

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة

UNIVERSITE Dr. TAHAR MOULAY – SAIDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de

Master en Electronique

Option :Electronique Instrumentation

THEME

**Défits et solutions associés à la génération hybride
d'énergie solaire et éolienne**

Présenté par
Mahammedi Hocine

Soutenu publiquement, le 24/09/2024 devant le jury composé de :

Dr BellilAmeur	Président	MA	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Dr. Bensaad Abdellah	Examineur	Dr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Pr. Driss Khodja Fatima Z	Encadreur	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda

Année Universitaire 2023- 2024



Remerciements

*A*vant tout, je remercie le bon Dieu de m'avoir aidé à réaliser ce présent travail.

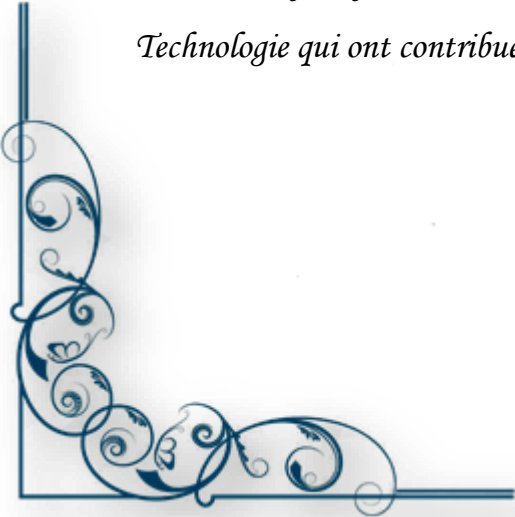
*C*e travail a été effectué sous la direction de Madame **Driss Khodja Fatima Zohra**, Professeur à l'Université de Saïda. Je tiens à la remercier pour la confiance qu'elle m'a témoignée, pour la disponibilité dont elle a fait preuve tout le long de ce travail et ses conseils judicieux me furent d'une très grande utilité.

*E*n toute complémentarité, Monsieur **Yahi Youcef**, Doctorant à l'Université de Saïda, a co-dirigé ce travail. Il a suivi ce travail avec beaucoup d'intérêt. J'ai bénéficié pour la réalisation d'une partie de ce travail de son aide. Je lui exprime ma profonde reconnaissance pour son attention, sa disponibilité et ses encouragements.

*J*e suis reconnaissant à Monsieur **A. Bellil** Maître assistant à l'Université de Saïda, pour l'attention qu'il a portée à ce travail et je le remercie d'avoir accepté de présider le Jury.

*J*e tiens à manifester ma gratitude à Monsieur **A. Bensaad** Maître de Conférences à l'Université de Saïda, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail et je le remercie d'avoir accepté de faire partie du Jury.

*E*nfin, j'adresse mes vifs remerciements à tous les enseignants de la faculté de Technologie qui ont contribué à ma formation.





Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donnée la vie, le symbole de
tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, **A ma mère***

***A mon père** école de mon enfance*

Que dieu les garde et les protège

A mes chers frères et mes sœurs

A tous mes amis et connaissances

*Je vous dédie ce travail, témoignage de ma profonde reconnaissance et mon
plus grand attachement.*



ملخص:

إن استعمال الموارد المتجددة عرف تطورا كبيرا في البلدان المصنعة وأيضا في بعض الدول السائرة في طريق النمو. هذا العمل يأخذ في دراسة نظام هجين للطاقة (الرياح - الفوتونية)، غير متصل بالشبكة الكهربائية، يستعمل في تغذية حمولة معزولة. النظام الطاقوي المدروس في هذه المذكرة من النوع الهجين يحتوي على نوعين من الطاقات المتجددة (الرياح - الفوتونية) متصلة بمحولات الضبط وهي محولات الطاقة الكهربائية المطبقة في منطقة معزولة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة، الرياح، الفوتونية، محولات الضبط، نظام الطاقة الهجين

Abstract:

The use of renewable resources has been a great growth in the industrialized countries and even in some underdeveloped countries.

This work focuses on the study of hybrid system (photovoltaic-wind), not connected to the electricity grid, and used to supply an isolated load.

The energy system studied in this memory is hybrid with two renewable energy sources (solar and wind) coupled and connected to a control electrical transducers and static converter applied in an isolated site.

Keywords: Renewable energy, wind, photovoltaic, static converter, hybrid system

Résumé :

L'exploitation des ressources renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés.

Ce travail porte sur l'étude d'un système hybride d'énergie (photovoltaïque -éolien), non connecté au réseau électrique, utilisé pour alimenter une charge isolée.

Le système énergétique étudié dans cette mémoire est de type hybride à deux sources d'énergies renouvelables (solaire et éolienne) couplées à des convertisseurs statiques d'adaptation et de conversion des formes d'énergie électrique avec une application au site isolée.

Mots clés : énergies renouvelables, photovoltaïques, éolienne, convertisseur statique, système hybride.

Table des matières

TABLE DES MATIERES

Résumé.....	I
Table des matières.....	II
Liste des tableaux.....	V
Liste des figures.....	VI
Liste des abréviations.....	VIII
Introduction générale.....	01

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques et l'énergie éolienne

I.1 Introduction.....	03
I.2 Les énergies	03
I-2-1- Les sources non renouvelables	03
I-2-2- Les sources renouvelables	03
I.3 Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque	04
I.4 Cellule photovoltaïque	04
I.4.1 Cellule solaire	05
I.4.2 Historique des cellules photovoltaïques	06
I.4.3 Structure de la cellule photovoltaïque	07
I.4.3.1 Dopage des cristaux	07
I.4.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	09
I.4.5 Effet photovoltaïque	10
I.5 Différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)	10
I.5.1 Les cellules mono-cristallines.....	10
I.5.2 Les cellules en silicium poly-cristallin.....	11
I.5.3 La cellule au silicium Amorphe	11
I.6 Système de conversion	12
I.6.1 le convertisseur continu-continu.....	12
I.6.2 Le convertisseur continu- alternatif.....	12
I.7 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	13
I.7.1 Avantages.....	13
I.7.2 Inconvénients.....	13
I.8 Energie éolienne.....	13
I.8.1 Définition de l'énergie éolienne.....	13
I.8.2 Notions théoriques sur l'éolien.....	14
I.8.2.1 Loi de Betz - notions théoriques.....	14
I.8.2.2 Distributions de Weibull.....	15
I.8.3 Principe de fonctionnement.....	17
I.8.4 Caractéristiques de l'éolienne.....	18
I.8.4.1 Modèle du vent.....	18
I.8.4.1.1 Energie cinétique du vent.....	18
I.8.4.1.2 Limite de Betz/Formule de Betz.....	18
I.8.4.2 La puissance éolienne incidente du vent.....	19
I.8.4.3 La vitesse spécifique (Paramètre de rapidité).....	19
I.8.4.3.1 L'équation analytique de C_p en fonction de λ	20
I.8.4.3.2 Le rendement aérodynamique de l'éolienne.....	20
I.8.4.3.3 Le couple développé sur le rotor de l'éolienne.....	20
I.8.4.4 Fonction de probabilité de densité de Weibull.....	21
I.8.4.5 La distribution de Rayleigh.....	21
I.8.4.6 Loi de Davenport et Harris.....	22
I.8.5 Puissance récupérable par une turbine.....	22

I.8.6 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	26
I.8.7 Les différents types d'éoliennes.....	27
I.8.7.1 Eolienne à axe horizontal.....	27
I.8.7.2 Eolienne à axe vertical.....	28
I.8.8 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	30
I.9 Conclusion.....	31

Chapitre II : Convertisseurs (DC-DC) et (DC-AC)

II.1 Introduction.....	32
II.2 Les convertisseurs DC/DC.....	32
II.2.1 Principe de la conversion.....	33
II.2.2 Types d'hacheur.....	33
II.2.2.1 Hacheurs réversibles.....	34
II.2.2.2 Hacheurs non réversibles.....	34
II.2.2.3 Les types des hacheurs non réversibles.....	35
II.2.3 Evaluation des performances du hacheur survolteur (Boost).....	38
II.2.4 Applications des convertisseurs DC/DC.....	38
II.3 Les convertisseurs DC/AC (onduleurs).....	39
II.3.1 Principe de la conversion.....	39
II.3.2 Types des onduleurs.....	39
II.3.3 Evaluation des performances de l'onduleur monophasé.....	40
II.3.4 Applications des onduleurs.....	41
II.4 Définition de la commande PWM.....	42
II.4.1 Définition.....	42
II.4.2 Applications	42
II.4.3 Fonctionnement.....	42
II.5 Conclusion.....	44

Chapitre III : Modélisation et commande des systèmes PV et éolien

III.1 Introduction.....	45
III.2 Modélisation du module photovoltaïque.....	45
III.3 Identification des paramètres du GPV en utilisant le modèle d'une cellule réelle...	47
III.4 L'adaptation de l'énergie PV par les convertisseurs de puissances.....	48
III.5 Amélioration des performances d'un système photovoltaïque par la méthode MPPT.....	49
III.5.1 Amélioration de la Méthode.....	49
III.5.2 Définition de la commande PWM.....	50
III.6 Conversion de l'énergie éolienne.....	51
III.7 Modèle de rotor de turbine éolienne.....	52
III.8 Modélisation de la partie électrique.....	52
III.9 Modélisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	53
III.10 Conclusion.....	54

Chapitre IV : Simulation et Interprétation des résultats

IV.1 Introduction.....	56
IV.2 Présentation du logiciel de simulation MATLAB/SIMULINK.....	56
IV.3 Simulation de la MADA.....	56
IV.4 Simulation de la stratégie de commande.....	57
IV.5 Simulation du système hybride de conversion d'énergie (Éolienne - photovoltaïque).....	58
IV.6 Interprétation des résultats.....	59

IV.6.1 Système photovoltaïque.....	60
IV.6.2 Résultat de la simulation du système éolien.....	64
IV.6.3 Alimentation de la charge Moteur DC.....	67
IV.7 Conclusion.....	68
Conclusion générale.....	70
Référence bibliographiques	71

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1-1	Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement.....	16
Tableau I-2	Eolienne WS-400.....	23
Tableau I-3	Puissance mensuelle obtenue.....	25
Tableau II-1	Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC.....	34
Tableau III-1	Caractéristiques du module Solarpeace P6Y-230.....	46
Tableau IV-1	Les caractéristiques électriques de la machine MADA.....	57

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1	Schéma de différentes énergies non renouvelables.....	03
Figure I.2	Schéma de différentes énergies renouvelables	04
Figure I.3	Cellule photovoltaïque	05
Figure I.4	L'énergie solaire.....	06
Figure I.5	Structure d'une cellule solaire.....	07
Figure I.6	Diode fabriquée à partir d'une jonction PN.....	08
Figure I.7	Dopage de type N-P.....	08
Figure I.8	Structure d'une cellule photovoltaïque.....	09
Figure I.9	Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	10
Figure I.10	Le type de cellule monocristalline	11
Figure I.11	type de cellule poly cristalline	11
Figure I.12	Le type de Cellule photovoltaïque amorphes.....	12
Figure I.13	Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	14
Figure I-14	Exemple de la rose des vents	16
Figure I-15	Exemple de la distribution de Weibull	17
Figure I-16	Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée λ	20
Figure I-17	Distribution de la vitesse du vent et de l'énergie correspondante pour différents couples de paramètres de la distribution.....	21
Figure I-18	Courbe de puissance relative à l'éolienne WS-400.....	23
Figure I-19	Vitesse du vent à l'ULFG1 en 2006.....	24
Figure I-20	Courbe de puissance après programmation sur Matlab.....	24
Figure I-21	Energie fournie en kWh pour l'année 2006.....	25
Figure I-22	Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du Vent.....	26
Figure I-23	Eolienne à axe horizontal (Modèle Fortis Montana).....	28
Figure I-24	Eolienne de type Darrieus (Wind Wall).....	29
Figure I-25	Eolienne de type Savonius (Wind Side).....	29
Figure II-1	Différents types de hacheurs	35
Figure II-2	Schéma réel du Convertisseur buck	35
Figure II-3	Convertisseur survolteur (Boost-converter)	36
Figure II-4	Circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur	37
Figure II-5	Schéma de base d'un convertisseur «CUK».....	38
FigureII-6	Schéma de base d'un convertisseur «ZETA».....	38
Figure II-7	Schéma de principe de la conversion Continue - Alternative (DC-AC).....	39
FigureII-8	Onduleur non autonome	40
Figure II-9	Boîtier onduleur hybride ImeonEnergy	40
Figure II-10	La valeur moyenne est récupérée simplement par un filtre passe bas.....	42
Figure II-11	Signal de commande PWM.....	43
Figure III-1	Module Solarpeace P6Y-230.	45
Figure III-2	Schéma équivalent du modèle à une diode	47
Figure III-3	Schéma de la courbe tension-courant.....	48
Figure III-4	Courbe tension-puissance avec les caractéristiques courant-tension puissance-tension d'un système photovoltaïque	49
Figure III-5	L'algorithme de Perturbation et Observation (P&O).....	50
Figure III-6	Modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	51
Figure III-7	Schéma simple d'une éolienne.....	52
Figure III-8	Schéma de la MADA connecte au réseau.....	54

Figure III-9	Caractéristique de la production d'énergie de la MADA et machine asynchrone à cage	54
Figure IV-1	Schéma bloc de machine la MADA connectée à une turbine.....	57
Figure IV-2	Modèle Simulink pour la commande MPPT	58
Figure IV-3	Modèle Simulink pour la génération du signal PW	58
Figure IV-4	Schéma global d'un système hybride photovoltaïque- éolien.....	59
Figure IV-5	Variation de la tension de sortie de ligne à ligne en fonction du temps.....	60
Figure IV-6	Variation de la puissance (P) en fonction de l'irradiation et de la température	60
Figure IV-7	Caractéristiques I(V) et P(V) en fonction de la température.....	61
Figure IV-8	Variation de la puissance produite(P) en fonction de la tension (V).....	61
Figure IV-9	Variation du courant (I) en fonction de la tension (V).....	62
Figure IV-10	Les caractéristiques de (I) et (V) du panneau solaire en fonction de la Température.....	62
Figure IV-11	Variation du courant (I) et la tension(V) en fonction de l'irradiation	63
Figure IV-12	Variation de la puissance (P) et de la tension (V) en fonction de l'irradiation	63
Figure IV-13	Variation du courant (I) en fonction de la tension (V).....	64
Figure IV-14	Variation de la puissance (P) en fonction de la tension (V).....	64
Figure IV-15	Variation de la puissance (P) en fonction l'angle de calage beta.....	64
Figure IV-16	Variation de couple de la turbine (Tm) en fonction du temps.....	65
Figure IV-17	Tension triphasée délivrée par MADA en fonction du temps	65
Figure IV-18	Variation du courant délivré par le RMS.....	65
Figure IV-19	Variation de la tension délivrée par le RMS.....	66
Figure IV-20	Variation de la vitesse du rotor de la turbine.....	66
Figure IV-21	Puissance crête de la turbine.....	67
Figure IV-22	Variation de la vitesse du moteur DC.....	67

Liste des abréviations

Liste des abréviations

AC	Une tension alternative
C_p	Le coefficient de performance (sans unité)
c	Paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent
D	Le rapport cyclique du convertisseur
E_c	Energie cinétique (en joules)
H	La hauteur du mat
h_{mes}	La hauteur des appareils de mesure.
I_{cc}	Courant court-circuit
I_{ph}	Le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température
I_{opt}	Un courant optimal
I_s	Courant de saturation inverse de la diode
I_{sc}	Le courant de court-circuit
K	Le rapport de transformation du transformateur d'isolement
k	Paramètre de forme caractérise la répartition du vent
m	Masse du volume d'air (en kg) ;
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
MPP	Maximal power point
MPPT	Maximum power point tracking
n	Facteur d'idéalité de la diode
P_{éol}	La puissance fournie par le rotor de l'éolienne
P_n	Une puissance nominale
P_{max}	La puissance maximale
PV	Les applications photovoltaïques
P_v	La puissance incidente du vent
PWM	Pulse Width Modulation
R_s	La résistance série de chaque cellule
R_{sh}	La résistance shunt
S	La surface traversée par l'air
STC	Standard Test Conditions
T	La période

th	Représente la durée de l'état haut
V	La vitesse du vent (m/s).
V_{co}	Tension à vide
V_{max}	La tension maximum
V_{moy}	La vitesse moyenne
V_{mp}	La tension maximale de chaque cellule
V_{opt}	Une tension optimaux
ρ	La densité volumique de l'air
ω	La vitesse angulaire du rotor de l'éolienne
λ	La vitesse réduite
η	Le rapport cyclique

Introduction générale

Introduction Générale

Au cours des dernières décennies, le problème énergétique est devenu un véritable problème à l'échelle mondiale. Nous estimons que près de 80 % de la production mondiale totale d'énergie primaire provient d'énergies fossiles telles que : le pétrole, le gaz naturel, le charbon et l'énergie nucléaire...etc.

Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles.

L'exploitation des ressources renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés. Le rôle d'un **système hybride (éolien - photovoltaïque)** de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales.

Les **sources d'énergie éoliennes** et **photovoltaïques** sont inépuisables, les processus de conversion sont sans pollution, et leur disponibilité est gratuite.

En effet, s'il n'y a ni soleil ni vent, les systèmes photovoltaïques et les systèmes éoliens ne produiront pas d'électricité. Afin d'assurer l'autonomie et la sécurité d'approvisionnement énergétique, il est nécessaire d'envisager d'inclure un système de récupération d'énergie afin d'optimiser la combinaison de ces deux sources pour fournir une alimentation électrique continue et stable.

Aujourd'hui, **les énergies renouvelables** deviennent progressivement des énergies à part entière, rivalisant avec des énergies fossiles, du point de vue coût et performances de production. Cependant, leur système de conversion de l'énergie en électricité souffre souvent d'un manque d'optimisation qui en fait encore des systèmes trop chers, et présentant des déficiences importantes en rendement et en fiabilité. Pour cela, bien qu'il existe, de plus en plus de travaux de recherches prouvant la fiabilité de sources comme, par exemple, l'énergie photovoltaïque (PV) ou l'énergie éolienne. L'industrie des cellules solaires font de multiples recherches dans le but de réaliser **des panneaux** avec **le meilleur rapport rendement/prix**.

De nouvelles énergies dites « **énergies renouvelables** », ont été développées tel que : **l'énergie éolienne**, l'énergie de la biomasse, l'énergie géothermique et **l'énergie solaire**. La plupart de ces énergies proviennent directement ou indirectement du soleil.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par l'ensemble de cellules dites **photovoltaïques (PV)**, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière (une énergie suffisante).

La **technique MPPT**, destinée à commander les convertisseurs, est nécessaire pour le fonctionnement optimal du système PV dans différentes conditions d'exploitation. Le suivi du **point de puissance maximum (MPPT)** peut être atteint de différentes manières, en

utilisant différentes approches et algorithmes à savoir la logique floue, les réseaux de neurones... Néanmoins, les techniques de perturbation et d'observation (P&O) et l'incrément de la conductance (INC) sont largement utilisées, en raison de leurs simplicités et leurs efficacités.

Dans le cadre de notre travail, nous proposons un système hybride composé de deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles. Notre objectif est d'atteindre un meilleur rendement avec un coût minimal du système hybride photovoltaïque - éolien. Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque GPV, et d'un convertisseur DC/DC commandé par la **commande MPPT** assurant la poursuite de la **puissance maximale**. Ce dernier alimente une machine asynchrone à partir d'un **onduleur** commandé par la **commande MLI**. Nous avons présenté la modélisation mathématique d'un système PV et d'un système éolien ainsi que les **caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$** simulées sous **Matlab/ SIMULINK**.

Dans le premier chapitre nous allons nous pencher sur les généralités sur les systèmes photovoltaïques et l'énergie éolienne. Bien que la littérature soit abondante de nos jours, nous donnons néanmoins l'essentiel de la conversion photovoltaïque et de l'énergie éolienne, le principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénients. Le deuxième chapitre sera consacré aux convertisseurs (DC-DC) et (DC- AC). Dans le troisième chapitre, nous traitons la modélisation d'un système photovoltaïque et d'un système éolien, la commande MPPT d'un système photovoltaïque, ainsi que l'amélioration des performances d'un système photovoltaïque par cette dernière. Le quatrième chapitre est consacré aux résultats et discussion. Nous présentons les résultats de simulation par le logiciel de simulation **MATLAB SIMULINK** avec interprétations.

Enfin, nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale et les perspectives offertes par ce travail.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques et l'énergie éolienne

I.1 Introduction

Parmi les sources d'énergie disponibles dans notre environnement proche et permettant de produire de l'électricité on a : l'eau, le soleil et le vent.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une grande augmentation ces dernières années. 20-30 ans avant, les systèmes de production énergétiques sont basés sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables, on mentionne comme systèmes qui fonctionnent avec les énergies renouvelables les systèmes éoliens fonctionnant à base du vent et les systèmes solaires fonctionnant à base d'énergie solaire. Les plus intéressantes technologies des systèmes précédant on va étudier: éoliens à axe horizontal et solaires photovoltaïque.

Dans ce premier chapitre, nous allons décrire les différentes caractéristiques des deux énergies renouvelables étudiée dans ce mémoire : le solaire et l'éolien.

I.2 Les énergies

Les sources utilisées dans la procédure de production d'énergie électrique peuvent être classées en deux catégories, sources renouvelables et non-renouvelables :

I.2.1 Les sources non renouvelables

D'une manière générale, nous définissons les énergies non renouvelables comme des sources d'énergie qui tendent à s'épuiser, devenir trop chères ou trop polluantes pour l'environnement, par opposition aux énergies renouvelables, qui se reconstituent naturellement dans une période de temps relativement courte. Les sources non renouvelables sont les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz dont les gisements limités peuvent être épuisés.

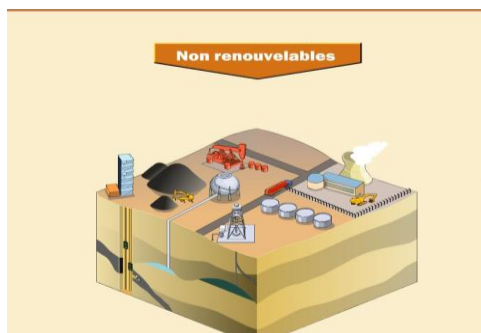


Figure I.1 Schéma de différentes énergies non renouvelables

I.2.2 Les sources renouvelables

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) c'est à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués

principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la terre (géothermique profonde...), à l'échelle de la durée de vie de humanité .Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [1].



Figure I.2 Schéma de différentes énergies renouvelables

I.3 Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque

Le soleil a toujours fasciné l'Homme. Il est source de vie et sans lui, nous n'existerions pas. Néanmoins, si nous replaçons le Soleil dans le contexte de l'Univers - ce dernier contient des centaines de milliards de milliards d'étoiles - c'est un astre tout à fait ordinaire, une étoile parmi les étoiles - soit une sphère que sa température élevée rend lumineuse. Cette étoile – notre étoile – située à environ 150 millions de kilomètres de la Terre. Vu de notre planète, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène et apparaît sous un angle d'un peu plus d'un demi-degré. Il faudrait donc 93 000 soleils côte à côte pour occuper l'étendue de la voûte céleste. Son rayon est 109 fois celui de la Terre (soit 696 000 km) et sa masse 333 000 fois celle de notre planète. La Lune est 400 fois plus petite que le Soleil, mais 400 fois plus près de la Terre, ce qui explique la taille apparente similaire des deux astres dans le ciel, ce dont on peut se rendre compte en particulier lors des éclipses de Soleil [2].

Le soleil est une grande sphère formée de gaz extrêmement chauds. Il est constitué, par la masse de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments lourds (Fer, Néon, Azote, Silicium, ...). Les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. La masse est alors transformée en énergie selon la fameuse formule d'Einstein, $E = mc^2$. Cette énergie est transmise sous forme de rayonnement [3].

I.4 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier le pair électron-trou créé est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N [4].

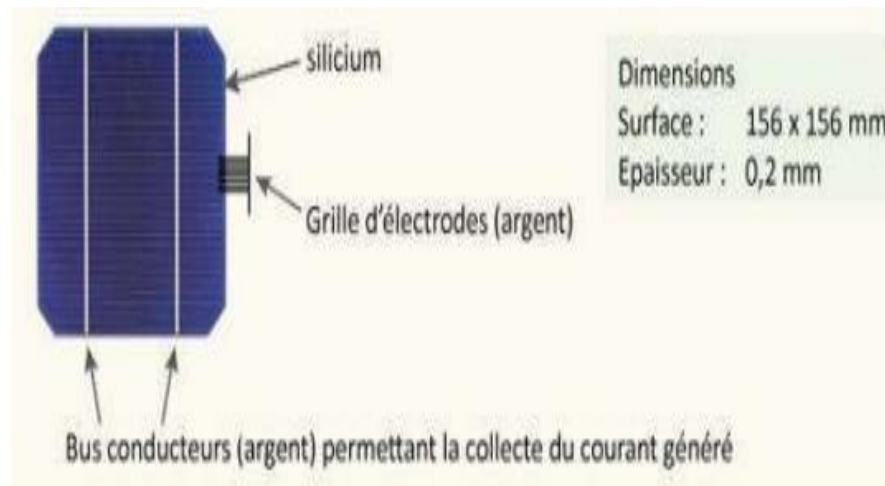


Figure I.3 Cellule photovoltaïque

I.4.1 Cellule solaire

Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène - hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement qui représente chaque année environ 1500 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (1KWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que ne consomme l'humanité en une année [5].

Depuis très longtemps, l'homme cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. la plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m^2 dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m^2 lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [6].

Sur Terre, il existe des différents types d'énergies solaires:

- L'énergie thermique.
- L'énergie thermodynamique.

- L'énergie photovoltaïque.



Figure I.4 L'énergie solaire

I.4.2 Historique des cellules photovoltaïques

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque [7] :

- 1839 : Le physicien français Antoine Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- 1887 : L'effet photoélectrique a été compris et présenté par Heinrich Rudolf Hertz qui en publia les résultats dans la revue scientifique *Annalen der Physik*
- 1905 : Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1905 et obtint le prix Nobel de physique sur ses travaux en 1921.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince des laboratoires BELL mirent au point la première cellule photovoltaïque au silicium avec un rendement de 4%, au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule photovoltaïque avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites Vanguard alimentés par des cellules photovoltaïques sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Wilmington dans l'Etat du Delaware, USA.
- 1983 : La première voiture alimentée par de l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.
- 1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.
- 2000 : Entrée en application le 1er avril 2000 et modifiée en 2004 et en 2009, l'EEG Renewable Energy Sources Act (EEG) est le résultat de la transposition de la directive européenne relative à la promotion des énergies renouvelables dans le secteur de l'électricité.
- 2005 : En décembre 2005 mise en réseau de la première centrale solaire photovoltaïque du groupe Prime Energy à Weil am Rhein (Baden-Württemberg), Hagenheimer strasse 17, 79576 Weil am Rhein

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé [8].

I.4.3 Structure de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. Visuellement, la cellule photovoltaïque prend la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté. Ces cellules photovoltaïques sont ensuite assemblées dans un module photovoltaïque, plus communément appelé panneau. On trouve au centre, une couche avec porteurs de charges libres négative (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et d'autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle +) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle -) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Comme le montre la figure (I.5) [9].

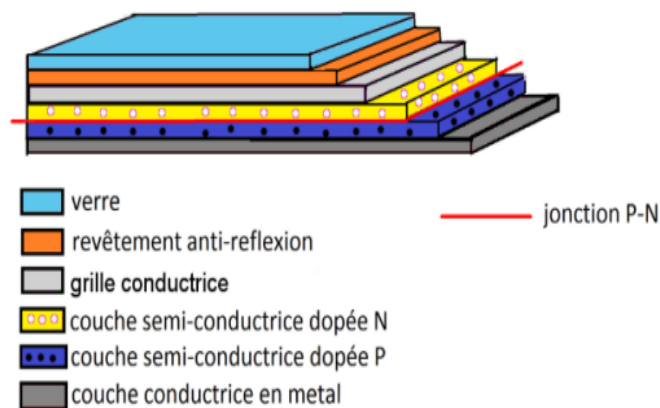


Figure I.5 Structure d'une cellule solaire

I.4.3.1 Dopage des cristaux :

La jonction PN : C'est la juxtaposition de deux régions de types différents (N et P). La différence de densité des donneurs et d'accepteurs ($N_d - N_a$) passe d'une valeur négative dans la région de type P à une valeur positive dans la région de type N.

La solution la plus fréquente pour guider les électrons et les trous est d'utiliser un champ électrique au moyen d'une jonction PN, entre couches « dopées » respectivement P (positive) et N (négative). Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P. Le composant ainsi créé est appelé diode [10].

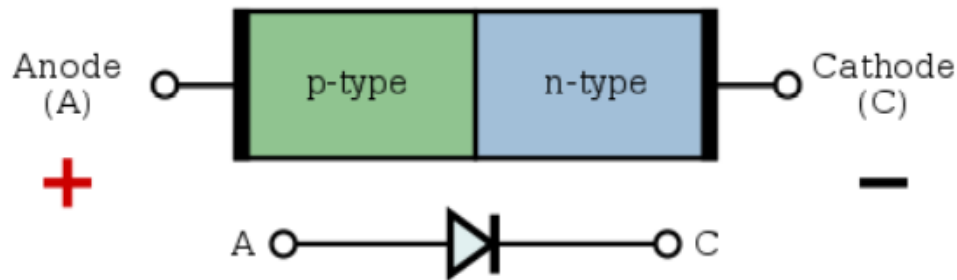


Figure I.6 Diode fabriquée à partir d'une jonction PN

Dopage de type N : un atome de silicium compte 4 électrons. L'une des couches est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage négatif car les électrons (de charge négative) sont excédentaires.

Dopage de type P : l'autre couche de la cellule est dopée avec des atomes de bore ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage positif en raison du déficit d'électrons ainsi créée.

Lorsque la première couche est mise en contact avec la seconde. Les électrons en excès dans le matériau dopé N se dirigent naturellement vers le matériau dopé P.

Quand un photon arrache un électron, libérant l'électron et formant un trou, sous l'effet de ce champ électrique ils partent chacun à l'opposé. Les électrons s'accumulent dans la région N (qui devient le pôle négatif), tandis que les trous s'accumulent dans la région P (qui devient le pôle positif). Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité.

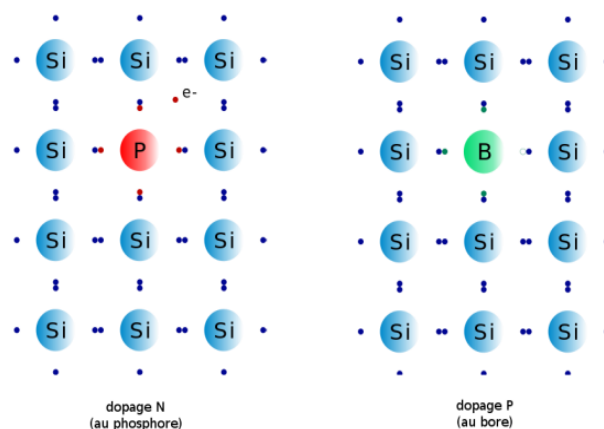


Figure I.7 Dopage de type N-P.

I.4.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant optoélectronique qui permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique [11].

La structure la plus simple de ce dispositif est assimilable à une diode photosensible basée sur des matériaux semi-conducteurs qui exploite l'effet photovoltaïque, un phénomène physique propre à certains de ces matériaux, pour la transformation de l'énergie. La figure (I.8) représente la structure d'une cellule photovoltaïque [12].

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque.

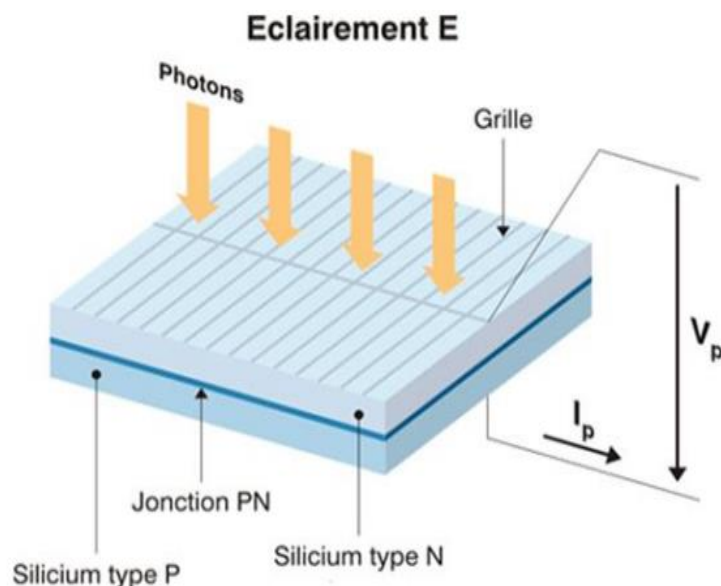


Figure I.8 Structure d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "excités" par les photons constituant la lumière, sous l'action de cette excitation, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés". Ce principe est illustré sur la figure(I.9).

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique, sinon les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible qui varie entre 0.3V et 0.7V en fonction du matériau et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule [13].

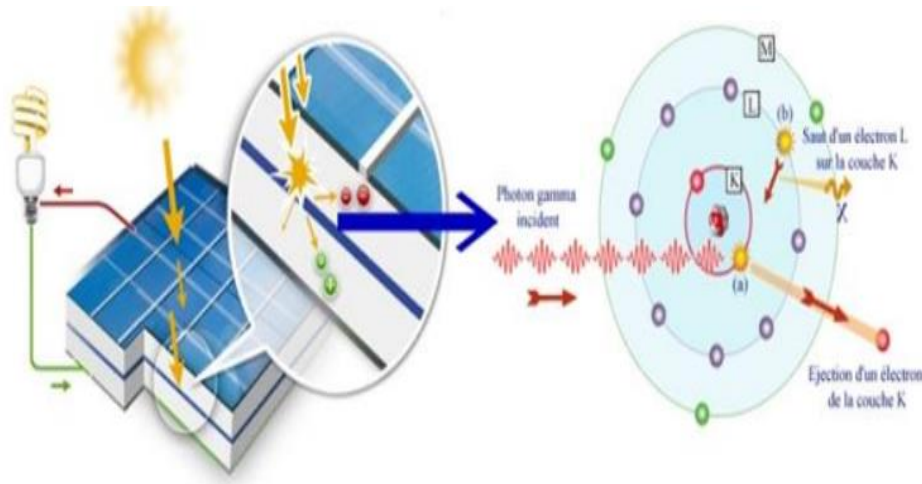


Figure I.9 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Afin d'effectuer la collecte du courant électrique, des électrodes en forme de grille sont déposées sur les deux couches du semi-conducteur. L'électrode supérieure permet le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [14].

I.4.5 Effet photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. A l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité. L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell-Lab, aux États Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [14].

I.5 Différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïques)

Il existe plusieurs types de cellules qui se différencient par les matériaux utilisés pour les construire. En dehors du prix, le choix d'un type de cellule n'a que peu de conséquences pour l'utilisateur, la principale différence sera la surface qui, à puissance égale, pourra varier du simple au double.

I.5.1 Les cellules mono-cristallines:

Ce type de cellule photovoltaïque est l'une des plus répandues. Elle est obtenue à partir de silicium monocristallin, appliqué en une tranche simple. Elle permet de composer

des panneaux solaires qui vont produire de l'électricité servant à alimenter une habitation ou le réseau public, par exemple.



Figure I.10 Le type de cellule monocristalline

I.5.2 Les cellules en silicium poly-cristallin :

Facilement reconnaissable grâce à ses cristaux bleus, cette cellule photovoltaïque se compose d'une seule tranche de silicium. Elle est de forme carrée. On la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles.



Figure I.11 type de cellule poly cristalline

I.5.3 La cellule au silicium Amorphe :

Elle est composée d'une couche fine de silicium, bien plus fine que les monocristallines ou les polycristallines. On la trouve essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance, comme les montres solaires, les éclairages de jardin ou encore les calculatrices solaires [15].



Figure I.12 Le type de Cellule photovoltaïque amorphes

I.6 Système de conversion

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de Convertisseur continu continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif).

A l'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil.

I.6.1 le convertisseur continu-continu

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95%.

Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance : - Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.

I.6.2 Le convertisseur continu- alternatif

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

Rotatif : c'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW. Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité. Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).

Statique : on le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes avides considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à

l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. Avec ce système, on obtient :

Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
De faibles pertes à vide [16].

I.7 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques [17] :

I.7.1 Avantages

- ✓ Energie électrique non polluante à l'utilisation et s'inscrit dans le principe de développement durable
- ✓ Source d'énergie renouvelable car inépuisable à l'échelle humaine
- ✓ Utilisables soit dans les pays en voie de développement sans réseau électrique important soit dans des sites isolés tels qu'en montagne où il n'est pas possible de se raccorder au réseau électrique national.

I.7.2 Inconvénients

- ✓ Coût dépendant de la puissance de crête ;
- ✓ Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance ;
- ✓ Marché très limité mais en développement ;
- ✓ Production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte ;
- ✓ Demande chez les particuliers se fait la nuit ;
- ✓ Le stockage de l'électricité est quelque chose de très difficile avec les technologies actuelles (coût écologique des batteries très élevé) ;
- ✓ Durée de vie : 20 à 25 ans, après le silicium "cristallisé" rend inutilisable la cellule ;
- ✓ Pollution à la fabrication : certaines études prétendent que l'énergie utilisée pour la fabrication des cellules n'est jamais rentabilisée durant les 20 années de production ;

Même en fin de vie, le recyclage des cellules pose des problèmes environnementaux.

I.8 Energie éolienne :

I.8.1 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Le principe de la conversion éolienne est illustré par la figure (I.13). l'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécanique, électrique ou d'automatique.

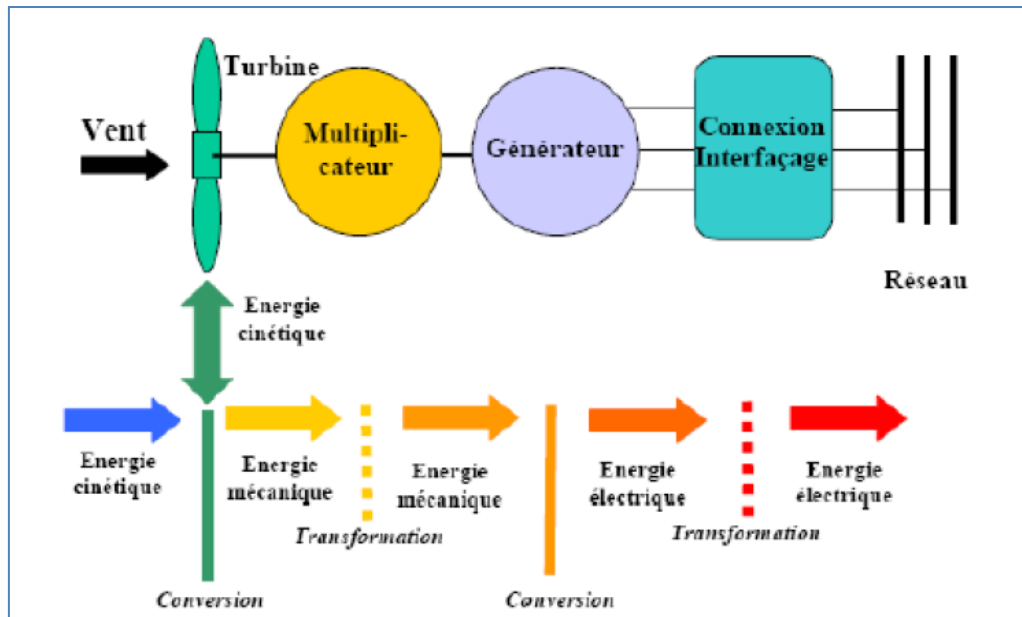


Figure I.13 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [18].

I.8.2 Notions théoriques sur l'éolien

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

I.8.2.1 Loi de Betz - notions théoriques:

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement poussant par la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par : (I-1)

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (I-1)$$

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot P_v = 0,59 \cdot P_v \quad (I-2)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59 % de l'énergie cinétique (I-2) de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximale théorique est défini :

$$C_p^{\text{opt}} = \frac{P_{\max}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\rho \cdot s \cdot V_v^3} = 0,59 \quad (I-3)$$

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

$$C_p = \frac{2P_{eol}}{\rho \cdot s \cdot V_v^3} \quad (I-4)$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne une grandeur spécifique est utilisée :

La vitesse réduite λ , qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_v} \quad (I-5)$$

I.8.2.2 Distributions de Weibull

Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. Pour connaître les propriétés d'un site, des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps, sont nécessaires (un à dix ans).

En effectuant la caractérisation d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur de mat de l'éolienne. En effet, la vitesse du vent augmente selon la hauteur. L'expression (6) donne la méthode de ce calcul et le Tableau 1-1 les valeurs de rugosité α en fonction du caractère des obstacles dans l'environnement proche. On précise que h est la hauteur du mat et h_{mes} la hauteur des appareils de mesure.

$$V_v(h) = V_v(h_{\text{mes}}) \cdot \frac{\ln(h/\alpha)}{\ln(h_{\text{mes}}/\alpha)} \quad (I-6)$$

Nature du sol	Paramètre de rugosité
Surface d'un plan d'eau	0,0002
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...)	0,0024
Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces.	0,03
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m.	0,055
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m.	0,1
Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m.	0,2
Villages, petites villes, zones agricoles avec de nombreuses haies, forêts et terrains très accidentés.	0,4
Grandes villes avec bâtiments hauts	0,8
Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel.	1,6

Tableau 1-1 Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement

Chaque site éolien est caractérisé par une direction de la vitesse de vent dominante. Cependant, elle est variable comme la valeur de la vitesse du vent. Pour décrire ces propriétés spatiotemporelles le diagramme appelé rose des vents peut être élaboré. Il se présente comme un diagramme polaire, lequel répertorie l'énergie du vent disponible dans chaque direction en pourcent (parfois c'est la vitesse) et le temps de l'occurrence de chaque direction du vent en pourcent.

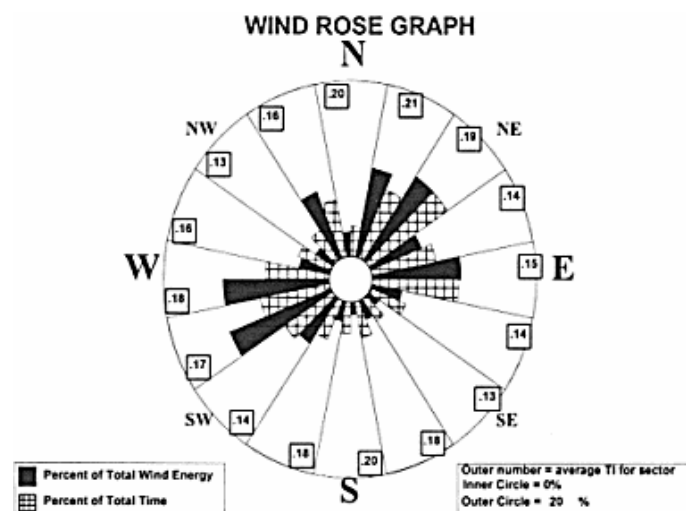


Figure I-14 Exemple de la rose des vents

La rose du vent permet d'avoir une première vue sur la capacité énergétique du site éolien mais elle est destinée plutôt à l'aide au choix de l'emplacement spatial de la turbine et principalement pour éviter les obstacles qui peuvent gêner le flux d'air. Des informations supplémentaires peuvent être insérées dans ce graphique comme la turbulence ou la rugosité du terrain.

La caractéristique la plus importante est la distribution statistique de Weibull. Elle s'est révélée la plus adéquate pour l'emploi dans l'éolien. Elle modélise avec succès la probabilité de l'occurrence des vitesses de vent du gisement éolien.

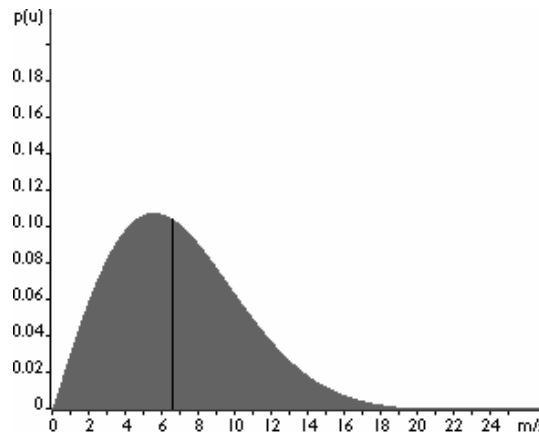


Figure I-15 Exemple de la distribution de Weibull

Cette figure est obtenue grâce à l'expression (I-7) qui présente la fonction de distribution statistique de Weibull. Les paramètres k et c sont respectivement facteur de forme (sans dimension) et le facteur d'échelle en m/s. Habituellement, le facteur de forme qui caractérise la symétrie de la distribution est dans l'éolien égal à $k=2$. Le facteur d'échelle est très proche de la vitesse moyenne de la vitesse du vent V_v . [19].

$$P(V_v) = \frac{k}{c} \left(\frac{V_v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-(V_v/c)^k} \quad (I-7)$$

I.8.3 Principe de fonctionnement

Une éolienne a un fonctionnement plutôt basique. C'est une grande structure blanche composée d'un mat, d'une nacelle, de fondation et en général de 3 pales montées sur un rotor et bien sûr d'un générateur électrique.

Ce générateur électrique est appelé un alternateur. Un alternateur est une machine rotative qui convertit l'énergie mécanique fournie au rotor en énergie électrique à courant alternatif. Les pales fixées sur le rotor l'entraînent, il tourne. Et il fait tourner un aimant constitué de deux pôles, dans une bobine de fils (en général du cuivre).

Cette rotation engendre un courant alternatif dans la bobine de cuivre (stator). On appelle cette opération l'électrification. Une éolienne produit environ 1750 KW par an. La

consommation d'un petit village. Ensuite cette énergie est transmise aux populations grâce à des lignes à hautes tensions. En France nous ne sommes pas beaucoup équipés en centrale éolienne. Mais les éoliennes sont très peu polluantes.

Ces centrales sont surtout utilisées dans les pays riches exposés aux vents (Espagne...), mais une éolienne n'est rentable qu'au bout de deux ans [20].

I.8.4 Caractéristiques de l'éolienne

I.8.4.1 Modèle du vent

Le vent est le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, déterminant pour le calcul de la production de l'électricité, les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent considéré dans ce modèle se limite à une dimension. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps. Elle sera modélisée, dans cette partie, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques.

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

I.8.4.1.1 Énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air, m , qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (I-8)$$

m : masse du volume d'air (en kg) ;

v : vitesse instantanée du vent (en m/s) ;

E_c : énergie cinétique (en joules) ;

I.8.4.1.2 Limite de Betz/Formule de Betz

La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. L'allemand Albert Betz a démontré en 1919 que la puissance maximale récupérable est :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot P_{\text{cinétique}} = \frac{8}{27} \rho \cdot s \cdot V^3 \quad (I-9)$$

$$P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \rho \cdot s \cdot V^3 \quad \text{Lorsque } V_{\text{aval}} = \frac{1}{3} V_{\text{amont}} \quad (I-10)$$

$$P = 0,37 \frac{\pi}{4} D^2 V^3 \quad \text{d'où } P = 0,29 D^2 V^3 \quad (I-11)$$

Le rendement maximal théorique d'une éolienne est ainsi fixé à $\frac{16}{27}$, soit environ 59,3%. Ce chiffre ne prend pas en compte les pertes d'énergie occasionnées lors de la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. Dans le cas d'une hélice de diamètre D, la limite de Betz est égale à :

La puissance fournie par un aérogénérateur est proportionnelle au **carré** des dimensions du rotor et au **cube** de la vitesse du vent. Nous savons que l'éolienne procure son énergie du vent, par conséquent, il existe une relation entre la vitesse du vent et la vitesse de rotation, le couple et la puissance sur le rotor d'une éolienne.

I.8.4.2 La puissance éolienne incidente du vent

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (I-12)$$

Où : ρ est la masse volumique de l'air en kg/m^3 (air atmosphérique sec environ $1,23 \text{ kg/m}^3$ à 15°C et à pression atmosphérique $1,0132 \text{ bar}$), S la surface traversée par l'air ($S = \pi R^2$) en m^2 , R le rayon du rotor de l'éolienne (rayon de l'hélice) et V la vitesse du vent en m/s .

Coefficient aérodynamique de puissance C_p

Cependant, le dispositif de conversion extrait une puissance $P_{\text{éol}}$ inférieure à la puissance incidente P_v , à cause de la vitesse non nulle des masses d'air derrière l'aéromoteur. On définit alors, le coefficient de puissance de l'aéromoteur par la relation :

$$C_p = \frac{P_{\text{éol}}}{P_v} \quad C_p < 1 \quad (I-13)$$

La puissance fournie par le rotor de l'éolienne :

$$P_{\text{éol}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 C_p = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p \quad (I-14)$$

C_p : Coefficient qui dépend de la forme du rotor et de la vitesse du vent, On peut estimer la valeur maximale de ce coefficient, donc la puissance maximale qui peut être récupérée avec une turbine éolienne, en s'appuyant sur la théorie Rankine - Froude de l'hélice dans un fluide incompressible. C'est la valeur maximale de ce coefficient qui correspond à la limite dénommée la limite de Betz (théorie de Betz années 1920) du coefficient de puissance.

$$C_{p_{\text{max}}} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (I-15)$$

I.8.4.3 La vitesse spécifique (Paramètre de rapidité)

La valeur du coefficient aérodynamique de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ , donc $C_p = C_p(\lambda)$. Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite (spécifique) λ qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V} = \frac{U}{V} \quad (\text{I-16})$$

I.8.4.3.1 L'équation analytique de C_p en fonction de λ

$$C_p = 0.043 - 0.108 \lambda + 0.146 \lambda^2 - 0.0602 \lambda^3 + 0.0104 \lambda^4 - 0.0006 \lambda^5 - 2.2 \cdot 10^{-6} \lambda^6$$

Résultant de l'interpolation, la courbe $C_p(\lambda)$ passe un maximum $\lambda_{\max}$, compris entre 5 et 16 environ, selon le nombre de pales de la turbine et c'est seulement pour cette valeur que C_p approche la valeur de 16/27.

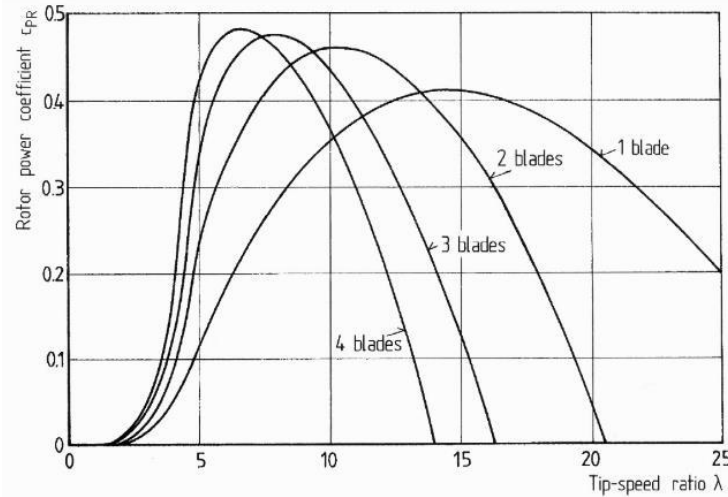


Figure I-16 Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée λ .

I.8.4.3.2 Le rendement aérodynamique de l'éolienne :

Qui est représentatif de la « qualité aérodynamique » de l'éolienne

$$\eta_a = \frac{C_p}{C_{p_{\max}}} = \frac{C_p}{0,593} \quad (\text{I-17})$$

I.8.4.3.3 Le couple développé sur le rotor de l'éolienne

$$T = C_p \frac{\rho \cdot s \cdot V^3}{2 \omega} = C_p \frac{R \cdot \rho \cdot s \cdot V^3}{2 k} \quad (\text{I-18})$$

Avec

$$K = \omega \frac{R}{V} \quad (\omega \text{ est la vitesse angulaire du rotor de l'éolienne})$$

I.8.4.4 Fonction de probabilité de densité de Weibull :

On rappelle que la fonction de répartition $F(v)$ est la probabilité que la vitesse du vent soit inférieure à une certaine valeur v et que la densité de probabilité $f(v)$ est la dérivée de $F(v)$:

$$f(v) = \frac{dF(v)}{dv} \quad (I-19)$$

Parmi les distributions utilisées dans les modèles statistiques, la distribution de Weibull s'est avérée appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent, La fonction de répartition Weibull à deux paramètres c et k s'écrit :

$$F(v) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (I-20)$$

En utilisant la relation (I-19), il résulte la fonction de la densité de probabilité $f(v)$:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp - \left(\frac{v}{c} \right)^k \quad (I-21)$$

Avec :

k : paramètre de forme caractérise la répartition du vent ;

c : paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent (plus c est élevé plus l'énergie se trouve dans les hautes vitesses ;

v : vitesse du vent « instantanée » (moyennée sur 10 mn).

I.8.4.5 La distribution de Rayleigh :

La plupart des sites éoliens ayant une vitesse de vent qui respecte la distribution de Weibull avec un paramètre de forme $k=2$, on définit la distribution de Rayleigh qui est plus simple à manipuler, en remplaçant $k=2$ dans l'équation (I-21) on obtient :

$$f(v) = 2 \left(\frac{v}{c^2} \right) \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right] \quad (I-22)$$

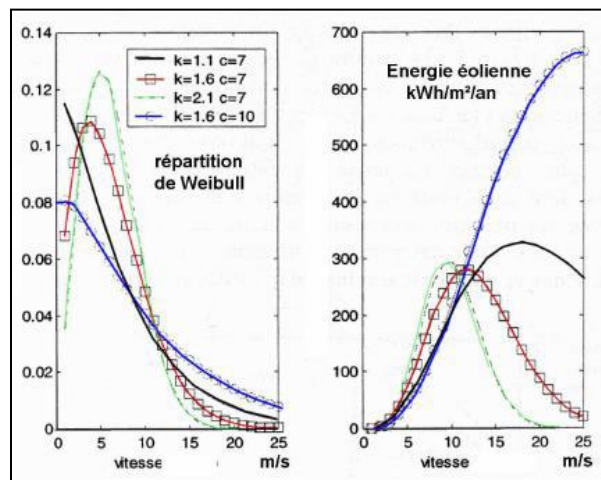


Figure I-17 Distribution de la vitesse du vent et de l'énergie correspondante pour différents couples de paramètres de la distribution

La vitesse moyenne annuelle divisée par le nombre d'heures total annuel (8760h/an) peut être définie de la façon suivante :

$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{8760} \int_0^{\infty} f(V) dV \quad (\text{I-23})$$

I.8.4.6 Loi de Davenport et Harris :

La vitesse du vent est également fonction de l'altitude la loi (empirique) de Davenport et Harris exprime cette dépendance :

$$\frac{V}{V_0} = \left[\frac{Z}{Z_0} \right]^\alpha \quad (\text{I-24})$$

Avec α compris entre 0,1 et 0,4 (0,1 correspond à la mer, 0,16 à une plaine, 0,28 à une forêt et 0,4 à une zone urbaine), la modélisation est valable s'il n'y a pas de changement de rugosité en amont (α constant). Alors la puissance dépend de l'altitude Z : [21]

$$\frac{P}{P_0} = \left[\frac{Z}{Z_0} \right]^{3\alpha} \quad (\text{I-25})$$

I.8.5 Puissance récupérable par une turbine

Le système installé est constitué de :

- Une éolienne WS-400 capable de fournir 400 Watts nominale à partir de l'énergie du vent
- Régulateur transformant une puissance allant jusqu'à 400 Watts en une tension continue sous 12 V
- Deux batteries 12 Volts - 40 Ah capables de stocker et de dépenser de l'énergie continue
- Une charge continue, ou un onduleur de tension 12 V / 220 V suivi d'une charge alternative.
- L'éolienne WS-400 considérée à la Faculté de Génie de l'Université Libanaise est caractérisée par les données présentées dans le tableau I-2. Selon le constructeur, la caractéristique de la puissance en fonction de la vitesse de cette éolienne est illustrée sur la figure I-17

Modèle	WS400
Puissance de sortie nominale	400 WATTS
Vitesse du vent - ref. nominale	12,5 m/s (45 Km/H)
Vitesse de rotation nominale	900 tr/mn
Vitesse du vent au seuil de rotation	2 m/s (7,2 Km/H)
Vitesse du vent au seuil d'amorçage	3 m/s (10 Km/H)
Diamètre du Rotor	1,40 mètres
Matière des pales	Nylon renforcé fibres de carbone
Profil des pales	Type aviation
Résistance maximum	60 m/s (210 Km/H)
Système de coupure	Contrôle électrique
Installation électrique	12 Volts (Batterie)
Système d'entraînement	Direct par axe unique
Régulateur de charge	inclus
Protection de survitesse	Contrôle électronique du frein
Protection de sous tension	OUI
Protection de survoltage	OUI
Poids de la turbine	15 Kg
Poids brut emballage	20 Kg
Dimension du colis	1140 mm x 560 mm x 240 mm
Garantie	1 an
Entretien	Contrôle visuel semestriel

Tableau I-2 Eolienne WS-400

a) Bilan Energétique

Afin de déterminer la puissance fournie par l'éolienne durant l'année 2006, et comme les mesures de la vitesse du vent en 2006 ont été déjà déterminées (figure I-18), il était plus opportun de s'en servir de cette base de données dans la caractéristique 'puissance / vent' de l'éolienne (figure I-17) pour obtenir la puissance générée.



Figure I-18 Courbe de puissance relative à l'éolienne WS-400.

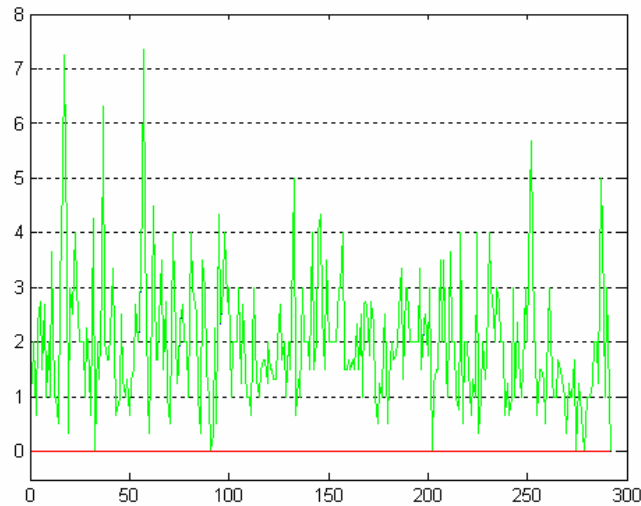


Figure I-19 Vitesse du vent à l'ULFG1 en 2006

Pour cela, plusieurs mesures (vitesse du vent et puissance fournie) ont été réalisées à l'aide d'un capteur de vitesse approprié et d'un wattmètre numérique, pour permettre l'apprentissage du réseau de neurones qui aura pour but de calculer le bilan énergétique. Ces mesures sont faites lorsque les batteries sont presque vides et en présence d'une charge continue en parallèle pour absorber la totalité de la puissance fournie. La courbe obtenue par ces mesures vérifie totalement celle fournie par l'industriel qui fabrique ce genre d'éolienne (figure I-19).

La courbe obtenue par ces mesures servira pour entraîner un réseau de neurones sur Matlab. Ainsi, une généralisation de la production de l'éolienne en WATTS sera possible à partir d'une valeur quelconque de la vitesse du vent. La programmation d'un réseau de neurones MLP pour les vitesses supérieures à 9 m/s et un autre linéaire pour les vitesses inférieures à 9 m/s (vitesse pour laquelle la courbe est non dérivable) permettra alors la généralisation de la production de l'éolienne pour des vitesses du vent inférieures à 17 m/s (vitesse critique pour laquelle il y aurait débranchement de l'éolienne pour des raisons de sécurité impliquées par le fabricant).

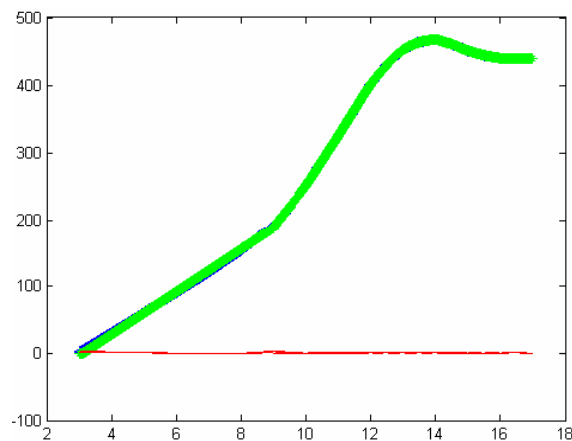


Figure I-20 Courbe de puissance après programmation sur Matlab.

Nous remarquons que les courbes apprises par le réseau de neurones (la courbe bleue est la courbe réelle, la courbe verte est celle apprise et la courbe rouge est celle de l'erreur qui est inférieure à 1 %) nous permettent d'obtenir une bonne précision dans la correspondance 'Puissance – Vitesse du vent'.

Les puissances fournies mensuellement par l'éolienne pendant l'année 2006 sont données sur le tableau I-3. Le bilan énergétique est illustré alors sur la figure I-21.

Moisen2006	Puissance en kWh
Janvier	6,17728
Février	5,89902
Mars	7,00264
Avril	3,47154
Mai	0
Juin	12,45260
Juillet	2,50979
Août	0,15127
Septembre	11,73015
Octobre	1,97758
Novembre	3,09608
Décembre	2,08025

Tableau I-3 Puissance mensuelle obtenue

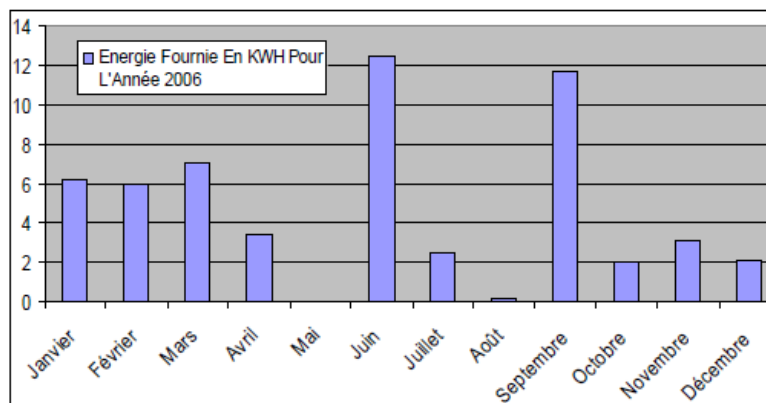


Figure I-21 Energie fournie en kWh pour l'année 2006

Le bilan énergétique de l'éolienne WS-400 positionnée à l'ULFG1, pendant toute l'année 2006, nous délivre une énergie annuelle fournie égale à 56,55 kWh.

b) Calcul Du Rendement

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique ou électrique. La puissance récupérable par une éolienne est fonction du carré de son diamètre et du cube de la vitesse du vent, comme le montre la formule suivante :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 C_p \quad (I-26)$$

Avec :

ρ : la densité volumique de l'air (1,225 kg/m³ à 15°C et 1013 mbar) soit à peu près 1,2 kg/m³.

A : la surface balayée par le rotor (m²).

V : la vitesse du vent (m/s).

C_p : le coefficient de performance (sans unité), ce coefficient varie au maximum entre 20 % et 40 % (calculable selon les grandeurs nominales).

D'après les données du constructeur, la turbine éolienne de 400 Watts à 3 pales est conçue pour fournir sa puissance nominale pour un vent de 12,5 m/s. Les pales ont une longueur de 0,7 m et la vitesse nominale de la turbine est de 900 tr/min. Pour ces valeurs, la surface balayée par les pales :[22]

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,7^2 = 1,539 \text{ m}^2$$

La puissance disponible du vent par mètre carré :

$$P_v = 0,6 \cdot V^3 = 0,6 \times 12,5^3 = 1171,875 \text{ W/m}^2$$

La puissance disponible pour faire tourner l'éolienne :

$$P_d = P_v \times A = 1171,88 \times 1,539 = 1803,5 \text{ W}$$

I.8.6 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n . Pour des vitesses de vents supérieures à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnâtes : V_d la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et V_M la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

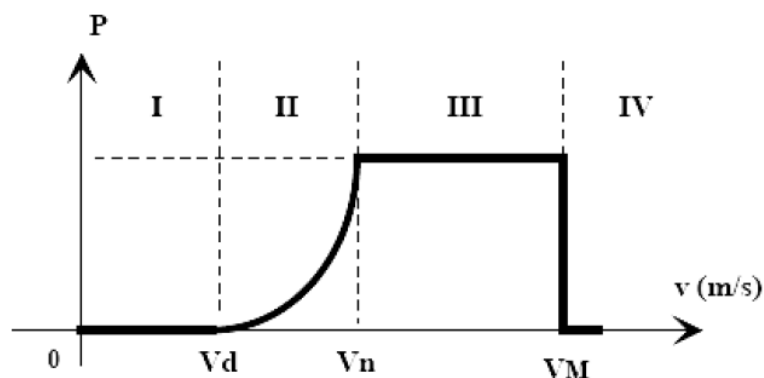


Figure I-22 Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones :

- la zone I, où $P_{\text{turbine}} = 0$ (la turbine ne fournit pas de puissance) ;
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V ;
- la zone III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P_{turbine} fournie reste sensiblement égale à P_n ;
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie ;

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

- système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses ;
- système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales). Chez certains fabricants de grandes machines, un système hybride se développe, le « stall actif », dans lequel le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minime des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le système pitch ;

D'autres systèmes de régulation, dans les petites éoliennes notamment, sont exploités :

- basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal ;
- pas variable par la pression du vent (modèle Airwind : les pales en fibre, se déforment et provoquent un décrochage) ;
- déviation par rapport à l'axe du vent. La dérive se trouve légèrement décalée par rapport à l'axe de rotation vertical (qui permet normalement à la turbine d'être face au vent) et crée une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique (la turbine reçoit un vent de travers). [23]

I.8.7 Les différents types d'éoliennes

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

I.8.7.1 Eolienne à axe horizontal

Elles sont similaires aux éoliennes que l'on rencontre actuellement sur les fermes éoliennes. Les caractéristiques des éoliennes à axe horizontal sont les suivantes : de petite

taille, de 5 à 20 m avec un diamètre compris entre 2 et 10 m, et avec une production pouvant aller jusqu'à 20 kW.



Figure I-23 Eolienne à axe horizontal (Modèle Fortis Montana)

I.8.7.2 Eolienne à axe vertical

Elles ont été conçues pour s'adapter au mieux avec les contraintes engendrées par les turbulences du milieu urbain comme décrit ci-dessus. Grâce à ce design, elles peuvent fonctionner avec des vents provenant de toutes les directions et sont moins soumises à ces perturbations que les éoliennes à axe horizontal. Elles sont relativement silencieuses et peuvent facilement s'intégrer au design des bâtiments. Leurs faiblesses résident principalement dans la faible maturité du marché (coûts d'investissement élevés) et leur coefficient de puissance inférieur à celui offert par les turbines à axe horizontal. En raison de leur petite taille, l'énergie produite reste faible. Ces éoliennes trouvent donc leur place essentiellement dans le milieu urbain.

En milieu urbain, la vitesse du vent et sa direction sont imprévisibles, surtout près des bâtiments. Là où la turbulence ne peut être évitée, les éoliennes à axe vertical peuvent plus facilement capter le vent. D'autre part, les éoliennes peuvent être classées selon leur caractéristique aérodynamique. Les éoliennes à axe horizontal fonctionnent avec la portance alors que les éoliennes à axe vertical utilisent soit la traînée (Savonius) soit la portance (Darrieus). L'éolienne de modèle Darrieus se caractérise par la forme en C de ces pales qui rappelle vaguement un batteur. Elle est normalement constituée de deux ou trois pales. Il existe différents types de machine utilisant ce principe : conique, cylindrique ou parabolique. L'éolienne peut être fixée par des haubans. L'éolienne Wind Wall est un exemple de machine Darrieus alors que le modèle Turby est connu pour être basé sur un design Darrieus modifié.



Figure. I.24 Eolienne de type Darrieus (Wind Wall)

L'éolienne de modèle Savonius utilise la traînée différentielle entre les aubes constituées de parties cylindriques en opposition. Un couple se crée mettant alors le générateur en mouvement. La vitesse de démarrage de ces machines est plutôt basse, autour de 2 m/s ($\lambda \sim 0.5$). Les éoliennes à axe vertical s'adaptent particulièrement bien aux effets de la turbulence.

De plus, ce design ne fait pas beaucoup de bruit et finalement convient bien au milieu urbain. En revanche, ce concept est fortement pénalisé par son coefficient de puissance ($C_p \text{ max} \sim 0.2$).



Figure I-25 Eolienne de type Savonius (Wind Side)

En conclusion, en termes de coûts, les éoliennes à axe horizontal sont à l'heure actuelle moins chère que les éoliennes à axe vertical et connaissent également de meilleurs rendements énergétiques. Cependant, les éoliennes à axe horizontal posent quatre problèmes qui sont moins cruciaux pour les éoliennes à axe vertical : le bruit, les vibrations, la sécurité, l'orientation du flux éolien et sa variation.[24]

I.8.8 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

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

Avantage:

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie ;
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales ;
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables ;
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle ;

Inconvénient :

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif ;
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée ;
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines ;
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent ;
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [25]

I.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur deux systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, les systèmes éoliens et les systèmes solaires. La première partie a été consacrée aux systèmes solaires et plus précisément ceux d'origines photovoltaïques. La seconde partie les différents types d'éoliennes et leur principe de fonctionnement ont été décrites.

Chapitre II : Convertisseurs (DC-DC) et (DC-AC)

II.1 Introduction

Le présent chapitre traite deux conversions DC/DC (hacheurs) et DC/AC (onduleurs). Les hacheurs, également appelés convertisseurs DC-DC, sont des dispositifs qui permettent de convertir une tension continue (DC) d'une valeur donnée en une autre tension continue de valeur variable, à l'aide d'un interrupteur qui est régulièrement ouvert et fermé à une fréquence élevée. Les onduleurs, quant à eux, sont des dispositifs qui permettent de convertir une tension continue en une tension alternative (AC), à une fréquence donnée [26].

Les hacheurs et les onduleurs sont utilisés dans une grande variété d'applications, allant des systèmes de conversion d'énergie solaire et éolienne, aux systèmes d'alimentation de secours pour les ordinateurs et les équipements électroniques sensibles.

Les technologies des hacheurs et des onduleurs sont en constante évolution, offrant des performances améliorées, une efficacité accrue, une meilleure fiabilité et une plus grande flexibilité pour répondre aux besoins changeants de l'industrie et de la société.

II.2 Les convertisseurs DC/DC

Les convertisseurs DC/DC permettent l'adaptation d'une source continue vers une charge continue, la stabilisation et la régulation de la tension, l'isolation galvanique ainsi que la gestion du flux d'énergie.

La mise en œuvre de convertisseurs électroniques est justifiée dans deux cas :

- 1- Le premier cas est lorsqu'on doit alimenter une charge qui nécessite une alimentation continue, et qu'on dispose déjà d'une source d'alimentation continue, comme une batterie par exemple. Dans ce cas, il est important d'utiliser un convertisseur direct qui permettra de faire circuler l'énergie entre les sources.
- 2- Le deuxième cas est lorsqu'on doit alimenter une charge qui nécessite une alimentation continue, mais qu'on dispose d'une source d'alimentation alternative. Dans ce cas, il est possible d'utiliser un convertisseur de courant pour convertir l'alimentation alternative en alimentation continue, suivi d'un convertisseur continu-continu pour ajuster les valeurs des grandeurs de sortie continues.

Il y'a deux types de convertisseurs DC/DC, qui permettent de convertir une tension continue en une autre tension continue : les hacheurs et les alimentations à découpage.

En mettant plusieurs convertisseurs de ce type en série, il est possible d'augmenter la fréquence de commutation, ce qui permet de réduire la taille des filtres de lissage et d'améliorer le comportement dynamique du système.

Les hacheurs sont utilisés pour les applications de moyenne et forte puissance, tandis que les alimentations à découpage sont plutôt utilisées pour les applications de faible puissance, comme l'alimentation des équipements électroniques.

Les deux types de convertisseurs se distinguent par la présence de transformateurs dans les alimentations à découpage, et par leur fréquence de commutation, qui est de l'ordre de plusieurs dizaines de kilohertz pour les hacheurs, et de plusieurs centaines de kilohertz pour les alimentations à découpage [27].

II.2.1 Principe de la conversion

Un hacheur est un circuit électronique qui permet de convertir un signal électrique continu en un signal de tension pulsé, également appelé signal à onde carrée. Le hacheur est également connu sous le nom de convertisseur de tension continue (ou convertisseur DC-DC) car il est souvent utilisé pour réguler la tension d'un système électronique.

Le principe de base du hacheur est de contrôler la tension moyenne appliquée à une charge en alternant la mise sous tension et la mise hors tension de la charge à une fréquence élevée. La fréquence de commutation typique des hacheurs modernes peut aller de quelques kilohertz à plusieurs mégahertz.

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques qui permettent d'obtenir une tension continue constante avec un rendement voisin de l'unité. Les hacheurs peuvent être utilisés dans de nombreuses applications, telles que :

- ❖ Les alimentations électriques à découpage.
- ❖ Les variateurs de vitesse de moteur et les onduleurs solaires.
- ❖ La conversion de la tension d'une batterie pour alimenter un ordinateur portable ou un téléphone portable.
- ❖ La régulation de la vitesse des moteurs électriques.
- ❖ La génération de signaux de commande pour les amplificateurs audio.

II.2.2 Types d'hacheur

Selon le parcours de l'énergie électrique entre la source et la charge, on distingue deux catégories de hacheurs : réversibles et non réversibles (Figure II-1) [28].

Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le flyback, en demi-point et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté [29].

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu.

- Abaisseurs (Buck),
- Élévateurs (Boost),
- Élévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau.

La topologie boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur boost pour augmenter la tension de sortie au niveau de service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y'a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telle que le buck-boost, le cuk, et le sepic.

Le tableau II-1 résume les principaux rapports de transformation en fonction du rapport cyclique pour les différentes structures de convertisseurs statiques avec et sans isolement galvanique. Où D désigne le rapport cyclique du convertisseur et K le rapport de transformation du transformateur d'isolement [30].

Convertisseur	Rapport de transformation D	galvanique
Buck	D	Non
Boost	$\frac{1}{1-D}$	Non
Buck-Boost	$\frac{-D}{1-D}$	Non
Cuk	$\frac{D}{1-D}$	Non
SEPIC	$\frac{D}{1-D}$	Non
Flyback	$K \cdot \frac{D}{1-D}$	oui
Push-pull	$K.D$	oui
Forward	$K.D$	oui

Tableau II-1: Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC.

II.2.2.1 Hacheurs réversibles

Ce sont des structures qui assurent une réversibilité en tension et/ou en courant. Ainsi, il est possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie. Alors, une source peut devenir une charge et inversement. Ce type de comportement se rencontre usuellement dans les systèmes d'entraînement électrique. Ainsi, un moteur en sortie d'un hacheur représente une charge. Cependant, si on veut réaliser un freinage, le moteur va devenir un générateur, ce qui va entraîner un renvoi d'énergie à la source (mieux qu'un simple freinage mécanique).

Dans cette catégorie, on distingue trois types :

- Hacheur réversible en tension,
- Hacheur réversible en courant,
- Hacheur réversible en courant et en tension.

On peut caractériser un convertisseur DC-DC par l'indication de sa ou de ses réversibilités communes à la source de tension et à la source de courant :

- Un convertisseur réversible en tension relie deux sources réversibles en tension.
- Un convertisseur réversible en courant relie deux sources réversibles en courant.
- Un convertisseur réversible en courant et en tension relie deux sources toutes deux réversibles en courant et en tension.

II.2.2.2 Hacheurs non réversibles

Dans cette partie, nous traitons les convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que le transfert d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer :

- Des sources de tension unidirectionnelles en courant, dont la tension qu'elles imposent ne peut être que d'un seul signe.

- Des sources de courant unidirectionnelles en tension, dont le courant qu'elles imposent ne peut être que d'un seul signe.

On distingue trois familles de hacheurs :

- Hacheur série ou abaisseur (**Buck**).
- Hacheur parallèle ou élévateur (**Boost**).
- Hacheur série-parallèle ou abaisseur-élévateur (**Buck-Boost**) [28].

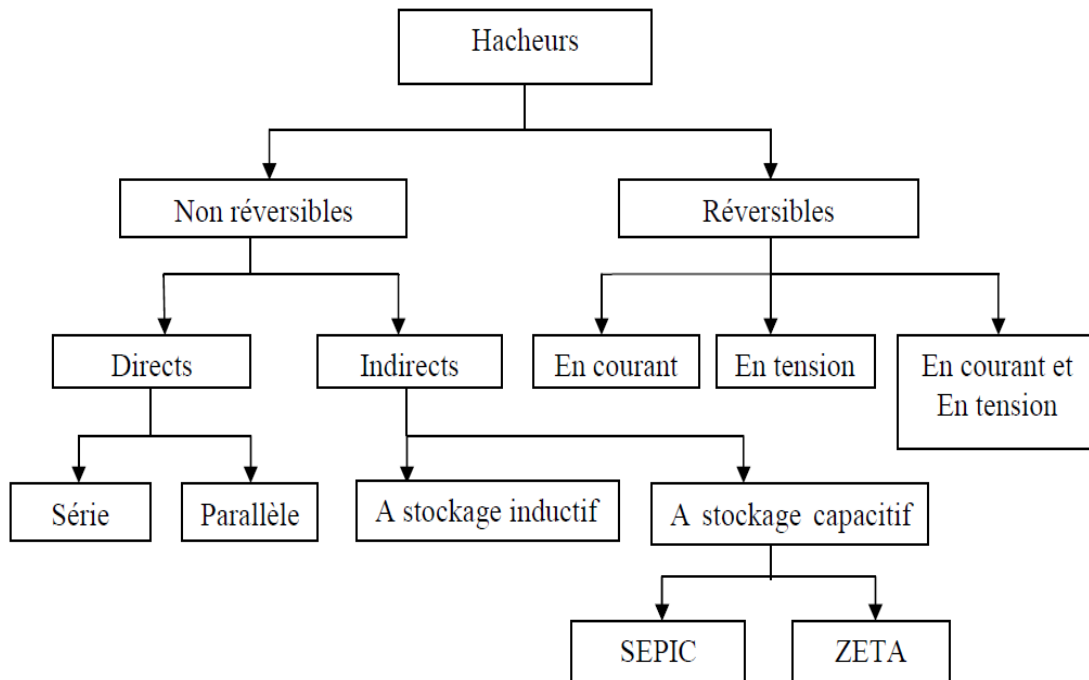


Figure II-1 : Différents types de hacheurs.

II.2.2.3 Les types des hacheurs non réversibles

A) Convertisseur Buck

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur buck ou hacheur série. La figure II-2 présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure [26].

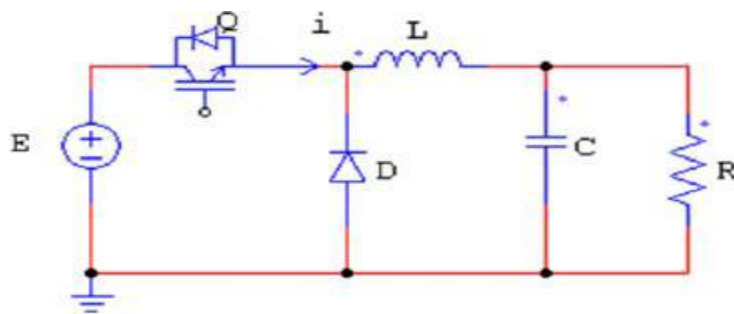


Figure II-2: Schéma réel du Convertisseur buck.

B) Hacheur survolteur (Boost)

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure II-3. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [28].

En mode Boost, l'inducteur supplémentaire est utilisé pour stocker l'énergie et augmenter la tension de sortie. Dans ce mode, le transistor est mis sous tension pendant une période de temps donnée pour que le courant circule dans l'inducteur principal, l'inducteur secondaire et la charge, tandis que l'inducteur secondaire stocke l'énergie. Pendant la phase de coupure, le transistor est éteint et l'énergie stockée dans l'inducteur secondaire est transférée à la charge, produisant ainsi une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée.

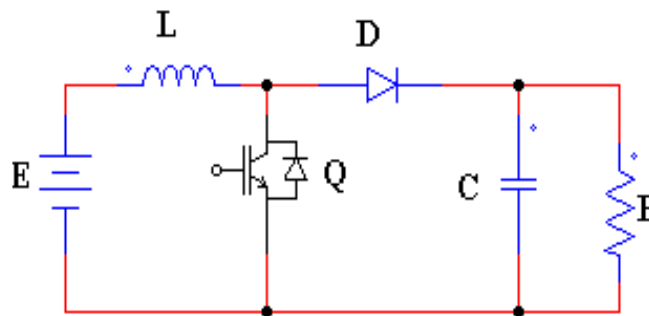


Figure II-3: Convertisseur survolteur (Boost-converter) [31].

C) Le convertisseur Buck-Boost

La deuxième topologie de base du DC/DC est donnée par la figure II.4. Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le thyristor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur se met sur la position (off) l'énergie stockée se transfert vers la charge via la diode. Dans les bornes de la charge décrivant le fonctionnement par l'équation suivante [28].

Le convertisseur Buck-Boost est un type de hacheur qui permet de réguler la tension d'un circuit électronique. Il peut convertir une tension continue d'entrée en une tension continue de sortie de valeur inférieure ou supérieure à celle de l'entrée, en fonction de la configuration du circuit.

Le principe de fonctionnement du convertisseur Buck-Boost est similaire à celui du convertisseur Buck. Il utilise également un transistor de commutation, une inductance, un condensateur et une diode de roue libre pour contrôler le courant et la tension du circuit. Cependant, le convertisseur Buck-Boost ajoute un deuxième inducteur pour augmenter ou diminuer la tension de sortie en fonction des besoins du système [32].

En mode Buck-Boost, l'inducteur supplémentaire est utilisé pour inverser la polarité de la tension de sortie. Par conséquent, lorsque la tension d'entrée est supérieure à la tension de sortie désirée, le transistor est mis sous tension pendant une période de temps donnée pour que le courant circule dans l'inducteur principal et la charge, tandis que l'inducteur secondaire stocke l'énergie. Pendant la phase de coupure, le transistor est éteint et le courant circule dans

l'inducteur secondaire et la charge, en produisant une tension de sortie inférieure à la tension d'entrée.

Le convertisseur Buck-Boost peut être utilisé dans de nombreuses applications, telles que la régulation de la tension d'une batterie pour alimenter un système électronique, la régulation de la tension d'une cellule solaire, la régulation de la tension d'un moteur électrique, etc.

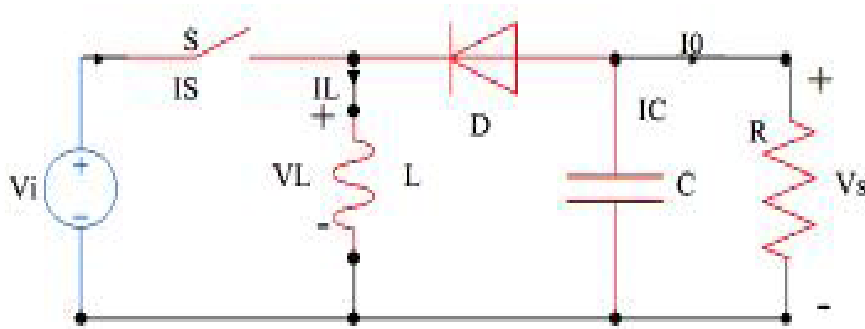


Figure II-4 : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur.

D) Le convertisseur Cuk

Le convertisseur Cuk est une variante du convertisseur SEPIC. Il se différencie de ce dernier par une disposition légèrement différente de ses composants. Le convertisseur Cuk est constitué de deux inductances, deux condensateurs, un interrupteur (généralement un transistor) et une diode. Comme il s'agit de composants réactifs, le rendement théorique est excellent.

Le condensateur C est utilisé pour transférer l'énergie entre la source de tension d'entrée V_{in} et celle de sortie V_{out} . Pour cela, il est connecté alternativement à l'entrée ou à la sortie du convertisseur grâce à l'interrupteur k ainsi qu'à la diode D . Les deux inductances L_1 et L_2 sont utilisées pour convertir respectivement la source de tension d'entrée et la source de tension de sortie (C) en sources de courant.

Ces conversions sont nécessaires pour limiter le courant lorsque le condensateur C_1 est relié à une source de tension (V_{out} ou V_{in}). Le convertisseur Cuk peut fonctionner en conduction continue ou discontinue en courant. Contrairement à d'autres convertisseurs, il peut également fonctionner avec une conduction discontinue en tension, où la tension aux limites du condensateur s'annule pendant une partie du cycle de commutation (Figure II-5).

Le convertisseur C_{uk} est un convertisseur DC-DC sans isolation galvanique, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'isolation électrique entre l'entrée et la sortie. Il peut être utilisé pour réguler la tension de sortie d'une source d'alimentation DC ou pour réguler le courant de charge ou de décharge d'une batterie. Le convertisseur Cuk est souvent utilisé dans les applications d'éclairage LED, d'alimentation de moteurs et dans les applications solaires photovoltaïques.

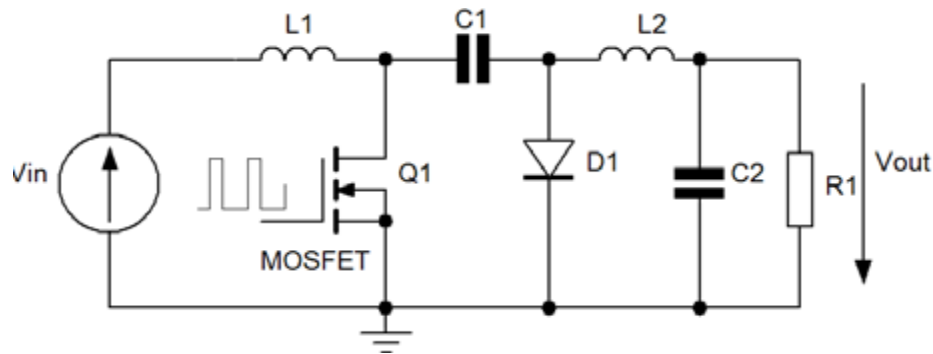


Figure II-5 : Schéma de base d'un convertisseur «CUC».

E) Hacheur ZETA

Comme le précédent, le hacheur ZETA (Figure II-6) dérive du hacheur à stockage capacitif. Il présente à nouveau des caractéristiques semblables (non inverseur).

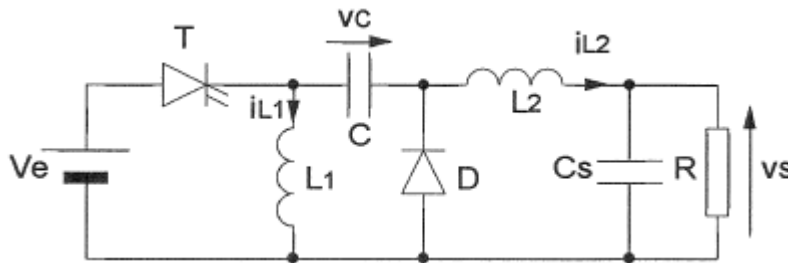


Figure II-6 : Schéma de base d'un convertisseur «ZETA» [28].

II.2.3 Evaluation des performances du hacheur survolteur (Boost)

Le hacheur survolteur (**Boost**) est un circuit électronique qui permet d'augmenter la tension d'un signal électrique continu. L'évaluation des performances de ce circuit consiste à mesurer différents paramètres qui déterminent son efficacité et sa qualité de fonctionnement.

Les paramètres à mesurer peuvent inclure :

- ❖ Le taux de conversion.
- ❖ La stabilité.
- ❖ La régulation.
- ❖ La fréquence de commutation.
- ❖ Le bruit.

L'évaluation des performances du hacheur survolteur peut être réalisée à l'aide d'équipements de mesure spécialisés tels que : des oscilloscopes, des analyseurs de spectre et des alimentations électriques.

II.2.4 Applications des convertisseurs DC/DC

En général, les convertisseurs DC-DC réalisent deux fonctions:

- Modifier le niveau de tension (élever ou abaisser).
- Réguler la tension [27].

II.3 Les convertisseurs DC/AC (onduleurs)

A la base de l'électronique de puissance se trouvent les éléments de puissances, qui peuvent être subdivisés en éléments redresseurs non contrôlables (diodes) et éléments redresseurs contrôlables (thyristors, triacs, transistors ...). Les éléments de puissance, associés à des dispositifs auxiliaires appropriés (commande de gâchettes, radiateurs de dissipation, circuit RC de protection), composent des modules standard permettant la conversion de puissance, tel que : Les redresseurs, **les onduleurs**, les cyclo-convertisseurs [31].

Un onduleur est un convertisseur statique de type continu/alternatif permettant de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique de tension ou de fréquence différente, C'est la fonction inverse d'un redresseur.

Les onduleurs sont basés sur une structure en pont en H, constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, transistors de puissance ou thyristors.

Les onduleurs sont basés sur le principe de la (MLI) modulation de largeur d'impulsion, qui consiste à contrôler la durée et le moment des impulsions de tension pour obtenir une forme d'onde de tension sinusoïdale.

II.3.1 Principe de la conversion

Les fonctions de l'onduleur sont de convertir l'électricité produite avec un maximum d'efficacité et en toute sécurité vers le réseau électrique. En moyenne, l'onduleur a une durée de vie de 8 à 12 ans [33].

L'onduleur convertit le courant continu des modules photovoltaïques en courant alternatif identique à celui du réseau. Dans sa conversion, l'onduleur cherche à chaque instant le point maximal de fonction (MPP) en fonction des caractéristiques I/U du champ photovoltaïque (qui dépendent des conditions météorologique (voir le schéma figure II-7).

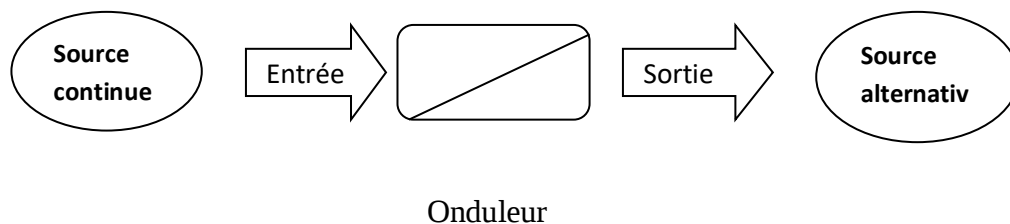


Figure II-7: Schéma de principe de la conversion Continue - Alternative (DC-AC).

II.3.2 Types des onduleurs

Il existe différents types d'onduleurs, qui sont classés en fonction de leur topologie de circuit et de leur mode de fonctionnement :

A) Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi-conducteur. Dans ce cas, nous commandons la fréquence la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes :

- Les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continue [34].

B) Onduleur non autonome

C'est le nom donné au montage redresseur tous les thyristors (pont de Graëtz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques). À la base du développement des entraînements statiques à vitesse **variable pour moteurs à courant** continu et alternatif, cyclo-convertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO (Figure II-8).



Figure II-8: Onduleur non autonome [31].

C) Onduleurs hybrides

Les onduleurs hybrides ou intelligents sont une nouvelle génération dédiée aux applications d'énergie renouvelable pour l'autoconsommation et en particulier pour les panneaux solaires photovoltaïques (onduleur solaire). L'énergie des panneaux solaires photovoltaïques est active seulement pendant la journée et essentiellement lorsque le soleil est au zénith (point d'intersection de la verticale du panneau et du soleil) : elle est donc fluctuante et non synchronisée avec la consommation des habitations [35]. De ce fait, il est nécessaire de stocker l'excédent de production avant utilisation (voir figure II-9).



Figure II-9: Boitier onduleur hybride Imeon Energy.

II.3.3 Evaluation des performances de l'onduleur monophasé

L'évaluation des performances d'un onduleur monophasé peut être effectuée à l'aide de plusieurs paramètres :

- ✓ **L'efficacité de conversion** est un paramètre important pour évaluer la performance d'un onduleur, qui mesure la quantité d'énergie électrique qui est convertie de la source d'entrée à la charge de sortie. Une efficacité élevée réduit les pertes d'énergie et améliore l'efficacité globale du système.
- ✓ **La qualité de la forme d'onde de sortie** est un autre paramètre important qui mesure l'exactitude de la forme d'onde de sortie par rapport à la forme d'onde d'entrée. Une bonne qualité de la forme d'onde de sortie est essentielle pour assurer un fonctionnement fiable et sûr des équipements alimentés par l'onduleur.
- ✓ **La THD** mesure le pourcentage de distorsion harmonique présente dans la forme d'onde de sortie par rapport à la forme d'onde de référence. Une THD élevée peut causer des problèmes de bruit électrique, de chaleur et de perturbation pour les équipements alimentés par l'onduleur.
- ✓ **La plage de tension de sortie** est un autre paramètre important, qui mesure la gamme de tension de sortie de l'onduleur. Une plage de tension de sortie suffisamment large est nécessaire pour alimenter efficacement une variété d'équipements électriques.
- ✓ **La capacité de charge** mesure la quantité de puissance électrique que l'onduleur peut fournir à la charge de sortie. Une capacité de charge suffisante est nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques des équipements alimentés par l'onduleur.
- ✓ **La stabilité et la fiabilité** sont également des paramètres importants pour évaluer la performance d'un onduleur, qui mesurent la capacité de l'onduleur à maintenir une sortie stable et fiable dans des conditions de charge et d'environnement variables.

II.3.4 Applications des onduleurs

L'onduleur est l'un des montages les plus répandus de l'électronique de puissance ; il a de multiples applications :

Les alimentations de secours.

- ❖ Les alimentations sans interruption.
- ❖ Le raccord des panneaux solaires au réseau électrique.
- ❖ Les nombreux dispositifs nécessitant de fonctionner à une fréquence spécifique.
- ❖ Les générateurs d'ultrasons ou d'électricité utilisés dans le domaine médical.
- ❖ L'alimentation des lampes dites à cathode froide pour le rétro-éclairage des afficheurs à cristaux liquides.
- ❖ Les variateurs de vitesse des machines alternatives.
- ❖ Les convertisseurs de tension continue/continue à découpage : La tension continue est d'abord ondulée en haute fréquence puis appliquée à un transformateur en ferrite et enfin redressée.
- ❖ Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes [31].

II.4 Définition de la commande PWM

II.4.1 Définition

Un signal MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) ou PWM HYPERLINK en anglais (Pulse Width Modulation) est un signal dont le rapport cyclique varie. Ce type du signal est souvent utilisé dans les applications à valeur moyenne variable (Ex : Commande des moteurs, alimentation réglable,...).

II.4.2 Applications

- ✓ Variateurs de vitesse des moteurs
- ✓ Convertisseurs: AC/DC, DC/AC, DC/DC, AC/AC
- ✓ Générateur des signaux
- ✓ Modulateurs
- ✓ La conversion numérique-analogique

II.4.3 Fonctionnement

Le signal PWM (MLI, Modulation de largeur d'impulsion) est un signal de fréquence constante et de rapport cyclique variable. Il est mis en œuvre dans des fonctions telles que : La synthèse vocale ou associée à un filtre passe bas permet la synthèse de signaux audio. La commande en vitesse d'un moteur à courant continu, ou ce dernier fait naturellement office de filtre passe bas. La commande en position d'un servomoteur La génération de signaux aléatoires ou périodiques, pour un onduleur par exemple. Courbe PWM dont la valeur moyenne est une courbe sinusoïdale. La valeur moyenne (Figure II-10) est récupérée simplement par un filtre passe bas.

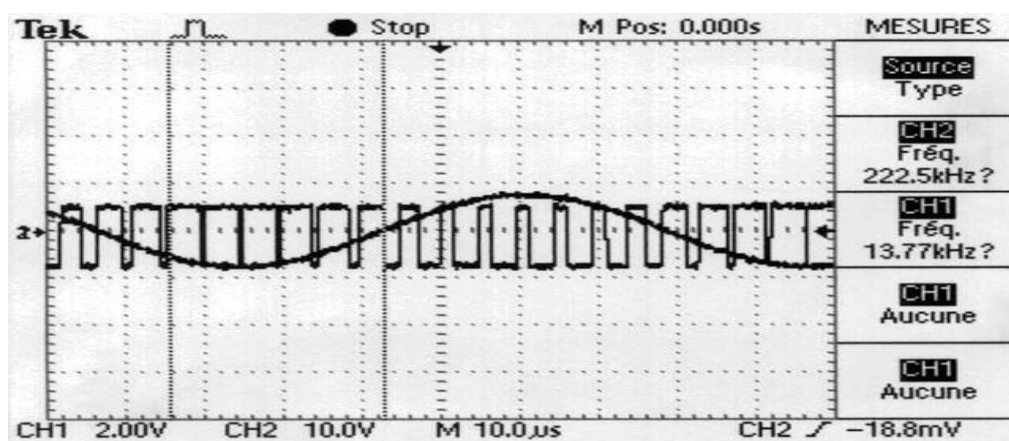


Figure II-10: La valeur moyenne est récupérée simplement par un filtre passe bas.

La valeur moyenne d'un signal rectangulaire dépend du rapport cyclique (duty Cycle) ainsi que de la tension maximum ($V_{\max}$). Le rapport cyclique $\eta = t_h/T$, t_h représente la durée de l'état haut et T la période.

Si $t_h = 0$, $\eta = 0$

Si $t_h = T$, $\eta = 1$

Donc $0 \leq \eta \leq 1$

Valeur moyenne : $V_m = V_{\max} \cdot t_h / T = V_{\max} \cdot \eta$.

En retirant la fréquence porteuse $F=1/T$ avec un filtre passe bas, il reste la valeur moyenne du signal. Le filtre passe bas peut être électronique ou mécanique (cas d'un moteur et de son inertie l'inertie) ou optique (cas de l'œil humain qui filtrera les fréquences au delà de 30Hz). La génération d'un signal par PWM (Figure II-11) est particulièrement avantageuse du point de vue de la consommation de la commande. En effet il sera produit par un transistor MOSFET (ou bipolaire) qui ne consomme pratiquement rien en mode triode se comporte comme une de très faible valeur) et rien du tout en mode bloqué.

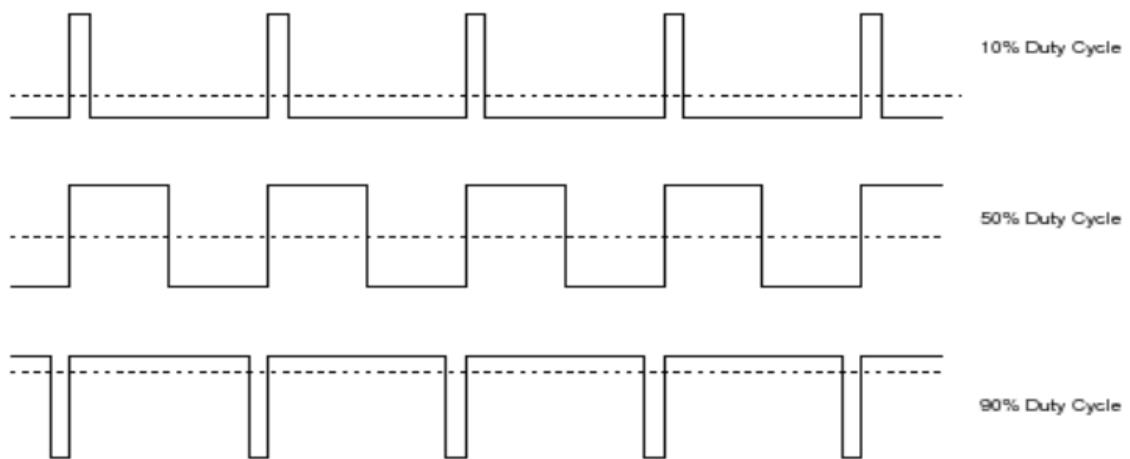


Figure II-11: Signal de commande PWM

Exemple de structure d'un hacheur permettant la commande d'un moteur à courant continu par PWM. K est en électronique, généralement un MOSFET. K fermé le courant passe de l'alimentation vers le moteur. K ouvert l'énergie emmagasinée dans l'inductance du moteur s'évacue sous forme d'un courant traversant la (dite de roue libre) [33].

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude théorique des convertisseurs (DC-DC) et (DC-AC) d'une manière générale, pour les hacheurs non réversibles en particulier (Boost converter) et les onduleurs en particulier l'onduleur monophasé.

Les convertisseurs DC/DC sont des circuits électroniques largement utilisés dans les systèmes électroniques pour convertir une tension continue en une tension pulsée, également connue sous le nom d'onde carrée. Les hacheurs sont utilisés pour réguler la tension d'un système électronique, contrôler la vitesse d'un moteur électrique, générer des signaux de commande pour les amplificateurs audio, etc...

Les onduleurs sont des dispositifs électriques très utiles pour convertir le courant continu en courant alternatif, permettant ainsi d'alimenter des équipements électroniques qui nécessitent une alimentation électrique stable et régulière.

Ils sont largement utilisés dans de nombreuses applications, notamment les systèmes de sauvegarde de données, les alimentations électriques de secours, les systèmes de climatisation, les éclairages de secours, les équipements de télécommunications, les systèmes de contrôle industriel et les équipements médicaux.

Chapitre III : Modélisation et commande des systèmes PV et éolien

III.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires. Bien que cette technologie soit facile à mettre en œuvre, peu coûteuse et respectueuse de l'environnement, sa compétitivité diminue lorsque la demande d'énergie augmente.

Afin de garantir une performance optimale, un système PV doit être correctement dimensionné en fonction des conditions météorologiques telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent. La modélisation mathématique des cellules solaires est nécessaire pour optimiser leur rendement et diagnostiquer les problèmes éventuels.

Les modèles mathématiques décrivant les cellules PV sont basés sur des circuits équivalents dont les paramètres sont déterminés expérimentalement à partir de mesures directes sur le module ou des données fournies par le constructeur. Les différences entre les modèles se situent principalement dans le nombre de diodes, la résistance shunt et le facteur d'idéalité. Le modèle équivalent à quatre paramètres basé sur **la courbe tension-courant** est le plus couramment utilisé dans la littérature.

III.2 Modélisation du module photovoltaïque

Pour modéliser les cellules photovoltaïques, il est important de choisir des circuits électriques équivalents appropriés afin de créer des modèles précis. Pour ce faire, il faut comprendre la configuration physique des éléments de la cellule et leurs caractéristiques électriques, car le comportement des cellules PV est fortement non linéaire en raison des jonctions semi-conductrices à leur base. Enfin, l'étude d'un module **Solarpeace P6Y-230** est présentée en exemple (Figure III-1) [36]



Figure III-1: Module Solarpeace P6Y-230.

Le tableau III-1 donne les caractéristiques du module Solarpeace P6Y-230 sous les conditions standards (1000 W/m^2 , masse optique: AM 1.5, Température de cellule: 25°C).

Grandeurs	Valeurs
Puissance maximale (W)	230.1
Tension Circuit Ouvert (Vco) (V)	37
Courant Circuit Court (Isc) (A)	8.22
Tension à Puissance Maximal (Vmax) (V)	30
Courant à Puissance Maximum (Cmax) (A)	7.67
Coefficient de sensibilité de la tension à la température Voc (%/deg.C)	-0.3828
Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température (%/deg.C)	0.062105
Nombre de cellules en série (Ns)	10
Nombre de cellules en parallèle (Np)	35

Tableau III-1: Caractéristiques du module Solarpeace P6Y-230.

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque seront décrites comme suit :

- Le courant de court-circuit (Icc) qui fournit chaque cellule est [37] :

$$I_{CC(ce\text{le}\text{ule})} = \frac{I_{cc}}{N_p} \quad (\text{III-27})$$

- La tension du circuit ouvert (Vco) de chaque cellule est :

$$V_{CO(ce\text{le}\text{ule})} = \frac{V_{co}}{N_s} \quad (\text{III-28})$$

- Le courant maximal (Imp) de chaque cellule est :

$$I_{mp(ce\text{le}\text{ule})} = \frac{I_{mp}}{N_p} \quad (\text{III-29})$$

- La tension maximale (V_{mp}) de chaque cellule est :

$$V_{mp(ce\text{le}\text{ule})} = \frac{V_{mp}}{N_s} \quad (\text{III-30})$$

- La puissance maximale Pmax de chaque cellule est :

$$P_{\max(ce\text{le}\text{ule})} = I_{mp(ce\text{le}\text{ule})} * V_{mp(ce\text{le}\text{ule})} \quad (\text{III-31})$$

- La résistance série Rs de chaque cellule est :

$$R_{s(ce\text{le}\text{ule})} = \frac{N_p}{N_s} * R_{s(module)} \quad (\text{III-32})$$

- La résistance shunt R_{sh} de chaque cellule est :

$$R_{sh(ce\text{le}\text{ule})} = \frac{N_p}{N_s} * R_{sh(module)} \quad (\text{III-33})$$

III.3 Identification des paramètres du GPV en utilisant le modèle d'une cellule réelle

Pour la modélisation d'une cellule réelle nous avons choisis le modèle à une diode dont le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté par (la Figure III-2) [38].

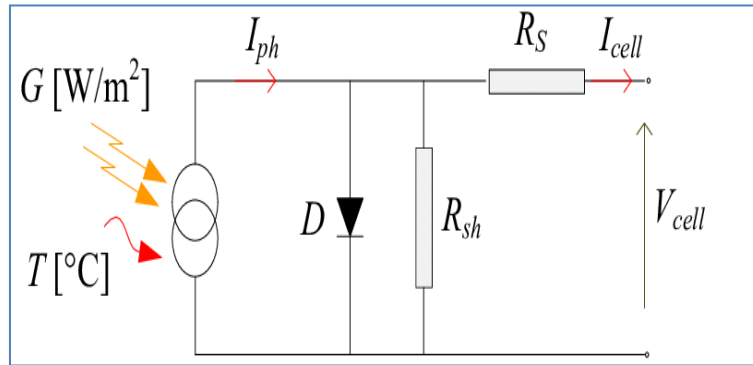


Figure III-2: Schéma équivalent du modèle à une diode.

C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data Sheet). Il est aussi considéré comme une référence pour cataloguer typiquement les modules solaires.

Ce modèle est appelé modèle à une diode et sa valeur de courant est donnée par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s [\exp (q (V_{pv} + (I_{pv} \times R_s)) - 1) - V_{pv} + (I_{pv} \times R_s)R_{sh} \quad (\text{III-34})$$

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt.

I_{ph} : Le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température.

I_s : Courant de saturation inverse de la diode.

n : Facteur d'idéalité de la diode.

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe: Sa tension à vide V_{co} : Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée. Son courant court-circuit I_{cc} : Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même. Son point de puissance maximale **MPP**: (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp})[37].

Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces caractéristiques dans des conditions de test bien précises (**STC** = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : émission lumineuse de 1000 W/m^2 , température de 25°C , conditions spectrales Air Mass 1.5 (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse

une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de 41.8° par rapport à l'horizontale (Figure III-3).

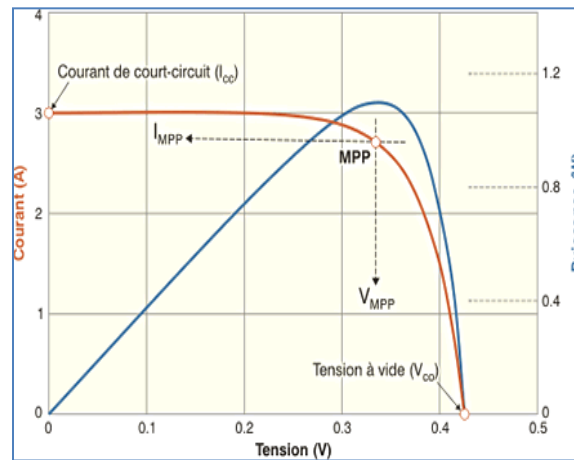


Figure III-3: Schéma de la courbe tension-courant.

III.4 L'adaptation de l'énergie PV par les convertisseurs de puissances

L'énergie photovoltaïque produite par des panneaux solaires est une source d'énergie continue de tension et de courant variable en fonction des conditions météorologiques et de l'éclairement solaire. Pour utiliser cette énergie pour alimenter des charges électriques ou pour la stocker dans des batteries, il est nécessaire d'adapter cette énergie PV aux caractéristiques de la charge ou du système de stockage. C'est là qu'interviennent les convertisseurs de puissance, qui peuvent être de différents types, en fonction des caractéristiques de l'énergie PV et de la charge à alimenter. Les deux types utilisés dans notre modélisation sont les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et les convertisseurs DC-AC (onduleurs).

Pour Les convertisseurs DC-DC, nous avons choisis le convertisseur élévateur aussi appelé Boost converter ou hacheur parallèle, qui joue un rôle crucial dans les systèmes photovoltaïques en permettant de convertir la tension continue produite par les panneaux solaires en une tension continue de forte valeur, ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, afin de disposer d'un niveau de tension suffisamment élevé.

Le fonctionnement du convertisseur se compose de deux phases: -Une phase d'accumulation d'énergie: lorsque l'interrupteur est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

Lorsque l'interrupteur est ouvert (état bloqué), l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité [38]. Et pour Les convertisseurs de puissance DC-AC, nous avons choisis l'ondeleur monophasé, qui convertit l'énergie PV de tension et de courant continu en une énergie monophasée de tension et de

courant alternatif sinusoïdale, plus adaptée pour alimenter un moteur électrique à courant continu comme charge dans notre modélisation.

En somme, les convertisseurs de puissance sont essentiels pour adapter l'énergie photovoltaïque aux caractéristiques de la charge ou du système de stockage. Ils permettent de convertir l'énergie de tension et de courant continu produite par les panneaux solaires en une énergie de tension et de courant alternatif adaptée pour alimenter les charges électriques ou pour stocker l'énergie dans des batteries.

III.5 Amélioration des performances d'un système photovoltaïque par la méthode MPPT

III.5.1 Amélioration de la méthode

Pour améliorer les performances d'un système photovoltaïque, nous utilisons la méthode **MPPT** (Maximum Power Point Tracking) pour maximiser la puissance de sortie de la cellule solaire photovoltaïque (GPV) en suivant le point de puissance maximale (MPP) de la courbe courant-tension (IV) de cette cellule.

Le point de puissance maximale (MPP) est le point de fonctionnement de la cellule solaire qui produit la puissance de sortie maximale pour un niveau d'éclairement donné. Le MPP dépend de plusieurs facteurs tels que la température de la cellule, le niveau d'éclairement, et les caractéristiques électriques de la cellule solaire (voir la figure III-4).

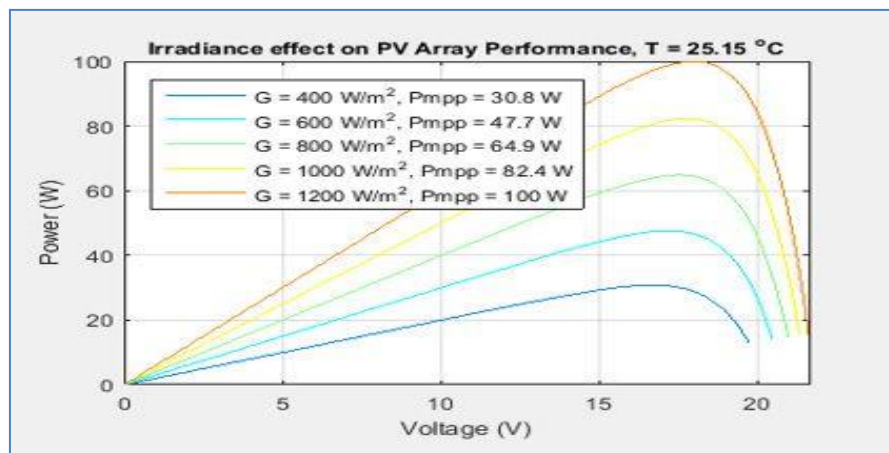


Figure III-4: Courbe tension-puissance avec les caractéristiques courant-tension puissance-tension d'un système photovoltaïque

La méthode MPPT utilise des algorithmes qui surveillent en continu la tension et le courant de sortie de la GPV et ajuste la charge pour maximiser la puissance de sortie. Dont les plus couramment utilisés sont l'algorithme de Perturbation et Observation (P&O) et l'algorithme Incrémental Conductance (IC). L'algorithme de Perturbation et Observation (P&O) est le plus simple des deux algorithmes. Il consiste à mesurer la puissance de sortie de la GPV à des intervalles réguliers et à ajuster la charge pour obtenir une puissance de sortie maximale. Cependant, cet algorithme peut être sensible aux perturbations de l'éclairement et peut entraîner une instabilité de la tension de sortie (Figure III-5)[39].

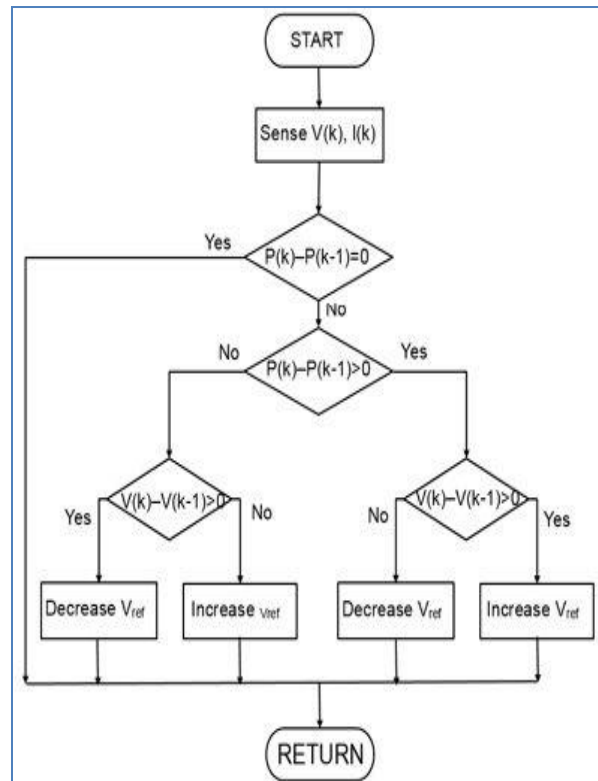


Figure III-5: L'algorithme de Perturbation et Observation (P&O).

En utilisant la méthode MPPT, les performances du système photovoltaïque peuvent être améliorées de plusieurs façons. Tout d'abord, la méthode MPPT peut augmenter l'efficacité énergétique en permettant à la cellule solaire de fonctionner à son MPP, ce qui peut augmenter la production d'énergie. De plus, la méthode MPPT peut aider à prolonger la durée de vie de la cellule solaire en réduisant le stress thermique et électrique sur la cellule.

III.5.2 Définition de la commande PWM

La commande PWM (Pulse Width Modulation) est une technique de modulation de largeur d'impulsion MLI, qui permet de contrôler la puissance électrique transmise à une charge en modulant le rapport cyclique d'un signal d'onde carrée.

Le signal PWM est généré par un circuit électronique appelé "modulateur PWM", qui est généralement contrôlé par un microcontrôleur ou un DSP. Le signal PWM est composé d'une série d'impulsions dont la durée est modulée en fonction du niveau de tension souhaité pour la charge. Le rapport cyclique du signal PWM représente le rapport entre la durée de l'impulsion positive et la durée totale de l'onde carrée.

Le signal PWM (MLI, Modulation de largeur d'impulsion) est un signal de fréquence constante et de rapport cyclique variable. Il est mis en œuvre dans des fonctions telles que : La synthèse vocale ou associée à un filtre passe bas permet la synthèse de signaux audio. La commande en vitesse d'un moteur à courant continu, ou ce dernier fait naturellement office de filtre passe bas. La commande en position d'un servomoteur La génération de signaux aléatoires ou périodiques, pour un onduleur par exemple. Courbe PWM dont la valeur

moyenne est une courbe sinusoïdale. La valeur moyenne est récupérée simplement par un filtre passe bas (Figure III-6) [40].

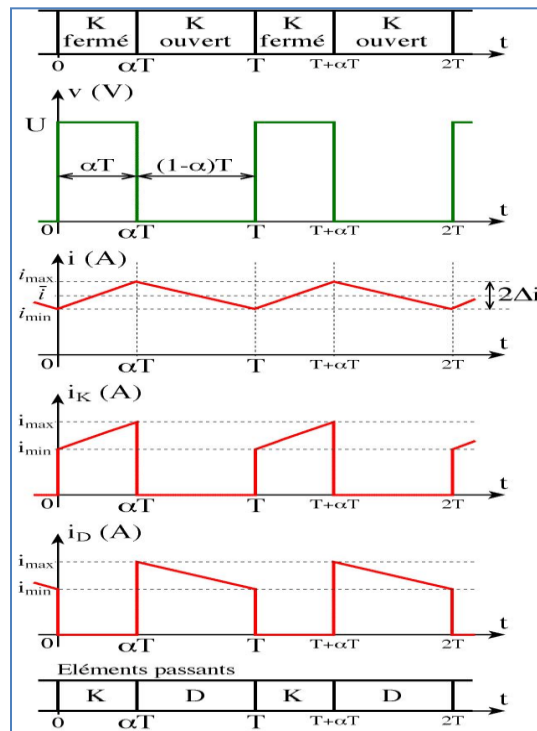


Figure III-6: Modulation de largeur d'impulsion (MLI).

En utilisant la commande PWM, il est possible de contrôler efficacement la puissance fournie à une charge, en faisant varier la tension moyenne fournie à cette dernière. Par exemple, pour un signal PWM avec un rapport cyclique de 50%, la tension moyenne transmise à la charge est la moitié de la tension d'alimentation. En modulant le rapport cyclique, il est donc possible de contrôler la tension moyenne transmise à la charge et donc de contrôler sa puissance.

III.6 Conversion de l'énergie éolienne

La conversion de l'énergie éolienne consiste à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique utilisable. Cette transformation se fait généralement à travers l'utilisation d'une éolienne, qui est constituée d'un rotor qui est muni de pales tournent grâce à l'énergie cinétique du vent et il est relié au générateur électrique. Cette dernière transforme alors l'énergie mécanique en énergie électrique qui est ensuite injectée dans le réseau électrique ou stockée dans des batteries.

Il existe plusieurs types d'éoliennes qui se différencient notamment par leur technologie de rotor, leur taille et leur puissance. Les éoliennes les plus courantes sont les éoliennes à axe horizontal, qui sont constituées d'un rotor horizontal et d'une tour verticale. Les éoliennes à axe vertical sont également utilisées, elles sont constituées d'un rotor vertical et d'une structure en forme de cylindre.

Le contrôle de l'éolienne est essentiel pour optimiser son rendement et assurer sa sécurité. Les systèmes de contrôle permettent notamment de réguler la vitesse de rotation du rotor et d'orienter les pales en fonction de la direction du vent. Il existe également des systèmes de contrôle avancés qui permettent d'optimiser la production d'énergie en fonction des conditions météorologiques et des besoins du réseau électrique (voir la figure III-7) [41]

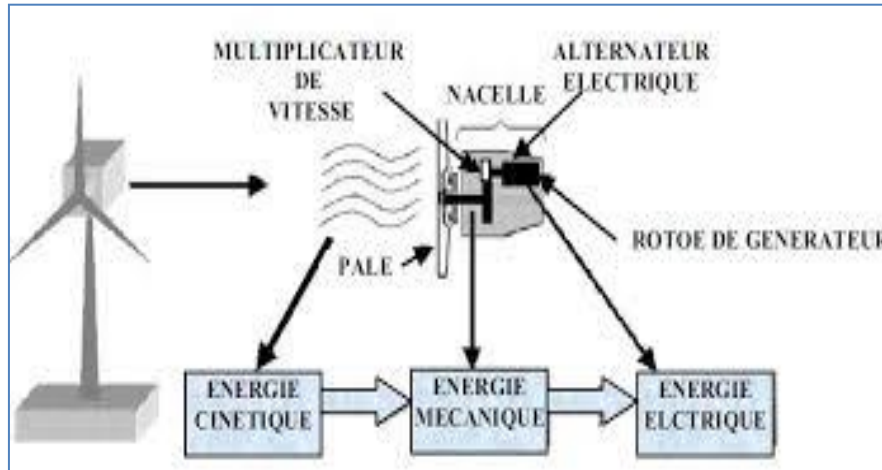


Figure III-7: Schéma simple d'une éolienne.

III.7 Modèle de rotor de turbine éolienne

Une éolienne dite classique est généralement constituée de trois éléments principaux :

1. Le rotor
2. Le mat
3. La nacelle

Le rotor est le composant qui tourne sous l'action du vent, il est constitué du moyeu sur lequel, on a assemblé des pales. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3. On distingue deux types de rotor :

- Les rotors à vitesse fixe qui sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositifs d'électronique de puissance.
- Les rotors à vitesse variable qui sont moins coûteux car le dispositif d'orientation des Pales est simplifié.

III.8 Modélisation de la partie électrique

La partie électrique du système éolien comprend généralement un générateur électrique, un convertisseur de puissance et un système de contrôle. Le générateur électrique transforme l'énergie mécanique en énergie électrique et le convertisseur de puissance permet de réguler la tension et la fréquence de l'énergie électrique produite pour la synchroniser avec le réseau électrique.

Les générateurs ne produisent pas directement de l'énergie, mais ils assurent le transfert de l'énergie et la convertissent en électricité. Pour ce faire, l'énergie doit être transmise au générateur. Dans le cas d'un générateur, la force motrice est le rotor qui transforme l'énergie mécanique du rotor en électricité. Un générateur de base est constitué d'une bobine de fils qui tourne à l'intérieur d'un champ magnétique. Selon le type de courant produit, il peut s'agir de courant continu (CC) ou de courant alternatif (AC). Un générateur doit comporter :

- Des bobines de fil dans lesquelles l'électricité est produite et circule.
- Un champ magnétique.
- Un mouvement relatif entre les bobines de fil et le champ magnétique. Le rotor d'une éolienne peut entraîner une génératrice, soit par l'intermédiaire d'un multiplicateur, il existe trois types de génératrices électriques :
 1. Une génératrice à courant continu (Dynamo).
 2. Une génératrice asynchrone à courant alternatif :*- Génératrice asynchrone à cage d'écureuil.*- **Génératrice asynchrone à double alimentation (MADA).***- Génératrice asynchrone à rotor bobiné.
 3. Une génératrice synchrone à courant alternatif.

III.9 Modélisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à une étude générale de la MADA, ses applications et ses variantes fonctionnement et ses avantages et connaissance du comportement de type de la machine dans les différents régimes de fonctionnement.

La MADA se compose principalement de deux parties, le stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques, et le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et séparé du stator par un entre-fer. Les circuits électriques du stator sont constitués de trois enroulements identiques couplés en triangle ou en étoile. La seule différence est que celui du rotor est relié aux bagues sur lesquelles glissent les balais.

Une machine asynchrone à double alimentation (MADA) est un type de machine électrique qui peut être utilisée pour la production d'énergie éolienne. Elle est constituée d'un rotor bobiné et de deux enroulements statoriques, l'un connecté au réseau électrique et l'autre connecté à un convertisseur de puissance (onduleur) qui contrôle la vitesse de rotation du rotor et de maximiser la production d'énergie en utilisant la commande PWM (Figure III-8).

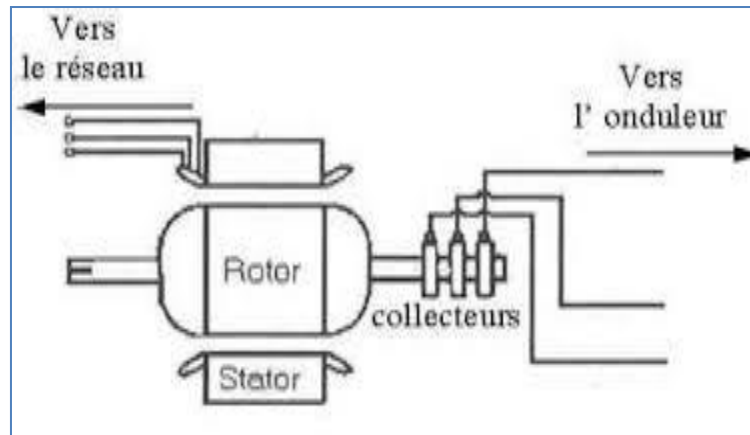


Figure III-8: Schéma de la MADA connectée au réseau.

La MADA ne commence à produire qu'à partir de 1000 tr/min qui correspond à la vitesse de synchronisme moins 30 %. La puissance totale produite par la MADA est la somme des puissances statorique et rotorique ; avant le synchronisme la puissance rotorique est négative donc la MADA produit légèrement moins que la machine à cage, mais au-delà de synchronisme la MADA est capable de produire de l'énergie par intermédiaire du rotor jusqu'à 1900 tr/min qui correspond à +30% de la vitesse du synchronisme (Figure III-9) [42].

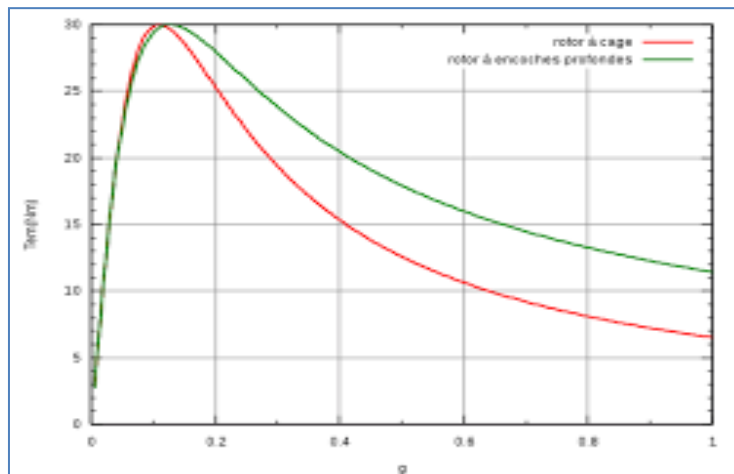


Figure III-9: Caractéristique de la production d'énergie de la MADA et machine asynchrone à cage.

La machine asynchrone à double alimentation a deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de la puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchrone) et la récupération de la puissance de glissement.

III.10 Conclusion

En conclusion, la modélisation et la commande d'un système photovoltaïque (PV) et d'un système éolien sont des étapes clés pour optimiser la production d'énergie électrique et maximiser le rendement du système.

La modélisation du système PV consiste à décrire mathématiquement le comportement de chaque composant du système, notamment les cellules photovoltaïques, le convertisseur de puissance et le système de contrôle. La modélisation permet de simuler le comportement du système dans différentes conditions d'éclairement solaire et de déterminer les paramètres optimaux de commande pour maximiser la production d'énergie électrique.

La commande du système PV est basée sur la méthode MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui permet de réguler la tension et le courant du système pour maximiser la production d'énergie électrique. La commande PWM (Pulse Width Modulation) est utilisée pour contrôler la puissance électrique produite par le système.

La modélisation du système éolien consiste à modéliser les composants électriques qui permettent de transformer l'énergie mécanique produite par l'éolienne en énergie électrique utilisable et de l'injecter dans le réseau électrique. La modélisation permet de simuler le comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement et de déterminer les paramètres optimaux de commande pour maximiser le rendement du système.

La commande du système éolien est basée sur la régulation de la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne pour maximiser la production d'énergie électrique. Les MADA (Machines Asynchrones à Double Alimentation) sont couramment utilisées pour la production d'énergie éolienne en raison de leur efficacité et de leur capacité à produire de l'énergie électrique dans une large gamme de vitesses de rotation.

En somme, la modélisation et la commande des systèmes PV et éolien permettent d'optimiser la production d'énergie électrique et de maximiser le rendement du système, contribuant ainsi à la transition énergétique vers des sources d'énergie plus durables et respectueuses de l'environnement.

Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

IV.1 Introduction

La simulation des systèmes photovoltaïques (PV) et éoliens est une étape cruciale pour évaluer leur performance et prédire leur comportement dans différentes conditions. Nous avons choisi le logiciel MATLAB/Simulink qui est largement utilisé dans le domaine de l'énergie renouvelable pour modéliser ces systèmes.

Lors de la simulation, les modèles mathématiques des systèmes PV et éoliens, basés sur les caractéristiques des composants et les données environnementales, sont utilisés pour simuler le fonctionnement du système dans des scénarios spécifiques. Les simulations peuvent prendre en compte des variables telles que l'ensoleillement, la vitesse du vent, la température, les pertes de câblage, les pertes d'onduleur, etc....

Après la simulation, les résultats peuvent être interprétés pour évaluer les performances du système. Les paramètres clés à examiner incluent la puissance de sortie, le rendement énergétique, la production d'électricité prévue, les variations de tension et de courant.

IV.2 Présentation du logiciel de simulation MATLAB/SIMULINK

MATLAB/Simulink est un logiciel puissant de simulation et de modélisation largement utilisé dans de nombreux domaines, y compris l'ingénierie, les sciences, les mathématiques et l'énergie. Il est largement adopté dans le domaine de l'énergie renouvelable pour simuler et analyser les systèmes photovoltaïques (PV) et éoliens.

MATLAB/Simulink offre une interface conviviale, une bibliothèque de blocs prêts à l'emploi et permet la personnalisation des modèles. La simulation en temps réel permet d'analyser le comportement du système, et l'analyse avancée des résultats facilite l'extraction de données et la visualisation. L'intégration avec MATLAB offre des fonctionnalités supplémentaires pour les calculs et l'analyse statistique.

IV.3 Simulation de la MADA

Les caractéristiques électriques de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) sont citées dans le tableau IV-1 suivant :

Caractéristiques	Valeurs
Puissance de sortie mécanique nominale (W)	3000
Puissance de base du générateur électrique(V.A)	3000/0.9
Vitesse du vent de base (m/s)	12
Puissance maximale à la vitesse du vent de base (pu de la puissance mécanique nominale)	1000
Vitesse de rotation de base (p.u. de la vitesse de base du générateur)	1.3
Angle de pas beta pour afficher les caractéristiques de puissance de l'éolienne (beta >=0) (deg)	0

Tableau IV-1: Les caractéristiques électriques de la machine MADA.

Les éoliennes utilisent des pales de construction aérodynamique pour capter l'énergie éolienne et la convertir en puissance mécanique de rotation. Dans la plupart des cas, trois lames sont utilisées. Cette énergie mécanique est transmise au rotor d'un générateur électrique qui la transforme en énergie électrique. Le modèle complet de la conception Simulink est donné par la figure IV-1.

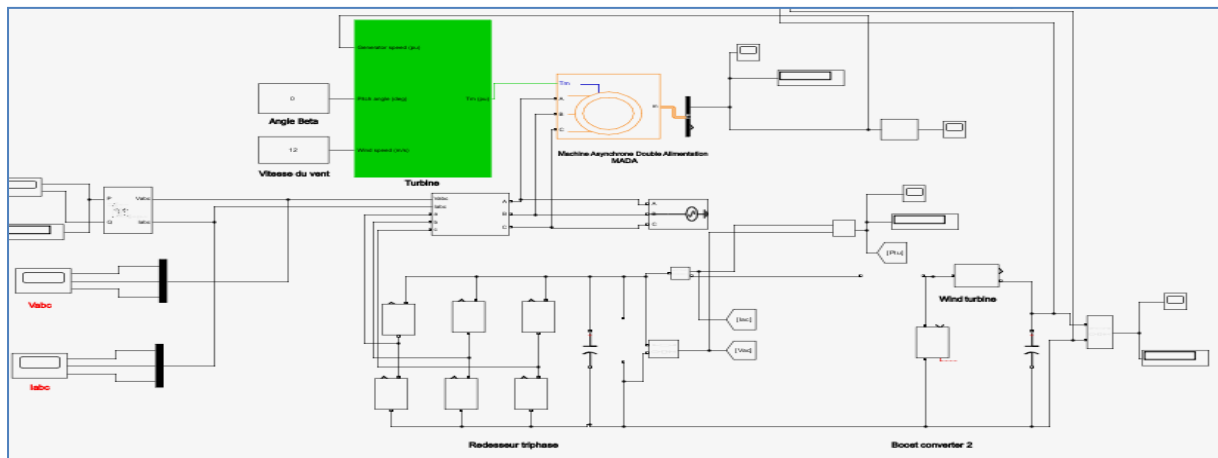


Figure IV-1: Schéma bloc de machine la MADA connectée à une turbine.

IV.4 Simulation de la stratégie de commande

Nous avons utilisé deux méthodes de commande pour le système hybride PV et éolien:

- ❖ La commande **MPPT** (Maximum Power Point Tracking).
- ❖ La commande **MLI** (Modulation de Largeur d'Impulsion).

La figure IV-2 représente le schéma d'un système photovoltaïque composé d'un panneau solaire connecté à un hacheur survolteur commandé par MPPT.

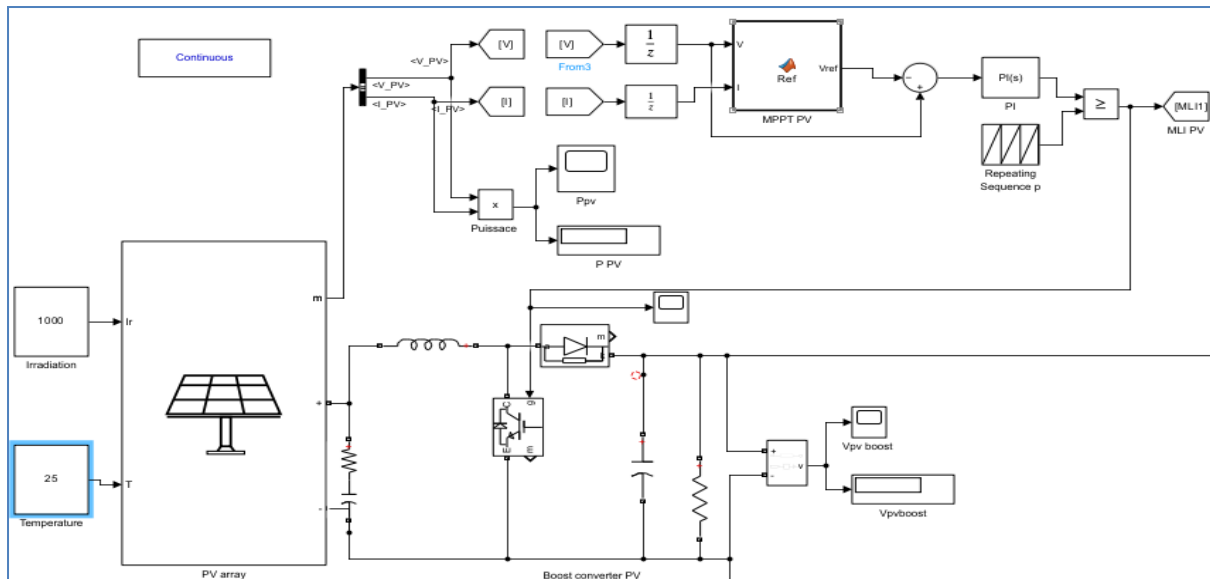


Figure IV-2: Modèle Simulink pour la commande MPPT.

Tandis que, la figure IV-3 représente le schéma bloc de la commande MLI ou PWM, qui génère un signal PWM nécessaire à la commande de l'onduleur monophasé.

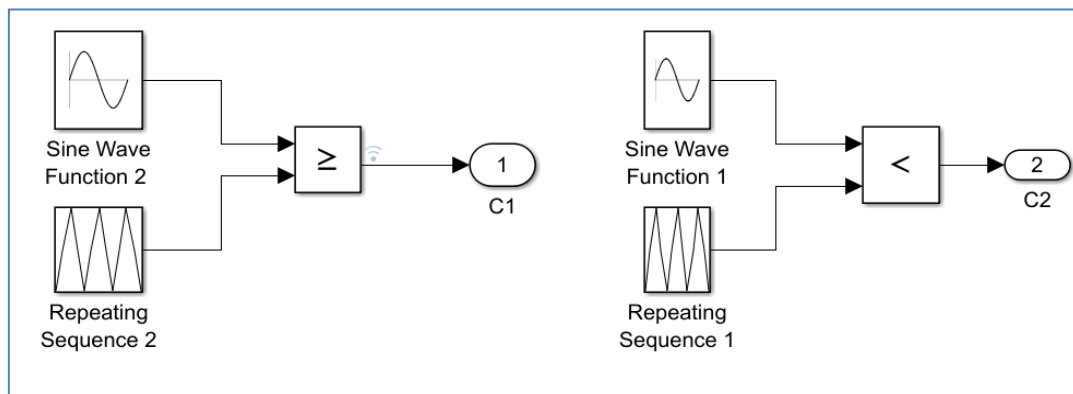


Figure IV-3: Modèle Simulink pour la génération du signal PW.

IV.5 Simulation du système hybride de conversion d'énergie (Éolienne - photovoltaïque)

Le système hybride est composé d'un générateur photovoltaïque PV et d'une turbine, tous deux couplés à une charge à courant continu DC via un convertisseur de puissance intermédiaire (Boost converter) dédié à chaque source.

Le système hybride se module à l'aide de l'environnement Matlab/Simulink comme, il est illustré sur la figure IV-4.

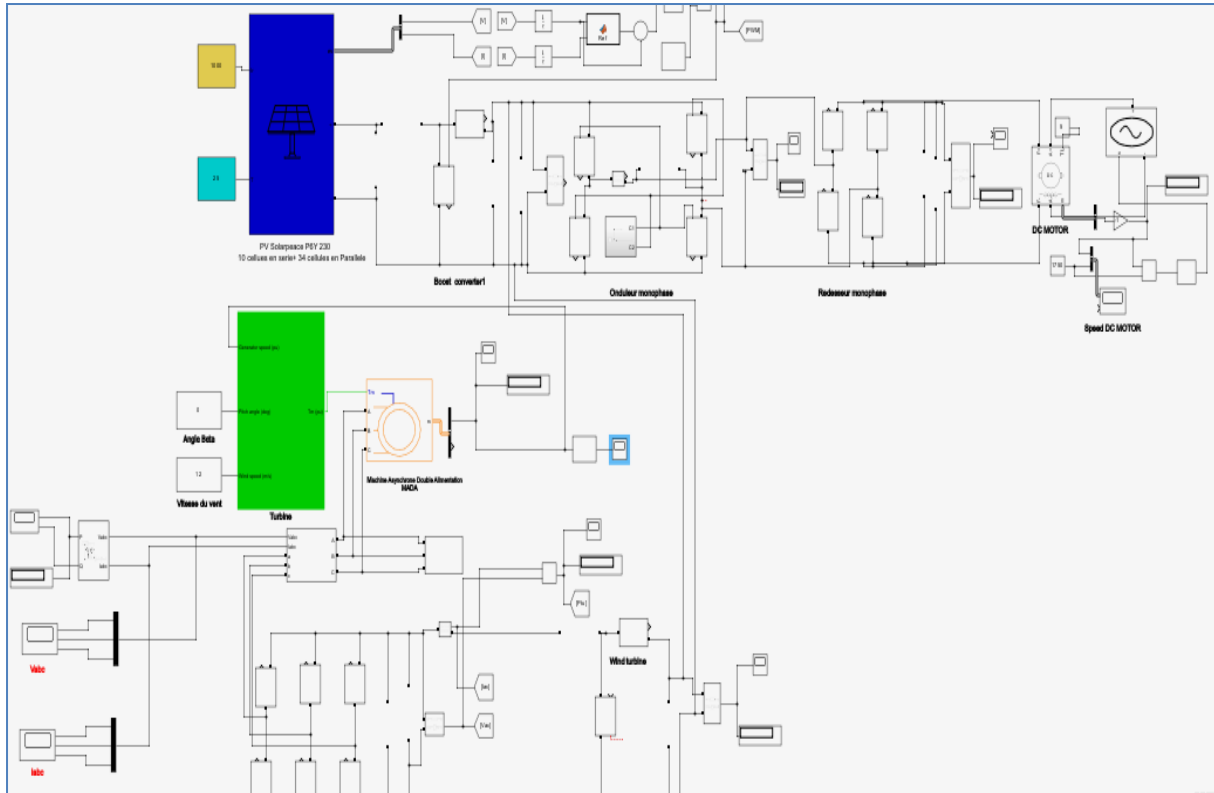


Figure IV-4: Schéma global d'un système hybride photovoltaïque- éolien.

Le système hybride est composé d'un générateur photovoltaïque et d'une éolienne, tous deux couplés à une charge DC via un convertisseur de puissance intermédiaire (Boost) dédié à chaque source. Le système se module à l'aide de l'environnement MATLAB/SIMULINK.

IV.6 Interprétation des résultats

Dans un système hybride photovoltaïque-éolien avec une charge DC. Chaque source est adaptée au climat local (rayonnement et vitesse du vent). De plus, nous avons besoin d'un capteur de courant et d'un capteur de tension pour chacun d'eux afin de garantir le maintien de la puissance maximale délivrée quelles que soient les variations environnementales.

L'autonomie du système est assurée par la combinaison de ces deux sources connectées à une charge continue. Le système hybride a été choisi car il utilise deux sources connectées, ce qui a un taux effectif plus élevé que les systèmes traditionnels qui utilisent simplement une source. La relation entre la tension de sortie de ligne à ligne et le temps est représentée sur la figure IV-5.

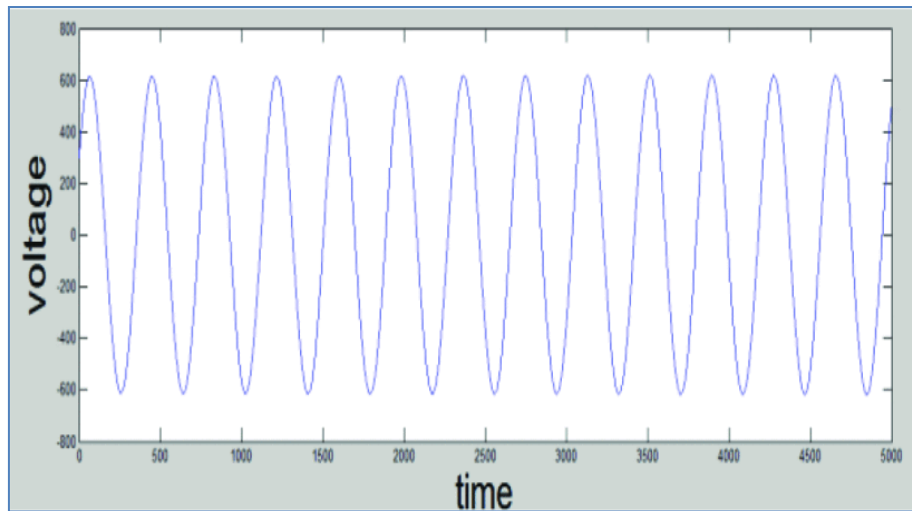


Figure IV-5: Variation de la tension de sortie de ligne à ligne en fonction du temps.

IV.6.1 Système photovoltaïque

- **Effet de la température et l'irradiation**

La figure IV-6 illustre la variation de la puissance de sortie délivrée par le panneau solaire en fonction de l'irradiation et la température.

On détermine que l'irradiation solaire plus élevée conduit à une augmentation de la puissance de sortie d'un panneau solaire, tandis qu'une irradiation solaire plus faible entraîne une réduction de la puissance de sortie. En revanche, une élévation de la température ambiante peut entraîner une diminution de la puissance de sortie des panneaux solaires en raison de ses effets sur la tension et le courant de la cellule solaire.

Le résultat de la variation de la puissance produite par le panneau solaire en fonction de l'effet de l'irradiation et la température est illustré sur la figure IV-6.

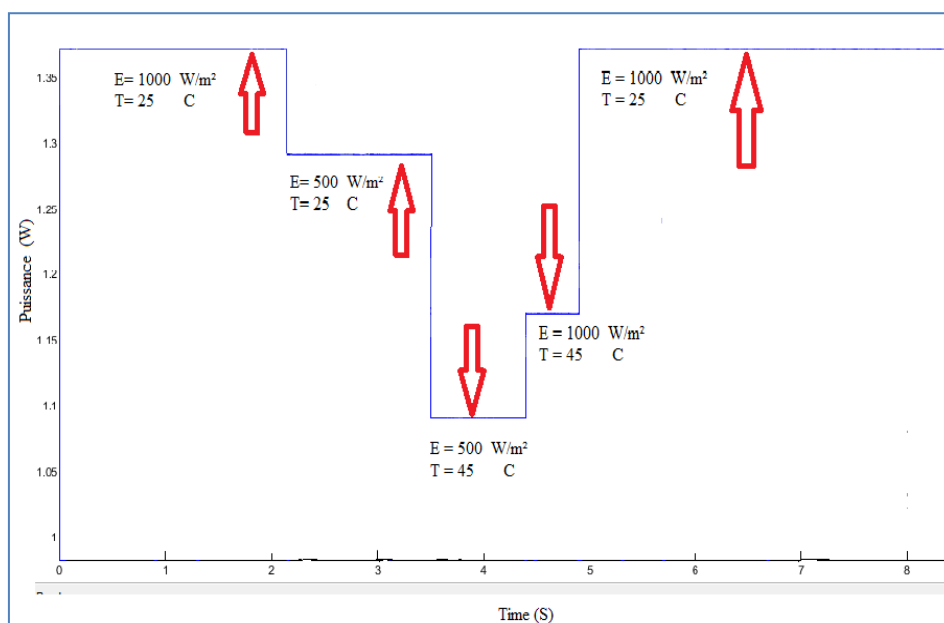


Figure IV-6: Variation de la puissance (P) en fonction de l'irradiation et de la température.

La figure IV-7 illustre la variation des caractéristiques du panneau solaire $I(V)$ et $P(V)$ en fonction de la température.

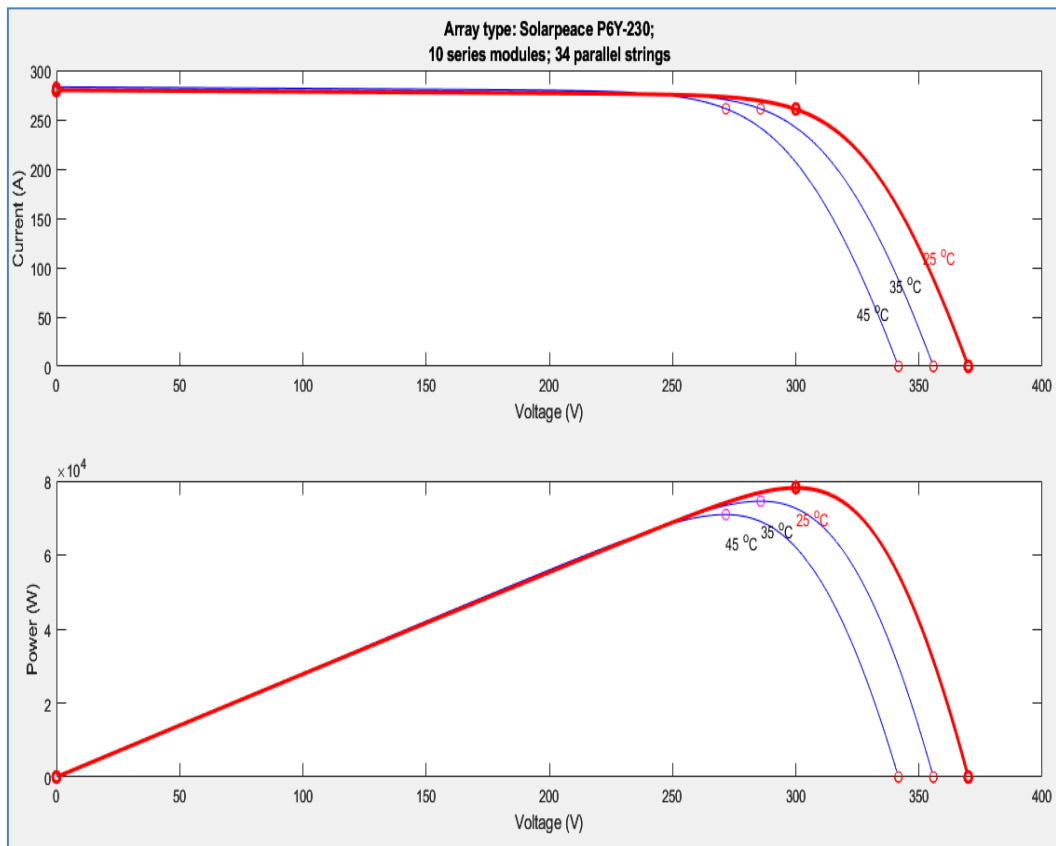


Figure IV-7: Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ en fonction de la température.

La figure IV-8 illustre la variation de la puissance produite du panneau solaire en fonction de la tension délivrée (V).

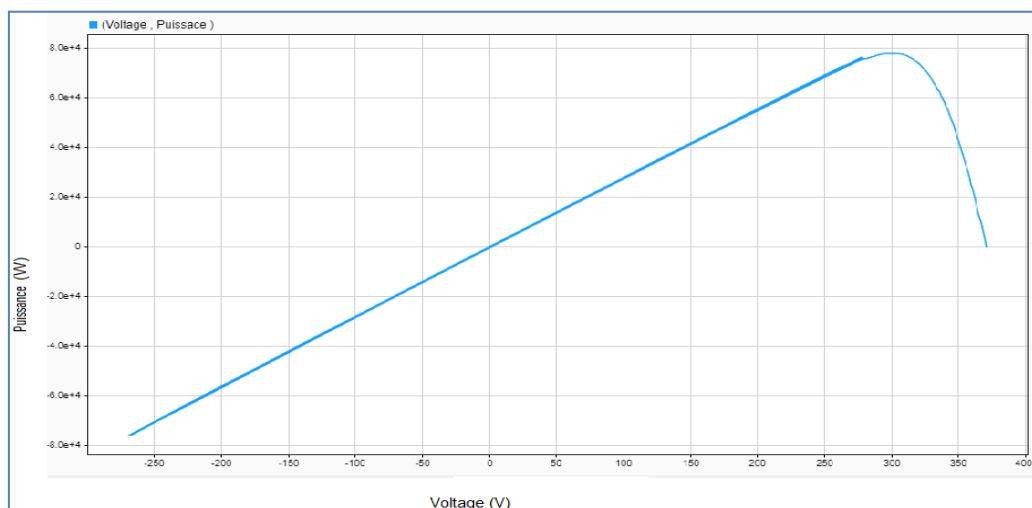


Figure IV-8: Variation de la puissance produite(P) en fonction de la tension (V).

La figure IV-9 illustre la variation du courant (I) en fonction de la tension délivrée par le panneau solaire (V).

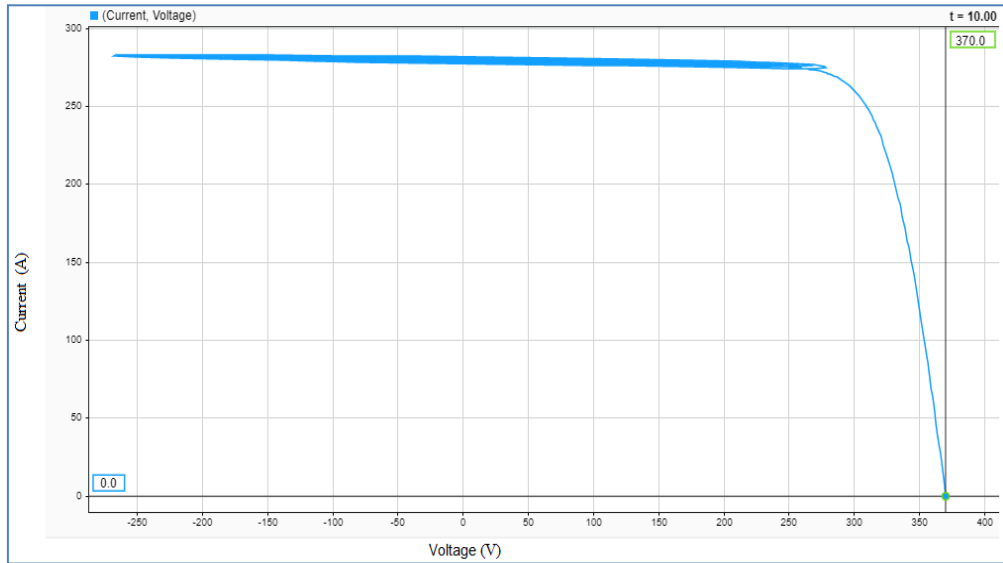


Figure IV-9: Variation du courant (I) en fonction de la tension (V).

- **Effet de la température**

Sur la figure IV-7, nous pouvons voir que la variation de température affecte principalement la tension, à mesure que nous augmentons la température, la tension diminue mais le courant reste presque inchangé. La figure IV-7 montre l'effet de la variation de température sur les caractéristiques P(V). Au fur et à mesure que la température augmente, la puissance générée diminue, car à mesure que la température augmente, la tension diminue.

La figure IV-10 représente les caractéristiques du courant (I) et la tension (V) d'un module PV en fonction de la température.

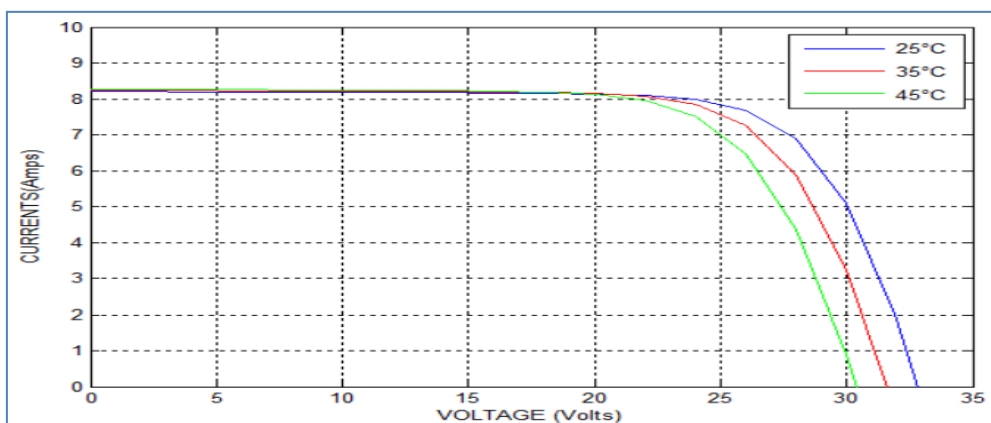


Figure IV-10: Les caractéristiques de (I) et (V) du panneau solaire en fonction de la température.

Comme, nous pouvons le constater sur la figure IV-10, le module PV partiellement ombragé génère moins de courant que le module non ombragé.

Dans des conditions partiellement ombragées, nous pouvons observer plus d'un pic de puissance maximale sur la figure IV-7.

- **Effet de l'irradiation**

Sur les figures IV-11 et IV-12, nous pouvons voir l'effet du changement de l'irradiation solaire sur les caractéristiques PV. À partir de la figure IV-11, nous observons que lorsque nous augmentons l'irradiation, le courant de court-circuit de rayonnement solaire augmente. La variation des effets de l'irradiation solaire principalement sur le courant est constatée. Lorsque, nous augmentons l'irradiation solaire de 700 w/m^2 à 1000 w/m^2 , le courant augmente de $5,7 \text{ A}$ à $8,2 \text{ A}$ environ, mais l'effet de la variation de l'irradiation solaire sur la tension est moindre. La figure IV-12 montre l'effet de la variation de l'irradiation solaire sur les caractéristiques P-V. À mesure que l'irradiation solaire augmente, la puissance générée augmente également. L'augmentation de la puissance est principalement due à l'augmentation du courant.

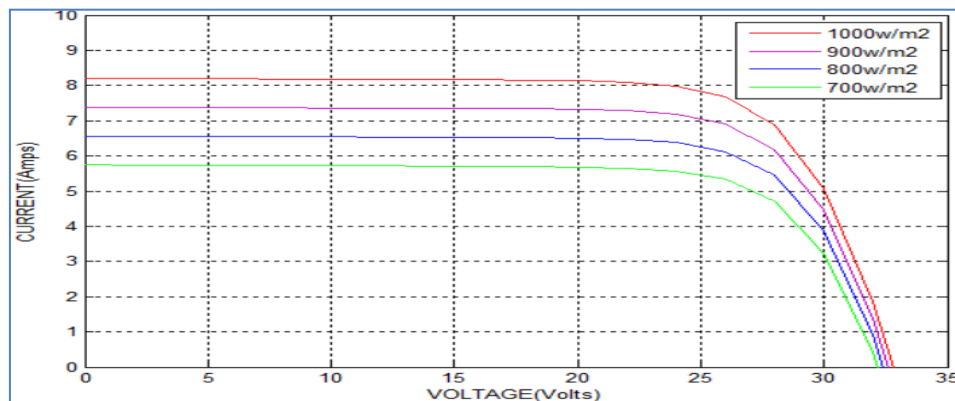


Figure IV-11: Variation du courant (I) et la tension(V) en fonction de l'irradiation.

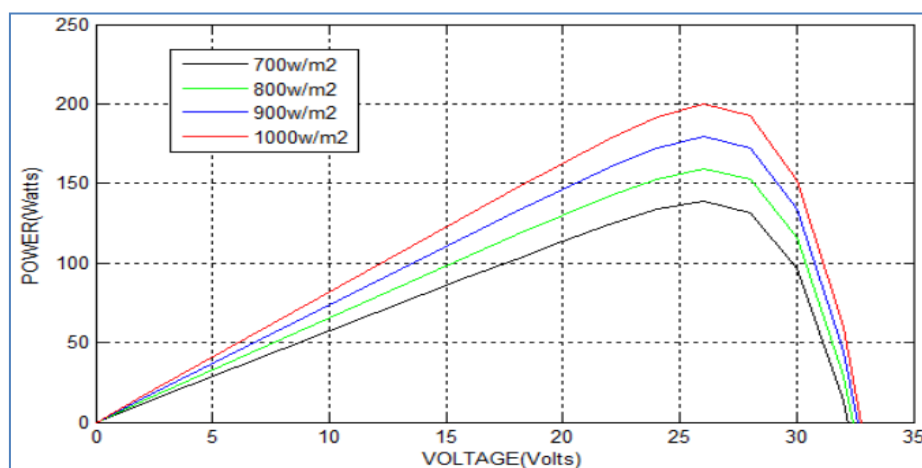


Figure IV-12: Variation de la puissance (P) et de la tension (V) en fonction de l'irradiation.

- Les sorties du MPPT

Les figures IV-13 et IV-14 représentent les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un module PV. Sur la figure IV-13, nous pouvons voir que le courant de court-circuit (I_{sc}) du module PV est d'environ 8,2 A et la tension de circuit ouvert (V_{oc}) est d'environ 32,9 volts. Sur la figure IV-14, nous observons que la puissance maximale est d'environ 200W et qu'elle se produit à un courant de 7,61A et une tension à 26,3V environ.

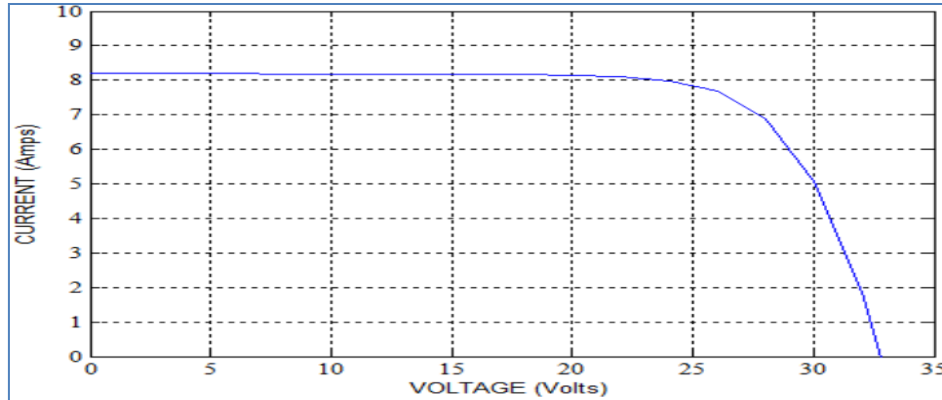


Figure IV-13: Variation du courant (I) en fonction de la tension (V).

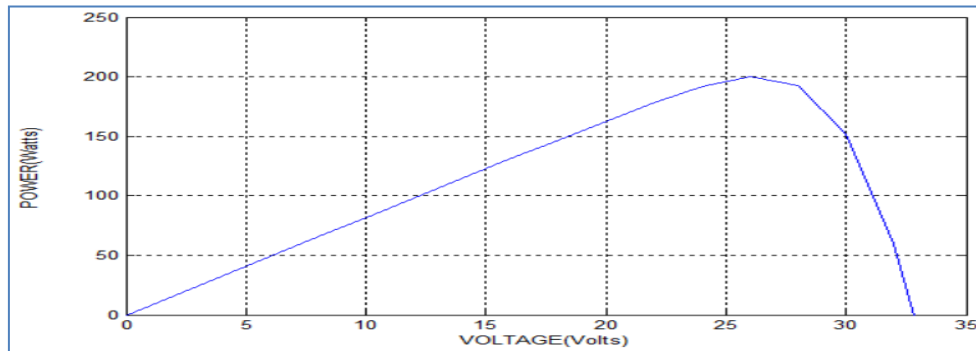


Figure IV-14: Variation de la puissance (P) en fonction de la tension (V).

Nous pouvons voir que la puissance maximale qui est d'environ 200 watts peut être suivie.

IV.6.2 Résultat de la simulation du système éolien

La figure IV-15 montre les caractéristiques de puissance de la turbine à différentes vitesses de vent. À partir de la figure IV-15, nous pouvons observer que lorsque la vitesse du vent augmente, la puissance de sortie de la turbine augmente également.

Dans le système éolien on détermine le changement de la puissance en fonction de l'angle de calage β suivant la figure IV-15.

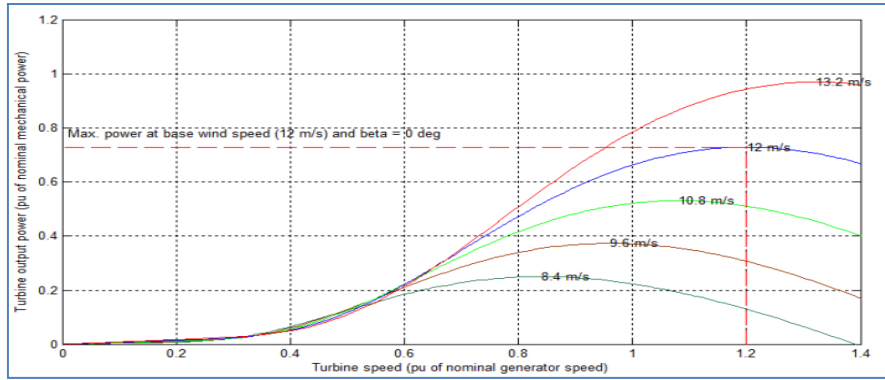


Figure IV-15: Variation de la puissance (P) en fonction l'angle de calage β .

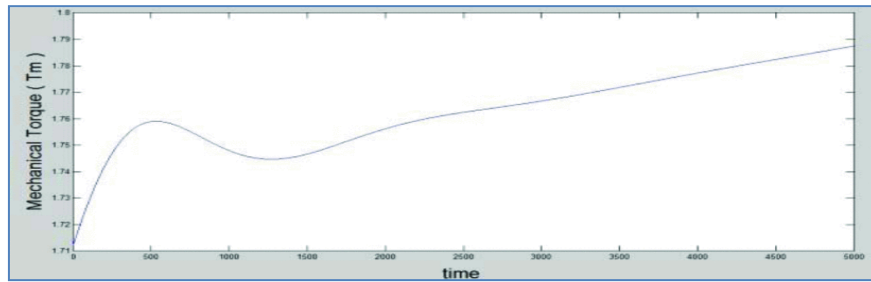


Figure IV-16: Variation de couple de la turbine (T_m) en fonction du temps.

La figure IV-17 illustre les caractéristiques de la tension triphasée délivrée par la machine asynchrone MADA en fonction du temps.

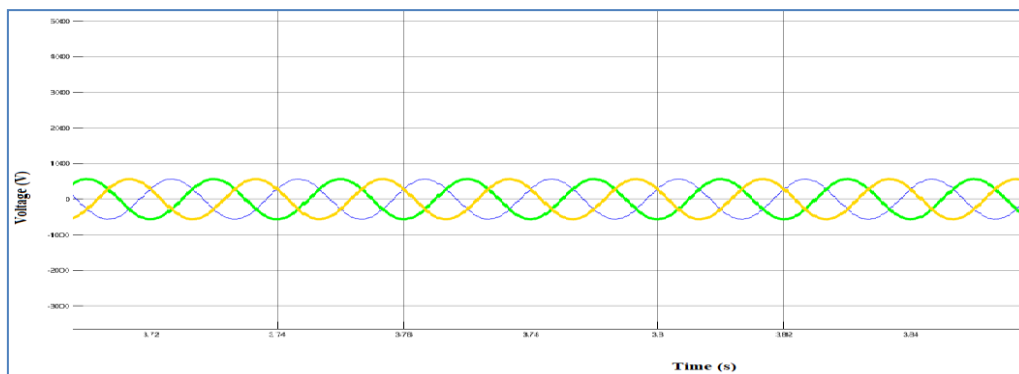


Figure IV-17: Tension triphasée délivrée par MADA en fonction du temps.

La figure IV-18 illustre la variation du courant délivré par le RMS.

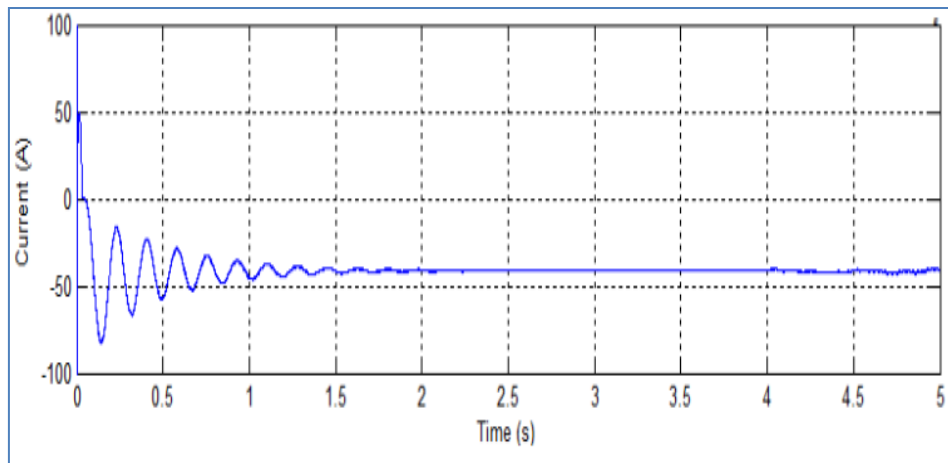


Figure IV-18: Variation du courant délivré par le RMS.

La figure IV-19 illustre la variation de la tension délivrée par le RMS en fonction du temps.

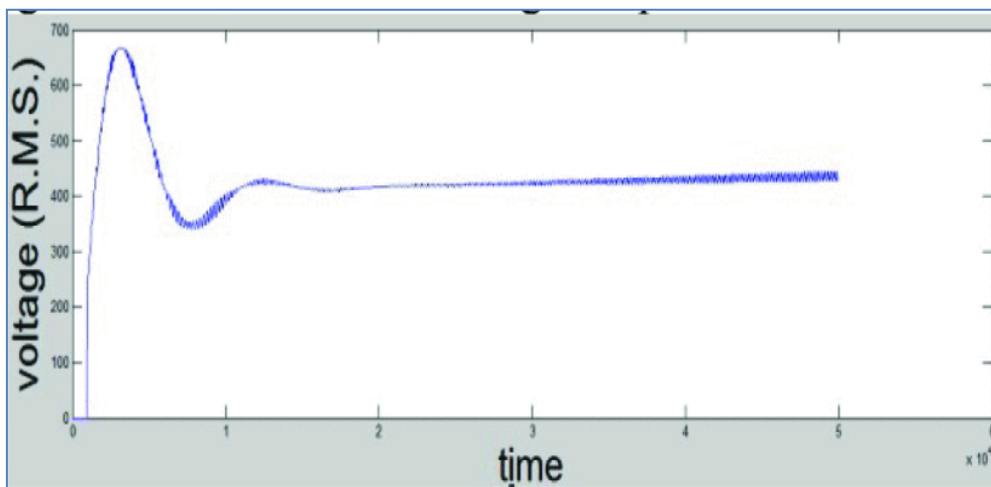


Figure IV-19: Variation de la tension délivrée par le RMS.

La figure IV-20 illustre la variation de la vitesse du rotor de la turbine en fonction du temps.

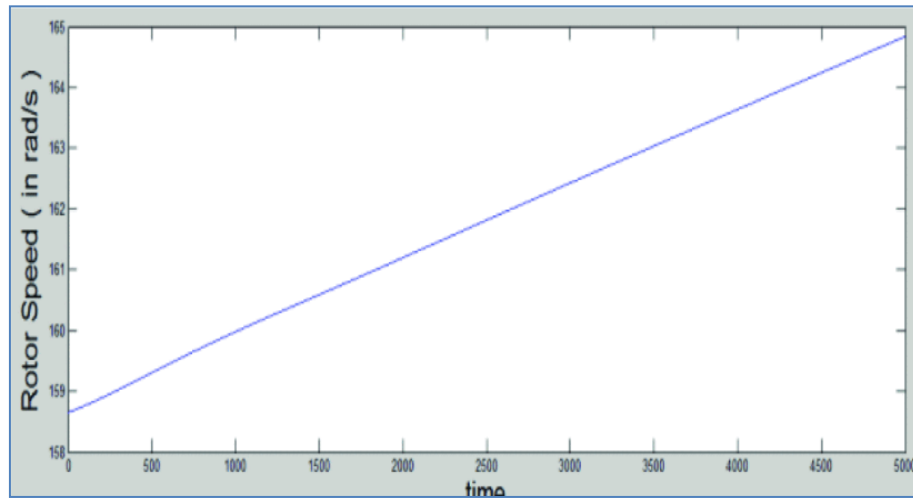


Figure IV-20: Variation de la vitesse du rotor de la turbine.

Le point de fonctionnement de la puissance de crête de la sortie de l'éolienne est tracé par un système de traçage du point de puissance maximale illustré sur la figure IV-21 ci-dessous

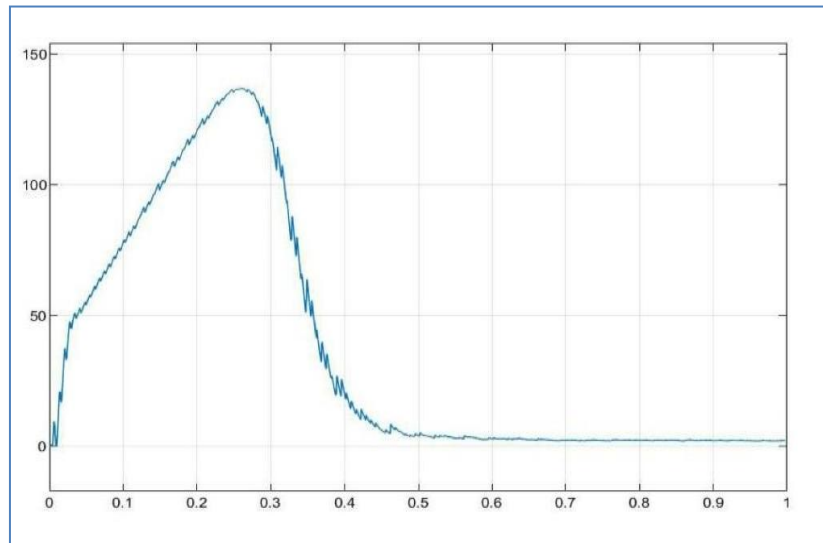


Figure IV-21: Puissance crête de la turbine.

IV.6.3 Alimentation de la charge Moteur DC

Comme, il est bien illustré dans la figure IV-22, nous avons pris comme charge un moteur DC. Ce dernier est alimenté par une tension provenant d'un redresseur monophasé, qui a converti la tension alternative sinusoïdale du l'onduleur monophasé. En résultat, la vitesse du moteur augmente jusqu'à atteindre la valeur demandée.

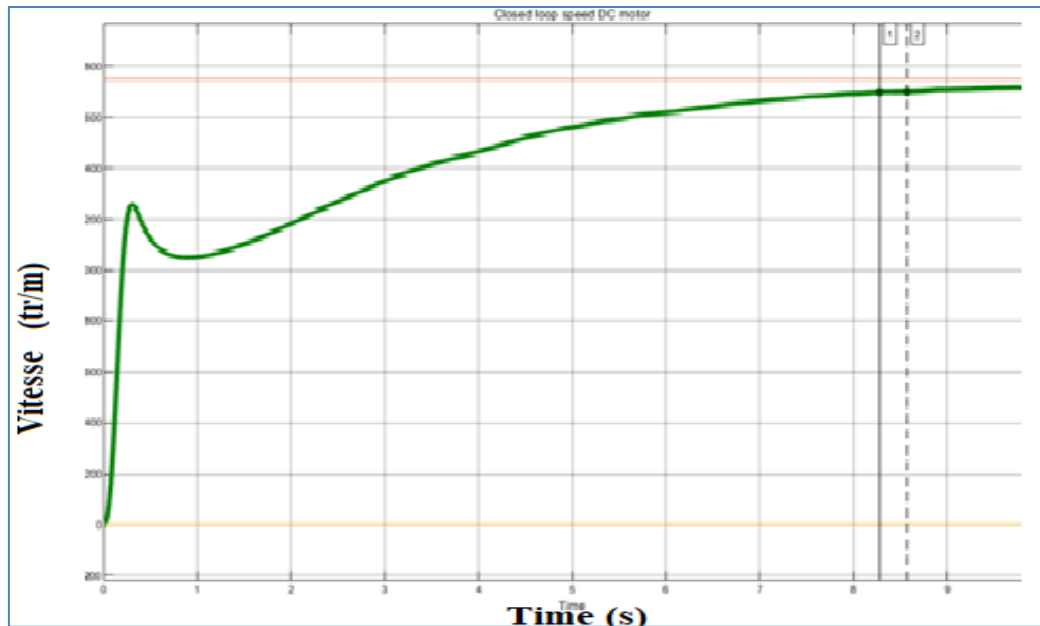


Figure IV-22: Variation de la vitesse du moteur DC.

La puissance de sortie obtenue à partir de l'éolienne et des panneaux solaires a été mesurée avant et après le convertisseur boost. Étant donné que, MPPT n'a pas été mis en œuvre pour les éoliennes, il a été observé que la puissance de 12 kW générée par l'éolienne était réduite à 10,6 kW après le convertisseur élévateur. D'autre part, en raison de la mise en œuvre de MPPT pour le générateur photovoltaïque, le rapport de conversion de puissance était proche de 1 et la puissance de 12,72 kW des panneaux photovoltaïques n'a été réduite qu'à 12,65 kW hors convertisseur boost. La puissance maximale du système dans les conditions nominales, c'est-à-dire une irradiation solaire de 1000 W/m^2 et une vitesse du vent de 14 m/sec, a été mesurée à 23,3 kW. Après stabilisation, la tension du bus du système peut être maintenue à 500 V dans le système de haute tension.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des résultats de la simulation d'un système hybride photovoltaïque-éolien, qui fournissent des informations précieuses pour planifier, concevoir et justifier l'adoption de cette technologie.

La simulation permet d'évaluer les performances attendues du système hybride photovoltaïque-éolien dans différentes conditions, en prenant en compte des facteurs tels que : la disponibilité du soleil et du vent. Grâce à ces simulations, il est possible de déterminer la taille et la configuration optimales du système, ainsi que d'anticiper les performances à long terme.

Nous constatons que dans un système **hybride photovoltaïque-éolien** avec une charge DC, chaque source est adaptée au climat local (rayonnement et vitesse du vent). De plus, nous avons besoin d'un **capteur de courant** et d'un **capteur de tension** pour chacun d'eux afin de garantir le maintien de la puissance maximale délivrée quelles que soient les variations environnementales. L'autonomie du système est assurée par la combinaison de ces deux sources connectées à une charge continue.

Le système hybride **choisi** utilise **deux sources connectées**, ce qui a **un taux** effectif **plus élevé** que les systèmes traditionnels qui utilisent simplement **une source**.

Ces systèmes offrent **une solution prometteuse** pour répondre à nos besoins énergétiques tout en préservant l'environnement, contribuant ainsi à un avenir plus durable et résilience.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

La source globale en énergie éolienne et photovoltaïque est très importante et peut contribuer de manière significative à la fourniture d'électricité au niveau mondial.

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent la production d'électricité à partir d'un système hybride (éolien-photovoltaïque).

A cet effet, la modélisation et la simulation des deux chaînes de conversion d'électricité ont été effectuées en utilisant le logiciel Matlab.

Dans la première partie de ce travail nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire et l'énergie éolienne ainsi que le panneau photovoltaïque et les différents types d'éoliennes et aussi nous avons présenté les avantages et les inconvénients de chaque énergie.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté une étude théorique des convertisseurs (DC-DC) et (DC-AC) d'une manière générale, pour les hacheurs non réversibles en particulier (Boost converter) et les onduleurs en particulier l'onduleur monophasé.

Alors que la troisième partie est sacré à la modélisation et la commande d'un système photovoltaïque (PV) et d'un système éolien sont des étapes clés pour optimiser la production d'énergie électrique et maximiser le rendement du système.

Dans un dernier temps, nous avons présenté des résultats de la simulation d'un système hybride photovoltaïque-éolien, qui fournissent des informations précieuses pour planifier, concevoir et justifier l'adoption de cette technologie.

Bibliographie

Bibliographiques

- [1] N.Touil et Sghenbazi, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [2] Pierre Bessemoulin et Jean Oliiviéri « le rayonnement solaire et sa composante ultra violette » la météorologie 8e série - n° 31 - septembre 2000.
- [3] M.Boukli-Hacene Omar « conception et réalisation d'une génération photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique » magister en automatique productique informatique 2010/2011.
- [4] N. Oleksiy, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques a contact s'arrières inter digités », Institut National Des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.
- [5] H. Fatiha, R. Aicha, “Modélisation Et Simulation D'un Système Photovoltaïque”, Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014.
- [6] H. Kamelia, “Modélisation D'une Cellule PV : Etude Comparative”, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2012
- [7] <https://www.prime-energy-technics.ch/actualites/histoire-du-photovoltaique>.
- [8] BARKA Nour-Eddine, « Amélioration des Performances de Contrôle d'un Système Photovoltaïque par les Méthodes Méta heuristiques », Magister en Electrotechnique, Université d'El-oued, 2013
- [9] A.Ricaud, « systèmes photovoltaïques » Polytech' Savoie, oct. 2011.
- [10] F.Heroguel, « Les cellules photovoltaïques » Ecole normale supérieure, Lyon épreuve de projet, 2007.
- [11] M. Med Nadjib, H.Charaf Eddine, “ Modélisation et Simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau”, Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013.
- [12] T. Nacer Eddine, G. Slimane, “Modélisation Et Simulation D'un Système photovoltaïque”, Mémoire Master, Université Echahid Hama Lakhder d'el-Oued, 2015.
- [13] B. Wafa, “ Modélisation Et Simulation D'un Système Photovoltaïque Adapté Par Une Commande MPPT ”, Diplôme de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2012.
- [14] R. Jimmy et al., Le pompage photovoltaïque, Édition Multi mondes, 1999
- [15] F.Heroguel, « Les cellules photovoltaïques » Ecole normale supérieure, Lyon épreuve de project, 2007.
- [16] D.Thévenard, and M. Ross « Validation and verification of component models and system models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada,2003.
- [17] Selman Mohamed Abd Setar, Taïbi Mohamed El Amine « Étude des panneaux solaires photovoltaïques », Mémoire Licence, Université BADJI Mokhtar- Annaba, 2021
- [18] Dr. BENAMARA Nabil, « L'Energie Eolienne », Polycopié pédagogique, Master Option Energie Renouvelable en mécanique, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes,

Année universitaire 2021/2022

- [19] BOUACHE Samir et AMRANE Mahmoud « Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la conversion de l'énergie éolienne », Mémoire Master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2011
- [20] BELAMRI Abdeldjalil « Simulation d'une turbine éolienne à axe Horizontal », Mémoire Master, Université BADJI Mokhtar- Annaba, 2018
- [21] BENBOUABDELLAH Zakaria, HADJAL El Mehdi., « Modelisation et simulation d'un Système de stockage dans une alimentation hybride », Mémoire de fin d'étude d'Ingénieur Ecole Supérieure En Sciences Appliquées Tlemcen, 2020
- [22] Georges GERGES*, Ali El-ALI*, Nazih MOUBAYED*, Rachid OUTBIB, Article 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMECHANICAL AND POWER SYSTEMS - Chisinau, Rep.Moldova, L'ENERGIE EOLIENNE AU LIBAN : BILAN ANNUEL, L'énergie Eolienne Au Liban : Bilan Annuel, Rendement Et Rentabilite Rendement Et Rentabilite, October 4-6, 2007
- [23] Mr. MAHAMMEDI Abdellatif, « Etude et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque », Mémoire Magister , Université FERHAT Abbas –Setif1-UFAS (Algérie), 2014
- [24] LAKBIR Abderrazak et BENCHRIEF Abdellah, « Etude et modélisation d'un convertisseur statique dans une chaîne éolienne », Mémoire Master Académique, Université Ahmed. Draia-Adrar, 2022
- [25] Mr BEKHOUCHE Fouad et RAHOU Mohamed Thème Étude théorique d'une éolienne Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2022
- [26] A. Rufer.A, P. Barrade, " Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC, Ecole Polytechnique Fédérale de Laussane.
- [27] I. Hidri, " support de cours d'électronique de puissance" Les conversions DC-DC et DC-AC ; Institut supérieur des études technologiques de Nabeul.
- [28] Z. Hazem, " support Réalisation d'une alimentation variable SEPIC avec régulation de tension et protection contre surcharge" ; Mémoire de master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi, Juin 2017,
- [29] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [30] A. Sahraoui., « Étude d'une chaîne de convertisseur photovoltaïque », Mémoire de Magistère, Université de Msila, 2010.
- [31] A. Boukaroura, " Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph", Université Ferhat Abbas Setif, 2009.
- [32] M. Hacid, L. Kaci, "Caractérisation et commande d'un système photovoltaïque", Mémoire de master académique , Université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou , 2021.
- [33] <https://www.electronique-mixte.fr/pwm/>
- [34] <https://for-ge.blogspot.com/2015/08/londuleur.html>.
- [35] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/convertisseurs->

- electriques-et-applications.
- [36] : K. Helali, « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque », Mémoire magister, l'UMMTO Tizi-Ouzou, 2012.
- [37] : [https://www.energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-électriques-Bas du formulaire](https://www.energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-Bas%20du%20formulaire)
- [38] : [https://www.researchgate.net/figure/Schema-electrique-equivalent-dune-cellule photovoltaique fig9 324474604.](https://www.researchgate.net/figure/Schema-electrique-equivalent-dune-cellule-photovoltaique_fig9_324474604)
- [39] R. Arbouche, M. Aichi, « Identification des paramètres d'un module photovoltaïque », Master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021-2022.
- [40] : <https://www.electronique-mixte.fr/pwm/>Publié par ElecM le 2016-01-26.
- [41] : [https://ventdouestenergie.wordpress.com/comment-fonctionne-une-eolienne/de distribution électrique.](https://ventdouestenergie.wordpress.com/comment-fonctionne-une-eolienne/de-distribution-electrique)
- [42] : R. Maacha, « Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation », diplôme d'Ingénierie, l'UMMTO Tizi-Ouzou, 2010-2011.