

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :

N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies

Département d'automatique et électromécanique

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Energies Renouvelables

Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique

Par : HOSSEINAT Abdeldjalil et SOUFRANI Djamal Eddine

Thème

Etude et simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque à deux étages à base de l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade

Devant le jury :

BAHRI Ahmed	M.A.A	Université Ghardaïa	Président
FERKOUS Khaled	M.A.A	Université Ghardaïa	Examineur
BENAMRANE Karima	M.R.B	URAER Ghardaïa	Encadreur
ABDELKRIM Thameur	M.R.A	URAER Ghardaïa	Co-encadreur

Année universitaire 2020/2021

Remerciement

Nous remercions avant tous le Bon Dieu qu'il nous a aidé pour réaliser ce modeste travail.

Nous remercions nos encadrateurs et Co-encadreur Dr. **BENAMRANE Karima** et Dr **ABDELKRIM Thameur** pour les efforts et le temps qu'ils nous ont consacré, ils nous ont beaucoup aidés par leur conseils, leurs expériences et leurs encouragements, nous leur sommes très reconnaissants.

Notre reconnaissance va également à nos enseignants pour leurs honorables tâches durant notre période d'études.

Merci, à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour accomplir ce travail.

Dédicace

A mes chers parents préférés dans cet univers, pour l'amour et l'affection qu'ils m'ont offert, pour les conseils fructueux qui m'ont été prodigués, grand merci.

A mes frères et sœurs.

A toute la famille **HOSSEINAT**

A tous les amis ...

A tous ceux qu'on aime ...

Et à tous ceux qui me sont chers.

HOSSEINAT Abdeldjalil

Dédicace

Je suis honoré de dédier ce mémoire à mon cher père à ma chère mère qui sont la source de ma volonté.

Je suis fier d'être votre fils et de pouvoir enfin réaliser ce que vous attendiez de moi.

Vous n'avez jamais cessé de donner vos efforts pour subvenir à nos besoins, nous encourager et nous aider à choisir la voie du succès.

Votre patience, votre bonne volonté et vos précieux conseils ainsi que votre confiance en moi ont été un grand facteur de ma réussite.

Cher père chère mère vous trouverez dans cet humble acte le fruit de vos sacrifices, ainsi qu'une profonde expression de mon affection et de ma sincère gratitude.

A ma femme, mes frères et sœurs.

Pour tous les membres de la famille **SOUFRANI** et famille **Ghibeche**

A tous les amis.

Pour tous ceux que nous aimons.

Et tous ceux qui me sont chers.

SOUFRANI Djamel Eddine

Résumé

Dans notre mémoire nous nous intéressons à la conversion de l'énergie photovoltaïque au moyen d'une chaîne de conversion à deux étages constituées de deux hacheurs élévateurs dans le premier étage et d'un onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade dans le second étage. Les résultats de simulation obtenus ont montrés l'efficacité de l'algorithme MPPT appliqué à la commande des deux hacheurs élévateurs à extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque. Aussi la stratégie de commande utilisée pour contrôler l'onduleur à cinq niveaux a permis d'obtenir la forme d'onde souhaitée. L'implémentation pratique des stratégies de commandes simulées de cette cascade de conversion photovoltaïque a montrée à travers les résultats expérimentaux obtenus un bon fonctionnement des deux boosts et de l'onduleur cinq niveaux.

Abstract

In our work we are interested in the conversion of photovoltaic energy by two-stage conversion cascade composed by two boost converter in the first stage and a single-phase five-level inverter cascade structure in the second stage. The simulation results obtained showed the effectiveness of the MPPT algorithm applied to the control of the two boost to extract the maximum power from the photovoltaic generator. Also the control strategy used to control the five-level inverter achieved the desired waveform. The practical implementation of the simulated control strategies of this photovoltaic conversion cascade has shown through the experimental results obtained that the two boosts and the five-level inverter work correctly.

ملخص

نحن مهتمون في أطروحتنا بتحويل الطاقة الكهروضوئية عن طريق سلسلة تحويل متكونة من مرحلتين, تتكون من محولين (DC/DC) في المرحلة الأولى موج ذو خمس مستويات أحادي الطور بهيكل متسلسل في المرحلة الثانية . أظهرت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها فعالية خوارزمية MPPT المطبقة على التحكم في المحولين (DC/DC) لاستخراج الطاقة القصوى من المولد الكهروضوئي. كما أن استراتيجية التحكم المستخدمة للتحكم في الموج ذو خمس مستويات حققت الشكل الموجي المطلوب. أظهر التنفيذ العملي لاستراتيجيات التحكم المحاكاة لسلسلة التحويل الكهروضوئية هذه من خلال النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها أن المحولين (DC/DC) والموج ذو خمس مستويات يعملان بشكل صحيح.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la conversion photovoltaïque.....	3
I.1. Introduction.....	4
I.2. Les énergies renouvelables	4
I.2.1 Les énergies renouvelables en Algérie	4
I.2.2 L'énergie solaire	6
I.2.2.1 Rayonnement solaire	6
I.2.2.2 Le rayonnement direct	6
I.2.2.3 Le rayonnement diffus	6
I.2.2.4 Le rayonnement solaire réfléchi	6
I.2.2.5 Le rayonnement global	6
I.2.2.6 Spectre du rayonnement	7
I.3. Cellules photovoltaïques	8
I.3.1 Définition d'une cellule	8
I.3.2 Semi-conducteurs	8
I.3.3 La jonction P-N	8
I.3.4 Principe de fonctionnement d'une cellule PV.....	9
I.3.5 Types de cellules photovoltaïques	10
I.3.5.1 Cellule en silicium poly cristallin.....	10
I.3.5.2 Cellule en silicium monocristallin	11
I.3.5.3 Cellule silicium amorphe en couche mince	102
I.3.5.4 Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS	113
I.3.5.5 Cellule multijonction.....	114
I.3.5.6 Les cellules solaires photovoltaïques transparentes	11
I.3.5.7 Cellule solaire CZTS : cuivre zinc étain soufre (innovation 2016)	11

I.3.5.8 Le photovoltaïque sous concentration	16
I.3.6 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	18
I.3.6.1 Le courant de court-circuit (I_{cc})	19
I.3.6.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co}).....	20
I.3.6.3 La puissance maximale	20
I.3.6.4 Facteur de forme FF	21
I.3.6.5 Le rendement	21
I.4 Module photovoltaïque.....	21
I.4.1 Groupement en série	22
I.4.2 Groupement en parallèle:	22
I.4.3 Groupement mixte (série-parallèle):.....	23
I.5. Paramètres influant sur la caractéristique I(V) et P(V) :	24
I.5.1 Influence de l'éclairement :	24
I.5.2 Influence de la température :	25
I.6. Conclusion :	26
Chapitre II : Modélisation, simulation et expérimentation du convertisseur Boost	27
II.1. Introduction:	28
II. 2. Convertisseur :.....	28
II .3. Les convertisseurs DC/DC (Hacheurs) :	28
II.3.1 Les différents types d'hacheurs :.....	29
II.3.2 Hacheur survolteur (Boost) :	29
II.3.2.1 Fonctionnement	30
II.3.2.2 DIMENSIONNEMENT DES COMPOSANTS ACTIFS	33
II.3.2.2.1 Courant dans l'interrupteur K	33
II.3.2.2.2 Tension maximale aux bornes de l'interrupteur K	34
II.3.2.2.3 Courant dans la diode D	34
II.3.2.2.4 Tension maximale aux bornes de la diode D...	34
II.3.2.2.5 Calcul de la valeur du condensateur de sortie	34

II.3.2.2.6 Valeur de l'inductance	35
II .4. Commande MPPT :.....	35
II.4.1 Algorithme perturbation et observation :.....	36
II .5. Simulation system photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT :	38
II .6. La partie expérimentale :	41
II.6.1. Micro-ordinateur associé à la carte arduino Mega.....	42
II.6.2. Unité d'acquisition :.....	43
II.6.3. Carte Capteur :.....	44
II.6.4. Carte d'interface :	44
II.6.5. Partie puissance de le hacheur boost et charge R.....	45
II.6.6. Oscilloscope	45
II.6.7. Résultats expérimentaux	46
II.7. Conclusion :.....	47
Chapitre III : Modélisation, simulation et expérimentation de l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade	48
III.1. Introduction.....	49
III.2. Onduleur	49
III.2.1. Principe de fonctionnement	50
III.2.2. Les différents types d'onduleur	50
III.2.2.1. Onduleur autonome	51
III.2.2.2. Onduleur non autonome	51
III.2.3. Onduleur multi-niveaux	51
III.2.3.1. Principe de l'onduleur multi niveaux	52
III.2.4. Onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade :	53
III.2.4.1 Principe de fonctionnement	53
III.2.4.2 Principe de la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).....	54
III.2.4.3. Résultats de simulation	55

III.3. Résultats expérimentaux	56
III.3.1. Appareils utilisés dans le montage expérimental	57
III.3.1.1. Alimentation stabilisée	57
III.3.1.2. PC et carte d'acquisition PCIE6351	58
III.3.1.3. Onduleur cinq niveaux	59
III.3.1.4. Oscilloscope numérique	59
III.3.2. Résultat de test pratique	60
III.4. Conclusion :	60
Chapitre IV : Simulation et expérimentation de la cascade de conversion photovoltaïque à deux étages.....	61
IV.1. Introduction:.....	62
IV.2. Chaîne conversion photovoltaïque à deux étages à base de l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade.....	62
IV.2.1. Description	62
IV.2.2. Caractéristiques du module photovoltaïque :	62
IV.2.3. Résultat de simulation :.....	64
IV.2.4. Implémentation expérimentale :	67
IV.3. Conclusion :	69
Conclusion générale.....	71
Références.....	73

Liste des tableaux		
Tableau	Titre	Page
CHAPITRE I : Généralités sur la conversion photovoltaïque		
Tableau (I-1)	différentes technologies des cellules photovoltaïques	16
CHAPITRE III : Modélisation, simulation et expérimentation de l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade		
Tableau (III -1)	les configurations possibles	48
CHAPITRE IV : Simulation et expérimentation de la cascade de conversion photovoltaïque à deux étages		
Tableau (IV -1)	Caractéristiques électriques du module PV Sanyo HIP-225HDE1.	61

Liste des Symboles

Liste des Symboles		
Symboles	Nomination	Unité
T	Température	(C°)
I_{raa}	Rayonnement solaire	(W/m ²)
V	Tension	(V)
V_{pv}	Tension photovoltaïque	(V)
V_{S}	Tension sortie	(V)
V_{mpp}	Tension de circuit ouvert	(V)
I	Courant	(A)
I_{cc}	Courant de court-circuit	(A)
I_{mpp}	Courant de circuit ouvert	(A)
I_{d}	Courant diode	(A)
P_{pv}	Puissance photovoltaïque	(W)
P_{mpp}	Puissance au point de puissance maximale	(W)
Fe	Fréquence de commutation	(Hz)
A	Rapport cyclique	
L	Inductance	(H)
C	Condensateur	(F)
C_{e}	Condensateurs d'entrée	(F)
C_{s}	Condensateurs de sortie	(F)

Liste des abréviations

Liste des abréviations	
Abréviations	Nomination
CIS	cuivre indium sélénium
CIGS	cuivre indium gallium et sélénium
CZTS	cuivre zinc étain soufre
G _{pv}	Générateur photovoltaïque
PV	Photovoltaïque
PPM	Point de Puissance Maximale
MPPT	Maximum Puissance point tracking
P&O	perturbation et observation
DC	Courant continu
DC/DC	Continue / Continue
AC	Courant alternatif
DC/AC	Continue/alternatif
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
MLI	Modulation de la Largeur d'Impulsion

Liste des figures

Liste des figures		
Figure	Titre	Page
CHAPITRE I : Généralités sur la conversion photovoltaïque		
Fig.I.1	Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables	5
Fig.I.2	Composante du rayonnement global sur un plan horizontal	7
Fig.I.3	Jonction PN à l'équilibre	8
Fig.I.4	La jonction PN	9
Fig.I.5	Cellule en silicium poly cristallin	11
Fig.I.6	Cellule en silicium monocristallin	12
Fig.I.7	Cellule silicium amorphe en couche mince	13
Fig.I.8	Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS	13
Fig.I.9	Cellule multijonction	14
Fig.I.10	Les cellules solaires photovoltaïques transparentes	15
Fig.I.11	Cellule solaire CZTS : cuivre zinc etain soufre (innovation 2016)	15
Fig.I.12	Le photovoltaïque sous concentration	16
Fig.I.13	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	18
Fig.I.14	Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule PV	19
Fig.I.15	Courant de court-circuit	20
Fig.I.16	Tension de circuit ouvert	20
Fig.I.17	Panneau photovoltaïque	21
Fig.I.18	Association des modules en série	22
Fig.I.19	. Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques.	22
Fig.I.20	Association des modules en parallèle.	23
Fig.I.21	Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle des cellules identiques	23
Fig.I.22	Association mixte des modules	24
Fig.I.23	Caractéristique résultante d'un groupement mixte	24
Fig.I.24	Caractéristique I-V et P-V pour différentes éclairément.	25
Fig.I.25	Caractéristiques I-V et P-V pour différentes températures	25
CHAPITRE II : Modélisation, simulation et expérimentation du convertisseur Boost		
Fig.II.1	Symbole d'un convertisseur DC-DC	29

Liste des figures

Fig.II.2	Schéma électrique d'un hacheur boost	29
Fig.II.3	Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost	30
Fig.II.4	Schéma électrique d'un hacheur boost fermé	30
Fig.II.5	Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert	31
Fig.II.6	Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT	36
Fig.II.7	Schéma de convergence vers le PPM par P&O	37
Fig.II.8	Organigramme de l'algorithme perturbation et Observation	37
Fig.II.9	Module PV- hacheur boost- Charge R	38
Fig.II.10	Caractéristiques I(V)- P(V) de module	39
Fig.II.11	L'ensemble des courbes α , et V_{PV} , I_{PV} , P_{PV} de module pour Rayonnement solaire variable [1000 700] W/m ² .	40
Fig.II.12	Montage expérimental	41
Fig.II.13	Algorithme MPPT sous Matlab Simulink	42
Fig.II.14	Photo réelle d'Arduino MEGA	42
Fig.II.15	Unité d'acquisition	43
Fig.II.16	Logiciel de l'unité d'acquisition	43
Fig.II.17	Photo réelle de Carte Capteur	44
Fig.II.18	Photo réelle de Carte d'interface	44
Fig.II.19	Partie puissance de l'hacheur boost	45
Fig.II.20	Charge R	45
Fig.II.21	Oscilloscope	46
Fig.II.22	Résultat de test pratique de tension, courant et puissance de module PV	46
Fig.II.23	Rapport cyclique	47
CHAPITRE III : Modélisation, simulation et expérimentation de l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade		
Fig.III.1	Schéma de principe de la conversion Continu -Alternative (DC –AC)	49
Fig.III.2	Onduleur Monophasé	50

Liste des figures

Fig.III.3	Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux	52
Fig.III.4	Onduleur à niveaux multiples	52
Fig.III.5	Onduleur monophasé en cascade à 5 niveaux	53
Fig.III.6	Principe de la modulation	54
Fig.III.7	Génération des signaux de commande d'un onduleur 5 niveaux	55
Fig.III.8	Technique MLI, signale de commande des transistors, tension de sortie.	56
Fig.III.9	Montage expérimental	57
Fig.III.10	Alimentation stabilisée	57
Fig.III.11	Commonde MLI sous Matlab simulink	58
Fig.III.12	Carte d'acquisition PCIE6351	58
Fig.III.13	Onduleur cinq niveaux	59
Fig.III.14	Oscilloscope numérique	59
Fig.III.15	Tension de sortie de l'onduleur	60
CHAPITRE IV : Simulation et expérimentation de cascade de la conversion photovoltaïque à deux étages		
Fig. IV.1	Chain de conversion photovoltaïque à deux étages à base de l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade	63
Fig. IV.2	Caractéristiques I(V)- P(V) de générateur	64
Fig. IV.3	L'ensemble des courbes I_{rra1} , α_1 et V_{PV} , I_{PV1} , P_{PV} de GPV_1	65
Fig. IV.4	L'ensemble des courbes I_{rra2} , α_2 , et V_{PV2} , I_{PV2} , P_{PV2} de GPV_2	66
Fig. IV.5	Tension et courant sortie	67
Fig. IV.6	Banc expérimental de l'association PV- Boosts- onduleur 5N- Charge	68
Fig. IV.7	L'ensemble des courbes courants, tensions, puissances, tensions entré et sortie de l'onduleur	69

Introduction générale

Dans le cadre du développement énergétique durable, face au double défi planétaire que représente l'épuisement imminent des ressources énergétiques fossiles, une solution alternative doit être trouvée pour la production d'énergie électrique, car c'est l'énergie la plus consommée au monde, et cette solution est l'énergie renouvelable, qui est l'énergie dérivée de ressources naturelles qui ne sont pas épuisées et sont constamment renouvelées, comme le vent, l'eau et le soleil sont disponibles dans la plupart des pays du monde et peuvent également être produites à partir des vagues et de la chaleur et ont aucun effet sur l'environnement.

Parmi ces énergies renouvelables, il y a l'énergie solaire à partir de laquelle l'énergie électrique est générée par des moteurs thermomécaniques ou des convertisseurs photovoltaïques au moyen de cellules solaires qui convertissent la lumière directe du soleil en électricité.

Dans notre mémoire nous nous intéressons à la conversion de l'énergie photovoltaïque au moyen d'une chaîne de conversion à deux étages constituées : de deux hacheurs élévateurs dans le premier étage et d'un onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade dans le second étage. Pour réaliser cet objectif, nous avons divisé notre mémoire en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre nous nous intéressons à l'énergie solaire photovoltaïque. L'énergie du soleil est transformée à travers des cellules photovoltaïques en électricité. Cette énergie obtenue est transformée et utilisée dans différentes applications. Nous présentons dans ce chapitre les différents types de ces cellules solaires ainsi leur modèle mathématique. Par la suite nous montrons les caractéristiques électriques du module photovoltaïque qui est le résultat de l'association de plusieurs cellules solaires. Nous terminons ce chapitre par étudier l'influence que peut avoir la variation de l'éclairement et de la température sur les caractéristiques électriques du module.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons à l'hacheur élévateur. Nous commençons par présenter sa structure, son principe de fonctionnement ainsi que le dimensionnement des composants qui le constitue. Par la suite, nous montrons les résultats de simulation de ce convertisseur boost qui est alimenté par un module photovoltaïque et commandé par l'algorithme de poursuite du point de puissance maximal. Nous terminons ce chapitre par la présentation des résultats expérimentaux.

Introduction générale

Dans le troisième chapitre, nous allons étudier un type d'onduleur très utilisé dans les applications des énergies renouvelables, il s'agit de l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade. Nous commençons par présenter sa structure ainsi que la stratégie de commande sinus triangle qui nous permet d'avoir une tension de sortie à cinq paliers. Par la suite les résultats de simulation de cette stratégie de commande sont montrés. Nous terminant ce chapitre par une présentation des résultats expérimentaux.

Dans le dernier chapitre nous allons étudier l'association de la chaîne de conversion photovoltaïque à deux étages composée de deux convertisseurs boosts dans son premier étage et de l'onduleur monophasé à cinq niveaux dans le second. Nous commençons par la description du système puis la présentation des résultats de simulation obtenus. Par la suite nous décrivons le banc expérimental nécessaire pour l'implémentation des algorithmes de commande et la récolte de résultats. Nous terminons ce chapitre par la présentation des résultats expérimentaux.

Chapitre 1 : Généralités sur la conversion photovoltaïque

I.1. Introduction

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. L'exploitation des énergies renouvelables est une solution indispensable. On peut prévoir que tout système énergétique durable dans le futur sera basé sur l'utilisation de ces sources [1].

Aujourd'hui on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque. L'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre [2].

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'énergie solaire photovoltaïque. L'énergie du soleil est transformée à travers des cellules photovoltaïques en électricité. Cette énergie obtenue est transformée et utilisée dans différentes applications. Nous présentons dans ce chapitre les différents types de ces cellules solaires ainsi leur modèle mathématique. Par la suite nous montrons les caractéristiques électriques du module photovoltaïque qui est le résultat de l'association de plusieurs cellules solaires. Nous terminons ce chapitre par étudier l'influence que peut avoir la variation de l'éclairement et de la température sur les caractéristiques électriques du module.

I.2. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables se positionnent comme une solution adéquate à l'épuisement des ressources d'énergies fossiles, et qui peut couvrir la demande mondiale de l'énergie électrique tout en préservant notre environnement. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre, la croissance des végétaux... On les qualifie d'énergies "flux", leurs exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. [3]

D'ici on distingue plusieurs familles des énergies renouvelables, ainsi que les différentes technologies qui sont mis en œuvre afin de les exploité convenablement.

I.2.1 Les énergies renouvelables en Algérie

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie renouvelable devient de plus en plus une solution prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés. [4]

Dans ce propos l'Algérie l'un des pays de fort potentiel des énergies renouvelables, avec une capacité nationale d'électricité qui dépasse les 56.74 TWh avec 0.45 TWh crête seulement pour les énergies renouvelables (en 2012)[9],spécifiquement l'énergie solaire photovoltaïque, car l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara), et l'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m² soit près de 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/ m² au Grand Sud (TAMENRASSET) [5].

L'Algérie s'engage donc avec une grande volonté sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions sérieuses et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile [6].

Ainsi, un programme très ambitieux est envisagé pour développer les énergies renouvelables durant la période 2015-2030, il consiste à installer une capacité totale de 22000 MW, et le solaire photovoltaïque sera la principale source de production d'énergie propre car il représenterait 62% de la capacité totale projetée à 2030 [6].

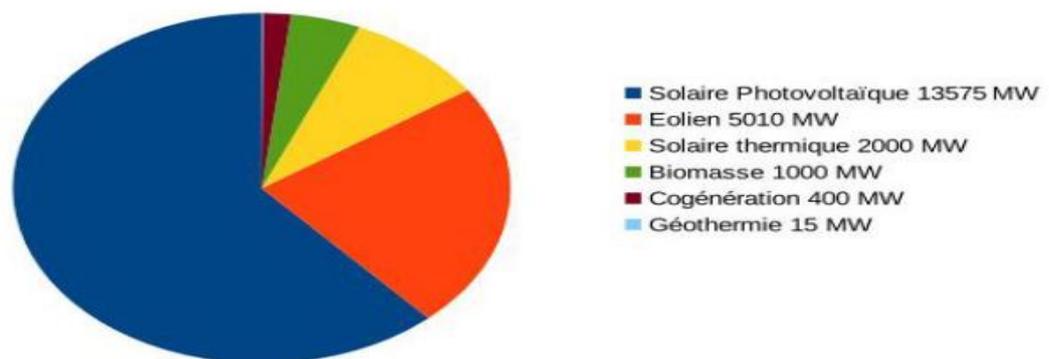


Figure I.1. Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables [6]

I.2.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Elle est transmise à la terre à travers l'espace sous forme de photons et de rayonnement électromagnétique. Elle consiste à convertir directement le rayonnement solaire en électricité. On utilise des convertisseurs photovoltaïques ou cellules photovoltaïques qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque. [7]

I.2.2.1 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10^{-6} m. sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent [8].

I.2.2.2 Le rayonnement direct

Est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre [8].

I.2.2.3 Le rayonnement diffus

Est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent ce (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques [8].

I.2.2.4 Le rayonnement solaire réfléchi

Où l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [8].

I.2.2.5 Le rayonnement global

Est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurent le rayonnement

global horizontal par un pyromètre placé horizontalement à l'endroit requis.

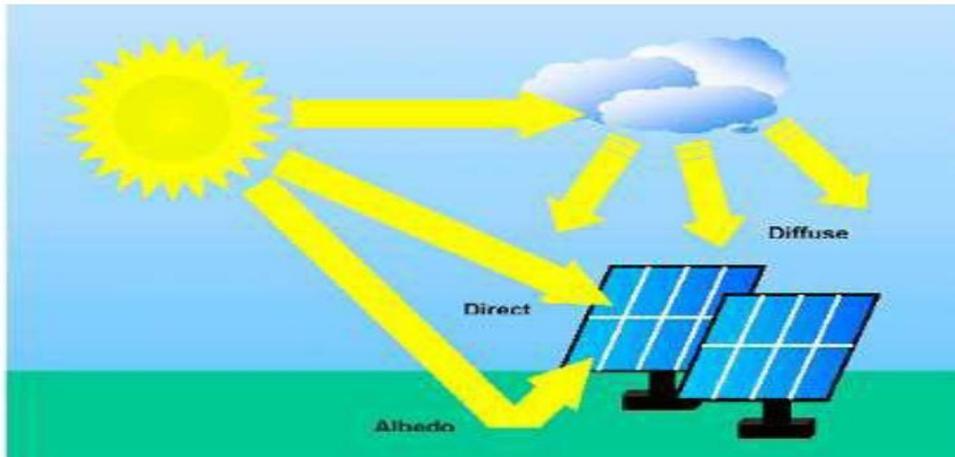


Figure .I.2.Composante du rayonnement global sur un plan horizontal [8]

I.2.2.6 Spectre du rayonnement

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi: [9]

- 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4 \mu\text{m}$),
- 47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$),
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$)

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1370 W/m^2 , à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1,2 \text{ kW/m}^2$. La rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [9].

I.3. Cellules photovoltaïques

I.3.1 Définition d'une cellule

La cellule photovoltaïque est composée d'éléments semi-conducteurs qui absorbent l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique ; donc le principe de fonctionnement fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

I.3.2 Semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées

I.3.3 La jonction P-N

Lorsque les deux zones sont mises en contact, certains électrons du semi-conducteur de type N passent vers le matériau de type P tandis que les trous du semi-conducteur de type P se déplacent au même moment dans la direction opposée. Le mouvement de ces charges majoritaires forme des paires électron-trou neutres, nous obtenons alors une région appelée jonction PN dans laquelle la conductibilité passe progressivement du type P au type N.

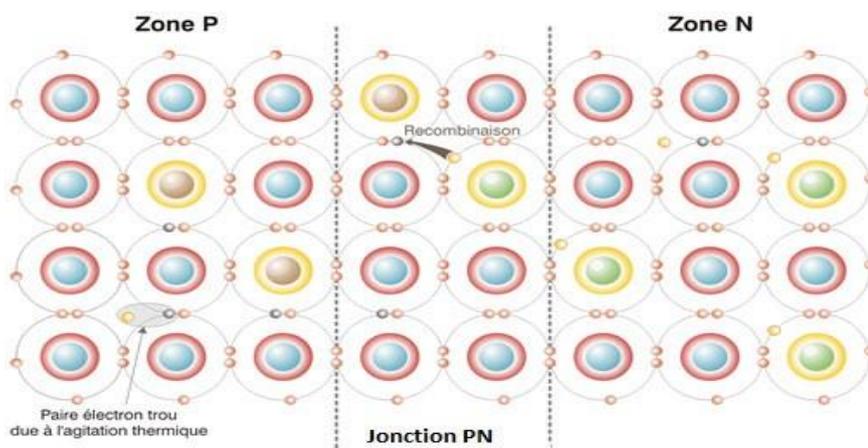


Figure I.3. Jonction PN à l'équilibre.

I.3.4 Principe de fonctionnement d'une cellule PV

Le photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs" (le plus connu est le silicium utilisé pour les composants électroniques). L'effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en 1839 par le physicien Alexandre-Edmond Becquerel. Lorsque les photons heurtent une surface mince de ces matériaux, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique. Ce courant peut être ajouté à celui provenant d'autres dispositifs semblables de façon à atteindre la puissance désirée pour un usage donné [10].

La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques. Dans la majorité des cas, la cellule photovoltaïque est en effet fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur) :

- Une couche dopée avec du Bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P). Elle est couverte d'une plaque qui joue le rôle d'anode.
- Une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N). Elle est couverte d'une plaque qui joue le rôle de cathode.

En mettant en contact ces deux plaques polarisées, on obtient une jonction PN (Positive-négative). Le fait de créer une telle jonction, fait apparaître un champ électrique interne.

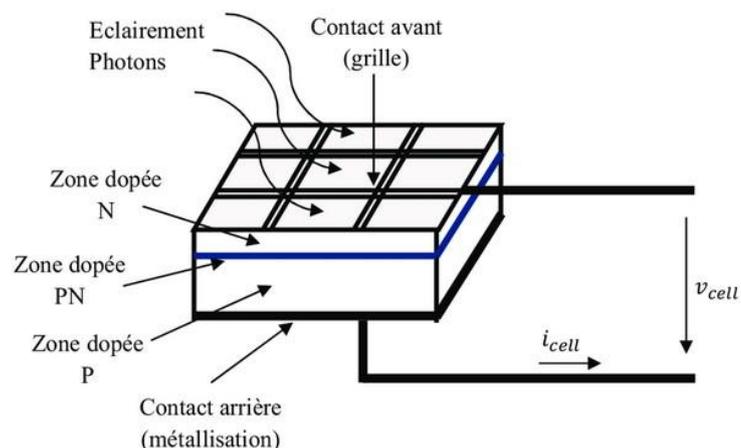


Figure I.4. La jonction PN

- ✓ i_{cell} : le courant de la cellule.
- ✓ V_{cell} : la tension de la cellule.

Éclairement photon : photon, particule élémentaire de la lumière, cette dernière est une onde électromagnétique de fréquence ν et elle est constituée par un faisceau de particules appelées photons transportant l'énergie E telle que :

$$E = h.\nu \quad (\text{I.1})$$

Où h est la constante de Planck $h = 6,63.10^{-34}$ J.s

ν est la fréquence de l'onde électromagnétique associée aux photons.

Dans une cellule photovoltaïque, lorsqu'un photon est absorbé par le semi-conducteur, il donne naissance à un électron et à un "trou". En effet, ce photon va transmettre son énergie à un électron (particule négative) qui va alors se libérer de l'attraction de son noyau et donc laisser un " trou " (chargé positivement) derrière lui. Pour obtenir un courant électrique, les charges positives (" trous ") et négatives (électrons) doivent être séparées puis attirées vers l'extérieur.

C'est à ce moment qu'intervient le champ électrique interne créé par la jonction PN : c'est lui qui va repousser les électrons dans la zone N et donc séparer les charges. Les porteurs de charges sont ensuite, collectés par l'intermédiaire d'une grille, qui fait office d'anode, à l'avant et un contact, qui fait office de cathode, à l'arrière. On obtient alors une tension continue d'environ 0,5 V entre ces électrodes [11].

I.3.5 Types de cellules photovoltaïques

Le matériau le plus répandu dans les photopiles ou cellules solaires est le silicium, semi-conducteur de type IV (tétravalent). On utilise également des matériaux composites tel que l'Arséniure de Gallium et des couches minces comme de CdTe (Tellure de Cadmium) et le CIS (Cuivre-Indium-Sélénium) et encore le CIGS.

Il existe plusieurs types de cellules solaires :

- Cellules poly cristallines
- Cellule en silicium monocristallin
- Cellule silicium amorphe en couche mince

- Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS
- Cellule multijonction
- Les cellules solaires photovoltaïques transparentes
- Cellule solaire CZTS : cuivre zinc étain soufre (innovation 2016)
- Le photovoltaïque sous concentration

I.3.5.1 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 [12]

✓ **Avantage :**

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

✓ **Inconvénients :**

- Rendement faible sous un faible éclaircissement

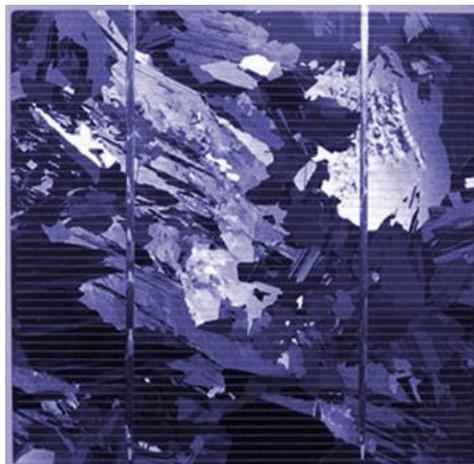


Figure I.5. Cellule en silicium poly cristallin

I.3.5.2 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 [12].

✓ **Avantage :**

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

✓ **Inconvénients :**

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

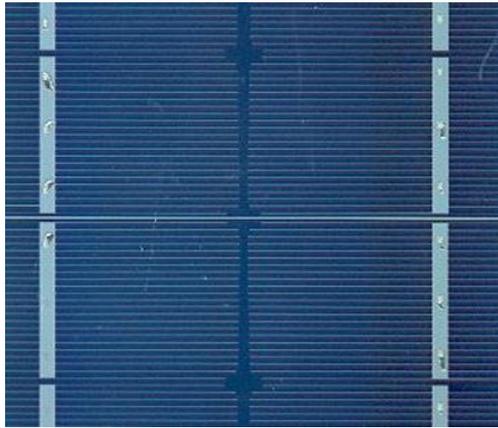


Figure I.6. Cellule en silicium monocristallin

I.3.5.3 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" [12].

✓ **Avantage :**

- 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 Wc/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

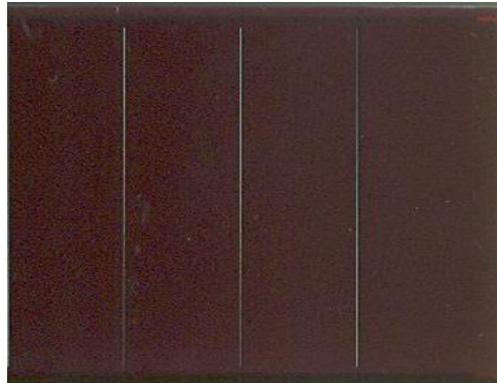


Figure I.7. Cellule silicium amorphe en couche mince

I.3.5.4 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. [12]

✓ **Avantage :**

- 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"

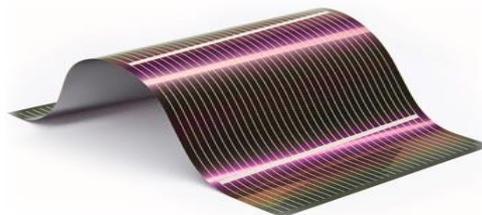


Figure I.8. Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS

I.3.5.5 Cellule multijonction

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion. [12]

- ✓ **Avantages**
 - Rendement inégalé

- ✓ **Inconvénients**
 - Pas ou peu d'applications commerciales

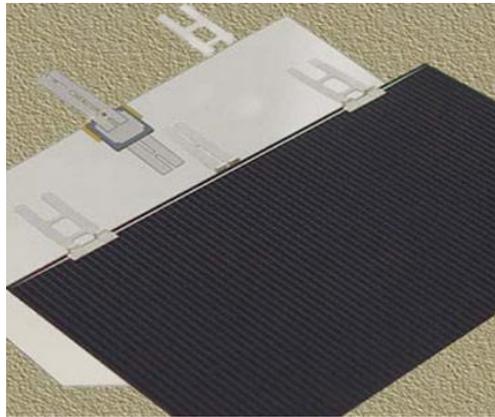


Figure I.9. Cellule multijonction

I.3.5.6 Les cellules solaires photovoltaïques transparentes

Depuis 2011 et l'apparition médiatique de WYSIPS, on entend parler de cellules solaires "**transparentes**" aux nombreuses applications : vitrage solaire, écran de téléphones portables, automobile. [12]

Plusieurs technologies sont développées dans le monde :

- L'entreprise française Sun Partner Technologies et sa cellule transparente WYSIPS.
- L'italien Escot énergie Srl avec son concept de doubles vitrages dans lesquels est injecté un gel organique permettant de capter l'énergie solaire.
- L'université du Michigan aux USA qui a présenté un prototype de cellule solaire 100% transparent.



Figure I.10. Les cellules solaires photovoltaïques transparentes

I.3.5.7 Cellule solaire CZTS : cuivre zinc étain soufre (innovation 2016)

Les cellules solaires au silicium – les plus répandues à l'heure actuelle - ont un rendement très satisfaisant : elles peuvent convertir en électricité jusqu'à 25 % de la lumière solaire. Cependant, le procédé de fabrication s'avère onéreux et ces cellules doivent être épaisses pour leur assurer une efficacité optimale - environ 0,3 millimètre.

Les cellules photovoltaïques CZTS, aussi minces qu'une pellicule de film - moins de 5 μm d'épaisseur - sont fabriquées en appliquant une mince couche de matériau contenant cuivre, zinc, étain et soufre, sur un support comme le verre ou le plastique, qui a l'avantage d'être flexible. [12]

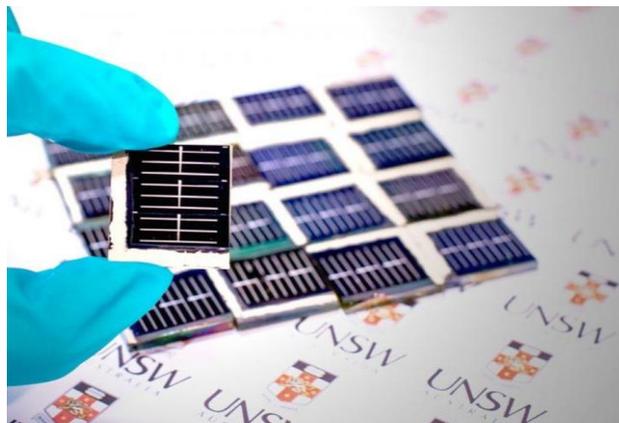


Figure I.11. Cellule solaire CZTS : cuivre zinc étain soufre (innovation 2016)

I.3.5.8 Le photovoltaïque sous concentration

Augmenter le taux de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique des installations pour en réduire les coûts, tel est le principal objectif de la recherche actuelle dans le domaine du solaire photovoltaïque. Choix des matériaux semi-conducteurs (silicium ou autre), combinaison de plusieurs technologies (hétérojonction), introduction de nanotechnologies... plusieurs axes de recherches sont étudiés. Si certains cherchent avant tout à améliorer le rendement des cellules solaires, d'autres cherchent à optimiser à tous les niveaux le captage de l'énergie lumineuse et sa conversion. Cette voie a abouti au développement du solaire photovoltaïque à concentration (CPV) dont l'objectif est de concentrer les rayons du soleil sur les cellules solaires afin d'élever la densité du flux énergétique et par conséquent la quantité d'électricité produite.

Le photovoltaïque à concentration devient très intéressant si on l'utilise à un endroit sur la planète où le DNI (Direct Normal Irradiation) est plus important (voir carte ci-dessous). [12]



Figure I.12. Le photovoltaïque sous concentration

Le tableau (I-1) donne une comparaison entre les différentes technologies de cellules photovoltaïques en termes de rendement de longévité et d'autres caractéristiques

Chapitre I

Tableau (I-1) : les différentes technologies des cellules photovoltaïques				
Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales Utilisations
Silicium monocristallin	16 à 18% (24,7% en laboratoires)	20 à 30 Ans	* Très performant * Stabilité de production d'W	Aérospatiale, modules pour toits, façades
Silicium polycristallin	13 à 15% (19,8% en laboratoires)	20 à 30 Ans	* Adapté à la production à grande échelle.	Modules pour toits, façades, générateurs
Composite monocristallin (GaAs)	(27.5% en laboratoire)		* Lourd, fissure facilement	Systems de concentrators Aérospatiale
Composite polycristallin (CdS, CdTe)	(environ 38% en laboratoire)		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices)
Amorphe	5 à 10% (13% en laboratoire)		* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel	Appareils électroniques (montres, calculatrices ...) intégration dans le bâtiment

I.3.6 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisée dans littérature est représenté par la figure (I.13).

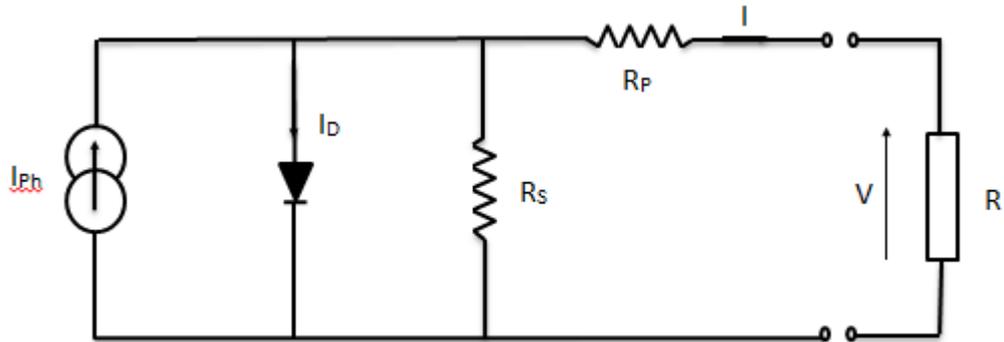


Figure I.13. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

D'après la figure (I.13), la cellule PV produit un courant de court-circuit (I_{cc}) proportionnel à l'éclairement. L'équation mathématique du courant de sortie d'une cellule PV est écrite comme suite:

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (I.2)$$

Tel que :

$$I_d = I_{sat} \left[\exp\left(\frac{V + I.R_s}{m.V_{th}}\right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{V + I.R_s}{m.V_{th}}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + I.R_s}{R_p}\right) \quad (I.4)$$

Où

- $V_{th} = \frac{m.K.T}{q}$: La tension thermique
- m : Facteur d'idéalité de la diode
- V : Tension de sortie de la cellule
- I_{ph} : Courant photo-courant
- I : Courant photo-courant
- I_{sat} : Courant de saturation de la diode
- R_s : Résistance série
- q : La charge de l'électron $1.6 \times 10^{-19}(c)$

- R_p : Résistance parallèle
- k : Constant de Boltzmann $1.38 \times 10^{-23} \text{ (J/K)}$

- La tension en circuit ouvert (V_{co}) d'une cellule PV est comprise entre 0,3V et 0,7V selon le matériau utilisé, la température et son état de vieillissement, elle est produite dans des conditions de circuit ouvert ($I_{cc} = 0$). Son courant de court-circuit (I_{cc}) varie principalement selon le niveau d'éclairement et selon les technologies et la taille des cellules. Le point de puissance maximale (PPM) est le point de fonctionnement M (V_{opt} , I_{opt}), pour lequel la puissance dissipée dans la charge est maximale.

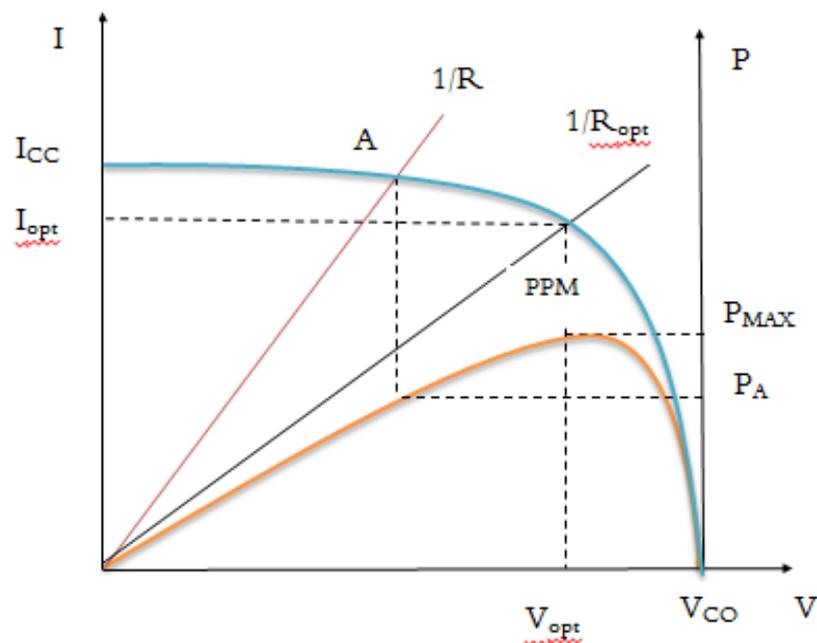


Figure I.14. Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule PV

I.3.6.1 Le courant de court-circuit (I_{cc})

C'est la plus grande valeur de courant dans lequel la tension aux bornes de la cellule est nulle. Dans le cas idéal ($R_s=0$, $R_p= \infty$), pratiquement ($I_{cc} = I_{ph}$) [13].

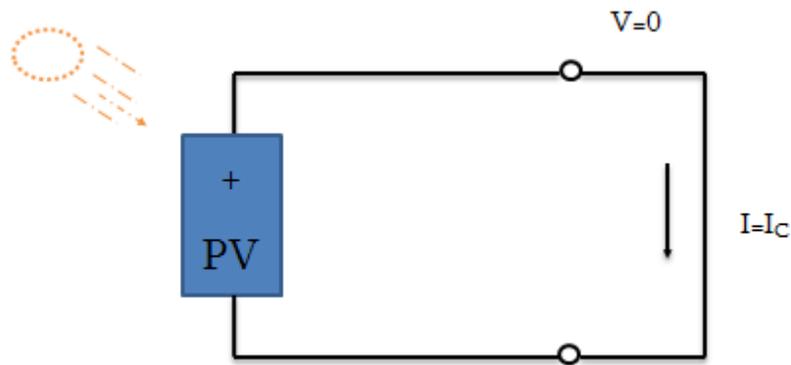


Figure I.15. Courant de court-circuit

I.3.6.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co})

C'est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule PV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV) [14]. Son expression est déduite de l'équation suivante:

$$V_{co} = V_{th} * \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}}\right) \quad (I.5)$$

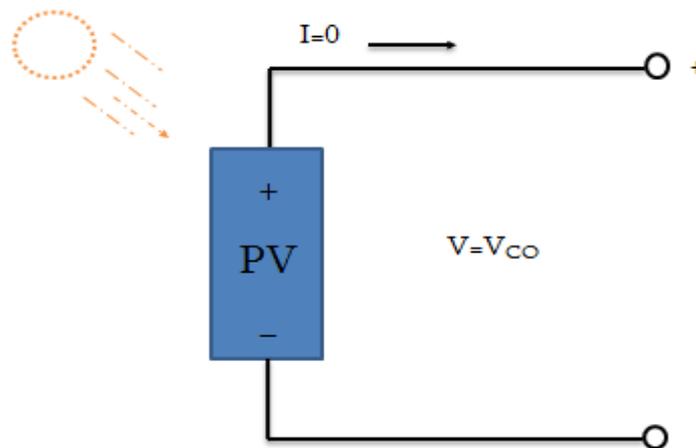


Figure I.16. Tension de circuit ouvert

I.3.6.3 La puissance maximale

C'est la puissance électrique maximale que peut fournir par le module, qui est associé à une tension maximale et à une intensité maximale. Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions standard ($G=1000\text{w}/\text{m}^2$, 25°), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête [14].

I.3.6.4 Facteur de forme FF

Le facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage ou "fill factor", C'est le rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge sur le produit de (I_{cc} , V_{co}) [15].

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (I.6)$$

Pour les cellules ayant moyen rendement, le FF des valeurs d'ordre 0.7 à 0.85. Le facteur de forme FF diminue si la température augmente.

I.3.6.5 Le rendement

C'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance de rayonnement incident sur la surface X de la cellule [15].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{cc} * V_{co} * FF}{P_{inc}} \quad (I.7)$$

I.4 Module photovoltaïque

Les modules photovoltaïques sont constitués de cellules solaires. Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium et d'autres matériaux. Pour former un module, les cellules doivent être reliées soit en série ou en parallèle ou les deux à la fois. Dans les paragraphes suivants nous étudierons ces différentes caractéristiques [16].



Figure I.17. Panneau photovoltaïque

I.4.1 Groupement en série

Chapitre I

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné. La figure (I.19) montre la caractéristique résultante (I_S , V_S) obtenue par l'association en série (indice s) de n_S cellules identiques (I_{CC} , V_{CO}) [16].

Avec :

- ✓ $I_{SCC}=I_{CC}$: le courant de court-circuit.
- ✓ $V_{SCO}=n_s \cdot V_{CO}$: la tension de circuit ouvert

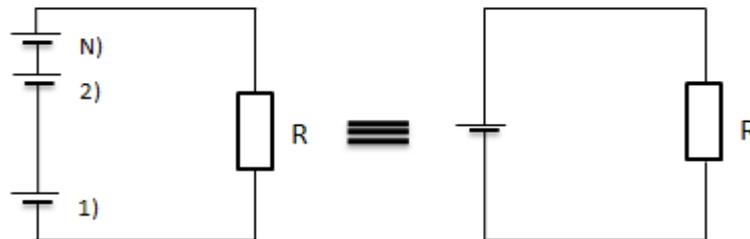


Figure I.18. Association des modules en série.

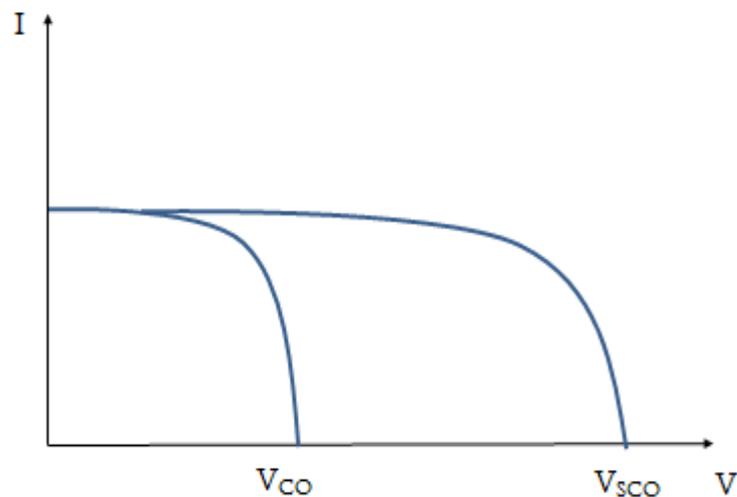


Figure I.19. Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques.

I.4.2 Groupement en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. La figure suivante montre la caractéristique résultante (I_{PCC} , V_{PCO}) obtenue en association en parallèle (indice p) n_P cellules identiques (I_{CC} , V_{CO}) [16].

- $I_{PCC} = n_P I_{CC}$: le courant de court-circuit.
- $V_{PCO} = V_{CO}$: la tension de circuit ouvert

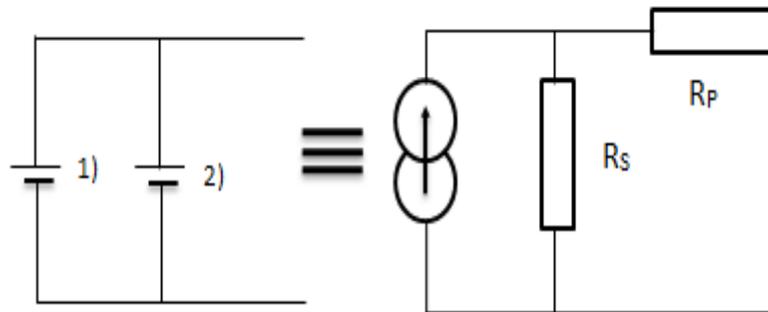


Figure I.20. Association des modules en parallèle.

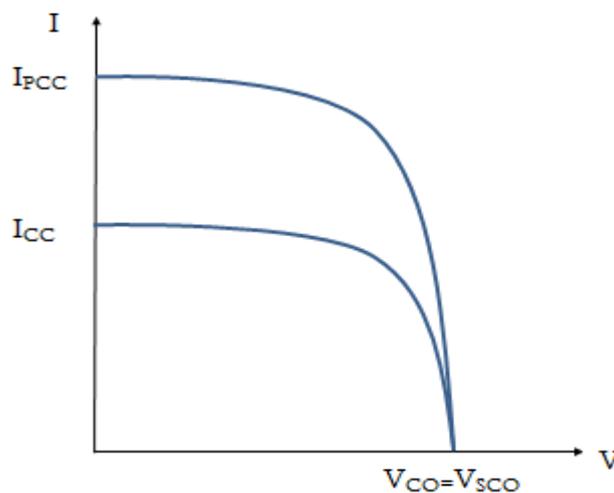


Figure I.21. Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle des cellules identiques.

I.4.3 Groupement mixte (série-parallèle)

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques. La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport n_s parallèlement à l'axe des tensions et de rapport n_p parallèlement à l'axe des courants, n_s et n_p étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle [16].

$I_{GCC} = n_P * I_{CC}$: courant de court-circuit du module résultant.

$V_{GCO} = n_s * V_{CO}$: tension du circuit ouvert du module résultant

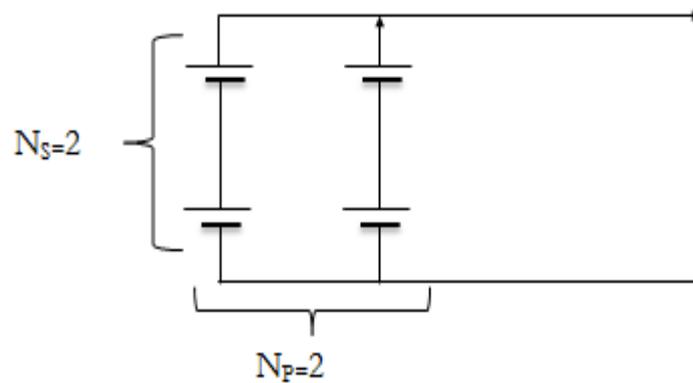


Figure I.22. Association mixte des modules

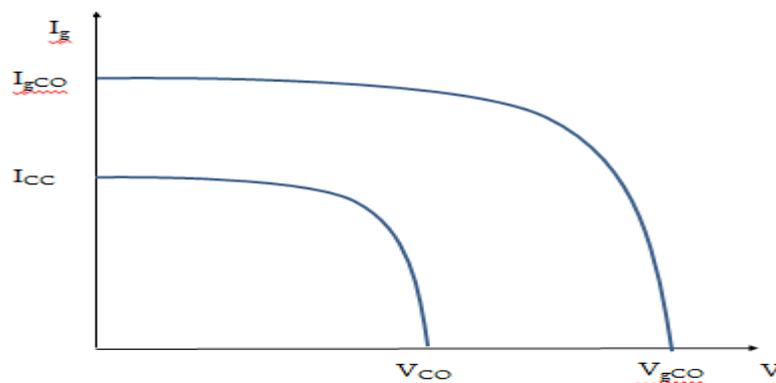


Figure I.23. Caractéristique résultante d'un groupement mixte

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (Groupement en série) ou augmenter le courant (Groupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants).

I.5. Paramètres influant sur la caractéristique I(V) et P(V)

I.5.1 Influence de l'éclairement

Les figures I.24 présente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes.

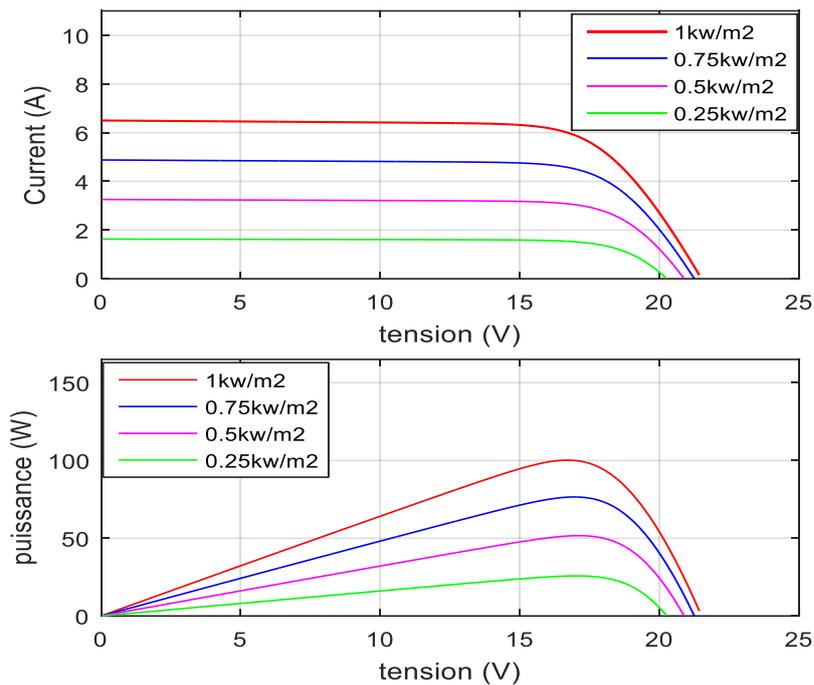


Figure I.24. Caractéristique I-V et P-V pour différents éclaircements.

I.5.2 Influence de la température

La figure I.25 présente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module PV solaire en fonction de la température, à un éclairciment constant

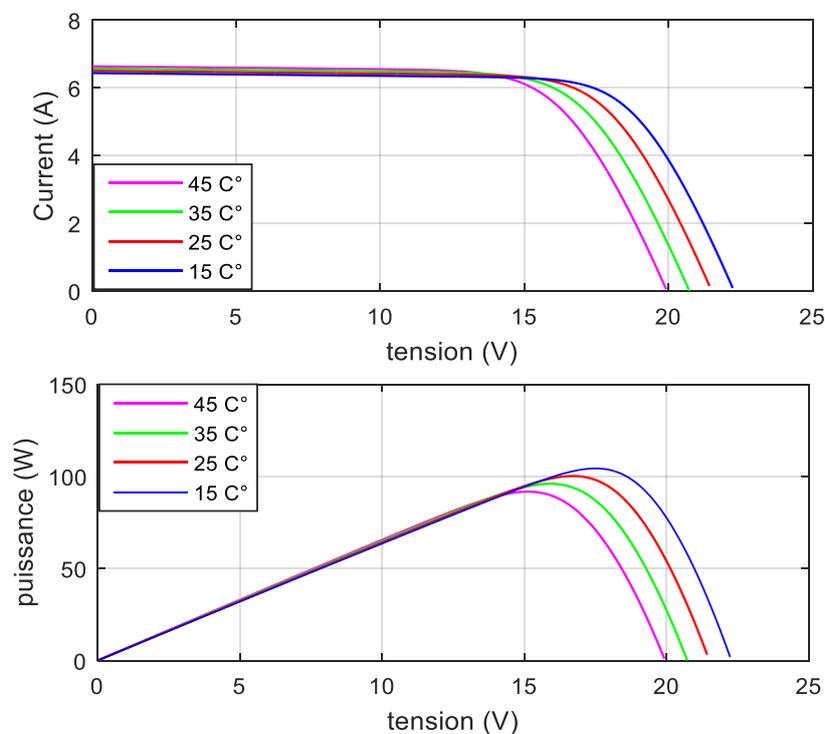


Figure I.25. Caractéristiques I-V et P-V pour différentes températures

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié le principe de l'effet photovoltaïque et présenté le modèle de la cellule solaire origine de cette conversion du rayonnement solaire en électricité. Par la suite nous avons présenté les différents types de ces cellules solaires ainsi leur modèle mathématique. Puis nous avons montré les caractéristiques électriques du module photovoltaïque. A la fin de ce chapitre une étude de l'influence de la variation de l'éclairement et de la température sur les caractéristiques électriques du module est présentée.

Le prochain chapitre sera consacré à l'étude du convertisseur DC/DC qui nous permet par sa technique de commande d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque.

Chapitre 11 : Modélisation,
simulation et expérimentation
du convertisseur Boost

II.1. Introduction

Les convertisseurs DC-DC convertissent un niveau de tension en un autre par action de commutation. Il est très populaire en raison de sa petite taille et de son efficacité par rapport aux régulateurs linéaires. Les convertisseurs DC-DC ont une très large gamme d'applications. Ils sont largement utilisés dans les ordinateurs personnels, les accessoires informatiques et les adaptateurs d'appareils électroniques pour fournir une tension continue. [17]

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'hacheur élévateur. Nous commençons par présenter sa structure, son principe de fonctionnement ainsi que le dimensionnement des composants qui le constitue. Par la suite, nous montrons les résultats de simulation de ce convertisseur boost qui est alimenté par un module photovoltaïque et commandé par l'algorithme de poursuite du point de puissance maximal. Nous terminons ce chapitre par la présentation des résultats expérimentaux.

II. 2. Convertisseur

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative. L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...). En générale on trouve deux sorte de convertisseurs dans une installation PV, le hacheur et l'onduleur qui ont pour rôle d'extraire la puissance maximale du générateur PV et la convertir en puissance alternative avant de la consommer. [18]

II .3. Les convertisseurs DC/DC (Hacheurs)

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, où pour alimenter une charge continue. Il se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ont un bon rendement, ils ne consomment aucune puissance active. Les hacheurs sont des convertisseurs continu qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation. [19]

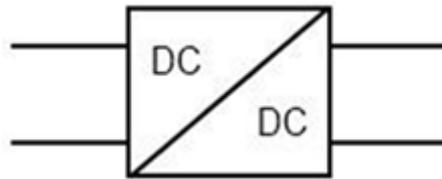


Figure II.1. Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.3.1 Les différents types d'hacheurs

Selon la position du commutateur d'hacheur ; différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés à savoir :

- hacheur abaisseur (ou Buck),
- hacheur élévateur (ou boost),
- hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost)

II.3.2 Hacheur survolteur (Boost)

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [20]

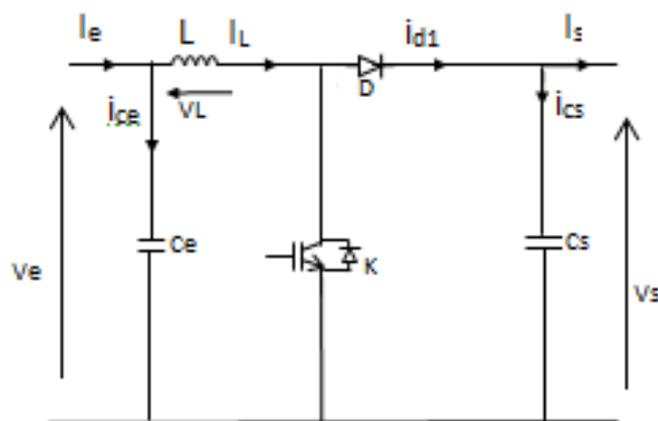


Figure II.2. Schéma électrique d'un hacheur boost

II.3.2.1 Fonctionnement

- ✓ α : Rapport cyclique

Chapitre 11

✓ $T = \frac{1}{f_e}$

✓ f_e : Fréquence de commutation

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée $[0, \alpha T]$ αT le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps $t \in [\alpha T, T]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors $V_K = V_S$ En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à $V_S = (1 - \alpha) = V_e$ [21]

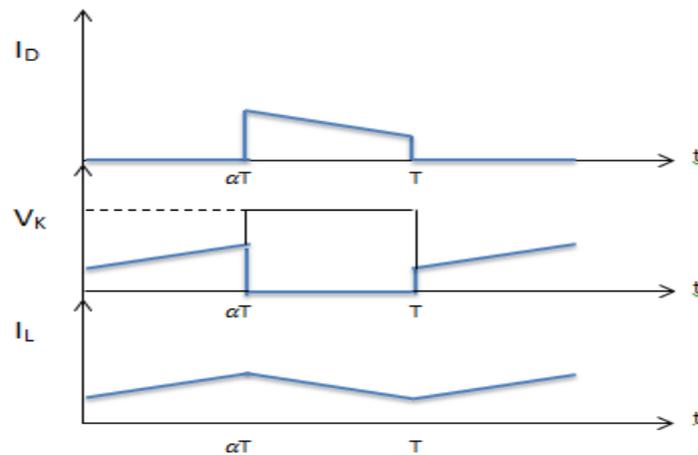


Figure II.3. Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

Pour étudier ce schéma nous devons faire la représentation du circuit équivalent pour les deux états du commutateur (ouvert et fermé) et de tirer par la suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. [22]

Lorsque l'interrupteur est fermé pendant une durée $\alpha.T$, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes K est nulle.

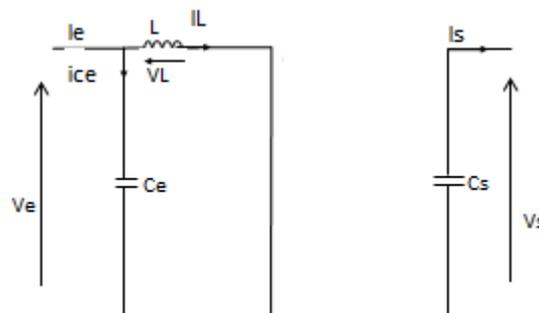


Figure II.4. Schéma électrique d'un hacheur boost (interrupteur fermé)

Pour étudier le fonctionnement du hacheur Boost dans l'intervalle $[0, \alpha.T_s]$, on applique les lois de Kirchhoff. Donc, on peut déduire les équations suivantes :

Chapitre 11

$$I_L(t) = I_{min} + \frac{V_e(t)}{L} \quad (II.1)$$

$$V_e(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (II.2)$$

Avec I_{min} la valeur minimale du courant dans l'inductance.

Al 'instant $t = \alpha T$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{max}

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (II.3)$$

Cependant lorsqu'on ouvre l'interrupteur à une durée $(1-\alpha).T$, l'énergie emmagasinée dans la bobine se dissipe et commande la circulation du courant dans la diode de Roue libre D .La figure II.5 illustre ce fonctionnement:

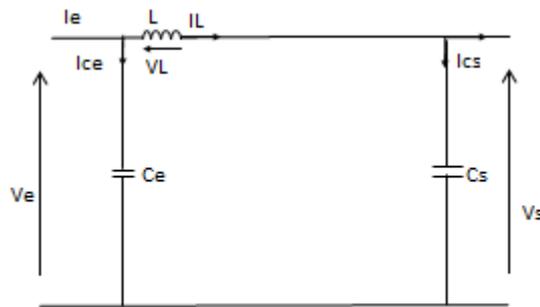


Figure II.5. Schéma électrique d'un hacheur boost (Interrupteur ouvert)

$$I_L = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T) \quad (II.4)$$

$$V_e - V_s = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (II.5)$$

Al 'instant $t = T$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{min}

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T \quad (II.6)$$

Soit $\Delta i_L = I_{max} - I_{min}$ l'ondulation du courant dans l'inductance.

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations(II.3) et (II.6), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sorties V_s :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad (II.7)$$

Chapitre 11

On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique α , le convertisseur est toujours élévateur de tension.

On notera que la tension de sortie est théoriquement indépendante de la charge. Dans la pratique, la boucle de régulation ne devra donc compenser que les variations de la tension d'entrée et les imperfections des composants réels.

La stratégie de régulation qui semble la plus évidente est la modulation de largeur d'impulsion (MLI) à fréquence fixe et rapport cyclique α variable.

Courant moyen d'entrée Tous les éléments étant supposés parfaits, le rendement théorique de ce convertisseur est égal à 1. On peut donc écrire:

$$V_s I_s = V_e I_e \quad (\text{II.8})$$

En combinant avec l'équation (II.7), on établit l'expression du courant d'entrée:

$$I_e = \frac{I_s}{1-\alpha} \quad (\text{II.9})$$

Limite de fonctionnement en conduction continue Lorsque le courant de sortie I_S diminue, par exemple par augmentation de la résistance R , le circuit peut passer en conduction discontinue (le courant s'annule au cours de la période). [22]

On montre que l'expression de la tension de sortie s'écrit alors:

$$V_s = V_e \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{RT}{2L} \alpha^2} \right) \quad (\text{II.10})$$

On remarque la tension de sortie n'est plus indépendante de la charge et de la fréquence .Il est donc important de connaître la limite de fonctionnement en conduction continue.

La valeur moyenne du courant traversant la diode (donc transitant vers la charge durant la phase 2) est égale au courant de sortie I_S .

$$I_S = \frac{1}{T} \int_0^T I_D dt = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T \left[I_M - \frac{(V_s - V_e)}{L} (t - \alpha T) \right] dt \quad (\text{II.11})$$

La limite de conduction continue étant atteinte pour $I_m = 0$, on tire de l'équation(II.3) :

$$I_{Max} = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (\text{II.12})$$

En portant cette expression dans l'équation précédente, on détermine l'expression de la valeur minimale du courant de sortie permettant de rester en conduction continue

$$I_{S \min} = \frac{(1-\alpha)\Delta I}{2} \quad (\text{II.13})$$

II.3.2.2 DIMENSIONNEMENT DES COMPOSANTS ACTIFS

Afin de pouvoir dimensionner correctement les composants et notamment les semi-conducteurs, il est nécessaire de connaître les valeurs maximales (dans les conditions de fonctionnement les plus sévères) des tensions et des courants. [22]

Rappelons que le calcul des pertes de conduction dans les semi-conducteurs nécessite la connaissance des valeurs crête, moyenne et efficace du courant qui les traverse.

II.3.2.2.1 Courant dans l'interrupteur K

Le courant crête I_M dans l'interrupteur K est atteint à $t = \alpha T$. Il est plus intéressant de l'exprimer en fonction des grandeurs d'entrée ou de sortie. [22]

La valeur moyenne du courant dans l'inductance L étant égale au courant d'entrée I_e , on peut écrire :

$$\hat{I}_k = I_M = I_e + \frac{\Delta I}{2} = \frac{I_s}{(1-\alpha)} + \frac{\Delta I}{2} \quad (\text{II.14})$$

La valeur moyenne s'écrit:

$$I_{kmoy} = \alpha I_e = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_s \quad (\text{II.15})$$

On démontre que la valeur efficace s'écrit:

$$I_{keff} = I_e \sqrt{\alpha \left(1 + \frac{1}{12} \left(\frac{\Delta I}{I_e} \right)^2 \right)} \quad (\text{II.16})$$

Cette expression est en fait peu différente de :

$$I_{keff} = I_e \sqrt{\alpha} \quad (\text{II.17})$$

II.3.2.2.2 Tension maximale aux bornes de l'interrupteur K

Durant la phase 2, lorsque la diode D conduit, l'interrupteur K est soumis à la tension de sortie V_s .

$$V_{kmax} = V_s \quad (\text{II.18})$$

II.3.2.2.3 Courant dans la diode D

La courante crête dans la diode est identique à celui traversant l'interrupteur K. L'intégralité du courant transitant de la source vers la charge traverse la diode D. [22]

La valeur moyenne du courant dans la diode est donc égale au courant de sortie:

$$I_{Dmoy} = I_s \quad (\text{II.19})$$

On adoptera pour la valeur efficace du courant dans la diode la valeur approchée:

$$I_{Deff} = I_e \sqrt{1 - \alpha} = \frac{I_s}{\sqrt{1 - \alpha}} \quad (\text{II.20})$$

II.3.2.2.4 Tension maximale aux bornes de la diode D

Durant la phase 1, lorsque l'interrupteur K conduit, la diode est soumise à la tension de sortie V_s .

$$V_{Dmax} = V_s \quad (\text{II.21})$$

II.3.2.2.5 Calcul de la valeur du condensateur de sortie

Durant la phase 1 qui dure αT , le condensateur fournit seul l'énergie à la charge. Le courant de sortie étant supposé constant, on peut calculer la charge fournie par le condensateur :

$$\Delta Q = I_s \alpha T \quad (\text{II.22})$$

Si l'on admet une ondulation ΔV_s de la tension de sortie, on peut écrire:

$$\Delta Q = C \Delta V_s \quad (\text{II.23})$$

On en déduit la capacité du condensateur de sortie:

$$C = \frac{I_s \alpha T}{\Delta V_s} \quad (\text{II.24})$$

Dans la pratique, il faut également tenir compte de la résistance série équivalente ESR du condensateur.

La courante crête dans le condensateur est égal à $IM - IS$, d'où :

$$\hat{I}_{Cs} \alpha = \frac{\alpha I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta I}{2} \quad (\text{II.25})$$

Ce qui entraîne une ondulation supplémentaire de la tension de sortie que l'on peut écrire:

$$\Delta \hat{V} = ESR \cdot \hat{I}_{Cs} = ESR \cdot \left(\frac{\alpha I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta I}{2} \right) \quad (\text{II.26})$$

II.3.2.2.6 Valeur de l'inductance

Nous avons établi la relation:

$$\Delta I = IM - Im = \frac{V_e \alpha T}{L} \quad (\text{II.27})$$

On en tire la valeur de l'inductance

$$L = \frac{\alpha V_e}{F \Delta I} \quad (\text{II.28})$$

II .4. Commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}). L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC –DC comme représenté sur la Figure II.11. [23]

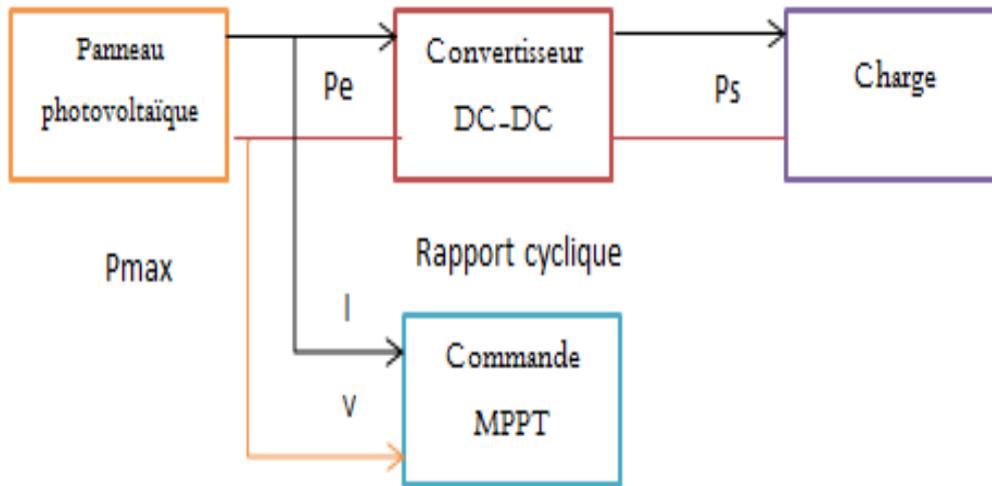


Figure II.6. Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

II.4.1 Algorithme perturbation et observation

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (II.7), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du point de puissance maximal (PPM).

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande. [24]

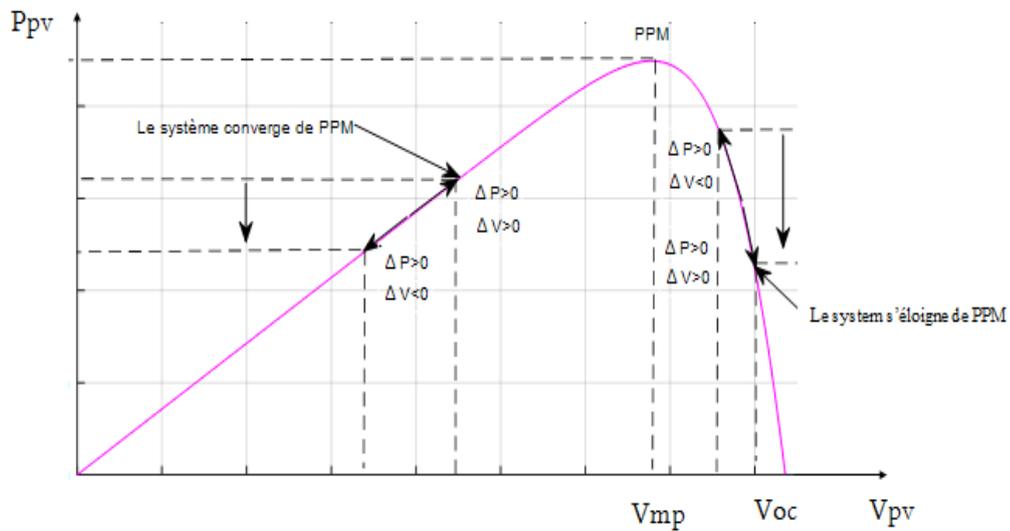


Figure II.7. Schéma de convergence vers le PPM par P&O

La figure (II.8) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du G_{PV}) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

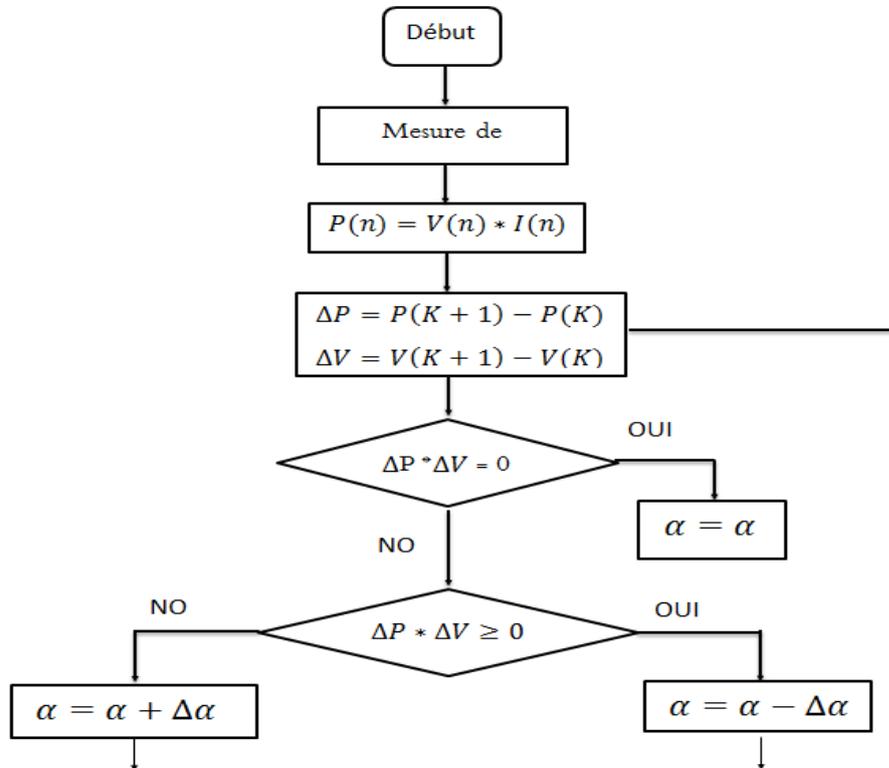


Figure II.8. Organigramme de l'algorithme perturbation et

Observation

A cause de la facilité de son implémentation, la méthode P&O est fréquemment utilisée malgré qu'elle présente des problèmes d'oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM. En plus, et pour des variations brusques des conditions climatiques ou/et de la charge, cette méthode présente parfois des erreurs d'interprétation dans la direction qu'il faut suivre pour atteindre le PPM. [25]

II .5. Simulation du system photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT

La figure II.9 présente un convertisseur Boost alimenté par module photovoltaïque. L'algorithme MPPT présenté précédemment est appliqué à la commande du Boost qui alimente une charge R.

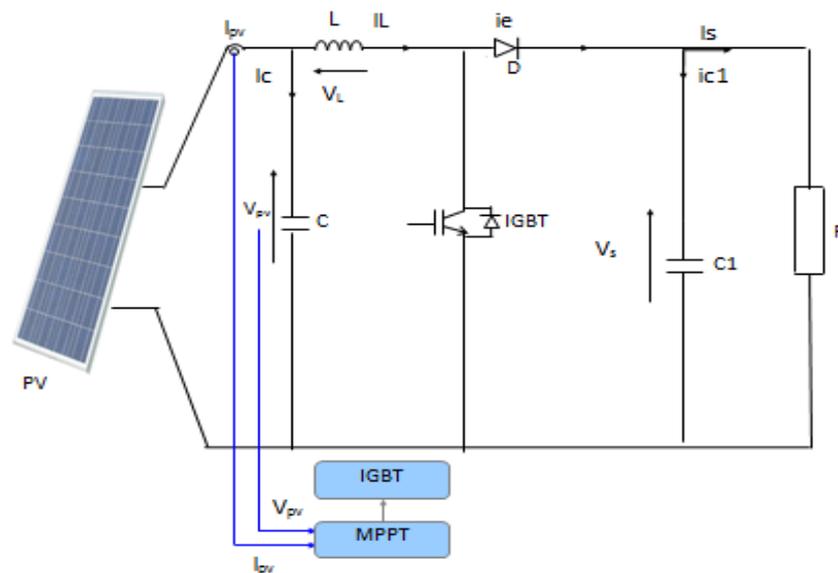


Figure II.9. Module PV- hacheur boost- Charge R

Les caractéristique I(V) et P(V) du module photovoltaïque utilisé sont présenté par les figures II.10. (a) et (b). Comme le montre la figure II.10.(b), la puissance maximum est de 225W .

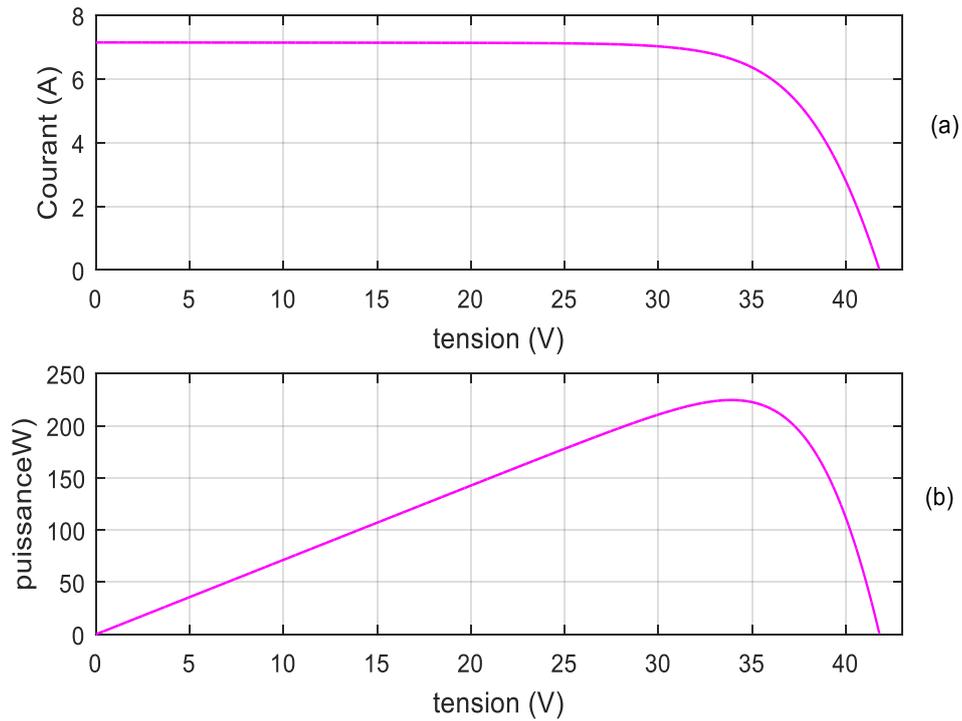


Figure II.10 .Caractéristiques I(V)- P(V) de module

La figure II.11 présente les résultats obtenus sous les conditions suivantes :

- Rayonnement solaire variable [1000 700] W/m². (Fig. II.11.a)
- Température 25°C
- Fréquence de commutation $f_e = 3000$ Hz
- Condensateurs d'entrée et de sortie $C = 100\mu\text{F}$, $C_1 = 500\mu\text{F}$
- Charge $R = 50\Omega$

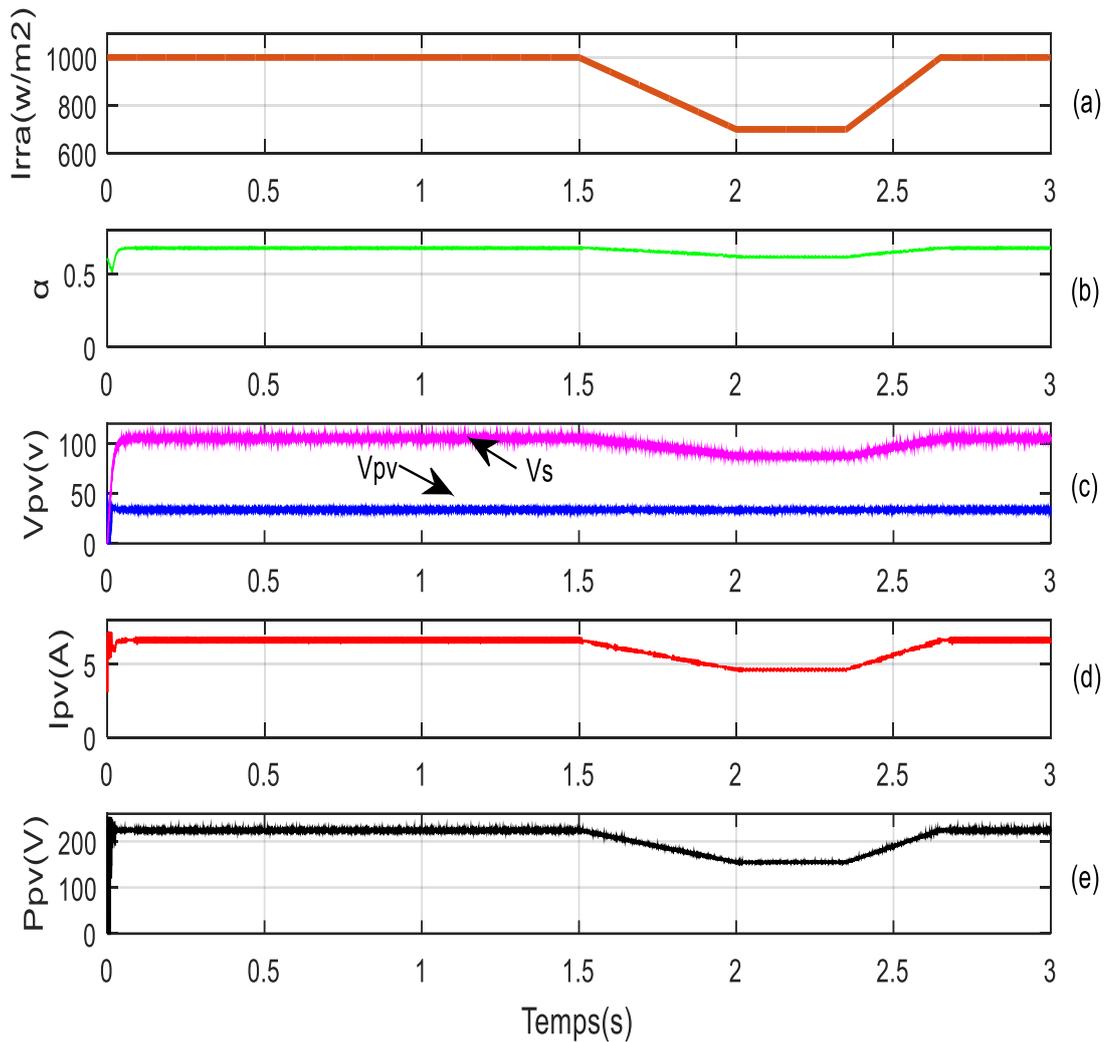


Figure II.11 L'ensemble des courbes α , et V_{PV} , I_{PV} , P_{PV} de module pour Rayonnement solaire variable [1000 700] W/m².

Sur la figure (II.11.a), on remarque que le rayonnement est fixé à 1000w/m² de t=0 à t=1.5s puis diminue à 700 de t=2s à t=2.4s puis revient à 1000w/m².

La figure(II.11.b) montre un courbe d'un rapport cyclique. Il est à noter que α vari avec le rayonnement solaire dans le but d'extraire le maximum de puissance du générateur PV (Fig. II.11.e) a tout moment.

La figure(II.11.c) représente la tension du panneau PV et la tension sortie V_s . Nous remarquons la tension V_{pv} n'est pas affectée par le rayonnement solaire. Aussi, il y a une augmentation de la tension sortie V_s . Ces résultats montrent que le convertisseur boost

remplit correctement son rôle.

La Figure (II.11.d et e) montre le courant et la puissance du panneau PV. Il est à noter que I_{pv} est affecté par le rayonnement solaire. A son tour la puissance P_{pv} est affectée par le courant I_{pv} .

II .6. La partie expérimentale

Le banc d'essai expérimental est illustré par la figure II.12. Il est composé des éléments suivants :

- ❖ Module PV (1)
- ❖ Deux ordinateurs (2) et (10)
- ❖ Unité d'acquisition (3)
- ❖ Carte Capteur (4)
- ❖ Hacheur Boost (5)
- ❖ Carte d'interface (6)
- ❖ Arduino MEGA (7)
- ❖ Charge R (8)
- ❖ Oscilloscope (9)

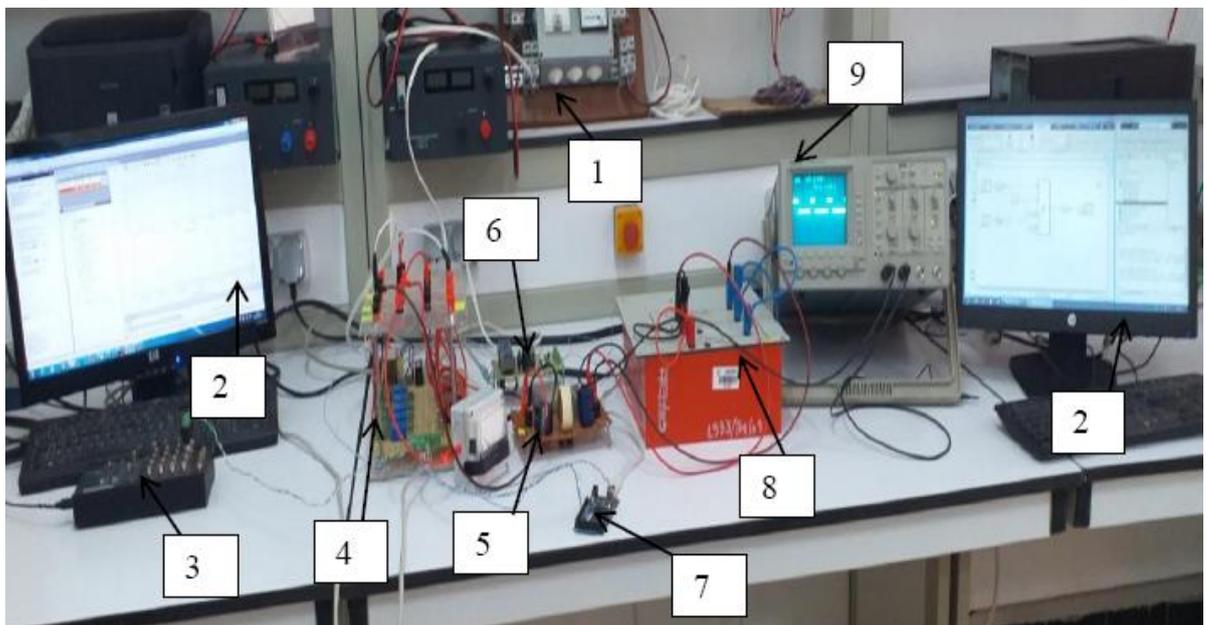


Figure II.12. Montage expérimental

II.6.1. Micro-ordinateur associé à la carte arduino Mega

Dans le premier ordinateur (10) présenté par la figure II.13, l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale est implémenté par l'intermédiaire d'une carte arduino Mega illustré par la figure II.14.

L'Arduino est un circuit imprimé en matériel libre sur lequel se trouve un microcontrôleur qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses. L'Arduino Mega est le modèle le plus perfectionné et puissant de la célèbre carte électronique. Elle permet d'effectuer un maximum d'actions et délivre un potentiel tel, qu'il est possible de se pencher sur les montages les plus lourds et gourmands en code. Cette carte peut être utilisée par les amateurs confirmés, mais est principalement destinée aux experts qui pourront en faire un usage plus professionnel.

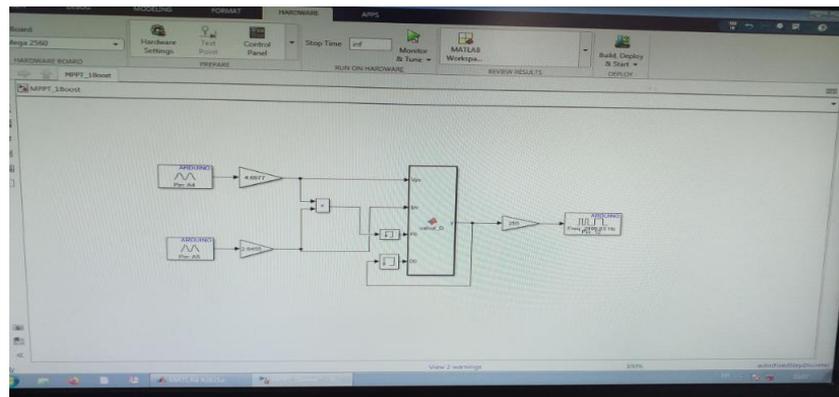


Figure II.13. Algorithme MPPT sous Matlab Simulink

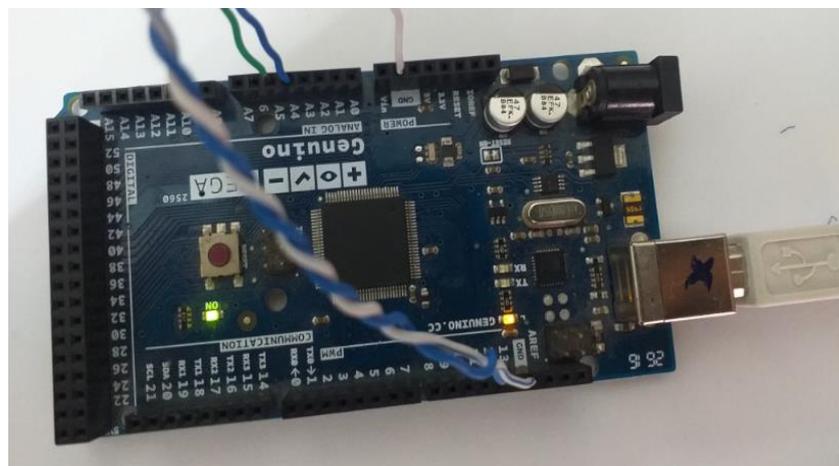


Figure II.14. Photo réelle d'Arduino MEGA

II.6.2. Unité d'acquisition

L'unité d'acquisition « Data Translation DT9826 » est présentée par la figure II.15. Ce périphérique d'acquisition de données USB synchrone (DAQ) est composé de 16 entrées analogiques de résolution 24 bits avec une fréquence d'échantillonnage jusqu'à 41,6 kéch/s par canal et de 16 E/S numériques, deux compteurs 32 bits et un tachymètre [26]. A cette unité est associé le logiciel présenté par la figure II.16.



Figure II.15. Unité d'acquisition

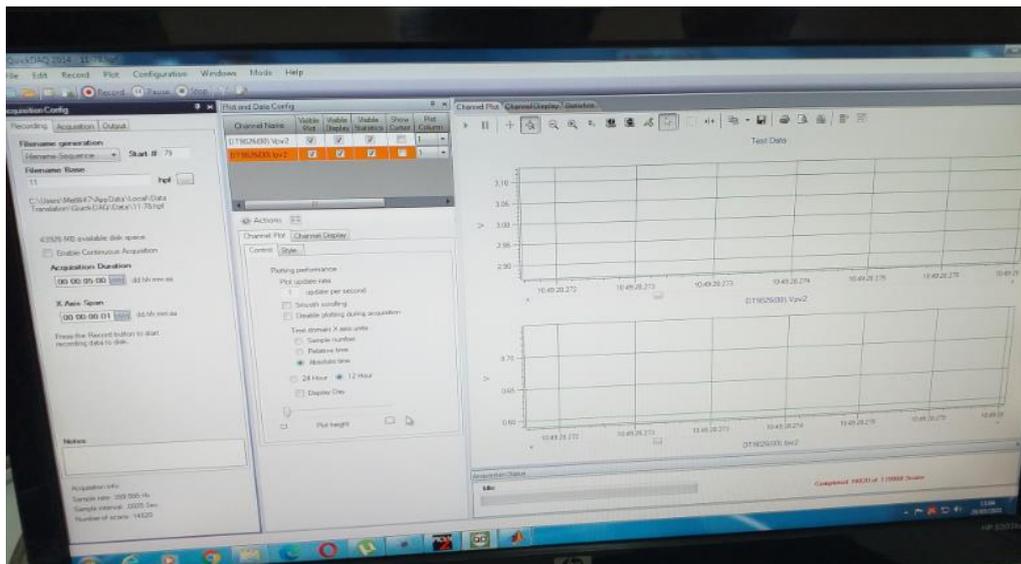


Figure II.16. Logiciel de l'unité d'acquisition

II.6.3. Carte Capteur

Cette carte permet de réduire les grandeurs physiques des courants et tensions et de les adapter à la carte de commande. Cette carte est illustrée par la figure II.17.

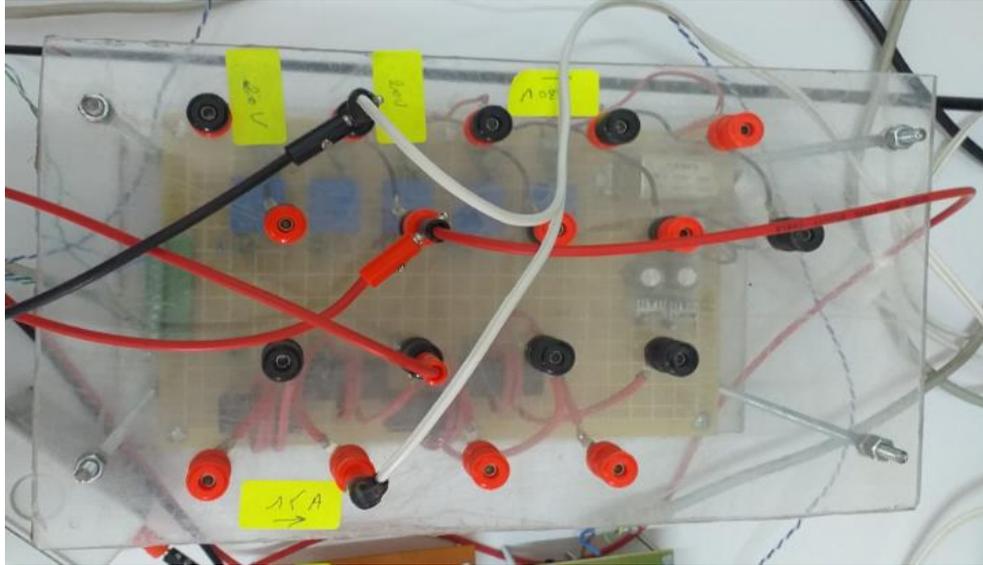


Figure II.17. Photo réelle de Carte Capteur

II.6.4. Carte d'interface

Cette carte permet d'amplifier la tension de sortie de la carte de commande arduino de la tension de 5V à 15V pour l'adapter à la gâchette du transistor MOSFET. Cette carte d'interface est représentée par la figure II.18

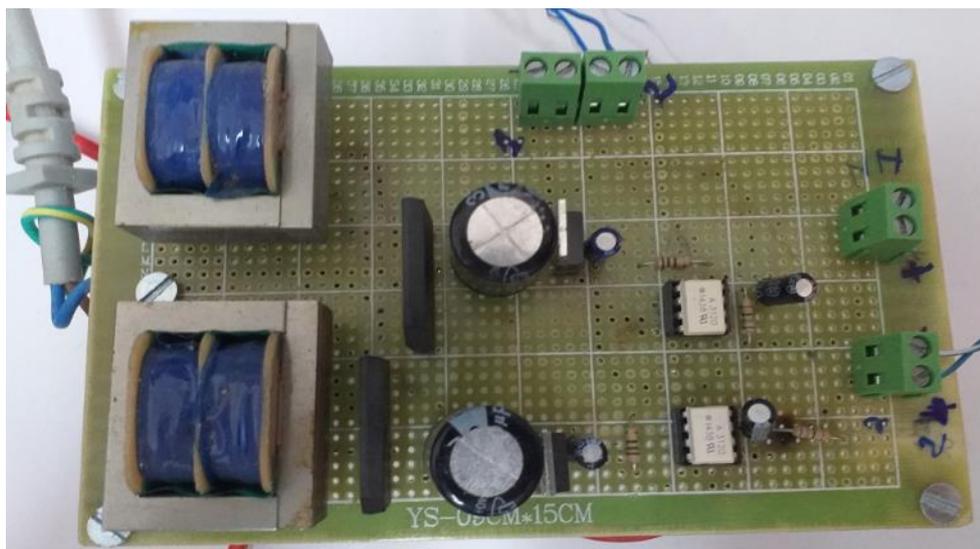
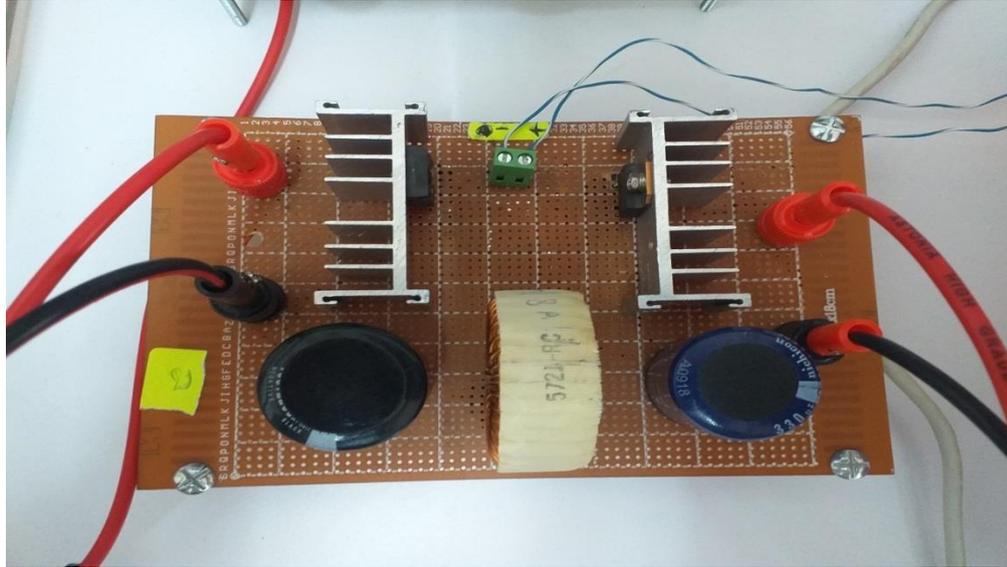


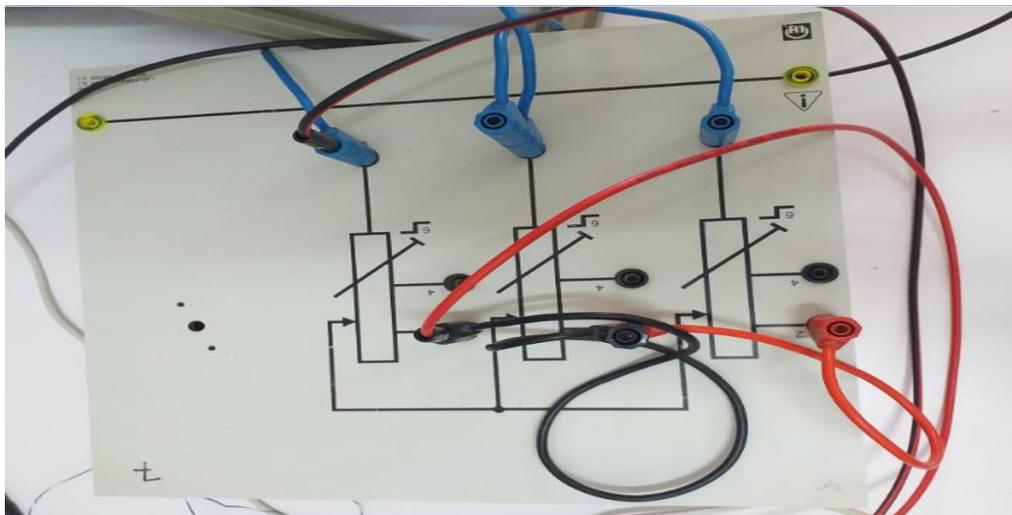
Figure II.18. Photo réelle de Carte d'interface

II.6.5. Partie puissance de l'hacheur boost et la charge R

Les figures II.19 et II.20 présentent respectivement la partie puissance de l'hacheur boost ainsi que la charge résistive R utilisée.



La figure II.19. Partie puissance de l'hacheur boost



La figure II.20. Charge R

II.6.6. Oscilloscope

La figure II.21 Présente l'oscilloscope utilisé pour la visualisation des résultats.

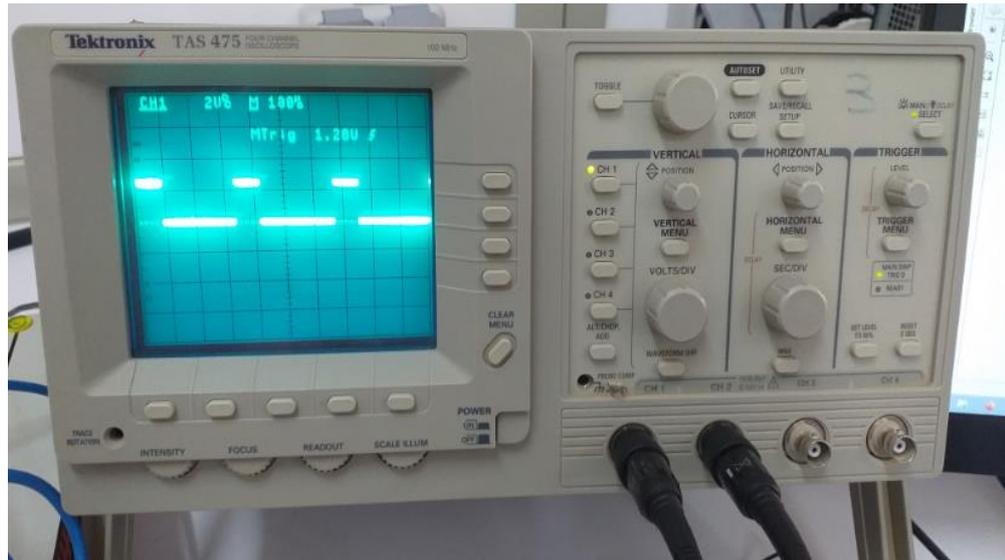


Figure II.21. Oscilloscope

II.6.7. Résultats expérimentaux

La figure II.22 présente la tension, le courant ainsi que la puissance du module photovoltaïque. On remarque que la tension diminue pour atteindre le V_{ppm} et le courant augmente pour atteindre à son tour le I_{ppm} . Quand a la puissance, elle augmente puis atteint son maximum P_{ppm} . Le rapport cyclique α après le régime transitoire et illustré par la figure II.23.

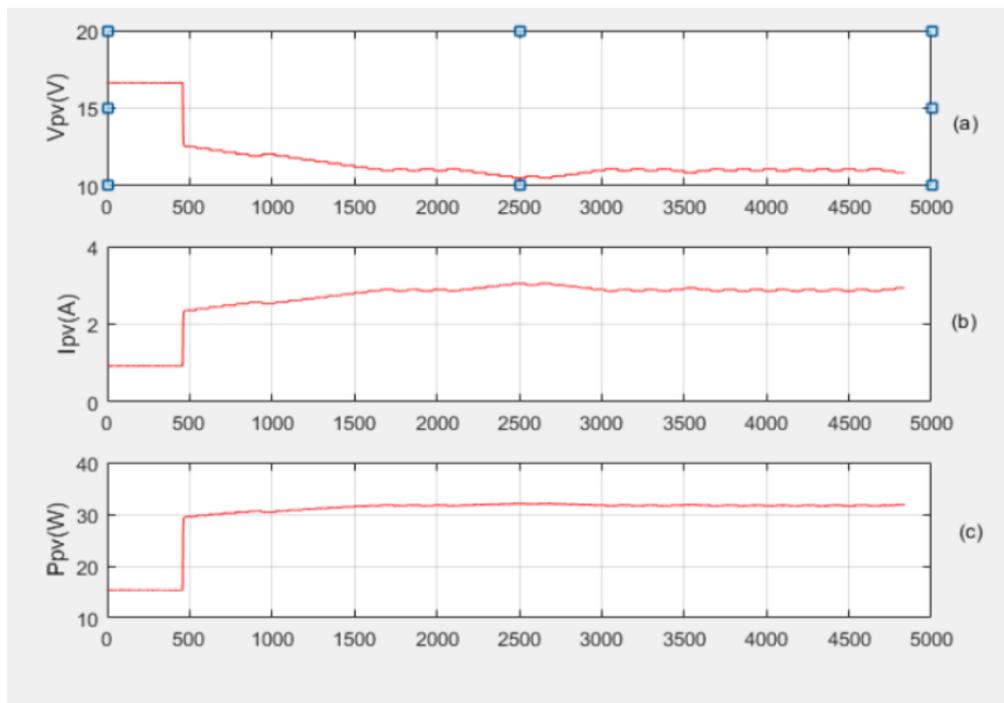


Fig.II.22. Résultat de test pratique de tension, courant et puissance de module PV

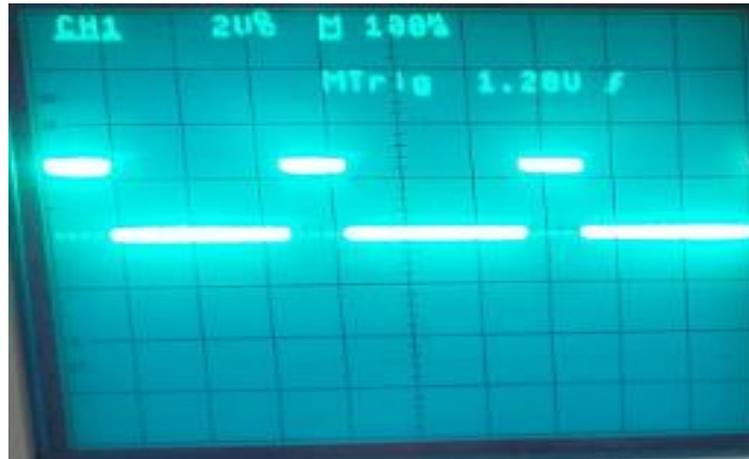


Figure II.23. Rapport cyclique

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure, le principe de fonctionnement ainsi que le dimensionnement des composants du hacheur boost. Les résultats de simulation ont montrés l'efficacité de l'algorithme de commande qui a permis d'extraire le maximum de puissance du module photovoltaïque. De même, les résultats expérimentaux présentés à la fin du chapitre montrent que la puissance augmente jusqu'à atteindre son maximum.

Le prochain chapitre est consacré au deuxième étage de la cascade de conversion photovoltaïque réalisé qui est l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade.

Chapitre III : Modélisation,
simulation et expérimentation
de l'onduleur monophasé à
cinq niveaux à structure
cascade

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier un type d'onduleur très utilisé dans les applications des énergies renouvelables, il s'agit de l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade. Nous commençons par présenter sa structure ainsi que la stratégie de commande sinus triangle qui nous permet d'avoir une tension de sortie à cinq paliers. Par la suite les résultats de simulation de cette stratégie de commande sont montrés. Nous terminant ce chapitre par une présentation des résultats expérimentaux.

III.2. Onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. La Figure III.1 représente le schéma de principe de l'onduleur. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande par Modulation de Largeur d'Impulsions (Pulse Width Modulation). [27]

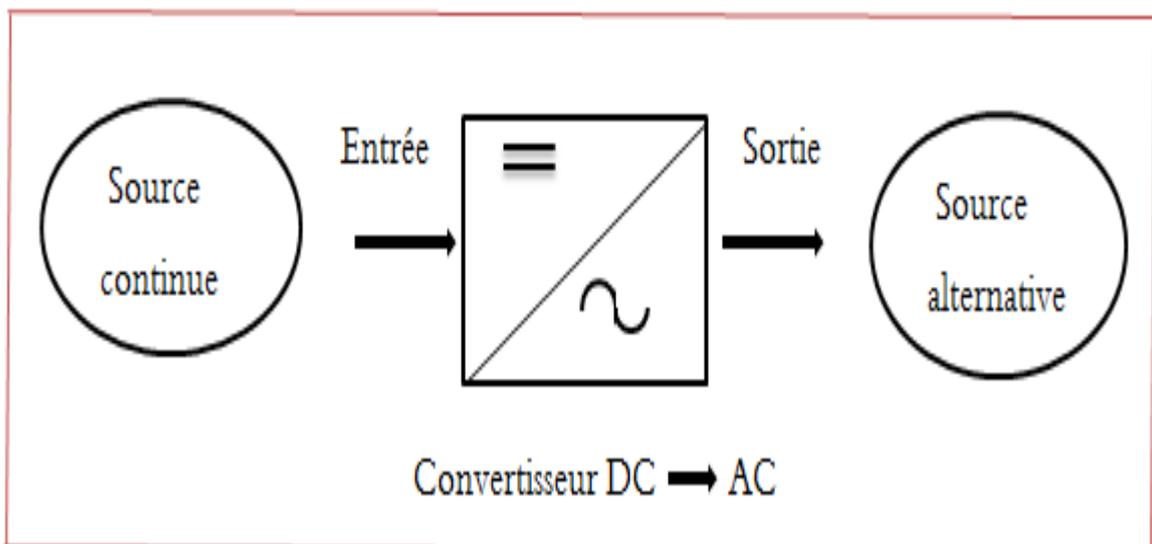


Figure III.1 .Schéma de principe de la conversion Continu -Alternative (DC –AC)

III.2.1. Principe de fonctionnement

Chapitre III

Un onduleur Monophasé classique est composé de de quatre Transistor (S1. S2. S3 .S4) La source est un générateur de tension E et charge R (figure III.2).

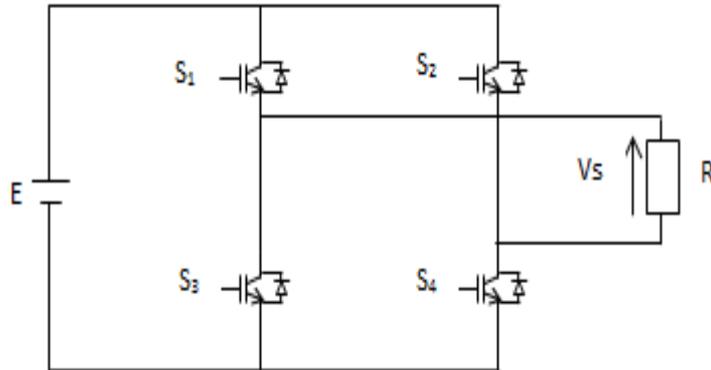


Figure III.2. Onduleur Monophasé

Si nous considérons S1, S2, S3,S4 comme des variables logiques, nous obtenons les résultats indiqués dans le tableau (III -1) suivant:

Tableau (III -1) les configurations possibles					
Cas	Transistor S1	Transistor S2	Transistor S3	Transistor S4	Tension Vs
Cas1	Bloqué	saturé	saturé	Bloqué	$V_s = -E$
Cas2	Saturé	bloqué	bloqué	Saturé	$V_s = E$
Cas3	Saturé	saturé	bloqué	Bloqué	$V_s = 0$
Cas4	Bloqué	bloqué	Saturé	Saturé	$V_s = 0$

III.2.2. Les différents types d'onduleur

Les onduleurs sont classés en deux grandes catégories :

III.2.2.1. Onduleur autonome

C'est un système qui nécessite des composants de commandes à la fois à la fermeture et l'ouverture. de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes. La charge est quelconque cet onduleur n'est pas réversible [28]

On distingue deux types d'onduleurs autonomes

- Onduleur de courant
- Onduleur de tension

III.2.2.2. Onduleur non autonome

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est «naturelle » contrairement à l'onduleur autonome [2].L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables. [28]

III.2.3. Onduleur multi-niveaux

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension de bus continu que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi-niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. Alors l'amplitude des raies harmoniques est par conséquent moins élevée. Dans le cas de modulation de largeur d'impulsion, le recours à un convertisseur multi-niveaux associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques. En général, les onduleurs de tension multi-niveaux peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux de tension discrets. [29] La figure III.3 présente les trois topologies principales des onduleurs multi-niveaux les plus récentes.

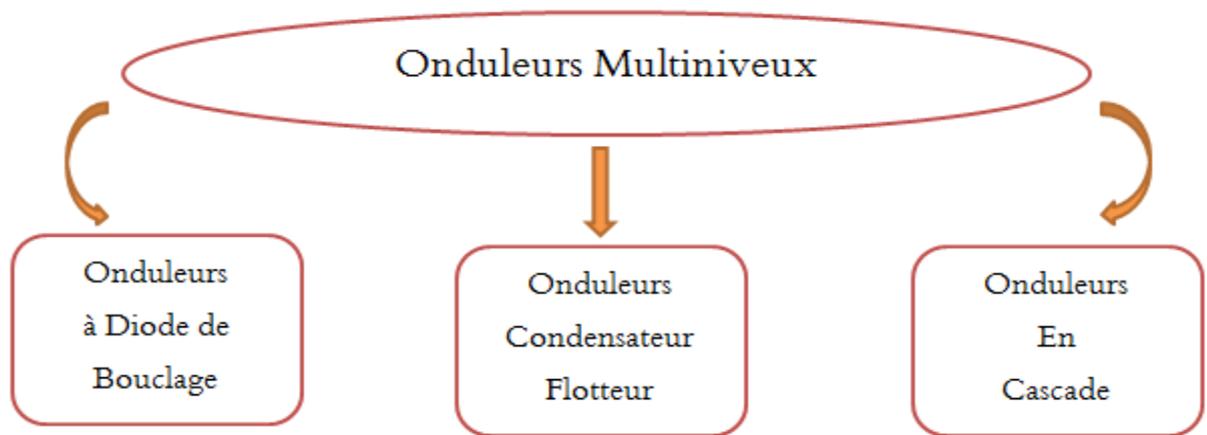


Figure III.3. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

III.2.3.1. Principe de l'ondeur multi niveaux

La figure III.4 permet de comprendre comment fonctionne les convertisseurs multi niveaux. Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la figure III.4.a dans laquelle les commutateurs (semi-conducteurs) ont été remplacés par un interrupteur idéal. La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs: 0 ou E. Sur la figure III.4.b, la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs : 0, E ou -E Dans la figure III.4.c, le cas général de n niveaux est présenté.

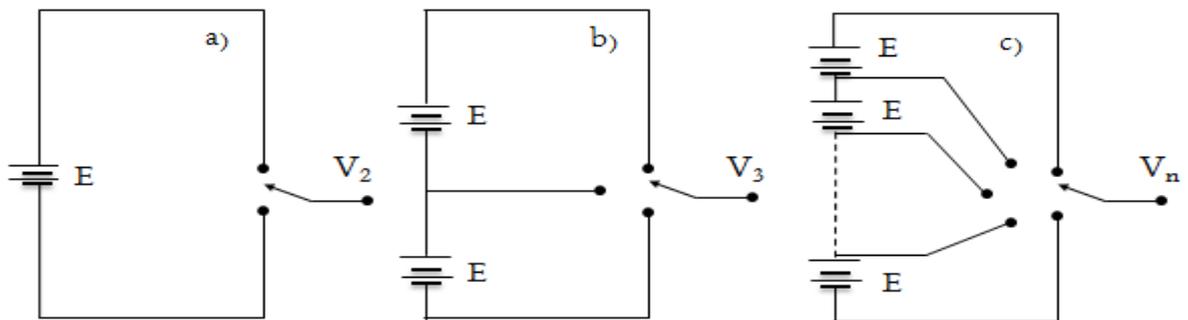


Figure III.4. Onduleur à niveaux multiples

a) à deux niveaux. b) à trois niveaux. c) à N niveaux.

L'augmentation de nombre du niveau permet d'améliorer les formes d'ondes en sortie de convertisseur, notamment en termes de contenu harmonique, mais cela nécessite une commande beaucoup plus complexe et un nombre important des semi-conducteurs utilisés. Cela rend le système global plus coûteux et surtout plus complexe.

III.2.4. Onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade

La structure d'un bras d'onduleur de tension en cascade à cinq niveaux est représentée par la figure III.5.

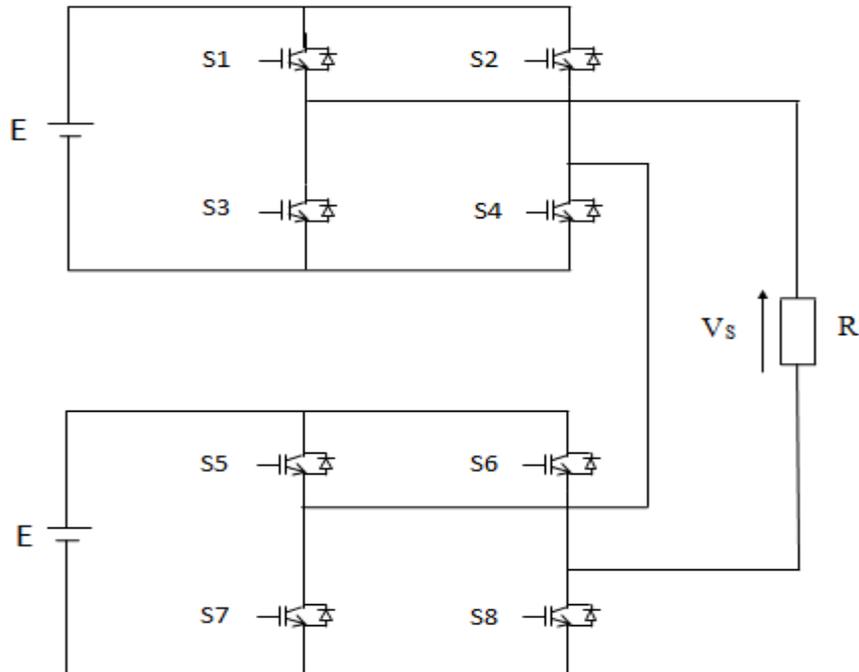


Figure III.5. Onduleur monophasé en cascade à 5 niveaux

III.2.4.1 Principe de fonctionnement

La structure d'un bras d'onduleur cinq niveaux en cascade est l'association en cascade de deux onduleurs classiques monophasés en pont complet. De telle sorte que la tension à la sortie de l'onduleur obtenue est la somme des tensions de sortie des deux onduleurs classiques. Nous avons les cinq séquences de fonctionnements suivantes pour le convertisseur en cascade à cinq niveaux de tensions :

- **Séquence 1:** S1, S4, S5, et S8 sont passants, et S2, S3, S6, et S7 sont bloqués.

Dans ce cas le premier pont monophasé (celui du haut) donne une tension de sortie E et second pont monophasé (celui du bas) donne également E comme tension de sortie. D'où la tension de sortie du convertisseur en cascade à cinq niveaux de tensions $V_S = E + E = 2E$.

- **Séquence 2:** S1, S4, S5, et S6 sont passants et S2, S3, S7, et S8 sont bloqués,

On a toujours E à la sortie du premier pont, mais cette fois ci 0 à la sortie du second pont. D'où la tension $V_S = E$.

- **Séquence 3:** S3, S4, S7, et S8 sont passants et S1, S2, S5, et S6, sont bloqués,

On a alors 0 comme tension de sortie dans les deux ponts monophasés montés en cascade. Et la tension de sortie du pont obtenue vaut: $V_S = 0$.

- **Séquence 4:** S2, S3, S7, et S8 sont passants et S1, S4, S5, et S6 sont bloqués,

Dans ce cas, la tension de sortie est : $V_S = -E$.

- **Séquence 5:** S2, S3, S6, et S7 sont passants et S1, S4, S5, et S8, sont bloqués. On a alors la tension de sortie $V_S = -E - E = -2E$.

III.2.4.2 Principe de la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

La conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative. Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs (MLI). Cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé modulatrice d'amplitude A_r et de fréquence F_r , avec un signal appelé porteuse d'amplitude A_p et de fréquence F_p très élevée comme montrer par la figure III.6. [30]

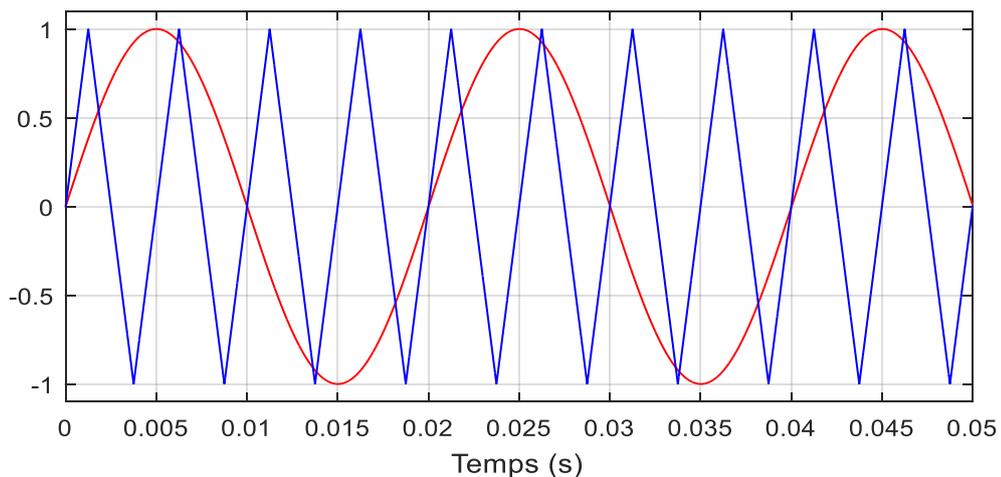


Figure III.6. Principe de la modulation

Pour générer les impulsions de commande MLI du convertisseur à cinq niveaux de tensions, quatre porteuses triangulaires et une tension de référence (sinusoïdale) sont nécessaires (Figure III.7).

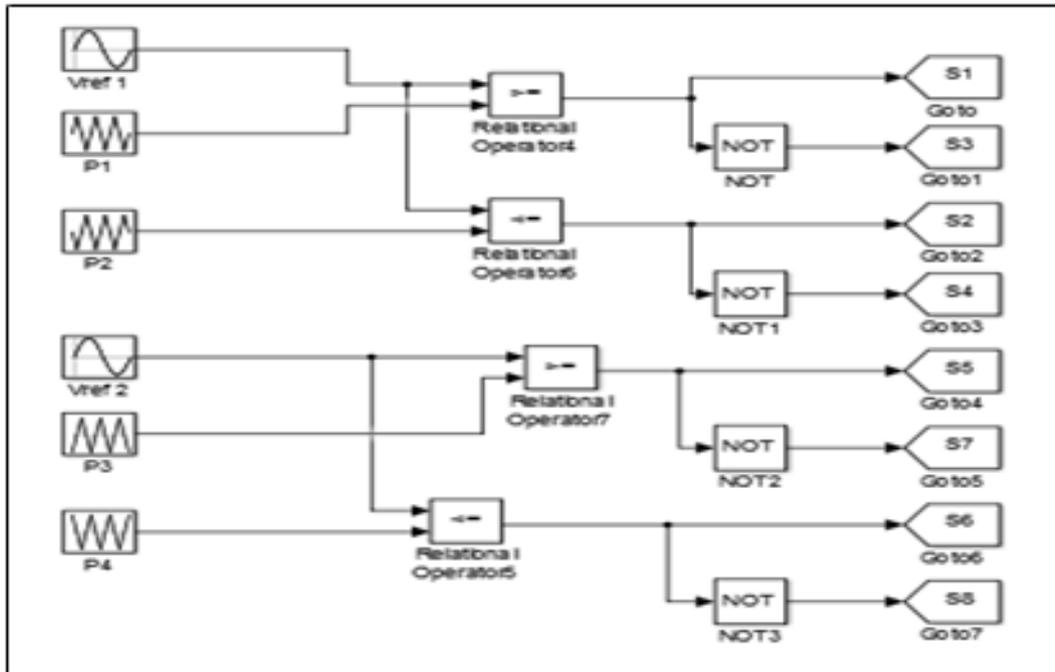


Figure III.7. Génération des signaux de commande d'un onduleur 5 niveaux

III.2.4.3. Résultats de simulation

La figure III.8 montre le principe de fonctionnement de la stratégie MLI qui est appliquée à notre l'onduleur. Le signal de référence V_{ref1} est comparé aux porteuses P1 et P2, ainsi la séquence de commutation des interrupteurs S1 et S2 est déterminé. De même, le signal de référence V_{ref2} est comparé aux porteuses P3 et P4, pour générer les séquences de commutation des interrupteurs S5 et S6. Les séquences S1 et S2 sont inversées pour obtenir S3 et S4, et les séquences S5 et S6 sont inversées pour obtenir S7 et S8. Cet algorithme nous permet d'obtenir la tension alternative à cinq niveaux à la sortie de l'onduleur.

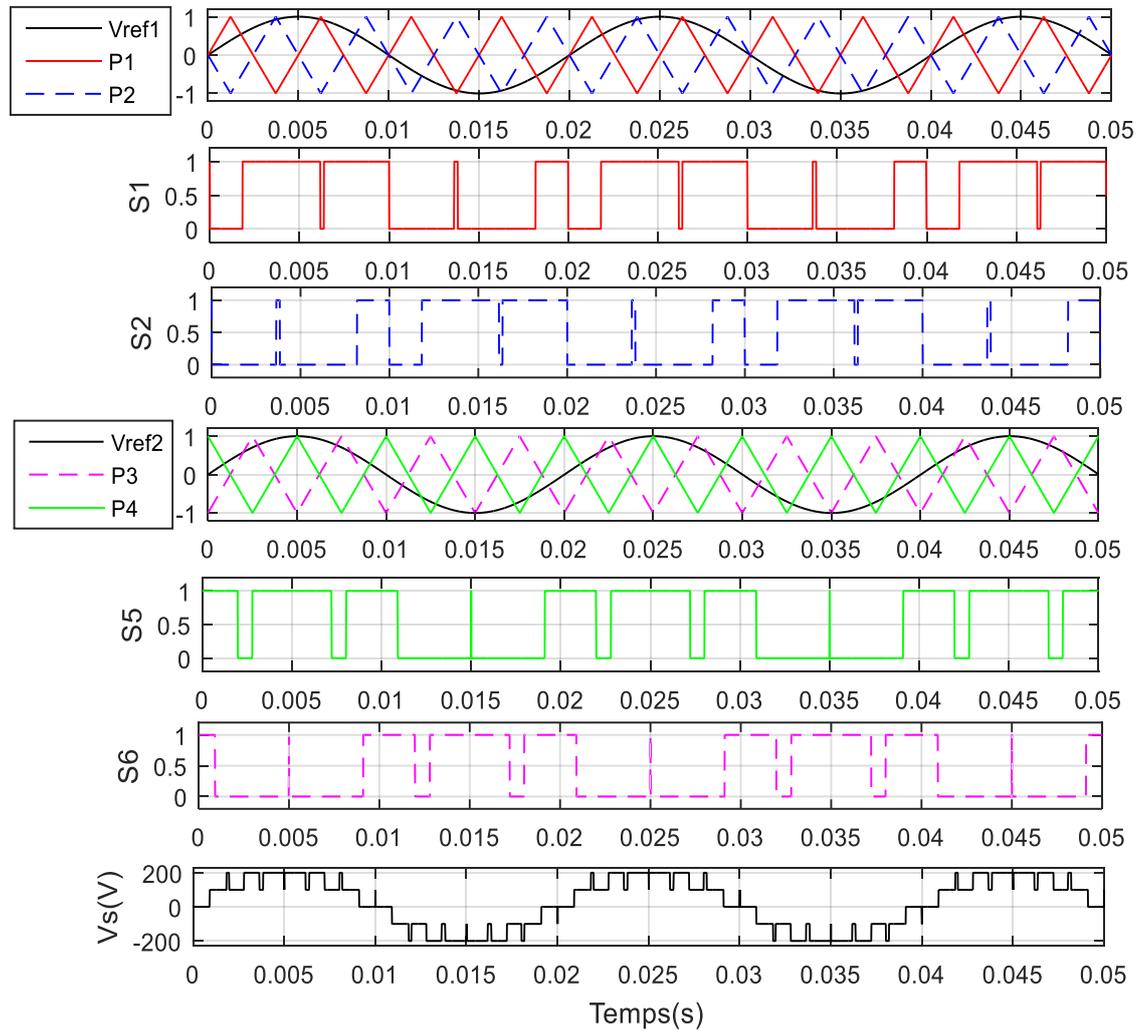


Figure III.8. Technique MLI, signal de commande des transistors, tension de sortie.

III.3. Résultats expérimentaux

Le banc d'essai expérimental (figure III .9) se compose des éléments suivants :

- ❖ Deux Alimentation tension (30 V. 30 V) (1)
- ❖ Carte d'acquisition et de commande PCIE6351 (2)
- ❖ Onduleur monophasé à cinq niveaux (3)
- ❖ Charge résistive R (4)
- ❖ Oscilloscope numérique (5)
- ❖ Ordinateur (6)

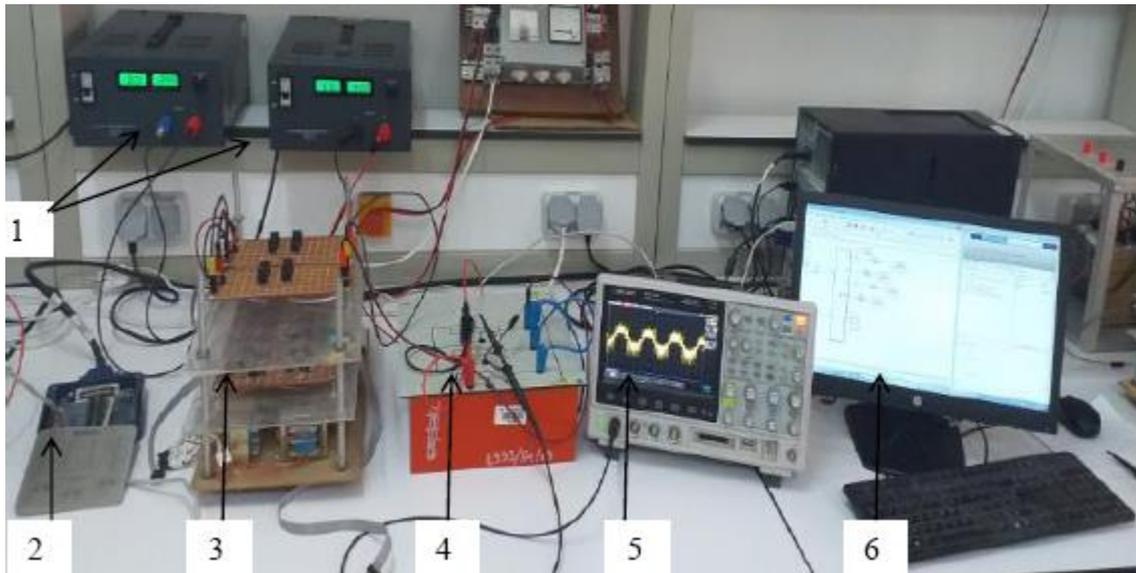


Figure III .9.Montage expérimental

III.3.1. Appareils utilisés dans le montage expérimental

III.3.1.1. Alimentation stabilisée

Une alimentation stabilisée est un dispositif électronique, utilisant un éventuel redressement à l'aide de diodes suivi d'un filtrage capacitif, permettant le réglage de la tension. La Figure III .11 montre les deux alimentations stabilisées réglés à 30V que nous avons utilisé pour alimenter notre onduleur.



Figure III .10. Alimentations stabilisées

III.3.1.2. PC et carte d'acquisition PCIe6351

L'implémentation de la stratégie de commande simulée précédemment est réalisée sous le logiciel Matlab Simulink ou boucle ouverte (Fig.III.11). Les signaux de control sont transmis à l'onduleur cinq niveaux par l'intermédiaire de la carte d'acquisition de National Instrument PCIe6351 illustré par la figure III.12.

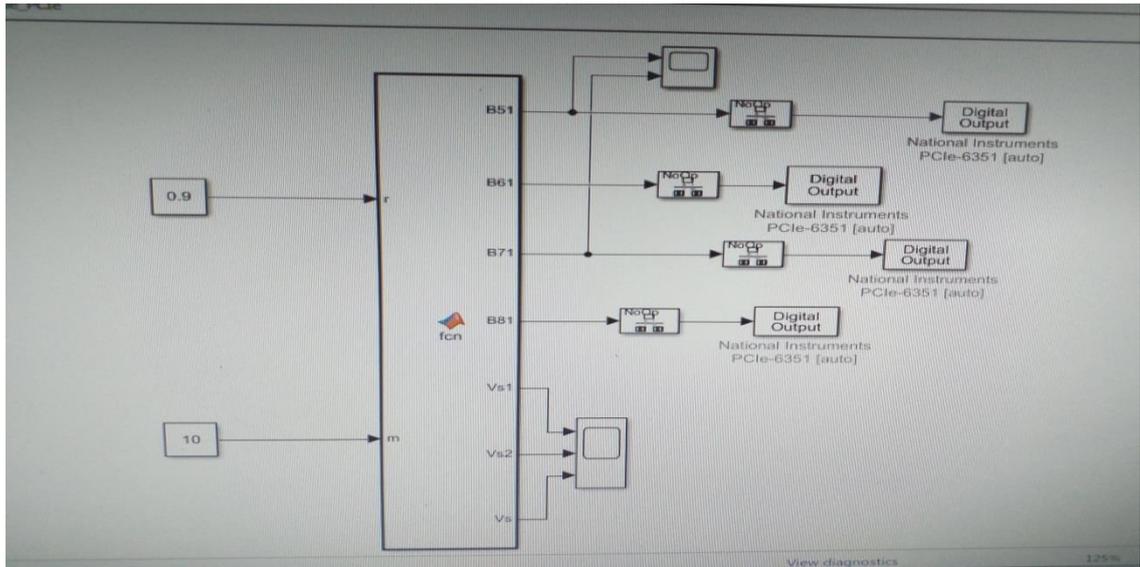


Figure III .11.Commande MLI sous Matlab simulink



Figure III .12. Carte d'acquisition PCIe6351

III.3.1.3. Onduleur cinq niveaux

La Figure III.13 montre l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade utilisé pour l'implémentation de notre algorithme MLI.

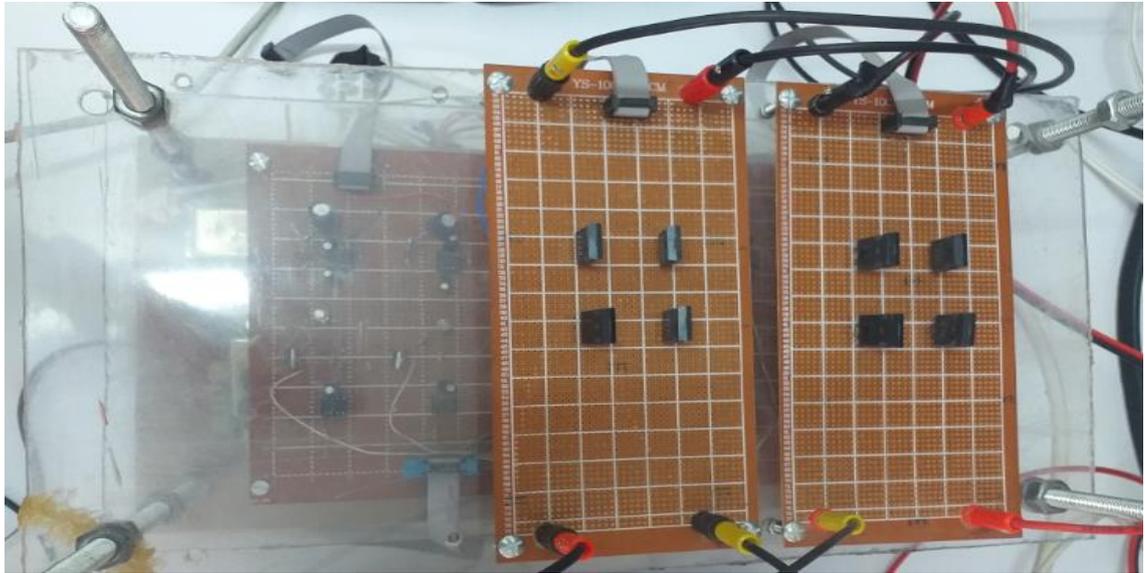


Figure III .13. Onduleur cinq niveaux

III.3.1.4. Oscilloscope numérique

La figure III.14 montre l'image réelle de l'oscilloscope numérique utilisé pour visualiser les résultats expérimentaux.

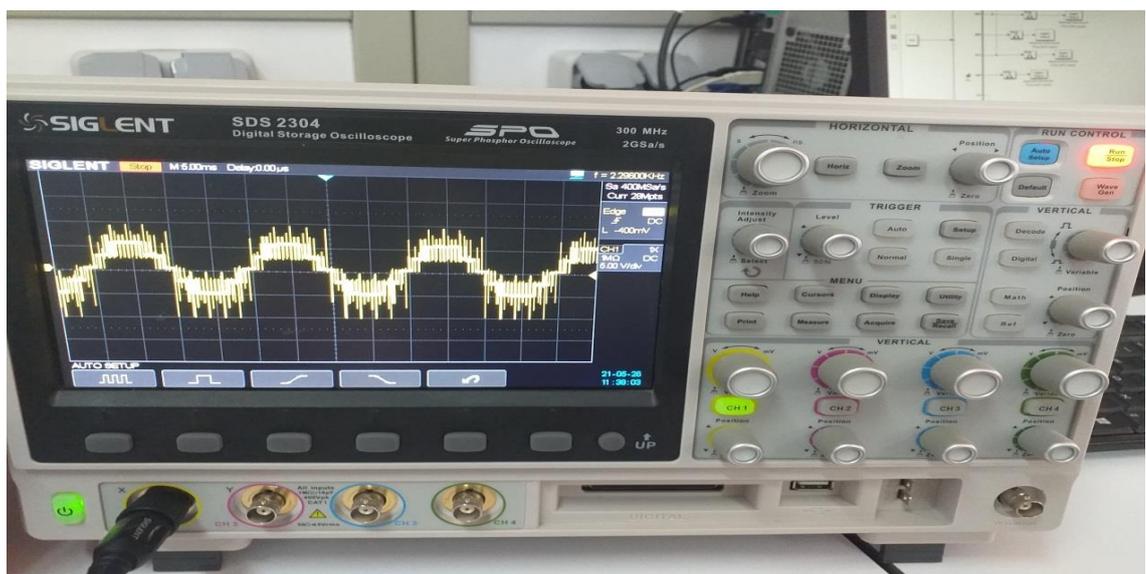


Figure III .14. Oscilloscope numérique

III.3.2. Résultat de test pratique

La figure III.15 montre la tension de sortie de l'onduleur. Cette figure présente bien les cinq paliers de tension, à savoir : 60V, 30V, 0V, -30V, -60V. Aussi, la fréquence de cette forme d'onde et identique au signal de référence (50Hz).

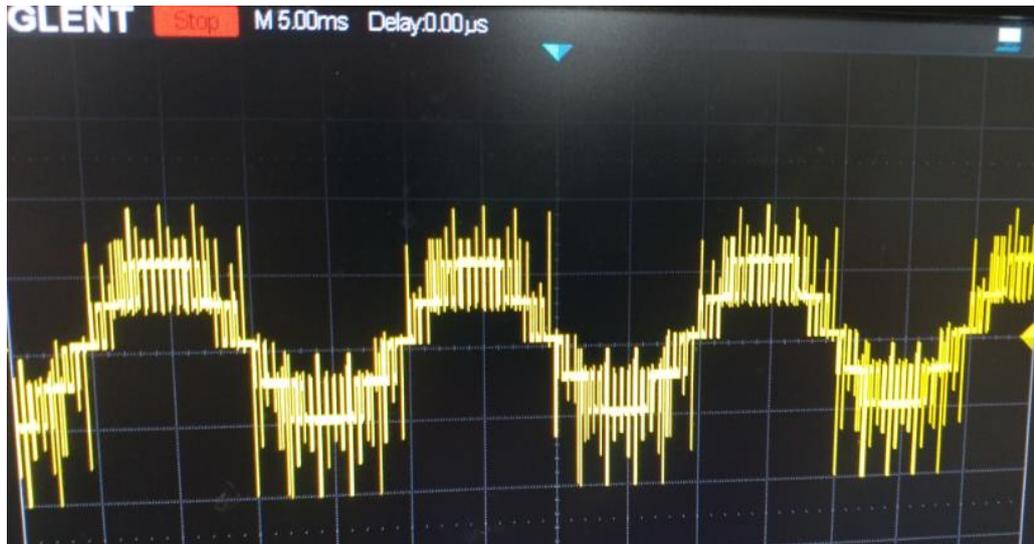


Figure III .15. Tension de sortie de l'onduleur

III.4.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle ainsi que la stratégie de commande MLI de l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade. Par la suite on a détaillé les résultats de simulation obtenus. Enfin nous avons terminé ce chapitre par la présentation de la partie expérimentale et des résultats expérimentaux.

Le prochain chapitre sera dédié à l'association de la chaine de conversion photovoltaïque à deux étages composée de deux convertisseurs boosts dans son premier étage et de l'onduleur monophasé à cinq niveaux dans le second.

Chapitre IV : Simulation et
expérimentation de la cascade
de conversion photovoltaïque à
deux étages

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier l'association de la chaîne de conversion photovoltaïque à deux étages composée de deux convertisseurs boosts dans son premier étage et de l'onduleur monophasé à cinq niveaux dans le second. Nous commençons par la description du système puis la présentation des résultats de simulation obtenus. Par la suite nous décrivons le banc expérimental nécessaire pour l'implémentation des algorithmes de commande et la récolte de résultats. Nous terminons ce chapitre par la présentation des résultats expérimentaux.

IV.2. Chaîne conversion photovoltaïque à deux étages à base de l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade

IV.2.1. Description

La figure IV.1 présente la Chaîne conversion photovoltaïque à deux étages à base de l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade. Chacun des deux onduleurs qui sont monté en cascade est alimenté par un générateur photovoltaïque à travers un hacheur élévateur commande en MPPT. L'onduleur cinq niveaux est commandé en MLI sinus triangle et alimente une charge résistive-inductive (RL).

IV.2.2. Caractéristiques du module photovoltaïque

Dans notre travail, nous avons choisi du module photovoltaïque du type Sanyo HIP-225HDE1. Ainsi nous donnons les caractéristiques électriques du module PV dans le tableau (IV -1)

Tableau (IV-1) Caractéristiques électriques du module PV Sanyo HIP-225HDE1		
Parameters	Symbols	Valeurs
Puissance du module [W]	P_m	225W
Courant de court-circuit [A]	I_{sc}	7.13A
Tension de circuit ouvert [V]	V_{oc}	41.59V
Tension de puissance maximale [V]	V_m	33.9V
Courant de puissance maximale [A]	I_m	6,63A
Résistance série [Ω]	R_s	0.20 Ω
Résistance parallèle [Ω]	R_p	1830.7 Ω

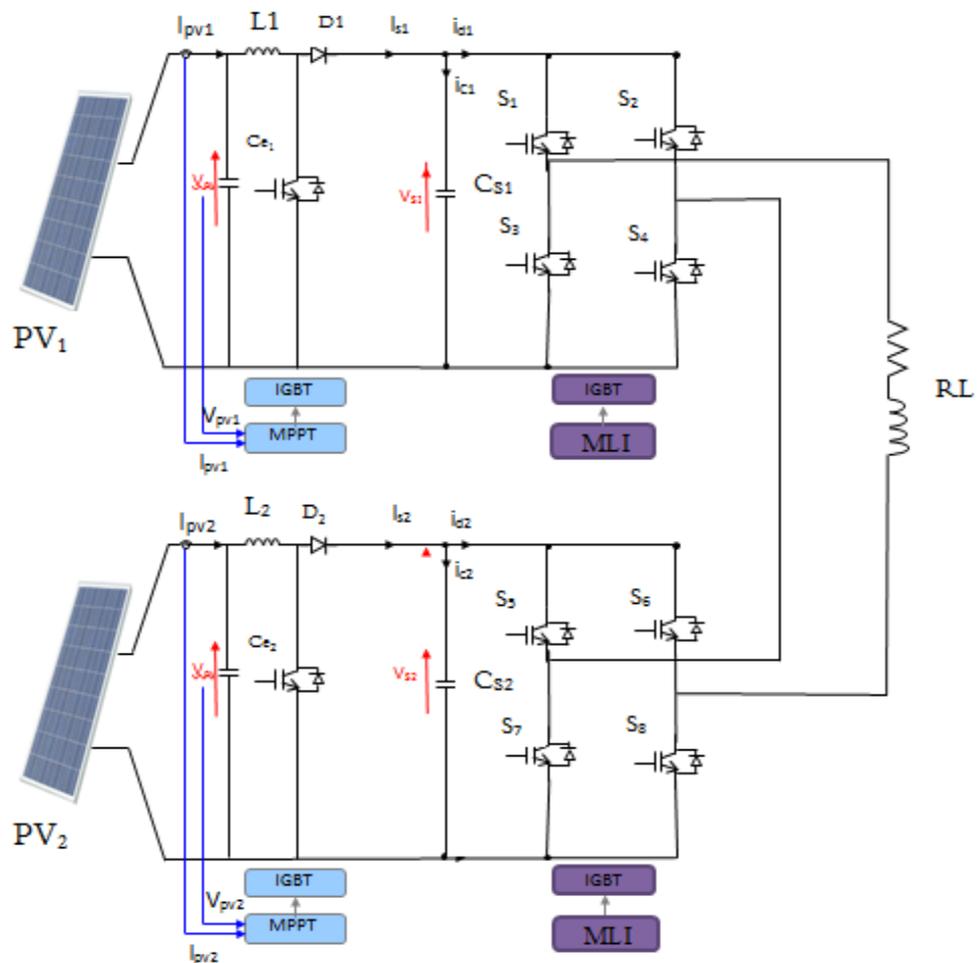


Figure IV.1. Chaîne de conversion photovoltaïque à deux étages à base de l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade

IV.2.3. Résultat de simulation

Les caractéristique I(V) et P(V) des deux générateurs photovoltaïques utilisés sont présenté par les figures IV.2.(a) et (b). Comme le montre la figure IV.2.(b), la puissance maximum est de 1350 W.

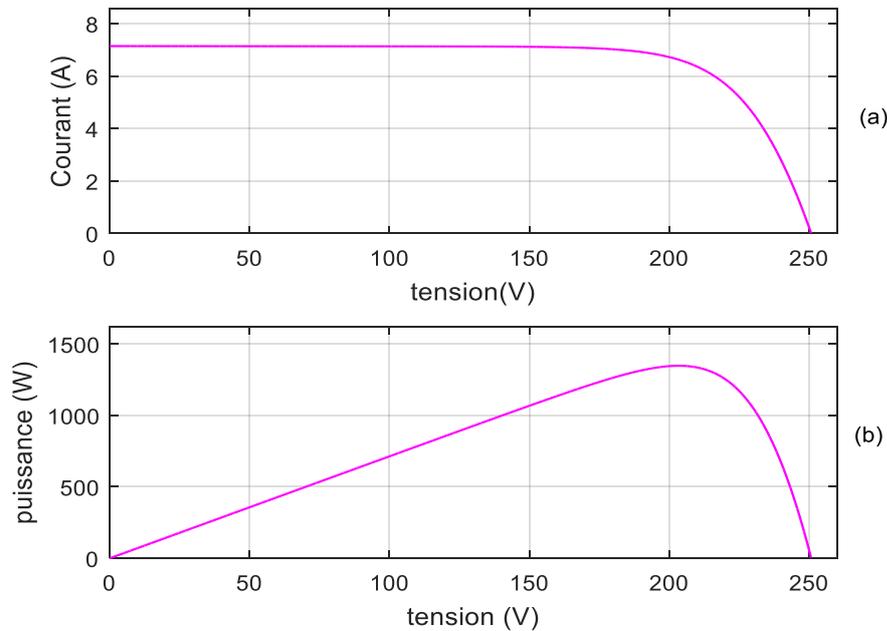


Figure IV.2 Caractéristiques I(V)- P(V) de générateur

La figure IV.3 présente les résultats obtenus pour le premier onduleur monté en cascade sous les conditions suivantes :

- Rayonnement solaire variable [1000 700] W/m². (Fig. IV.3.a)
- Température 25°C
- Fréquence de commutation $f_e = 3000$ Hz
- Condensateurs d'entrée et de sortie $C_{e1} = 100 \mu\text{F}$, $C_{s1} = 1000 \mu\text{F}$

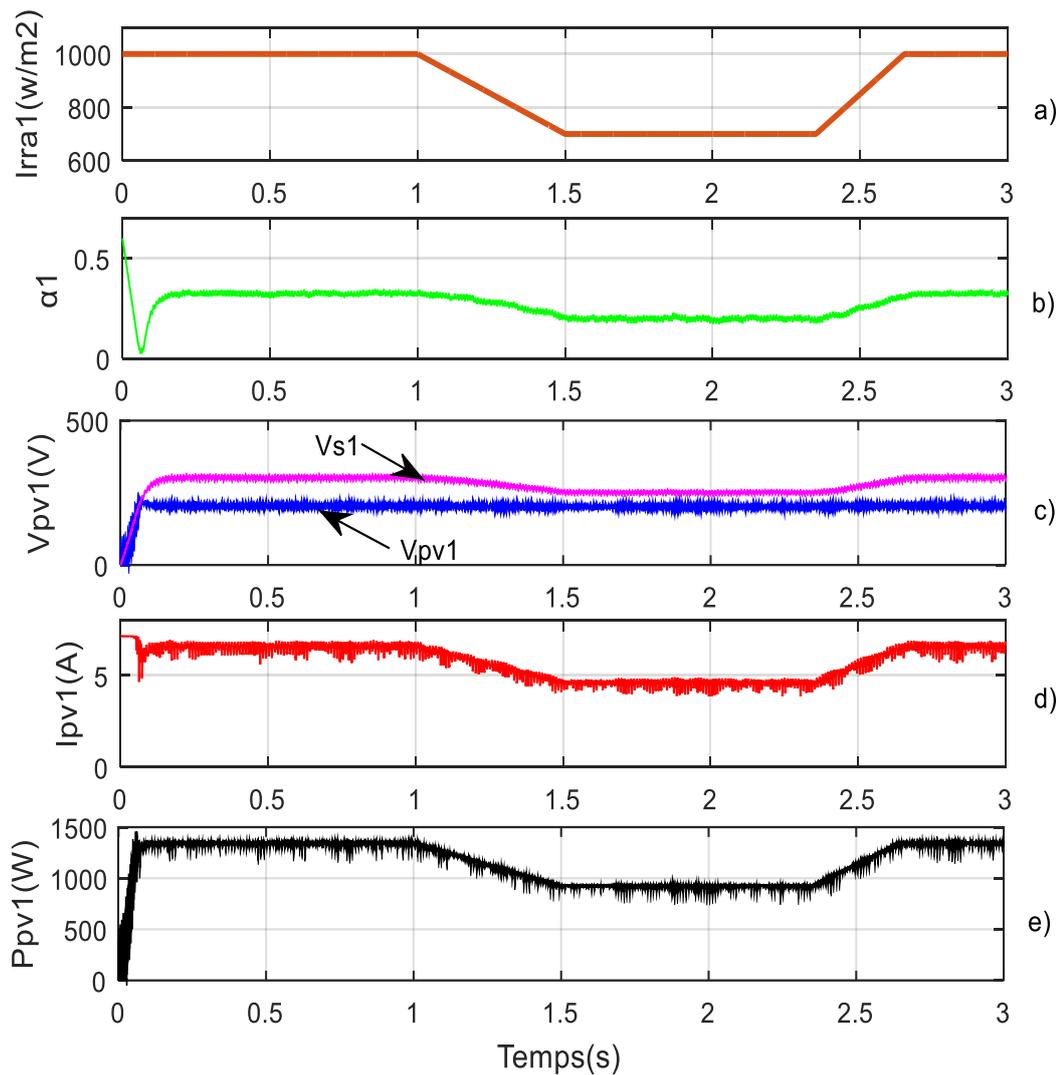


Figure IV.3. L'ensemble des courbes : $Irra_1$, α_1 et V_{PV1} , V_{s1} , I_{PV1} , P_{PV} du GPV_1

De la figure IV.3.a on remarque que le rayonnement est fixé à 1000W/m^2 de $t=0$ à $t=1.5\text{s}$ puis diminue à 700W/m^2 de $t=2\text{s}$ à $t=2.4\text{s}$ puis revient à 1000W/m^2 .

La figure IV.3.b montre les variations du rapport cyclique. Il est à noter que α_1 varie avec le rayonnement solaire dans le but d'extraire le maximum de puissance du générateur PV (Fig. IV.3.e) à tout moment.

La figure IV.3.c présente la tension du générateur V_{PV1} et la tension sortie V_{s1} . Nous remarquons la tension V_{pv1} n'est pas affectée par le rayonnement solaire. Aussi, il y a une augmentation de la tension sortie V_{s1} . Ces résultats montrent que le convertisseur boost remplit correctement son rôle.

Chapitre IV

Les figures IV.3.d et e montrent le courant et la puissance du générateur PV. Il est à noter que I_{pv1} est affecté par le rayonnement solaire. A son tour la puissance P_{pv1} est affectée par le courant I_{pv1} .

La figure IV.4 montre les résultats obtenus pour le deuxième onduleur monté en cascade sous les mêmes conditions et paramètres auquel été soumis le premier onduleur monté en cascade. La réponse aux variations du rayonnement solaire constaté pour le hacheur élévateur qui alimenté le premier onduleur monté en cascade sont les mêmes constatés pour l'hacheur connecté au deuxième onduleur monté en cascade.

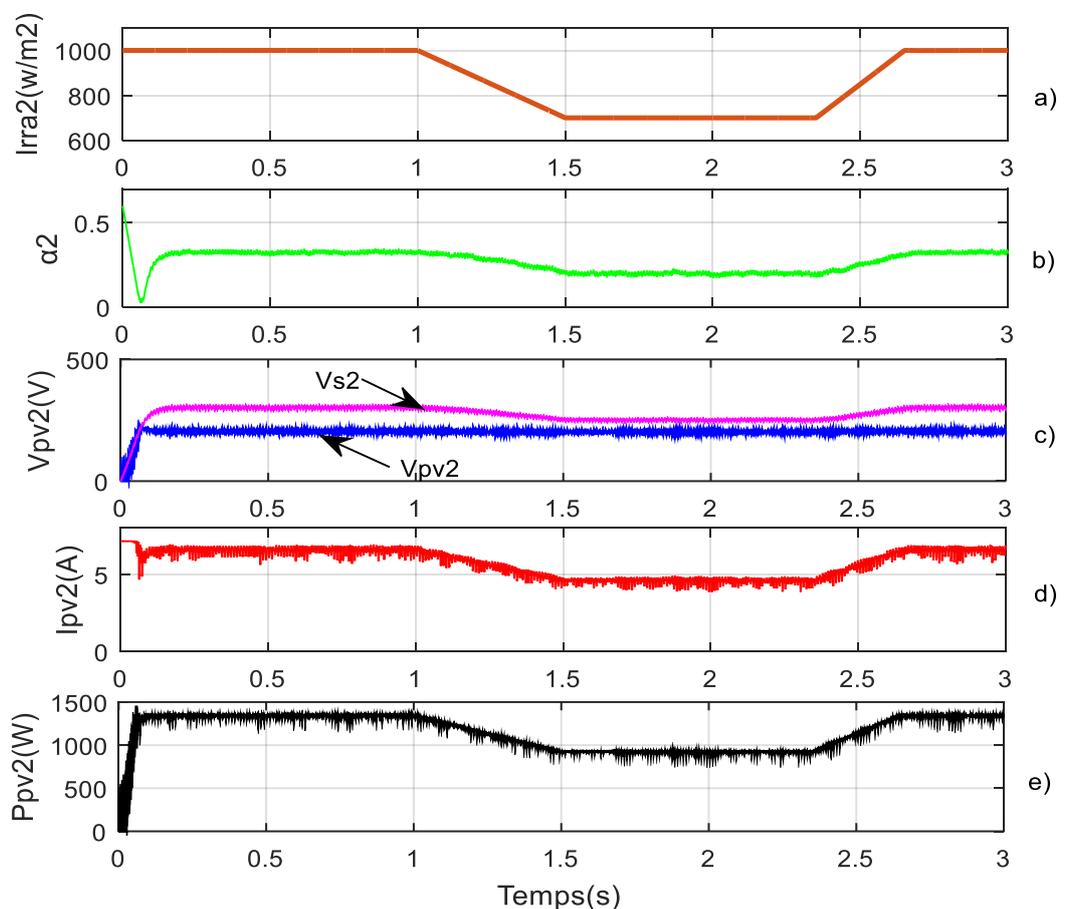


Figure IV.4. L'ensemble des courbes I_{rra2} , α_2 , V_{PV2} , V_{S2} , I_{PV2} , P_{PV2} du GPV₂

La figure IV.5.a présente la tension sortie V_{sa} de l'onduleur à cinq niveaux. La forme d'onde obtenue de cette dernière présente clairement cinq paliers. Le courant sortie I_{sa} est de forme sinusoïdale mais en retard par rapport à la tension. Ce retard est dû à la charge qui est composée d'une inductance.

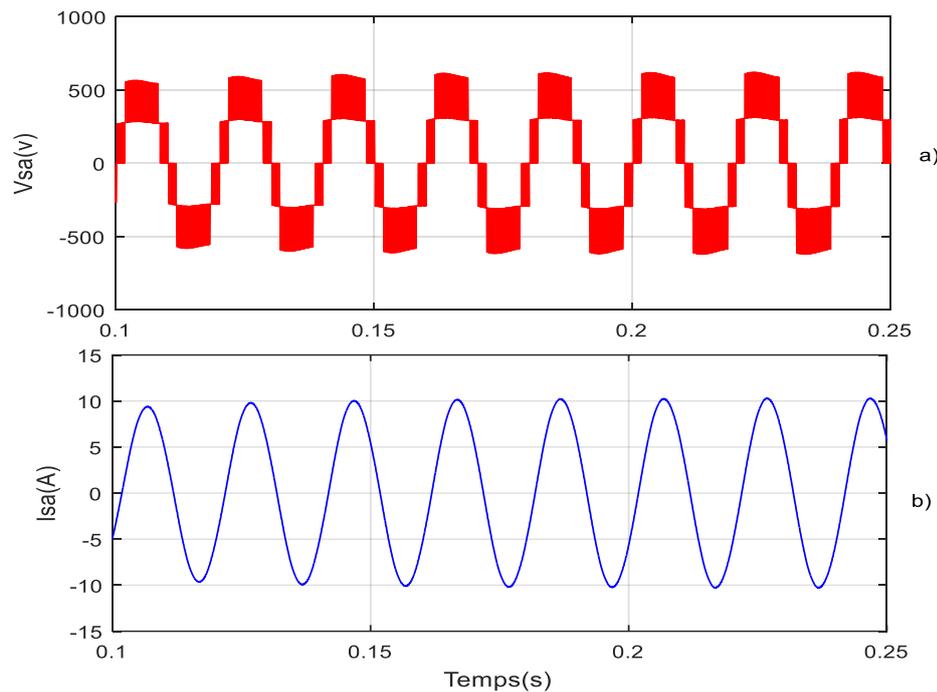


Figure IV.5 Tension et courant sortie

IV.2.4. Implémentation expérimentale

Le banc d'essai expérimental se compose des éléments suivants :

- ❖ Arrivée deux modules PV (1)
- ❖ Onduleur monophasé à cinq niveaux (2)
- ❖ Deux ordinateurs (3) (11)
- ❖ Unité d'acquisition (4)
- ❖ Carte d'acquisition et de commande PCIE6351 (5)
- ❖ Carte Capteurs (6)
- ❖ Deux Hacheurs Boosts (7)
- ❖ Arduino MEGA (8)
- ❖ Charge R (9)
- ❖ Oscilloscope numérique (10)
- ❖ Carte d'interface (12)

Le banc expérimental de l'association PV- Boosts- onduleur 5N- Charge est présenté par la figure IV.6. Les deux convertisseurs Boost sont commandés en MPPT à travers la carte arduino. L'onduleur à cinq niveaux est commandé en boucle ouverte par la carte PCIE 6351. Les résultats expérimentaux sont récoltés par l'unité d'acquisitions qui est connectée au deuxième PC.

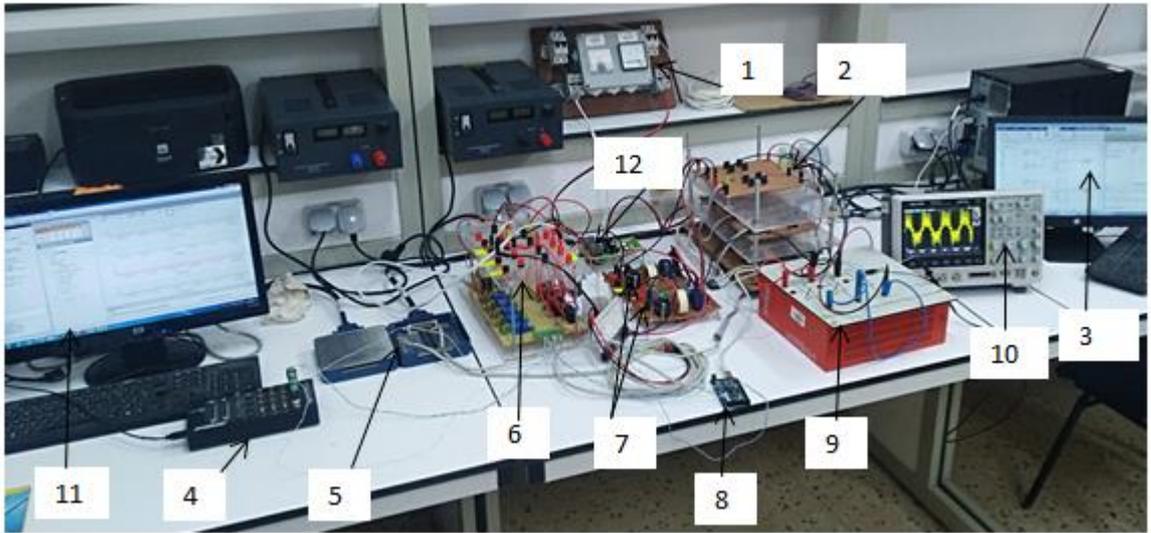


Fig. IV.6. Banc expérimental de l'association PV- Boosts- onduleur 5N- Charge

La figure IV.7 présente les résultats expérimentaux obtenus de l'association PV- Boosts- onduleur 5N- Charge. Les deux hacheurs fonctionnent en mode élévateur comme montrés par les figures IV.7.a et IV.7.b. La tension de sortie de l'onduleur présente bien les cinq paliers comme montré par la figure IV.7.g.

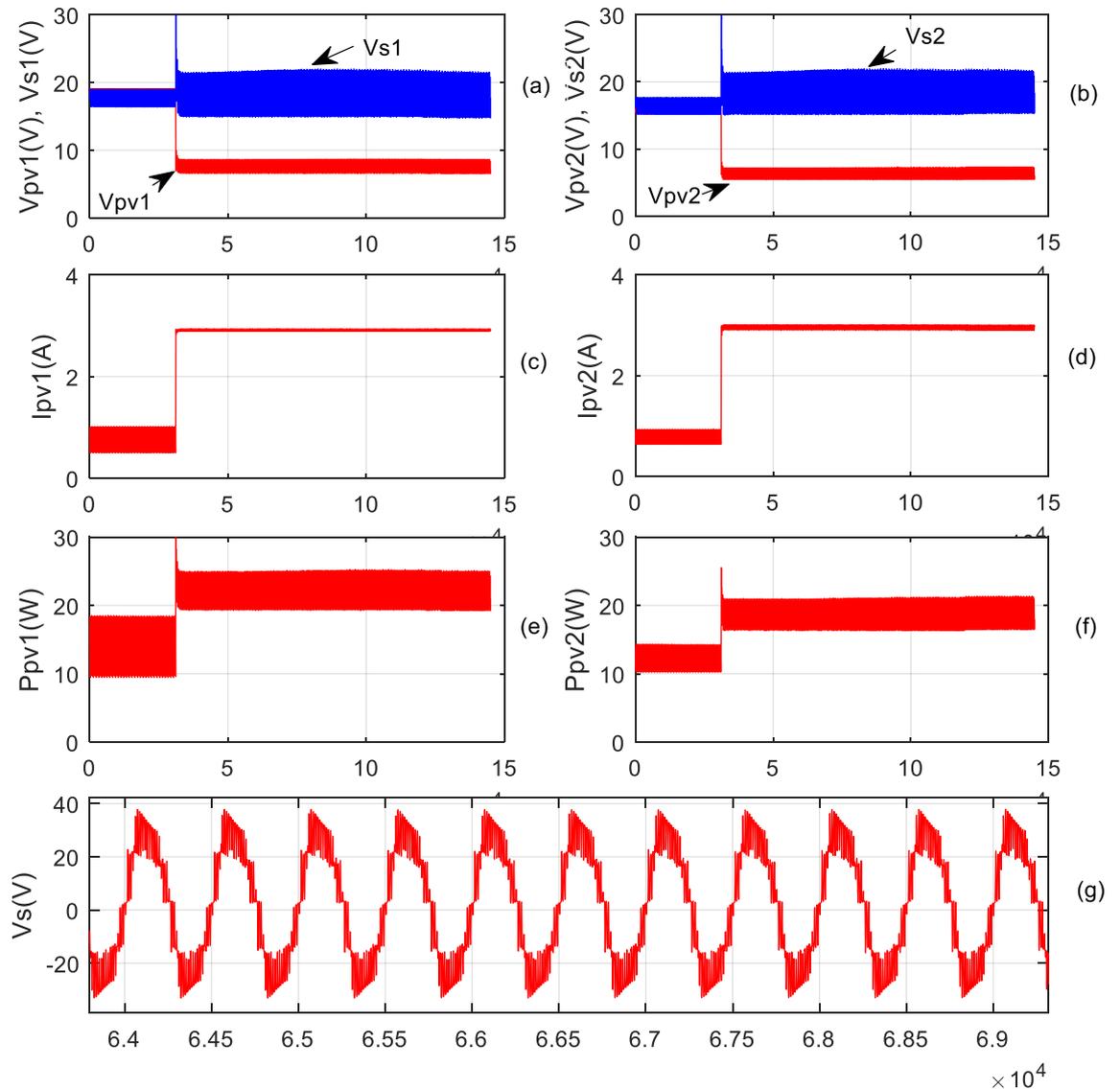


Fig.IV.7. L'ensemble des courbes courants, tensions, puissances, tensions entré et sortie de l'onduleur

IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation obtenus de l'association de la chaîne de conversion photovoltaïque à deux étages composée de deux convertisseurs boosts dans son premier étage et de l'onduleur monophasé à cinq niveaux dans le second. Les résultats de simulation obtenus ont montrés l'efficacité de l'algorithme MPPT appliqué à la commande des deux hacheurs élévateurs à extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque. Aussi la stratégie de commande utilisée pour

Chapitre IV

contrôler l'onduleur à cinq niveaux à permis d'obtenir la forme d'onde souhaitée. L'implémentation pratique des stratégies de commandes simulées de cette cascade de conversion photovoltaïque a montrée à travers les résultats expérimentaux obtenus un bon fonctionnement des deux boosts et de l'onduleur cinq niveaux.

Conclusion générale

Dans notre mémoire nous nous sommes intéressés à la conversion de l'énergie solaire photovoltaïque pour faire face au besoin d'une charge à courant alternatif. Cet objectif visé a pu être réalisé au moyen d'une chaîne de conversion à deux étages constituées : de deux hacheurs élévateurs dans le premier étage et d'un onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade dans le second étage. Pour réaliser cet objectif, nous avons divisé notre mémoire en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre nous avons étudié le principe de l'effet photovoltaïque et présenté le modèle de la cellule solaire origine de cette conversion du rayonnement solaire en électricité. Par la suite nous avons présenté les différents types de ces cellules solaires ainsi leur modèle mathématique. Puis nous avons montré les caractéristiques électriques du module photovoltaïque. A la fin de ce chapitre une étude de l'influence de la variation de l'éclairement et de la température sur les caractéristiques électriques du module est présentée.

Dans le second chapitre, nous avons présenté la structure, le principe de fonctionnement ainsi que le dimensionnement des composants du hacheur boost. Les résultats de simulation ont montrés l'efficacité de l'algorithme de commande qui a permis d'extraire le maximum de puissance du module photovoltaïque. De même, les résultats expérimentaux présentés à la fin du chapitre montrent que la puissance augmente jusqu'à atteindre son maximum.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté le modèle ainsi que la stratégie de commande MLI de l'onduleur monophasé à cinq niveaux à structure cascade. Par la suite on a détaillé les résultats de simulation obtenus. Enfin nous avons terminé ce chapitre par la présentation de la partie expérimentale et des résultats expérimentaux.

Finalement, dans le dernier chapitre nous avons présenté les résultats de simulation obtenus de l'association de la chaîne de conversion photovoltaïque à deux étages composée de deux convertisseurs boosts dans son premier étage et de l'onduleur monophasé à cinq niveaux dans le second. Les résultats de simulation obtenus ont montrés l'efficacité de l'algorithme MPPT appliqué à la commande des deux hacheurs élévateurs à extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque. Aussi la stratégie de commande utilisée pour

Conclusion générale

contrôler l'onduleur à cinq niveaux a permis d'obtenir la forme d'onde souhaitée. L'implémentation pratique des stratégies de commandes simulées de cette cascade de conversion photovoltaïque a montrée à travers les résultats expérimentaux obtenus un bon fonctionnement des deux boosts et de l'onduleur cinq niveaux.

Comme perspective, nous proposons d'essayer de réaliser la commande en boucle fermé de l'onduleur à cinq niveaux dans le but d'adapter l'amplitude de la tension de sortie à l'utilisation malgré les changements des paramètres météorologiques

Références

- [1] M.H. Quang. Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé. Thèse de doctorat, University Reims, Reims (2013)
- [2] Dadi Ahmed, «Modélisation et commande chaîne de traction d'un véhicule électrique », thèse doctorat, université de saïda, 2005.
- [3] Soltane Belakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », thèse doctorat, université de Constantine, 2010
- [4] Dr. Sofia Belaid Lalouni, « Cours Energie Solaire Photovoltaïque », maître de conférences classe B, Université A.Mira de Bejaia, 2015
- [5] ASAL. (L'Atlas Solaire de l'Algérie par l'Agence Spatiale Algérienne). Energie nouvelle et renouvelable
- [6] Abdelkader Mekemeche, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n, Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », Thèse de Doctorat, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017.
- [7] Salaheddine Bensalem, « Effets de la température sur les paramètres et caractéristiques des cellules solaire », mémoire de magister université Farhat Abbas- Setif, , 2011.
- [8] N.Touil et S.ghenbazi, «Modélisation et Simulation d'un système Photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [9] BELHADJ Mohammed. «Modélisation d'un système de captage photovoltaïque Autonome», Mémoire de Magister, Université de Bechar, 2008.
- [10] N. F. BENHADDOUCHE. La Commande D'un Système Photovoltaïque D'un Satellite, Mémoire de PFE, Université de Tlemcen, 2014.

- [11] D. mouhamet daffalah, « Etude et conception d'une chaîne photovoltaïque connectée au réseau et étude de la qualité de l'énergie injectée », Mémoire de master, Université de Tunis, Tunisie, 2016.
- [12] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>
- [13] ABBASSEN Lyes, «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque», Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammri de Tizi Ouazou, 2011.
- [14] M. Yousef, «Etude de raccordement d'un système photovoltaïque au réseau électrique», Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [15] Ayache Khadidja, «Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Couplé à un Réseau Électrique», Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras, 2014.
- [16] M. Makhlouf, « Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie Photovoltaïque application au pompage », Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2006.
- [17] NETTARI Yakoub «Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC », Magister en Electrotechnique, Université ferhat abbas setif 1, 2014
- [18] Othman ben seddik.fathi djaloud «Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque», mémoire de master, université Kasdi Marbah-Ouargala, 2012
- [19] R. Merahi, R. Chenni, amélioration de la commande p&o par une détection synchrone du courant de batterie, université des frères mentouri route de Ain el bey de Constantine, 2011
- [20] Lequeu Thierry, "Cours d'électronique de puissance", IUT GEII 2ième année, Option EEP, 2004/2005
- [21] Bogdan Grabowski, Christian Ripoll, " Aide-mémoire Électronique", Dunod, 5e édition, 2008
- [22] Alayat Mahmoud et Boucetta Issam « Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclaircissements différents », mémoire de master filière Électrotechnique, UNIVERSITE badji mokhtar annaba ,2017

- [23] BOUALEM, DENDIB, "Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des application photovoltaïque : étude comparative.," Université Ferhat Abbas-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électronique, 2007.
- [24] M.S. Amamra « Optimisation de la production d'un générateur Photovoltaïque », magister en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [25] S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage » Thèse de doctorat, co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, 2015.
- [26] Data Translation DT9826 datasheet
- [27] REBAOUI Brahim «Etude du déséquilibre de l'alimentation d'un onduleur multi niveaux» magister Mohamed Boudiaf Oran 2014
- [28] Mr. YAHIAOUI Omar et Mr. LABZA Tahar: «Etude et simulation d'association onduleur de tension-moteur asynchrone et réglage par modélisant ", Mémoire d'ingénieur d'état, Université de M'silla, 2007
- [29] Houria Ben Zemammouch « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba.2010
- [30] Bouzana hani hocine «MÉMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master», Université Badji Mokhtar-Annaba ,2019