



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département Maintenance En Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : électromécanique

Spécialité : maintenance en électromécanique

THEME

Etude et simulation d'un système hybride à base
d'énergies renouvelables (photovoltaïque –éolien)

Présenté et soutenu par :

YOUCEF IMEN

DEHANI AMINA

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
LALAOUI Med El Amine	MAA	IMSI	Président
BELKACEM Belkacem	MCB	IMSI	Encadreur
BOUHAMRI Nouredine	MCB	IMSI	Examinateur

2020-2021

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers parents qui peinent dans mon éducation, mes études et
mon bien-être.

À mes très chers frères, sœurs et toute ma famille.

Qu'ils trouvent tous ici ma pleine gratitude pour leur patience et leur
soutien qui ne m'a jamais manqué.

À mon encadreur.

À tous mes enseignants.

À tous mes amis, chacun en son nom.

À tous mes collègues de promotion et à tous ceux qui m'ont aidé, de près
ou de loin, à accomplir ce travail.

DEHANI Amina & YUCEF Imen

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années.

Nous tenons tout particulièrement à exprimer nos sincères remerciements à notre encadreur Docteur BELKACEM, pour avoir accepté de nous encadrer pour la réalisation de ce travail, surtout pour sa patience et les conseils avisés qu'il nous a prodigués, témoignant de ses qualités scientifiques et humaines.

Nos respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt porté à ce travail.

Enfin nous remercions toute personne ayant de près ou de loin contribué à l'élaboration de ce modeste travail et l'ensemble des enseignants qui ont assuré notre formation durant toutes ces années d'étude.

Tables des matieres

1 Introduction.....	3
2 Sources d'énergies renouvelables.....	3
2.1 Energie hydroélectrique.....	4
2.2 Energie solaire thermique.....	4
2.3 Energie géothermique	5
2.4 La Biomasse	6
2.5 Energie marine	7
2.6 Energie éolienne.....	8
2.7 Energie photovoltaïque	8
2.8 L'hydrogène	9
3 Définition d'un système hybride	9
4 Classification des systèmes hybrides.....	10
4.1 Architecture série	10
4.1.1 Configuration à bus à courant continu :.....	10
4.1.2 Configuration à bus à courant alternatif AC.....	11
4.1.3 Configuration mixte à bus à CC/CA :	11
4.2 Architecture parallèle	12
5 Principaux composants d'un système hybride.....	13
5.1 Le générateur photovoltaïque	13
5.2 Le générateur éolien :.....	13
5.3 Les batteries de stockage	14
5.4 Le système de supervision :	14
5.5 Les convertisseurs :	15
6 Conclusion :.....	16
1 Introduction.....	17
2 Présentation de l'énergie éolienne.....	17
2.1 Définition de l'énergie éolienne	17
2.2 Fonctionnement d'un système éolien	17
3 Principe de fonctionnement d'une éolienne	18

Tables des matieres

4 Différents types d'éoliennes	19
4.1 Eoliennes à axe vertical.....	19
4.1.1 <i>Éolienne de Savonius</i> :.....	20
4.1.2 <i>Éolienne de Darrieus</i> :.....	20
4.2 Eoliennes à axe horizontal	21
4.3 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.....	23
• La tour (ou le mât) :	23
• La nacelle :	23
• Le rotor :.....	24
• Le multiplicateur :.....	25
• La génératrice :.....	26
• Le système de contrôle-commande (Le contrôleur électronique) :.....	26
• La cabine de dispersion :.....	28
5 Contrôle des puissances d'une turbine éolienne.....	28
5.1 Action du vent sur une pale	29
5.2 Contrôle de la puissance captée par la turbine.....	31
5.2.1 <i>Contrôle par décrochage aérodynamique passif (« Passive Stall »)</i>	31
5.2.2 <i>Contrôle par décrochage aérodynamique actif (« active stall » ou « combi stall »)</i>	31
5.2.3 <i>Contrôle par angle de calage variable (Pitch control)</i>	32
6 Modes d'exploitation de l'énergie éolienne :	33
6.1 Les systèmes à vitesse fixe.....	33
6.2 Les systèmes à vitesse variable	34
6.2.1 <i>Système basé sur les machines asynchrones</i>	34
6.2.2 <i>Système basé sur les machines synchrones</i>	34
6.2.3 <i>Système basé sur les machines asynchrones doublement alimentées</i>	34
7 Modèle aérodynamique	36
7.1 Modèle du vent :	36
7.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	36
8 Stratégies de MPPT pour une éolienne.....	40
8.1 Maximisation de la puissance sans connaissance de la caractéristique Cp	41
8.2 Maximisation de la puissance avec la connaissance de la courbe Cp.....	42
8.2.1 <i>Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse</i>	42

Tables des matieres

8.2.2	<i>Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse</i>	44
9	Modélisation du système éolien	45
9.1	Modèle de la turbine :	46
9.2	Modèle du multiplicateur :	47
9.3	Equation dynamique de l'arbre de transmission :	47
10	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	48
10.1	Avantages :	48
10.2	Inconvénients :	49
11	Présentation de la Machine Synchrones à Aimants Permanents MSAP 50	
11.1	Généralités.....	50
11.2	Principe de fonctionnement des MSAP	51
11.3	Fonctionnement en mode générateur GSAP	52
12	Modélisation de la MSAP	54
12.1	Hypothèses simplificatrices.....	54
12.2	Modèle de la MSAP dans le repère triphasé abc	55
12.2.1	<i>Equations électriques</i>	55
12.2.2	<i>Equations magnétiques</i>	55
12.2.3	<i>Equations mécaniques</i>	56
12.3	Modèle de la MSAP dans le repère de Park (d, q).....	56
12.3.1	<i>Expressions des tensions</i>	58
12.3.2	<i>Expressions des flux</i>	59
12.4	Expressions de la puissance et du couple.....	59
13	Modèle généralisé de la MSAP en mode générateur PMSG	60
14	Conclusion	60
1	Introduction	65
2	État de l'art du système photovoltaïque	65
3	Notion d'effet photovoltaïque	66
4	Principe de la génération photovoltaïque	67

Tables des matieres

5 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	69
5.1 Présentation du modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque.....	69
5.2 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque.....	70
5.2.1 <i>Courant de court circuit</i>	70
5.2.2 <i>Tension à vide</i>	70
5.2.3 <i>Notion de Facteur de forme</i>	71
5.2.4 <i>Rendement</i>	71
6 Module photovoltaïque	71
6.1 Mise en série.....	71
6.2 Mise en parallèle.....	72
7 Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque	73
8 Système de conversion photovoltaïque	74
9 Conclusion :.....	75
1 Introduction.....	76
2 Simulation de la chaine globale :.....	76
2.1 Présentation de la chaine de conversion éolienne :	77
2.2 Présentation de la chaine de conversion photovoltaïque :.....	77
3 Simulation de la chaine globale	78
3.1 Simulation de la chaine de production éolienne	78
3.2 Simulation de la chaine de production photovoltaïque.....	79
4 Modèle du convertisseur de puissance.....	80
4.1 Modélisation du redresseur triphasé à diodes	80
4.2 Modélisation du filtre :.....	81
IV.4.3.....	82
4.2.1 <i>Présentation de l'onduleur à deux niveaux</i> :	82
4.2.2 <i>Description et fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux</i> :.....	82
5 Simulation de la chaine de stockage.....	86
6 Présentation du résultat final	87

Tables des matieres

7 Conclusion 88

Introduction générale

Introduction générale

Les systèmes de production d'énergie décentralisés basés sur les énergies renouvelables, sont utilisés pour remédier à la demande sans cesse croissante de la consommation mondiale et diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Par cause du comportement intermittent de la vitesse du vent et de l'irradiation solaire dans la nature, la production d'énergie à partir de certaines sources est incertaine du point de vue de l'exploitation de réseaux autonomes.

Le principal défi lié à l'utilisation de l'énergie éolienne et solaire comme source d'énergie réside dans le fait que l'énergie éolienne comme le solaire peut ne pas être disponible en cas de besoin d'électricité [1]. L'intégration du système de stockage d'énergie afin de réduire l'incertitude liée à la production solaire-éolienne améliorera la fiabilité et la sécurité de la production. Ces systèmes peuvent jouer un rôle essentiel dans la génération de l'énergie et ainsi lisser les variations de l'énergie produite sur un horizon temporel désiré.

La dynamique d'un système hybride solaire photovoltaïque PV-Eolien est fortement influencée par l'ensoleillement, le vent et le profil de charge considéré. La nature variable des sources d'énergie renouvelable, associée à des changements imprévisibles de la charge, nécessite la mise en œuvre simultanée de systèmes de stockages à haute puissance et à forte densité énergétique. Ce travail porte sur la modélisation, la simulation dynamique d'un système autonome solaire-éolien avec des batteries de stockage.

Dans un contexte socio-économique primordial, marqué par des interrogations sur les problèmes environnementaux grandissantes, les motivations sont orientées vers l'utilisation des énergies dites « vertes », pour l'efficacité énergétique et l'économie d'énergie.

Les systèmes solaire et/ou éolien sont largement utilisés dans les applications autonomes, cependant, le comportement intermittent de l'irradiation et du vent affecte sérieusement la stabilité de la production [2]. En effet, l'énergie photovoltaïque n'est pas disponible la nuit, par temps nuageux et par temps neigeux, lorsque de l'électricité est nécessaire, tout comme l'énergie éolienne, inexistante à l'absence du vent. L'extraction de la puissance maximale des sources de natures fluctuantes est un problème majeur. L'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPPM) ou en anglais «maximum power point tracking (MPPT) » est largement utilisé dans la littérature afin de remédier à ce problème [3].

Le présent travail se situe donc dans un souci d'exploitation du potentiel en énergie renouvelable d'un système hybride Solaire-Éolien avec récupération d'énergie. Nous avons pour tâche la modélisation et la simulation d'un système de stockage associé au dit système hybride pour l'exploitation efficace et simultanée de ces deux formes d'énergie.

Une recherche sur la faisabilité, l'intégration et le choix du système hybride a été élaborée premièrement. Ensuite un dimensionnement des différents sous-systèmes a été fait afin de concevoir une configuration optimale. Toutes les simulations ont été effectuées par le logiciel Matlab/Simulink nous permettant de prédire les comportements dynamiques de chaque sous-système hybride ; de la modélisation et la simulation des caractéristiques de base du générateur

PV, de l'éolien, des convertisseurs et des batteries-charge continue pour une charge isolée. Finalement la simulation du système hybride complet a aussi été faite. Les résultats de simulations valident les performances dynamiques du système élaboré, à alimenter la charge en absence de production ou à réagir instantanément pour satisfaire la demande grâce aussi aux différentes commandes utilisées. Les résultats ont été validés par comparaison à ceux rencontrés dans la littérature scientifique.

Chapitre 01 : Etat d'art sur les systèmes hybrides

1 Introduction

Un système d'énergie hybride est équivalent aux systèmes de production d'énergie tout en utilisant plusieurs types de ces sources qui peuvent être renouvelables ou conventionnelles. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, le photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peuvent constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels. Les systèmes d'énergies hybrides sont généralement autonomes car ils génèrent de l'énergie à de petites ou moyennes proportions ; ils sont le plus souvent utilisés dans les sites isolés où l'alimentation électrique conventionnelle est très coûteuse [1]. Dans ce chapitre, on expose un état d'art général sur les systèmes de production. On parlera de plusieurs types d'énergie.

2 Sources d'énergies renouvelables

Toutes les énergies abondantes et inépuisables, sont considérées comme énergies renouvelables. Elles sont issues directement ou indirectement du soleil, mais en quantité limitée, à un endroit et en un instant donné. La figure I.1 fournit une vue d'ensemble des principales ressources énergétiques sur terre qui peuvent être exploitées pour créer de manière viable de l'électricité.

Ces énergies n'exercent que peu d'impacts négatifs sur l'environnement. En particulier, leur exploitation ne donne pas lieu à des émissions de gaz à effet de serre ou à des déchets dangereux.

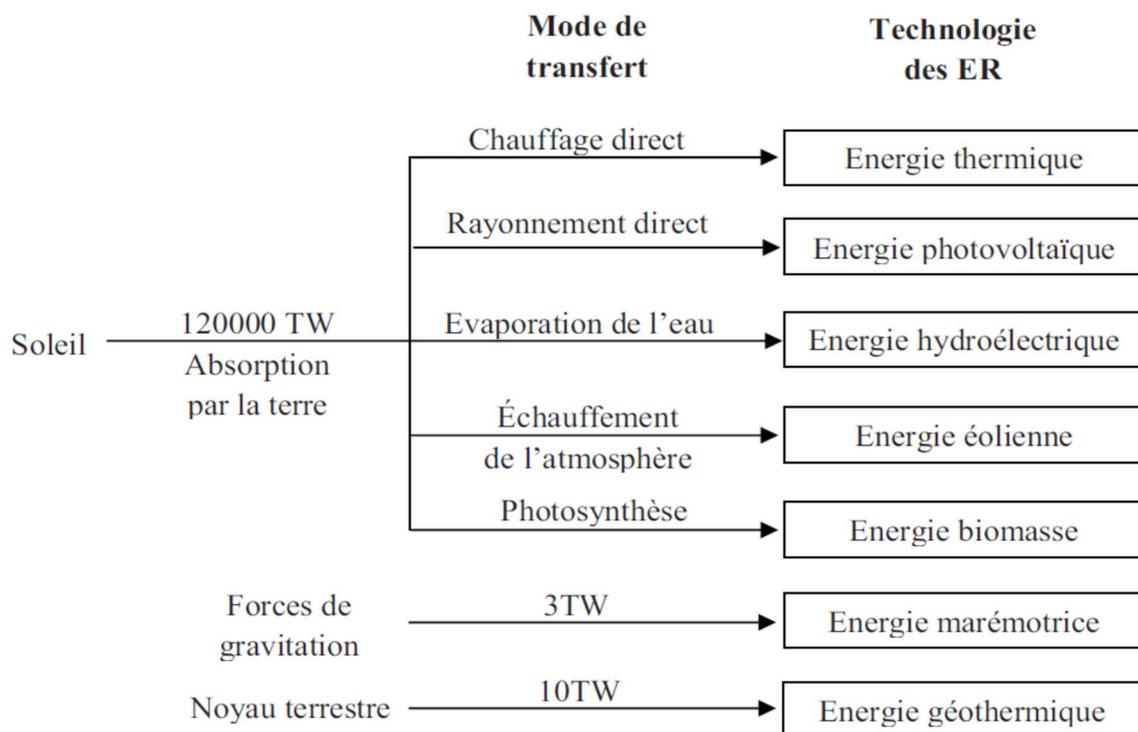


Figure I.1. Les parcours de conversion pour les énergies renouvelables [2].

2.1 Energie hydroélectrique

Rappelons d'abord que l'énergie hydraulique est de loin l'énergie renouvelable la plus mature et la plus développée. L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs turbines hydrauliques, couplées à des générateurs électriques. La puissance maximale dépend de la hauteur de chute, du débit d'eau et des caractéristiques mécaniques de la turbine.

Le principal avantage énergétique de cette énergie est qu'elle n'est pas intermittente [3]. La technologie nécessaire à son utilisation est maîtrisée, les coûts de maintenance sont raisonnables, les installations sont prévues pour fonctionner longtemps [4].

Cependant le coût de réalisation, le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations lourdes, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [5].

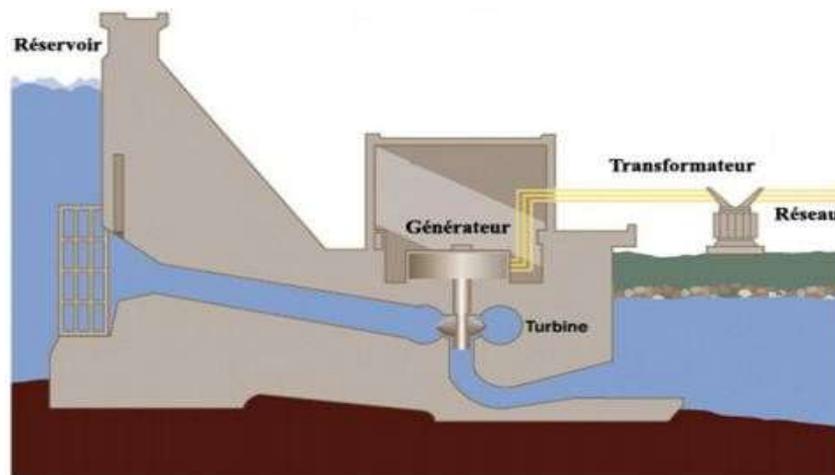


Figure I.2. Présentation d'une centrale hydroélectrique [4].

2.2 Energie solaire thermique

Les systèmes thermo-solaires consistent le plus souvent à focaliser les rayons solaires pour produire des températures élevées afin d'obtenir un bon rendement pour les machines thermiques (selon le principe de Carnot) [6]. Les deux types principaux de générateurs fournissant une forte puissance sont basés sur le rayonnement direct du soleil. La technologie thermo-solaire à rayonnement direct est donc utilisée sous les deux formes suivantes :

- Soit un parc solaire composé de réflecteurs paraboliques sous forme de portions de cylindre. Les rayons provoquent le chauffage de « tuyaux » parcourus par un fluide intermédiaire, de l'huile ou de l'eau sous pression. Ce fluide à haute température est envoyé vers un échangeur (une chaudière) où l'on obtient de la vapeur d'eau qui ira entraîner une turbine. La température de fonctionnement varie entre 350°C et 400°C, et on peut construire des centrales solaires de ce type atteignant des puissances de l'ordre de 80 MW. Pour améliorer le fonctionnement de la turbine et donc son rendement, la température de la vapeur peut être encore augmentée par un moyen de chauffage classique.

- Soit une tour solaire centrale, qui reçoit au sommet les rayons lumineux provenant d'un ensemble de miroirs (héliostats) qui suivent le soleil. Les héliostats réfléchissent et concentrent la lumière vers le haut de la tour, où l'énergie est absorbée par un fluide intermédiaire, qui peut être de l'eau, du sel fondu, ou tout liquide à haute température. Celle-ci peut atteindre 1000 °C.



Figure I.3. Energie solaire thermique [7].

Cette technologie possède de multiples avantages : l'installation est créée pour des zones désertiques donc dépourvues d'intérêts (pas de possibilité d'aménagement) mais riches en soleil. Le coût est moins cher par rapport à l'énergie photovoltaïque. La maintenance nécessaire est peu importante [7].

Mais l'énergie thermo- solaire possède quelques désavantages : l'espace demandé pour la construction est très important (plusieurs dizaines de km²) et doit être exposé suffisamment aux rayons du soleil toute l'année, avec une température ambiante supérieure à 25°C pour assurer un bon rendement [7].

2.3 Energie géothermique

Il existe dans la croûte terrestre un gradient de température qui est en moyenne de 3 °C par 100 mètres [8]. La géothermie vise à étudier et exploiter ce phénomène d'augmentation de la température en fonction de la profondeur. L'exploitation de cette ressource consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour la transformer en électricité à l'aide des turbines.

Pour capter l'énergie géothermique, un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe captive naturelle, de l'eau injectée dans une roche chaude imperméable ou dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure. Le principe d'utilisation de la géothermie pour générer l'électricité est présenté dans la figure I.4.

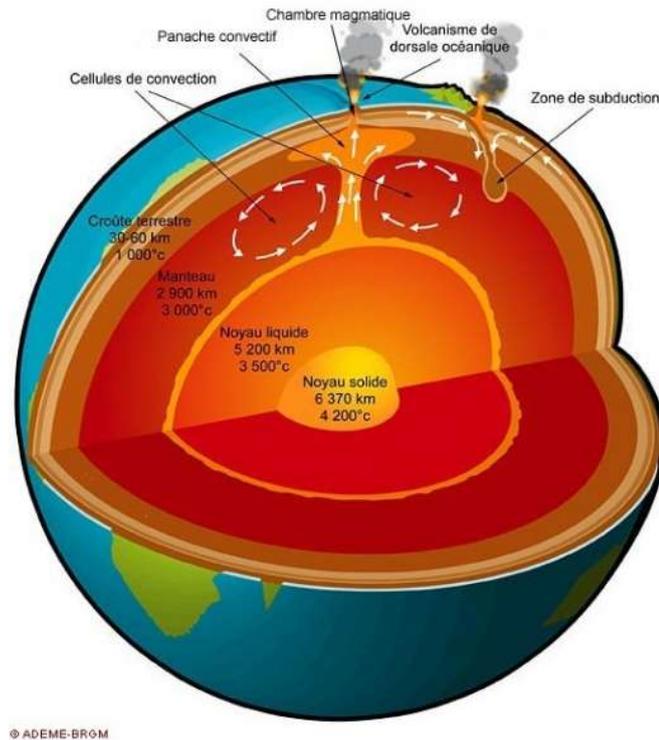


Figure I.4. Génération d'électricité par une source d'énergie géothermique [9].

2.4 La Biomasse

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, de la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux [10].

La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- Lors de la fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie,
- La biomasse elle-même peut être incinérée.

Dans tous les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites.

L'intérêt est que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère lors de l'incinération de la biomasse ou le méthane est compensé par celui absorbé par la repousse des plantes qui, entre autre, sont la source principale de biomasse. De cette manière, le bilan carbone peut être proche de zéro [11].

Le problème plus important est que la biomasse n'est pas inépuisable. Quand on l'exploite de manière naturelle elle est peu menacée mais lorsqu'il s'agit d'une biomasse cultivée (pour les biocarburants par exemple) ou en cas de surexploitation massive de la ressource (comme la déforestation), la production d'une telle énergie peut rapidement avoir de lourds impacts environnementaux [12].

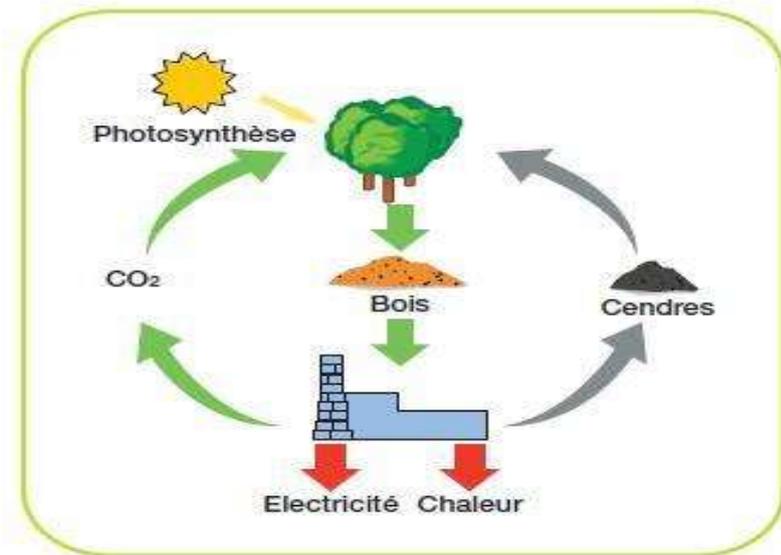


Figure I.5. Énergie de la Biomasse [12].

2.5 Énergie marine

L'énergie marine ou des mers est extraite du milieu marin. Il y a notamment l'énergie marémotrice issue du mouvement de l'eau créé par les marées, l'énergie des vagues utilise la puissance du mouvement des vagues, ou une autre technologie, utilisant les courants sous-marins.

Tout comme les autres sources d'énergie renouvelable, elle est non polluante lors de la production. On note également que l'énergie potentiellement disponible est énorme et que cette technologie a un bel avenir devant elle [13].

Mais cette énergie est très difficilement récupérable, et les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible [14].



Figure I.6. Énergie marine [12].

2.6 Énergie éolienne

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ensuite cette énergie est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine électrique. Les termes "parc éolien" ou "ferme éolienne" sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre « onshore » ou dans la mer « offshore ».

L'avantage principal de cette source est son coût d'installation qui est moins cher par rapport à d'autres énergies renouvelables. Néanmoins l'énergie éolienne est intermittente, et l'installation de parc éolien engendre des impacts paysagés et sonores [15].



Figure I.7. Énergie éolienne

2.7 Énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir de l'irradiation solaire. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire. Cette ressource a toutefois deux inconvénients, la production est invariablement liée aux conditions climatiques et un rendement relativement faible (typiquement entre 10 et 18 %) [16].



Figure I.8. Plaques photovoltaïques

2.8 L'hydrogène

L'hydrogène est une énergie très abondante et propre qui n'est ni polluante ni toxique, et il est plus actif que le pétrole et le gaz de plus, il a des avantages qui le favorisent par rapport aux autres énergies [17] :

- On peut produire de l'hydrogène à partir d'énergie propre comme l'eau... etc.
- Il peut également être utilisé comme carburant pour faire fonctionner un moteur à combustion pour générer de l'électricité, et il peut également être utilisé directement par un réacteur électrochimique dans des piles à combustible pour produire de l'électricité. Pour les puissances élevées, la conversion la plus efficace de l'hydrogène en électricité peut être atteinte en cogénération.



Figure I.8. Énergie de l'hydrogène [18].

3 Définition d'un système hybride

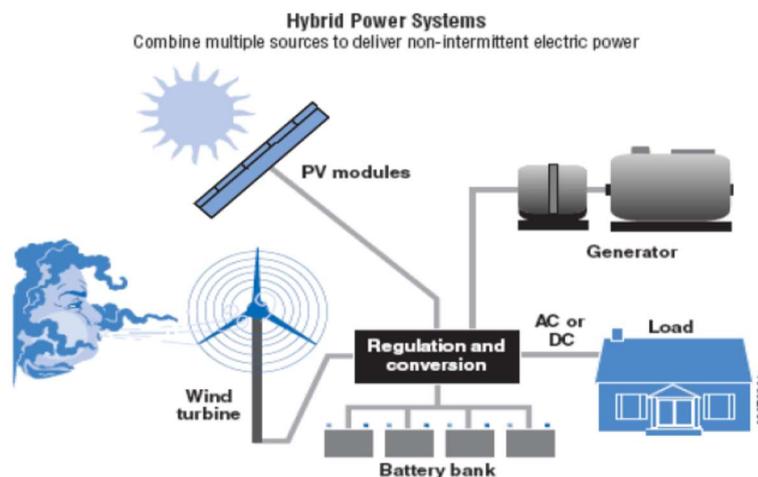


Figure I.9. Présentation d'un système hybride [21].

Un système de production électrique, qui associe plus d'une source d'énergie de nature différente, est appelé **un système hybride**. Ces systèmes rassemblent au moins une source d'énergie renouvelable ainsi qu'une ou plusieurs sources d'énergie conventionnelles [19], [20]. Le but majeur de ces systèmes est de délivrer une énergie continue, ceci à cause de l'intermittence de plusieurs sources. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement utilisés dans les régions isolées [8]; toutefois ils peuvent être ajoutés aux systèmes interconnectés. Le but d'un système hybride est de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie présentes ; pour satisfaire à une demande qui est prédite avant la conception de ces systèmes.

4 Classification des systèmes hybrides

Les systèmes hybrides peuvent être classés en deux groupes :

- Les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, ils sont connectés au réseau.
- Les systèmes hybrides fonctionnant en régime isolé ou en mode autonome. Ils alimentent des clients situés dans des régions isolées ou sites éloignés du réseau électrique.

4.1 Architecture série

On rencontre trois types d'architectures, Il existe différentes structures pour un système hybride, nous considérons dans ce travail un système composé d'un générateur photovoltaïque, d'une éolienne et de batteries de stockage [21] :

4.1.1 Configuration à bus à courant continu :

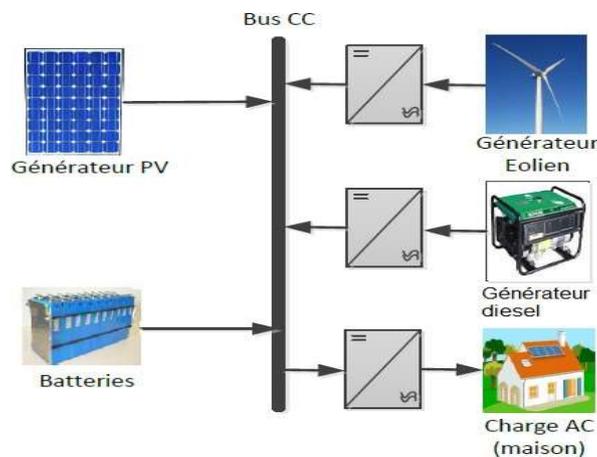


Figure I.10. Configuration d'un système hybride à bus CC [23].

Dans le cas d'une architecture série, toutes les sources sont connectées à un même bus à courant continu (CC) comme l'indique la figure (I.6). Pour cette architecture, les tensions délivrées par

les modules à courant alternatif (générateur éolien et groupe Diesel) sont redressées en tension continue grâce à des convertisseurs AC/DC. La charge est alors alimentée par un onduleur (convertisseur DC/AC).

4.1.2 Configuration à bus à courant alternatif AC

Cette structure contient un vecteur AC afin que toutes les unités du système hybride y soient connectées, et c'est un bon choix en raison de son abondance de tension alternative continue et continue, en plus de l'émergence de transformateurs plus efficaces. Dès qu'il y a une coupure de courant dans le bus, il démarre automatiquement le groupe électrogène, mais son seul point négatif est la difficulté d'imposer la fréquence et l'amplitude de la tension du bus [22].

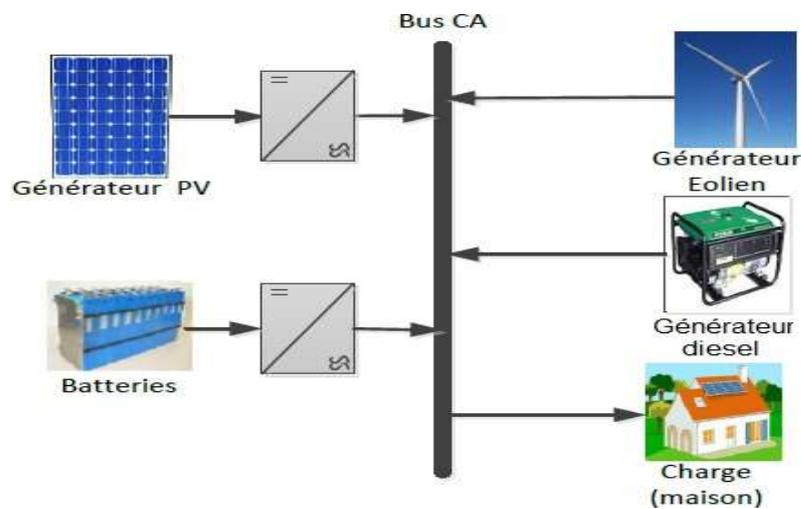


Figure I.11. Configuration d'un système hybride à bus CA.

4.1.3 Configuration mixte à bus à CC/CA :

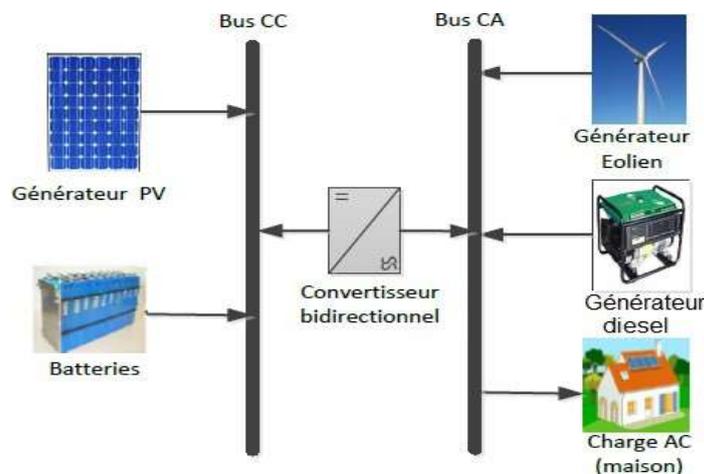


Figure I.11: Configuration d'un système hybride à connexion parallèle.

Un bus DC connectant la source d'alimentation DC (batterie et panneaux photovoltaïques) et le bus AC connectant l'éolienne, le générateur diesel et la charge (maison). Les deux bus sont connectés à l'aide d'adaptateurs bidirectionnels [24]. Lorsque le générateur diesel répond à la demande de l'ensemble de la charge et participe à la charge de la batterie, l'onduleur bidirectionnel fonctionne en mode redresseur, ou en mode onduleur lorsque la charge est alimentée par le panneau et/ou la batterie. De cette façon, la charge peut être exploitée par les deux bus en même temps.

4.2 Architecture parallèle

La configuration parallèle utilise deux bus : un bus CC où sont connectées les sources à courant continu (batterie et panneaux PV), et un bus CA sur lequel sont connectés l'éolienne, le groupe diesel et la charge (maison). Les deux bus sont reliés à l'aide d'un convertisseur bidirectionnel. Le convertisseur bidirectionnel travaille soit en mode redresseur lorsque le générateur diesel couvre complètement la demande de la charge et participe à charger la batterie, soit en mode onduleur lorsque la charge est alimentée par les panneaux et/ou les batteries. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément [25]. L'architecture d'un tel système est représentée par la figure (I.12).

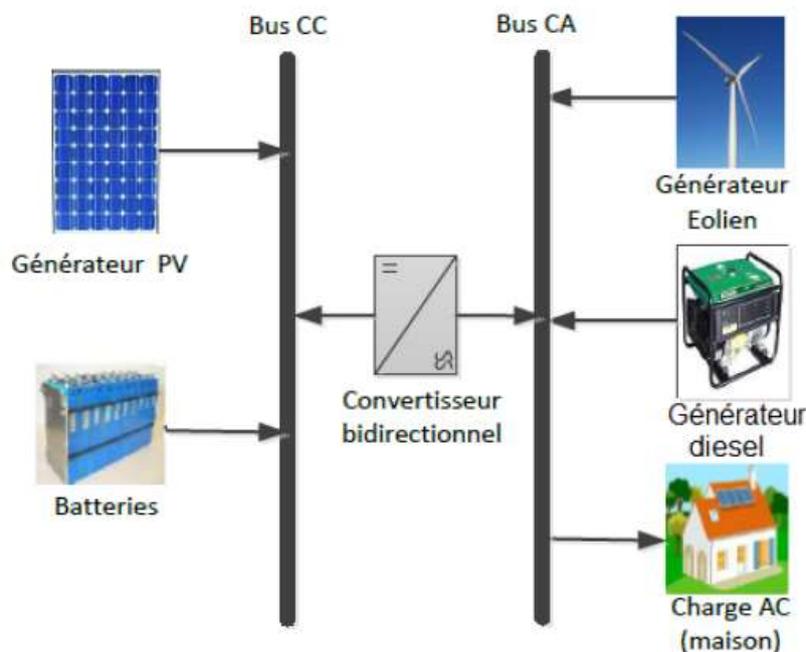


Figure I.12. Configuration d'un système hybride à connexion parallèle.

5 Principaux composants d'un système hybride

L'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne ainsi que l'énergie hydraulique sont des énergies renouvelables souvent utilisées dans les systèmes hybrides. Ces systèmes peuvent inclure d'autres composants comme les convertisseurs, les batteries pour le stockage de l'énergie, les charges principales et les charges de délestage. La majorité de ces éléments fonctionnent en parallèle pour avoir un système équilibré qui permet d'atteindre un but précis.

5.1 Le générateur photovoltaïque

Une cellule galvanique constituée d'un matériau semi-conducteur peut convertir l'énergie photonique reçue à sa surface en une différence de potentiel, qui est créée en délocalisant les électrons dans le matériau. Le spin de l'électron dans le circuit à l'extérieur de la cellule photovoltaïque lui permet de jouer le rôle de générateur. Les cellules photovoltaïques sont fusionnées pour former des modules photovoltaïques, qui peuvent produire une certaine quantité d'énergie dans différentes conditions d'éclairage et de température. Ensuite, les modules PV peuvent être assemblés séquentiellement pour former un générateur PV. Elle est mesurée en fonction de la puissance requise pour une installation particulière.

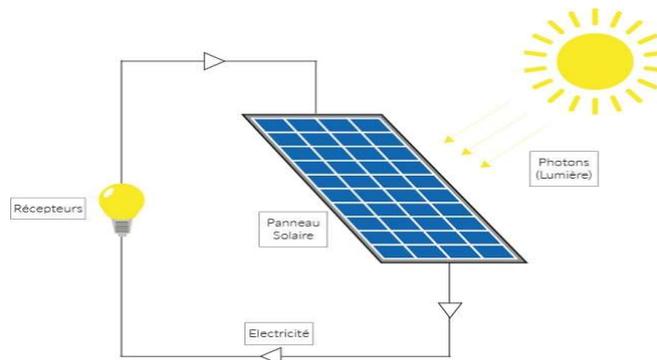


Figure I.13. Principe du fonctionnement d'un Générateur Photovoltaïque [26].

5.2 Le générateur éolien :

Un générateur d'air ou une éolienne, est un appareil qui capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en énergie électrique. Le vent fait tourner les pales rotatives d'une éolienne connectée à un générateur, pouvant ainsi produire de l'électricité. Ils sont soit stockés dans des batteries, soit envoyés directement sur le réseau.

Différentes topologies de connexion d'éolienne aux systèmes hybrides isolés sont proposées dans la littérature. Le choix du convertisseur se fait selon l'architecture du système hybride et le bus sur lequel l'éolienne est connectée, mais aussi selon les objectifs que l'on souhaite réaliser. Néanmoins, deux configurations figurent parmi les plus utilisées dans les systèmes hybrides isolés. L'architecture de ces deux topologies est illustrée par la figure (I.14).

Ces architectures permettent d'adapter la forme de l'onde produite par la génératrice éolienne au bus auquel elle est connectée. Ici en l'occurrence pour une connexion au bus CC deux solutions sont possibles : l'association d'un redresseur à diodes et un hacheur (architecture (a)) permettant d'avoir une seule variable de commande à gérer [27], ou le redresseur MLI permettant d'utiliser un seul convertisseur [28].

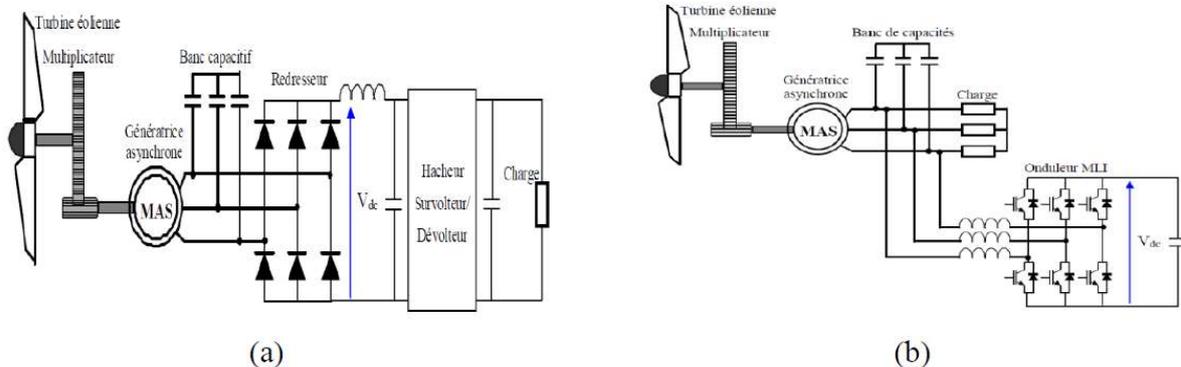


Figure I.14. Convertisseurs utilisés en étage d'adaptation : (a) Redresseur à diodes + hacheur, (b) Redresseur MLI.

5.3 Les batteries de stockage

Le dispositif de stockage est un élément essentiel dans un système hybride, car il stocke l'énergie excédentaire produite par les sources (énergie électro-photovoltaïque, énergie éolienne) pour être exploitée à un autre moment lorsque la production d'énergie est faible, car il joue un rôle important dans la continuité de la présence des forces à tout instant, avant tout. Cela nécessite que l'énergie produite par les sources soit compatible avec le groupe d'énergie consommée par l'utilisateur et absorbée par le système lui-même [29].

Comme il ne garantit pas une production d'énergie importante à tout moment, il se peut qu'un faible pourcentage dans certains cas de l'énergie produite ne corresponde pas à la consommation. La seule solution à ce problème est d'utiliser le système de stockage.

5.4 Le système de supervision :

Le contrôle du système hybride nécessite l'application d'un système de contrôle. Le système de supervision est une entité intelligente qui lui permet de gérer efficacement l'interaction entre les différents éléments du système hybride. Il représente le cerveau d'un système d'alimentation hybride, qui identifie l'entité à alimenter (générateur PV, énergie éolienne, charge ou décharge de batterie, générateur diesel) en fonction de la demande de charge et de la disponibilité d'énergie renouvelable. Plusieurs stratégies de gestion et de supervision ont été proposées dans la littérature pour traiter les différents problèmes des différents systèmes multi-sources.

Dans La référence [30], le système considéré est un système multi-sources composé de panneaux photovoltaïques, de packs de batteries et de piles à combustible, montés sur un bus DC via un onduleur approprié. Le principe de fonctionnement du système est de charger la batterie lorsque la puissance du panneau photovoltaïque est supérieure à la consommation de la charge. Au contraire, lorsque la consommation est supérieure à la sortie, la batterie se décharge pour pallier le manque de puissance.

Dans le cadre d'applications isolées, un autre algorithme de gestion et de supervision d'un système hybride éolien/PV a été proposé. Dans ce travail, l'auteur a identifié trois principaux modes de fonctionnement, qui permettent d'inclure toutes les situations et scénarios auxquels un système hybride peut être confronté. Le premier mode consiste à utiliser une seule source pour satisfaire la demande de charge, dans ce cas la source éolienne. Le deuxième mode est l'utilisation d'énergie optique en plus du premier mode. Ce dernier mode maximise l'utilisation de deux sources d'alimentation et l'utilisation de batteries lorsque cela est nécessaire. Par conséquent, l'auteur n'a pas fourni de source d'urgence pour compenser une éventuelle défaillance de la source ou des conditions météorologiques extrêmement défavorables [31].

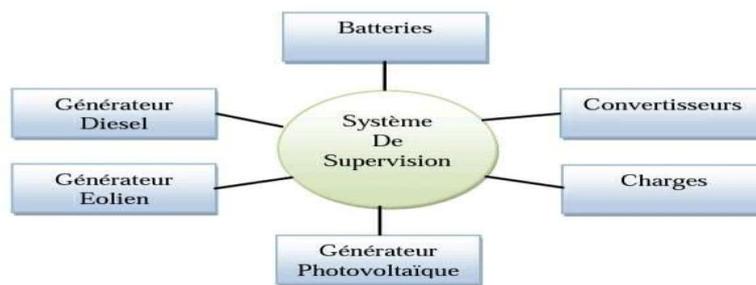


Figure I.15. Système de supervision.

5.5 Les convertisseurs :

Les onduleurs convertissent l'électricité entre le courant continu et le courant alternatif et chargent les batteries de stockage. Ils sont en premier lieu avant les batteries. Il existe 3 types d'onduleurs dans les systèmes hybrides : les transformateurs, les hélicoptères et les redresseurs. Les transformateurs convertissent le courant continu en courant alternatif pour faire fonctionner des appareils dignes du courant alternatif, et les hélicoptères convertissent le courant continu en courant continu pour adapter la tension entre deux sources [32].



Figure I.16. Convertisseur 150 W.

Les redresseurs convertissent le courant alternatif en courant continu et sont utilisés pour charger les batteries la plupart du temps à partir d'un courant alternatif source, qui sont des appareils peu coûteux et efficaces.

6 Conclusion :

Dans ce premier chapitre on a donné une présentation détaillée des différentes sources d'énergies renouvelables existantes. On a ensuite étalé la définition et les différentes structures des systèmes hybrides de génération de l'énergie électrique, où nous avons constaté que l'avantage principal de l'utilisation des sources renouvelables dans la construction d'un système hybride peut aider à résoudre plusieurs problèmes qui apparaissent au niveau de l'impact de l'utilisation des ressources classiques sur l'environnement, en particulier l'émission de gaz à effet de serre.

Chapitre II

Chaîne de production éolienne

1 Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, l'être humain étant de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Cette dernière sert à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [33] ; là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, on utilise des machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [34].

Dans ce chapitre, on présente des notions théoriques sur l'énergie éolienne, des différents types d'aérogénérateurs (verticaux, horizontaux, à vitesse fixe et vitesse variable ...etc.), puis on passe à un état De l'art sur les dispositifs électrotechniques permettant de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. On termine notre chapitre par la présentation de la génératrice électrique, il s'agira d'un générateur synchrone à aimants permanents (PMSG ou GSAP).

2 Présentation de l'énergie éolienne

2.1 Définition de l'énergie éolienne

Le principe de production de l'énergie éolienne est assez simple. L'énergie cinétique générée par la force du vent est transmise à une turbine (aérogénérateur) ; cette force fait tourner les pales d'un rotor ; L'énergie mécanique produite est ainsi transformée en énergie électrique.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée) [35]. Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable aux autres énergies sans pour autant prétendre les remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes Offshore) où la présence du vent est plus régulière.

2.2 Fonctionnement d'un système éolien

Un aérogénérateur a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, ce système est connu sous l'appellation anglaise Wind Energy Conversion System

(WECS), (Figure II.1). Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement. Une éolienne doit comporter :

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

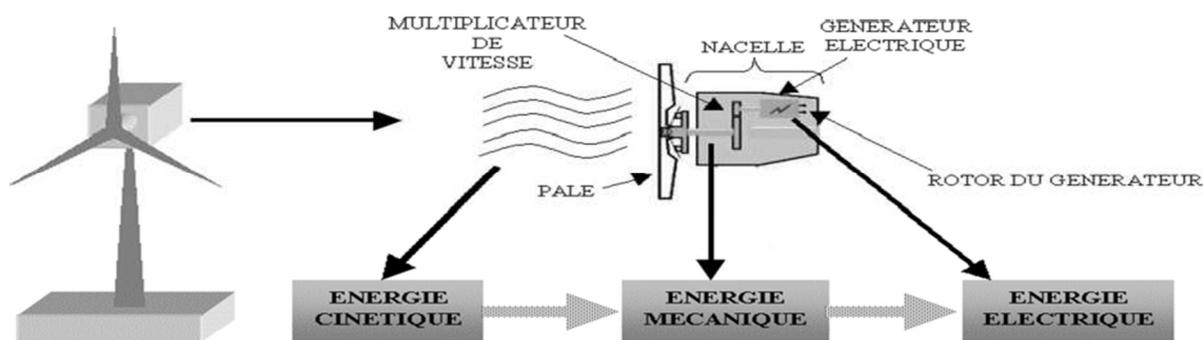


Figure II.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent [36].

3 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est conçue pour transformer l'énergie du vent en une énergie électrique. Plusieurs étapes sont nécessaires pour cette transformation [37] :

- Les pales sont fixées sur un moyeu, portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical, elles fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion : la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique fera tourner le rotor.
- La vitesse de rotation des pales est relativement lente (5 à 15 tr/min), d'autant plus lente que l'éolienne est grande. Pour pouvoir produire de l'électricité, les générateurs ont besoin d'une vitesse (de 1000 à environ 3000 tr/min). Ce problème est réglé par l'installation d'un multiplicateur pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par. Quelques modèles d'éoliennes n'ont pas besoin du multiplicateur, elles sont équipées de machines synchrones (génératrices annulaires).
- Le rotor d'un générateur reçoit l'énergie mécanique transmise par le multiplicateur, une énergie électrique est par conséquent produite. Dans les grandes éoliennes, la tension générée est d'environ 690 V.
- L'ensemble est fixé sur une nacelle. Un système d'orientation permet de guider la nacelle pour que les pâles soient toujours face au vent.

- L'électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis grâce à un transformateur sa tension est élevée à 20000 V. L'électricité est alors acheminée à travers un câble souterrain jusqu'au poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique.

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

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

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

Une éolienne est équipée d'un système de freinage afin d'assurer l'arrêt rapide de la machine et son immobilisation lors de la maintenance [38].

4 Différents types d'éoliennes

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

4.1 Eoliennes à axe vertical

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

4.1.1 Éolienne de Savonius :

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

Les avantages de cette éolienne se résument sur [39] :

- La possibilité d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, ils seront donc facilement accessibles,
- Il est possible de l'installer sur une toiture.
- Contrairement au système Darrieus, l'éolienne Savonius peut fonctionner même avec un vent faible, quelle que soit sa direction (Figure II.2) [39].

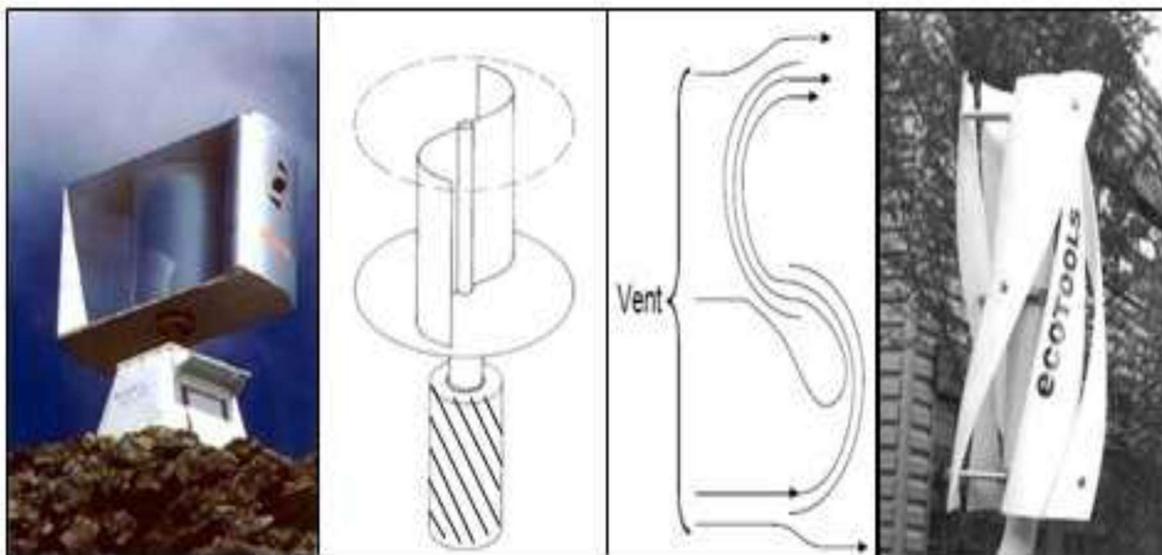


Figure I.3 : Éolienne de Savonius.

4.1.2 Éolienne de Darrieus :

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

vérification et l'entretien de celui-ci est à portée. La présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité [40].

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

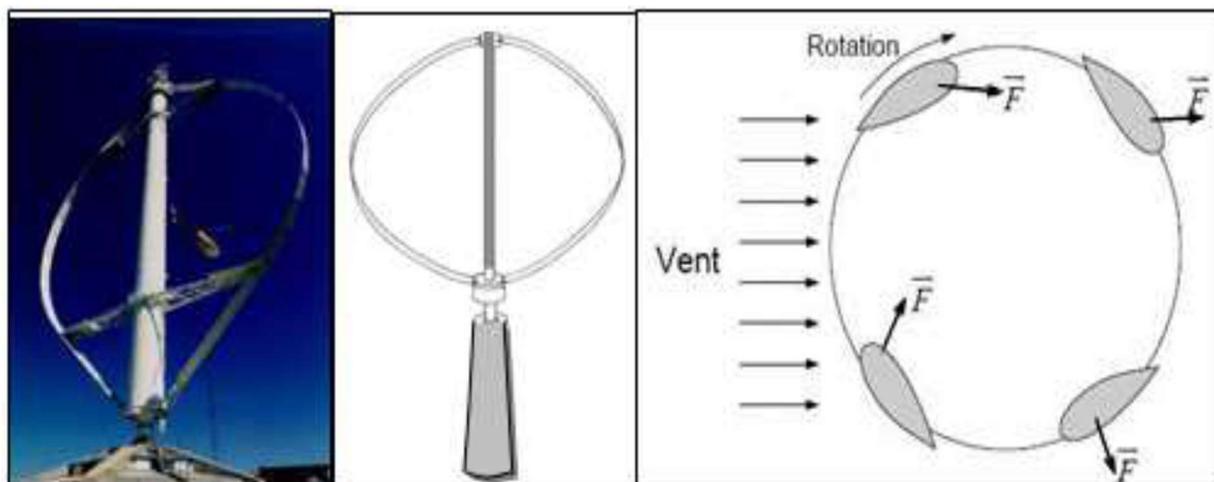


Figure I.4 : Éolienne de Darrieus [3].

4.2 Éoliennes à axe horizontal

Les aérogénérateurs à axe horizontal ont été inspirés des moulins à vent. Cette technologie ancestrale est devenue largement dominante de nos jours, car la plupart des éoliennes commerciales et industrielles installées sont à axe horizontal [41]. Leur principe de fonctionnement est similaire à celui des turbines hydrauliques : la puissance mécanique du vent fait tourner des pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion ; ces pales sont couplées à un rotor, ce qui va générer un couple moteur entraînant sa rotation.



Figure I.5 : Éoliennes à axe horizontal

Une éolienne à axe horizontal est souvent constituée de trois pales tournantes, mais on trouve également des systèmes constitués d'une, de deux ou d'une multitude de pales ; ces dernières sont bien adaptées aux vents de faible vitesse, mais ils sont toutefois fragiles en présence de fortes intempéries, ceux constitués de deux pales doivent de tourner plus rapidement pour produire une même quantité d'énergie. Les éoliennes tripales sont de loin les plus utilisées ; en effet le vent en haut d'une éolienne souffle plus fort qu'en bas puisque la vitesse du vent augmente avec l'altitude. Dans le cas où le nombre de pales est de deux, la variation de la force sur le moyeu est alors importante car lorsqu'une pale est au plus haut la quantité de vent présente est plus grande, l'autre pale étant au plus bas le vent s'affaiblit. L'utilisation de trois pales permet une compensation de ces différences, et une grande stabilité car la charge aérodynamique est relativement uniforme et elles présentent le coefficient de puissance le plus élevé actuellement. Suivant leur position en fonction du vent et leur site d'implantation, on distingue :

- En amont (UP-WIND) : le rotor est face au vent sans la présence d'obstacles, toutefois un système d'orientation de la nacelle face au vent sera plus que nécessaire.
- En aval (DOWN-WIND) : pour ces dispositifs l'éolienne est positionnée automatiquement face au vent, ceci permet d'éviter le système mécanique d'orientation, notamment pour les fortes puissances ; mais la répartition de charge sur la pale sera différente, pour cette raison l'éolienne en amont est largement prédominante.
- Eolienne terrestre dite **Onshore** installée sur terre.
- Eolienne marine dite **Offshore** installée en mer.

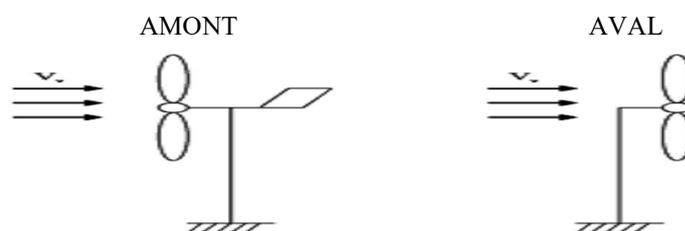


Figure II.5. Type de montage de la voilure



Ferme Onshore



Parc Offshore

Figure II.6. Exemples d'éoliennes [43]

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

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 à 45 m	40 à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

Tableau II.1 : Classification des turbines [43]

4.3 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

Tous les éléments constituant Une éolienne sont représentés sur la figure II.7 [44]. On peut classer une éolienne en plusieurs éléments principaux :

- **La tour (ou le mât) :**

La tour sert de support à la nacelle et au rotor, elle permet à l'éolienne d'avoir une hauteur où la vitesse moyenne du vent est plus élevée et plus constante qu'au sol. Elle peut être tubulaire (tube en béton ou en acier) ou en treillis (voir Fig. II.8). La première structure offre plusieurs avantages : les oiseaux la voient de loin et la définissent comme quelque chose à éviter ; ils ne peuvent pas y faire de nid. La nuisance sonore est presque éliminée pour une tour en tubulaire.

- **La nacelle:**

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

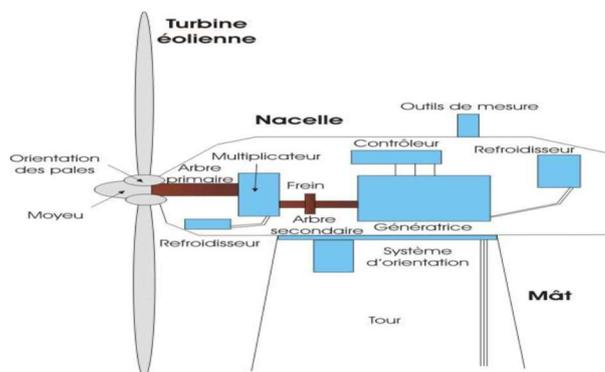


Figure II.7. Différentes parties d'une éolienne [44]



a) Tour tubulaire

b) Tour en treillis

Figure II.8. Tour d'un aérogénérateur

- **Le rotor:**

Le rotor est composé des pales et du moyeu. Cet ensemble assure la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui sera transmise au reste de l'éolienne via l'arbre lent. Le moyeu est la pièce qui reçoit les pales. Il est souvent protégé par une coque en polyester en forme d'obus qui lui donne une forme aérodynamique. Les pales sont montées sur l'axe du moyeu et servent à capter la puissance du vent. Leur profil ressemble à celui d'une aile d'avion. En général sur les éoliennes modernes le rotor tripale (concept danois) est de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [45].

**Figure II.9.** Constituants principaux d'une nacelle [46]

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

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

- **Le multiplicateur :**

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

Il existe plusieurs types de multiplicateurs pouvant être utilisés :



a) Multiplicateur



b) Multiplicateur



c) Vérification du frein à disque



d) Remplacement de la boîte de vitesse

Figure II.10. Vues d'un multiplicateur [47].

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

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

- **La génératrice :**

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

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

- **Le système de contrôle-commande (Le contrôleur électronique) :**

Le contrôleur électronique est considéré comme le cerveau de l'éolienne, il gère tous les paramètres (de 100 à 500) ; un ordinateur surveille en permanence l'état de l'éolienne et enregistre chaque changement. Si un défaut surgit, le système stoppe immédiatement l'éolienne, un signal de défaut est transmis à l'opérateur. Le contrôleur électronique est aussi chargé de gérer [50]:

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

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



Figure II.11. Moteurs d'orientation d'une nacelle [48].



Figure II.12. Cabine de dispersion située au pied de la tour [49].

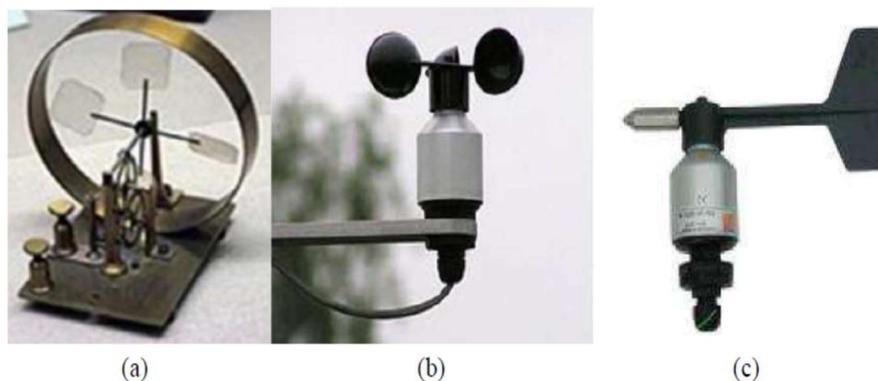


Figure II.13. Capteurs pour la mesure de la vitesse du vent [48] : (a) Anémomètre à rotation, (b) Anémomètre à pression, (c) Girouette.

- **La cabine de dispersion :**

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

5 Contrôle des puissances d'une turbine éolienne

Une éolienne industrielle se doit d'être protégée contre les vents forts afin de délimiter la puissance fournie, et de ne pas dépasser une puissance nominale P_n . Au-delà d'une vitesse de vent nominale v_n , les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale v_m au risque d'endommager la turbine. Quatre zones de fonctionnement sont donc à définir [51] :

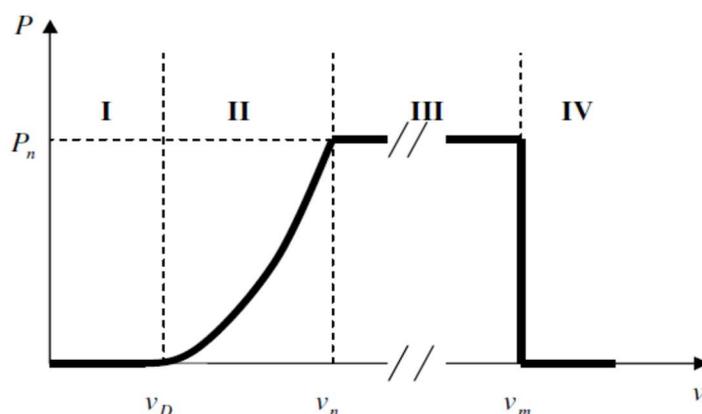


Figure II.14. Caractéristique puissance/vitesse de vent d'une éolienne classique [51]

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

5.1 Action du vent sur une pale

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface des pales (Figure II.15) [52].

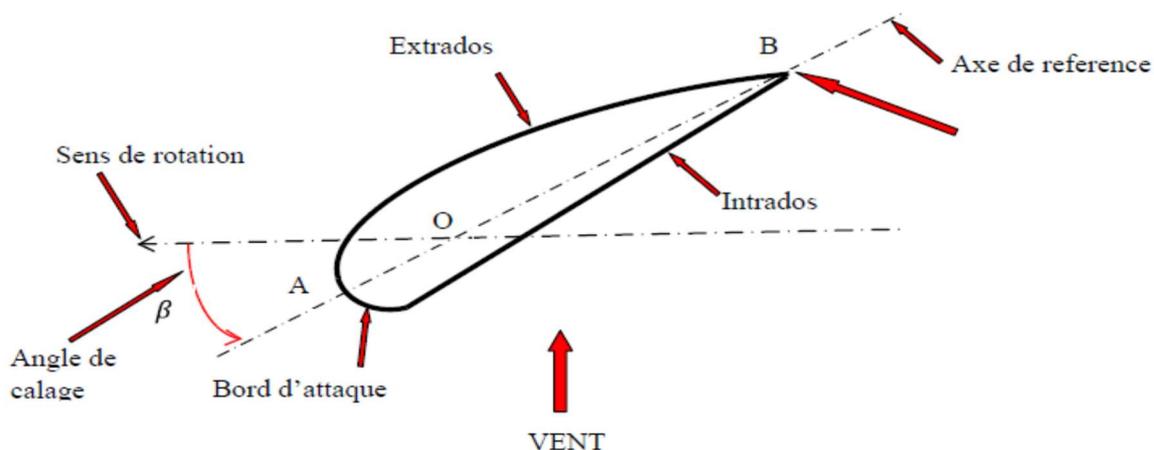


Figure II.15. Eléments caractéristiques d'une pale

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

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

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis [42] .

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

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

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

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

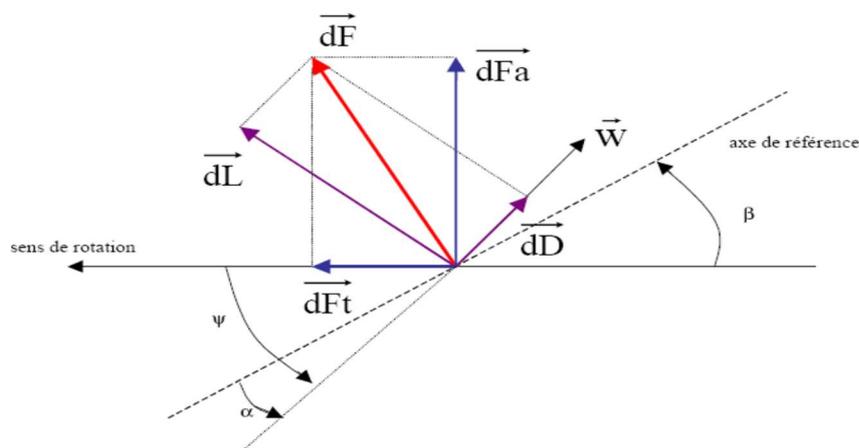


Figure II.16. Forces appliquées sur un tronçon de pale [42]

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

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

On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

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

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

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

C'est le couple résultant des forces tangentielles qui va provoquer la rotation de la turbine. Les modules des forces dL et dD sont données par :

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

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

Les coefficients C_L et C_D dépendent fortement de l'angle d'incidence α . Pour des angles faibles, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. La dépression qui en résulte à l'extrados crée la portance ; c'est cette force qui

soulève un avion et qui lui permet de voler, elle « aspire » la pale vers l'avant. Si α augmente, la portance augmentera jusqu'au point où l'écoulement deviendra turbulent. Du coup, la portance résultant de la dépression sur l'extrados disparaît. Ce phénomène s'appelle le décrochage aérodynamique. Cependant, les concepteurs de pales ne se préoccupent pas uniquement de la portance et du décrochage. Ils prêtent également beaucoup d'attention à la résistance de l'air, appelée aussi dans le langage technique de l'aérodynamique, la traînée. La traînée augmente en général si la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente. Ce phénomène apparaîtra ici pour des angles d'incidence importants.

5.2 Contrôle de la puissance captée par la turbine

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

Trois méthodes de contrôle des pales sont décrites ci-dessous. Elles servent principalement à limiter la puissance captée au moment où les vents sont très forts [53].

5.2.1 Contrôle par décrochage aérodynamique passif (« Passive Stall »)

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

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

- La puissance captée par la turbine est seulement fonction de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation. Il n'y a donc aucune possibilité d'adaptation.
- Nécessité de freins dimensionnés pour absorber l'énergie cinétique de la turbine ainsi que l'énergie captée pendant le freinage, même en cas de problème sur la transmission, ce qui suppose un système de freinage sur l'arbre de la turbine lui-même (couple de freinage très élevé) [53].

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

L'angle α peut être augmenté (ou diminué) légèrement par diminution (ou augmentation) de l'angle de calage β de quelques degrés (3 à 5° généralement). Le décrochage peut être légèrement avancé (ou retardé). Le couple est maintenu pratiquement constant jusqu'au

décrochage total où il chute rapidement. La puissance peut donc être limitée à sa valeur nominale.

Parmi les avantages de ce système :

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

Comme inconvénients, on peut citer :

- L'énergie nécessaire aux actionneurs doit être transmise au moyeu de la turbine.
- Si les actionneurs sont électriques, cela nécessite des contacts glissants (bagues/charbons) sujets à l'usure et nécessitant un entretien [53].

5.2.3 Contrôle par angle de calage variable (Pitch control)

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

En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine, et plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses, puis, pour les fortes vitesses de vent, s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance. Elles atteignent la position "en drapeau" à la vitesse maximale.

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

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

Ce système présente néanmoins des inconvénients :

- Les actionneurs nécessaires sont de puissance supérieure à celle du cas précédent.
- L'énergie nécessaire aux actionneurs doit être transmise au moyeu de la turbine. Si les actionneurs sont électriques, cela nécessite également des contacts glissants bagues/charbons sujets à l'usure et nécessitant un entretien [52].

6 Modes d'exploitation de l'énergie éolienne :

6.1 Les systèmes à vitesse fixe

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

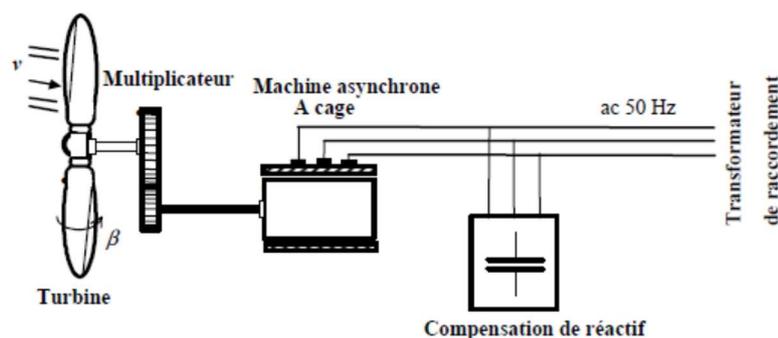


Figure II 17 Éolienne à vitesse fixe [54]

aérodynamiques et mécaniques. Le temps de réponse de certaines des parties de ces turbines éoliennes se situe dans la gamme de la dizaine de millisecondes [54]. On pourra en conséquence observer une sérieuse variation de la puissance électrique générée, en présence de rafales de vent. Les possibilités de réglages de la puissance générée par ce type d'éoliennes resteront toutefois quasiment impossibles.

Pour pallier au problème de vents violents, certaines modèles sont équipées d'un système à décrochage aérodynamique des pales dit « Stall control ». L'augmentation de la vitesse du vent s'accompagne automatiquement d'une diminution de l'angle de calage afin de permettre le décrochage aérodynamique de la turbine aux vitesses du vent plus grandes que la vitesse nominale. La structure de ces éoliennes demeure ainsi plus simple, et présente des inconvénients tels que : [54].

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

6.2 Les systèmes à vitesse variable

6.2.1 Système basé sur les machines asynchrones

Il existe plusieurs variantes d'éoliennes à vitesse variable, La configuration de la figure (Fig. II.18.a) est basée sur une machine asynchrone à cage pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La machine est couplée à la turbine via un multiplicateur, sa vitesse de rotation est maintenue constante grâce au système mécanique d'orientation des pales.

6.2.2 Système basé sur les machines synchrones

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

- **Couplage direct** (Fig. II.18.b)

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

- **Couplage via un multiplicateur** (Fig. II.18.c).

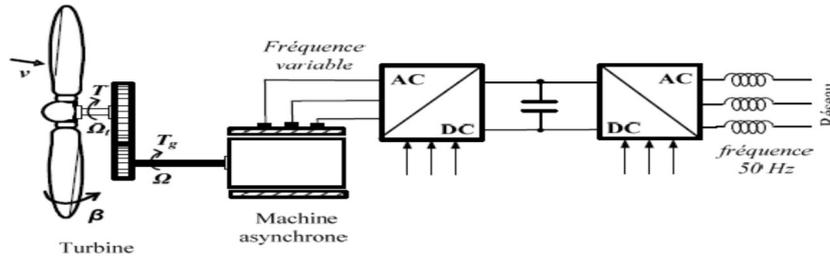
On trouve également chez certains constructeurs des machines synchrones « rapides » associées à un multiplicateur de vitesse, ces machines fonctionnent à vitesse variable. Elles débitent généralement sur un redresseur à diodes, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau auquel elles sont connectées comme le montre la Figure II.18.c.

6.2.3 Système basé sur les machines asynchrones doublement alimentées

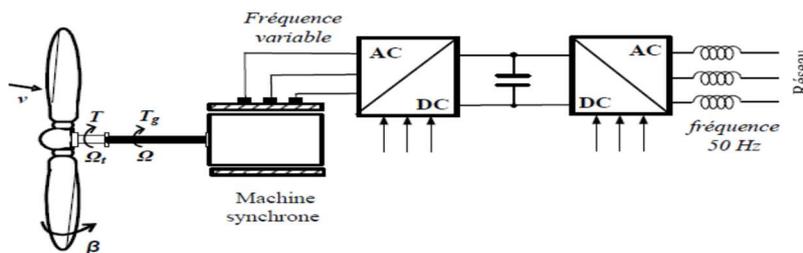
Une des configurations qui se développe dans le marché des turbines éoliennes est sans doute machine asynchrone doublement alimentée, utilisée en génératrice (GADA). Le stator est relié directement au réseau, tandis ce que le rotor est connecté via un convertisseur de tension en « back-to-back », utilisé comme variateur de fréquence. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor (Figure II.18.d).

Les avantages de cette configuration sont :

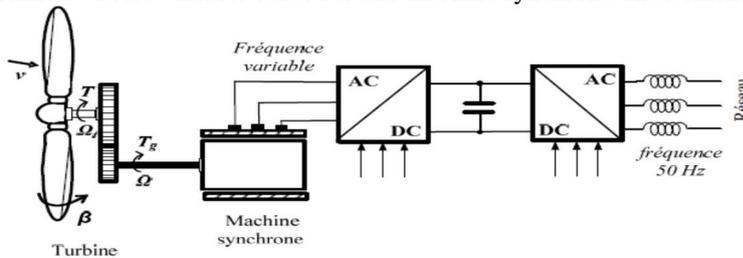
- Aptitude de réguler la puissance réactive, par conséquent un découplage de la commande des puissances active et réactive peut se réaliser.
- Magnétisation à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la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



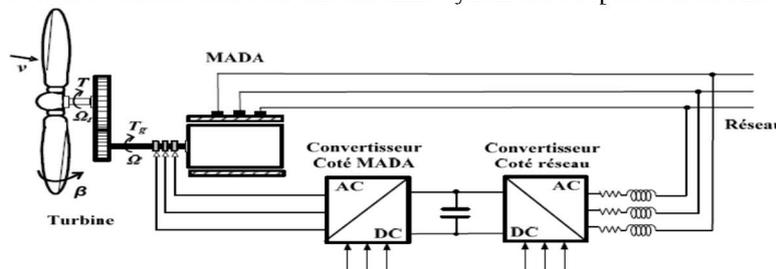
a) Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone.



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



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



d) Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

Figure II.18. Différentes configurations d'éoliennes à vitesse de vent variable [50-52]

7 Modèle aérodynamique

7.1 Modèle du vent :

Le vent est l'énergie source de l'aérogénérateur, c'est la variable d'entrée du système éolien. L'énergie cinétique contenue dans le vent est récupérée en partie, transformée en énergie mécanique par le biais de la turbine. Le vecteur de vitesse évolue dans les plans horizontaux, alors le modèle du vent comportemental est simplifié considérablement. La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps [55].

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

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

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

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

7.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté dans la figure (II.19), sur lequel on a représenté respectivement les vitesses du vent v_1 en amont et v_2 en aval de l'aérogénérateur. L'énergie cinétique d'une particule de masse m dans l'air qui se déplace avec une vitesse v est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad \text{II.8}$$

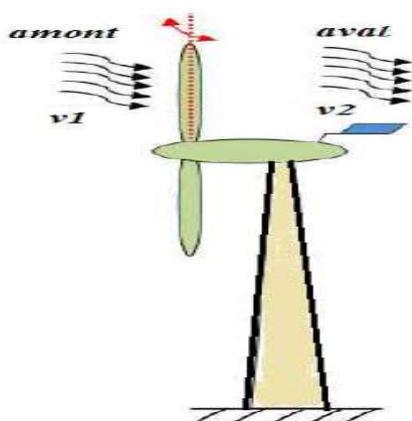


Figure II.19. Schéma simplifié d'une éolienne [55].

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

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

On dérive par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} = \rho \cdot S \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot S \cdot v \quad \text{II.10}$$

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

$$\dot{m} = \rho \cdot S \cdot v \quad \text{II.11}$$

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

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

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

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad \text{II.13}$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

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

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

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

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

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad \text{II.16}$$

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

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

Et selon la deuxième loi de Newton :

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

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

$$F = \dot{m} \cdot v \quad \text{II.19}$$

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

$$F = \rho \cdot S \cdot v^2 \quad \text{II.20}$$

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

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

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

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

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

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

On considère le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (II.20) sur lequel on a représenté la vitesse du vent v_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse v_2 en aval ; v est la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, S_1 et S_2 sont les sections en amont et en aval du tube d'air et S la surface balayée par l'hélice. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit :

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

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

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

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

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

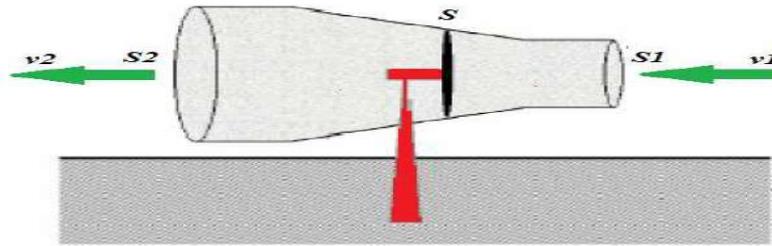


Figure II.20. Tube de courant autour d'une éolienne.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Chaque éolienne est définie expérimentalement par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse spécifique relative λ qui représente les performances aérodynamiques de cette éolienne [56].

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

$$\eta_a = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{C_{p-max}}$$

II.33

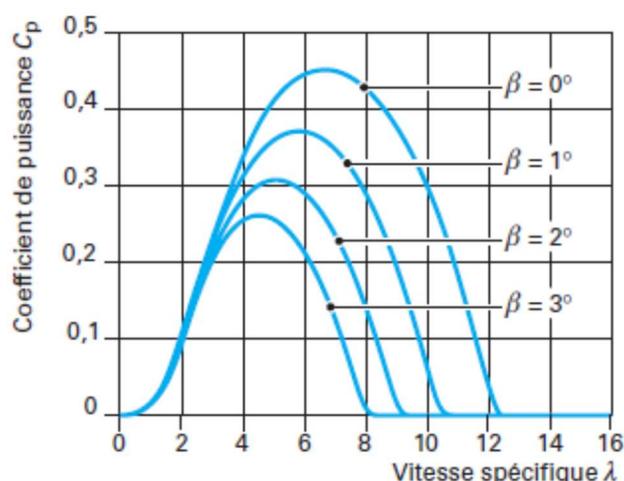


Figure II.21. Paramétrage une éolienne tripale pour différentes valeurs β [56]

8 Stratégies de MPPT pour une éolienne

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

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

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

Pour cela, on peut distinguer deux approches possibles [45], [50], [55] :

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

8.1 Maximisation de la puissance sans connaissance de la caractéristique C_p

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

L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Le système doit trouver pour chaque vitesse de vent, la puissance maximale de ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale. Le schéma de la Figure II.22 illustre les courbes caractéristiques de la puissance l'éolienne en fonction de différentes vitesses de rotation de la turbine.

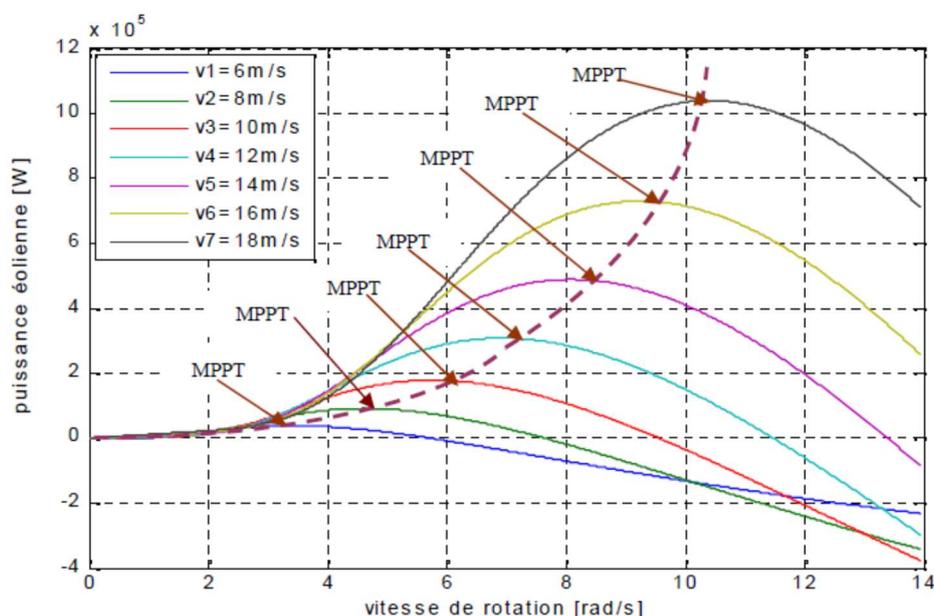


Figure II.22. Caractéristiques d'une éolienne en fonction de la vitesse de vent

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

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

8.2 Maximisation de la puissance avec la connaissance de la courbe Cp

Une autre façon de procéder consiste en une recherche du point maximal de puissance en connaissant la courbe caractéristique Cp. Ces méthodes permettent de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples de vitesse de rotation, sans (ou avec) l'obligation d'utilisation des capteurs de vitesse du vent [52], [54]. Ces techniques diffèrent selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. On peut classer ces techniques en deux familles, selon que la vitesse du vent est nécessaire ou non à la genèse de référence :

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

8.2.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

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

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

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

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation décrivant le régime permanent de l'aérogénérateur on obtient [57] :

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

Ceci revient à considérer le couple mécanique C_{mec} développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux $C_f = 0$, on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad \text{II.36}$$

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

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

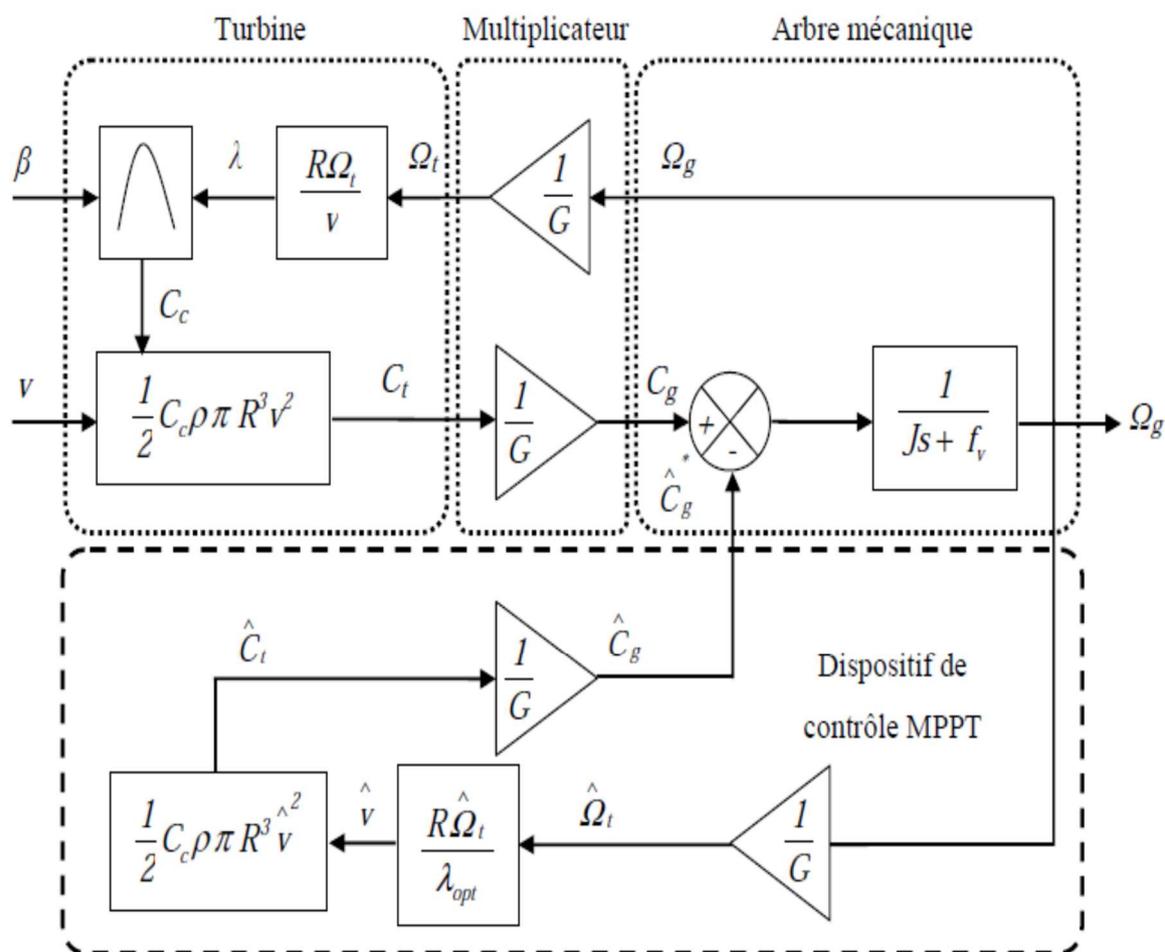


Figure II.23. Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse

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

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

L'estimation de la vitesse de la turbine Ω_{t-est} est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad \text{II.39}$$

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

$$v_{estimé} = \frac{R \cdot \Omega_{t-est}}{\lambda} \quad \text{II.40}$$

On obtient donc une relation globale de contrôle :

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

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

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

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

$$P_{em-re} = C_{em-r} \cdot \Omega_{mec} = \frac{C_{p-max} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{mec}^3}{2 \cdot \lambda_{opt}^3 \cdot G^3} \quad \text{II.43} \quad \text{Il est}$$

à noter que l'expression de la puissance électromagnétique de référence est proportionnelle au cube de la vitesse de génératrice. La représentation sous forme de schéma blocs du dispositif de commande est illustrée dans la figure (II.23) [56].

8.2.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

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

$$\Omega_{g-re} = G \cdot \Omega_{t-ref} = G \cdot \frac{v \cdot \lambda_{opt}}{R} \quad \text{II.44}$$

Le couple électromagnétique de référence C_{em-re} permettant d'avoir une vitesse de rotation de référence Ω_{g-ref} obtenue en sortie d'un régulateur de vitesse de type proportionnel-intégral (PI) ; qui va permettre d'asservir la vitesse de rotation et d'atténuer l'effet du couple de la MADA C_{mec} considéré comme une perturbation. Le schéma de principe du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique de rotation est montré à la figure II.24.

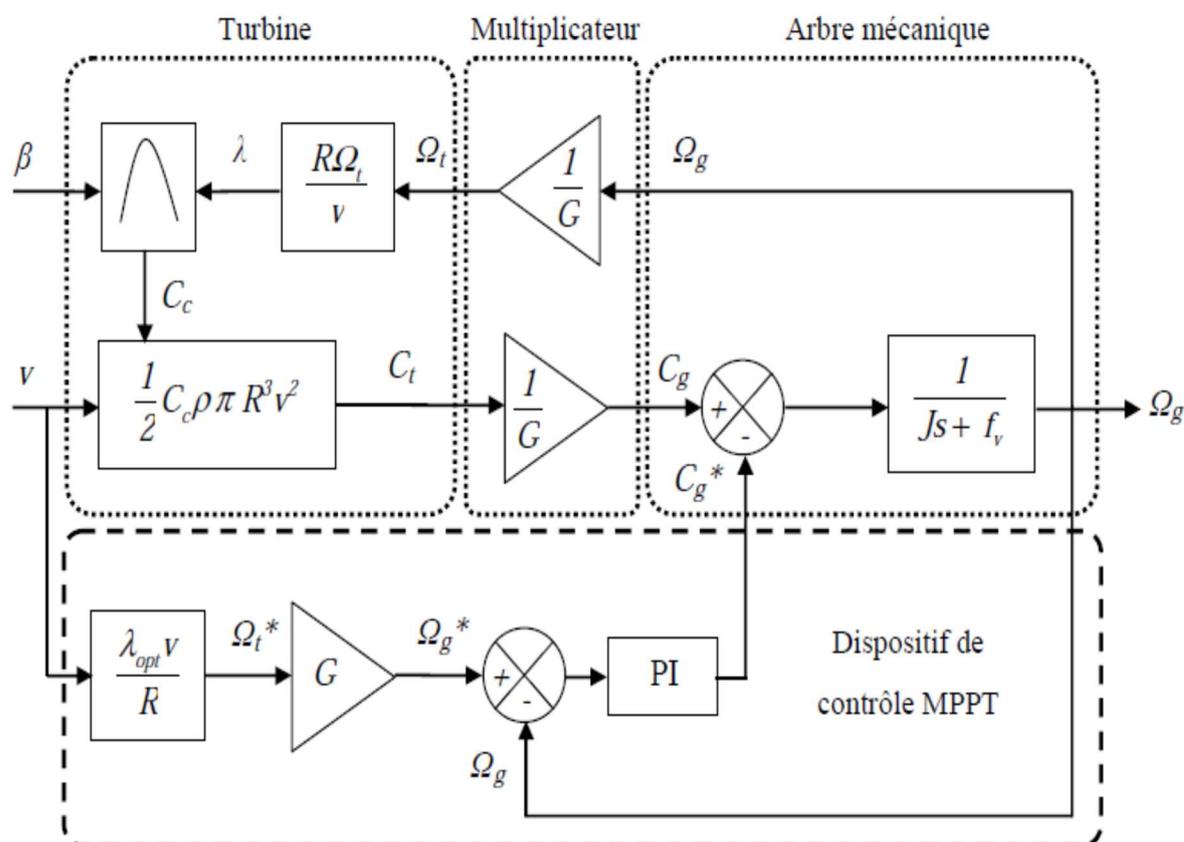


Figure II.24. Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse

9 Modélisation du système éolien

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, et électrique. Les facteurs déterminant la puissance mécanique, sont la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine. Ce système peut être représenté sur la figure (II.25), il comporte :

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

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

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

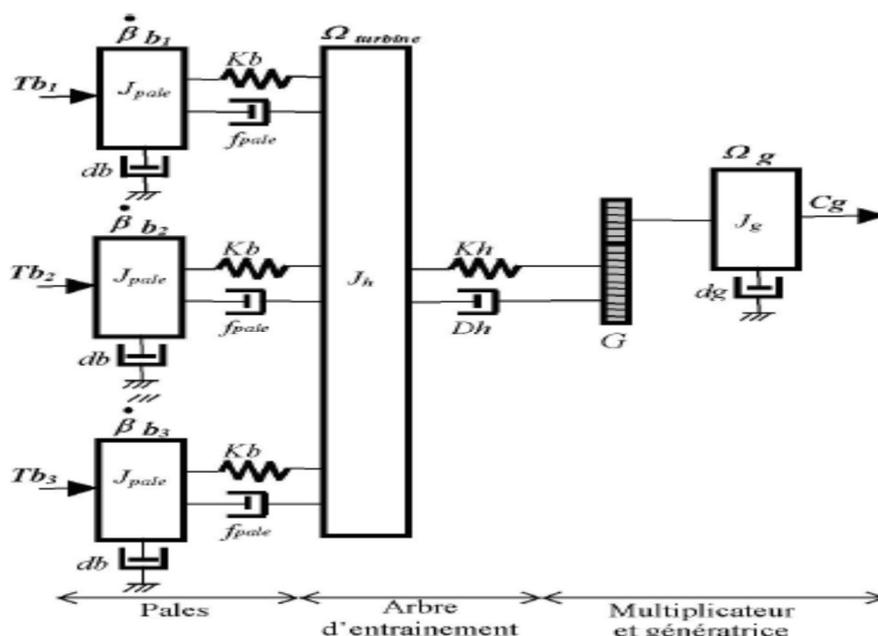


Figure II.25. Représentation du système mécanique de l'éolienne [57].

9.1 Modèle de la turbine :

On peut simplifier le schéma de la figure II.25, si l'on considère les forces de poussée ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$), puisque qu'on a une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales. L'ensemble des trois pales peut être simplifié comme un seul système.

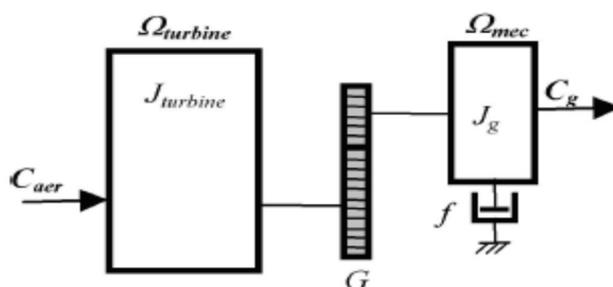


Figure II.26. Modèle mécanique simplifié de la turbine [53].

Le coefficient de frottement des pales, (δ) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique simplifiée (figure II.26) [56].

9.2 Modèle du multiplicateur :

L'aérogénérateur tourne généralement à une vitesse nominale. Le multiplicateur a pour rôle d'ajuster cette vitesse à celle du générateur électrique à travers un coefficient appelé le gain G [53].

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_t} \quad \text{II.45}$$

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

$$G = \frac{C_{mec}}{C_t} \quad \text{II.46}$$

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

9.3 Equation dynamique de l'arbre de transmission :

D'après la figure (II.26), nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique du générateur (modèle de l'arbre) par [54] :

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

Où :

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

$$C_T = C_{mec} - C_{em} \quad \text{II.48}$$

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

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

Le schéma bloc de la figure (II.27) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne [55]. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation mécanique Ω_{mec} qui entraîne le générateur, peut être contrôlée de deux manières différentes : soit par la variation de l'angle de calage des pales, soit par contrôle du couple électromagnétique C_{em} .

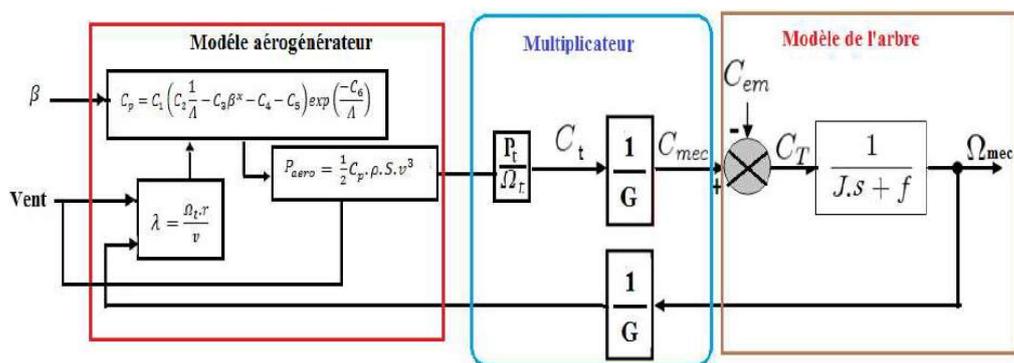


Figure II.27. Modèle aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne.

10 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est classée parmi les filières qui ont un bilan très positif, c'est une des techniques de production d'énergie les plus prometteuses aujourd'hui, et bien au-delà [54].

10.1 Avantages :

- C'est une énergie propre qui n'engendre aucune pollution, qui ne produit directement ni dioxyde de carbone, ni dioxyde de soufre, ni fines particules, ni déchets radioactifs, comme d'autres sources de production d'électricité.
- Elle est de plus disponible presque partout, de manière décentralisée.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable dont le gisement est inépuisable à l'échelle des temps. En effet le vent est inépuisable et abondant ; il constitue donc une véritable ressource renouvelable.
- Elle est désormais la moins chère de toutes les énergies renouvelables existantes. Les avancées technologiques de pointe en matière d'aérodynamique, de résistance des matériaux et de météorologie ont contribué à une diminution coûts de cette énergie.
- L'énergie éolienne est fiable, puisque le facteur de disponibilité de ce moyen de production est bien supérieur à d'autres moyens de production d'électricité. Les opérations liées à la vérification et la maintenance se font quelquefois.
- Lorsque le temps d de fonctionnement d'une ferme éolienne est écoulé (environ 20 ans), les fondations sont entièrement démantelées, elles peuvent être réutilisées.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple ; le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- La ressource de production éolienne peut jouir de complément à d'autres types d'énergies, notamment durant des pics de consommation.

- L'énergie éolienne est créatrice d'emploi, l'industrie éolienne offre de plus en plus d'emplois de diverses spécialités. C'est une source de richesse pour les pays qui ont le savoir technologique de cette filière.

10.2 Inconvénients :

L'énergie éolienne dévoile également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement [55] :

- L'énergie éolienne est une énergie intermittente. Elle n'est prévisible que dans la limite des prévisions météorologiques et ne peut être stockée sous sa forme primaire ; aussi la vitesse du vent peut être affaiblie par de nombreux facteurs, qui peuvent influencer la rentabilité du système de production.
- Impact visuel : Les premiers parcs éoliens installés sur terre étaient très denses et dénaturaient le paysage, cependant, les nouveaux parcs voient leurs éoliennes plus espacées, celles-ci étant de plus grande taille et puissance, ils ont donc perdu leur aspect fourmillant commence à se perdre. L'apparition des fermes offshore tend aussi à exclure ce problème.
- L'influence des éoliennes est connue au niveau des impacts sur la biodiversité et particulièrement sur les oiseaux. Cela peut être maîtrisé par une réflexion appropriée au niveau de l'implantation.
- Les éoliennes constituent un obstacle à la propagation des ondes. Les radars météorologiques ou militaires les perçoivent comme des interférences. Selon la proximité et la densité du parc d'éoliennes, ceci peut constituer un blocage majeur à basse altitude donnant une zone d'ombre dans les données. De plus, comme les pales sont en rotation, un radar note leur vitesse de déplacement, et peut les voir comme cible [57].
- Une éolienne a une durée de vie limitée entre 20 et 30 ans, le rendement moyen de production se limite entre 20 et 60%.
- Le bruit que génèrent les éoliennes peut être d'origine mécanique (rotation du rotor et fonctionnement de la génératrice) ou d'origine aérodynamique (lorsque les pales disjoignent l'air). Même si les éoliennes actuelles sont relativement silencieuses, une étude de l'impact sonore sur les habitations doit être effectuée avant l'implantation des parcs éoliens. En fonction du résultat, cette implantation peut être modifiée afin de respecter la réglementation (émergence maximale de 5 dB le jour et 3 dB la nuit). La distance entre les éoliennes et les habitations est généralement de 300 m à environ 500 m, elles sont inaudibles ou très peu audibles et leur bruit est généralement couvert par le bruit du vent.

11 Présentation de la Machine Synchrones à Aimants Permanents MSAP

11.1 Généralités

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

Au rotor, la bobine d'excitation peut être remplacée par des aimants permanents, la machine est dite alors machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ce type de machines possède un bon rendement puisque les pertes Joule sont localisées au stator. En outre, la compacité du rotor conduit à un bon rapport couple/inertie, autorisant des accélérations élevées.

Inversement, lorsque l'arbre du rotor est entraîné à une certaine vitesse, le moteur fonctionne en mode générateur et génère des tensions triphasées au stator à une fréquence proportionnelle à la vitesse d'entraînement [58].

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

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

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



Figure.II.1 Structure générale d'une machine synchrone à aimants [59]

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

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

11.2 Principe de fonctionnement des MSAP

La machine synchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor qui tourne autour de l'axe de symétrie de la machine. Les trois enroulements identiques, à p paires de pôles sont logés sur des encoches régulièrement réparties sur la surface interne du stator ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égale à : $\frac{2}{3p}$ [60].

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

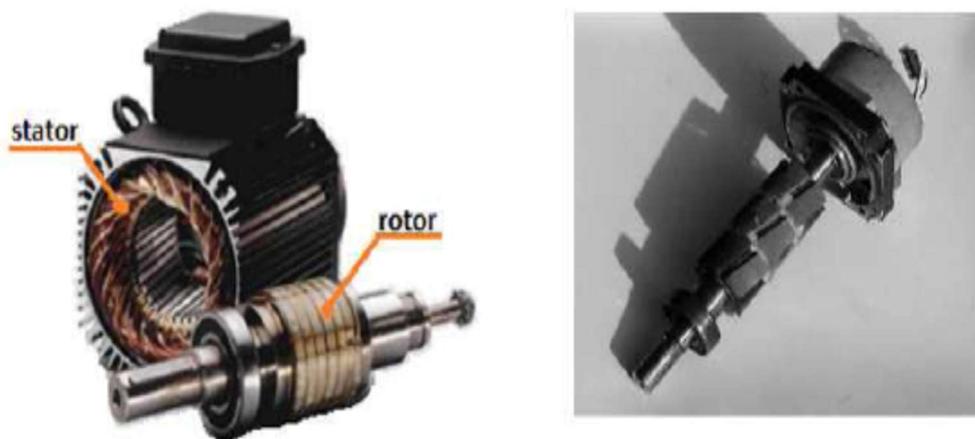


Figure.II.2. Constituants d'une machine synchrone à aimants [59]

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

Ω_t :Vitesse mécanique (rad/s).

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

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

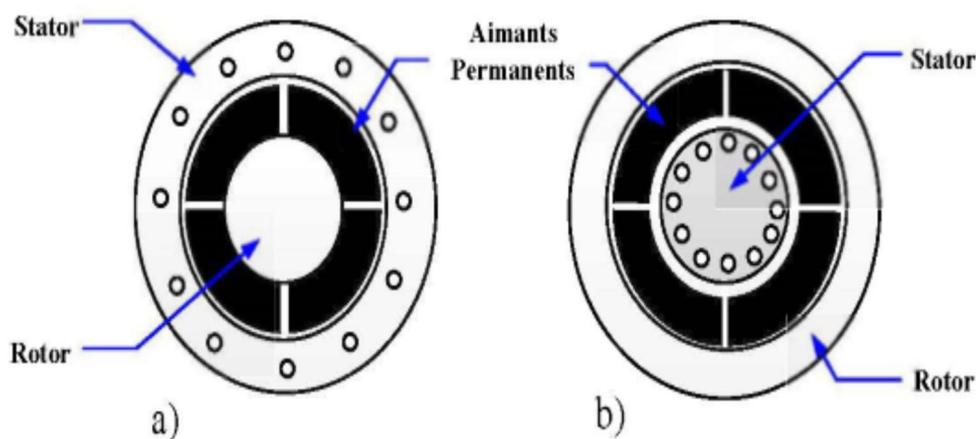


Figure II.3. Structure à rotor interne a) Structure à rotor externe b)

11.3 Fonctionnement en mode générateur GSAP

Ce type de machines est parmi les plus utilisés dans les systèmes de production d'électricité, (centrales électriques, énergie éolienne...). L'inducteur de la génératrice synchrone, mécaniquement entraîné, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques, les f.é.m. induites dans ces bobinages provoquent la circulation de courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer, qui tourne à la même vitesse que celle de champ inducteur. Dans les alternateurs à aimants permanents, le champ magnétique créé par les aimants est constant [9].

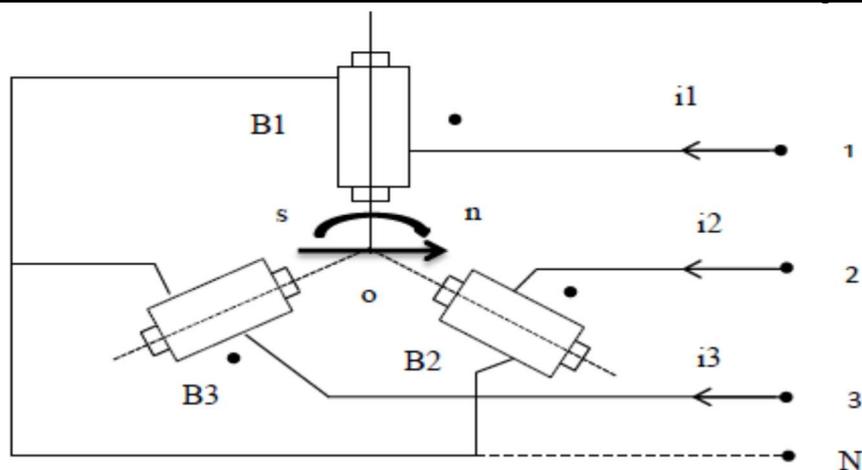


Figure II.4. Principe de fonctionnement d'une GSAP

La caractéristique d'auto-excitations du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui la rend favorable pour des applications tels que la production d'énergie éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son cout réduit et simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font un choix moins compétitif [61].

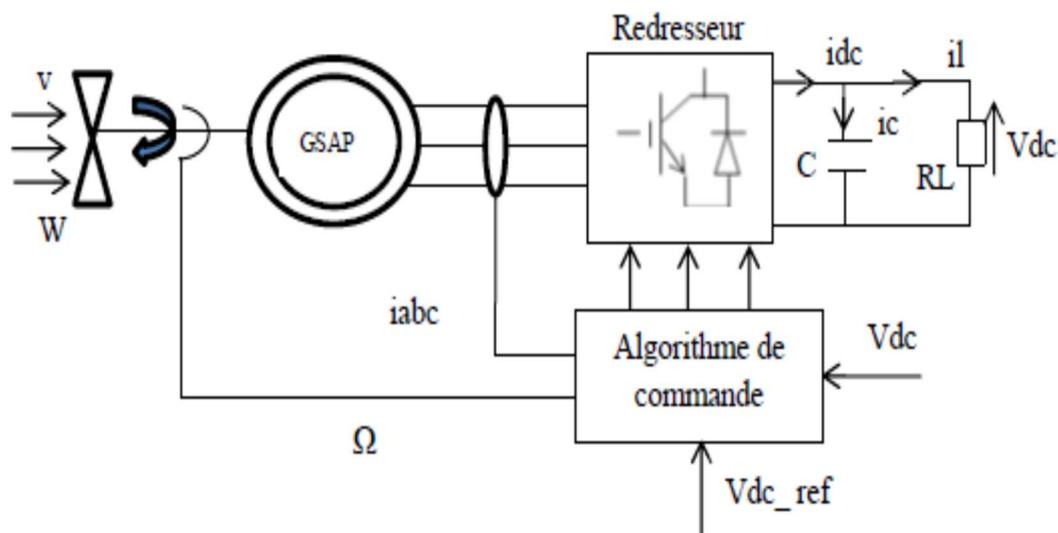


Figure II.4. Structure du générateur éolien à base d'une GSAP

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

12 Modélisation de la MSAP

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

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

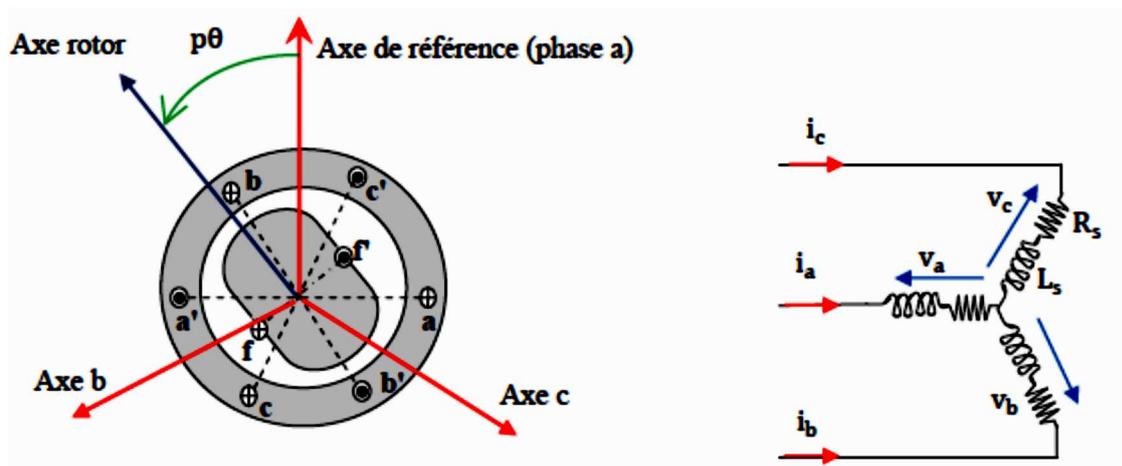


Figure II.5. Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents.

12.1 Hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique de la machine synchrone obéit à certaines hypothèses simplificatrices essentielles [62] :

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

12.2 Modèle de la MSAP dans le repère triphasé abc

12.2.1 Equations électriques

Les équations électriques qui régissent le fonctionnement d'une machine synchrone dans un repère fixe lié au stator (a, b, c) s'énoncent sous la forme suivante [63] :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad \text{II.51}$$

Avec :

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

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

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

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

12.2.2 Equations magnétiques

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

$$[\Phi_s] = [L][i] + [\Phi_{sr}] \quad \text{Où :} \quad \text{II.52}$$

- $[\Phi_{sr}] = [\Phi_{sra} \ \Phi_{srb} \ \Phi_{src}]^T$ II.53
- $[L]$ étant la matrice inductance statorique (propre et mutuelle).
- Φ_{sr} : Flux de l'aimant permanent.

$$[\Phi_{sr}] = \Phi_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{où :} \quad \text{II.54}$$

- $\theta_r = p\theta_m$: Position angulaire électrique ;
- p : Nombre de paires de pôles ;

- θ_m : Position angulaire mécanique ;
- Φ_m : Flux maximum produit par l'aimant dans les enroulements statoriques.

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{II.55}$$

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

$$[V_s] = [R_s][I_s] + [L] \frac{d}{dt} [I_s] + [\Phi_{sr}] \quad \text{II.56}$$

12.2.3 Equations mécaniques

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

$$C_{em} - C_r - C_f = J \frac{d}{dt} \Omega \Rightarrow C_{em} - C_r - f\Omega = J \frac{d}{dt} \Omega \quad \text{où :} \quad \text{II.57}$$

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

12.3 Modèle de la MSAP dans le repère de Park (d, q)

La mise en équation des moteurs synchrones triphasés aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. La résolution analytique dans ce repère reste très difficile. Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère ; on utilise des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. On obtient un système équivalent formé de trois enroulements orthogonaux, deux de ces enroulements sont situés dans le même plan que les enroulements a, b, et c. Le troisième enroulement est situé dans le plan orthogonal au plan formé par les axes de phases a, b, et c et représente la composante homopolaire, en se basant sur les hypothèses simplificatrices, et en appliquant la transformation de Park au rotor, [64]. Cette transformation mathématique, transforme ainsi les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor (Figure II.6).

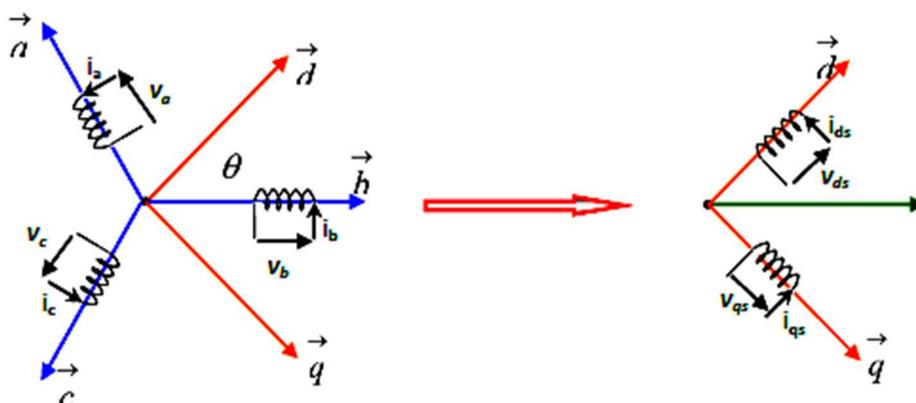


Figure II.6. Représentation de la MSAP dans le repère d-q [64].

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

$$\begin{cases} [X_{dqo}] = [P(\theta)][X_{abc}] \\ [X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}[X_{dqo}] \end{cases} \quad \text{II.58}$$

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

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

La matrice inverse de Park, vaut :

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

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

$$\begin{cases} [X_{\alpha\beta o}] = [T][X_{abc}] \\ [X_{abc}] = [T]^{-1}[X_{\alpha\beta o}] \end{cases} \quad \text{II.59}$$

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

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

$$\begin{cases} [X_{dq}] = [R(\theta)][X_{\alpha\beta}] \\ [X_{\alpha\beta}] = [R(\theta)]^{-1}[X_{dq}] \end{cases} \quad \text{II.60}$$

$$\begin{cases} [R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \\ [R(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \end{cases} \quad \text{II.61}$$

En se basant sur les hypothèses simplificatrices, on peut exprimer l'ensemble des relations de la machine dans le repère de Park (d, q, o) qui est à priori quelconque, on peut ainsi considérer qu'il tourne à une vitesse arbitraire [64].

12.3.1 Expressions des tensions

En appliquant la transformation de Park au système d'équations(II.51), on aboutit à :

$$[V_{dq0}] = [P(\theta)][v_s] = [P(\theta)][R_s][I_s] + [P(\theta)] \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad \text{II.62}$$

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

$$[V_{dq0}] = [P(\theta)][v_s] = [P(\theta)][R_s][P(\theta)]^{-1}[i_{dq0}] + [P(\theta)][P(\theta)]^{-1} \frac{d}{dt} [\Phi_{dq}] + [P(\theta)] \left(\frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right) [\Phi_{dq}] \quad \text{II.63}$$

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

$$\begin{cases} [P(\theta)][R_s][P(\theta)]^{-1} = [R_s] \\ [P(\theta)] \left(\frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right) = \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad \text{II.64}$$

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

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \omega \Phi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\Phi_q}{dt} + \omega \Phi_d \end{cases} \quad \text{II.65}$$

12.3.2 Expressions des flux

$$[\Phi_{dqo}] = [P(\theta)][\Phi_s] = [P(\theta)][L] \cdot [P(\theta)]^{-1} [i_{dqo}] + [\Phi_{sr}] \quad \text{II.66}$$

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

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + \Phi_{sr} \\ \Phi_q = L_q i_q \end{cases} \text{Où :} \quad \text{II.67}$$

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

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

Le modèle de la MSAP est enfin donné par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \Phi_{sr}) \end{cases} \quad \text{II.68}$$

12.4 Expressions de la puissance et du couple

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

$$\begin{cases} P(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \\ P(t) = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \end{cases} \quad \text{II.69}$$

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

En remplaçant les valeurs des tensions et des courants par leurs similaires dans l'équation II.69, la puissance électrique absorbée par la machine dans le référentiel de Park s'écrit :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[R_s (i_d^2 + i_q^2) + \left(i_d \frac{d\Phi_d}{dt} + i_q \frac{d\Phi_q}{dt} \right) + (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \omega \right] \text{ où :} \quad \text{II.70}$$

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

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

$$\begin{cases} P(t) = \frac{3}{2}(i_q\Phi_d - i_d\Phi_q)\omega = \omega C_{em} \\ P(t) = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \end{cases} \quad \text{II.71}$$

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

$$C_{em} = \frac{3}{2}p[i_q\Phi_{sr} + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad \text{II.72}$$

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

$$C_{em} = \frac{3}{2}i_q\Phi_{sr} = \frac{3}{2}i_d\Phi_{sr} \quad \text{II.73}$$

13 Modèle généralisé de la MSAP en mode générateur PMSG

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

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{II.74}$$

En appliquant les transformations de Park, comme auparavant :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - \frac{d\Phi_d}{dt} + \omega\Phi_q \\ V_q = -R_s i_q - \frac{d\Phi_q}{dt} - \omega\Phi_d \end{cases} ; \begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + \Phi_{sr} \\ \Phi_q = L_q i_q \end{cases} ; \frac{d\Omega}{dt} - C_f = C_m - C_{em} \quad \text{II.75}$$

14 Conclusion

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

Chapitre III
Modélisation du générateur
photovoltaïque

1 Introduction

La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies solaire, offre une grande assurance de fourniture électrique aux consommateurs, avec l'avantage du respect des normes liées à l'environnement. Néanmoins les propriétés aléatoires de ces sources obligent les producteurs d'établir des règles de dimensionnement et d'emploi de ces systèmes, ceci pour une exploitation optimale.

Considérant sa caractéristique saisonnière, l'énergie solaire ne peut-être un concurrent seul face aux autres types d'énergie renouvelable.

Dans ce chapitre, il sera exposé la description et le principe de fonctionnement de différents composants du système de production photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque, sera présenté en détail ; enfin on essaiera de donner un modèle physique où décrira tous les composants.

2 État de l'art du système photovoltaïque

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2 μm) à l'infrarouge lointain (2.5 μm). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m² (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (voir figure III.1). Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m² du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m² (AM1.5) [65].

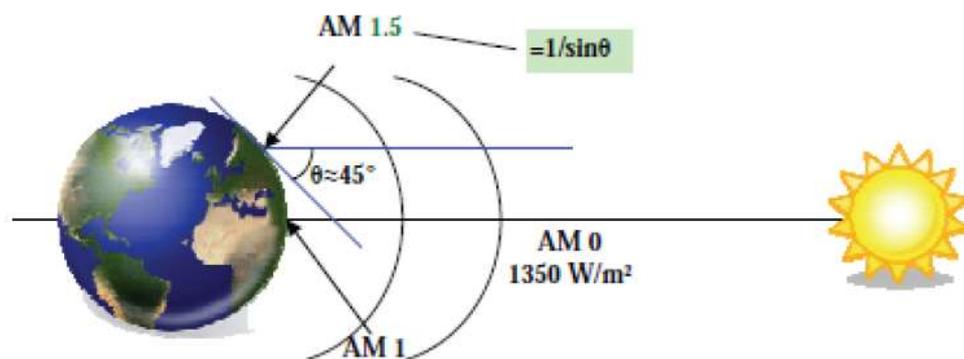


Figure III.1. Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m² (voir figure III.2) [66].

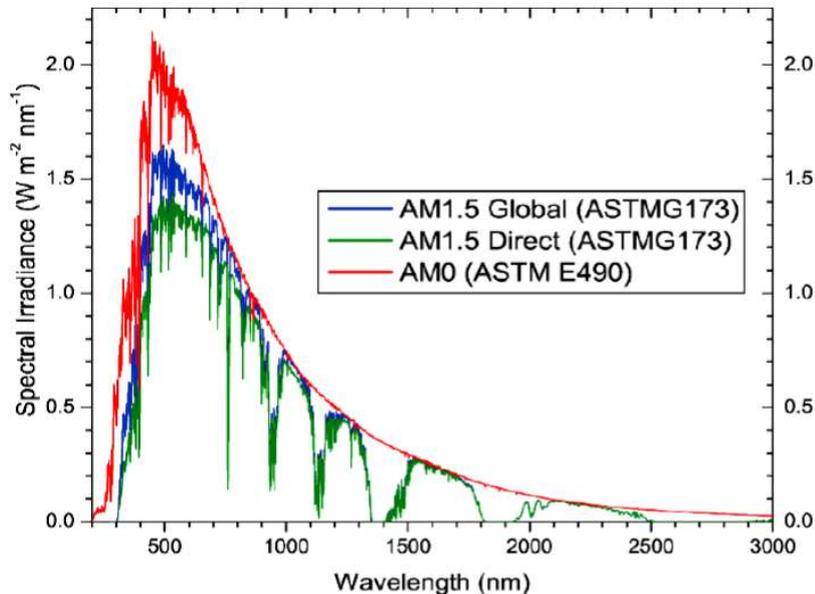


Figure III.2. Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.

3 Notion d'effet photovoltaïque

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation (III.1) [66] :

$$E_{ph} = \frac{h.c}{\lambda_0} \quad \text{III.1}$$

Où E_{ph} représente la quantité d'énergie, λ_0 la longueur d'onde, h la constante de Planck et C la vitesse de la lumière. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

L'effet photovoltaïque se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur ou entre deux semi-conducteurs lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde adéquate. Ainsi une cellule photovoltaïque peut convertir l'énergie solaire en énergie électrique en mettant en jeu ce phénomène physique optoélectronique. Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les

cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12% avec du silicium polycristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe [67].

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass. Celle-ci n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

4 Principe de la génération photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi conducteurs. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque [68]. Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi conducteurs. Ces deux couches sont dopées différemment. Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi conducteur (figure III.4).

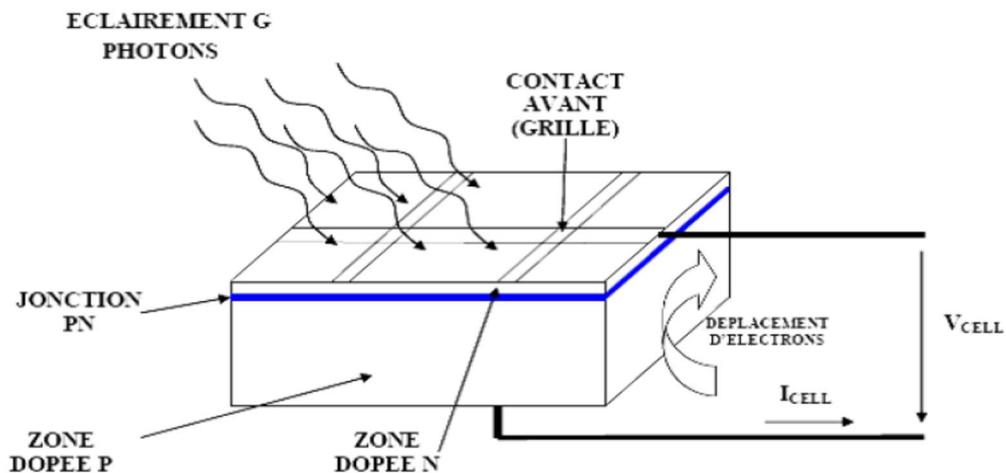


Figure III.4. Schéma d'une cellule élémentaire

L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [69].

Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Le rendement énergétique atteint industriellement est de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium

monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium polycristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces.

Les caractéristiques ainsi obtenues sont celles d'une photodiode mais en convention générateur [70] (voir figure III.5).

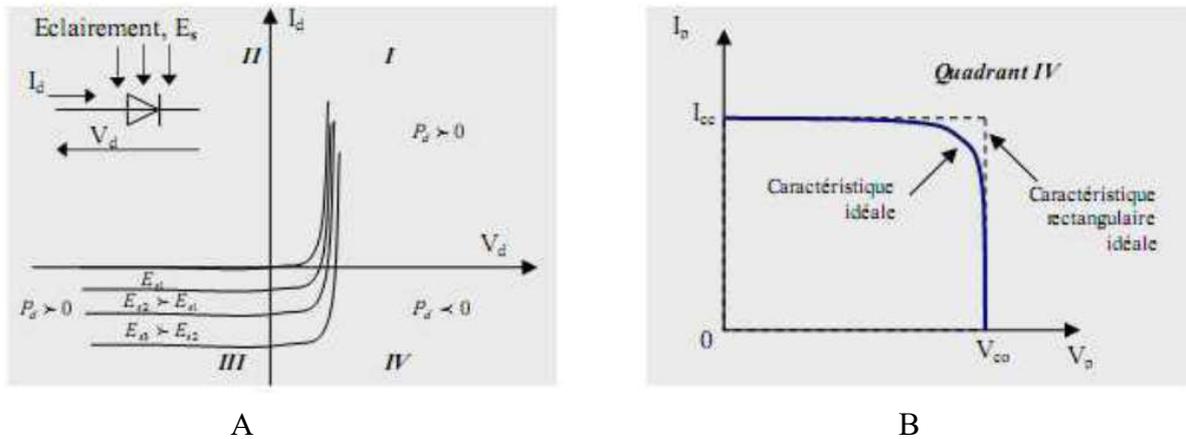


Figure III.5. A : caractéristique d'une photodiode. B : caractéristique d'une cellule Photovoltaïque.

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Alors Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un module Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque (Voir Figure III.6) [71].

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

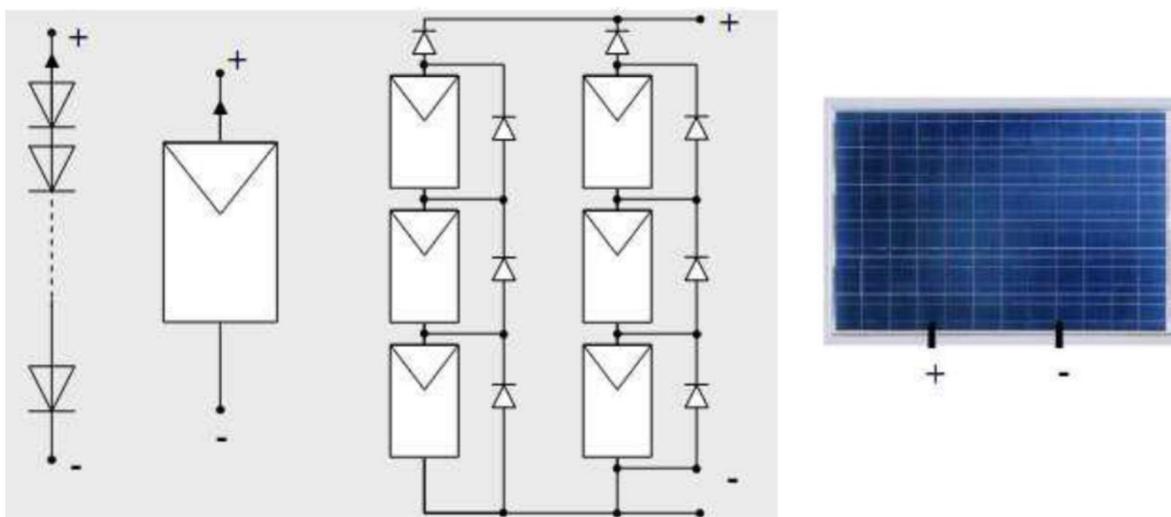


Figure III.6. Cellules, module et panneau photovoltaïques.

5 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

On rencontre dans la littérature technique plusieurs modèles du générateur photovoltaïque (à une, à deux ou à trois diodes) [72]. Ils diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque.

Le modèle à une seule diode est le plus cité dans la littérature. Il est caractérisé par son schéma électrique équivalent qui est représenté sur la figure III.7. Il se compose d'une source de courant symbolisant la conversion du flux lumineux en énergie électrique, d'une résistance shunt R_{sh} caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dû à la non-idéalité de la jonction PN et des impuretés près de la jonction. Une résistance série R_s représente les diverses résistances de contact et de connexions [73].

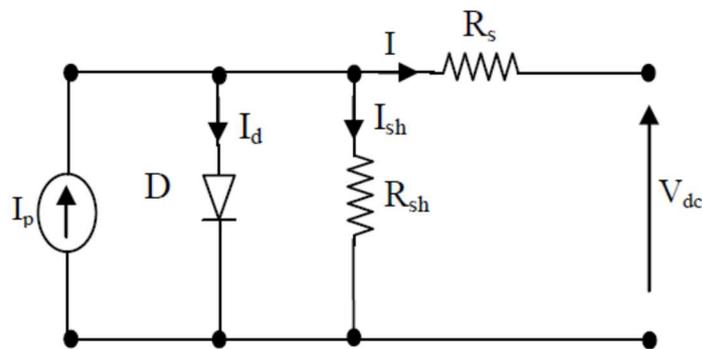


Figure III.7. Schéma électrique équivalent du modèle à une seule diode d'une cellule photovoltaïque.

5.1 Présentation du modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque

En appliquant la première loi de Kirchhoff (loi des nœuds), on peut écrire :

$$I_p = I + I_d + I_{sh} \quad \text{III.2}$$

Le courant de jonction I_d est donné par :

$$I_d = I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{V + R_s I}{nKT} \right)} - 1 \right] \quad \text{III.3}$$

Le courant dans la résistance R_{sh} vaut :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad \text{III.4}$$

Si on combine ces relations, on trouve ;

$$I = I_p - I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{V + R_s I}{nKT} \right)} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right] \quad \text{III.5}$$

Avec :

I : Le courant de cellule [A]. V : La tension de cellule [V]. I_p : Le photo-courant de la cellule [A]. R_s : La résistance série de la cellule [Ω]. R_{sh} : La résistance shunt de la cellule [Ω].

T : La température de la cellule [$^{\circ}\text{K}$]. q : La charge de l'électron $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ [C]. I_0 : Le courant de saturation [A]. K : Constante de Boltzmann ($1.3854 \cdot 10^{-23}$ [JK $^{-1}$]). n : Le facteur de non-idéalité de la diode.

5.2 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique (III.5). Les plus usuels sont les suivantes [68], [72] :

5.2.1 Courant de court circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s est nulle et R_{sh} est infinie), ce courant se confond avec le photo courant I_p . Dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II.5), on obtient ;

$$I_{cc} = I_p - I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{R_s I_{cc}}{nKT} \right)} - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \right] \quad \text{III.6}$$

La plupart des photopiles ont une résistance série qui est faible, on peut négliger le terme :

$$I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{R_s I_{cc}}{nKT} \right)} - 1 \right] \ll I_p, \text{ donc le courant de court-circuit aura pour valeur :}$$

$$I_{cc} = \frac{I_p}{\left(1 - \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad \text{Avec } I_{cc} \text{ intensité de court-circuit.} \quad \text{III.7}$$

5.2.2 Tension à vide

C'est la tension V_{c0} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (circuit ouvert). On la définit comme étant la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque.

$$0 = I_p - I_0 \left[\exp^{q \left(\frac{V_{c0}}{nKT} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{c0}}{R_{sh}} \Rightarrow V_{c0} = \left(\frac{q}{nKT} \right) \text{Ln} \left(\frac{I_p}{I_0} + 1 \right) \quad \text{III.8}$$

Avec : V_{c0} tension à vide (circuit ouvert).

5.2.3 Notion de Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($V_{pm} \cdot I_{pm}$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit ($I_{cc} \cdot V_{co}$).

$$FF = \frac{V_{pm} \cdot I_{pm}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad \text{III.9}$$

5.2.4 Rendement

Le rendement (η), d'une cellule photovoltaïque est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \left(\frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \right) \quad \text{III.10}$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court circuit et la tension à vide [73].

6 Module photovoltaïque .

En associant les cellules photovoltaïques en série ou en parallèle, on peut construire un module (générateur) photovoltaïque selon le besoin des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. La puissance disponible en sortie du module photovoltaïque est donnée par [74]:

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad \text{III.11}$$

où :

N_s : Le nombre de cellules photovoltaïques mises en série. N_p : Le nombre de cellules photovoltaïques mises en parallèle.

6.1 Mise en série

Une association de N_s cellules permet d'accroître la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules étant en série seront traversées par la même intensité de courant. La caractéristique de ce groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule (figure III.8). L'équation (III.12) résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules [75].

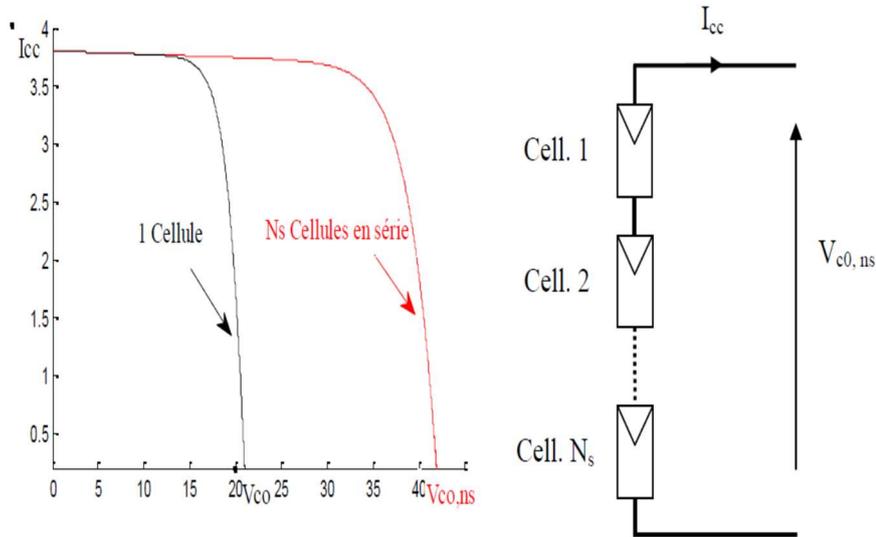


Figure III.8. Caractéristiques de Ns cellules groupées en série.

$$\begin{cases} I_{cc,ns} = I_{cc} \\ V_{c0,ns} = N_s \cdot V_{c0} \end{cases} \quad \text{III.12}$$

6.2 Mise en parallèle

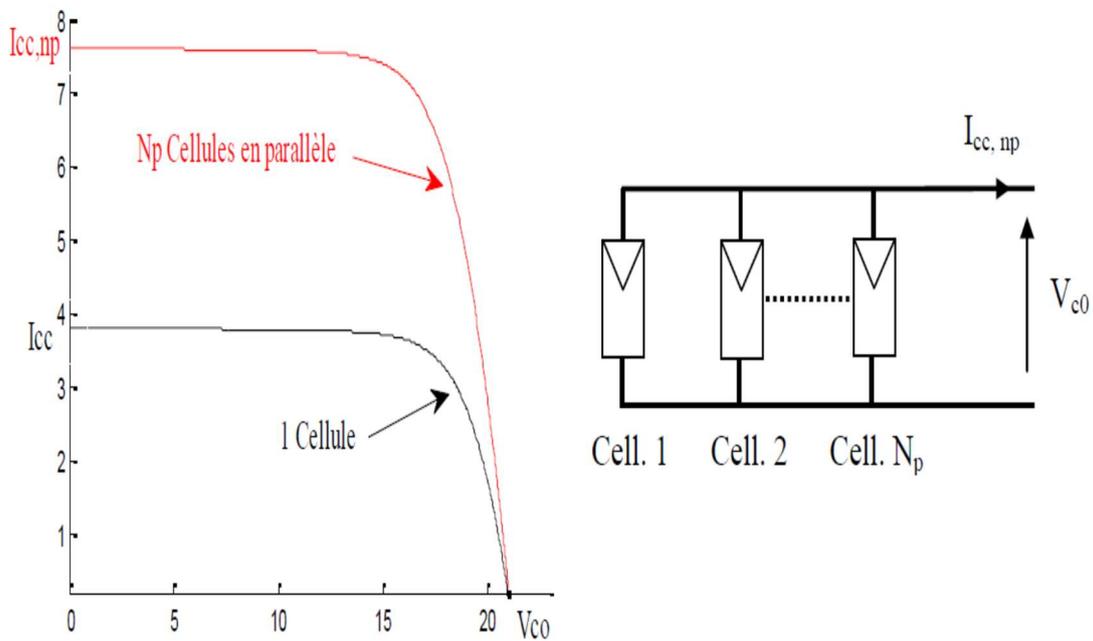


Figure III.9. Caractéristiques de Np cellules groupées en parallèle.

D'autre part, on peut assembler Np cellules en parallèle ; ce qui permettra d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique de ce groupement est obtenue par addition des courants (Figure III.9). L'équation (III.13) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de Np cellules [75].

$$\begin{cases} I_{cc,np} = N_p \cdot I_{cc} \\ V_{c0,np} = V_{c0} \end{cases}$$

III.13

7 Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque

Les figures ci-dessous montrent respectivement les résultats de simulation des caractéristiques I(V) et P(V) d'un panneau photovoltaïque pour différentes valeurs de l'éclairement et de la température.

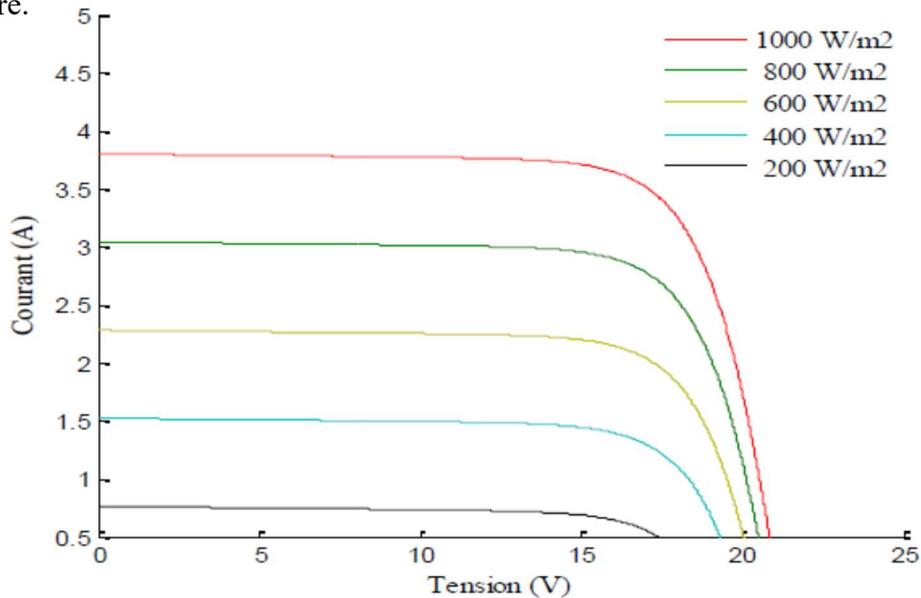


Figure III.10. Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairements à température constante 25°C [76]

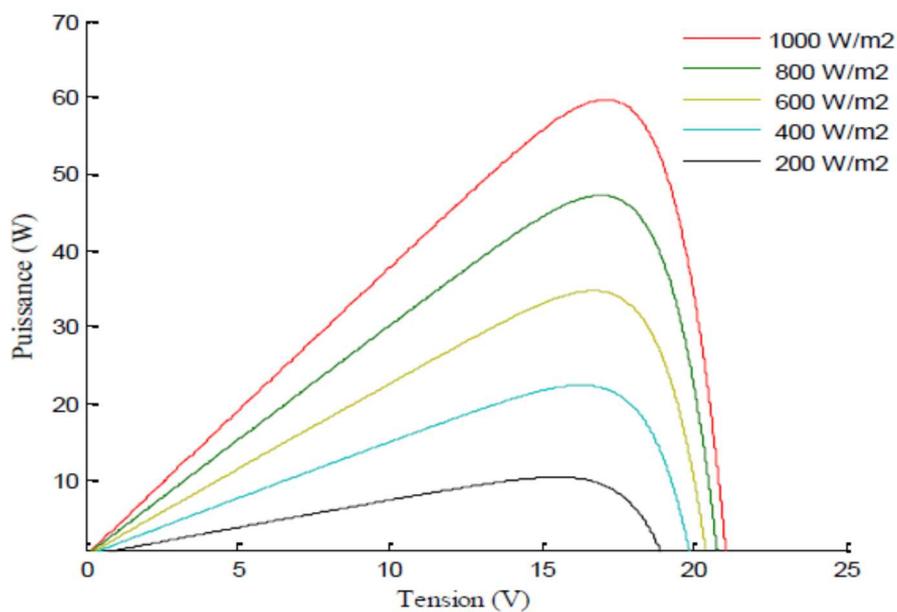


Figure III.11. Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairements à température constante 25°C [76]

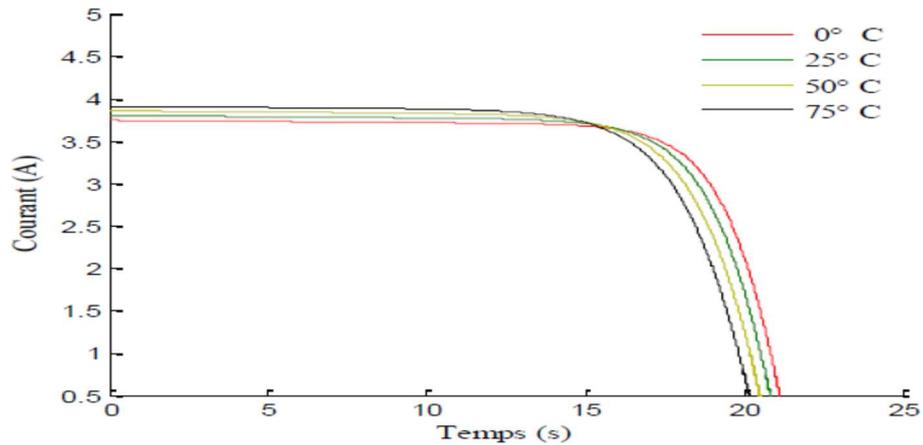


Figure III.12. Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de températures à éclairement constant 1000 W/m^2 [76]

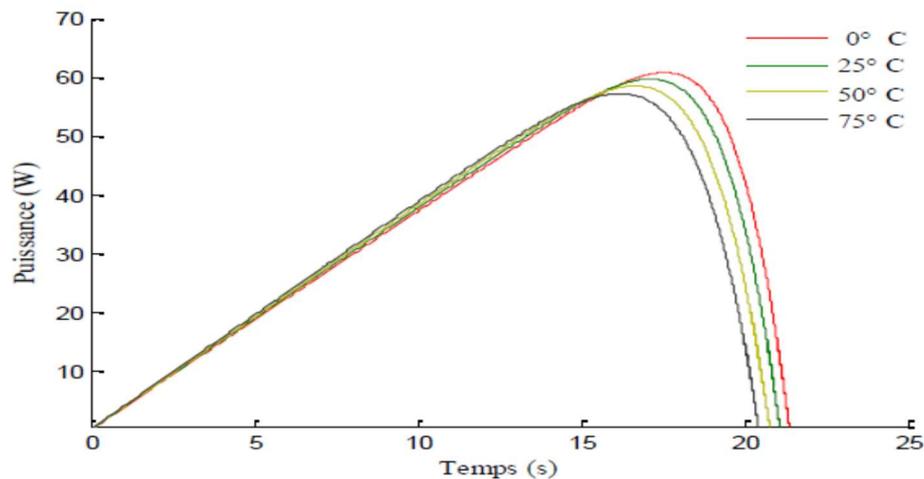


Figure III.13. Caractéristique P(V) pour différentes valeurs de températures à éclairement constant 1000 W/m^2 [76]

Nous observons que l'ensoleillement affecte beaucoup plus le courant I_{pv} du générateur que la tension V_{pv} . La température quant à elle, influe beaucoup plus sur la tension que sur le courant. L'ensoleillement augmente la puissance fournie par le module, alors que la température l'abaisse.

8 Système de conversion photovoltaïque

La figure III.14 présente le schéma synoptique d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge. Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de réaliser l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal.

Ceci est obtenu en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du MPP (point de puissance maximale) pour n'importe quelle condition de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc...). [77].

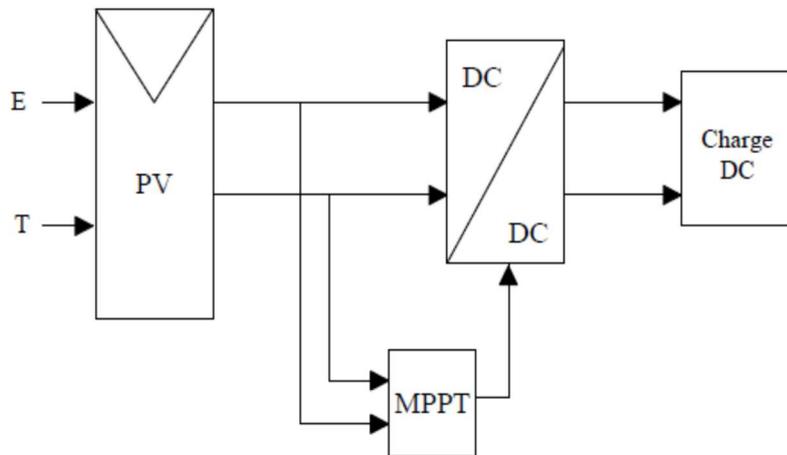


Figure III.14. Connexion d'un GPV à une charge DC à travers un étage d'adaptation survolteur associé à une commande MPPT [77].

Cet étage d'adaptation utilise un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui permet de rechercher le Point de Ppuissance maximum que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque [78]. Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation de la commande MPPT. Parmi ces algorithmes on citera : la méthode de Hill Climbing, Perturb & Observe (P&O), de l'incrément de Conductance (IncCond) et par intelligence artificielle (logique floue, réseaux de neurones) [79].

9 Conclusion :

Le soleil fournit une source d'énergie propre à court et long terme. C'est une des solutions rentables pour alimenter les utilisateurs isolés. Une présentation globale de la modélisation, du fonctionnement, de la structure et des différents composants du système photovoltaïque est faite.

Dans ce chapitre, le modèle du panneau photovoltaïque est présenté, on a entre autres décrit les différents paramètres influençant les principales caractéristiques, à savoir la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ en fonction de l'ensoleillement et de la température.

Chapitre IV

Résultats de simulation du système hybride

1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons entamer l'association des deux sources d'énergie renouvelable simulées précédemment, qui seront couplés avec une batterie de stockage qui sera une source de secours. L'association de ces différentes sources va constituer notre système hybride qui sera la seule source de production de l'énergie électrique pour la charge.

Le modèle global sera ensuite simulé à l'aide du logiciel Matlab Simulink, l'influence des paramètres du panneau solaire (température et ensoleillement) ainsi que la turbine éolienne (Variation de la vitesse du vent), seront mises en évidence.

2 Simulation de la chaine globale :

L'objectif de notre contribution est de développer un système hybride combinant les deux sources d'énergie renouvelable, à savoir un générateur photovoltaïque pour convertir l'énergie du soleil et un générateur éolien pour convertir celle du vent. Ce système hybride éolien-photovoltaïque sera autonome, il servira de source électrique pour les zones isolées dont le raccordement au réseau n'est économiquement pas avantageux. Les batteries de stockage auront le rôle de secours en cas d'absence de soleil et de vent. Ces deux sources d'énergie sont connectées vers un bus continu via des convertisseurs. Ce système global est illustré dans la figure suivante :

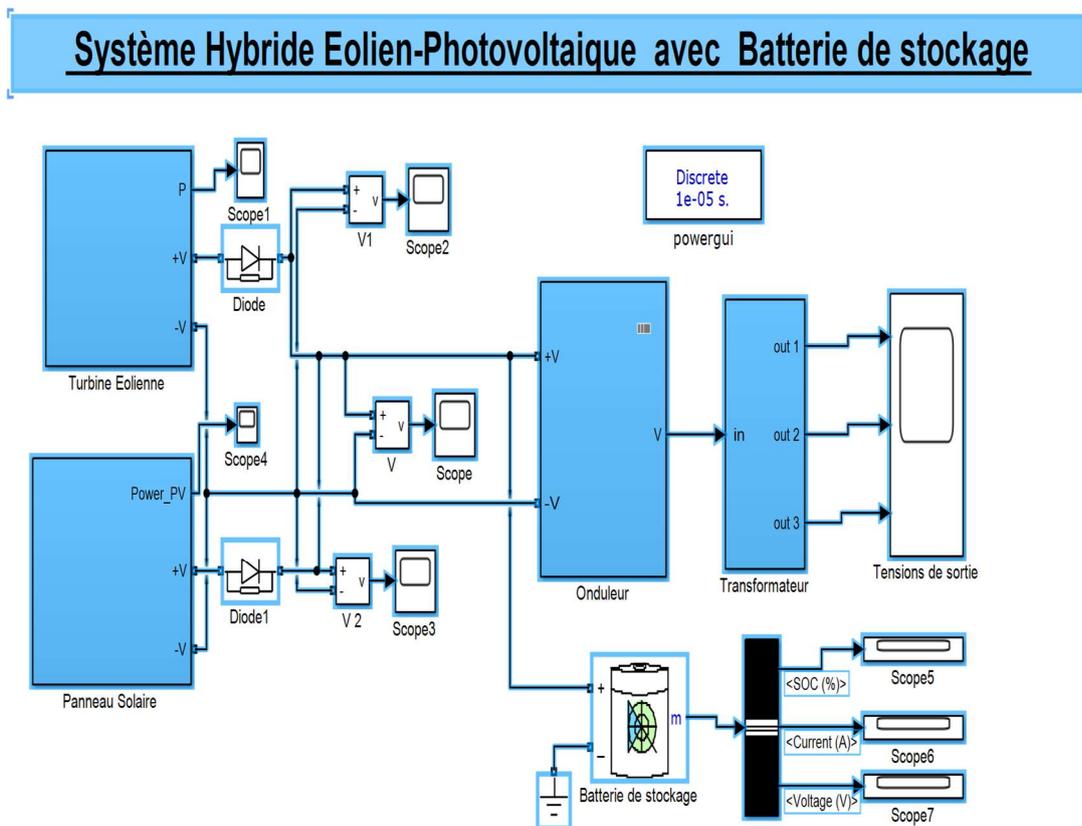


Figure IV-1 : Présentation de la chaine de production.

On présentera dans ce qui suit, et de manière séparée les trois chaînes du système hybride.

2.1 Présentation de la chaîne de conversion éolienne :

La première chaîne est celle qui permet de produire de l'énergie à travers une turbine éolienne soumise à un profil de vent variable.

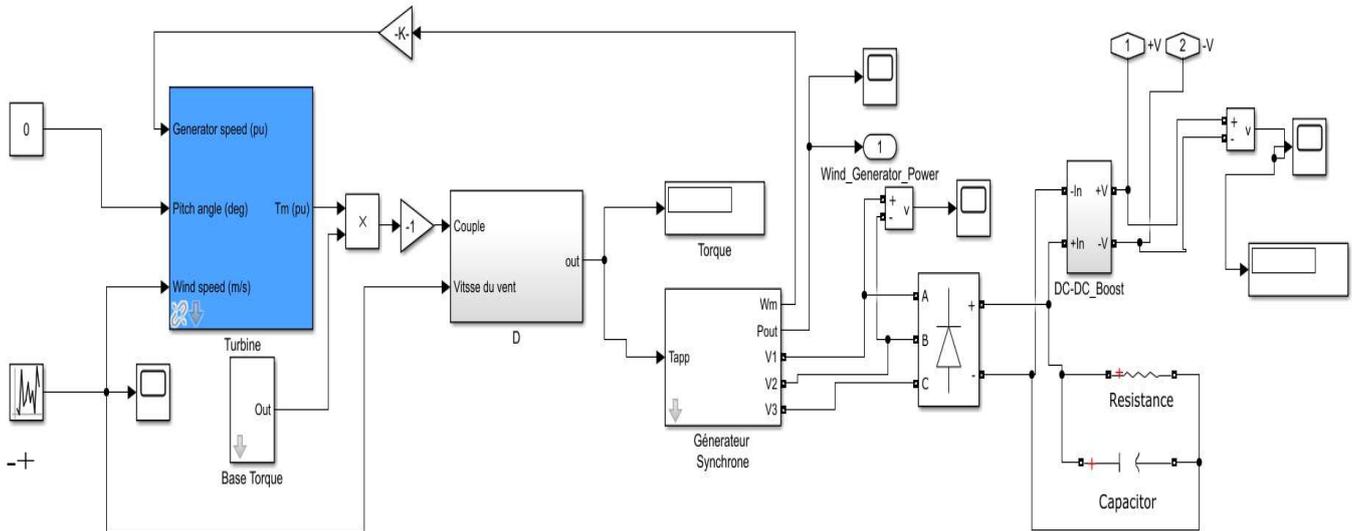


Figure IV-2 : Schéma bloc du système éolien.

La chaîne de conversion éolienne illustrée dans la figure (IV.2) est composée de :

- Une turbine éolienne soumise à un profil de vent où la vitesse est variable de façon aléatoire.
- Un générateur synchrone à aimants permanents (PMSG) qui transforme l'énergie mécanique issue de la turbine éolienne en énergie électrique.
- Un redresseur (pont triphasé de diodes), qui joue le rôle d'un convertisseur AC/DC
- Un hacheur survolteur série DC/DC muni d'une régulation, ce dernier permet de générer la tension désirée pour pouvoir la raccorder au bus continu.

2.2 Présentation de la chaîne de conversion photovoltaïque :

La chaîne de conversion photovoltaïque a été conçue pour générer la même valeur de tension que celle de la chaîne éolienne, nous avons pour cela ajouté un hacheur survolteur série afin d'obtenir la même tension désirée que la chaîne précédente.

Cette chaîne est composée de (figure IV.3) :

- Un panneau solaire d'une puissance de 80 W, ce dernier permettra de convertir l'énergie solaire en énergie électrique.
- Un convertisseur DC/DC survolteur (BOOST Converter), une commande MPPT est insérée pour pouvoir extraire la puissance maximale présente dans le panneau.

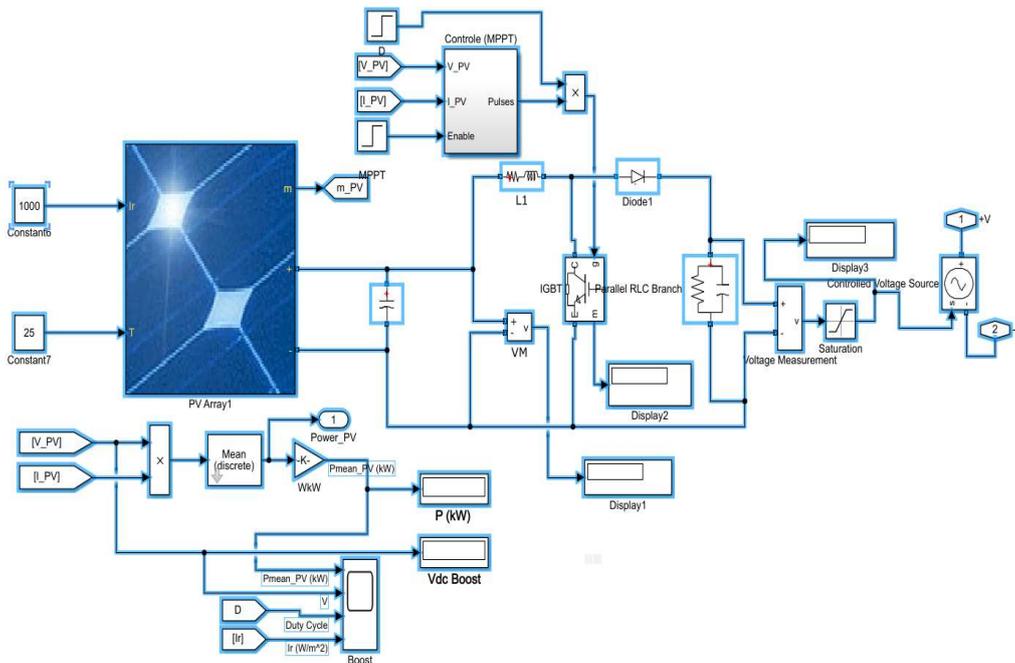


Figure IV-3 : Schéma bloc chaîne de conversion photovoltaïque.

La chaîne de stockage est visible dans la figure IV.1, il s'agit d'une batterie qui joue aussi le rôle d'une source d'énergie de secours (absence ou non satisfaction à la demande de la charge de la première et la deuxième chaîne).

3 Simulation de la chaîne globale

Une fois avoir modéliser chaîne globale de production, nous l'avons implémentée dans l'environnement MATLAB/SIMULINK afin d'effectuer tous les tests de la régulation. Nous avons donc soumis le système éolien à un profile de vent aléatoire où la vitesse mécanique est constamment variable [80]. Le but de la stratégie de gestion est de produire des références de puissance pour les sources (éolien, photovoltaïque, et stockage) afin de garantir un réseau continu.

3.1 Simulation de la chaîne de production éolienne

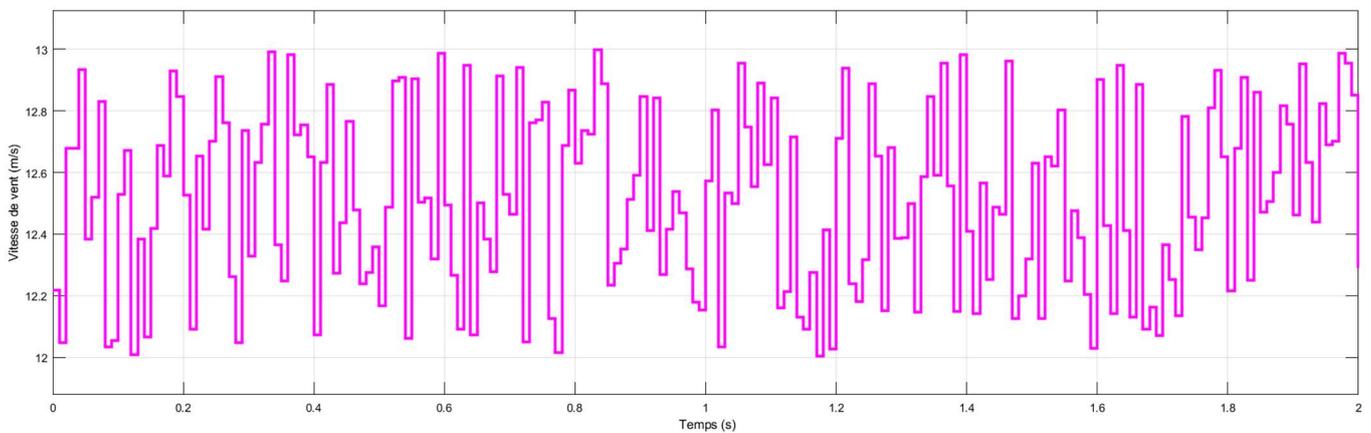


Figure IV-4 : Profile de la vitesse de vent [80].

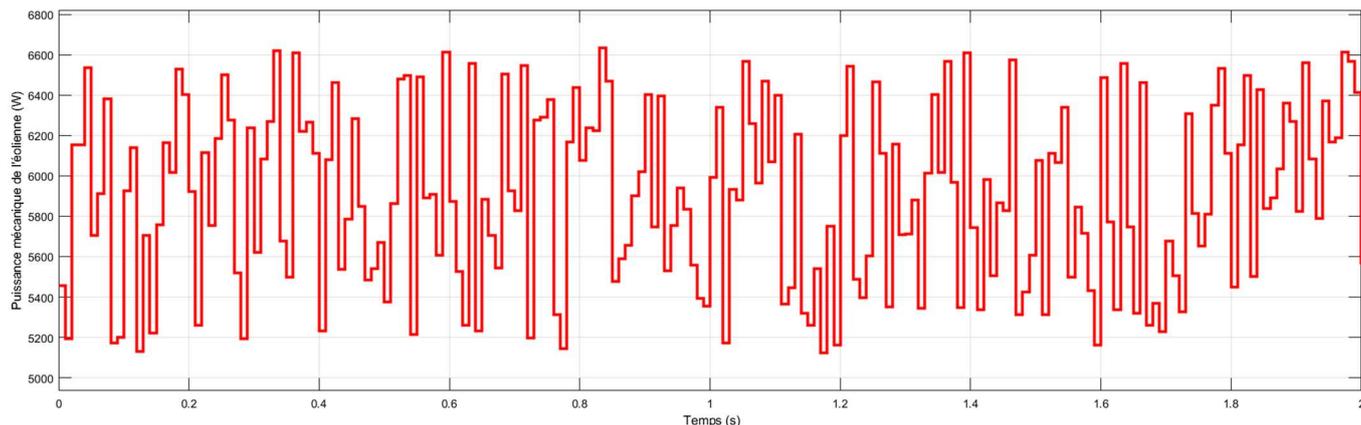


Figure IV-5 : Vitesse mécanique

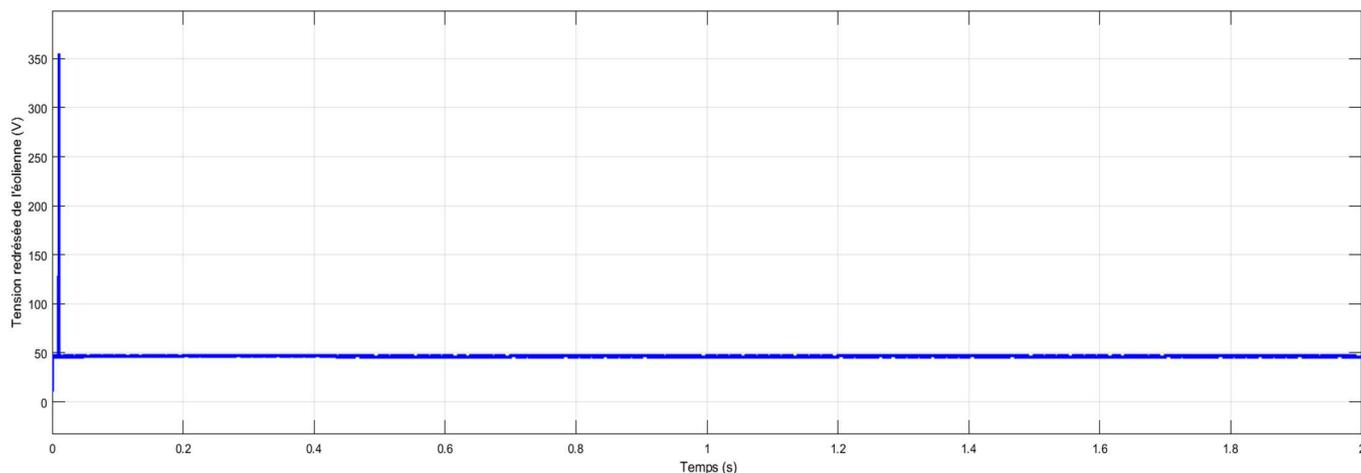


Figure IV-6 : Tension redressée en sortie du générateur éolien

3.2 Simulation de la chaine de production photovoltaïque

Les caractéristiques de ce panneau photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

Caractéristiques du panneau	Indéfini
Nombre de cellules en parallèle	01
Nombre de cellules en série	72
Puissance maximale	90 W
Tension maximale – Tension à vide	17,4V - 21,7V
Courant maximal – Courant de CC	5,02A – 5,34A

Les paramètres de simulation sont comme suit :

- Un profile d'éclairnement constant, égal à 1000 W/m².
- Un profile de température constante, égal à 25°C.

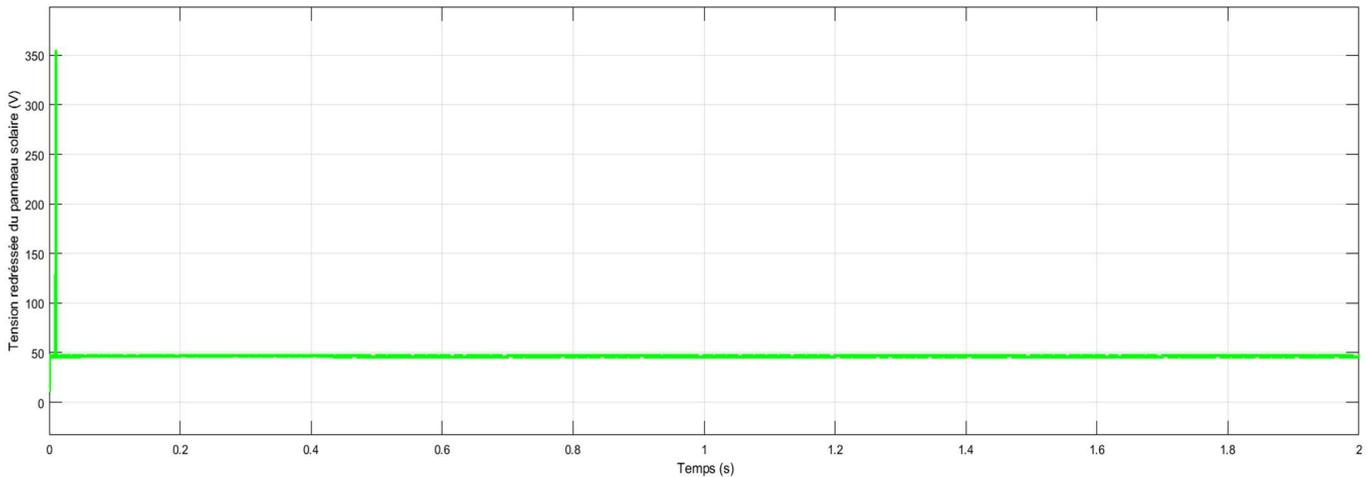


Figure IV-7 : Tension en sortie du panneau photovoltaïque

Les résultats de simulation effectués pour la chaîne photovoltaïque montrent que la tension de sortie est maintenue constante, ce qui nous permet de conclure que la commande MPPT du système est efficace.

4 Modèle du convertisseur de puissance

4.1 Modélisation du redresseur triphasé à diodes

Le redresseur est un convertisseur « alternatif / continu », ce redresseur comporte trois diodes (D1, D2, D3) à cathode commune assurant l'allée du courant I_d et trois diodes (D4, D5, D6) à anode commune assurant le retour du courant I_d . Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

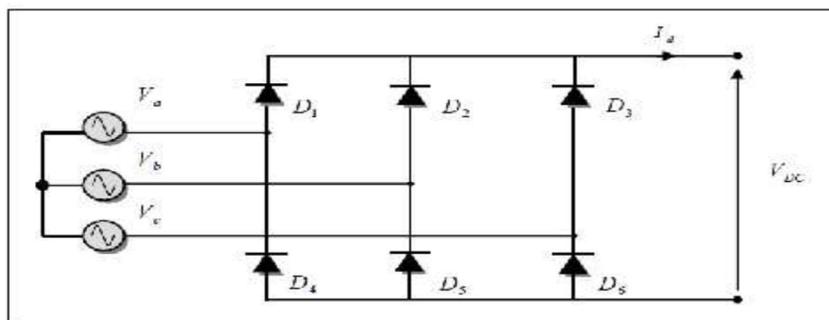


Figure IV.8 : Représentation du redresseur triphasé à diodes.

$$v_a(t) = v_m \sin(2\pi ft)$$

$$v_b(t) = v_m \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3})$$

$$v_c(t) = v_m \sin(2\pi ft - \frac{4\pi}{3})$$

Si on néglige l'effet d'empiétement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme :

$$v_{red}(t) = \text{MAX}(v_a(t), v_b(t), v_c(t)) - \text{MIN}(v_a(t), v_b(t), v_c(t))$$

Cette tension est représentée par la (figure IV.9).

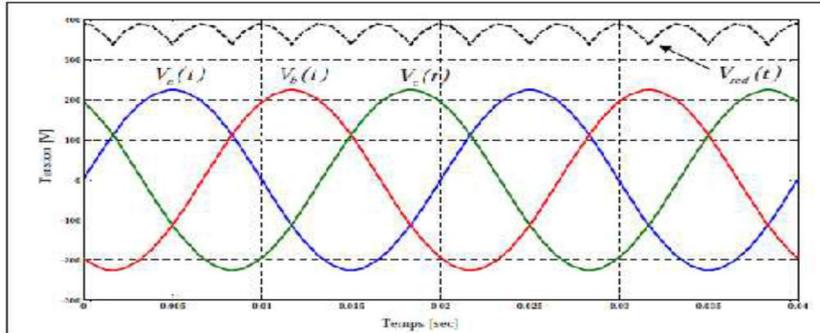


Figure IV.9: Représentation de la tension de sortie du redresseur.

4.2 Modélisation du filtre :

On utilise un filtre passe bas « LC », pour éliminer les hautes fréquences.

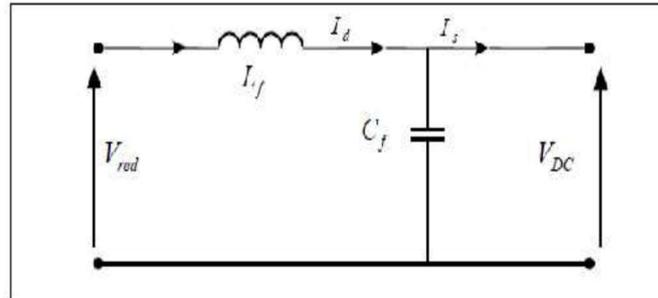


Figure IV.10: Représentation du filtre passe –bas.

Le modèle du filtre est défini par le système d'équations suivantes :

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{V_{red} - V_{dc}}{L_f}$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{I_d - I_s}{C_f}$$

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$F(s) = \frac{V_{dc}}{V_{red}} = \frac{1}{L_f C_f s^2 + 1}$$

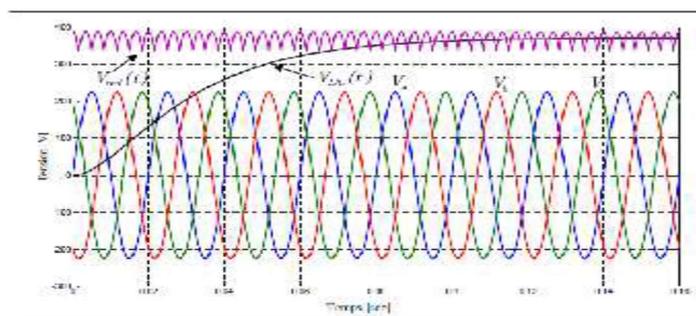


Figure IV.11: Tension redressée et filtrée à l'entrée de l'onduleur rotorique.

IV.4.3 Modélisation du convertisseur (l'onduleur) :

L'onduleur de tension représente un composant essentiel dans les systèmes d'interfaçage avec le réseau. Son utilisation vient du fait qu'il permet entre autres de contrôler les puissances actives et réactives échangées avec le réseau.

4.2.1 Présentation de l'onduleur à deux niveaux :

Le convertisseur continu alternatif est un onduleur de tension. Il est constitué de trois bras (A, B, C) composés chacun de deux transistors IGBT et de deux diodes en antiparallèle. Aux différentes configurations des interrupteurs correspondent les huit vecteurs de tension appliqués à la machine.

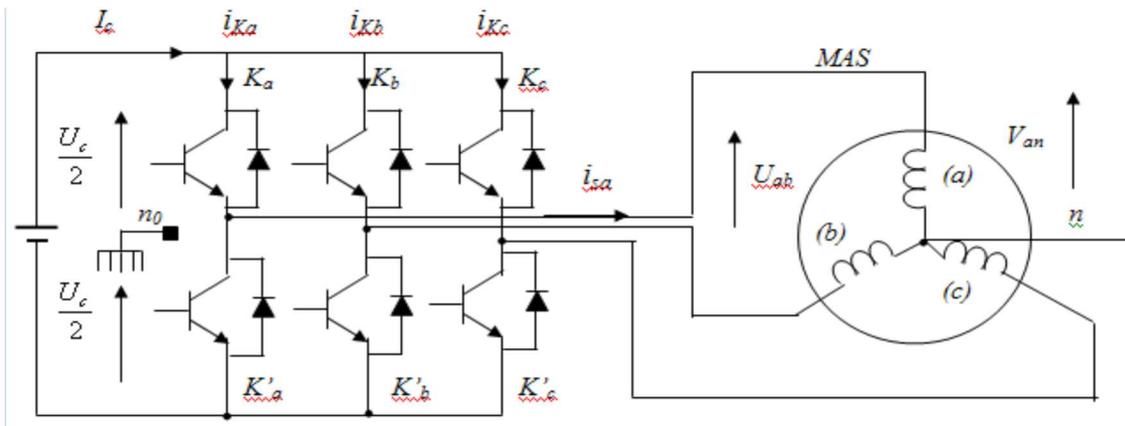


Figure IV.12: Schéma de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

4.2.2 Description et fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux :

Le principe de fonctionnement s'exprime par le séquençage imposé à l'interrupteur statique qui réalise la modulation de la largeur d'impulsions (MLI) des tensions appliquées. Les trois cellules de commutation formant un onduleur triphasé sont bidirectionnelles en courant. Dans l'hypothèse de la conduction continue, on montre que chaque groupe transistor diode, assemblé en parallèle, forme un interrupteur (demi-bras) bicommandable (commande à l'ouverture et à la fermeture), Ainsi que chaque demi-bras possède son complémentaire.

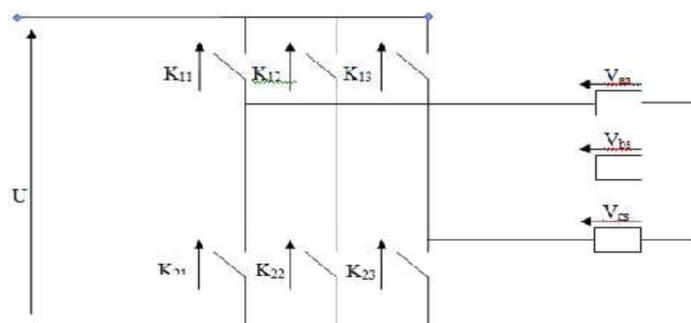


Figure IV.13: Représentation schématique d'un onduleur.

Pour assurer la continuité des courants alternatifs, les interrupteurs K_{nj} doivent être contrôlés de manière complémentaire, chaque interrupteur K_{nj} ($n \in \{1, 2, 3\}$, $j \in \{1, 2\}$) supposé idéalisé introduit une fonction de connexion f_{ci} ; le courant et la tension a ses bornes s'écrivent respectivement :

$$I_{ci} = f_{ci} i_{ci} \text{ et } V_{ci} = (1 - f_{ci}) V_{ci}$$

Avec :

$f_{ci} = 0$: interrupteur ouvert.

$f_{ci} = 1$: interrupteur fermé.

I_{ci} : Courant commuté.

V_{ci} : Tension commutée.

Chaque cellule est formée de deux interrupteurs, comme la conduction est considérée toujours continue, a un instant donne un seul des interrupteurs est ferme de tel sorte qu'il en résulte une liaison rigide entre leurs fonctions de connexion soit :

$$f_{c1} + f_{c2} = 0 \tag{III.1}$$

L'expression des tensions composées est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} U_{12} &= V_{as} - V_{bs} = V_{21} - V_{11} \\ U_{23} &= V_{bs} - V_{cs} = V_{31} - V_{21} \\ U_{31} &= V_{cs} - V_{as} = V_{11} - V_{31} \end{aligned} \tag{III.2}$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle :

$$\begin{aligned} V_{as} &= \frac{(U_{12} - U_{31})}{3} \\ V_{bs} &= \frac{(U_{23} - U_{12})}{3} \\ V_{cs} &= \frac{(U_{31} - U_{23})}{3} \end{aligned} \tag{III.3}$$

En introduisant les fonctions de connexion relatives a chacun d'entre eux, il vient :

$$\begin{bmatrix} U_{12} \\ U_{23} \\ U_{31} \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \tag{III.4}$$

Si on admet que les tensions simples du récepteur forment un système triphasé équilibré, il en découle :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \tag{III.5}$$

La génération des signaux de commande de la modulation se fait le plus souvent en temps réel. Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs on fait appel à l'électronique de commande. La modulation de largeur d'impulsion (MLI) nous permet cette détermination. Pour assurer la détermination en temps réel des instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, on distingue plusieurs types de techniques de modulation de largeur d'impulsion qui peuvent être considérées, dont en

peut citer : La modulation sinus-triangle, la modulation en pleine onde, et la MLI vectorielle (SVM : space vector modulation) ... etc.

La modulation de largeur d’impulsion permet de repousser vers des fréquences, élevées les harmoniques de la tension de sortie ; ce qui facilite le filtrage, la multiplication du nombre des impulsions, formant chacune des alternances d’une tension de sortie, faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie. Offre la possibilité de moduler la forme de cette tension et obtenir une forme d’onde approximant de la sinusoïde.

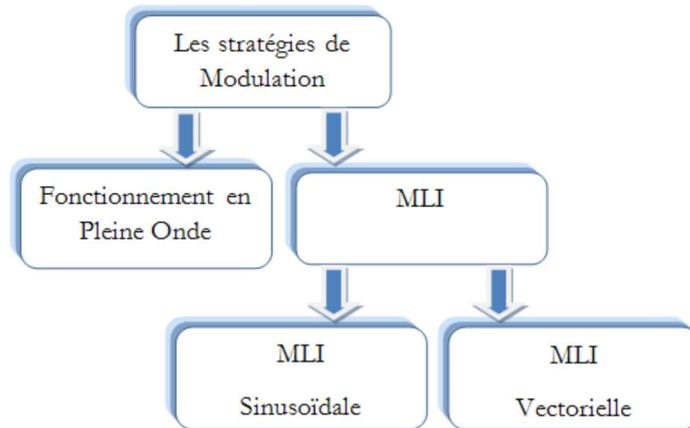


Figure IV.14 : Différentes techniques de commandes.

Maintenant on montre les résultats obtenus en sortie de l’onduleur ;

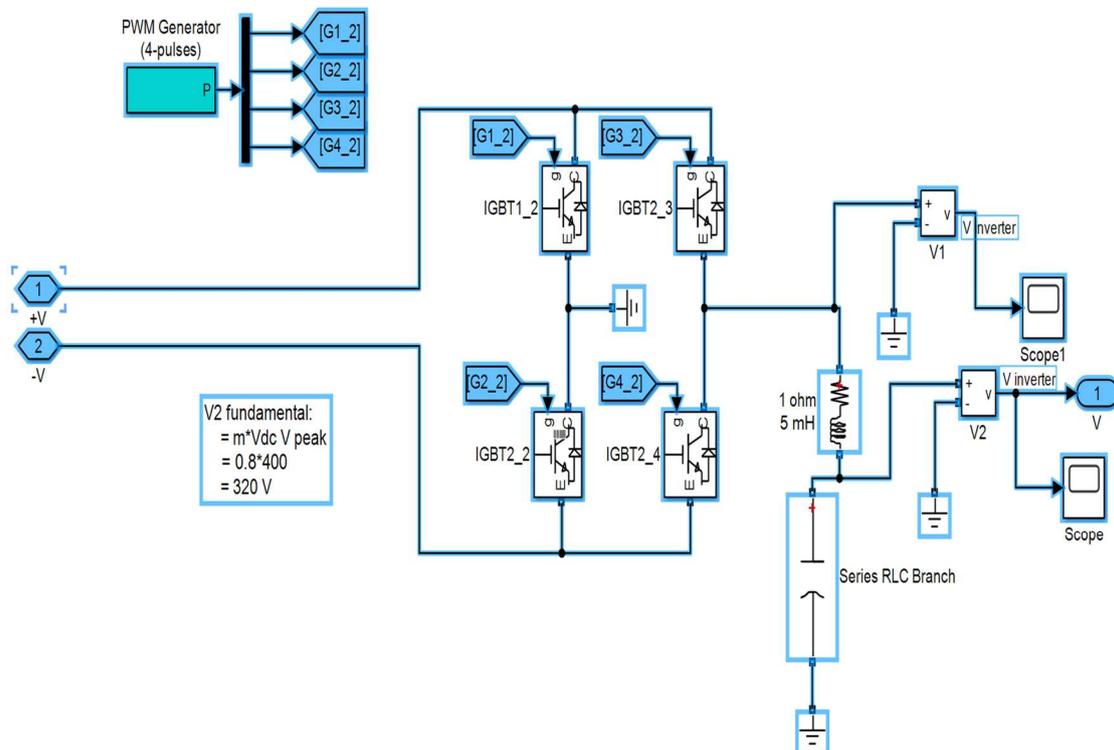


Figure IV.15 : Schéma de l’onduleur de tension à deux niveaux

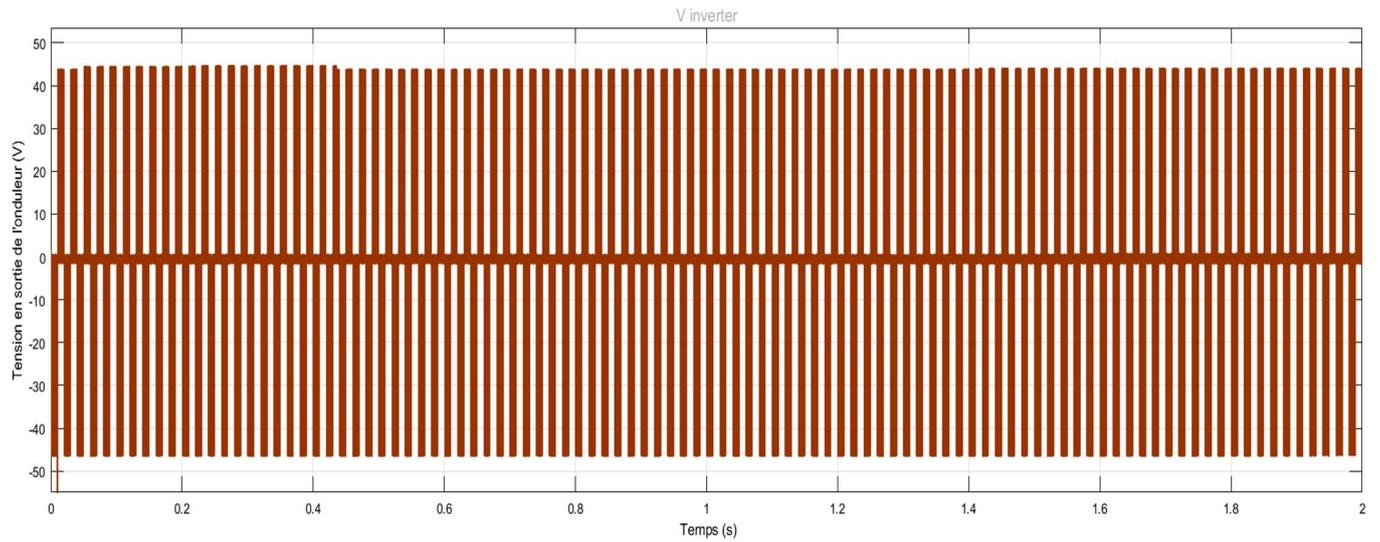


Figure IV.17 : Tension en sortie de l'onduleur à deux niveaux

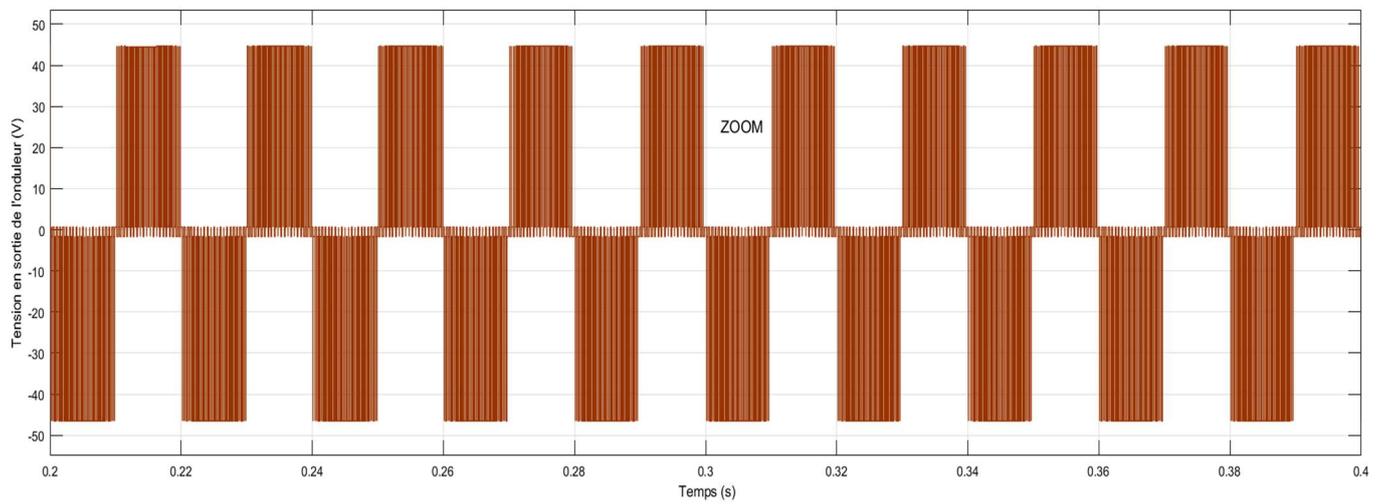


Figure IV.18 : ZOOM de la tension en sortie de l'onduleur à deux niveaux

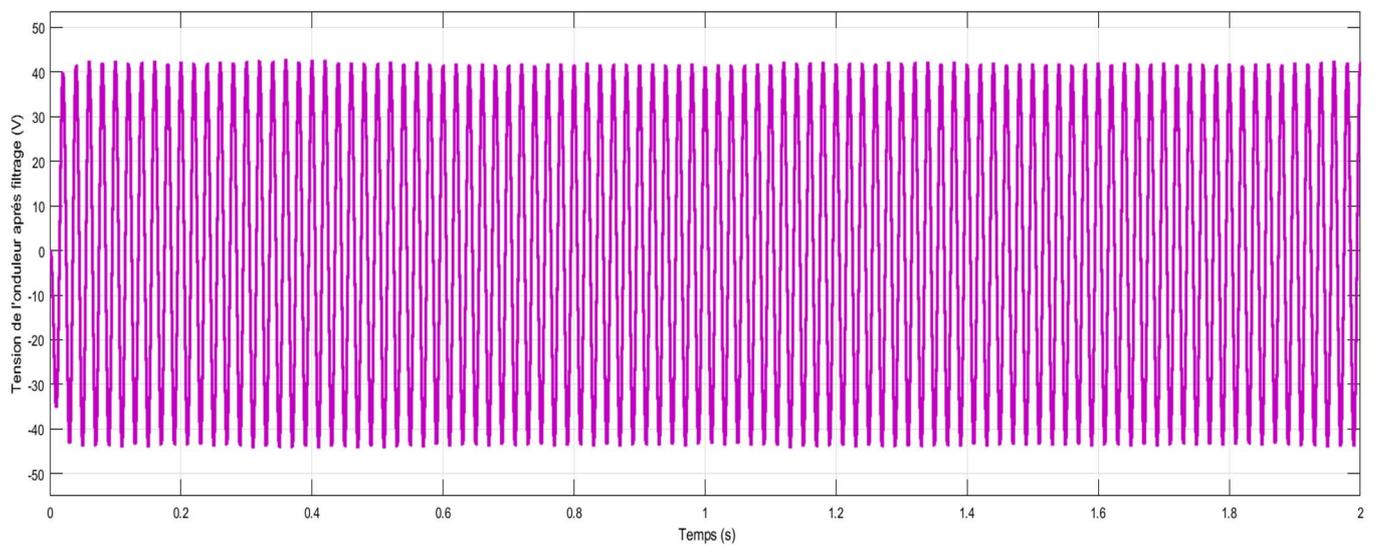


Figure IV.20 : Tension filtrée de l'onduleur

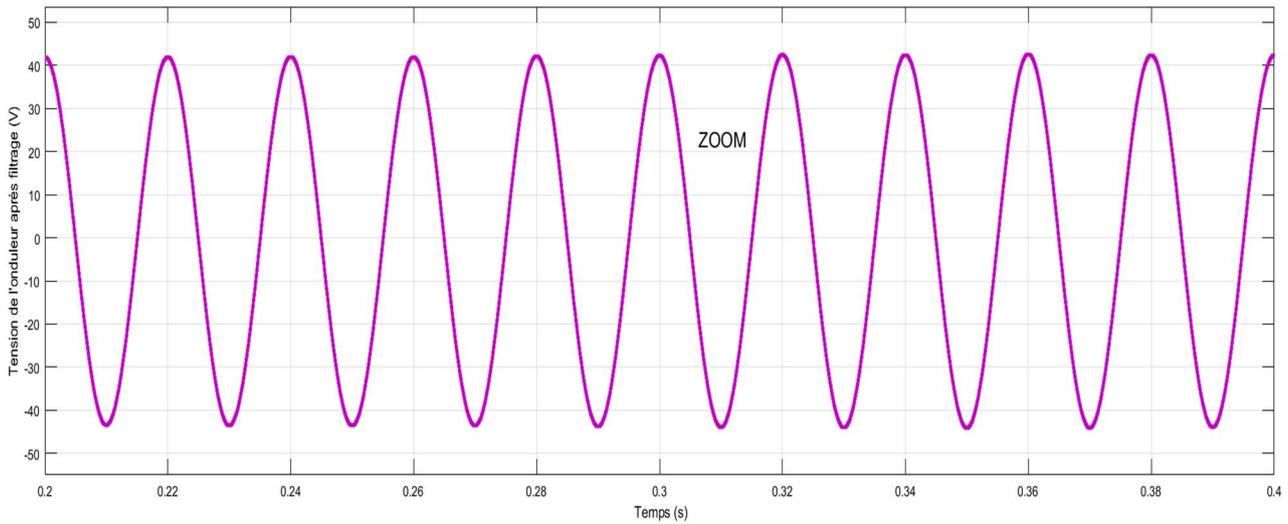


Figure IV.21 : ZOOM de la tension filtrée de l'onduleur

5 Simulation de la chaîne de stockage

Le stockage de l'énergie électrique est principalement réalisé grâce à des accumulateurs électrochimiques. Pour la modélisation et la simulation de la batterie choisie, nous avons pris l'initiative d'exploiter la bibliothèque de Matlab.

Cette chaîne est obligatoire dans les systèmes de production autonomes, ceci afin de garantir la continuité de service et aussi assurer l'équilibre des puissances entre les sources de production et la charge. La chaîne de stockage illustrée dans le système hybride qu'on a présenté est composée de :

- Une batterie de type Nickel-Metal Hybride ;
- Tension nominale : 12V ;
- Capacité : 6.5AH

Les figures ci-dessous illustrent les allures de charge et de décharge de la batterie.

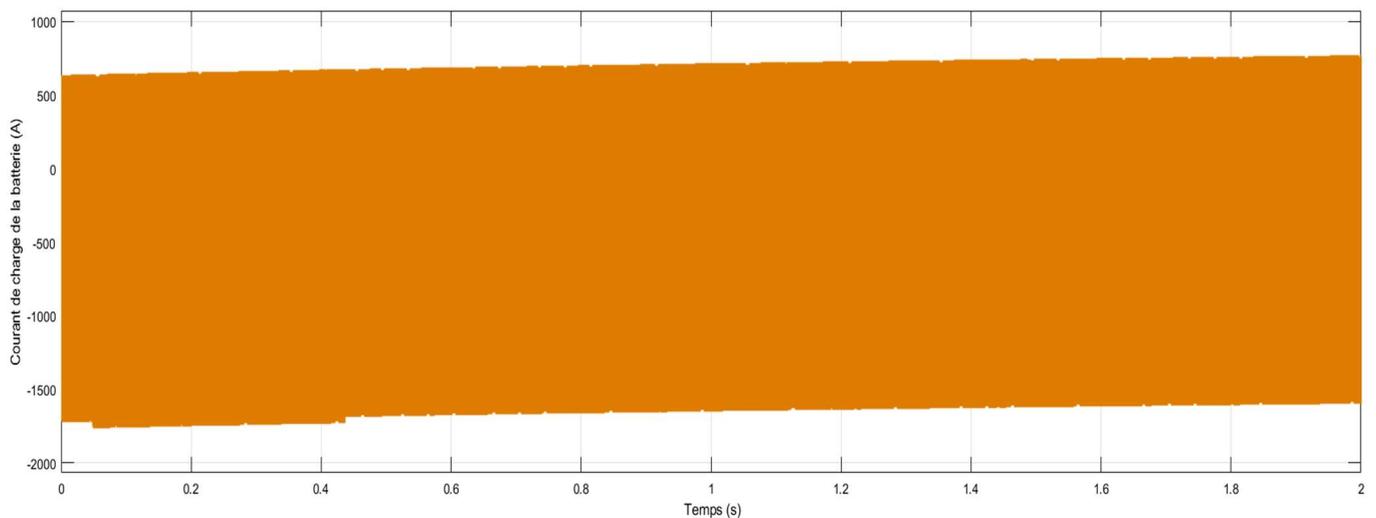


Figure IV.22 : Allure du courant de charge de la batterie

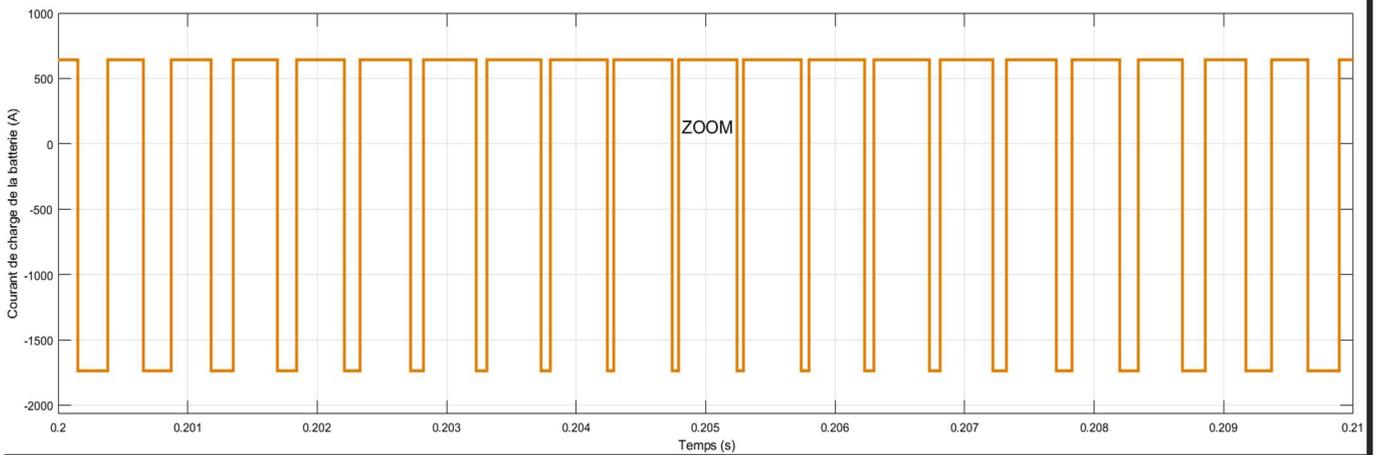


Figure IV.23 : ZOOM du courant de charge de la batterie

6 Présentation du résultat final

Pour avoir un réseau normalisé, on a amplifié la tension de sortie de l'onduleur à travers un transformateur élévateur triphasé comme illustré sur la figure IV.26. La tension obtenue est présentée à la figure IV.27.

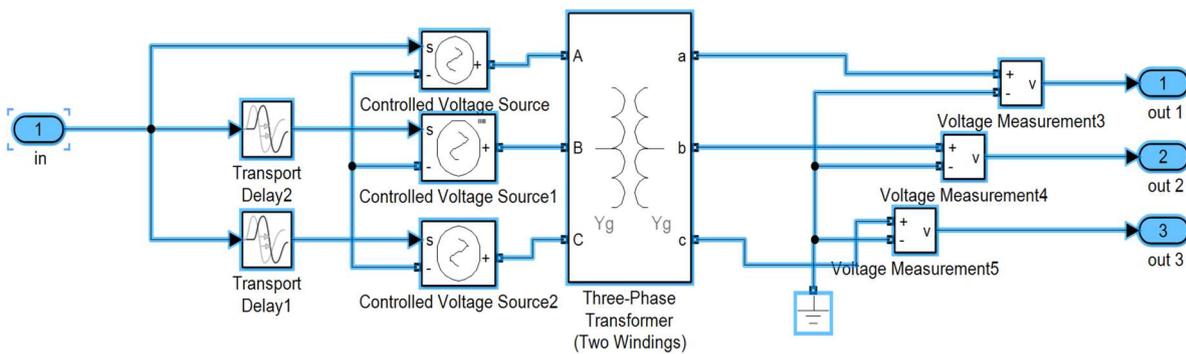


Figure IV.24 : Schéma bloc du transformateur élévateur triphasé

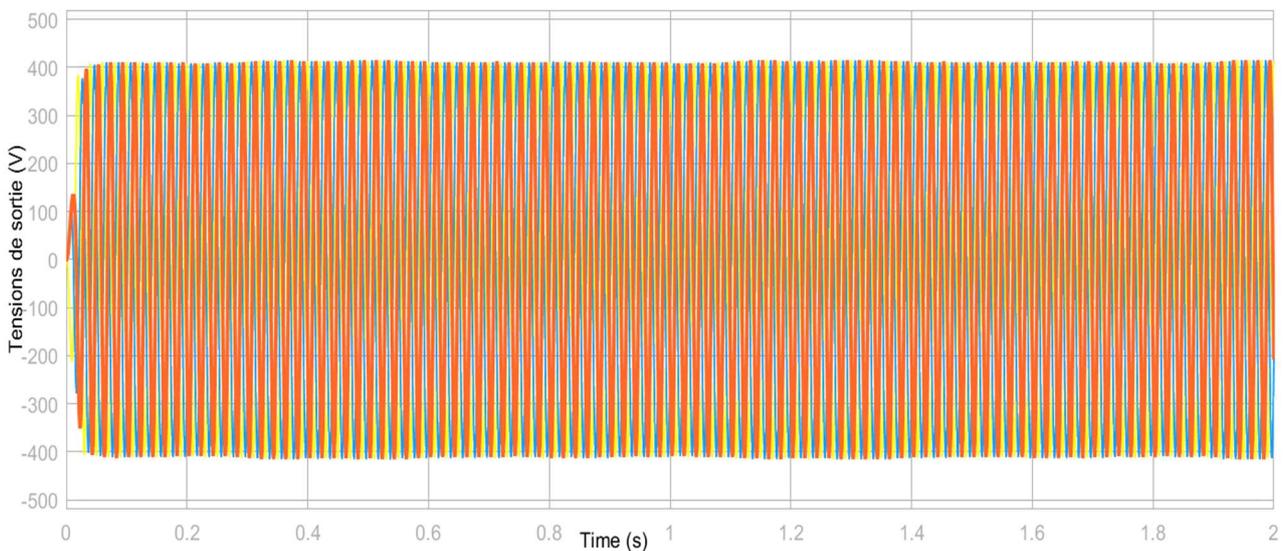
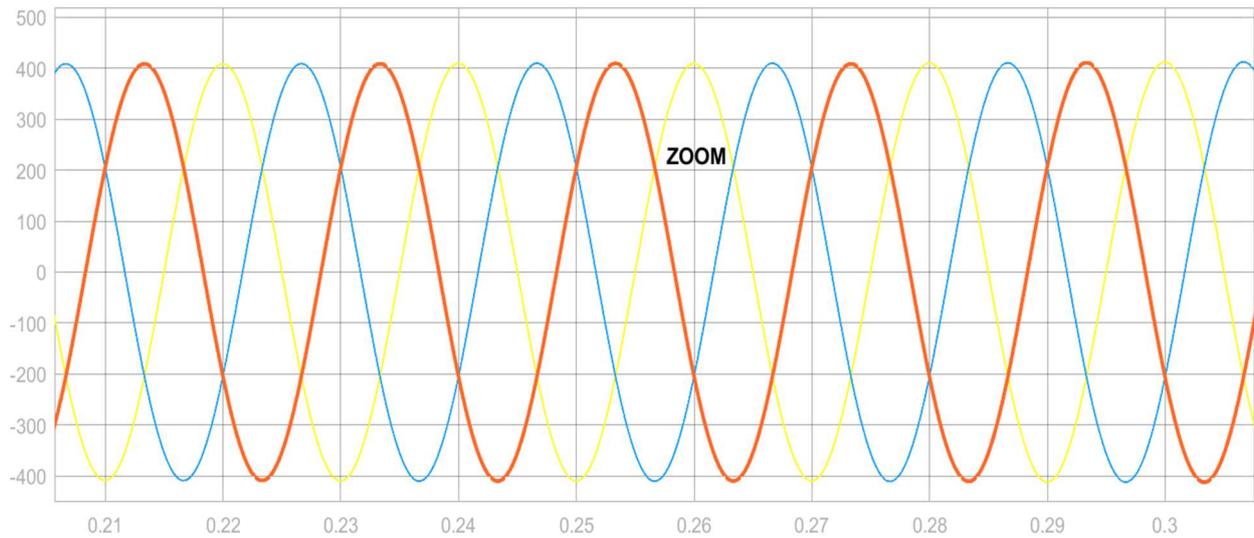


Figure IV.25 : Système de tensions triphasé**Figure IV.26 : ZOOM du système de tensions triphasé**

D'après les résultats de simulation, on constate qu'ils contribuent convenablement à la production de l'énergie électrique ; chaque source a conduit tout le système hybride à satisfaire la demande en puissance de la charge.

Tout le système hybride est basé sur les chaînes de conversion d'énergie renouvelable, comme il est illustré sur les figures (IV.6, IV.7 et IV.26). La majorité de la puissance de la charge est produite à travers ces sources grâce à la commande en puissance.

Les commandes du système de production ne peuvent pas répondre toutes seules aux variations brusques de la demande en puissance. Pour remédier à ce problème, une chaîne de stockage est installée en parallèle du système dans le but de fournir ou d'absorber ce manque de puissance (figures IV.22). Le rôle de la batterie de stockage consiste à garantir la continuité pour que la puissance de la charge soit toujours satisfaite quelque soit les conditions climatiques ou la variation de la charge.

7 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la simulation du système hybride d'énergie électrique constitué d'une éolienne associée à des panneaux photovoltaïques et un système de stockage par batterie. Le système global est présenté dans un premier temps ; ensuite, on a dimensionné les trois sources d'énergie pour les connecter vers un même bus continu par l'intermédiaire des convertisseurs, pour assurer la commande en puissance et assurer une tension du bus continu constante et ce en dépit des variations de la charge. Les résultats des différents blocs réalisés sous environnement Matlab/Simulink ont été discutés.

Conclusion générale

8 Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire était de proposer un système hybride constitué de deux sources d'énergies renouvelables, qui sont un générateur photovoltaïque et une turbine éolienne, tous deux générant de l'énergie de manière complémentaire.

En effet, ce système hybride éolien-photovoltaïque devait servir à l'alimentation en énergie électrique les zones isolées dont le raccordement au réseau est très coûteux et non rentable.

Dans un premier chapitre, un état d'art des différentes sources d'énergie renouvelable, ensuite une présentation et une définition d'un système hybride, ses différents éléments et ses différentes structures. On a choisi l'utilisation de deux sources d'énergie qui sont très concurrentielles et sont presque à maturité par rapport à leur utilisation, ce seront l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne. On a ajouté à ces sources un système de stockage à travers des batteries de condensateurs.

Ensuite, dans un second chapitre on a développé la modélisation des générateurs d'énergie solaire muni d'un dispositif de commande lui permettant de fonctionner en site isolé dans les conditions optimales pour une meilleure exploitation de l'énergie ; ainsi que leurs convertisseurs statiques (hacheur boost et redresseur) nécessaires à la conversion d'énergie électrique solaire.

Nous avons consacré le troisième chapitre aux généralités sur l'énergie éolienne, un bref rappel sur les différents constituants d'un aérogénérateur ainsi que sa modélisation.

Cette étude est suivie par l'étude du générateur placé en aval de la turbine éolienne. Parmi les différentes architectures, on a fini par choisir la machine synchrone à aimants permanents, utilisée en mode générateur. On a développé la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents, après on a utilisé la transformation de Park pour éviter la complexité des équations différentielles ; cette machine offre une multitude d'avantages par rapport à ses concurrentes, surtout pour un fonctionnement à vitesse variable.

Le quatrième chapitre a été réservé à l'étude et la commande du système hybride d'énergie électrique constitué d'une éolienne associée à des panneaux photovoltaïques et un système de stockage, puis à l'interprétation des différents résultats de simulations sur l'environnement MATLAB SIMULINK. Nous avons introduit un régulateur pour la commande de l'hacheur survolteur dont la tension de sortie a été débitée dans un onduleur de tensions à deux niveaux ; ceci dans le but du suivi du point maximum de puissance à travers la technique MPPT. Pour ce faire, nous avons commencé dans un premier temps par donner une présentation du

Conclusion générale

système global. Puis nous avons dimensionné les deux sources d'énergie qui le compose. Ensuite nous les avons connectés vers un même bus continu par l'intermédiaire des convertisseurs, pour assurer la commande en puissance et assurer une tension du bus continu constante et ce en dépit des variations de la charge.

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

- La validation expérimentale d'un système hybride d'énergie électrique constitué d'une éolienne associée à des panneaux photovoltaïques et un système de stockage.
- La validation expérimentale de la commande en puissance du convertisseur MLI de la chaîne éolienne.
- La validation expérimentale du système de gestion.
- Proposition d'autres algorithmes de gestion du système hybride, à savoir la logique floue et les réseaux de neurones...etc.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1]. A. Labouret, P. cumunel, J-P.Braun, "Cellules Solaires Les Bases de L'énergie Photovoltaïque", Dunod, Paris 2001.
- [2]. Zarour Laid « étude technique d'un système d'Energie hybride photovoltaïque-eolien hors réseau » Thèse de doctorat de l'université Mentouri de Constantine ; le 10 / 07 / 2010.
- [3]. B. Azoui et al, "Sizing and Optimization models for photovoltaic pumping system Using BLDCM Motor", AMSE, pp 55-69, 2003.
- [4]. Seghir BENHALIMA « Modélisation et Contrôle des Systèmes Éoliens-Solaire Intégrés au Réseau VSC-HVDC » THÈSE PRÉSENTÉE à l'école de technologie supérieure comme exigence partielle à l'obtention de doctorat en génie ph.d. Montréal, le 27 juin 2019
- [5]. E. Matagne, R. El Bachtiri, "A method for in situ Determination of the Junction Temperature of Solar Modules and its Potential Applications, " Proceeding of the International Conference Metrology & Measurement Systems - METSIM'2003, Bucharest, October 2003, ISBN973-8067-86-3, 2003, 1-8.
- [6]. W.A. Beckman, J. Thorton, "Control Problem in Solar Domestic Hot Water Systems", Solar Energy, Vol 27, No5, pp, 23- 28, 1991.
- [7]. Eckstein, J.H. "Detailed Modelling of Photovoltaic Components" MS thesis, SolarEnergy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1990.
- [8]. Townsend, T. U. "A Method For Estimating The Long Term Performance of Direct-Coupled Photovoltaic Systems".MS Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [9]. Bryan F. "Simulation of Grid-Tied Building Integrated Photovoltaic Systems". MS thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1999
- [10]. R. Chenni, M. Makhlof, T. Kerbache, A. Bouzid, "A Detailed Modeling Method for Photovoltaic Cells", Science Direct Solar Energy 32 pp 1724-1730, 2007.
- [11]. E. Matagne E., Chenni R, El Bachtiri R, "A photovoltaic Cell Model Based on Nominal Data Only" Proceeding of the International Conference Metrology & Measurement Systems - METSIM'2003, Bucharest, October 2003, ISBN973-8067-86-3, 2003, 1-8.
- [12]. ARDJOUN Sid Ahmed El Mehdi " Commande d'un système d'énergies renouvelables multi sources relié au réseau électrique » Thèse de doctorat de l'université Djillali Liabes de sidi-bel-abbes ; le 18/ 04 / 2016.
- [13]. R. Chenni, L. Zarour, E. Matagne, A. Bouzid, "Optimisation d'un Système de Pompage Photovoltaïque " Sciences & Technologie B – N°26, décembre (2007), 49-54.
- [14]. H. Camblong, " Minimisation de l'impact des Perturbations D'origine Eolienne dans la Génération Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable ", Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux ,2003.

Références Bibliographiques

- [15]. A. D. Diop, C. Nichita, "Modelling of a Variable Pitch Haut Characteristics for a Real Time Wind Turbine Simulator", *Wind Eng.*, 23(4), pp. 225-243, 1999.
- [16]. S. El Aimani, " Modélisation des Différentes Technologies D'éoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension", Th. Doctorat, Ecole Centrale de Lille ,2004.
- [17]. R. Hammouche, 'Atlas Vent de l'Algérie', Office National de la Météorologie, Alger, 1991.
- [18]. B. Milton, " Le Génie Electrique dans le Vent, Etat de L'art et Recherches dans le Domaine de la Génération Eolienne" JCGE 03 Saint Nazaire, 2003
- [19]. H. De Battista, R. J. Mantz, and C. F. Christiansen, "Dynamic sliding mode power control of wind driven induction generators," *IEEE Trans.Energy Convers.*, vol. 15, no. 4, pp. 451–457, Dec. 2000.
- [20]. C. Nichita, D. Luca, "Large Band Simulation of the Wind Speed for Real Time Wind Turbine Simulator", *IEEE Trans Energy. Conv.*, vol.17, n°4, pp.523 - 529, December 2002.
- [21]. C. Nichita, D. Luca, "Large Band Simulation of the Wind Speed for Real Time Wind Turbine Simulator", *IEEE Trans Energy. Conv.*, vol.17, n°4, pp.523 - 529, Dec 2002.
- [22]. A. Mirecki, "Réalisation Pratique d'une Chaîne de Conversion D'énergie et L'implantation d'un MPPT pour une Eolienne Débitant sur Réseau Autonome", LEEI, Août 2001.
- [23]. S. Boux de Casson, "Modélisation et Simulation D'architectures de Conversion de Puissance Associées à une Commande MPPT Destinée à Optimiser la production Electrique d'une Eolienne", Octobre 2001.
- [24]. P. Barret, "Régime Transitoires dans les Machines Tournantes", Eyrolles, Paris1982.
- [25]. Fartas Hafsia « étude, modélisation et simulation d'un système hybride autonome éolien-photovoltaïque » Mémoire de Master de l'université Badji Mokhtar Annaba ; 2019.
- [26]. J. Chatelian."Machine Electrique" Traité d'électricité vol 10, édition géométrie 1983.
- [27]. M. Lajoie-Mazene, Ph. Viarouge, "Alimentation des Machines Synchrones " Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, D3630.
- [28]. H. Bühler, "Electronique de Puissance", Presses Polytechniques Romandes, 1989
- [29]. G. Séguier et F. Labrique. "Les Convertisseur de L'électronique de Puissance, et Comportement Dynamique", Tome5, Technique et documentation –Lavoisier, 1998.
- [30]. J. P. Hautier, J, P. Caron, Convertisseur Statique, Méthodologie Causale de Modélisation et de Commande, Edition Techip
- [31]. A. Djahbar. "Commande Vectoriel d'une Machines Asynchrone Alimentée en Tension", Ecole Nationale Polytechnique, 1995
- [32]. S. Barkati, "Commande Robuste par Retour D'état d'une Machine Asynchrone", Thèse de Magister, ENP, 1997
- [33]. J. caron J. Hautier, "Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone", Technips-Paris, 1995.

Références Bibliographiques

- [34]. L. Mazence. "Les Techniques de Commande Vectorielle des Machines Asynchrones Destinées à la Variation de Vitesse à Haute Performance ", électricité de France, Janv. 1992.
- [35]. Madaci Bouthaina « Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multisystèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs » Thèse de doctorat de l'université des Frères Mentouri Constantine ;2018.
- [36]. D. Doncker RW. "Parameters sensitivity of indirect universal field-oriented controllers "IEEE Trans., Power Electronics 1994.
- [37]. F. Messai," Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réductance Variable.".Thèse de Magister Institut d'électrotechnique Université mentouri constantine2009
- [38]. J. Appelbaum, "Starting and Study State Characteristics of DC Motors by Solar Cell ". Solar Energy, Vol. EC-1, N°1, pp17-25, March1989.
- [39]. Hassaine Mohamed nabil « Commande floue d'un générateur synchrone à aimants permanents (GSAP) intégré dans un système éolien » mémoire de master de l'Université d'Oran 2 ;2020.
- [40]. W.R. Anis, H. Metwally," Dynamic Performance of a Directly Coupled PV Pumping System", Solar Energy, Vol.53, N°4, pp369-377, 1994.
- [41]. Gabriele GRANDI, Domenico CASADEI, "Dynamic Performance of a Power Condition Applied to Photovoltaic Sources ", EPE-PEMC, Dubrovnik & Cavtat. pp. 01-10, 2002.
- [42]. Mahammedi Abdellatif « Etude et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque » Thèse de magister de l'université Ferhat Abbas –Setif1 ; 2014.
- [43]. R Duzat. "Analytic and Experimental Investigation of a Photovoltaic Pumping System", PhD thesis, Oldenburg University 2000.
- [44]. A. Tlemçani, H. Chekireb, M. Boucherit, "Perturb and Observe MPPT Technique Robustness Improved", IEEE pp 845- 850, 2004.
- [45]. F. Nicola, G. Petrone, " Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Poin Tracking Method ", IEEE. Vol.20, N°4, pp.963-973, 2005.
- [46]. T. Ching - Pan et al. "A Fast Maximum Power Point Trackers for Photovoltaic Power Systems " IEEE, 1999, pp 390-393.
- [47]. B. Azoui et al, "Photovoltaic Pumping System with NdFeB Brushless DC Motor", Electromotion, pp 19-27, 2001.
- [48]. A. Betka, A. Moussi, "Performance Optimization of a Photovoltaic Pumping System Based on Induction Motor Drive", Renewable Energy, Vol 29, N° 1, pp 2167- 2181,2004.
- [49]. L Zarour, R. Chenni, A Bouzid, T Kerbache " Optimisation de la performance d'un Système de Pompe Photovoltaïque à l'aide d'un Moteur Asynchrone", International Conférence on Electrotechnics, University of science and Technology of Oran ICEL2005.
- [50]. M. Mimouni, N. Mansouri, "Vectorial Command of an Asynchronous Motor Fed by a Photovoltaic Generator", Renewable Energy 29 (2004) 433–442

Références Bibliographiques

- [51]. Laroui Rachid « Modélisation et simulation d'un système multi-sources Photovoltaïque-éolien-diesel dans la région d'Adrar » Mémoire de Magister de l'Université Ahmed Draya Adrar ; 2015.
- [52]. C. Cabal, C. Alonsol, "Adaptive Digital MPPT Control for Photovoltaic Applications". IEEE Trans Power Electronics, pp 2414-2419, 2007.
- [53]. L Zarour, R. Chenni, A. Borni, A Bouzid, "Improvement of Synchronous and Asynchronous Motor Drive Systems Supplied by photovoltaic Arrays with Frequency Control", Journal of Electrical Engineering Volume59 N°4 2008 pp169-177.
- [54]. N. Hamrouni, M. Jraidi, "Measurements and Simulation of PV Pumping Systems Parameters using MPPT and PWM Control Strategies" IEEE MELECON 2006, May 16-19, Benalmádena (Málaga), Spain 2006
- [55]. R. Chenni, L Zarour, M. Amarouayache, A Bouzid, A New Design for Analogue Maximum Power Point Tracking " International Review of Electrical Engineering - February 2008.
- [56]. R Chedid, Y Saliba " Optimization of Autonomous Solar-Wind Power Systems for Lebanon", Solar Energy, pp. 51 1-5 17. (1996)
- [57]. Martin Taïki Vaïtchemén « modélisation et simulation d'un système de stockage intégré dans un micro-réseau autonome solaire-éolien » Thèse de doctorat de l'université du Québec en Abitibi Témiscamingue ; 2019.
- [58]. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, " Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method ", IEEE. Vol.20, N°4, pp.963-973, 2005.
- [59]. B. S. Borrowsy and Z. M. Salameh, "Methodology for Optimally Sizing the Combination of Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System, " IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 12, no. 1, Mar. 1997
- [60]. H. D Battista, P. F. Puleston, "Sliding Mode Control of Wind Energy Systems with DOIG. Power Efficiency and Torsional Dynamics Optimization, " IEEE Trans. Power Syst., vol. 15, no. 2, pp. 728–734, May 2000
- [61]. F. Valenciaga and P. F. Puleston, "Supervisor Control for a Stand-Alone Hybrid Generation System Using Wind and Photovoltaic Energy, " IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, N°. 2, June 2005.
- [62]. Shigeo Morimoto, " Sensorless Output Maximization Control for Variable-Speed Wind Generation System Using IPMSG, " IEEE Transactions on industry applications, Vol. 41, N). 1, January/February 2005.
- [63]. E. H. Mamdani, "Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis", IEEE Trans. Computer, Vol. 26, N°.12, pp.1182-1191, December1977.
- [64]. M. Sugeno, G. T. Kang, "Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control", IEEE Trans. Syst. Man. Cybern, Vol. 15, pp.116-132, 1985
- [65]. L.Zadeh, "Fuzzy sets, Information and Control", Vol.8, pp.338-353, 1965.

Références Bibliographiques

- [66]. J. M. Mendel, "Fuzzy systems for Engineering A Tutorial", IEEE Proc, Vol. 83, N°3, pp 347-377, March, 1995
- [67]. J. R. Jang, "Neuro-Fuzzy Modeling and Control", Proc. Of IEEE, Vol.83, N°.3, pp378-406, March, 1995.
- [68]. A. J. Fossard, "Commande à Structure Variable, Systèmes de Régulation, Collaboration Automatique", Editions Masson, 1996.
- [69]. A.Z. Mohamed, M.N. Eskander "Fuzzy logic control based maximum power point tracking of a wind energy system" Renewable Energy 23, pp : 236-244, 2001.
- [70]. Y. Tang, L. Xu, "Vector Control and Fuzzy Logic Control of a Doubly fed Variable Speed Drive with DSP Implementation", IEEE trans. Pp 661-667, 1995
- [71]. K. Benlarbi., " Fuzzy, Neuronal and Neuro-Fuzzy Optimization of a Photovoltaic Water Pumping System driven by DC an AC Motors " Master Thesis (in French). University of Batna, Algeria. 2003
- [72]. K. Benlarbi., L. Mokrani" A Fuzzy Global Efficiency "Optimization of a Photovoltaic Water Pumping System "Solar energy 77, pp203-216 (2004)
- [73]. D. Rekioua, Z. Roumila et T. Rekioua « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel » Revue des Énergies Renouvelables Vol. 11 N°4 (2008) 623 – 633.
- [74]. IZGHECHE yousra « Estimation de la vitesse de la machine d'une éolienne » mémoire de master de l'université Badji Mokhtar Annaba ; 2019.
- [75]. Waleed Obaid, A-K.Hamid, Chaouki Ghenai « Wind-Fuel-Cell-Solar Hybrid Electric Boat Power Design with MPPT System” 2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO).
- [76]. Meflah AIssa « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque » Mémoire de Magister de l'université Abou Bakr Belkad- Tlemcen, 2011.
- [77]. D. Saheb-Koussa et M. Belhamel « Système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel) à fourniture d'énergie électrique totalement autonome » Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda (2007) 67 – 70.
- [78]. Mouna Abarkan, N. K. M'Sirdi “ modélisation et simulation d'un système de production d'énergie renouvelable multi-sources et multi-utilisateurs » Revue Méditerranéenne des Télécommunication Vol. 4, N° 2, October 2014.
- [79]. A.Al. Amoudi, L.Zhang, " Application of radial basis function networks for solar array modelling and maximum power-point prediction ", IEE Proceedings. Online, Vol 147, No 5 pp310-316, September, 2005.
- [80]. Boutabba Tarek « Contribution à la modélisation et à la commande d'un système de génération hybride Solaire-Eolien » Thèse de doctorat de l'Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd ; 2018.