

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

**Modélisation et simulation d'un système hybride
Photovoltaïque - éolien**

Présenté par

Slimani Feta & Hamaidi Ferial

Soutenu publiquement, le 19 /06/2023 devant le jury composé de :

Pr Arbouche Omar	Président	Pr	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
Dr. Yahy Youcef	Co-encadreur	Dr	Université Dr. Tahar Moulay de Saïda

Année Universitaire 2022- 2023

Remerciements

Avant tout, nous remercions le bon Dieu de nous avoir aidé à réaliser ce présent travail.

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

*En 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.*

*Nous sommes reconnaissantes à Monsieur **O. Arbouche**, Professeur à l'Université de Saïda, pour l'attention qu'il a portée à ce travail et nous le remercions d'avoir accepté de présider le Jury.*

*Nous tenons à manifester notre gratitude à Monsieur **A. Bensaad**, Enseignant à l'Université de Saïda, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail et nous le remercions d'avoir accepté de faire partie du Jury.*

Enfin, nous adressons nos vifs remerciements à tous les enseignants de la faculté de Technologie qui ont contribué à notre formation.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail :

A Nos parents : Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils

ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de nos études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer nos respects, notre considération et

Nos profonds sentiments envers eux,

A nos sœurs et nos frères

Qu'ils trouvent ici l'expression de nos sentiments de respect et de reconnaissance

pour le soutien qu'ils n'ont cessé de nous porter.

A tous nos amis et nos collègues qu'ils trouvent ici le témoignage d'une fidélité et

d'une amitié infinie.

A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin durant nos études.

Slimani Feta

Hamaïdi Ferial

Résumé

La consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Pour cela, les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles puisque une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir du : charbon, gaz naturel, pétrole et l'uranium ...

Les énergies renouvelables sont des énergies dont la source est illimitée et non polluante et dont l'exploitation cause le moins de dégâts écologiques. Les sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne et la géothermie jouent un rôle important dans la production d'électricité. L'électricité photovoltaïque est le résultat d'une transformation directe de la lumière du soleil en électricité au moyen des cellules PV.

Les modules photovoltaïques ont des points de puissance maximum (MPP) correspondant aux conditions ambiantes telles que l'éclairement solaire, la température des modules PV, la surface de la cellule et la charge. Pour un fonctionnement optimale du système, on doit assurer un fonctionnement à puissance maximale du générateur photovoltaïque quel que soit les conditions climatiques.

Le travail concerne une application des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire (photovoltaïque), il porte sur l'étude d'un système hybride d'énergie (photovoltaïque-éolien), utilisé pour alimenter une charge isolée. L'objectif est de faire la modélisation et la simulation d'un système hybride photovoltaïque ainsi que les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ en fonction de la température et de l'irradiation simulées sous Matlab/Simulink.

Mots clés : Système Solaire Photovoltaïque, convertisseur DC/DC, convertisseur DC/AC, algorithme MPPT, système hybride, éolienne, qualité d'énergie, éclairement panneau photovoltaïque (PV), simulation, étude, énergie solaire, MPPT, la méthode P&O, Matlab/Simulink.

Summary

Worldwide energy consumption is experiencing significant growth in all regions of the world. As a result, renewable energies have emerged as the appropriate long-term solution to meet this energy demand while reducing the major disadvantages associated with fossil fuels. A significant portion of global energy production currently relies on coal, natural gas, petroleum, and uranium.

Renewable energies are energy sources that are both limited and non-polluting, causing minimal ecological damage during their exploitation. Renewable energy sources such as solar energy, wind energy, and geothermal energy play a significant role in electricity production. Photovoltaic electricity is the result of a direct transformation of light into electricity through cells.

Photovoltaic modules have maximum power points (MPPs) that correspond to ambient conditions such as solar irradiance, PV module temperature, cell surface area, and load. For optimal system operation, it is important to ensure that the photovoltaic generator operates at maximum power regardless of the weather conditions.

The study focuses on one of the most current applications of renewable energies, specifically the use of solar energy (photovoltaic), and it involves the investigation of a hybrid energy system (photovoltaic-wind) used to power an isolated load. The objective is to model and simulate a photovoltaic hybrid system, as well as analyze the I-V (current-voltage) and P-V (power-voltage) characteristics based on simulated temperature and irradiation conditions using Matlab/Simulink.

Keywords : Photovoltaic solar system, DC/DC converter, DC/AC converter, MPPT, algorithm, Hybrid system, Power quality, Lighting level, Photovoltaic panel simulation, Research, Solar energy, Maximum Power Point Tracking, perturbation and observe method, Matlab /Simulink.

ملخص

يعرف استهلاك الطاقة العالمية نمواً قوياً جداً في جميع مناطق العالم. ولذلك، تظهر الطاقات المتجددة في الوقت الحاضر وعلى المدى البعيد كالحل المناسب الذي يلبي هذه الاحتياجات الطاقوية ويقلل من العيب الرئيسي الذي ينبعث عن الوقود الأحفوري حيث يتم توليد جزء كبير من الإنتاج العالمي للطاقة من الفحم والغاز الطبيعي والنفط واليورانيوم.

الطاقات المتجددة هي الطاقات التي مصدرها محدود وغير ملوثة، واستغلالها يسبب أقل قدر من الضرر البيئي. تلعب مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية طاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية دوراً هاماً في إنتاج الكهرباء. الكهرباء الضوئية هي نتيجة التحول المباشر للضوء إلى كهرباء عن طريق الخلايا الكهروضوئية. تحتوي الوحدات الكهروضوئية على نقاط طاقة قصوى (MPPT) تتوافق مع الظروف المحيطة مثل الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الوحدة الكهروضوئية ومنطقة الخلية والحمل. بطاقة قصوى للمولد الكهروضوئي مهما كانت الظروف المناخية.

العمل يتعلق بتطبيق أحدث تطبيقات الطاقات المتجددة، وهو استخدام الطاقة الشمسية (الكهروضوئية)، ويتعلق بدراسة نظام الطاقة الهجين (الكهروضوئية - الرياح) المستخدم لتزويد حمولة معزولة. الهدف هو نموذج ومحاكاة نظام هجين ضوئي بالإضافة إلى الخصائص $I(V)$ و $P(V)$ وفقاً لدرجة الحرارة والإشعاع المحاكى Matlab /Simulink

الكلمات المفتاحية : النظام الشمسي الضوئي، محول تيار مستمر - مستمر، محول تيار مستمر - متناوب، خوارزمية تتبع نقطة القدرة القصوى، النظام الهجين، جودة الطاقة، لوحة الطاقة الشمسية، محاكاة، دراسة، الطاقة الشمسية، تتبع نقطة القدرة القصوى، طريقة الاضطراب والملاحظة، ماتلاب سيمولينك.

Table des matières

Table des matières

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 energies	03
I.2.1	Les sources non renouvelables	03
I.2.2	Les sources renouvelables	03
I.3	Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque	03
I.4	Cellule photovoltaïque	04
I.5	Différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)	07
I.6	Système de conversion	09
I.7	Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques	10
I.8	L'énergie éolienne	11
I.9	Conclusion	21
	Références bibliographiques	22

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

II.1	Introduction	23
II.2	Les convertisseurs DC/DC	23
II.2.1	Principe de la conversion	24
II.2.2	Types des hacheurs	24

II.3	Les convertisseurs DC/AC	30
II.4	Définition de la commande PWM	32
II.3.1	Principe de la conversion	30
II.3.2	Types des onduleurs	30
II.3.3	Evaluation des performances de l'onduleur monophasé	31
II.3.4	Applications des onduleurs	32
II.4	Définition de la commande PWM	32
II.5	Conclusion	34
	Références bibliographiques	35

Chapitre III : Modélisation et commande d'un système PV et d'un système éolien

III.1	Introduction	36
III.2	Modélisation du module photovoltaïque	36
III.3	Identification des paramètres du GPV en utilisant le modèle d'une cellule réelle	38
III.4	L'adaptation de l'énergie PV par les convertisseurs de puissances	39
III.5	Amélioration des performances d'un système photovoltaïque par la méthode MPPT	40
III.6	Conversion de l'énergie éolienne	42
III.7	Modèle de rotor de turbine éolienne	43
III.8	Modélisation de la partie électrique	44
III.9	Modélisation d'une machine asynchrone à double alimentation	44
III.10	Conclusion	45
	Références bibliographiques	47

Chapitre IV : Simulation et interprétations des résultats

IV.1	Introduction	48
IV.2	Présentation du logiciel de simulation MATLAB/SIMULINK	48
IV.3	Simulation de la MADA	48
IV.4	Simulation de la stratégie de commande	49

IV.5	Simulation du système hybride de conversion d'énergie (éolienne - photovoltaïque)	50
IV.6	Interprétation des résultats	51
IV.6.1	Système photovoltaïque	51
IV.6.2	Résultat de la simulation du système éolien	56
IV.6.3	Alimentation de la charge Moteur DC	58
IV.7	Conclusion	59
	Conclusion générale	60
	Annexe	

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II-1	Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC	25
Tableau III-1	Les caractéristiques électriques du module Solarpeace P6Y-230	37
Tableau IV-1	Les caractéristiques électriques de la machine (MADA)	48

Liste des figures

Liste des figures

Figure I-1	Présentation schématique d'une cellule	4
Figure I-2	Coupe transversale d'une cellule PV typique	5
Figure I-3	Représentation schématique des niveaux d'énergie d'une cellule photovoltaïque	6
Figure I-4	Schéma de principe général d'un générateur photovoltaïque	7
Figure I-5	Exemples des constructions Darrieus et Savonius VAWT	12
Figure I-6	Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales	13
Figure I-7	Un rotor d'une éolienne à axe horizontal	15
Figure I-8	La nacelle d'une éolienne à axe horizontal	16
Figure I-9	Différents types de tours (PPM)	17
Figure I-10	Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales	18
Figure I-11	Diagrammes de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent	20
Figure II-1	Différents types de hacheurs	26
Figure II-2	Schéma réel du convertisseur Buck	26
Figure II-3	Convertisseur survolteur (Boost - converter)	27
Figure II-4	Circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur	28
Figure II-5	Schéma de base d'un convertisseur «CUK»	29
Figure II-6	Schéma de base d'un convertisseur «ZETA»	29
Figure II-7	Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)	30
Figure II-8	Onduleur non autonome	31
Figure II-9	Boîtier onduleur hybride Imeon Energy	31
Figure II-10	La valeur moyenne est récupérée simplement par un filtre passe bas	33
Figure II-11	Signal de commande PWM	34
Figure III-1	Module Solar peace P6Y-230	36
Figure III-2	Schéma équivalent du modèle à une diode	38
Figure III-3	Schéma la courbe tension - courant	39
Figure III-4	Schéma des courbes tension-puissance et courant-tension	40
Figure III-5	L'algorithme de Perturbation et Observation (P&O)	41
Figure III-6	Modulation de largeur d'impulsion (MLI)	42
Figure III-7	Schéma simple d'une éolienne	43
Figure III-8	Schéma de la MADA connectée à un réseau	45
Figure III-9	Caractéristique de la production d'énergie de la MADA	45
Figure IV-1	Schéma bloc de la MADA connectée à une turbine	49
Figure IV-2	Modèle Simulink pour la commande MPPT	49
Figure IV-3	Modèle Simulink pour la génération du signal PWM	50
Figure IV-4	Schéma global d'un système hybride photovoltaïque – éolien	50
Figure IV-5	Variation de la tension de sortie de ligne à ligne en fonction du temps	51
Figure IV-6	Variation de la puissance (P) en fonction de l'irradiation et de la température	52

Figure IV-7	Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ en fonction de la température	52
Figure IV-8	Variation de la puissance produite (P) en fonction de la tension	53
Figure IV-9	Variation du courant (I) en fonction de la tension (V)	53
Figure IV-10	Les caractéristiques de (I) et (V) du PV en fonction de la température	54
Figure IV-11	Variation du courant (I) et la tension (V) en fonction de l'irradiation	54
Figure IV-12	Variation de la puissance (P) et de la tension (V) en fonction de l'irradiation	55
Figure IV-13	Variation du courant (I) en fonction de la tension (V)	55
Figure IV-14	Variation de la puissance (P) en fonction de la tension (V)	55
Figure IV-15	Variation de la puissance (P) en fonction (V)	56
Figure IV-16	Variation de couple de la turbine (T_m) en fonction du temps	56
Figure IV-17	Variation de tension triphasée délivrée par MADA	56
Figure IV-18	Variation du courant délivré par le RMS	57
Figure IV-19	Variation de la tension délivrée par le RMS	57
Figure IV-20	Variation de la vitesse du rotor de la turbine	57
Figure IV-21	Puissance crête de la turbine	58
Figure IV-22	Variation de la vitesse du moteur DC	58

Liste des abréviations

Liste des abréviations

AC	Courant alternatif
CC	Courant continu
CS	Convertisseur statique
D	le rapport cyclique du convertisseur
DC-DC	Convertisseur source continue - charge continue
DC-AC	Convertisseur source continue - charge alternative
E	Irradiation [w/m^2]
ER	Energie Renouvelable
F_s	Fréquence de switch
h	Constante de Planck
I_{cell}	Courant fourni par la cellule [A]
I_{ch}	Courant à travers la charge [A]
I_o	Courant de saturation [A]
I_L	Courant d'inductance
I_{mpp}	Courant dans le point PPM
I_{PV}	Courant du module photovoltaïque [A]
I_{sc}	Courant de court-circuit [A]
I_s	Courant de saturation de la jonction non éclairée [A]
k	Constante de Boltzmann [$K = 1,3806503 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$]
GPV	Générateur Photovoltaïque
MADA	Machine asynchrone à double alimentation
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
N_s	Nombre de cellules en série
N_p	Nombre de modules en parallèles
P_a	Puissance active du MADA (W)
PPM	Point de puissance maximal
P_r	Puissance réactive du MADA (W)
PV	Cellule Photovoltaïque
q	Charge électrique élémentaire [$q=1.6021764 \cdot 10^{-19} \text{ C}$]

R_{CH}	Résistance de la charge [$\wedge$]
R_p	Résistance parallèle de la cellule [$\wedge$]
R_s	Résistance série de la cellule [$\wedge$]
T	Température de la cellule [$^{\circ}K$]
T_m	Couple de la turbine éolienne
V	Vitesse du vent (m/s)
V_{cell}	Tension aux bornes de la cellule [V]
V_{ch}	Tension aux bornes de la charge [V]
V_{CO}	Tension du circuit ouvert [V]
V_{PV}	Tension du module photovoltaïque [A]
η	Facteur d'idéalité de la jonction
λ	Longueur d'onde
α	Rapport cyclique
β	Angle de calage des pales ($^{\circ}$ deg)

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

Naturellement présentent dans le sous-sol de la terre, les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz ou l'énergie nucléaire qui sont le type d'énergie, le plus utilisé par l'être humain (à des fins de production, chauffage, transport, électricité...). Leur production représente encore 85% de la production totale de l'énergie.

Le monde se tourne vers les énergies renouvelables pour sauver la planète de la destruction par la pollution et juguler le changement climatique. Une source d'énergie renouvelable est une énergie inépuisable, réutilisable et issue des éléments naturels : le soleil, le vent, la chaleur de la terre ainsi que la croissance des végétaux.

La production solaire photovoltaïque a augmenté de 22% en 2019 et a représenté la deuxième plus grande croissance de production absolue de toutes les technologies renouvelables légèrement derrière l'éolien et devant hydro-électricité. Il existe plusieurs systèmes pour la production de l'énergie électrique à partir de ressources renouvelables disponibles facilement mobilisables; tel que : Le système hybride photovoltaïque- éolien afin de minimiser le coût du Stockage et optimiser sa capacité.

Avec l'énergie éolienne, l'énergie solaire photovoltaïque est la plus répandue des technologies énergétique faible mission du carbone et à mesure qu'elle se développe les coûts de développement diminuent. Pour comprendre le fonctionnement de ce système, nous effectuerons dans ce chapitre un bref rappel sur l'énergie solaire, effet photovoltaïque, la cellule solaire, turbine, énergie éolienne ainsi que le système hybride photovoltaïque-éolien.

I.2 Les énergies

Les sources utilisées pour la production de l'énergie électrique sont classées en deux grandes catégories : sources renouvelables et non-renouvelable.

I.2.1 Les sources non renouvelables

Les énergies non renouvelables ont générées par la combustion de matières fossiles comme le pétrole, gaz naturel, le mazout, le charbon et le nucléaire. Ce mode d'énergie est nuisible et polluant pour l'environnement et la santé de l'homme [01].

I.2.2 Les sources renouvelables

Les énergies renouvelables sont des énergies provenant de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation. Elles sont inépuisables et issues de phénomènes naturels provoqués principalement par le soleil (l'énergie solaire) mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse. La lune (énergie marémotrice) et la terre (géothermique profonde) [02].

I.3 Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque

Depuis les premiers pas de l'homme, le soleil fait partie intégrante de sa vie et même de sa survie. Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre, distante d'environ 150 millions de

kilomètres. C'est une étoile de type naine jaune, composée de 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'autres éléments lourds. Elle est située à 8,5 kilomètres par seconde du centre de la voie lactée et est une étoile de type G2. La réaction thermonucléaire de l'hydrogène au cœur du soleil produit de l'énergie d'une importance capitale pour la terre qui est transmise sous forme de rayonnement.

Le soleil a une rotation de 27 jours et sa vitesse est de 1,997 km/s. La masse du soleil représente la majeure partie de la masse du système solaire et est utilisée comme unité de masse pour les étoiles. Agé d'environ 5 milliards d'années, il continuera à briller pendant environ autant de temps, avant de mourir en tant que géante rouge. Le mouvement apparent du soleil par rapport à la terre donne lieu aux saisons [03].

I.4 Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par le processus « **effet photovoltaïque** ». Elle est réalisée à partir de deux couches de silicium, P dopée au bore et N dopée au phosphore créant une jonction PN avec une barrière de potentielle.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. À travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs (Figure I-1). La tension maximale de la cellule est d'environ 0,6 V pour un courant nul. Elle est nommée tension de circuit ouvert (V_{co}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [04].

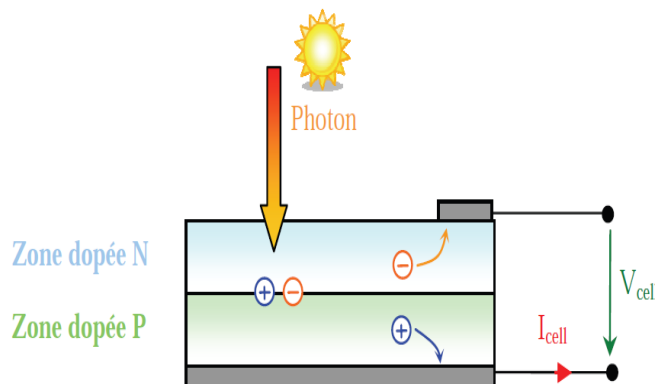


Figure I-1 : Présentation schématique d'une cellule solaire [06].

Comparable à une diode utilisée classiquement en électronique, une cellule PV peut être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore). Entre les deux zones se développent une jonction PN avec une barrière de potentiel. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et

surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode.

I.4.1 Cellule solaire

Les cellules photovoltaïques, également appelées cellules solaires, sont des composants qui génèrent de l'électricité en utilisant l'effet photovoltaïque [10]. La quantité d'énergie produite dépend de la lumière incidente et du rendement de la cellule pour produire de l'électricité, la cellule peut être connectée à une charge électrique, telle qu'un onduleur ou une batterie, ce qui délivre une tension continue et un courant électrique. Les cellules photovoltaïques les plus utilisées sont fabriquées à partir de semi-conducteurs, principalement en silicium, qui sont combinées en panneaux solaires ou modules photovoltaïques ou pour augmenter la puissance de production d'électricité (Figure I-2) [05].

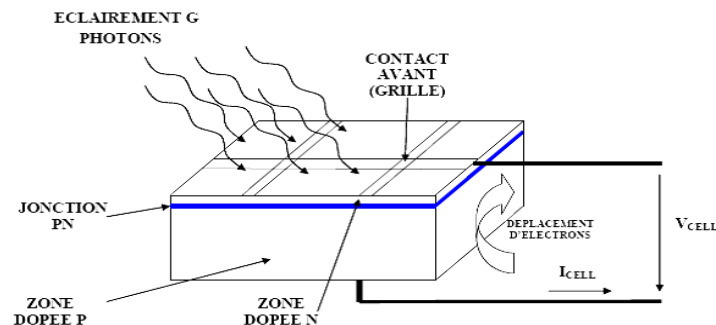


Figure I-2 : Coupe transversale d'une cellule PV typique [04].

I.4.2 Historique des cellules photovoltaïques

- 1839** : L'application du principe de l'effet photoélectrique dès 1839 par le physicien français Antoine Becquerel.
- 1860** : Auguste Mouchot utilise l'énergie solaire par le biais encore de miroir parabolique pour récolter la chaleur servant ensuite à chauffer de l'eau.
- 1875** : Werner Von Siemens est un inventeur industriel allemand qui dépose le premier article concluant sur le principe de l'effet photovoltaïque sur la dynamoélectrique.
- 1883** : Charles Fritts met au point les premières cellules solaires au sélénium.
- 1904** : Hallwachs Wilhelm a conclu que le cuivre et l'oxyde cuivreux sont deux matériaux photosensibles.
- 1916** : Robert Millikan parvient à produire un courant continu.
- 1954** : Le premier panneau solaire avec un rendement de 6 %, est développé par les chercheurs des laboratoires Bell présentent la première cellule photovoltaïque.
- 1958** : Vanguard I est le premier satellite alimenté en énergie par des panneaux PV.
- 1974** : Le premier bâtiment alimenté uniquement par l'énergie solaire voit le jour au Nouveau Mexique.
- 1976** : Wronsky Christopher en collaboration avec David Carlson, créent la première cellule photovoltaïque constitué de silicium amorphe.

1983 : Trivich Dan, scientifique et inventeur australien bat un nouveau record, celui de la plus longue distance parcourue avec une voiture à énergie solaire entre Sydney et Perth.

2000-2012 : L'industrialisation du photovoltaïque.

I.4.3 Structure de la cellule photovoltaïque

La structure d'une cellule photovoltaïque peut varier en fonction du type de cellule, mais en général, une cellule photovoltaïque se compose de plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs, tel que : le silicium. La structure fondamentale d'une cellule photovoltaïque à base de silicium comprend généralement les couches suivantes :

- La couche supérieure, appelée couche de contacts, est généralement en métal conducteur, telle que l'aluminium, qui est utilisé pour collecter l'électricité produite par la cellule.
- La couche intermédiaire est le matériau semi-conducteur, généralement du silicium cristallin, qui convertit la lumière en électricité.
- La couche inférieure, appelée sous-couche, est généralement en métal conducteur, comme le cuivre, qui sert à transporter l'électricité produite par la cellule.

Lorsqu'une lumière est absorbée par le matériau semi-conducteur, elle excite les électrons dans la structure cristalline, les faisant se déplacer à travers la structure. Les contacts en haut et en bas de la cellule permettent de collecter ces électrons excités pour produire un courant électrique. En plus de la structure de base décrite ci-dessus, certaines cellules photovoltaïques peuvent inclure des couches supplémentaires pour améliorer leur rendement, tels que des couches réfléchissantes pour renvoyer la lumière non absorbée vers la cellule, ou des couches de passivation pour réduire la perte d'électrons (Figure I-3) [06].

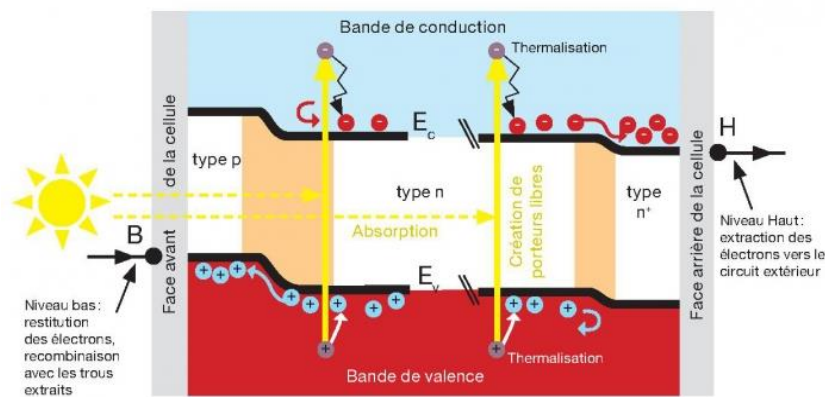


Figure I-3 : Représentation schématique des niveaux d'énergie du bas de la bande de conduction, E_c , et du haut de la bande de valence, E_v dans une cellule photovoltaïque.

I.4.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La jonction PN est un élément clé de la cellule photovoltaïque qui permet la production d'électricité. Elle est créée par l'assemblage de deux couches différentes de semi-conducteurs, une

couche P avec des électrons excédentaires et une couche N avec des trous excédentaires

Lorsqu'elle est exposée à la lumière, les photons absorbés excitent les électrons de la couche P, les poussant à travers la jonction PN pour rejoindre la couche N, créant ainsi un courant électrique à travers la cellule. La puissance électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de la quantité de lumière reçue, La tension augmente proportionnellement à l'intensité lumineuse, avec une augmentation progressive de la tension à mesure que la lumière augmente. Le rendement de la cellule peut être influencé par différents facteurs tels que la qualité des matériaux utilisés et la température.

I.4.5 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque désigne la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. La découverte de cet effet est attribuée à **Edmond Becquerel** en 1839. En 1875, Werner Von Siemens présente devant l'académie des sciences un exposé décrivant l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, mais il faudra attendre le début du XXe siècle pour en obtenir une explication, grâce notamment aux travaux d'Albert Einstein et à la compréhension de la nature corpusculaire de la lumière et de la quantification de son énergie.

Le système photovoltaïque comprend généralement des cellules photovoltaïques, des modules photovoltaïques ou des panneaux solaires qui regroupent plusieurs cellules photovoltaïques, ainsi qu'un onduleur qui convertit le courant continu produit par les cellules en courant alternatif pour pouvoir être utilisé par les appareils électriques [06].

Le système peut être installé sur un toit, un mur ou un terrain pour produire de l'électricité pour une utilisation immédiate ou pour stocker de l'énergie dans des batteries pour une utilisation ultérieure (Figure I-4) [08].

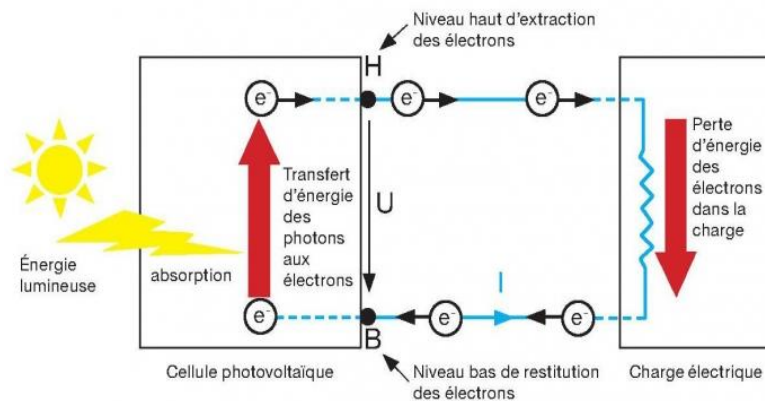


Figure I-4 : Schéma de principe général d'un générateur photovoltaïque.

I.5 Différents types des cellules solaires

Les différents types de cellules solaires sont classés en fonction du matériau semi-conducteur utilisé dans leur fabrication. Chaque type de cellule solaire a ses propres caractéristiques uniques en termes de rendement, de coût, de durabilité et de flexibilité

I.5.1 Cellules en silicium cristallin

Elles sont fabriquées à partir de cristaux de silicium pur et sont les plus couramment utilisées. Elles peuvent être soit monocristallines, soit poly cristallines.

A - Cellule en silicium poly-cristallin

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

***- Avantages**

- Bon rendement (environ 100 Wc/m²).
- Durée de vie importante (+/- 30 ans).
- Moins cher que le monocristallin.

***- Inconvénients**

- Rendement faible sous un faible éclaircissement.

B -Cellule en silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

***- Avantages**

- Meilleur rendement que le polycristallin (environ 150 Wc/m²).
- Durée de vie importante (+/- 30 ans).

***- Inconvénients**

- Plus cher que le poly cristallin.
- Rendement faible sous un faible éclaircissement.

I.5.2 Cellule silicium amorphe en couche mince

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

***- Avantages**

- Fonctionnent avec un éclaircissement faible.
- Bon marché par rapport aux autres types de cellules.
- Moins sensible aux températures élevées.
- Souple.

***- Inconvénients**

- Rendement faible en plein soleil (environ 60 W/m²), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses.
- Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps.
- Rendement faible : 5 à 9%.
- Rendement record en laboratoire : environ 13,4%.

I.5.3 Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS

Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type CIS (cuivre, indium, sélénium) ou CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium). Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre). De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.

***- Avantages**

- Meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince.
- La cellule peut être construite sur un substrat flexible.

***- Inconvénients**

- Les cellules en couche mince ont un rendement plus faible que les cellules "épaisses".

I.5.4 Cellules en pérovskite

Elles sont fabriquées à partir d'une structure en forme de pérovskite et sont considérées comme une alternative à moindre coût aux cellules en silicium cristallin [10].

I.6 Le système de conversion

Le rayonnement solaire se situe dans une gamme de longueurs d'onde allant de 0,25 μm dans l'UV à environ 2,5 μm dans l'IR, avec un pic autour de 0,55 μm . Au niveau de la terre, compte tenu de l'atmosphère, une partie de cette énergie est absorbée ou diffusée mais le rayonnement arrivant au sol est encore de 1000 W/ m^2 (soit $\sim 1,3$ MWh par m^2 et par an en France). Cette énergie solaire reçue représente près de 8 000 fois la consommation énergétique mondiale. La conversion photovoltaïque par absorption des photons, la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire consiste à convertir directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Dans la gamme spectrale solaire, l'énergie d'un photon est de l'ordre de l'électron-volt (cf. $E = h\nu$). Or les énergies séparant les niveaux électroniques impliqués dans les liaisons chimiques dans les solides ou les molécules sont justement dans la même gamme d'énergie.

C'est ainsi que dans les semi-conducteurs, l'écart entre le haut de la bande de valence (BV), pleine des électrons de liaison entre les atomes, et le bas de la bande de conduction (BC), pratiquement vide d'électrons à l'équilibre, et appelée bande interdite, est par exemple de 1,12 eV pour le silicium ; retrouve la même situation pour des molécules de colorants avec les niveaux LUMO (vide) et HOMO (occupé), avec par exemple la chlorophylle dont l'écart est de 1,85 eV. L'absorption d'un photon se fera par excitation d'un électron d'un niveau permis occupé (BV ou HOMO) à un niveau permis vide (BC ou LUMO), tandis qu'il laissera derrière lui un « trou » d'électron dans la BV ou l'HOMO.

Le transfert de l'énergie du photon se fait alors intégralement sous forme d'énergie potentielle électrique. Si on arrive à récupérer l'électron excité, c'est-à-dire placé dans un

potentiel plus négatif (réducteur), dans un circuit extérieur, cela crée un photo courant qui, associé à la tension à l'état excité, correspondant idéalement à la bande interdite entre les niveaux ; on aura alors créé un générateur photovoltaïque [08].

I.7 Les avantages et les inconvénients des systèmes de conversion

*- Les avantages

1. **Énergie renouvelable:** Les systèmes de conversion photovoltaïques utilisent une source d'énergie renouvelable, le soleil, ce qui en fait un choix écologique.
2. **Durabilité:** Les panneaux photovoltaïques sont conçus pour durer plusieurs décennies, ce qui en fait un investissement durable
3. **Efficacité énergétique:** Les systèmes photovoltaïques sont très efficaces pour convertir l'énergie solaire en électricité utilisable
4. **Respect de l'environnement:** Les systèmes photovoltaïques ne produisent aucun rejet nocif pour l'environnement et ne dépendent pas de combustibles fossiles ou de sources d'énergie non renouvelable
5. **Economies à long terme:** Bien que les systèmes photovoltaïques soient initialement coûteux, ils peuvent générer des économies importantes sur la facture d'électricité à long terme.
6. **Coûts réduits:** En installant un système photovoltaïque, vous pouvez réduire votre facture d'électricité en produisant votre propre énergie solaire.
7. **Faible entretien:** Les systèmes photovoltaïques nécessitent peu d'entretien une fois installés, ce qui les rend peu coûteux à long terme.
8. **Augmentation de la valeur immobilière:** Les systèmes photovoltaïques peuvent améliorer la valeur de votre propriété en lui donnant un cachet "verdissement".

*- Les inconvénients

1. **Coût initial élevé:** Les systèmes photovoltaïques peuvent être coûteux à l'achat et à l'installation.
2. **Dépendance de la luminosité:** Les systèmes photovoltaïques dépendent de la luminosité du soleil et peuvent produire moins d'électricité par temps nuageux ou peu ensoleillé.
3. **Stockage d'énergie:** Les systèmes photovoltaïques nécessitent un système de stockage d'énergie pour stocker l'électricité produite pour une utilisation ultérieure.
4. **Stockage Espace requis:** Les systèmes photovoltaïques peuvent nécessiter un espace important pour installer les panneaux, ce qui peut poser un problème dans les zones densément peuplées.
5. **Dépendance de la météo:** Les systèmes photovoltaïques ne produisent de l'électricité que lorsqu'ils reçoivent suffisamment de lumière solaire, ce qui peut être un inconvénient si vous vivez dans une région nuageuse.

I.8 L'énergie éolienne

L'utilisation des systèmes éoliens pour la production d'électricité est une solution pour satisfaire les besoins en électricité dans leur site isolé est assez bien venté. De tels systèmes présentent plusieurs avantages du fait de sa flexibilité et sa fiabilité [01].

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable produite à partir de la force du vent, en faisant tourner des turbines éoliennes, ce qui génère de l'électricité. Les éoliennes peuvent être installées à des endroits venteux, tels que les collines, les crêtes ou en mer, pour tirer parti des vents plus constants et plus forts.

L'utilisation de l'énergie éolienne a connu une croissance rapide ces dernières années, car elle est considérée comme une source d'énergie propre et écologique. Elle peut aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à réduire la dépendance envers les sources d'énergie non renouvelables telles que le pétrole et le charbon. La conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique est en effet relativement aisée, il faut « seulement » disposer d'un potentiel satisfaisant et résister aux caprices des vents excessifs. Parallèlement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [09].

I.8.1 Introduction sur l'éolienne

L'homme utilise l'énergie éolienne depuis des milliers d'années. Les perses de l'Antiquité utilisaient déjà l'énergie éolienne pour pomper l'eau. On a exploré le monde à l'aide de navires entraînés par le vent bien avant l'invention du moteur.

Pas plus tard qu'en 1920, plus d'un million d'éoliennes servaient à pomper l'eau et à fournir l'électricité aux entreprises agricoles de l'Amérique du Nord. Aujourd'hui, l'énergie électrique d'origine éolienne est parfois considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire.

En 2005, 6183 MW ont été installés dans les pays de la communauté européenne (1808 MW pour l'Allemagne et 1764 MW pour l'Espagne), soit une production électrique de 83 TWh, égale à 2.8% de la consommation électrique de 2004 [06].

Toutefois, une bonne connaissance des caractéristiques du vent en tout site est importante pour une exploitation adéquate et viable des ressources éolienne.

I.8.2 Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes sont classées suivant leurs tailles et leurs principes de fonctionnement.

A- Axe vertical (VAWT)

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau

Elles ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché [06].

Elles possèdent du sol donc facilement accessibles et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [09].

Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre.

Les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivantes:

Sur les systèmes éoliens 21 $\frac{3}{4}$, elle vous permet de placer la génératrice, le multiplicateur, etc. à terre, et vous n'avez pas besoin de munir la machine d'une tour. $\frac{3}{4}$ Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux sont les suivants : $\frac{3}{4}$ L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante. $\frac{3}{4}$ L'éolienne ne démarre pas automatiquement.

Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne (Figure I-5) [07].



Figure I-5: Exemples des constructions Darrieus et Savonius VAWT.

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent.

Bien que quelques grands projets industriels aient été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent marginales et peu utilisées. Il y a plusieurs facteurs comme leur capteur d'énergie situé près du sol est exposé aux turbulences et au gradient de vent, ce qui réduit leur efficacité. En outre, ces éoliennes sont sujettes à des problèmes d'aéroélasticité, en raison des fortes contraintes

qu'elles subissent. Enfin, pour les puissances élevées, leur surface d'occupation au sol est très importante [09].

B-Axe horizontal (HAWT)

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Le type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité.

Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal [09].

Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales. Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120m pour une puissance de 6 MW. La turbine à axe vertical de type Savonius qui semble être particulièrement adaptée est alors étudiée du point de vue de son rendement en collaboration avec l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse donnant des indices sur les différents perfectionnements du rendement possibles. Elle peut se trouver à l'avant de la nacelle ou à l'arrière : au vent (amont ou upwind) ou sous le vent (aval ou downwind) (Figure I-6).



Figure I-6: Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.

Les avantages de tels dispositifs sont une réduction du diamètre de la turbine ainsi que du bruit acoustique. Ils se positionnent automatiquement face au vent ce qui permet, notamment pour les fortes puissances d'éviter le système mécanique d'orientation, complexe, lourd et coûteux.

L'inconvénient majeur réside dans une fatigue accrue due aux fréquentes oscillations liées aux changements de direction du vent. Le procédé « sous le vent » reste peu utilisé comparativement à celui « au vent ». La réduction du nombre de pales permet théoriquement de réduire le coût mais cela dépend de la régularité du couple. Le coefficient C_p est également sensiblement plus faible, environ 5% entre une tripale et une bipale.

I.8.3 Le principe de fonctionnement d'une éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur.

Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV.

Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public (en France, le réseau EDF).

La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est, en France, généralement de 20 KV. Pour les centrales de grandes capacités, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90 KV, voire même 225 KV.

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants.

La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs [09].

I.8.4 Les caractéristiques d'une éolienne

Une éolienne est un dispositif qui permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette énergie est ensuite transformée dans la plupart des cas en électricité.

La France possède le deuxième gisement éolien européen après la Grande-Bretagne. Un développement important de l'énergie éolienne en France est attendu pour répondre aux objectifs fixés par la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte et par la Directive Européenne sur les Énergies Renouvelables.

En matière d'éolien on distingue tout d'abord les éoliennes posées à terre (dites terrestre ou « onshore ») de celles en mer (on parle alors d'éolien en mer ou « offshore »). Une éolienne produit de l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique du vent. Fixées en haut du mât, les pales mises en rotation par le vent autour du moyeu entraînent directement ou non un générateur qui produit l'électricité.

L'ensemble des éoliennes d'un parc sont raccordées entre elles puis au réseau électrique par l'intermédiaire d'un transformateur.

L'éolien terrestre est répandu en France ; allant généralement d'une puissance de 1,8 à 3MW les éoliennes terrestres installées ont des rotors mesurant entre 80 et 110 m de diamètre.

Caractéristiques d'une éolienne terrestre:

- Puissance : entre 1,8 et 3 MW.
- Diamètre du rotor : entre 80 et 110 m.
- Hauteur du mât : 80 à 100 m.
- Hauteur totale : entre 120 et 155 m.
- Puissance moyenne d'un parc éolien : 10MW.

Une éolienne de 2 MW produit en moyenne 4200 MWh par an, soit environ la consommation électrique moyenne de plus de 800 ménages français.

L'éolienne est pour sa part, composée de :

I.8.4.1Le rotor

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 (Figure I-7).



Figure I-7: Un rotor d'une éolienne à axe horizontal.

I.8.4.2 La nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres primaire et secondaire, multiplicateur, Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est soit une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter, le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne (Figure I-8).



Figure I-8 : La nacelle d'une éolienne à axe horizontal.

I.8.4.3 La tour

Son rôle est d'une part de supporter ensemble rotor et nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor et nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation (Figure I.9).

Trois grands types de tour peuvent se rencontrer:

- Tour mât haubané : de construction simple et moins coûteuse mais s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.
- Tour en treillis : sont les moins chères, mais souvent mal acceptées et très peu utilisées. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain
- Tour tubulaire : est beaucoup plus élégant, mais le prix d'une telle tour peut atteindre trois ou quatre fois celui d'un pylône haubané (Figure I-9)[09].



Figure I-9: Différents types de tours.

I.8.4.4 Le multiplicateur

Les rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m ont des vitesses de rotation trop faibles pour pouvoir entraîner directement un alternateur classique. Il est donc indispensable pour ces machines d'interposer entre l'aéromoteur et l'alternateur un multiplicateur.

Trois types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs :

- Le plus simple est le multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques ; d'une réalisation économique il est tout de même encombrant pour un rapport de multiplication élevé.
- L'utilisation de trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voire coaxiaux.
- Le réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée.

I.8.4.5 La génératrice

C'est un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Les plus simples et robustes sont des générateurs à induction. Il existe plusieurs types de génératrices pour stabiliser la vitesse des moteurs: génératrices à basses vitesses de vent, l'autre pour les hautes vitesses génératrice auto-excitée.

Enfin, La nouvelle génératrice discoïde de Jeumont Industrie est une innovation majeure car elle réduit la taille, normalement imposante, de ces alternateurs multipôles. Toutefois, le courant produit doit passer par un onduleur de grande puissance. Il s'agit là aussi d'une technologie de pointe.

I.8.4.6 Les pales d'éolienne

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement.

Les pales forment une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien. Cependant, il est bon de savoir que les pales déterminent grandement le rendement de l'éolienne et ces performances. Concevoir une pale revient à déterminer :

- La longueur de la pale : Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée.

La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales (Figure I-10).

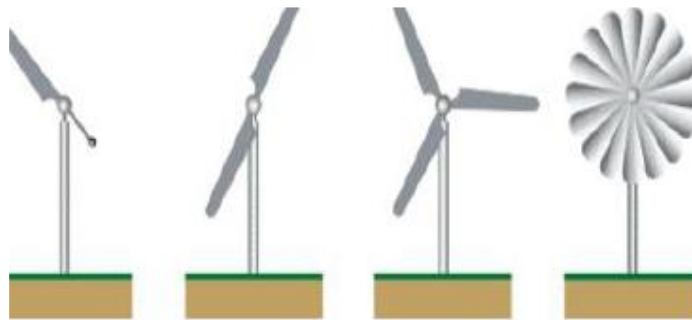


Figure I-10: Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.

Pour les roues à marche lente, ayant une inertie importante, le diamètre reste limité à 8 m à cause de leur comportement lors des rafales de vent.

Pour les roues à marche rapide, la longueur des pales peut être grande, supérieure à 30m.

- La largeur de la pale: La largeur des pales intervient pour le couple de démarrages qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis. La valeur du couple augmente si la largeur de pale augmente.

- Le profil aérodynamique de la pale : il est choisi en fonction de ses propriétés aéro-dynamiques telles que la portance et la traînée mais aussi selon le couple désiré et la vitesse spécifique de la pale. Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance, elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice. Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils ont en général été étudiés pour l'aviation (ailes ou hélices).

- Le calage initial et le gauchissement de la pale : ils seront déterminés afin d'avoir tout au long de la pale un angle d'attaque optimum pour le régime de rotation du rotor correspondant à la vitesse du vent nominale. C'est à dire la vitesse de vent pour laquelle l'éolienne a le meilleur rendement.

➤ Les matériaux de fabrication de la pale : le choix des matériaux est une étape importante. En effet, le matériau détermine le procédé de fabrication, le coût, la durée de vie et la fiabilité des pales qui subissent beaucoup de contraintes en fatigue. Le matériau idéal doit être léger, résistant, homogène pour avoir des pales de même masse, facile à mettre en oeuvre pour diminuer le coût, résistant à l'érosion et à la corrosion. Certains types de certains métaux, mais aujourd'hui surtout des matériaux composites répondent aux critères requis.

➤ Nombre de pales: Le nombre de pales B , que l'éolienne possèdera influence aussi le design de la pale ; le nombre de pale est déterminé en fonction de la vitesse spécifique λ , et du couple à fournir. Lorsque la vitesse spécifique est fixée, une valeur pour le nombre de pale est recommandée. Ainsi pour $4 < \lambda < 10$ le nombre de pale recommandé se situe entre 1 et 3 inclusivement.

Les éoliennes à marche lente ont en général entre 20 et 40 ailettes et ont un couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre ; leur rendement par rapport à la limite de Betz est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée.

➤ Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et la plus simple mais elle est génératrice de vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faibles, mais elle est plus compliquée et plus lourde.

I.8.4.7 Dimensionnement

La pale d'une éolienne est en réalité le véritable capteur de l'énergie présente dans le vent. de ses performances dépend la production d'énergie de l'installation, puis par conséquent l'intérêt économique de la machine [9].

La conception d'une pale doit faire appel à un compromis délicat entre le rendement aérodynamique, la légèreté, la résistance statique, les conditions de vent (vitesses, taux de turbulence) influent sur la conception (charges extrêmes, tenue en fatigue).

On s'aperçoit donc aisément que la conception d'une pale est en fait un procédé itératif avec de nombreux paramètres et de nombreuses contraintes. Il est indéniable que l'apparition de logiciels de calcul évolués associés à des optimisations facilite grandement la tâche du concepteur.

I.8.5 La puissance récupérable par une turbine

Une éolienne ne permet de récupérer qu'une partie de cette puissance, car l'écoulement ne peut pas avoir une vitesse nulle après son passage à travers la turbine (dans le cas contraire, cela reviendrait à « arrêter le vent »).

L'énergie récupérable est inférieure à l'énergie cinétique de l'air situé en amont de l'éolienne, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement.

La formule pour calculer la puissance récupérable par une éolienne dépend également de plusieurs facteurs tels que la vitesse du vent, la densité de l'air, la surface de la pale de l'éolienne, l'angle d'incidence des pales ainsi que la vitesse de rotation de l'éolienne.

$$P_{eo} = \frac{1}{2} C_p S \rho V^3 \quad (I-1)$$

P_{eo} est la puissance récupérable en watts (W).

ρ est la densité de l'air en kg/m^3 .

S est la surface balayée par les pales de l'éolienne en m^2 .

C_p est le coefficient de puissance, qui dépend de la conception de l'éolienne et varie entre 0,25 et 0,45.

V est la vitesse du vent en m/s .

Le physicien allemand Albert Betz en 1919 a démontré que la puissance maximale récupérable est égale aux 16/27 de la puissance incidente. Le coefficient de puissance maximum que l'on peut obtenir selon cette formule est d'environ 59,3 %. Cependant, il est important de noter que dans la pratique, les éoliennes ont généralement un coefficient de puissance inférieur à cette valeur théorique maximale [10].

1.8.6 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Pour des vitesses de vents supérieures à la vitesse de vent nominale V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mât et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale P_n pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y'a d'autres grandeurs dimensionnelles : V_d la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et V_c la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement (Figure I-11).

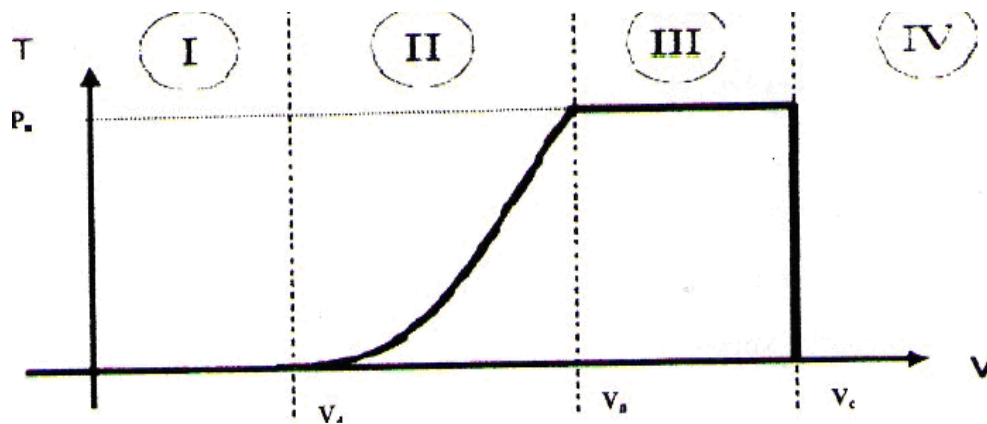


Figure I-11 : Diagrammes de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

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

- 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 :

1- 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;

2- 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) [09].

I.9 Conclusion

Les systèmes photovoltaïque et l'éolien sont deux technologies qui permettent de produire de l'énergie renouvelable et propre.

Le système photovoltaïque consiste en l'utilisation de panneaux solaires pour transformer l'énergie solaire en électricité, tandis que l'éolien utilise des turbines pour capter l'énergie cinétique du vent et la convertir en électricité. Ces deux technologies présentent des avantages en termes de production d'énergie propre, d'indépendance énergétique et de faible maintenance, mais leur coût d'installation peut être élevé.

L'optimisation de leur emplacement et l'utilisation de technologies de stockage d'énergie peuvent améliorer leur efficacité.

La combinaison de ces technologies et l'exploration de nouvelles sources d'énergie renouvelable ont un potentiel important pour répondre aux besoins énergétiques futurs tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

Cependant, leur utilisation doit être accompagnée d'une stratégie de développement durable pour minimiser leur impact environnemental et économique.

Références bibliographiques

- [01] www.energies-renouvelables.org.
- [02] <https://www.edfenr.com/lexique/energies-renouvelables/8>.
- [03] <https://www.riav.fr/definition-energie-non-renouvelable-quest-ce-que-cest/>
- [04] <https://www.futurasciences.com/sciences/definitions/univers-soleil-3727/>
- [05] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>
- [06] J. Nelson, The Physics of Solar Cells, Imperial College Press, 2009.
- [07] A. Zigha, "Etude et simulation d'un système hybride photovoltaïque -éolien", Mémoire master, Université Constantine, 2014.
- [08] Daniel Lincot, Article paru dans l'Actualité Chimique N°360-361 - février-mars 2012.
- [09] N. BENAMARA, L'énergie éolienne, Polycopié pédagogique, Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes, 2021/2022
- [10] <https://www.ecologie.gouv.fr/eolien-terrestre>.
- [11] A. Mahammedi, " Etude et optimisation d'un système hybride photovoltaïque-éolien, mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS ; SETIF1, 2014.

Chapitre II : Convertisseurs continu-continu (DC-DC) et continu-alternatif (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 [1].

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 [2].

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 [2].

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 [2].

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) [3].

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 [10].

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 [11].

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	$K \cdot D$	oui
Forward	$K \cdot D$	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 [3].

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**) [3].

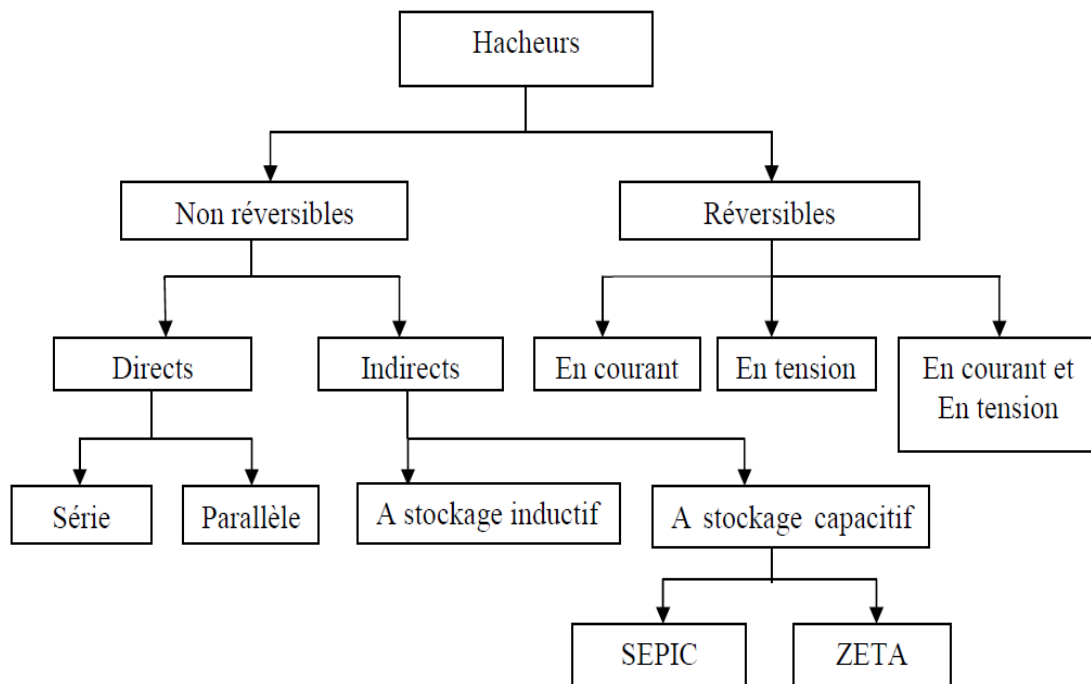


Figure II-1 : Différents types de hacheurs.

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 [1].

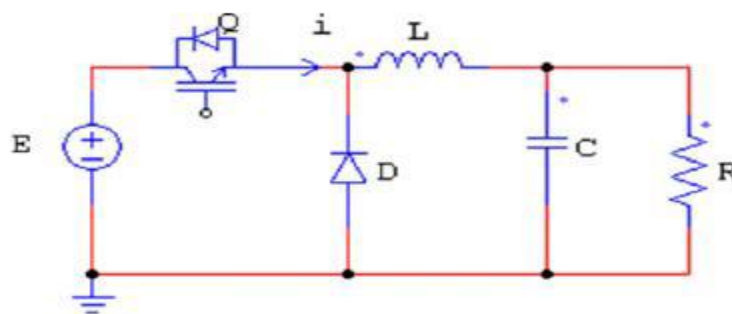


Figure II-2: Schéma réel du Convertisseur buck [3].

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 [3].

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.

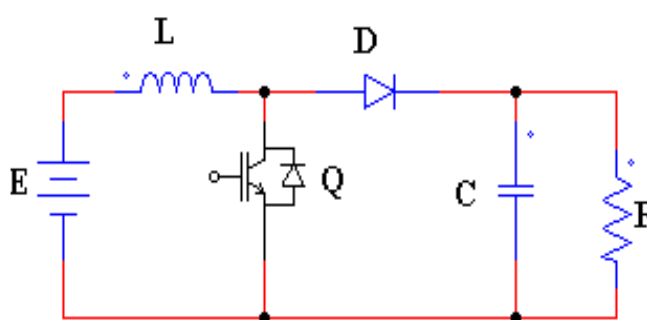


Figure II-3: Convertisseur survolteur (Boost-converter) [4].

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 transfère vers la charge via la diode. Dans les bornes de la charge décrivant le fonctionnement par l'équation suivante [3].

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 [5].

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.

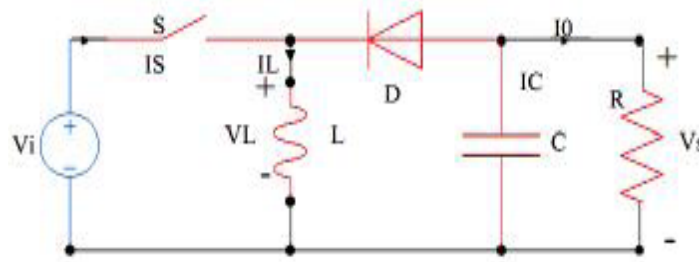


Figure II-4 : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur.

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 bornes 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 [3].

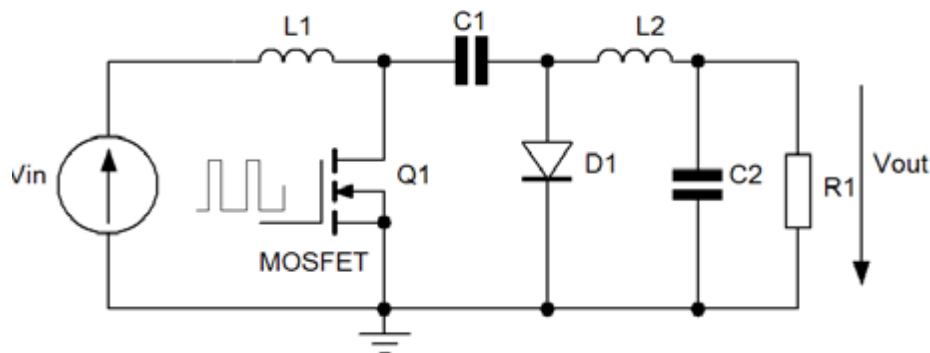
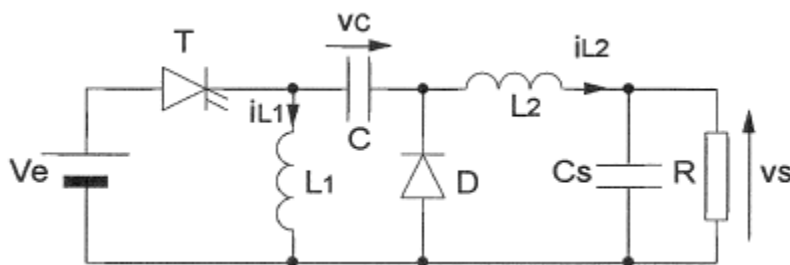


Figure II-5 : Schéma de base d'un convertisseur «CUK».

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) [3].



FigureII-6 : Schéma de base d'un convertisseur «ZETA» [3].

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 [2].

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 [4].

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 [8].

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)).

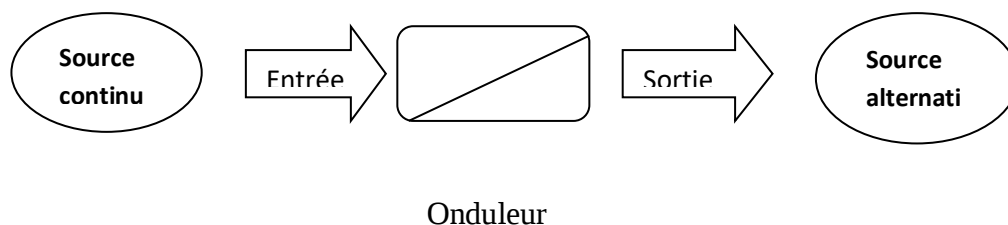


Figure II-7: Schéma de principe de la conversion Continue - Alternative (DC-AC).

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 [7].

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) [4].



Figure II-8: Onduleur non autonome [4].

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 [8]. 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 [4].
- *- Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.

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 de

signal est souvent utilisé dans les applications à valeur moyenne variable (Ex : Commande des moteurs, alimentation réglable,...)[9].

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.

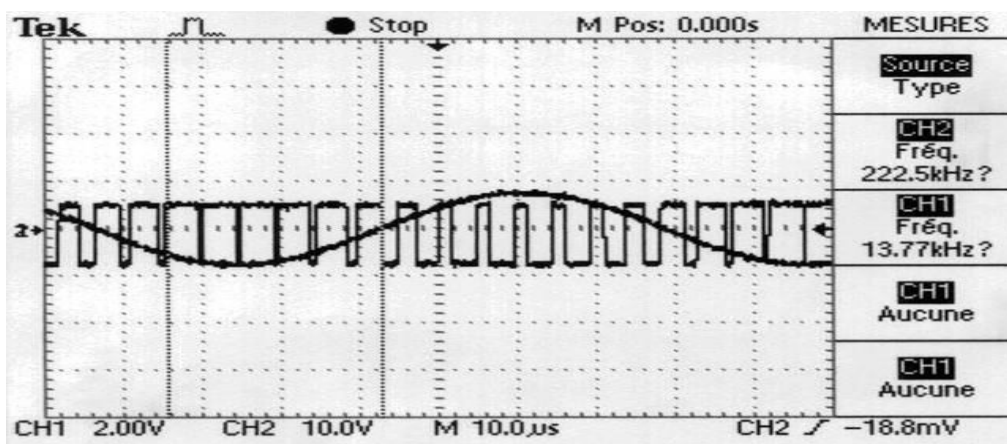


Figure II-10: La valeur moyenne est récupérée simplement par un filtre passe bas.

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.

$$\text{Si } t_h = 0, \eta = 0$$

$$\text{Si } t_h = T, \eta = 1$$

$$\text{Donc } 0 \leq \eta \leq 1$$

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

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 pratique rien en mode triode se comporte comme une de très faible valeur) et rien du tout en mode bloqué.

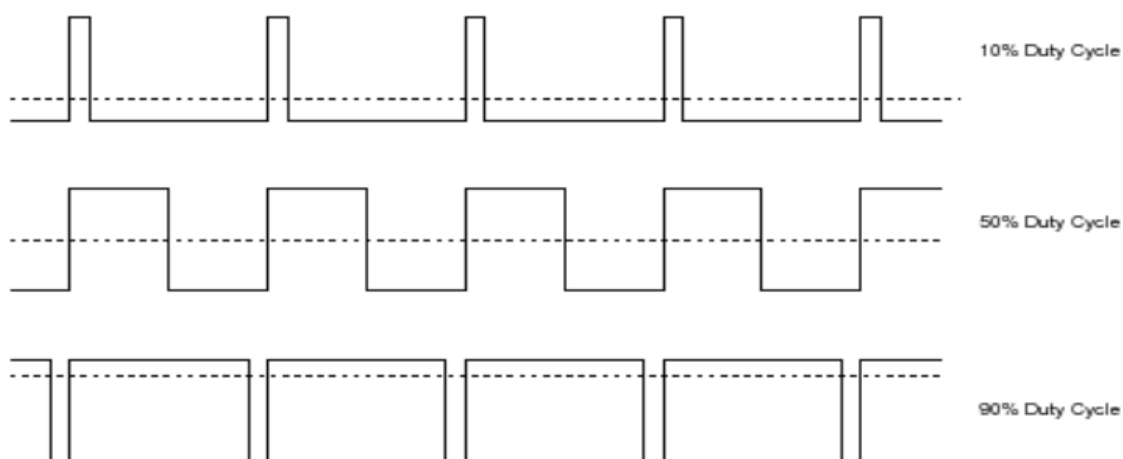


Figure II-11: Signal de commande PWM

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).

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.

Références bibliographiques

- [1] A. Rufer.A, P. Barrade, " Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC, Ecole Polytechnique Fédérale de Laussane.
- [2] I. Hidri, " support de cours d'électronique de puissance" Les conversions DC-DC et DC-AC ; Institut supérieur des études technologiques de Nabeul.
- [3] 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,
- [4] A. Boukaroura, " Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph", Université Ferhat Abbas Setif, 2009.
- [5] M. Hacid, L.Kaci, "Caractérisation et commande d'un système photovoltaïque", Mémoire de master académique ,Université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou ,2021.
- [6] Lycée P. Mendès France Epinal , Cours onduleur, génie électrique.
- [7] <https://for-ge.blogspot.com/2015/08/londuleur.html>.
- [8] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/convertisseurs-electriques-et-applications>.
- [9] <https://www.electronique-mixte.fr/pwm/>
- [10] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [11] A. Sahraoui., «Étude d'une chaîne de convertisseur photovoltaïque», Mémoire de Magistère, Université de Msila, 2010.

Chapitre III : Modélisation et commande d'un système PV et d'un système 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 [1].

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) [1].



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 Solar peace P6Y-230.

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

- Le courant de court-circuit (Icc) qui fournit chaque cellule est [2] :

$$I_{cc(ce\text{le}\text{ule})} = \frac{I_{cc}}{N_p} \quad (\text{III-1})$$

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

$$V_{co(ce\text{le}\text{ule})} = \frac{V_{co}}{N_s} \quad (\text{III-2})$$

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

$$I_{mp(ce\text{le}\text{ule})} = \frac{I_{mp}}{N_p} \quad (\text{III-3})$$

- La tension maximale (Vmp) de chaque cellule est :

$$V_{mp(ce\text{le}\text{ule})} = \frac{V_{mp}}{N_s} \quad (\text{III-4})$$

- La puissance maximale Pmax de chaque cellule est:

$$P_{\max(ce\text{le}\text{ule})} = I_{mp(ce\text{le}\text{ule})} * V_{mp(ce\text{le}\text{ule})} \quad (\text{III-5})$$

- La résistance série Rs de chaque cellule est :

$$R_{s(ce\text{le}\text{ule})} = \frac{N_p}{N_s} * R_{s(\text{module})} \quad (\text{III-6})$$

- La résistance shunt Rsh de chaque cellule est :

$$R_{sh}(cellule) = \frac{N_p}{N_s} * R_{sh}(module) \quad (III-7)$$

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) [3].

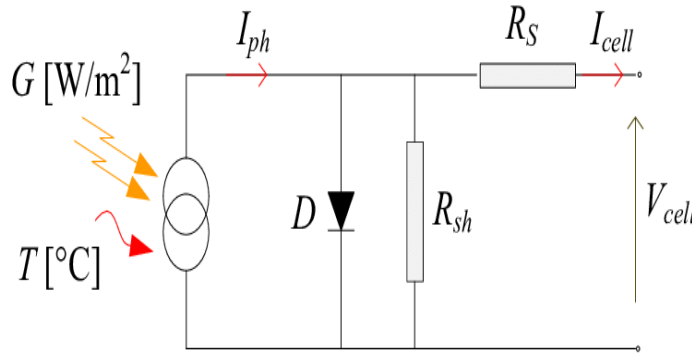


Figure III-2: Schéma équivalent du modèle à une diode.

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 :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s [exp (q (V_{pv} + (I_{pv} \times R_s))) - 1] - V_{pv} + (I_{pv} \times R_s) R_{sh} \quad (III-8)$$

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 (I-V) 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 maximal **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})[2].

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/m², 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).

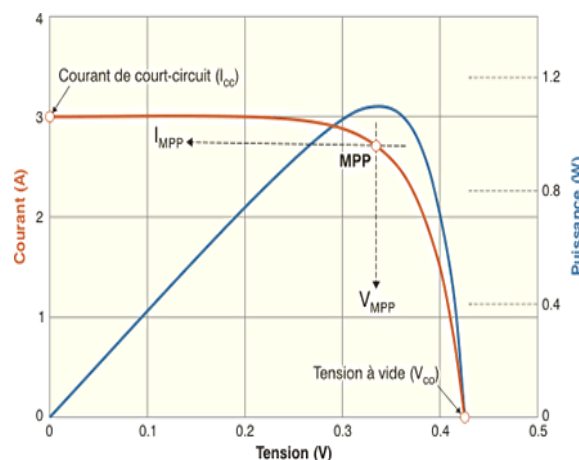


Figure III-3: Schéma de la courbe tension-courant.

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 [3].

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 Introduction

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).

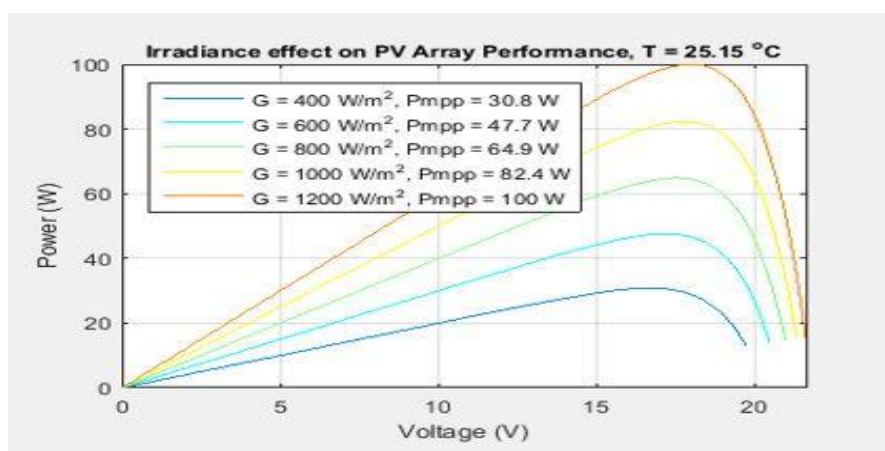


Figure III-4: Courbe tension-puissance avec les caractéristiques courant-tension puissance-tension d'un système photovoltaïque

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) [4].

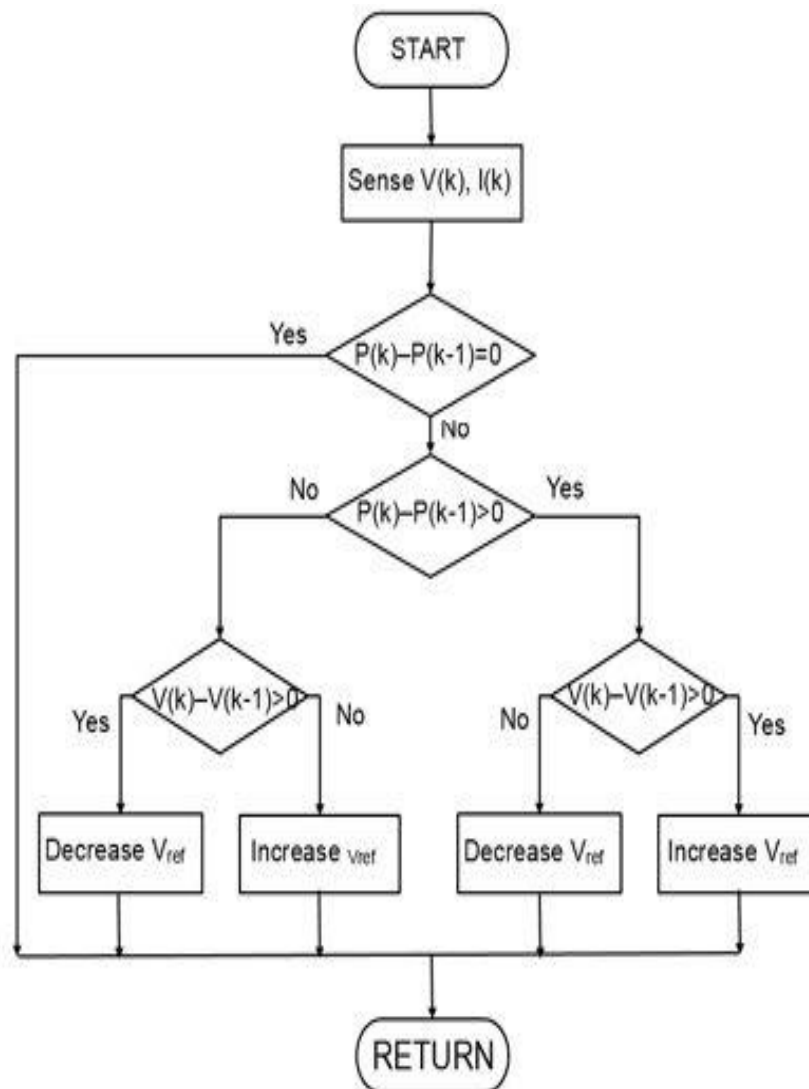


Figure III-5: L'algorithme de Perturbation et Observation (P&O).

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) [5].

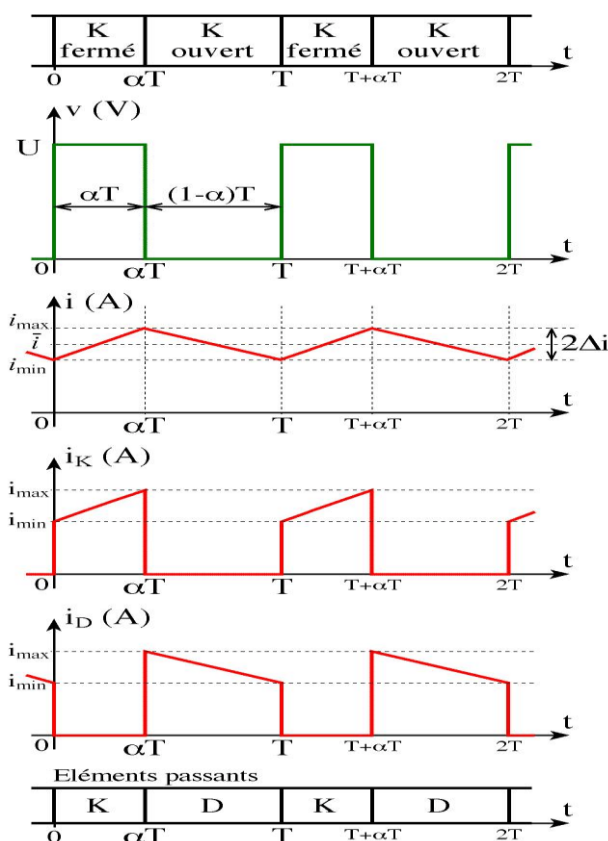


Figure III-6 : Modulation de largeur d'impulsion (MLI).

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) [6].

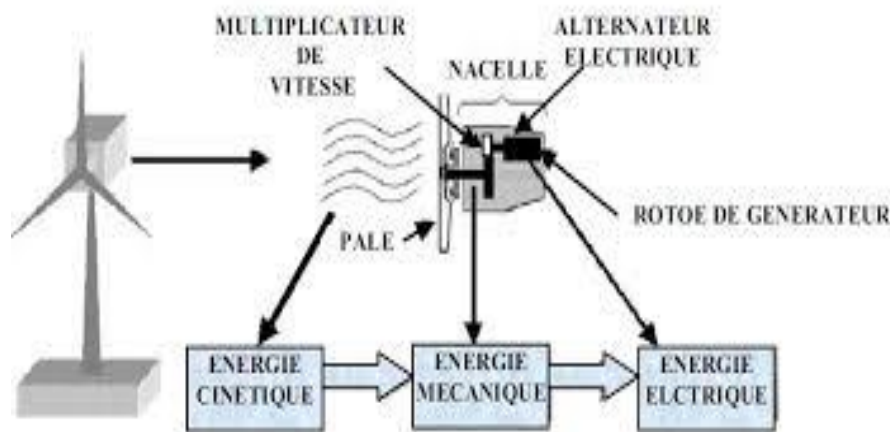


Figure III-7: Schéma simple d'une éolienne.

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 [7].

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 [7].

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 est 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).

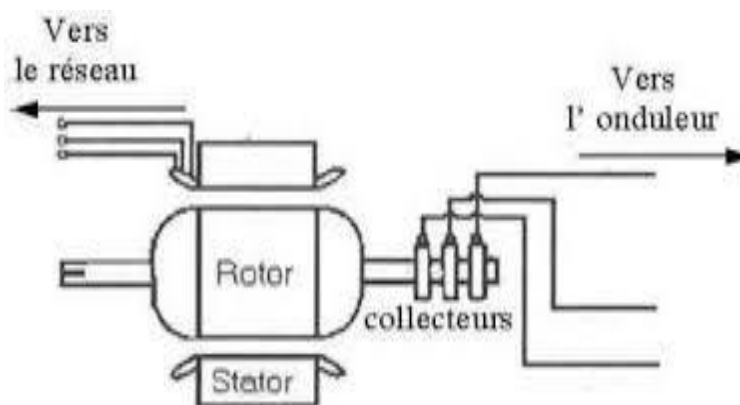


Figure III-8 : Schéma de la MADA connecte au réseau.

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) [7].

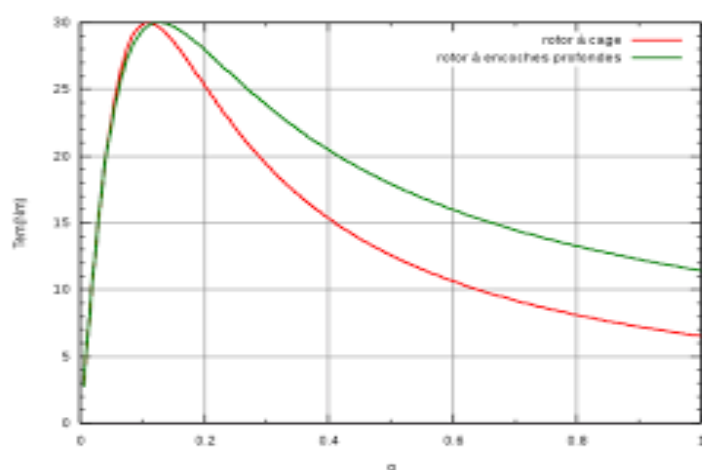


Figure III-9: Caractéristique de la production d'énergie de la MADA et machine asynchrone à cage.

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.

Références bibliographiques

- [1] K. Helali, « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque », Mémoire magister, l'UMMTO Tizi-Ouzou, 2012.
- [2] [https://www.energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-électriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaïques/](https://www.energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaïques/)
- [3] https://www.researchgate.net/figure/Schema-electrique-equivalent-dune-cellule-photovoltaïque_fig9_324474604.
- [4] R. Arbouche, M. Aichi, « Identification des paramètres d'un module photovoltaïque », Master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021-2022.
- [5] <https://www.electronique-mixte.fr/pwm/>Publié par ElecM le 2016-01-26.
- [6] [https://ventdouestenergie.wordpress.com/comment-fonctionne-une-eolienne/de-distribution électrique](https://ventdouestenergie.wordpress.com/comment-fonctionne-une-eolienne/de-distribution-electrique).
- [7] R. Maacha, «Modélisation et commande d'une machineasynchrone à double alimentation », diplôme d'Ingénierie, l'UMMTO Tizi-Ouzou, 2010-2011.

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.

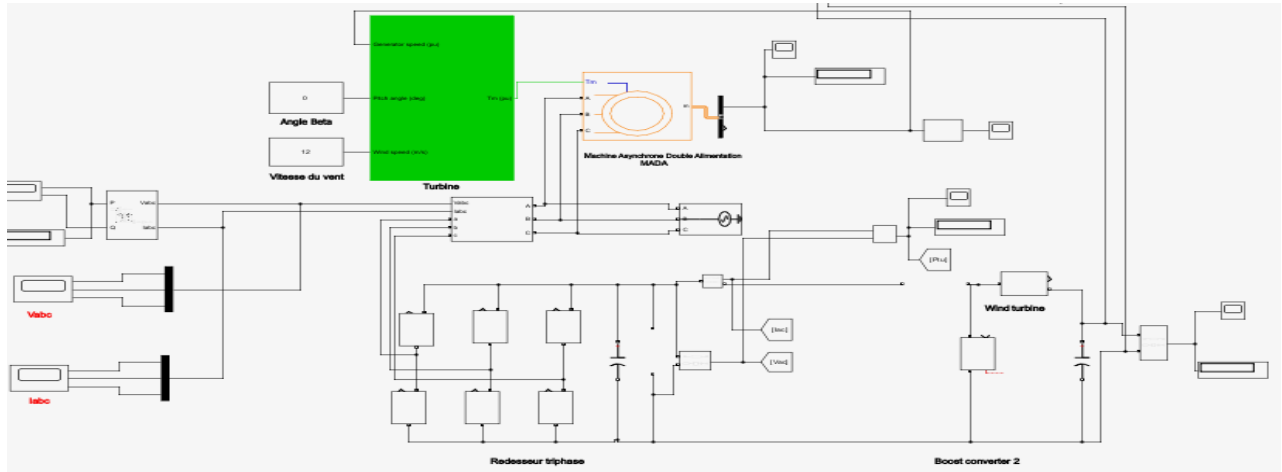


Figure IV-1 : Schéma bloc de machine la MADA connectée à une turbine.

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.

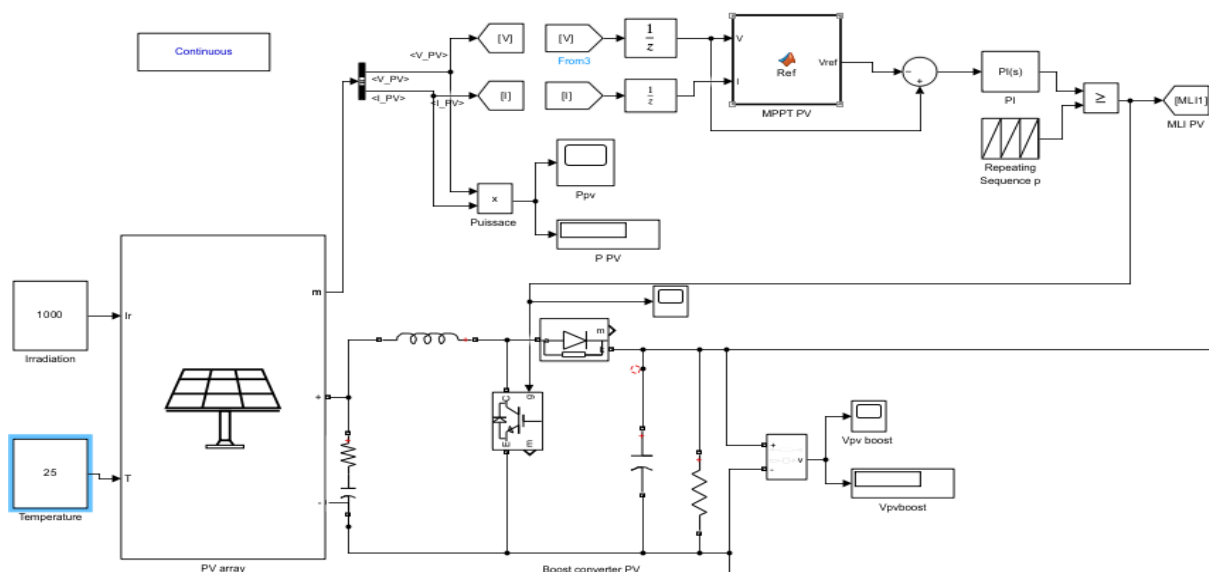


Figure IV-2 : Modèle Simulink pour la commande MPPT.

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.

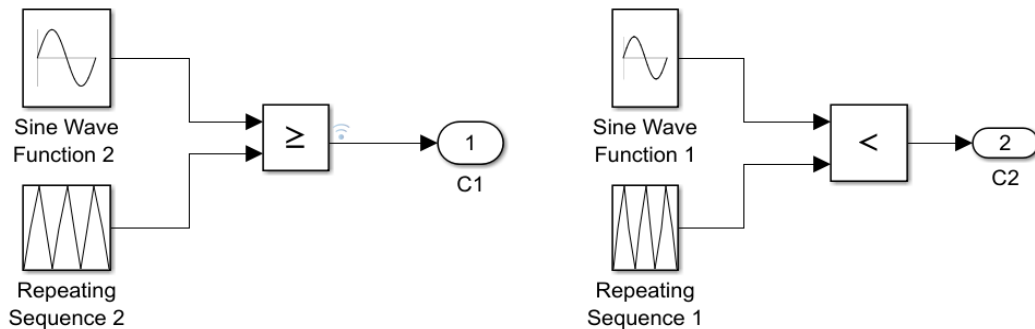


Figure IV-3: Modèle Simulink pour la génération du signal PW.

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.

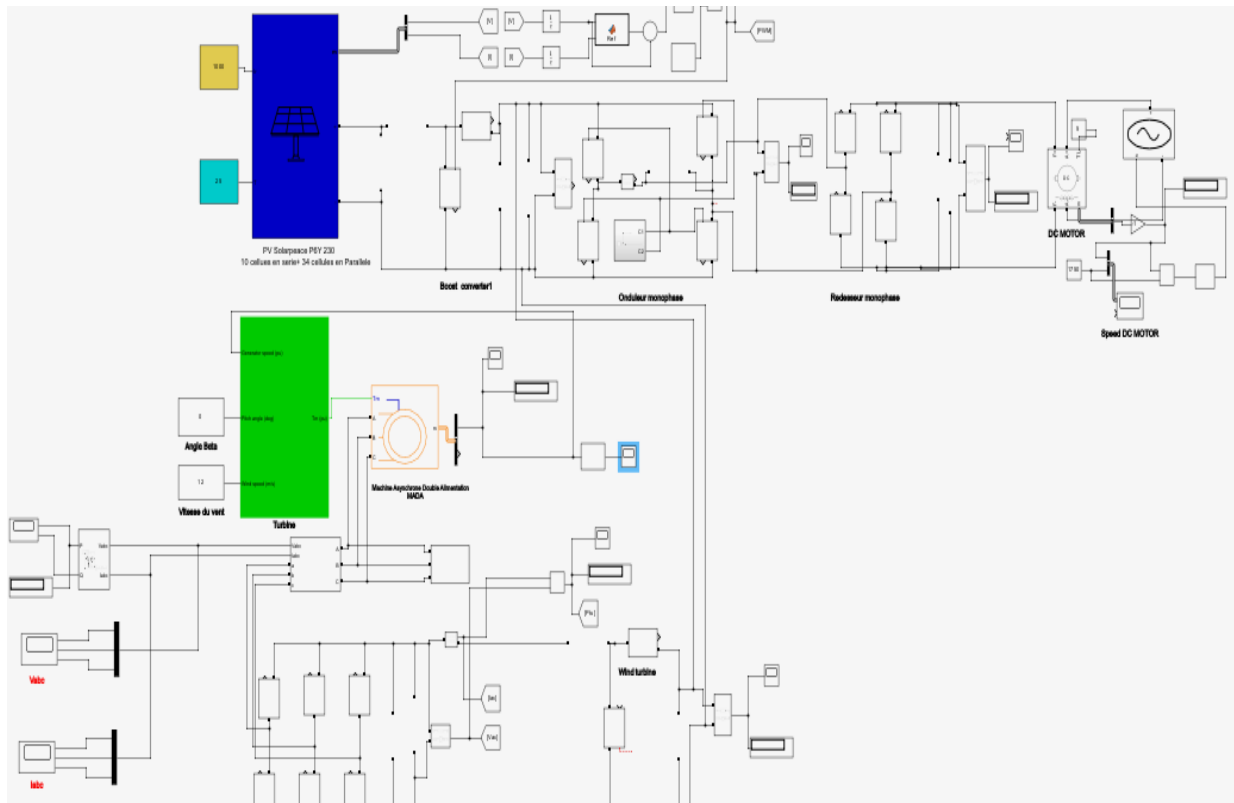


Figure IV-4 : Schéma global d'un système hybride photovoltaïque- éolien.

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.

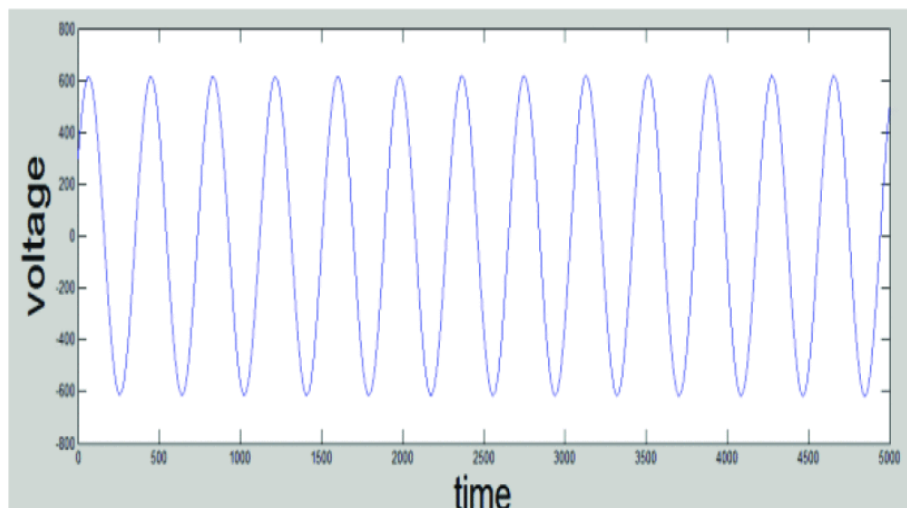


Figure IV-5 : Variation de la tension de sortie de ligne à ligne en fonction du temps.

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.

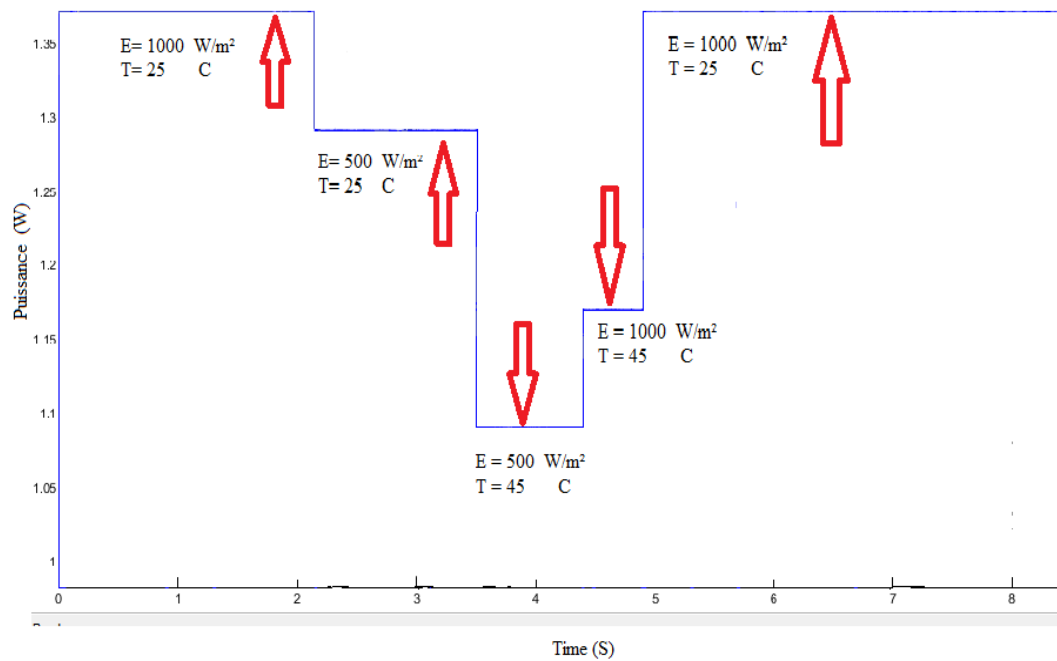


Figure IV-6: Variation de la puissance (P) en fonction de l'irradiation et de la température.

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

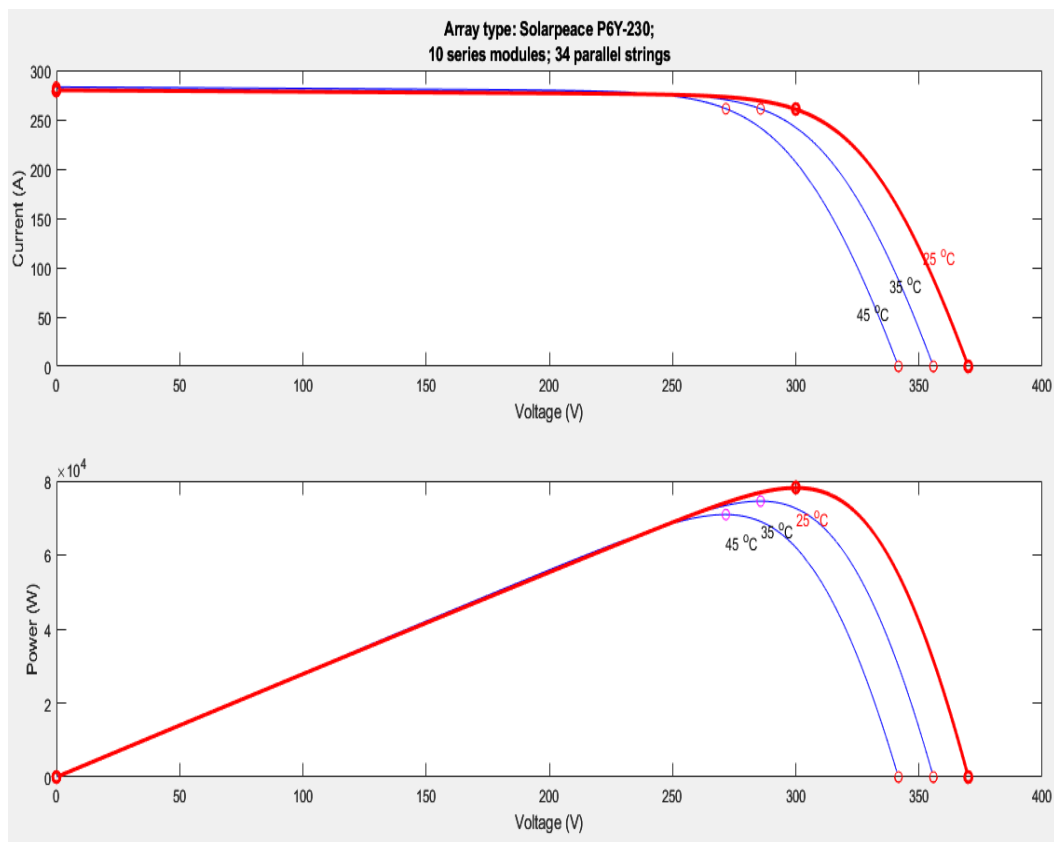


Figure IV-7: Caractéristiques I (V) et P (V) en fonction de la température.

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

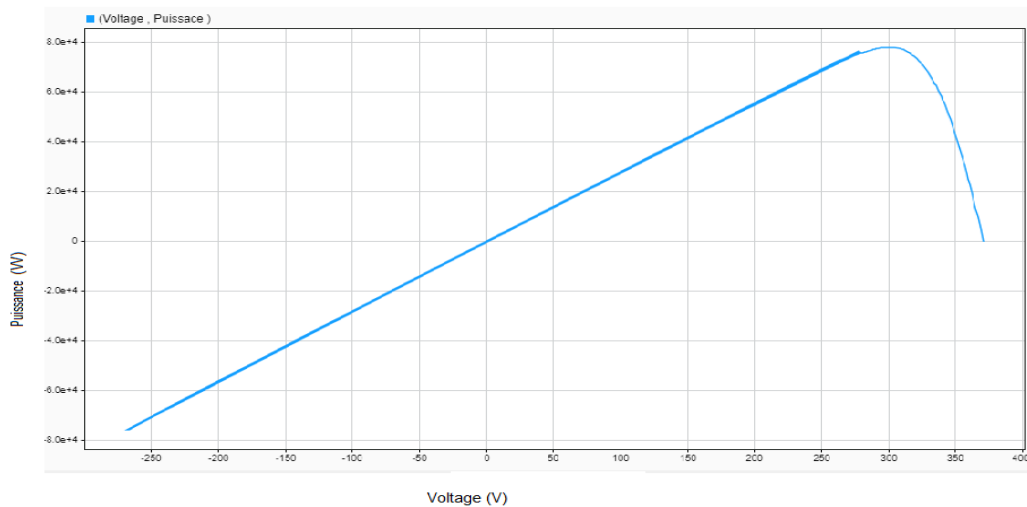


Figure IV-8 : Variation de la puissance produite (P) en fonction de la tension (V).

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

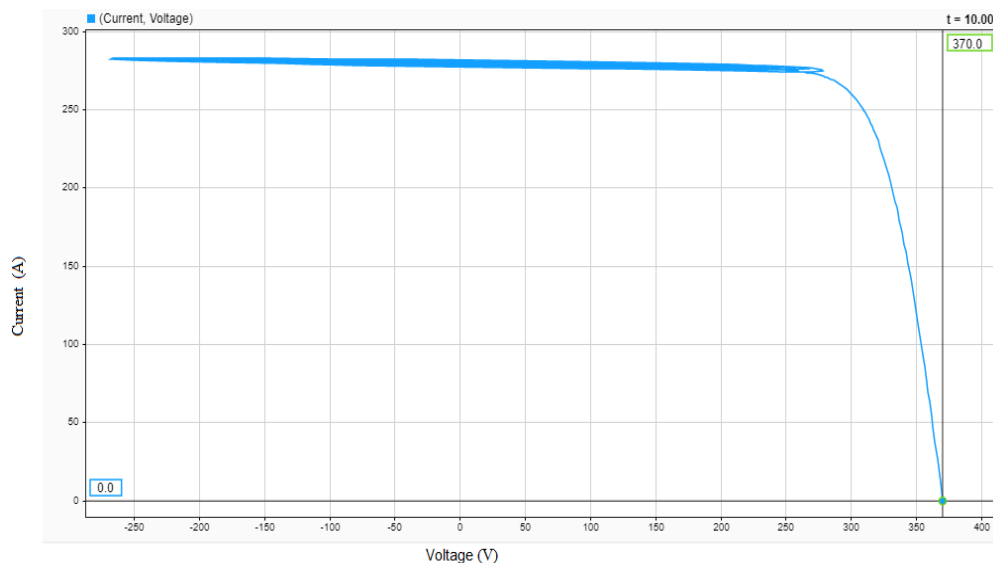


Figure IV-9 : Variation du courant (I) en fonction de la tension (V).

- **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.

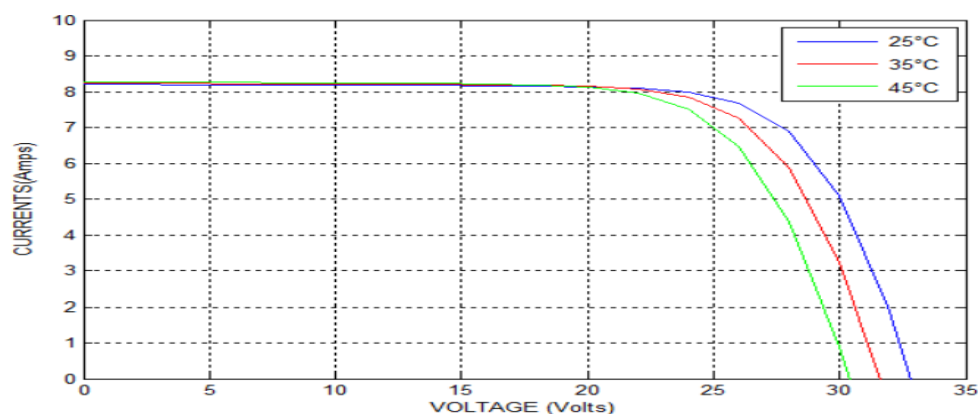


Figure IV-10: Les caractéristiques de (I) et (V) du panneau solaire en fonction de la température.

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 A à 8,2 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.

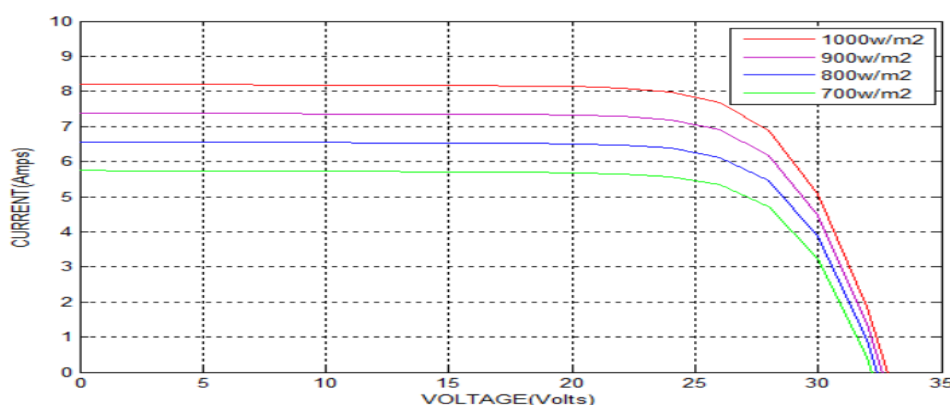


Figure IV-11: Variation du courant (I) et la tension (V) en fonction de l'irradiation.

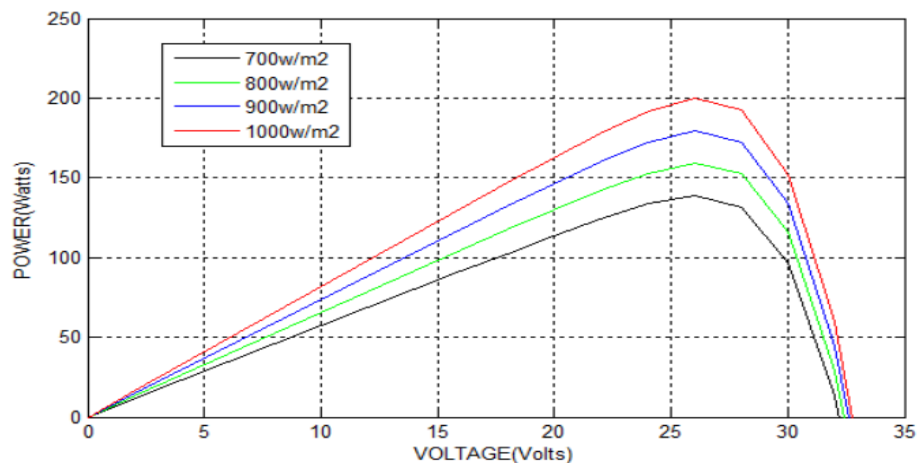


Figure IV-12 : Variation de la puissance (P) et de la tension (V) en fonction de l'irradiation.

- **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 200 W et qu'elle se produit à un courant de 7,61 A et une tension à 26,3 V environ.

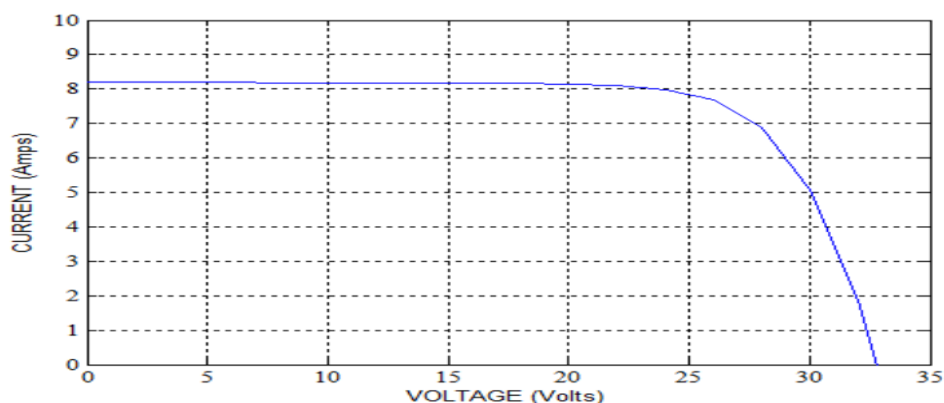


Figure IV-13 : Variation du courant (I) en fonction de la tension (V).

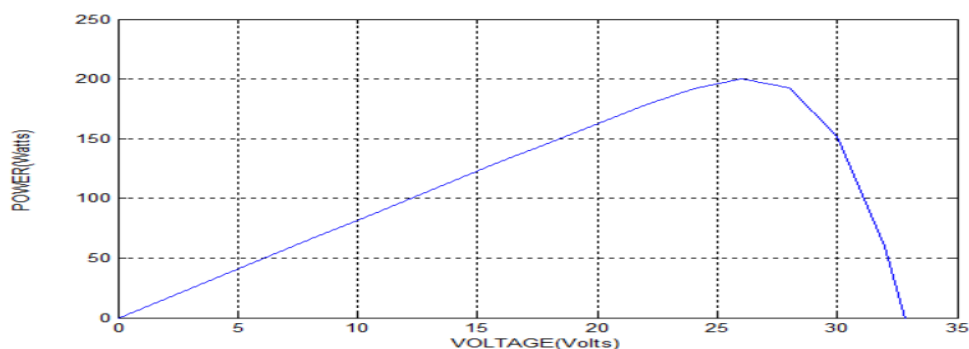


Figure IV-14 : Variation de la puissance (P) en fonction de la tension (V).

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.

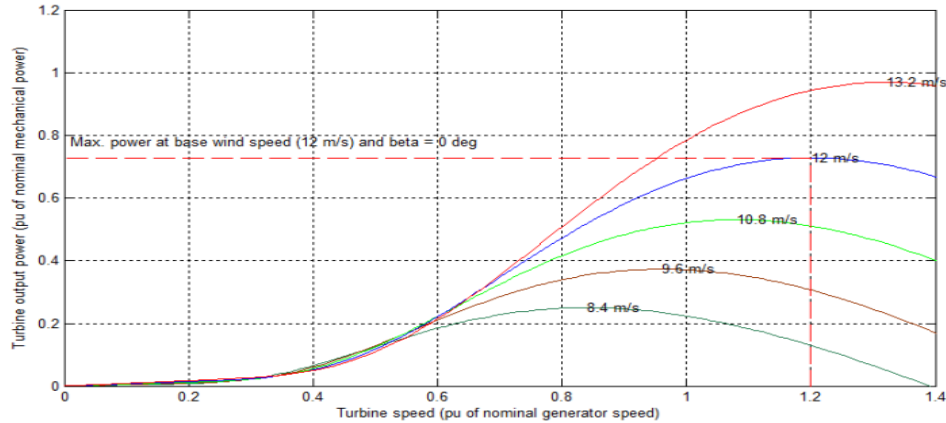


Figure IV-15 : Variation de la puissance (P) en fonction l'angle de calage β .

La figure IV-16 illustre la variation du couple de la turbine (T_m) en fonction du temps.

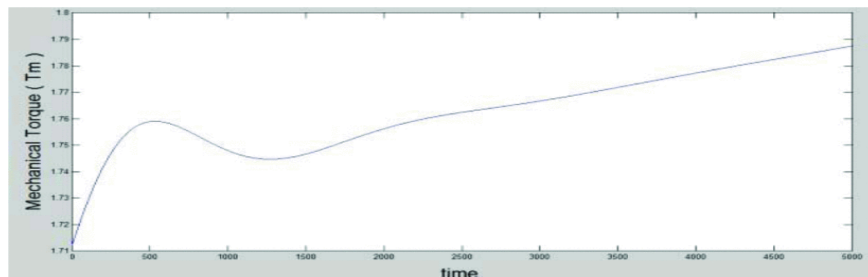


Figure IV-16 : Variation de couple de la turbine (T_m) en fonction du temps.

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

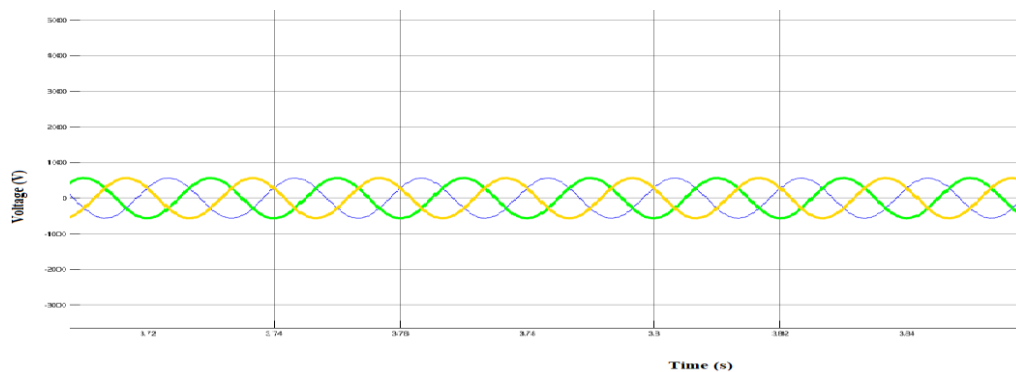


Figure IV-17 : Tension triphasée délivrée par MADA en fonction du temps.

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

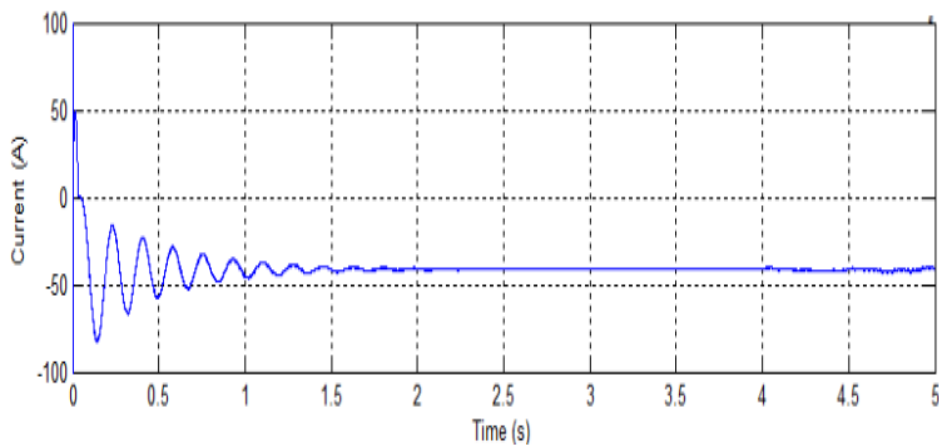


Figure IV-18 : Variation du courant délivré par le RMS.

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

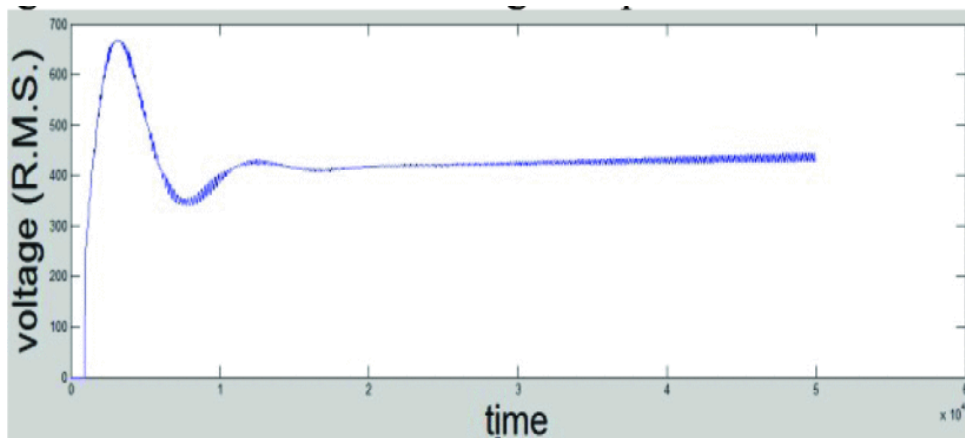


Figure IV-19 : Variation de la tension délivrée par le RMS.

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

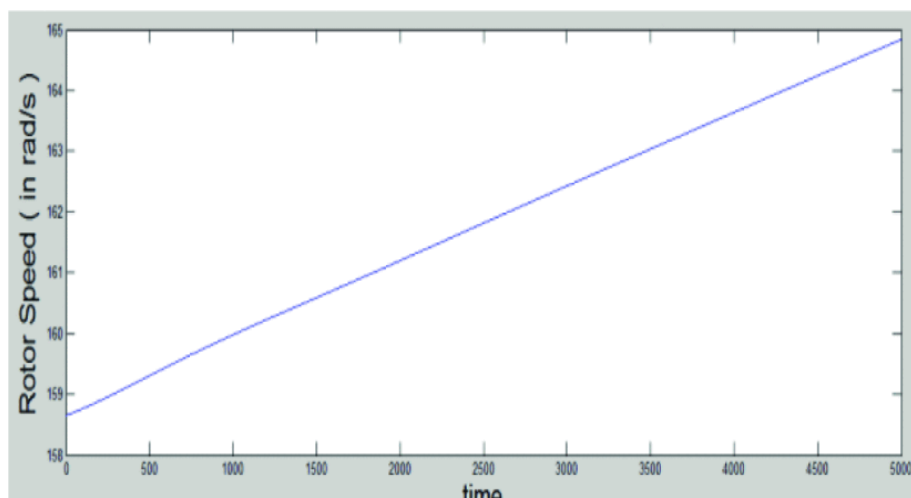


Figure IV-20 : Variation de la vitesse du rotor de la turbine.

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.

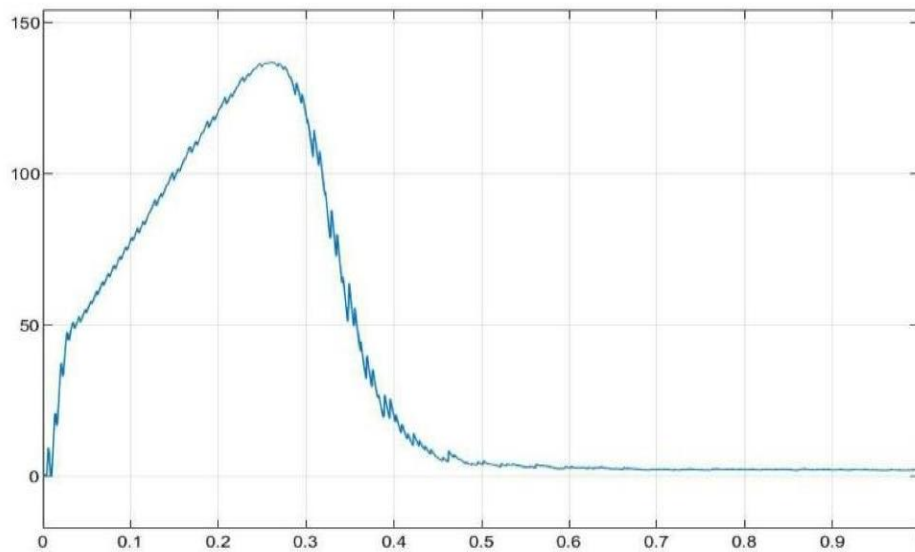


Figure IV-21: Puissance crête de la turbine.

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.

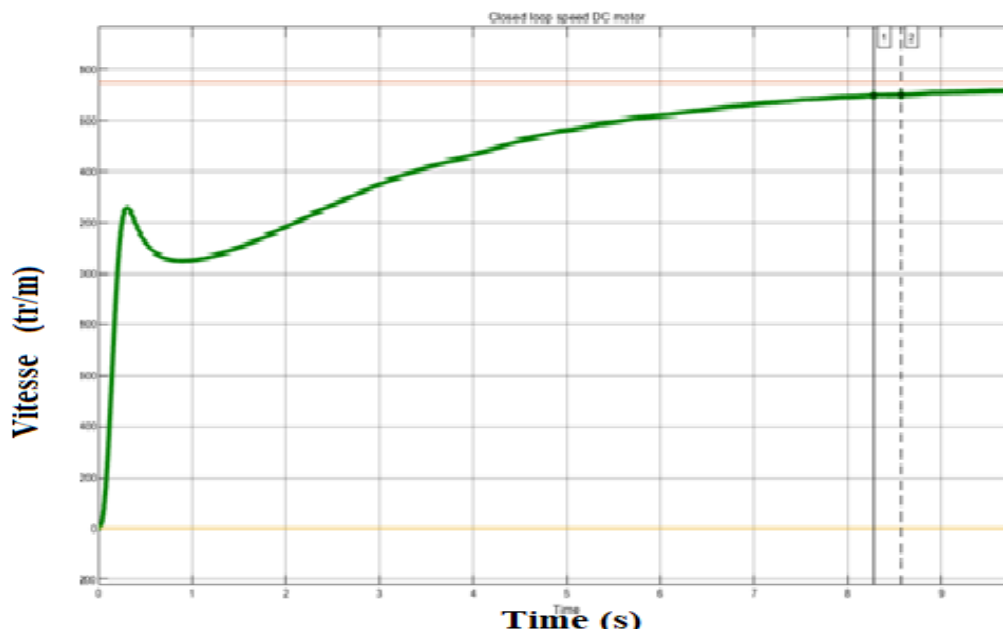


Figure IV-22 : Variation de la vitesse du moteur DC.

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/m² 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

Dans ce travail, nous avons modélisé et simulé un **système hybride photovoltaïque - éolien**. Il consiste à mettre en évidence la **méthode MPPT** qui aboutit à l'extraction de la **puissance maximale** à partir du panneau PV.

Nous avons brièvement présenté les configurations de convertisseurs de puissance ainsi que la **technique d'optimisation de puissance MPPT des générateurs PV**.

La modélisation du **système PV** consiste à la mise en équations des différentes parties les constituant : la source primaire (température et ensoleillement), les convertisseurs statiques : **le hacheur survolteur** (Boost), permettant la commande en tension du panneau photovoltaïque. Il s'agit donc d'optimiser le traitement global de l'énergie électrique au sein du système et en particulier au niveau du générateur, en plaçant celui-ci à chaque instant à son point optimal de fonctionnement grâce à **un système de poursuite de type MPPT**.

L'injection d'énergie vers le réseau est assuré via un **onduleur à commande MLI** triangulé- sinusoïdale multiple.

Après l'étape de la **modélisation**, nous nous sommes intéressés au **problème de maximisation de la puissance** délivrée par générateur PV. Nous avons traité la **commande MPPT** ainsi que **l'amélioration des performances** d'un **système photovoltaïque** et d'un **système éolien** par cette dernière. L'algorithme **MPPT**, nous a permis de trouver l'énergie maximale pour **les deux systèmes**.

Nous avons représenté le principe de fonctionnement **des hacheurs** et **des onduleurs** associé à la **commande MLI**, nous avons présenté la simulation sous **Matlab/Simulink** de l'ensemble « **générateur PV, convertisseurs, commande MPPT** ».

Les résultats obtenus lors de la simulation ont montré que les convertisseurs et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

En ce qui concerne **l'énergie éolienne**, nous avons vu la façon de maximiser l'énergie, l'algorithme et méthodes de travail, Le contrôleur proposée pour la poursuite du point de puissance maximale du système éolien est indépendant de la courbe de puissance et des conditions météorologiques. **Nous avons utilisé un régulateur PI**.

Les résultats de simulation sont satisfaisants du point de vue de toutes les grandeurs régulées, optimales recherchées par l'algorithme d'MPPT et la commande l'éolienne afin d'assurer l'alimentation sans interruption. 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**. L'autonomie du système est assurée par la combinaison de ces deux sources connectées à une charge continue

Pour une éventuelle continuité du présent travail, il est possible d'énumérer quelques perspectives comme suite de cette étude dont, nous pouvons citer :

- *- Le couplage du système hybride au réseau électrique de grande puissance pour servir à plusieurs utilisateurs.
- *- L'amélioration de l'efficacité du système hybride en introduisant d'autres sources d'énergie renouvelable.
- *- L'utilisation d'autres commandes MLI.
- *- Introduction d'autres types de convertisseurs DC/DC.
- *- Exploitation de nouveaux algorithmes MPPT.
- *- Réaliser la commande sur un dispositif pratique.

ANNEXE

Programme MPPT

```
function Vref=Ref(V,I)

Vrefmax=370;

Vrefmin=0;

Vrefinit=307;

deltaVref=1; persistent Vold Pold Vrefold;

dataType='double'; if isempty (Vold)

Vold = 0;

Pold = 0;

Vrefold=Vrefinit; end

P=V*I;

dV = V-Vold;

dP = P-Pold;

if dP ~= 0

if dP<0

if dV<0

Vref = Vrefold + deltaVref; else

Vref = Vrefold - deltaVref; end else if dV<0

Vref = Vrefold-deltaVref; else

Vref = Vrefold+deltaVref; end end else

Vref= Vrefold; end

if Vref >= Vrefmax Vref <= Vrefmin

Vref = Vrefold; end

Vrefold = Vref;

Vold = V;

Pold = P;
```