

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Commandes Electriques

Par : **BECHERIF Bouthayna**

et

AILAS Ghizlen

Sujet

**Etude et simulation d'un système photovoltaïque de production
d'énergie électrique monophasé non connecté au réseau**

Soutenu publiquement, le 29 / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

MERZOUG Sid Ahmed

YACOUBI Boumediene

LOUCIF Mourad

MECHERNENE Abdelkader

Pro

MAA

MCB

MCA

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Président

Examineur

Encadrant

Co-Encadrant

Année universitaire : 2021 /2022

Dedicaces 1

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce travail :

A ma chère mère qui m'a soutenue et encouragé durant toutes mes années d'étude.

A mon cher père qui a été ma force pour affronter les différents obstacles.

A mes frères et sœurs et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotions lors de la réalisation de ce travail et qui m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma famille et mes proches qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A mon binôme Ghizlène et mes amies à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime.

Bouthayna BECHERIF
Tlemcen, le 29 Juin 2022

Dedicaces 2

Aucun mot n'est assez fort pour te remercier comme il se doit ;
Tu as été la première à avoir cru en moi et à m'avoir encouragé,
Celle qui m'a porté et guidé,
Celle qui a souffert sans me laisser souffrir,
Maman, je te dédie le fruit des études que j'ai faite pour te rendre fière,
A mon père, que ce travail te témoigne ma gratitude et mon affection ;
A mon incroyable grande sœur qui m'a soutenu et a toujours été à mes côtés ;
A mes frères, mes nièces et tous les membres de ma famille ;
A mon binôme Bouthayna qui a été patiente et compréhensive tout le long de ce travail ;
A ma meilleure amie Islah pour son amour, sa présence et ses encouragements ;
A tous ceux qui me sont chers ;

Ghizlen AILAS
Tlemcen, le 29 Juin 2022

Remerciements

Ce modeste travail a été le fruit d'un magnifique parcours et d'une agréable collaboration, mais surtout grâce à Dieu, que nous ne cesserons de remercier de nous avoir donné la force, la patience et le courage d'accomplir notre but. Ainsi que tous ceux qui ont pu contribuer d'une quelconque manière dans la réalisation de ce mémoire, puissent ressentir, en lisant ces quelques lignes, notre sincère et profonde gratitude.

Suite à ces mots, nos pensées vont particulièrement vers celui qui nous a accompagné et encadré tout au long de ce projet, Monsieur Mourad LOUCIF, maître des conférences à l'Université de Tlemcen. Une personne humble et modeste que nous ne remercierons jamais assez pour la confiance qu'il nous a accordé mais surtout la patience dont il a fait preuve, le soutien moral et les précieux conseils qui resteront gravés en nous pour toute une vie.

Nous tenons aussi à remercier notre Co-encadrant, Monsieur Abdelkader MECHER-NENE, maître des conférences à l'Université de Tlemcen, pour ses encouragements permanents, le partage de son savoir-faire et surtout pour la gaieté qu'il communique, rien qu'en sa présence.

Par ailleurs, nous tenons à exprimer notre gratitude à Monsieur Sid Ahmed MER-ZOUG, professeur à l'Université de Tlemcen pour l'honneur qu'il nous a fait en présidant le jury de soutenance de ce mémoire, et à Monsieur Boumediene YACOUBI, maître assistant (A) à l'université de Tlemcen pour avoir accepté de faire partie du jury.

Nous remercions, tout particulièrement Monsieur Mohamed Choukri BENHABIB, Professeur à l'université de Tlemcen et Monsieur Younes DRIS, Docteur en Electrotechnique à l'Université de Tlemcen, pour leur aide et leurs conseils sur différentes stratégies proposées durant toute la période de travail.

Nos remerciements les plus sincères sont aussi adressés à tous les enseignants et employés de l'université de Tlemcen.

Ghizlen AILAS Bouthayna BECHERIF
Tlemcen, le 29 Juin 2022

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES 1	1
DEDICACES 2	2
REMERCIEMENTS	3
NOMENCLATURE	11
GLOSSAIRE	13
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I TECHNOLOGIE DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES	3
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 ÉVOLUTION DE L'ÉNERGIE PV	4
I.2.1 Dans le monde	4
I.2.2 En Algérie	6
I.2.3 En Afrique	7
I.3 EFFET PHOTOVOLTAÏQUE	8
I.4 CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	9
I.4.1 Constitution d'une cellule	9
I.4.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	9
I.5 DIFFÉRENTS TYPES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES	10
I.5.1 Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin	10
I.5.2 Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin	11
I.5.3 Cellule au silicium amorphe	11
I.6 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DANS CHAQUE CELLULE	11
I.6.1 Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin	11
I.6.2 Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin	12
I.6.3 Cellule photovoltaïque en silicium amorphe	12
I.7 DIFFÉRENTS MODÈLES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	12
I.7.1 Cellule idéale	12
I.7.2 Cellule réelle	13
I.7.2-a Modèle à une diode	13
I.7.2-b Modèle à deux diodes	13
I.8 CLASSIFICATION DES SYSTÈMES	14
I.8.1 Systèmes PV autonomes	15

I.8.1-a	Systèmes PV autonomes sans stockage d'énergie	15
I.8.1-b	Systèmes PV autonomes avec stockage d'énergie	16
I.8.1-c	Systèmes PV autonomes hybrides	16
I.8.2	Systèmes PV raccordés au réseau	17
I.9	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE	18
I.9.1	Avantages	18
I.9.2	Inconvénients	18
I.10	CONCLUSION	18
II	MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE	19
II.1	INTRODUCTION	20
II.2	PRÉSENTATION DU MODULE ALPV 250-P60	20
II.3	MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE	22
II.3.1	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	23
II.3.2	Equation et simulation de générateur électrique du panneau PV	23
II.3.3	Courant de saturation I_0	25
II.3.4	courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite) I_{rs}	25
II.4	CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	27
II.4.1	Caractéristiques (courant / tension)	27
II.4.2	Caractéristiques (puissance / tension)	28
II.5	ASSOCIATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES	29
II.5.1	Association séries des cellules	29
II.5.2	Association parallèle des cellules	30
II.5.3	Association hybride des cellules	31
II.6	INFLUENCE DE PARAMÈTRES SUR LA CARACTÉRISTIQUE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	32
II.6.1	Influence de l'éclairement	32
II.6.2	Influence de la température	33
II.6.3	Influence des résistances série	34
II.6.4	Influence des résistances parallèles	35
II.7	CONCLUSION	36
III	COMMANDE MPPT D'UN HACHEUR BOOST	37
III.1	INTRODUCTION	38
III.2	HACHEURS	38
III.2.1	Commande MLI d'un hacheur	39
III.2.1-a	Principe de la commande MLI	39
III.2.2	Types d'hacheurs	40
III.2.2-a	Hacheur Buck	41
III.2.2-b	Hacheur Boost	41
III.2.2-c	Hacheur Buck-Boost	42
III.2.2-d	Hacheur Ćuk	42
III.2.2-e	Hacheur SEPIC	42
III.3	SYSTÈME PV À BASE D'UN HACHEUR BOOST	43
III.3.1	Schéma du montage	43

III.3.2	Analyse de fonctionnement du Boost	44
III.3.2-a	Etat 1 : état de repos ; (S) fermé (Diode bloquée, Transistor passant)	44
III.3.2-b	Etat 2 : état de fonctionnement ; (S) ouvert (Diode passante, Transistor bloqué)	44
III.3.3	Calcul des composants du Boost [18]	45
III.3.4	Chronogrammes (pour 1 panneau PV)	46
III.3.5	Chronogrammes (pour 4 panneaux PV)	47
III.4	TECHNIQUE D'EXTRACTION DU MAXIMUM DE PUISSANCE MPPT	48
III.4.1	Principe de fonctionnement du MPPT	48
III.4.2	Algorithme de commande MPPT	49
III.4.2-a	Algorithme de P&O	50
III.5	SIMULATION D'UN SYSTÈME PV À BASE D'UN BOOST AVEC COMMANDE P&O	51
III.5.1	Résultats de la simulation	52
III.5.2	Interprétation des résultats	53
III.6	INSERTION D'UN BENCHMARK D'IRRADIATION SOLAIRE	53
III.7	COMMANDE FLOUE	55
III.7.1	Principe de fonctionnement	55
III.7.1-a	Fuzzification	56
III.7.1-b	Méthode d'inférence	56
III.7.1-c	Défuzzification	57
III.8	CONCLUSION	57
IV	SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE NON CONNECTÉ AU RÉSEAU	58
IV.1	INTRODUCTION	59
IV.2	STRUCTURE D'UN SYSTÈME PV NON RACCORDÉ AU RÉSEAU	59
IV.3	ÉTUDE DE L'ONDULEUR AUTONOME	60
IV.3.1	Structure de l'onduleur en pont	61
IV.3.2	Schéma du montage onduleur	61
IV.3.3	Analyse de fonctionnement	62
IV.3.4	Calcul tension/courant	62
IV.3.5	Chronogrammes	62
IV.4	DIFFÉRENTES STRUCTURES DE COMMANDE DE L'ONDULEUR	63
IV.4.1	Stratégie de commande	63
IV.4.2	Commande par MLI à Hystérésis	64
IV.5	SYNTHÈSE DES RÉGULATEURS DE BUS CONTINU	64
IV.5.1	Régulateur PI	65
IV.5.2	Régulateur IP	66
IV.6	ÉTUDE DES DIFFÉRENTS TYPES DE FILTRES	67
IV.6.1	Filtre L	67
IV.6.2	Filtre LC	67
IV.6.3	Filtre LCL	68
IV.7	INTRODUCTION DE LA CHARGE AU SYSTÈME	69
IV.8	RÉSULTATS DE SIMULATION ET INTERPRÉTATIONS	69

IV.8.1 Résultats de simulation	69
IV.8.2 Interprétations	70
IV.9 CONCLUSION	70
CONCLUSION GÉNÉRALE	71
BIBLIOGRAPHIE	75
ANNEXE A : TITRE ANNEXE A	1

TABLE DES FIGURES

I.1	Tendances de la puissance installée dans le monde [2]	5
I.2	Evolution des énergies renouvelables en Algérie à l'horizon 2030.	7
I.3	Effet photovoltaïque.	8
I.4	Constitution d'une cellule PV.	9
I.5	Principe de la cellule photovoltaïque [13]	10
I.6	Cellule PV en silicium monocristallin [16]	10
I.7	Cellule PV en silicium polycristallin [16]	11
I.8	Cellule PV en silicium amorphe [16]	11
I.9	Schéma équivalent d'une cellule idéale	12
I.10	Schéma équivalent d'une cellule réelle (modèle à une diode).	13
I.11	Circuit équivalent de la cellule réelle (modèle à deux diodes).	14
I.12	Classification des systèmes photovoltaïques.	14
I.13	Système photovoltaïque à connexion directe	15
I.14	Système photovoltaïque à connexion indirecte	15
I.15	Système photovoltaïque autonome sans stockage d'énergie	16
I.16	Système photovoltaïque autonome avec stockage d'énergie	16
I.17	Système photovoltaïque autonome hybrides	17
I.18	Système photovoltaïque raccordé au réseau	17
II.1	Panneau photovoltaïque modèle ALPV 250-P60	20
II.2	Organigramme simplifié de l'algorithme de calcul itératif	22
II.3	Système photovoltaïque	23
II.4	Modèle équivalent d'une cellule PV	23
II.5	Schéma bloc de simulation du photo-courant	24
II.6	Schéma bloc de simulation du courant à travers la résistance shunt.	24
II.7	Schéma bloc de simulation du courant de saturation.	25
II.8	Schéma bloc de simulation du courant de saturation inverse.	25
II.9	Schéma bloc de simulation du courant de sortie.	26
II.10	Schéma bloc de simulation du modèle PV.	26
II.11	Schéma bloc de simulation du modèle Photovoltaïque.	26
II.12	Caractéristique ($I - V$) d'un PV pour $G = 1000W/m^2$ et $T = 25C$	28
II.13	Caractéristique ($P - V$) d'un PV pour $G = 1000W/m^2$ et $T = 25C$	28
II.14	Association des panneaux photovoltaïque en série.	29
II.15	Caractéristique du groupement en série des cellules identiques.	29
II.16	Association des panneaux photovoltaïque en parallèle.	30
II.17	Association des panneaux photovoltaïque en parallèle.	30
II.18	Association des panneaux photovoltaïque en hybride.	31

II.19 Association des panneaux photovoltaïque en parallèle.	31
II.20 Comparaison entre la caractéristique $I - V$ pour différentes irradiances du modèle de simulation (a) et du modèle photovoltaïque ALPV-250-P60 (b).	32
II.21 Caractéristique $P - V$ pour différentes irradiances.	32
II.22 Comparaison entre la caractéristique $I - V$ pour différentes températures du modèle de simulation (a) et du modèle photovoltaïque ALPV-250-P60 (b).	33
II.23 Caractéristique $P - V$ pour différentes températures.	33
II.24 Influence de la résistance série sur la caractéristique $I - V$ d'une cellule solaire éclairée.	34
II.25 Influence de la résistance série sur la caractéristique $P - V$ d'une cellule solaire éclairée.	34
II.26 Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique $P - V$ d'une cellule solaire éclairée.	35
II.27 Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique $P - V$ d'une cellule solaire éclairée.	35
III.1 périodes de fermeture et d'ouverture d'un commutateur	38
III.2 Principe de la MLI	39
III.3 Différents types d'hacheurs	40
III.4 Schéma du montage du Buck	41
III.5 Schéma du montage du Boost	41
III.6 Schéma du montage du Buck-Boost	42
III.7 Schéma du montage du Ćuk	42
III.8 Schéma du montage du SEPIC	43
III.9 Schéma du montage PV+Boost	43
III.10 Schéma du Boost à l'état de repos	44
III.11 Schéma du Boost à l'état de fonctionnement	44
III.12 Chronogrammes du Boost pour 1 panneau PV	46
III.13 Chronogrammes du Boost pour 4 panneaux PV	47
III.14 schéma du principe du MPPT [12]	48
III.15 Schéma du principe de la méthode de P&O	50
III.16 Algorithme P&O	51
III.17 Schéma de simulation du système	51
III.18 Tension des panneaux PV	52
III.19 Courant des panneaux PV	52
III.20 Puissance des panneaux PV	52
III.21 Tension de charge	53
III.22 Insertion du Benchmark d'irradiation	53
III.23 Graphique du profil d'irradiation	54
III.24 Allure de la Puissance avec Benchmark	54
III.25 Allure de V_s avec Benchmark	54
III.26 Allure de V_c avec Benchmark	55
III.27 Structure du régulateur flou	56
III.28 Règles du contrôleur logique flou	56
III.29 Schéma bloc d'un contrôleur flou	57

IV.1	Structure d'un système PV autonome.	59
IV.2	Schéma du montage de l'onduleur à point milieu [26].	60
IV.3	Schéma du montage de l'onduleur en demi pont [26].	60
IV.4	Schéma du montage de l'onduleur en pont [26].	61
IV.5	Schéma du montage de l'onduleur en pont.	61
IV.6	Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI sinus-triangle).	62
IV.7	Allure de la tension à la sortie de l'onduleur.	63
IV.8	Allure du courant à la sortie de l'onduleur.	63
IV.9	Contrôle de courant par hystérésis.	64
IV.10	Régulateur de tension du bus continu.	64
IV.11	Structure du régulateur PI.	65
IV.12	Structure du régulateur IP.	66
IV.13	Structure du Filtre L.	67
IV.14	Structure du Filtre LC.	67
IV.15	Montage des filtres passifs <i>LC</i>	68
IV.16	Montage des filtres passifs <i>LC</i>	68
IV.17	Tension du bus continu par régulateur PI (a) et régulateur IP (b).	69
IV.18	Allure du courant de charge.	69
IV.19	Allure tension de charge.	70

Nomenclature

Les principales notations et abréviations utilisées dans ce document sont explicitées ci-dessous, sous leur forme la plus couramment employée dans le domaine du génie électrique.

Grandeurs électriques

Nom	Symbole	Unité
Courant de court-circuit (Short circuit current)	I_{sc}	A
Courant du panneau photovoltaïque	I_{pv}	A
Courant généré par la lumière incidente	I_{ph}	A
Courant de la diode	I_d	A
Courant de fuite de la diode	I_{rs}	A
Température de la cellule	T_c	K
Tension du panneau PV	V_{pv}	V
Rayonnement sur la surface de panneau PV	G	W/m^2
Tension en circuit ouvert	V_{oc}	V
Puissance maximale au PPM	P_{ppm}	W
Courant au PPM	I_{ppm}	A
Tension au PPM	V_{ppm}	V
Tension de la sortie du hacheur	V_c	V

Nom	Symbole	Unité
Nombre de cellules en série	N_s	/
Nombre de cellules en parallèle	N_p	/
Résistance en série de panneau solaire	R_s	Ω
Résistance en parallèle de panneau solaire	R_p	Ω
Rendement des cellules	η	/
Facteur de forme	FF	/
Capacité de la sortie du hacheur	C	μF
Résistance de la charge	R	Ω
Inductance de la charge	L	mH
Temps de commutation	T_s	s
Fréquence de commutation	f_s	Hz
Rapport cyclique	α	/
Ondulation du courant	ΔI	A
Ondulation de la tension	ΔV	V
Erreur	e	/
Variation de l'erreur	Δe	/
Variation du rapport cyclique	$\Delta \alpha$	/

Constantes

Nom	Symbole	Valeur	Unité
Charge de l'électron	q	$1,6e^{-19}$	C
Constante de Boltzmann	k	$1,38e^{-23}$	J/K
Température nominale de la jonction P-N	T_n	295,15	K
Rayonnement nominal sur la surface de panneau	G_{ref}	1000	W/m^2
Energie de la bande gap du semiconducteur	E_{g0}	1.1	eV

Glossaire

Acronyme	Signification
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur Photovoltaïque
PNEREE	Programme National de développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique
EnR	Energies Renouvelables
DC	Courant Continu (Direct Current)
AC	Courant Alternatif (Alternative Current)
GTO	Thyristor Blocable par la Gâchette (Gate Turn OFF Thyristor)
IGBT	Transistor Bipolaire à Grille Isolée (Insulated Gate Bipolar Transistor)
MOSFET	Transistor à Effet de Champ à Grille Isolée (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion (en anglais : Pulse Width Modulation ; PWM)
SEPIC	Single Ended Primary Inductor Converter
F.e.m	Force électromotrice
MPPT	Poursuite du point de puissance maximal (Maximal Power Point Tracking)
PPM	Point de puissance maximal
P&O	MPPT Perturber et Observer
ANN	Réseau de Neurones Artificiel (Artificial Neural Network)
NB	Grand négatif
NS	Petit négatif
ZE	Environs Zéro
PS	Petit positif
PB	Grand positif
FLC	Contrôleur de Logique Floue (Fuzzy Logic Controller)

Introduction générale

En préhistoire, l'homme utilisait la force musculaire, puis le feu et la force animale. Plus tard, l'homme a appris à exploiter l'énergie, la convertir en une forme utile et l'utiliser à diverses fins. Ceci dit, avant de discuter de la production et de la consommation mondiale d'énergie, il est prudent d'avoir une idée subjective sur l'énergie. Bien que de nombreuses personnes connaissent le terme « énergie », étonnamment, seules quelques personnes peuvent apprécier sa vraie nature.

Dans le langage courant, les termes associés à l'énergie sont souvent utilisés de manière erronée. L'énergie représente la base de la vie humaine. Il n'y a pratiquement aucune activité indépendante de l'énergie. Au cours des dernières décennies, l'énergie est devenue l'épine dorsale de la technologie et du développement économique. Sans compter les hommes, les machines et l'argent, "l'énergie" est désormais le quatrième facteur de production [34].

L'électricité devenant une nécessité quotidienne, sans énergie, aucune machine ne fonctionnera. Ainsi, les besoins énergétiques ont augmenté dans les années qui ont suivi la révolution industrielle. Cette énorme augmentation de la consommation d'énergie a créé des troubles dans « l'offre et la demande ». Cette demande énergétique mondiale croissante semble être satisfaite par le biais des combustibles fossiles. Or la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution, ajouté à cela, ils ne seront plus disponibles pour la production d'énergie dans quelques années.

C'est donc, un besoin mondial, aujourd'hui de se concentrer sur les sources d'énergie renouvelables pour satisfaire, exiger et conserver nos ressources naturelles limitées pour les générations à venir. Non polluantes, inépuisables, silencieuses et exigeant peu d'entretien, ces énergies sont devenues un sujet d'actualité. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie photovoltaïque, dont l'énergie électrique est produite par des panneaux photovoltaïques. Les principales applications des systèmes PV en utilisant ces panneaux sont soit dans des systèmes autonomes tels que le pompage de l'eau, l'éclairage domestique et rurale, les véhicules électriques, les applications militaires et spatiales ou configurations connectées au réseau comme les systèmes hybrides et les centrales électriques. Les recherches, toujours en cours

au jour d'aujourd'hui, dans le domaine de l'électronique de puissance, plus particulièrement les dispositifs de conversion de la puissance ont permis de concevoir de nouveaux schémas plus sophistiqués et moins encombrants améliorant par la même occasion leur rendement. Cela a une influence directe sur le rendement et le coût global du système photovoltaïque dans son ensemble.

L'électricité photovoltaïque présente une option économique intéressante pour des sites non raccordés au réseau de distribution centralisée. Lorsque les besoins à couvrir sont faibles, où l'absence d'une maintenance lourde constitue un avantage évident, les systèmes photovoltaïques trouvent alors leur pleine justification dans les régions rurales isolées et les pays en voie de développement. Elle permet de couvrir les besoins en électricité d'une habitation, tels que l'éclairage, le pompage de l'eau et la production du froid [3].

Notre objectif dans ce présent travail est l'étude d'un système photovoltaïque non connecté au réseau de distribution.

Le premier chapitre présentera, en premier lieu, l'évolution de l'énergie PV dans le monde puis l'Afrique et plus spécifiquement l'Algérie qui de par sa situation géographique (entre 36° et 42° de latitude Nord et entre 13° et 3° de latitude Est) favorise le développement et l'utilisation de l'énergie solaire, celle-ci bénéficie de conditions favorables pour la production et l'utilisation de l'énergie solaire d'origine photovoltaïque. En effet, l'introduction de ce type d'énergies peut être aisément envisageable sur de nombreux sites, vu son important potentiel solaire, notamment dans le grand sud, qui est caractérisé par de très forts apports solaires. Ensuite, nous présenterons des notions générales sur la technologie du photovoltaïque et les principales caractéristiques des cellules PV.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation et la simulation sous MATLAB/-simulink d'un panneau solaire selon différentes valeurs de température et d'éclairement.

Dans le troisième chapitre, les convertisseurs DC-DC et leur commande seront le sujet principal de l'étude. Ajoutons à cela, une étude des techniques de recherche du point de puissance maximale (MPPT).

Le dernier chapitre traitera la commande par MLI à hystérésis des onduleurs non connectés au réseau, en plus des régulateurs du bus de tension continue, puis l'insertion d'un filtre passif et d'une charge linéaire.

Chapitre I

Technologie des systèmes photovoltaïques

SOMMAIRE

I.1	INTRODUCTION	4
I.2	EVOLUTION DE L'ÉNERGIE PV	4
I.2.1	Dans le monde	4
I.2.2	En Algérie	6
I.2.3	En Afrique	7
I.3	EFFET PHOTOVOLTAÏQUE	8
I.4	CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	9
I.4.1	Constitution d'une cellule	9
I.4.2	Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	9
I.5	DIFFÉRENTS TYPES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES	10
I.5.1	Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin	10
I.5.2	Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin	11
I.5.3	Cellule au silicium amorphe	11
I.6	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DANS CHAQUE CELLULE	11
I.6.1	Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin	11
I.6.2	Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin	12
I.6.3	Cellule photovoltaïque en silicium amorphe	12
I.7	DIFFÉRENTS MODÈLES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	12
I.7.1	Cellule idéale	12
I.7.2	Cellule réelle	13
I.8	CLASSIFICATION DES SYSTÈMES	14
I.8.1	Systèmes PV autonomes	15
I.8.2	Systèmes PV raccordés au réseau	17
I.9	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE	18
I.9.1	Avantages	18
I.9.2	Inconvénients	18
I.10	CONCLUSION	18

I.1 Introduction

Il y a plusieurs types de sources d'énergies renouvelables, parmi elles : l'énergie éolienne, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Concernant les systèmes photovoltaïques, ce sont des sources d'énergie utilisées depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites.

Depuis peu, l'énergie solaire s'avère être l'une des solutions alternatives face à notre dépendance aux énergies fossiles, cette énergie propre et inépuisable permet de fournir dix mille fois plus d'énergie que celle consommée par toute la population mondiale (Funk, 2010). De ce fait, développer cette filière demeure une priorité pour de nombreux pays et ce afin d'y parvenir à un développement durable sur ces trois dimensions : économique, sociale et environnementale [21]

Le soleil source illimitée d'énergie pour l'humanité, est actuellement exploité par deux grandes voies technologiques : la thermique et le photovoltaïque. La filière thermique convertit le rayonnement solaire en énergie thermique permettant, entre autres, de produire de l'électricité, mais aussi de la chaleur ou du froid. La filière photovoltaïque, quant à elle, transforme directement le rayonnement solaire en électricité [32] .

I.2 Evolution de l'énergie PV

I.2.1 Dans le monde

La production solaire photovoltaïque a augmenté d'un record de 156 TWh (23 %) en 2020 pour atteindre 821 TWh. Il a démontré la deuxième plus grande croissance de production absolue de toutes les technologies renouvelables en 2020, légèrement derrière l'éolien et devant l'hydroélectricité. Les échéances politiques imminentes en Chine, aux états-Unis et au Viet Nam ont stimulé un boom sans précédent des ajouts de capacité PV - un record de 134 GW. L'énergie solaire photovoltaïque devient l'option la moins coûteuse pour la production d'électricité dans la majeure partie du monde, ce qui devrait stimuler les investissements dans les années à venir.

Cependant, le scénario de zéro émission nette d'ici 2050 montre une croissance annuelle moyenne de la production de 24% entre 2020 et 2030, ce qui correspond à 630 GW d'ajouts nets de capacité en 2030. Cette multiplication par près de cinq du déploiement annuel jusqu'en 2030 nécessitera une ambition politique beaucoup plus grande et d'avantage d'efforts de la part des acteurs publics et privés, en particulier dans les domaines de l'intégration du réseau et de l'atténuation des défis politiques, réglementaires et financiers, en particulier dans les pays émergents et en développement.

Le statut de suivi pour le solaire PV est donc passé de "en bonne voie" à "plus d'efforts nécessaires", reflétant l'ambition plus élevée du scénario net zéro par rapport au scénario de développement durable de l'année dernière.

On estime que la production d'électricité à partir du solaire photovoltaïque en 2020 a augmenté d'un record de 156 TWh, marquant une croissance de 23% par rapport à 2019. Le solaire photovoltaïque représentait 3,1% de la production mondiale d'électricité et reste la troisième plus grande technologie d'électricité renouvelable derrière l'hydroélectricité et l'onshore éolien après avoir dépassé la bioénergie en 2019.

La croissance record de la production d'électricité en 2020 a été provoquée par un boom des investissements mené par des développeurs se précipitant pour profiter de l'expiration des programmes de soutien en Chine, aux états-Unis et au Viet Nam. La Chine à elle seule était responsable de 75% de l'augmentation annuelle des installations solaires photovoltaïques de 2019 à 2020, car les projets contractés dans le cadre de l'ancien programme FIT de la Chine et ceux attribués lors d'enchères concurrentielles centrales ou provinciales précédentes devaient être connectés au réseau d'ici la fin de 2020.

Aux états-Unis, les promoteurs se sont empressés d'achever leurs projets avant l'expiration du crédit d'impôt à la production, bien qu'il ait été prolongé d'un an en décembre 2020. Au Viet Nam, la suppression progressive du FIT pour les projets solaires photovoltaïques a entraîné une ruée sans précédent sur les installations résidentielles. Parallèlement, le déploiement s'est également accéléré dans l'Union européenne, les pays intensifiant leurs efforts pour se mettre sur la bonne voie avec les objectifs climatiques de 2030. Dans l'ensemble, un record de 133 GW d'énergie solaire photovoltaïque a été installé dans le monde en 2020 [1].

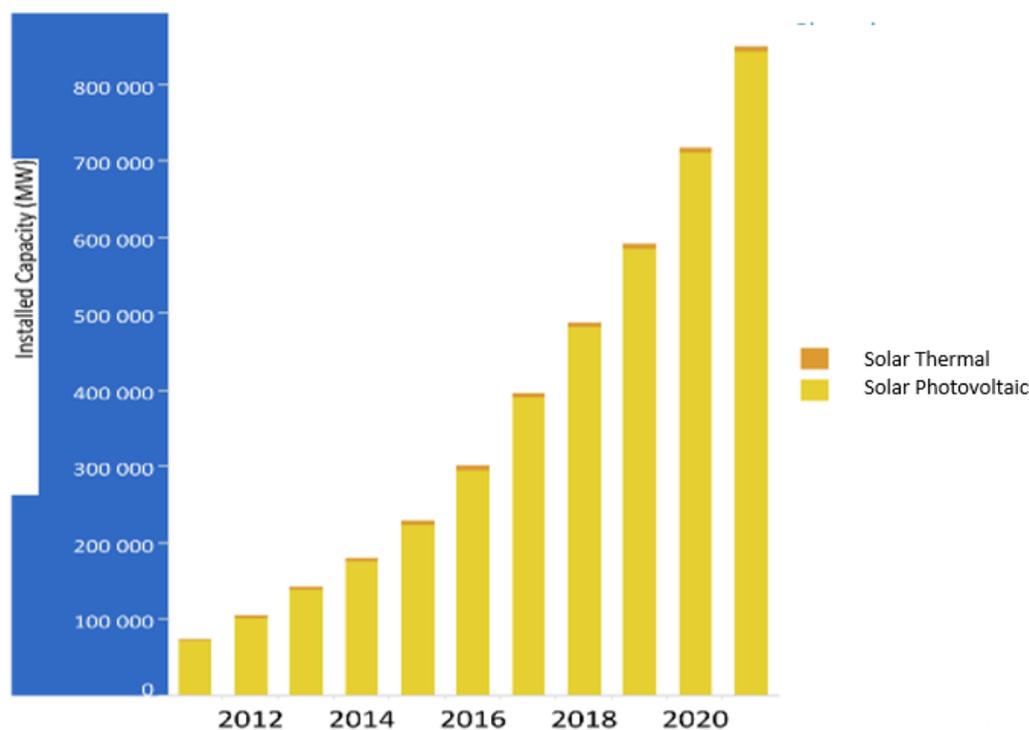


FIGURE I.1 – Tendances de la puissance installée dans le monde [2].

I.2.2 En Algérie

Nouveau projet d'électricité solaire de l'Algérie, l'appel d'offre vient d'être lancé et les candidats retenus seront connus au cours de l'année 2022. L'objectif est de produire 1000 MW d'électricité sur onze sites.

Annoncé fin 2020, l'appel d'offre pour la construction de centrales photovoltaïques en Algérie dans le cadre du plan « Solar 1000 MW » a été publié. L'ouverture des plis des offres aura lieu le 30 avril 2022.

C'est un projet qui vise à installer des centrales solaires plus ou moins importantes afin d'obtenir, à l'horizon 2035, une production électrique de 15 000 MW. Des centrales seront réparties sur le territoire national en lots de 50 MW pour les plus petites à 300 MW pour les plus grandes. Onze sites d'installation ont été retenus, entre autres Ghardaïa, Ouargla, Béchar. C'est la Société algérienne des énergies renouvelables qui les attribuera aux candidats sélectionnés lors de l'appel d'offre.

Malgré l'énorme potentiel du Sud algérien qui dispose d'un ensoleillement annuel de 3 000 heures en moyenne, le solaire ne représente que 3% de la production électrique du pays. Celle-ci est largement dévolue aux énergies fossiles et en particulier au gaz qui assurent 97% de la production. Mais pour répondre à une demande d'électricité en constante augmentation (+7% par an depuis 2010) et face à l'épuisement à terme de la ressource fossile, l'Algérie se devait de trouver une nouvelle ressource.

Alors que le pouvoir est toujours très suspicieux vis-à-vis de l'étranger, cette fois le projet est ouvert aux investissements étrangers. La garantie bancaire réclamée aux candidats non algériens s'élève à un demi-million de dollars, une somme à la hauteur des investissements qu'impose la production d'électricité solaire.

Il faut de l'argent, il faut aussi une expertise dans le domaine dont ne dispose pas à grande échelle l'Algérie. En ce sens, l'appel d'offre est sans ambiguïté, il n'y a aucune place pour l'amateurisme. Le candidat doit justifier « de références avérées dans le développement et le montage de projets de centrales de production indépendante d'électricité de sources renouvelables ». L'Algérie avait déjà lancé en 2011 le Programme national de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (PNEREE). Le projet voyait grand : 22 gigawatts de production dont la moitié destinée à l'export à l'horizon 2030. Près de la moitié de la production électrique devait être assurée par le solaire. En fait, seules trois centrales ont été construites, n'atteignant même pas une puissance cumulée de 40 MW. Il y eut également le projet Desertec, en collaboration avec l'Allemagne. Ce projet international envisageait d'installer des dizaines de centrales solaires dans les déserts d'Afrique du Nord et du Proche-Orient et d'exporter l'électricité vers l'Europe. Mais le coût faramineux du projet, estimé à 450 milliards de dollars, dont 50 pour le seul transport de l'électricité, a vite fait de calmer les esprits. Aujourd'hui, si la fondation Desertec existe toujours, elle semble en sommeil. Selon Boukhalifa Yaïci, un acteur de la filière solaire cité par TSA, les conditions sont enfin réunies en Algérie pour développer le secteur.

"En juin 2020, il y a eu la mise en place d'un ministère dédié à la transition énergétique et aux énergies renouvelables. Cela a été le premier acte politique qui a permis de donner un signal important." Cette fois, il s'agit pour Alger de réussir ce plan. Pour répondre à la consommation électrique, mais aussi pour rattraper son retard avec le voisin marocain, champion africain de l'énergie solaire [23] .

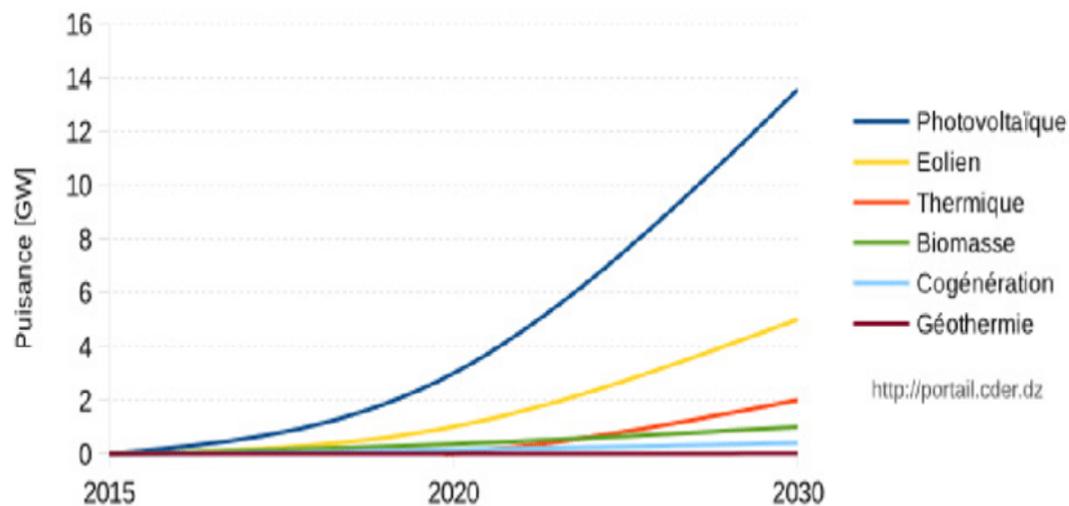


FIGURE I.2 – Evolution des énergies renouvelables en Algérie à l'horizon 2030.

I.2.3 En Afrique

L'année 2021 a vu se réaliser et se lancer de nombreux projets solaires en Afrique. Malgré les difficultés inhérentes à l'instabilité des réseaux nationaux, au coût élevé de l'électricité, aux réglementations nationales et aux subventions des énergies fossiles, le photovoltaïque est dans la ligne de mire du développement énergétique de nombreux pays. Le secteur CI concentre les principaux investissements et le solaire hors réseau reste résilient malgré la crise. L'hydrogène vert pourrait également profiter du développement des EnR.

L'Afrique possède 40% du potentiel solaire mondial, mais seulement 1% des panneaux solaires de la planète. Plusieurs défis restent à relever pour développer le solaire de manière efficace et à grande échelle. Parmi eux on note l'instabilité des réseaux nationaux, le coût élevé de l'électricité, les réglementations nationales ou encore les subventions bénéficiant aux énergies fossiles. A date, sur tout le continent, seuls l'Afrique du Sud et l'Egypte rejoignent le groupe des 37 pays du monde ayant déjà installé plus d'1 GW de solaire.

L'un des pays les plus attendus est l'Algérie, avec un pipeline de 4 GW qui a été annoncé depuis plusieurs années. D'après l'association des professionnels du solaire en Afrique, AFSIA, « avec de nouvelles institutions et de nouveaux responsables en en place, il est raisonnable de penser que ce plan (ou une partie de celui-ci) pourrait enfin avancer et que le pays riche en gaz pourra se lancer très rapidement dans des projets solaires ». A date, l'appel d'offre pour 1 GW prévu initialement pour la fin octobre est toujours attendu.

Ailleurs, l'année 2021 a vu se réaliser et naître de nombreux projets solaires et les acteurs français ne sont pas en reste dans le développement du marché photovoltaïque africain, comme l'a démontré le 5ème round du programme sud-africain d'achat indépendant d'énergie renouvelable (REIPPPP) où Engie, TotalEnergies et EDF Renewables ont remporté 729 MWh de projets solaires et éoliens. « Il y a de plus en plus d'appel d'offres qui eux-mêmes sont de plus en plus élaborés dans beaucoup de pays. Cependant les programmes peuvent se geler par la suite à cause de difficultés financières ou des problématiques de réseau », souligne Dennis Viennot, le dirigeant d'AltRaise Advisory, une société de conseil française qui a accompagné près de 300 millions d'euros d'opération dans la région depuis 2017 [17] .

I.3 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse (Photons) des rayons solaires en électricité, par le biais du déplacement de charges électriques dans un matériau semi-conducteur (Silicium).

Lorsque les photons heurtent une surface mince de ce matériau, 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.

Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique.

La première utilisation de cellules photovoltaïques ne date pas d'hier, En 1883, des chercheurs américains mettent au point les premières cellules et montent le tout premier toit solaire, sur un immeuble de New-York. Pas encore opérationnelles à l'époque, il faudra attendre 1954 pour que les ancêtres des cellules photovoltaïques au silicium voient le jour, au cœur d'un laboratoire de la compagnie Bell, laissant entrevoir une possibilité d'une fourniture en électricité prometteuse [17] .

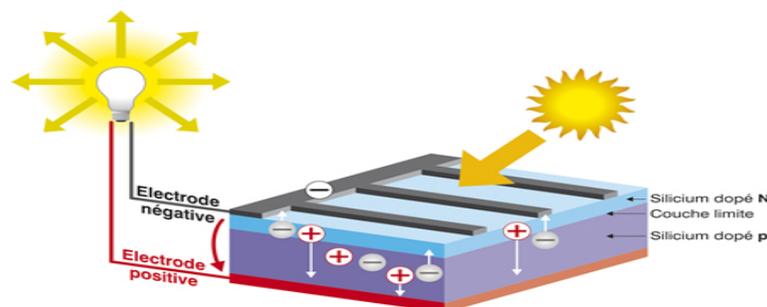


FIGURE I.3 – Effet photovoltaïque.

I.4 Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. La cellule la plus répandue est celle à base de silicium monocristallin. Son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu.

I.4.1 Constitution d'une cellule

- Une couche semi-conductrice.,
- Une couche antireflet pour la pénétration maximale des rayons solaires.,
- Une grille conductrice.
- Les plus récents possèdent une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants pour permettre à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [3]

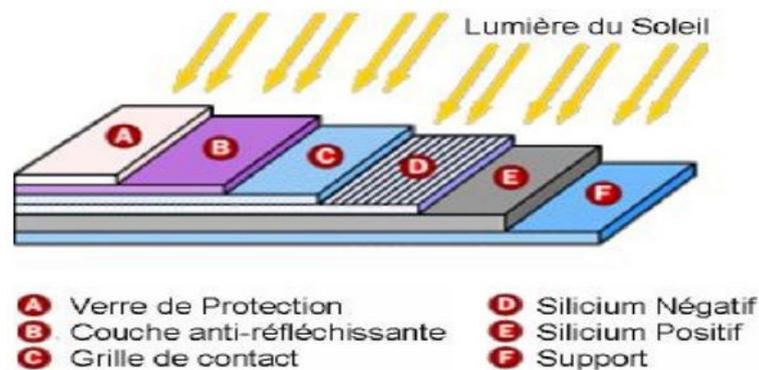


FIGURE I.4 – Constitution d'une cellule PV.

I.4.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique.

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche antireflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface [13]

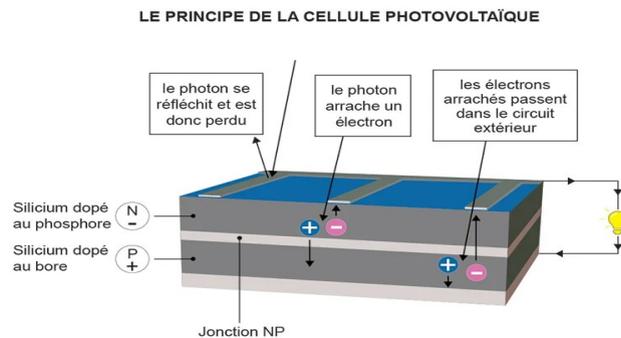


FIGURE I.5 – Principe de la cellule photovoltaïque [13]

I.5 Différents types de cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Parmi ces types de cellule on peut citer :

I.5.1 Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

Ce type de cellule photovoltaïque est l'une des plus répandues. Elle est obtenue à partir de silicium monocristallin, appliqué en une tranche simple. Elle permet de composer des panneaux solaires qui vont produire de l'électricité servant à alimenter une habitation ou le réseau public, par exemple.



FIGURE I.6 – Cellule PV en silicium monocristallin [16]

I.5.2 Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin

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



FIGURE I.7 – Cellule PV en silicium polycristallin [16]

I.5.3 Cellule au silicium amorphe

La cellule photovoltaïque au silicium amorphe est composée d'une couche fine de silicium, bien plus fine que les monocristallines ou les polys cristallins. On la trouve essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance, comme les montres solaires, les éclairages de jardin ou encore les calculatrices solaires.



FIGURE I.8 – Cellule PV en silicium amorphe [16]

I.6 Avantages et inconvénients dans chaque cellule

I.6.1 Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

Cette cellule photovoltaïque offre un rendement d'environ 25%, l'un des meilleurs sur le marché. La durée de vie des panneaux solaires composés de cellules en silicium monocristallin avoisine les 30 ans, ce qui est très rentable, malgré le coût élevé à l'achat. L'inconvénient de ce type de cellule solaire est qu'elle offre un rendement très faible lorsqu'il n'y a pas assez de soleil. Elle convient donc mieux aux régions les plus ensoleillées.

I.6.2 Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin

La fabrication de ce type de cellule photovoltaïque est plus simple que la version en silicium monocristallin. Son coût est donc moindre. Côté rendement du panneau solaire, on peut espérer entre 10 et 15%, ce qui est nettement inférieur aux cellules monocristallines. Elle a cependant l'avantage de pouvoir être utilisée par temps nuageux, ceci grâce à sa flexibilité d'irradiation.

I.6.3 Cellule photovoltaïque en silicium amorphe

Cette cellule solaire présente de nombreux avantages. Elle est tout d'abord peu chère à fabriquer. Elle peut aussi être intégrée sur tout type de support, flexible ou rigide. Un autre point positif est qu'elle capte les rayons solaires même par temps nuageux. Son principal inconvénient est qu'elle offre un faible rendement, environ 7% au maximum. Pour être rentable, il faut donc que la surface du panneau solaire soit conséquente. De même, ses performances diminuent dans le temps.

I.7 Différents modèles d'une cellule photovoltaïque

I.7.1 Cellule idéale

Le schéma équivalent le plus simple de la cellule photovoltaïque à jonction PN idéale comprend une source de courant I_{ph} , qui modélise le courant photoélectrique, associée à une diode en parallèle qui modélise la jonction P-N dont la polarisation détermine la tension (Figure I.9) [19].

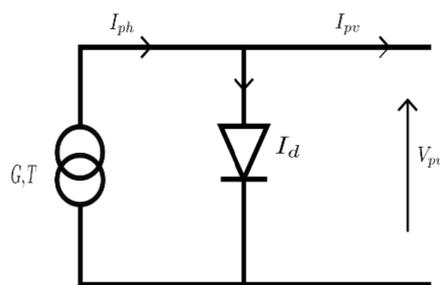


FIGURE I.9 – Schéma équivalent d'une cellule idéale .

Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{I.1})$$

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{sc} avec $V_{pv} = 0$, courant de court-circuit obtenu en court circuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{G}{G_{ref}} \quad (\text{I.2})$$

Le courant aux bornes de la diode :

$$I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{V_d}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{I.3})$$

La tension thermique :

$$V_t = \frac{N \times K \times T}{q} \quad (\text{I.4})$$

I.7.2 Cellule réelle

I.7.2-a Modèle à une diode

Le modèle à une diode est le modèle le plus simple et le plus utilisé pour les cellules PV (Figure I.10). Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire est constitué d'une diode et d'une source de courant connectées en parallèle. La source de courant génère le photo-courant I_{ph} qui est directement proportionnel à l'irradiance solaire $G_s [W/m^2]$, à la température ambiante $T_a [C]$ et à deux paramètres de sortie : le courant $I_s [A]$ et la tension $V_s [V]$. La zone de transition p-n de la cellule solaire équivaut à une diode [19].

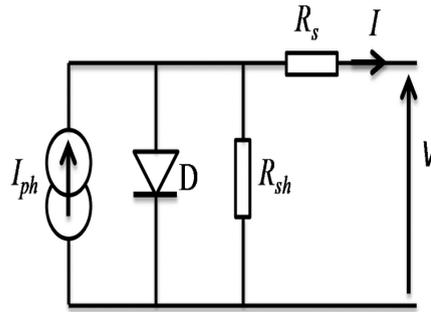


FIGURE I.10 – Schéma équivalent d'une cellule réelle (modèle à une diode).

R_s : Résistance série, due essentiellement aux pertes par effets Joule à travers les grilles de collectes et la résistance propre des semi-conducteurs, ainsi qu'aux mauvais contacts (Semi - conducteur, électrodes).

R_{sh} : Résistance parallèle, dite " Shunt ", provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'à la non idéalité de la jonction PN.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante : [5]

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\left(\frac{q(V + R_s I)}{AKT} \right)} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{I.5})$$

I.7.2-b Modèle à deux diodes

Il existe d'autres modèles de cellules photovoltaïques qui prennent en compte davantage de phénomènes physiques pour offrir une meilleure précision telle que le modèle à deux diodes [18]

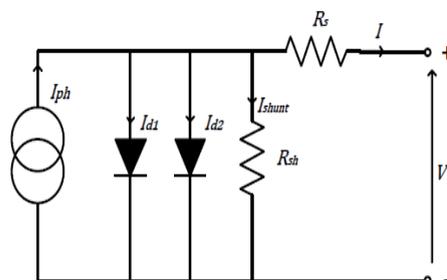


FIGURE I.11 – Circuit équivalent de la cellule réelle (modèle à deux diodes).

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \quad (\text{I.6})$$

Les courants des diodes sont donnés par :

$$I_{d1} = I_{s1} \times \left[e^{\left(\frac{q(V+RI)}{A_1 K T} \right)} - 1 \right] \quad (\text{I.7})$$

$$I_{d2} = I_{s2} \times \left[e^{\left(\frac{q(V+RI)}{A_2 K T} \right)} - 1 \right] \quad (\text{I.8})$$

L'équation mathématique de ce modèle est comme suit :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \times \left[e^{\left(\frac{q(V+RI)}{A_1 K T} \right)} - 1 \right] - I_{s2} \times \left[e^{\left(\frac{q(V+RI)}{A_2 K T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{I.9})$$

I.8 Classification des systèmes

On appelle système photovoltaïque l'ensemble des composants nécessaires à l'alimentation d'une application en toute fiabilité. Les systèmes PV peuvent être classifiés en deux grandes catégories : autonomes, et connectés (raccordés) au réseau. Ces catégories peuvent fonctionnellement être subdivisées comme suit.

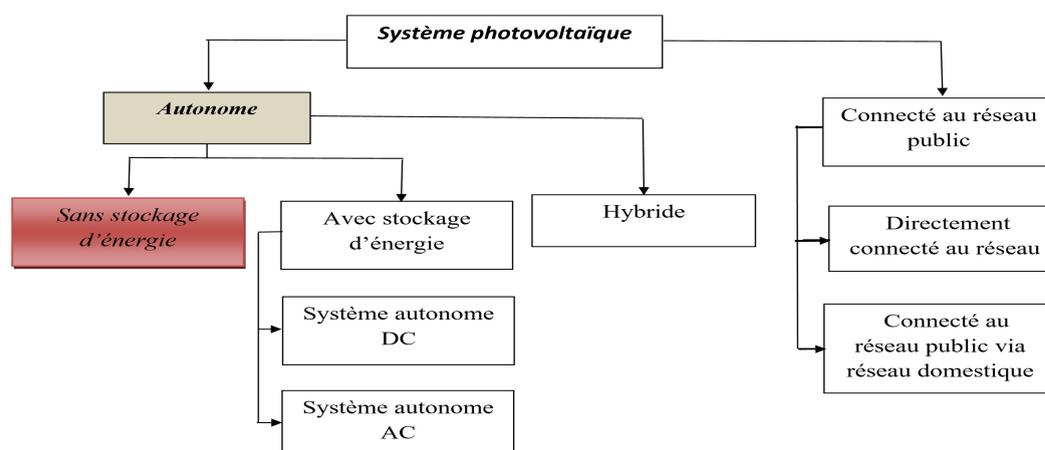


FIGURE I.12 – Classification des systèmes photovoltaïques.

I.8.1 Systèmes PV autonomes

Le but de cette installation est d'assurer l'énergie demandée par la charge en tout temps. Ce type d'installation est utilisée dans des endroits qui ne sont pas connectés au réseau, citons par exemple : les sites isolés (îles, en montagnes, désert), les éclairages publics. Deux types de connexion sont distingués : directe et indirecte. Dans la configuration directe illustrée par la Figure I.13, une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit à effectuer le transfert d'énergie du générateur photovoltaïque à la charge. L'inconvénient majeur de cette connexion est la dépendance entre la puissance fournie par le générateur et la charge [31]

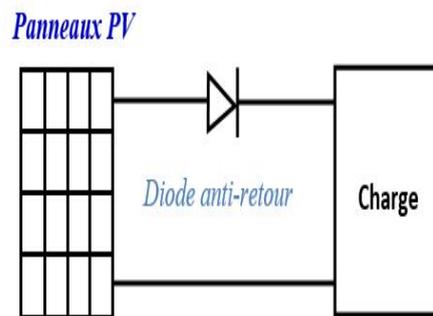


FIGURE I.13 – Système photovoltaïque à connexion directe

Dans la connexion indirecte montrée par la Figure I.14, un dispositif d'adaptation (convertisseur DC/DC) muni d'un régulateur MPPT est introduit pour optimiser la production d'énergie à chaque instant.

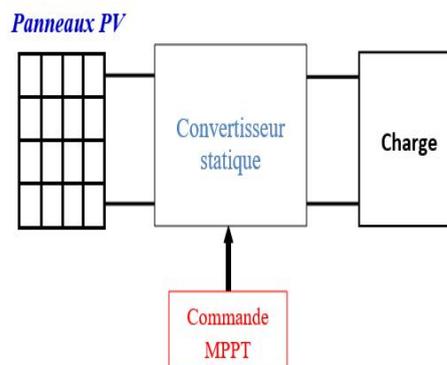


FIGURE I.14 – Système photovoltaïque à connexion indirecte

I.8.1-a Systèmes PV autonomes sans stockage d'énergie

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence de lumière et dès que l'éclairage sera suffisant pour atteindre la puissance demandée [6]

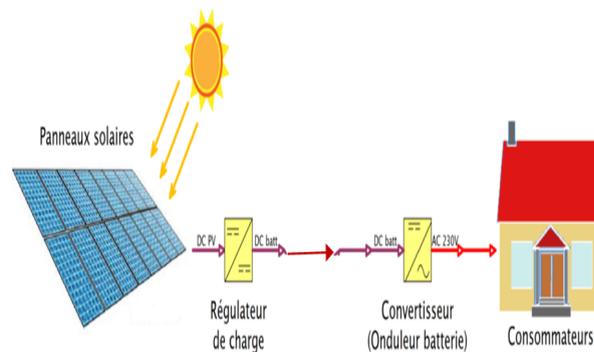


FIGURE I.15 – Système photovoltaïque autonome sans stockage d'énergie

I.8.1-b Systèmes PV autonomes avec stockage d'énergie

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes que les anglophones appellent « stand-alone systems ». L'ensemble est le plus souvent en courant continu (DC), ce qui est préférable car plus simple. Mais dès que l'on touche à l'habitat, il y a presque toujours des appareils en courant alternatif (AC) à alimenter [6]

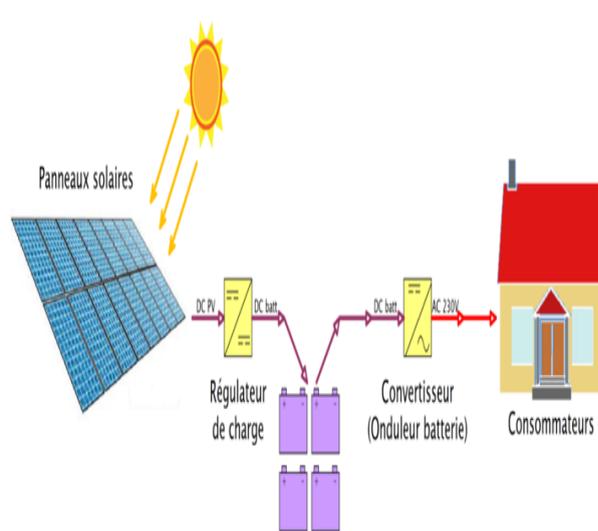


FIGURE I.16 – Système photovoltaïque autonome avec stockage d'énergie

I.8.1-c Systèmes PV autonomes hybrides

Avoir un système hybride, c'est disposer d'une autre source d'électricité autonome qui vient compléter l'apport photovoltaïque. Cette autre source peut être un groupe électrogène ou une génératrice éolienne [6]

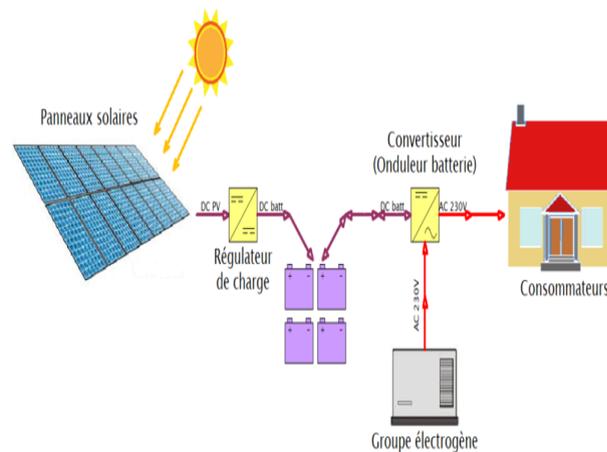


FIGURE I.17 – Système photovoltaïque autonome hybrides

I.8.2 Systèmes PV raccordés au réseau

Les panneaux solaires photovoltaïques peuvent être raccordés au réseau de distribution électrique. Ce raccordement ne peut se faire qu'après transformation, à l'aide d'un onduleur spécifique, du courant continu en courant alternatif adapté aux caractéristiques du réseau. L'énergie produite par les panneaux est soit consommée sur place par l'utilisateur (et le surplus est injecté sur le réseau), soit injectée en totalité dans le réseau électrique sans limite quantitative [7]. L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local ou national. Et ceci sans limite quantitative, donc toute l'énergie est récupérée. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif au travers d'un onduleur et celui-ci doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant. Car il doit respecter des normes sur sa qualité « sinusoïdale ». Ces systèmes ne sont pas des alimentations de secours en cas de coupure du réseau, car ils ne comportent aucune réserve d'énergie. Dans certains cas, on ajoute au système une batterie de secours pour les coupures de courte durée [27].



FIGURE I.18 – Système photovoltaïque raccordé au réseau

I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.9.1 Avantages

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages.

1. La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
2. Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
3. L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
4. La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
5. L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
6. Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
7. La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

I.9.2 Inconvénients

Malheureusement il existe quelques inconvénients.

1. Production d'énergie, qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
2. Le coût très élevé de l'électronique de puissance.
3. Faible rendement de conversion.
4. S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
5. Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'attendrir, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication.

I.10 Conclusion

Ce chapitre est une introduction à l'étude de l'énergie photovoltaïque et son évolution au cours des années à travers le monde et surtout en Algérie. La technologie « système photovoltaïque » rencontre un succès croissant afin de nourrir une campagne dite « moins de pollution, plus d'énergie propre » ainsi, nous avons présenté un aperçu de cette technologie en passant par définitions, explications et présentation de tout ce qui constitue cette technologie sans oublier les avantages et les inconvénients.

Le prochain chapitre sera l'hôte d'une modélisation et simulation d'un module photovoltaïque ainsi qu'une brève comparaison entre un modèle réel et un modèle idéal conçu pour la simulation.

Chapitre II

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

SOMMAIRE

II.1	INTRODUCTION	20
II.2	PRÉSENTATION DU MODULE ALPV 250-P60	20
II.3	MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE	22
II.3.1	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	23
II.3.2	Equation et simulation de générateur électrique du panneau PV	23
II.3.3	Courant de saturation I_0	25
II.3.4	courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite) I_{rs}	25
II.4	CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	27
II.4.1	Caractéristiques (courant / tension)	27
II.4.2	Caractéristiques (puissance / tension)	28
II.5	ASSOCIATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES	29
II.5.1	Association séries des cellules	29
II.5.2	Association parallèle des cellules	30
II.5.3	Association hybride des cellules	31
II.6	INFLUENCE DE PARAMÈTRES SUR LA CARACTÉRISTIQUE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	32
II.6.1	Influence de l'éclairement	32
II.6.2	Influence de la température	33
II.6.3	Influence des résistances série	34
II.6.4	Influence des résistances parallèles	35
II.7	CONCLUSION	36

II.1 Introduction

Etant un sujet d'actualité, l'énergie photovoltaïque suscite l'intérêt des adeptes d'énergies inépuisables, propres et silencieuses. La modélisation et la caractérisation électriques des panneaux photovoltaïques actuellement commercialisés sont nécessaires afin d'optimiser le fonctionnement des systèmes photovoltaïques utilisant ces panneaux PV. Ceci peut réduire d'une manière considérable le coût de l'installation PV et augmenter le rendement des générateurs PV. Le problème majeur de la production d'énergie électrique par cette technique est le fonctionnement optimal des panneaux (modules) PV. Cependant, le développement des systèmes de conversion rentables et économiquement viables, passe nécessairement par la compréhension des différents composants du système, à leur tête le module solaire PV. Ce dernier est composé de plusieurs cellules solaires qui nécessitent étude et compréhension.

Dans ce chapitre on va réaliser un modèle mathématique d'un système photovoltaïque pour l'intégrer au sein d'une chaîne de production d'énergie renouvelable. Ce modèle est basé sur les valeurs nominales fournies par le constructeur (modèle ALPV 250-P60) à savoir la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit, la tension et le courant correspondant au point de puissance maximal. Le modèle ainsi obtenu offre la possibilité de mieux prendre en compte l'influence de diverses grandeurs physiques telles que la température, l'éclairement et le changement des valeurs des résistances (série et parallèle). Après une vue d'ensemble du système PV, ce mémoire détaille, par la suite, la modélisation du panneau photovoltaïque et l'étude des caractéristiques (courant-tension) et (puissance-tension) en fonction de la température et de l'éclairement.

II.2 Présentation du module ALPV 250-P60

Nous avons pris comme référence le module PV de type ALPV 250-P60, illustré dans la figure II.1, disponible dans Laboratoire d'Automatique de Tlemcen (LAT).

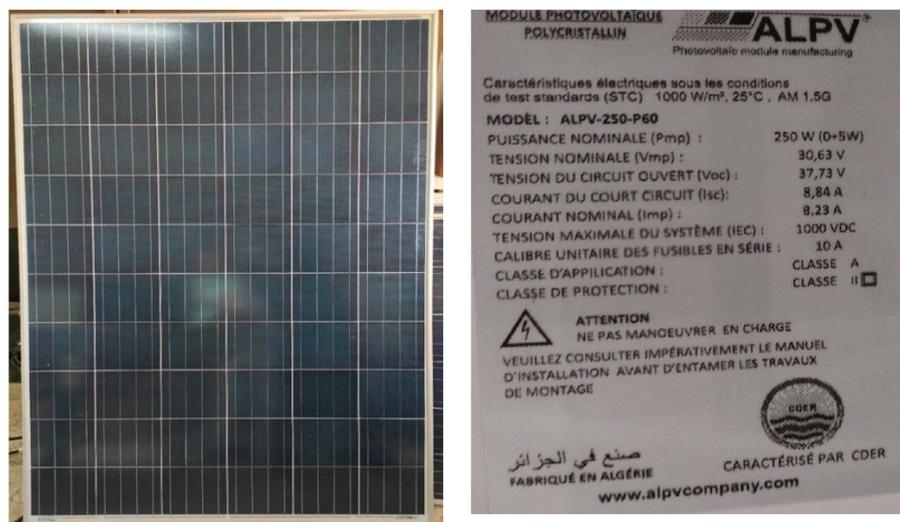


FIGURE II.1 – Panneau photovoltaïque modèle ALPV 250-P60

Les caractéristiques du ALPV 250-P60 seront présentées dans le tableau suivant.

Grandeurs	Valeurs
Puissance nominale $P_{mp}(W)$	250
Tension a puissance maximale $V_{mp}(V)$	30.55
Courant à puissance maximale $I_{mp}(A)$	8.19
Tension en circuit-ouvert $V_{oc}(V)$	36.67
Courant de court-circuit $I_{sc}(A)$	8.69
Nombre de cellule en série N_s	60
Nombre de cellule en parallèle N_p	1
Eclairement $G(W/m^2)$	1000
Température de la cellule $T(C)$	25
Coefficient de température de $V_{oc}(C)$	-0.38%
Coefficient de température de $I_{sc}(C)$	+0.04%

Mais, quelques paramètres nécessaires à l'ajustement des modèles des panneaux PV, ne sont pas fournis par les fabricants comme le courant généré par la lumière I_{ph} , la résistance en série R_s et en parallèle R_p , le courant de saturation inverse de la diode I_{rs} et l'énergie de la bande gap du semi-conducteur E_{g0} . Le courant généré par la lumière et le courant de saturation inverse de la diode sont calculés à partir des équations (II.4) et (II.9) respectivement.

Il y plusieurs méthodes pour déterminer la résistance série et parallèle [18] mais nous allons suivre la méthode itérative qui consiste à faire varier R_s et R_p jusqu'à ce que la courbe $I - V$ corresponde aux données du constructeur. Le processus d'itération ajuste R_s et R_p de façon à atteindre P_{mp} [35].

La relation entre R_s et R_p est comme suit :

$$R_p = \frac{V_{mpp}(V_{mpp} + R_s I_{mpp})}{V_{mpp} I_{ph} - V_{mpp} I_d - P_{mpp}} \quad (\text{II.1})$$

L'équation (II.1) signifie que pour toute valeur de R_s , il y aura une valeur de R_p qui fait que la courbe mathématique $I - V$ croise le point expérimental (V_{mp}, I_{mp}) [18].

Durant ce processus, R_s est lentement incrémenté en commençant par la valeur $R_s=0\Omega$ comme valeur initiale, ce qui nous donne la valeur initiale de R_p comme suit :

$$R_{p,\min} = \frac{V_{mpp}}{I_{sc,n} - I_{mpp}} - \frac{V_{oc,n} - V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (\text{II.2})$$

L'algorithme de calcul est illustré par la Figure II.2 :

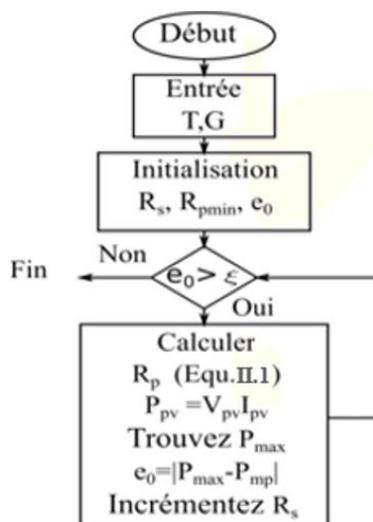


FIGURE II.2 – Organigramme simplifié de l'algorithme de calcul itératif

La méthode itérative donne la solution suivante :

R_s : Résistance séries = 0.133Ω

R_p : Résistance parallèle = 391.8674Ω

Pour $A = 1.088614$.

II.3 Modélisation et simulation d'un module photovoltaïque

La modélisation est l'outil de base de la simulation d'un système réel. Pour la modélisation, il est nécessaire d'analyser l'influence de différents facteurs sur les cellules photovoltaïques et de prendre en considération les caractéristiques données par les producteurs. Les modèles mathématiques pour les cellules photovoltaïques sont basés sur les équations théoriques qui décrivent le fonctionnement des cellules photovoltaïques et peuvent être développés en utilisant le circuit équivalent des cellules photovoltaïques. Les modèles empiriques reposent sur différentes valeurs extraites de la caractéristique $I - V$ des cellules photovoltaïques et approximent l'équation caractéristique des panneaux solaires à l'aide d'une fonction analytique. Pour la modélisation des systèmes photovoltaïques, nous analysons l'influence de différents facteurs sur les panneaux solaires et considérons les caractéristiques données par les producteurs. Les modèles mathématiques pour les GPV sont basés sur les équations théoriques qui décrivent le fonctionnement des cellules PV et peuvent être développés en utilisant le circuit équivalent des cellules PV. Les modèles empiriques reposent sur différentes valeurs extraites de la courbe $I - V$ des générateurs PV et ils se rapprochent de l'équation caractéristique des panneaux solaires à l'aide d'une fonction analytique. Il existe de nombreux modèles de cellule photovoltaïque.

Le système photovoltaïque est contrôlé par la commande MPPT comme le montre la figure II.3

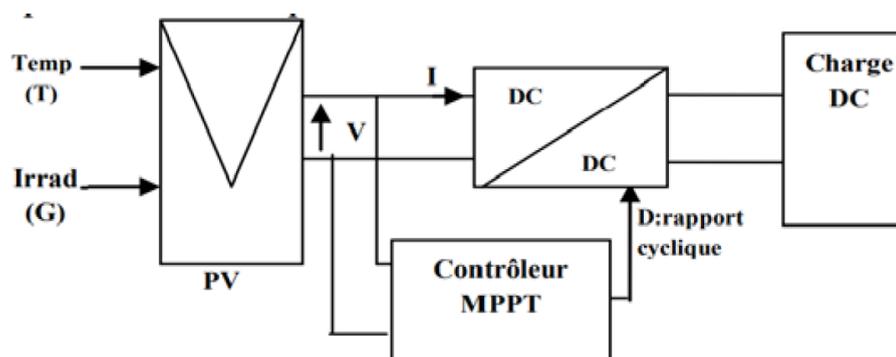


FIGURE II.3 – Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque se compose de quatre blocs, le premier bloc représente la source d'énergie (panneau photovoltaïque) dont le rôle est de convertir l'éclairement en courant continu, le second bloc est un convertisseur statique continu-continu qui permet de faire une adaptation d'impédance de sorte que le panneau délivre le maximum d'énergie. Le troisième bloc représente le système de contrôle MPPT basé sur un algorithme qui permet d'agir sur le rapport cyclique pour extraire en permanence la puissance maximale. Le quatrième bloc représente la charge [19].

II.3.1 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Une cellule PV peut être modélisée par circuit électrique donné par la figure II.4

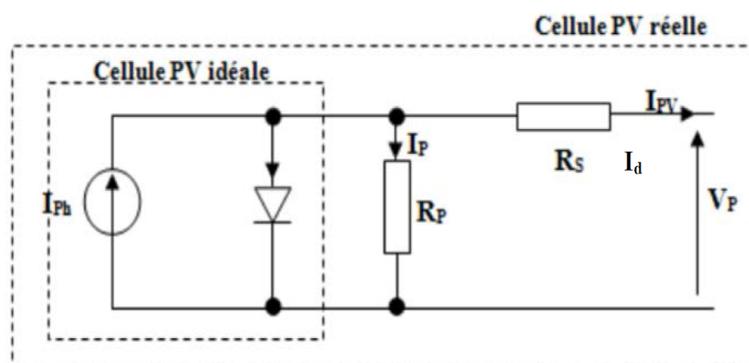


FIGURE II.4 – Modèle équivalent d'une cellule PV

II.3.2 Equation et simulation de générateur électrique du panneau PV

Dans la figure II.4 En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant sera obtenu par l'équation suivante

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{II.3})$$

Avec :

I_{ph} : Photo-courant (courant généré par la lumière).

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - T_n)] \times \frac{G}{G_n} \quad (\text{II.4})$$

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - 298)] \times \frac{G}{1000} \quad (\text{II.5})$$

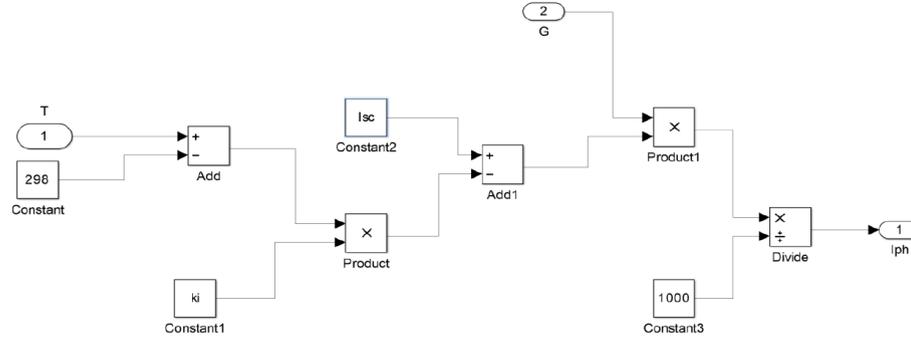


FIGURE II.5 – Schéma bloc de simulation du photo-courant

avec

K : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$)

T_c : est une température de cellule en Kelvin (K)

G : Ensoleillement

A : est un facteur idéal

I_p : courant qui circule dans la résistance parallèle, est donnée par l'équation suivante :

$$I_p = \frac{V_p + I_{pv} \times R_s}{R_p} \quad (\text{II.6})$$

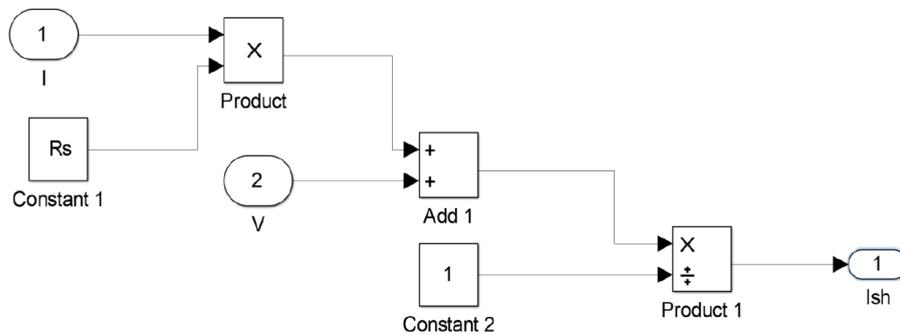


FIGURE II.6 – Schéma bloc de simulation du courant à travers la résistance shunt.

I_d : le courant de la diode qui est proportionnel au courant de saturation, il est donné par l'équation suivante :

$$I_d = I_s \times \left[\exp \left(\frac{q \times (V + R_s I)}{K \times T_c \times A} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.7})$$

II.3.3 Courant de saturation I_0

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \times \exp \left[\frac{q \times E_{g0}}{K \times A} \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_n} \right) \right] \quad (\text{II.8})$$

T_n : Température nominale = 298 k

E_{g0} : Energie de Gap de la cellule = 1.1 (eV)

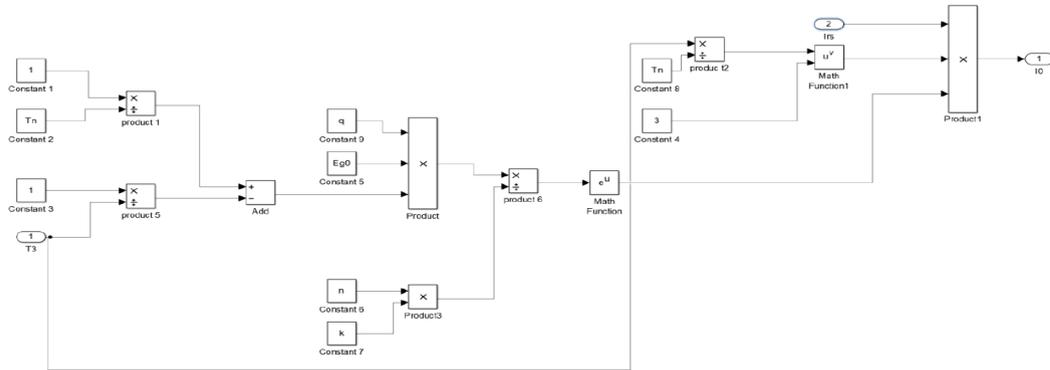


FIGURE II.7 – Schéma bloc de simulation du courant de saturation.

II.3.4 courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite) I_{rs}

Son expression est donnée par l'équation

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q \times V_{oc}}{n \times N_s \times K \times T} \right)} - 1} \quad (\text{II.9})$$

V_{oc} : Tension de circuit ouvert nominale (V)

N_s : Nombre de cellule connectée en série

n : Facteur de qualité de diode = 1.3

K : Constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$

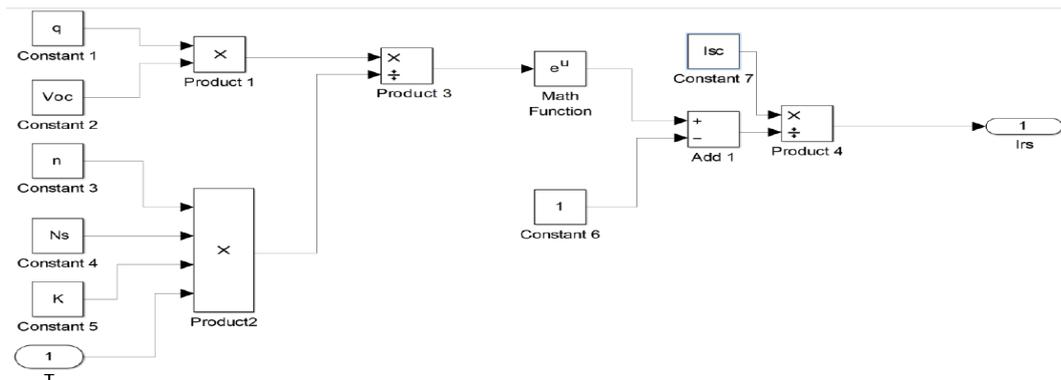


FIGURE II.8 – Schéma bloc de simulation du courant de saturation inverse.

Donc l'équation du courant d'une cellule photovoltaïque peut se mettre comme suit

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q \times (V + R_s I)}{n \times K \times N_s \times T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (II.10)$$

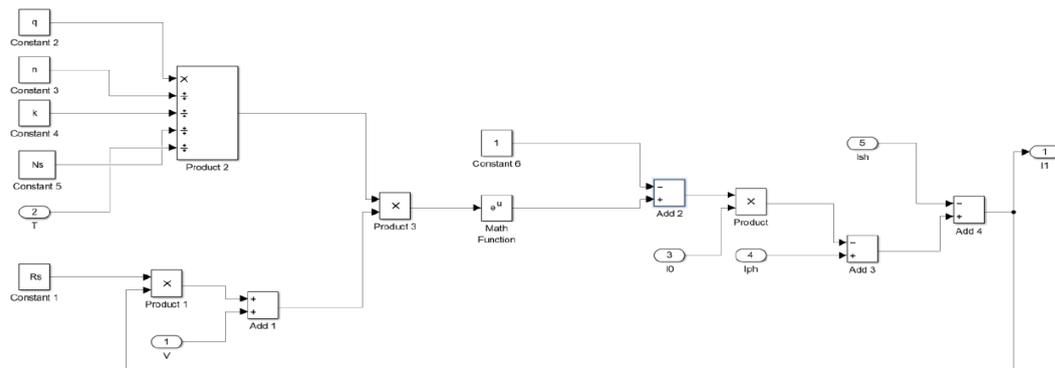


FIGURE II.9 – Schéma bloc de simulation du courant de sortie.

On a construit le modèle d'une cellule photovoltaïque réelle (Figure II.10 et figure II.11), contient toutes les équations qui décrivent le fonctionnement du module ALPV 250-P60.

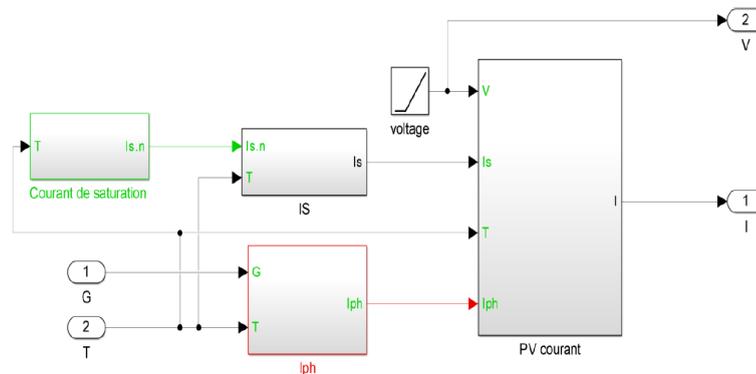


FIGURE II.10 – Schéma bloc de simulation du modèle PV.

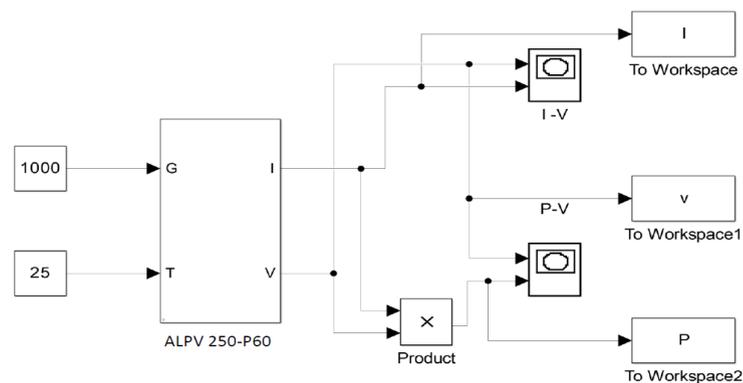


FIGURE II.11 – Schéma bloc de simulation du modèle Photovoltaïque.

II.4 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

II.4.1 Caractéristiques (courant / tension)

Cette caractéristique dépend de la puissance du rayonnement reçu par unité de surface (grandeur appelée éclairement (W/m^2)). Ses principaux paramètres sont les suivants :

Courant de court-circuit (I_{sc}) : est directement proportionnel à l'éclairement et à la surface de la cellule. Il est obtenu lorsqu'on place le module PV en court-circuit ($V_{oc} = 0$), cela représente le courant maximal généré par la cellule photovoltaïque.

Tension de circuit ouvert (V_{oc}) : est directement proportionnelle à la température. Elle est produite dans des conditions de circuit ouvert ($I_{sc} = 0$). Elle représente la tension maximale générée par le panneau photovoltaïque.

Point de puissance maximale (PPM) : représente le point pour lequel le produit ($V * I$) est maximal. Il se trouve sur le coude de la courbe. La puissance maximale (P_{max}) correspond à une tension maximale (V_{mpp}) et un courant maximal (I_{mpp}) [15].

$$P_{max} = V_{mpp} \times I_{mpp} \quad (II.11)$$

Rendement : est un facteur très important pour les composants photovoltaïques. Il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Autrement dit, le rendement est le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire. Il caractérise ses composants et définit leur performance. Le rendement est en fonction du type de semi-conducteur utilisé et est directement lié à l'un seuil d'énergie (bande gap (E_g)). Pour le silicium cristallin, le rendement théorique maximum est de 44%. Le silicium n'est pas le meilleur matériau, son seuil d'énergie est de 1,10 eV, tandis que celui de l'arséniure de gallium (GaAs), il est quasi optimal, et est égal à 1,4 eV. Le rendement commercial des cellules monocristallines est de l'ordre de 12 à 17% maximum. De plus, Le rendement des cellules PV peut être également désigné par une conversion en puissance.

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \times S} \quad (II.12)$$

Avec :

η : Rendement énergétique,

E : Eclairement (W/m^2)

S : Surface active de la cellule (m^2)

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

Facteur de forme : Ce facteur représente le rapport entre la puissance maximale (P_m) et la puissance optimale. Il représente la mesure de la qualité de la cellule ou d'un générateur. Il est défini par la relation suivante $V_{oc} \times I_{sc}$ [8].

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (II.13)$$

Il est compris entre 0 et 1 ou exprimé en pourcentage. Plus le rapport est proche de 1, meilleur est le rendement de la cellule. En général, le facteur de forme pour un panneau est compris entre 0.60 et 0.85 en raison des pertes inévitables (résistance et faibles fuites de courant, etc.)

La figure II.12 représente la caractéristique (courant-tension) pour un éclairement et une température de 25°C.

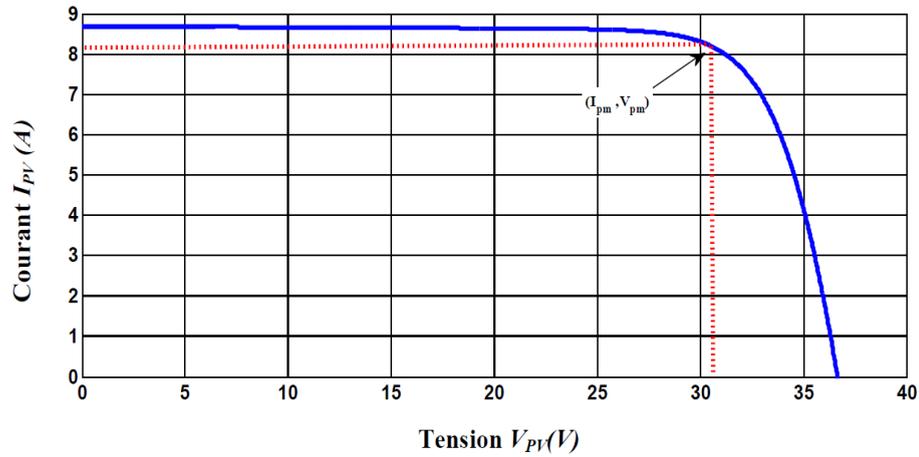


FIGURE II.12 – Caractéristique ($I - V$) d'un PV pour $G = 1000W/m^2$ et $T = 25C$.

II.4.2 Caractéristiques (puissance / tension)

La puissance délivrée par la cellule a pour expression :

$$P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv} \quad (\text{II.14})$$

Pour chaque point. On peut calculer la puissance P_{PV} et tracer la courbe $P_{pv} = f(V_{pv})$ qui est représentée sur la figure suivante

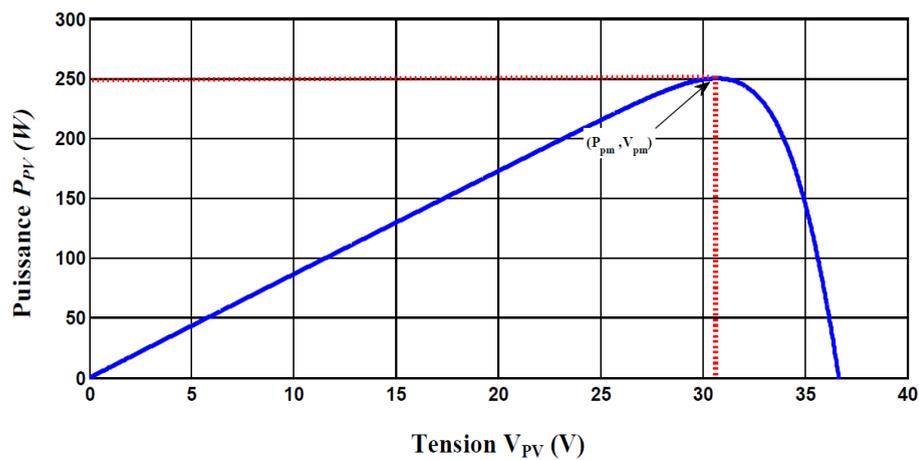


FIGURE II.13 – Caractéristique ($P - V$) d'un PV pour $G = 1000W/m^2$ et $T = 25C$.

II.5 Association des cellules photovoltaïques

En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire [14].

II.5.1 Association séries des cellules

Les modules photovoltaïques peuvent se connecter en série comme montré la figure II.14.

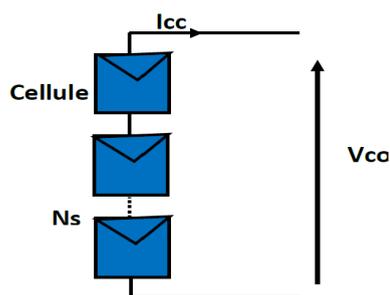


FIGURE II.14 – Association des panneaux photovoltaïques en série.

Comme illustré sur la figure II.15, le même courant traverse chaque cellule tandis que la tension globale est la somme des tensions à travers toutes les cellules qui est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant, la tension V_{oc} par N_s . On note aussi que l'impédance optimale de l'association sera deux fois plus grande que celle de la cellule de base.

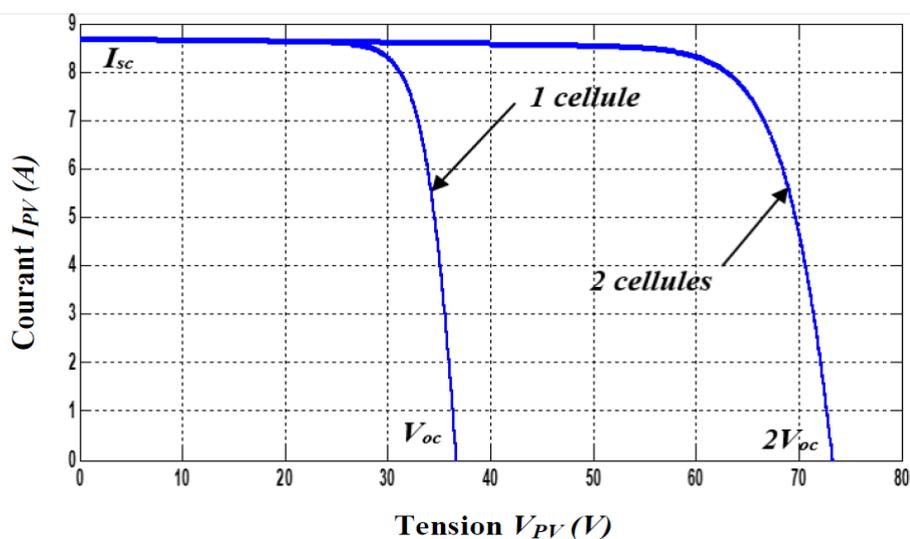


FIGURE II.15 – Caractéristique du groupement en série des cellules identiques.

II.5.2 Association parallèle des cellules

Les modules photovoltaïques peuvent se connecter en parallèle comme montré la figure II.16.

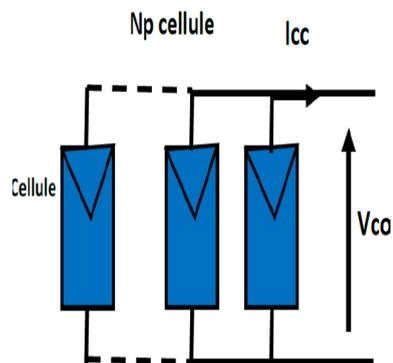


FIGURE II.16 – Association des panneaux photovoltaïque en parallèle.

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Lorsque les cellules sont connectées en parallèle, le courant dans les cellules solaires montées en parallèle est cumulatif, ça signifie que le courant obtenu par la mise en parallèle de N cellules est N fois le courant d'une cellule et la tension aux bornes du groupement parallèle des cellules est la même tension d'une seule cellule. Il faudra donc apparaitre les tensions et non les courants, lors de la mise en parallèle des modules photovoltaïques pour constituer un générateur puissant comme il est montré sur la figure II.17

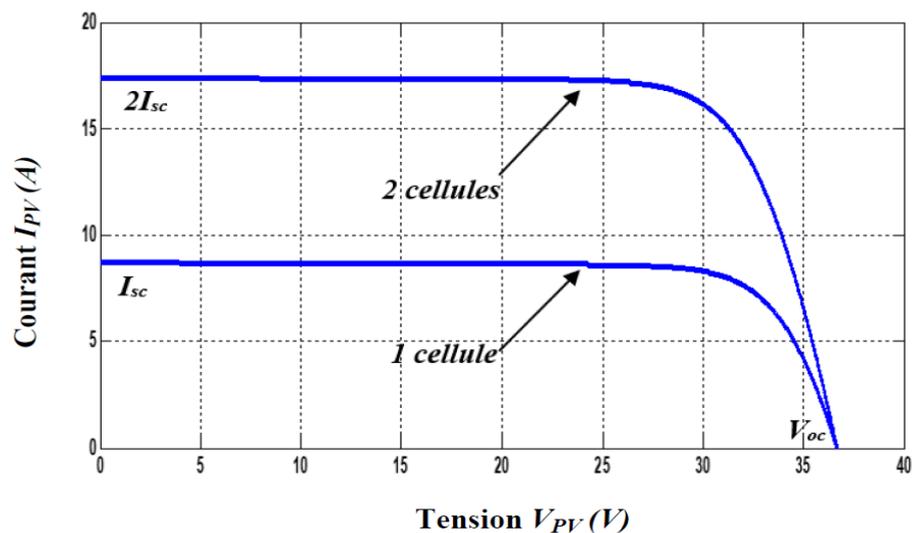


FIGURE II.17 – Association des panneaux photovoltaïque en parallèle.

II.5.3 Association hybride des cellules

La figure II.18 montre l'association des panneaux photovoltaïques en hybride

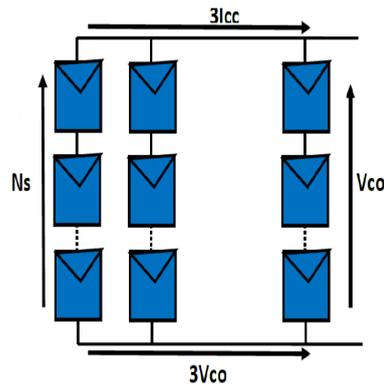


FIGURE II.18 – Association des panneaux photovoltaïques en hybride.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW , sous une tension convenable, il faut associer les modules en série et en parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque.

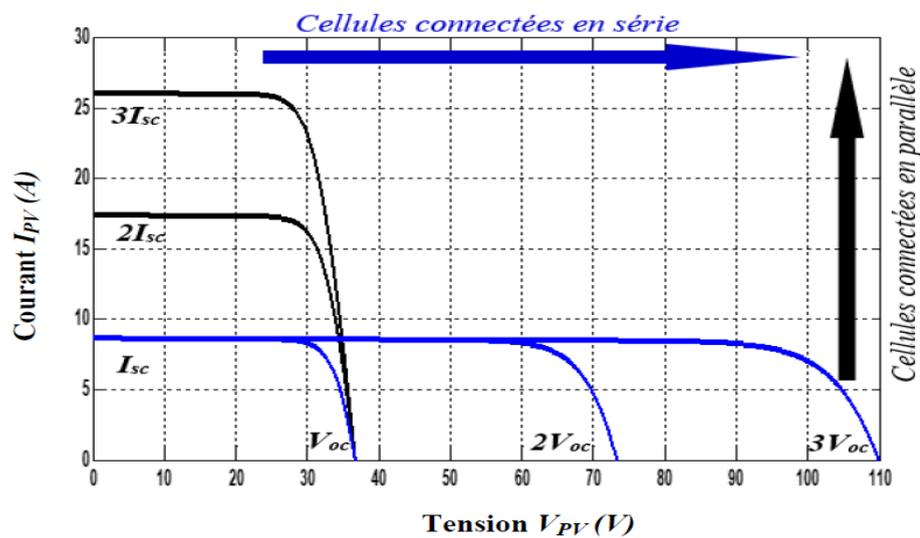


FIGURE II.19 – Association des panneaux photovoltaïques en parallèle.

II.6 Influence de paramètres sur la caractéristique de la cellule photovoltaïque

II.6.1 Influence de l'éclairement

On fixe la température à 25 degrés et on fait varier l'éclairement comme suit : 400, 600, 800 puis 1000 W/m^2 , on obtient les résultats de simulation montrés par la figure suivante. On remarque que le courant de court-circuit (I_{sc}) varie directement avec le rayonnement lumineux. Cependant, la tension restant relativement constante. Nous avons comparé avec les résultats du modèle du constructeur et les caractéristiques sont identiques à quelques erreurs près.

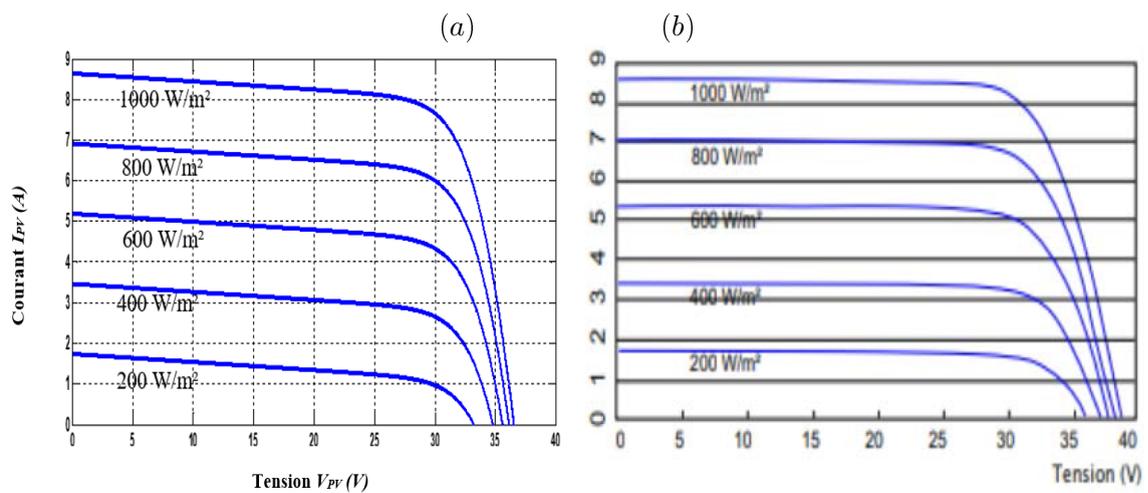


FIGURE II.20 – Comparaison entre la caractéristique $I - V$ pour différentes irradiances du modèle de simulation (a) et du modèle photovoltaïque ALPV-250-P60 (b).

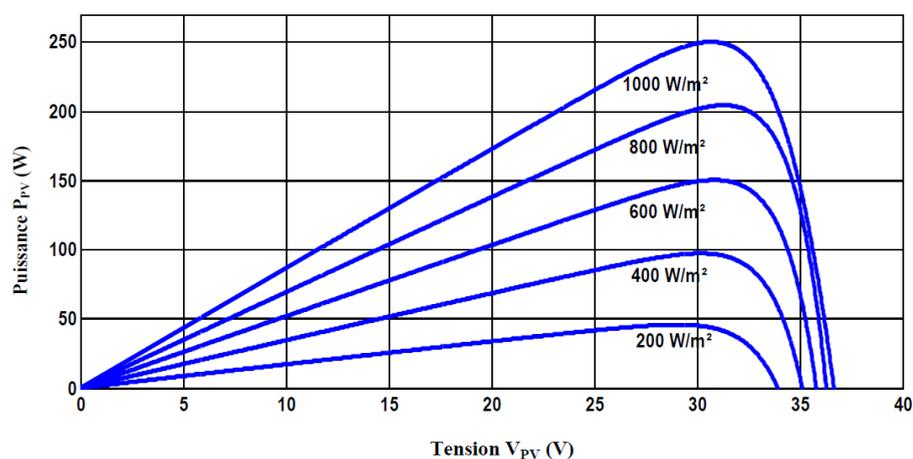


FIGURE II.21 – Caractéristique $P - V$ pour différentes irradiances.

II.6.2 Influence de la température

On fixe l'éclairement à $1000\text{W}/\text{m}^2$ et on fait varier la température comme suit : 0°C , 25°C , 50°C et 75°C . On obtient les résultats de simulation montrés par la figure suivante. On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert (V_{oc}) baisse lorsque la température augmente. De même, nous avons comparé avec le modèle du constructeur et le résultat est satisfaisant.

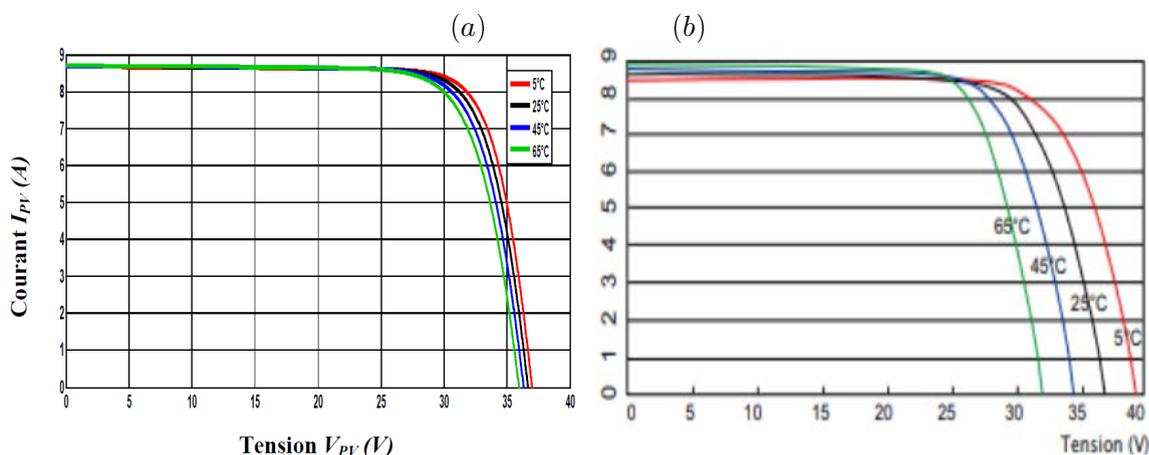


FIGURE II.22 – Comparaison entre la caractéristique $I - V$ pour différentes températures du modèle de simulation (a) et du modèle photovoltaïque ALPV-250-P60 (b).

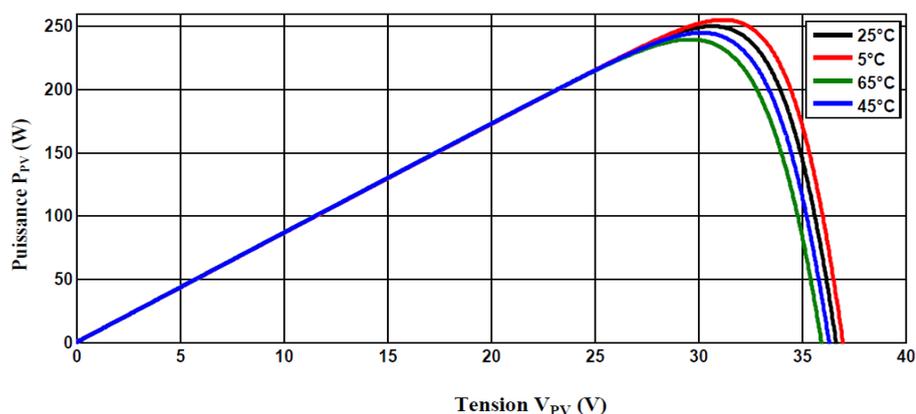


FIGURE II.23 – Caractéristique $P - V$ pour différentes températures.

Les caractéristiques ($P-V$) d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. En effet, les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C , montrent un changement considérable, alors que la tension change légèrement avec l'éclairement. Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux de température et à éclairement maintenu constant $1000\text{W}/\text{m}^2$, montrent un léger changement.

II.6.3 Influence des résistances série

On fixe l'éclairement à 1000W/m^2 et on fait varier la résistance série comme suit : 0, 0.2 et 0.6 Ω

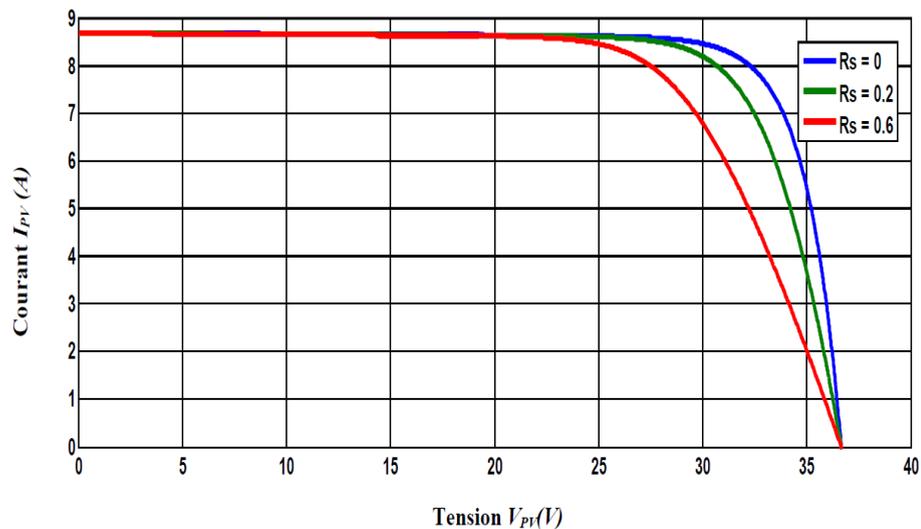


FIGURE II.24 – Influence de la résistance série sur la caractéristique $I - V$ d'une cellule solaire éclairée.

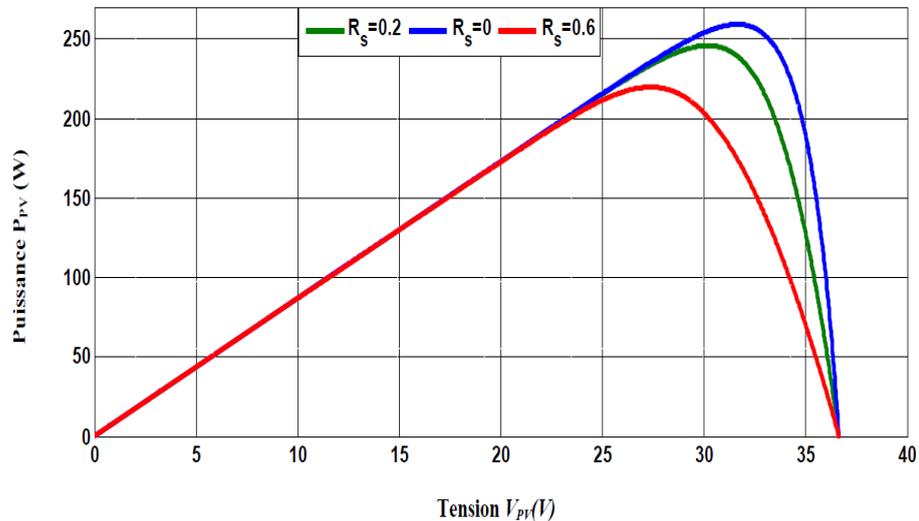
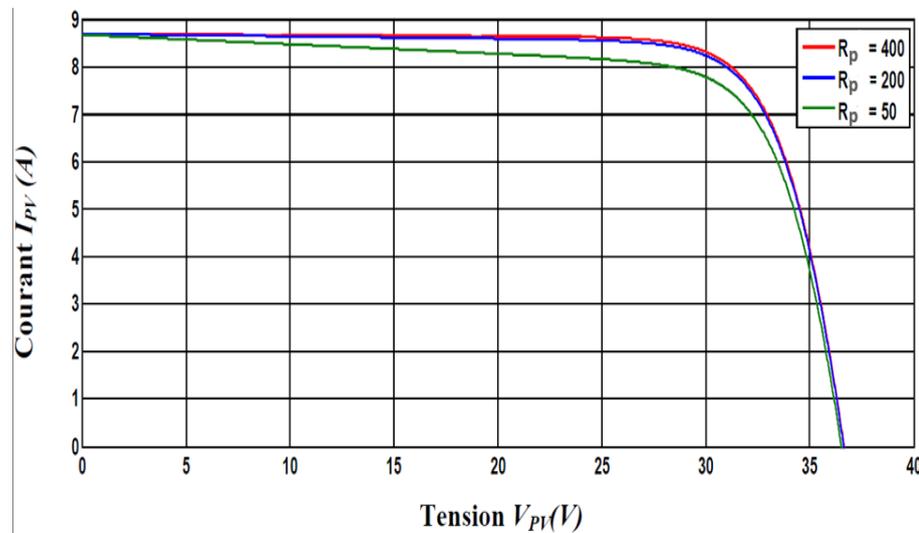
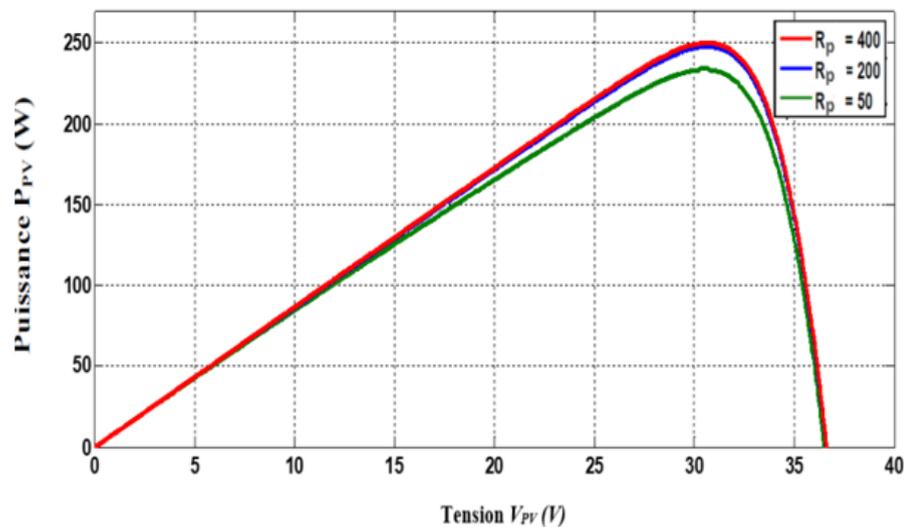


FIGURE II.25 – Influence de la résistance série sur la caractéristique $P - V$ d'une cellule solaire éclairée.

On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court-circuit (I_{sc}) ne sont pas modifiés, mais la caractéristique se déforme très rapidement sous l'effet de résistance statorique. Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique $I - V$ dans la zone où la cellule fonctionne comme une source de tension¹ lorsque R_s augmente. L'augmentation de la résistance série a un effet réductif considérable sur le point de fonctionnement ² et le facteur de forme (FF) de la cellule.

II.6.4 Influence des résistances parallèles

FIGURE II.26 – Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique $P-V$ d'une cellule solaire éclairée.FIGURE II.27 – Influence de la résistance parallèle sur la caractéristique $P-V$ d'une cellule solaire éclairée.

On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court-circuit (I_{sc}) ne sont pas modifiés ; mais la caractéristique se déforme très rapidement, cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la caractéristique $I-V$ de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant (basse tension).

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation mathématique d'un système PV et les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ simulées sous Matlab/ SIMULINK, ainsi que la comparaison entre les caractéristiques $I-V$ du modèle de simulation et celles du modèle ALPV 250-P60 sous l'influence de différentes températures et de différents éclairagements.

On peut ainsi conclure que l'éclairagement et la température sont les facteurs principaux qui influent sur le fonctionnement et la conception des cellules PV, puisque celles-ci sont exposées tout au long de la journée à différentes températures ainsi que différents éclairagements. Et pour améliorer le rendement d'un système PV, il est nécessaire d'intégrer une commande MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV, c'est ce que nous aborderont dans le prochain chapitre ainsi que l'introduction de convertisseurs DC-DC.

Chapitre III

Commande MPPT d'un hacheur Boost

SOMMAIRE

III.1 INTRODUCTION	38
III.2 HACHEURS	38
III.2.1 Commande MLI d'un hacheur	39
III.2.2 Types d'hacheurs	40
III.3 SYSTÈME PV À BASE D'UN HACHEUR BOOST	43
III.3.1 Schéma du montage	43
III.3.2 Analyse de fonctionnement du Boost	44
III.3.3 Calcul des composants du Boost [18]	45
III.3.4 Chronogrammes (pour 1 panneau PV)	46
III.3.5 Chronogrammes (pour 4 panneaux PV)	47
III.4 TECHNIQUE D'EXTRACTION DU MAXIMUM DE PUISSANCE MPPT	48
III.4.1 Principe de fonctionnement du MPPT	48
III.4.2 Algorithme de commande MPPT	49
III.5 SIMULATION D'UN SYSTÈME PV À BASE D'UN BOOST AVEC COMMANDE P&O	51
III.5.1 Résultats de la simulation	52
III.5.2 Interprétation des résultats	53
III.6 INSERTION D'UN BENCHMARK D'IRRADIATION SOLAIRE	53
III.7 COMMANDE FLOUE	55
III.7.1 Principe de fonctionnement	55
III.8 CONCLUSION	57

III.1 Introduction

Ces derniers temps, l'énergie solaire a pris une grande partie du marché grâce au développement continu de la technologie des systèmes PV et de la baisse des prix. Sauf que, comme exposé dans le chapitre précédent, les caractéristiques I-V et P-V du panneau PV sont non linéaires et admettent un seul point de fonctionnement optimal, celui-ci est atteint que lorsque le panneau fonctionne à son point de puissance maximale (PPM). De ce fait, plusieurs études ont été présentées visant à surveiller et extraire ce point.

Extraire l'énergie maximale du GPV reste un grand défi pour les chercheurs travaillant dans ce domaine. Ainsi, en insérant entre le GPV et la charge électrique un convertisseur statique muni d'une commande de poursuite du PPM.

Des algorithmes conventionnels ont été proposés pour suivre le point de puissance maximal (MPP) dans des conditions homogènes d'éclairement et de température, on présentera alors quelques techniques MPPT existantes ainsi qu'une étude détaillée sur les convertisseurs statiques DC-DC.

III.2 Hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs continu-continu (DC-DC) qui permettent d'obtenir une tension continue fixe ou variable, à partir d'une source de tension continue constante (batterie, réseau redressé et filtré).

Un hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune de puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [10].

En général, les convertisseurs alimentés en continu fonctionnent en commutation forcée, quand un semi-conducteur conduit, il tend à conduire en permanence. Ces convertisseurs utilisent des semi-conducteurs à fermeture et ouverture commandées, thyristors GTO ou transistor de puissance (IGBT ou MOSFET).

Pendant le fonctionnement du hacheur, le semi-conducteur sera commuté à une fréquence constante f_s avec un temps de fermeture $d.T_s$ et un temps d'ouverture $(1-d)T_s$ [10].

- T_s : période de commutation.
- d : rapport cyclique ($0 < d < 1$).

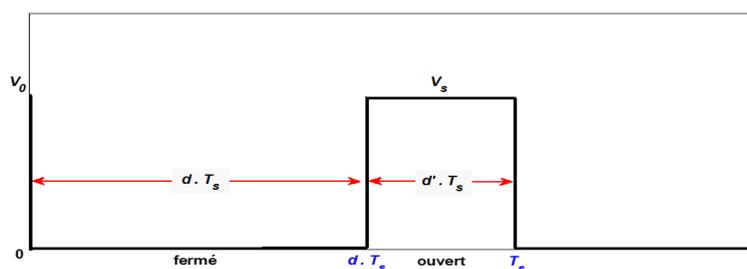


FIGURE III.1 – périodes de fermeture et d'ouverture d'un commutateur

III.2.1 Commande MLI d'un hacheur

La qualité de la tension de sortie d'un hacheur dépend largement de la technique de commande utilisée pour commander les interrupteurs de cet hacheur [4].

La technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou en anglais Pulse Width Modulation (PWM) est largement utilisée dans la commande des convertisseurs DC-DC ou DC-AC, ou généralement tous les dispositifs d'électronique de puissance utilisant des composants de type MOSFET, IGBT ou GTO.

Le développement considérable de la technique de modulation en largeur d'impulsion ouvre une large étendue d'application dans les systèmes de commande et beaucoup d'autres fonctions. Elle permet une réalisation souple et rentable des circuits de commande des hacheurs [4].

III.2.1-a Principe de la commande MLI

Le principe de la MLI est basé sur le découpage de l'onde rectangulaire. Ainsi, la tension de sortie est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation et de largeur variable. Les techniques de la MLI sont multiples, cependant, la technique la plus répandue est la MLI intersective qui consiste à comparer deux signaux ;

Le premier, appelé signal de référence V_{ref} , est un signal continu qui varie entre deux seuils définis en fonction de notre application.

Le second, appelé signal de la porteuse, en général triangulaire ou en dents de scie, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques du convertisseur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence (environ 20KHz) [4].

Le signal de sortie vaut 1 si la référence est plus grande que la porteuse, 0 sinon ; le signal de sortie change donc d'état à chaque intersection de la référence et de la porteuse.

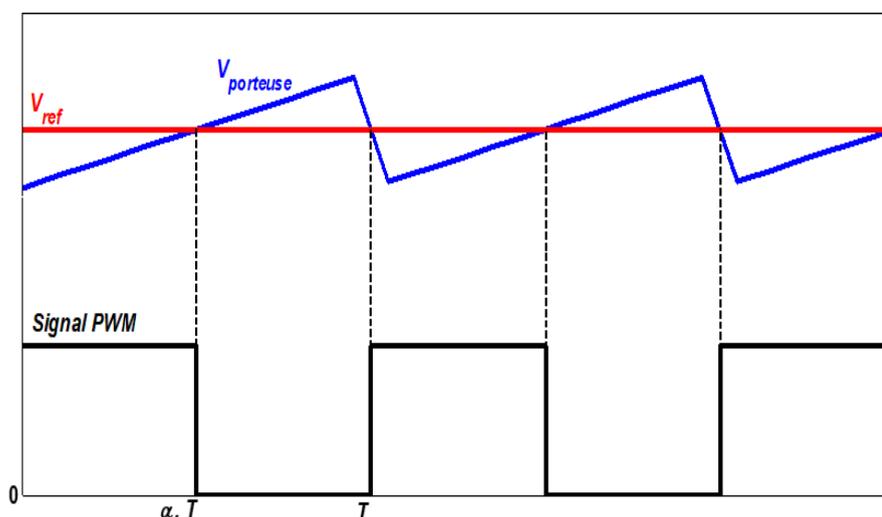


FIGURE III.2 – Principe de la MLI

III.2.2 Types d'hacheurs

Selon le sens de parcours de l'énergie électrique entre la source et la charge, on distingue deux familles d'hacheurs : réversibles et non réversibles. Pour ces derniers, l'énergie électrique ne peut donc aller que de la source vers la charge. Mais concernant les hacheurs réversibles, il est possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie en assurant une réversibilité en courant et/ou en tension. Parmi les hacheurs non réversibles, on rencontre les hacheurs à liaison indirecte ou à accumulation (à stockage inductif ou à stockage capacitif) qui permettent de régler un transfert d'énergie entre deux sources de même nature par l'intermédiaire d'un élément de stockage d'énergie : inductance ou condensateur.

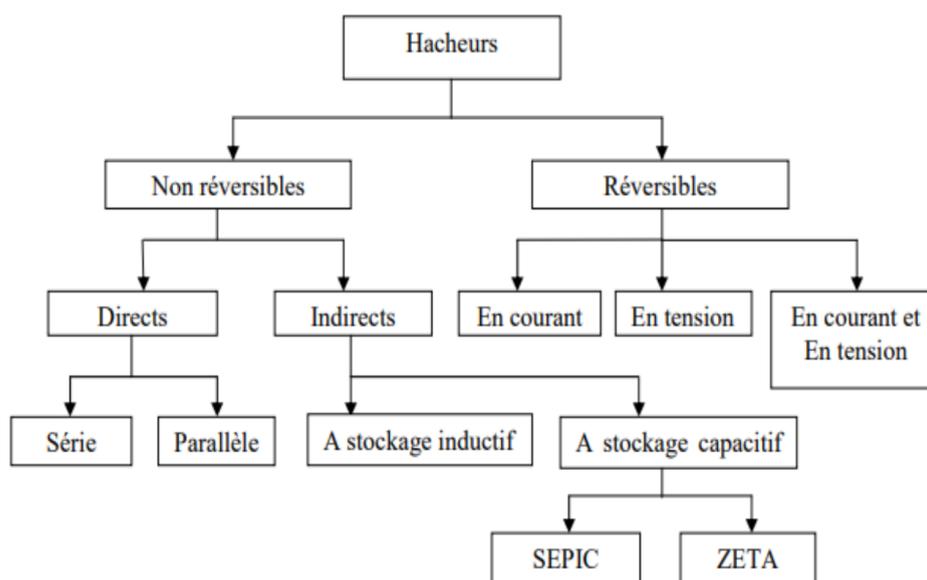


FIGURE III.3 – Différents types d'hacheurs

Dans ce qui suit, on ne s'intéresse qu'aux hacheurs sans isolation galvanique qui sont dépourvus de transformateur tels que : hacheur dévolteur ou abaisseur de tension (Buck), hacheur survolteur ou éleveur de tension (Boost), hacheur abaisseur-éleveur de tension (Buck-Boost, Cuk, SEPIC).

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

La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost et le Cuk. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC [3]

III.2.2-a Hacheur Buck

Ce convertisseur peut être appelé hacheur abaisseur, hacheur dévolteur ou hacheur série. Ce type de convertisseur convertit la tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure. En effet, il multiplie la tension d'entrée par un facteur scalaire inférieur à l'unité, ce qui donne une tension plus faible à la sortie.

Le principe d'un tel convertisseur est d'assurer la fluence d'énergie entre une source de tension continue, et une charge de courant continu [30].

- Schéma du montage,

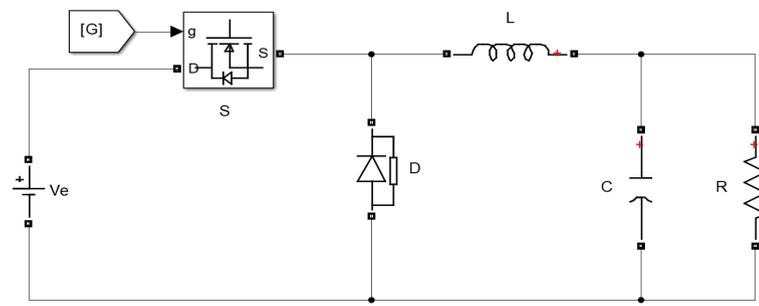


FIGURE III.4 – Schéma du montage du Buck

III.2.2-b Hacheur Boost

Ce convertisseur peut être appelé hacheur élévateur, hacheur survolteur ou hacheur parallèle. Ce type de convertisseur convertit la tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure. En effet, il multiplie la tension d'entrée par un facteur scalaire supérieur à l'unité, ce qui donne une tension plus forte à la sortie.

Le principe d'un tel convertisseur est d'assurer la fluence d'énergie entre une source de courant continu, et une charge de tension continue [30].

Le convertisseur survolteur est le plus populaire des convertisseurs pour les régulateurs de correction du facteur de puissance [3].

- Schéma du montage,

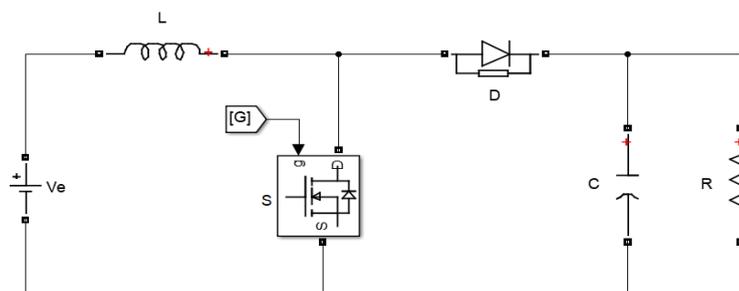


FIGURE III.5 – Schéma du montage du Boost

III.2.2-c Hacheur Buck-Boost

Le convertisseur Buck-Boost est également appelé abaisseur-élevateur par son aptitude à fournir une tension plus faible, ou plus élevée que celle appliquée en son entrée. Ceci dépend de la valeur du rapport cyclique [30].

- Schéma du montage,

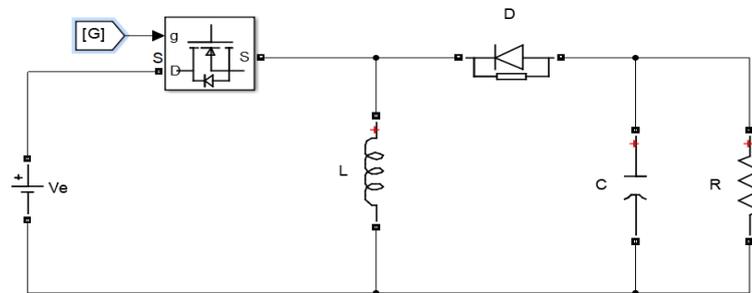


FIGURE III.6 – Schéma du montage du Buck-Boost

III.2.2-d Hacheur Ćuk

Un convertisseur Ćuk, qui doit son nom à son inventeur, Slobodan Ćuk, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. Au contraire des autres types de convertisseurs, qui utilisent une inductance, un convertisseur Ćuk utilise un condensateur pour stocker de l'énergie.

Le convertisseur Ćuk est alimenté par une source de courant et alimente une charge de courant [33].

- Schéma du montage,

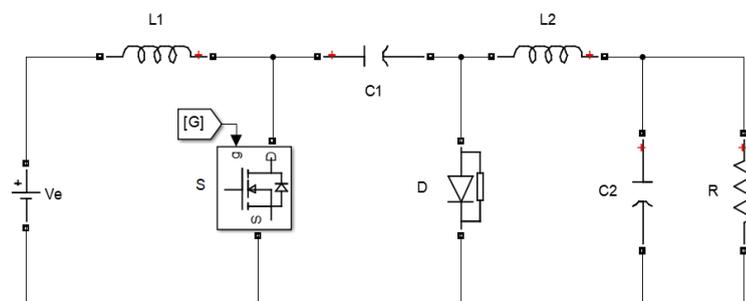


FIGURE III.7 – Schéma du montage du Ćuk

III.2.2-e Hacheur SEPIC

La structure du hacheur SEPIC se déduit du hacheur Ćuk, à l'exception qu'il est non inverseur de tension. à la différence du convertisseur Ćuk, le convertisseur SEPIC est alimenté par une source de tension mais, grâce à l'inversion de l'inductance et de la diode, peut alimenter une charge de tension [33].

- Schéma du montage,

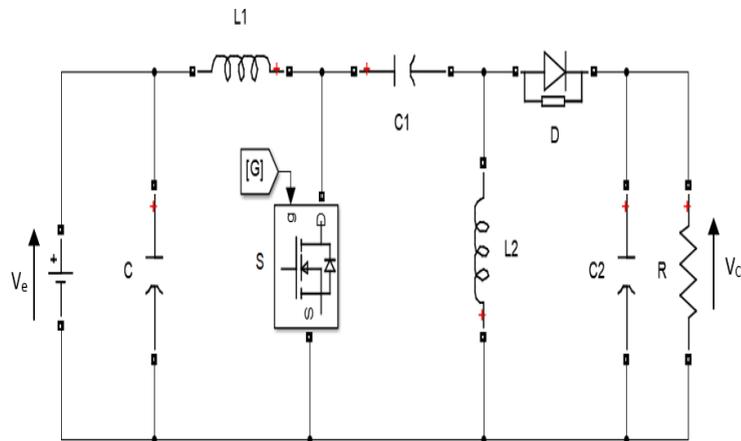


FIGURE III.8 – Schéma du montage du SEPIC

III.3 Système PV à base d'un hacheur Boost

Le convertisseur Boost sera choisi dans cette étude pour sa structure simple et son rapport de transformation en tension plus élevé par rapport aux autres topologies

III.3.1 Schéma du montage

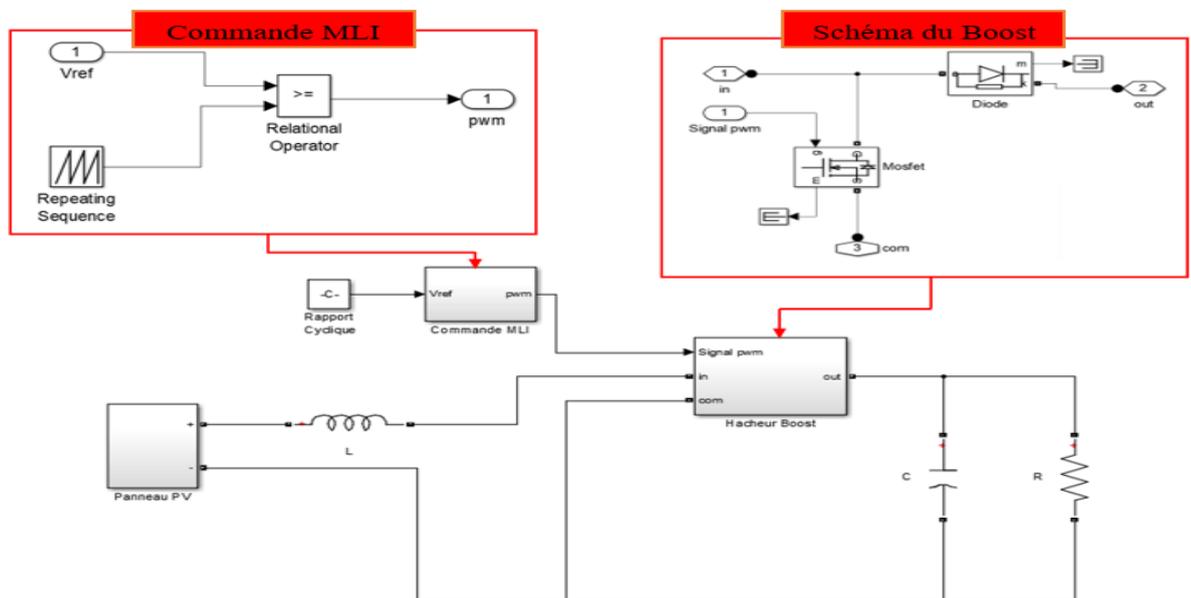


FIGURE III.9 – Schéma du montage PV+Boost

III.3.2 Analyse de fonctionnement du Boost

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur S :

- Mode continu : (Une phase d'accumulation d'énergie) : Lors de l'état passant lorsque l'interrupteur S est fermé, cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.
- Mode discontinu : Lorsque l'interrupteur S est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité [3] .

Alors, le fonctionnement du circuit peut se diviser en deux parties selon l'intervalle de commutation.

III.3.2-a Etat 1 : état de repos ; (S) fermé (Diode bloquée, Transistor passant)

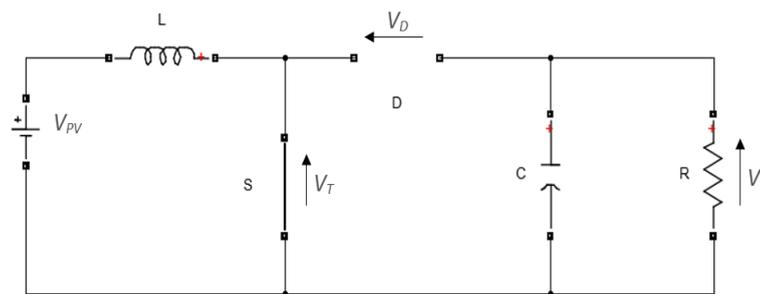


FIGURE III.10 – Schéma du Boost à l'état de repos

La source est court-circuitée et la charge est à circuit ouvert, on obtient :
 $V_D = -V_{pv}$ et $V_T = 0$

III.3.2-b Etat 2 : état de fonctionnement ; (S) ouvert (Diode passante, Transistor bloqué)

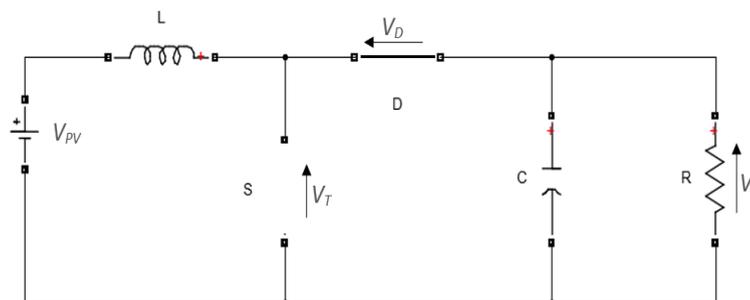


FIGURE III.11 – Schéma du Boost à l'état de fonctionnement

La source débite sur la charge, on obtient alors :

$$V_D = 0 \text{ et } V_T = V_{pv}$$

Si T est la période de fonctionnement et αT la durée des intervalles de conduction du transistor, les différentes tensions et courants sont :

La valeur moyenne de V_{pv} est : [26]

$$V_{pv} = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^{\alpha} v_{pv}.dt = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^{\alpha} v_c.dt = (1 - \alpha)V_c \Rightarrow V_c = \frac{V_{pv}}{1 - \alpha} \quad (\text{III.1})$$

A pertes minimales : [26]

$$P_{pv} = P_c \Leftrightarrow V_{pv}I_{pv} = V_cI_c \Leftrightarrow I_c = \frac{V_{pv}}{V_c}I_{pv} \Rightarrow I_c = \frac{I_{pv}}{1 - \alpha} \quad (\text{III.2})$$

III.3.3 Calcul des composants du Boost [18]

a . Rapport cyclique :

$$\alpha = 1 - \frac{V_{pv}}{V_c} \quad (\text{III.3})$$

b . Résistance de charge :

$$R = \frac{V_c^2}{P_{pv}} \quad (\text{III.4})$$

c . Valeur de la capacité :

$$C = \frac{V_c \times \alpha \times T_s}{2 \times \Delta V \times R} \quad (\text{III.5})$$

d . Valeur de l'inductance :

$$L = \frac{V_{pv} \times \alpha \times T_s}{2 \times \Delta I} \quad (\text{III.6})$$

e . Période de fonctionnement :

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (\text{III.7})$$

L'ondulation du courant est calculée en pourcentage du courant d'inductance (le courant du panneau PV), cette ondulation doit être de 10% au minimum et de 30% au maximum. Bien que l'ondulation de la tension soit calculée en pourcentage de la tension de la charge (tension de sortie du convertisseur), doit être de 1% [18] .

Un panneau PV du modèle *ALPV - 250 - P60* débite une tension $V_{mpp} = 30.55V$ et sachant qu'en pratique α ne dépasse pas de trop la valeur de 0.5 alors qu'en simulation, il peut atteindre une valeur de 0.9. La meilleure valeur de tension de sortie qu'on a alors pu atteindre pour un α plus proche de la réalité est de $V_c = 100V$.

Or, nous avons besoin de plus, la tension de sortie doit alors atteindre les 400V, c'est pourquoi nous avons proposé deux solutions ;

La première suggère d'utiliser quatre panneaux PV associés en série avec quatre hacheurs élévateurs. Ceci dit, ce montage est assez coûteux, ce qui nous conduit à choisir la deuxième solution, certainement plus économique et qui consiste à associer quatre panneaux PV à un seul hacheur Boost.

Le Tableau III.1 montre les paramètres de convertisseur Boost.

TABLE III.1 – Paramètres du Boost

	$P_{pv}(W)$	$V_{pv}(V)$	$I_{pv}(A)$	$V_c(V)$	α	$R(\Omega)$	$\Delta V(\%)$	$C(\mu F)$	$\Delta I(\%)$	$L(mH)$
1P	250	30.55	8.19	100	0.69	40	1	0.43	1.63	0.32
4P	1000	122.2	8.19	400	0.69	160	4	0.108	1.63	1.3

III.3.4 Chronogrammes (pour 1 panneau PV)

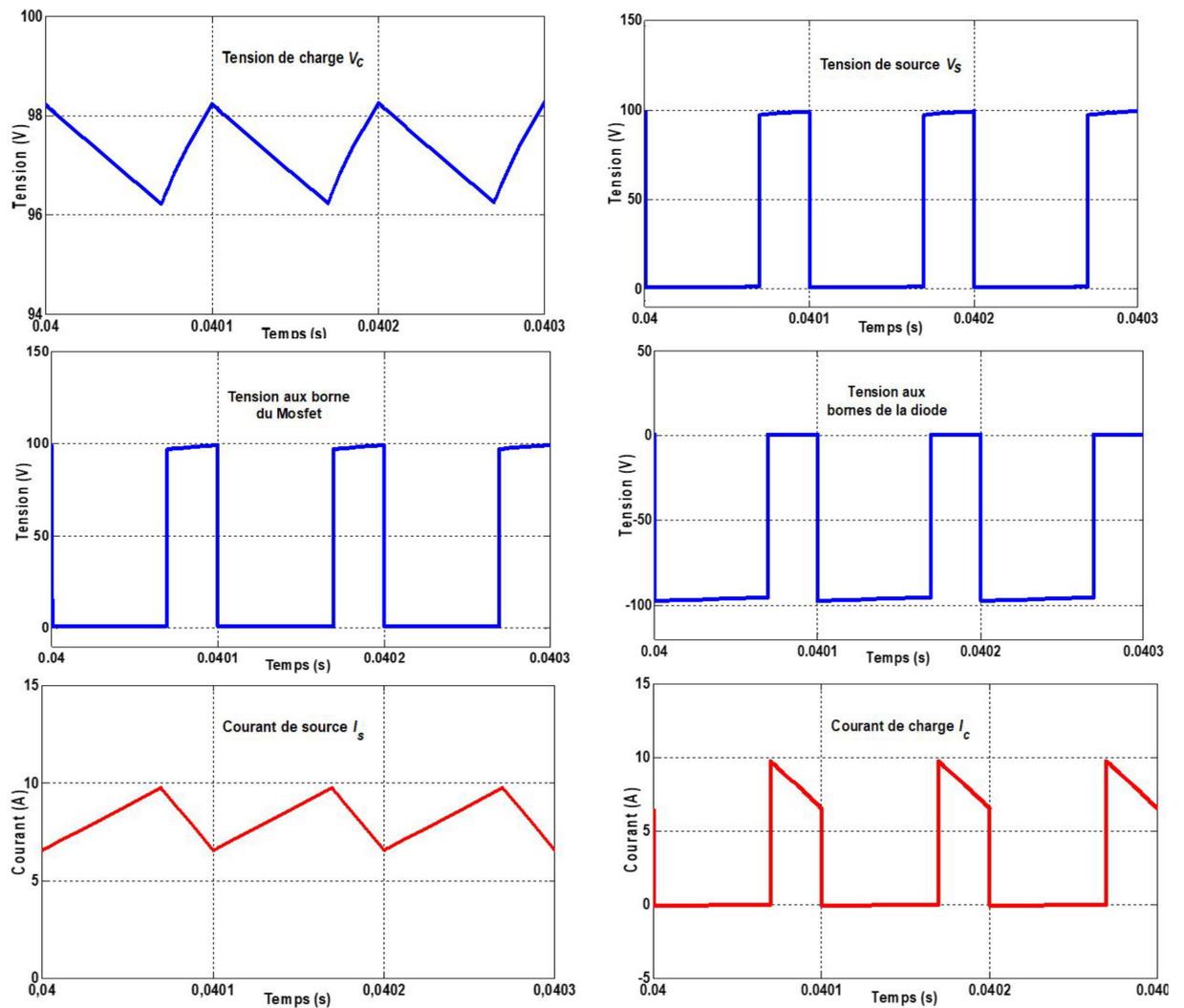


FIGURE III.12 – Chronogrammes du Boost pour 1 panneau PV

III.3.5 Chronogrammes (pour 4 panneaux PV)

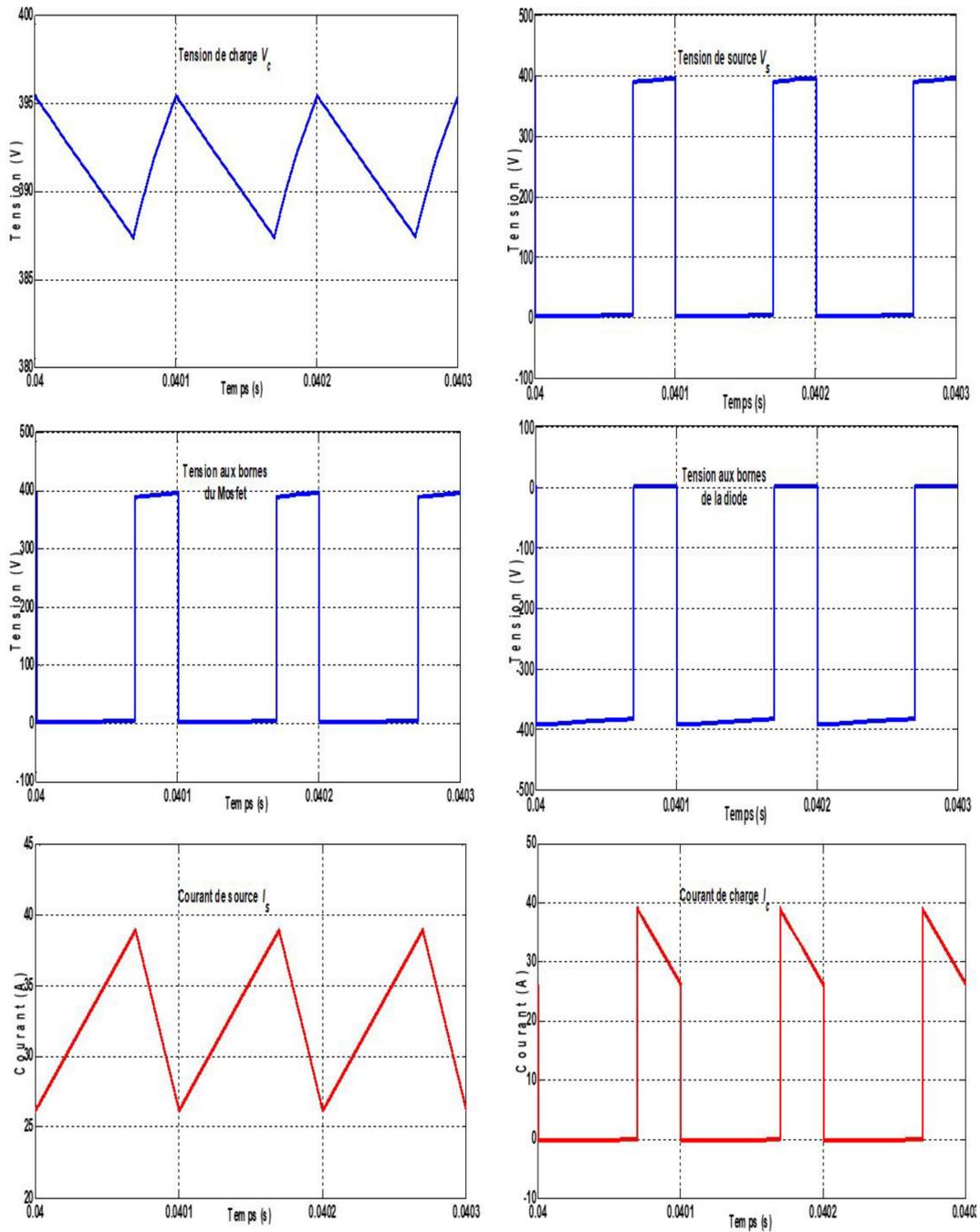


FIGURE III.13 – Chronogrammes du Boost pour 4 panneaux PV

III.4 Technique d'extraction du maximum de puissance MPPT

« Maximum Power Point Tracking » ou en français « Recherche du Point de Puissance Maximum », souvent appelé MPPT, fonctionne avec un GPV d'une manière qui lui permet de produire toute la puissance qu'il est capable de générer. Un MPPT n'est pas un système de suivi mécanique mais il fonctionne sur un algorithme de suivi particulier et basé sur un système de contrôle. Les algorithmes MPPT sont utilisés pour obtenir la puissance maximale du GPV en fonction de la variation de l'éclairement et de la température. La tension à laquelle Le module PV peut produire une puissance maximale est appelé « point de puissance maximale » PPM. La puissance maximale varie avec le rayonnement solaire, la température ambiante et la température des cellules solaires. Le grand principe du MPPT consiste à extraire la puissance maximale disponible du module PV en les rendant fonctionnants à la tension la plus efficace. L'algorithme MPPT est basé sur une logique simple, il calcule la sortie du module PV, la compare à la tension de la batterie puis fixe quelle est la puissance optimale que le module PV peut produire pour charger la batterie et le convertit à la tension optimale pour obtenir un courant maximal dans la batterie. Ç a peut également alimenter une charge DC, qui est directement connectée à la batterie. Un MPPT est surtout utile pendant les jours nuageux et lorsque la batterie est profondément déchargée [34] .

III.4.1 Principe de fonctionnement du MPPT

Comme illustré sur la Figure III.14, Le principe de la commande MPPT est simple. Celle-ci doit être implémentée en amont du convertisseur statique DC/DC de façon à agir sur le rapport cyclique de ce dernier de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment [3] .

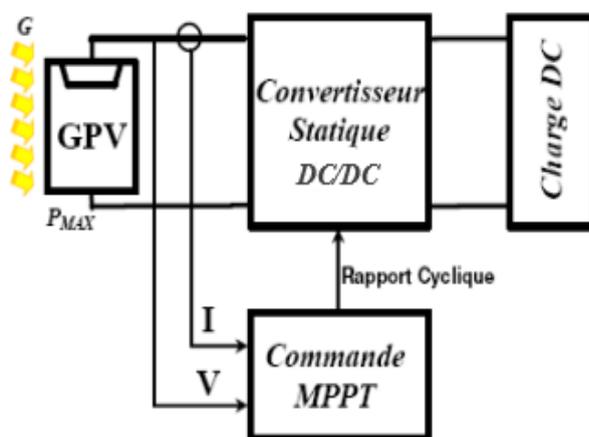


FIGURE III.14 – schéma du principe du MPPT [12]

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV.

III.4.2 Algorithme de commande MPPT

L'emplacement du PPM n'est pas connu de prime abord mais peut être tracé en utilisant des algorithmes MPPT pour trouver et maintenir le point de fonctionnement du GPV à son PPM [22] .

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le PPM ont été développées. Ces techniques diffèrent sur de nombreux aspects tels que les capteurs requis, la complexité, le coût, la portée d'efficacité, vitesse de convergence, suivi correct lors de l'irradiation et/ou changement de température, matériel nécessaire à la mise en œuvre ou popularité, entre autres.

Voici certaines techniques MPPT des plus populaires :

- Perturber et observer (PO) (méthode Hill Climbing).
- Méthode de conductance incrémentale.
- Courant de court-circuit fractionnaire.
- Tension de circuit ouvert fractionnaire.
- Logique floue.
- Réseaux de neurones.

Parmi les techniques mentionnées, la méthode Perturb and Observe (P&O) et les algorithmes de conductance incrémentale (InCond) sont les plus couramment utilisés.

D'autres techniques basées sur des principes différents incluent la commande par logique floue, réseau de neurones, tension fractionnaire en circuit ouvert ou courant de court-circuit, balayage de courant, etc. La plupart de ces méthodes donnent un maximum local et certaines, comme la tension de circuit ouvert fractionnaire ou courant de court-circuit, donnent un PPM approximatif, plutôt qu'une sortie exacte. Dans des conditions normales, la courbe P-V n'a qu'un seul maximum. Cependant, si le générateur photovoltaïque est partiellement ombragé, il existe plusieurs maxima dans ces courbes.

Les algorithmes P&O et InCond sont tous deux basés sur le "hill-climbing", un principe qui consiste à déplacer le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque dans la direction dans laquelle la puissance augmente. Les techniques "hill-climbing" sont les méthodes MPPT les plus populaires en raison de leur facilité de mise en œuvre et de leurs bonnes performances lorsque l'irradiation est constante [34] .

Pour la suite de notre travail, nous avons opté pour l'utilisation de la méthode du P&O. L'algorithme P&O a comme avantage d'une réponse précise et rapide. Il peut déterminer le point de puissance maximale pour un éclairage solaire et température ou un niveau de dégradation des caractéristiques. Le problème avec cet algorithme c'est que :

- L'oscillation autour du PPM dans les conditions de fonctionnement normales car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM.
- La mauvaise convergence de l'algorithme dans le cas des variations brusques des conditions climatiques ou/et de la charge [20] .

III.4.2-a Algorithme de P&O

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation.

Dans cette méthode, un seul capteur de tension est utilisé pour détecter la tension du générateur photovoltaïque et donc le coût de mise en œuvre est moindre. L'algorithme implique une perturbation sur le rapport cyclique du convertisseur de puissance et une perturbation de la tension de fonctionnement de la liaison DC entre le générateur photovoltaïque et le convertisseur de puissance.

Perturber le cycle de service du convertisseur de puissance implique de modifier la tension de la liaison DC entre le générateur photovoltaïque et le convertisseur de puissance [34].

Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en observant la variation de la puissance à la sortie du GPV. Sur la figure III.15, on voit que si la tension de fonctionnement varie dans une direction donnée ce qui implique que la puissance augmente ($\Delta P > 0$), la variation doit alors se déplacer vers le point de fonctionnement PPM.

L'algorithme P&O continuera à observer la variation de la tension dans la même direction.

Par contre, si la puissance diminue ($\Delta P < 0$), alors la variation est éloignée du point de fonctionnement du PPM. L'algorithme inversera alors la direction de la variation suivante [8].

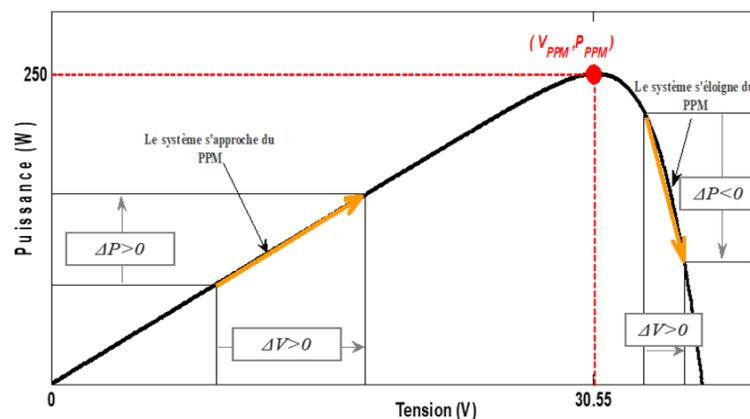


FIGURE III.15 – Schéma du principe de la méthode de P&O

L'algorithme qui décrit le fonctionnement de la méthode PO est illustré dans la figure suivante :

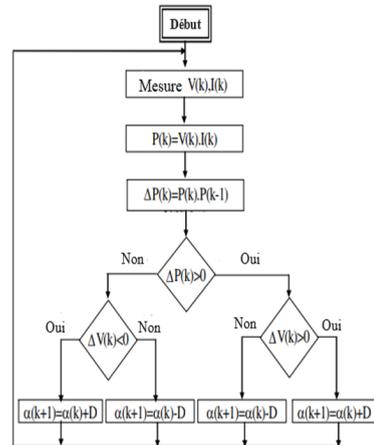


FIGURE III.16 – Algorithme P&O

Cet algorithme est résumé sur la figure III.16 Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le PPM soit atteint. Le système oscille alors autour du PPM, ce qui provoque des pertes de puissance. L'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la variation. Cependant, une taille de variation trop petite ralentit considérablement la poursuite du PPM. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité [8] .

III.5 Simulation d'un système PV à base d'un Boost avec commande P&O

Dans cette partie de notre travail nous allons simuler sous MATLAB/Simulink le fonctionnement de notre système PV, constitué de quatre panneaux PV branchés en série et contrôlés par une commande MPPT de type P&O, ce système sera associé avec un hacheur élévateur et sa charge de tension RC, dont les paramètres sont calculés dans le tableau III.1, La fréquence de commutation du hacheur, imposée par la fréquence de la porteuse en dent de scie, est de $20kHz$.

La figure III.17 montre le schéma de simulation du système pour les conditions fixes de température et d'éclairement $T = 25C$; $G = 1000W/m^2$.

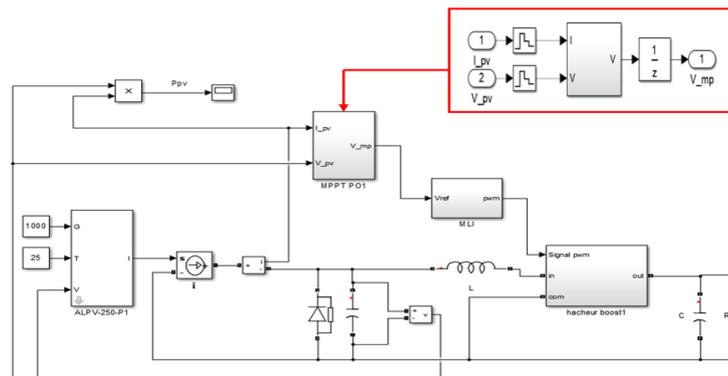


FIGURE III.17 – Schéma de simulation du système

III.5.1 Résultats de la simulation

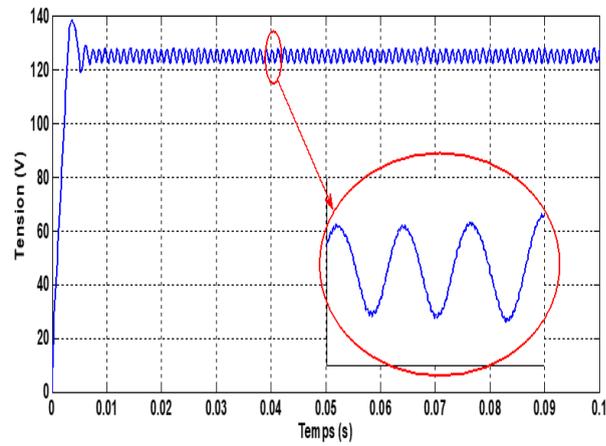


FIGURE III.18 – Tension des panneaux PV

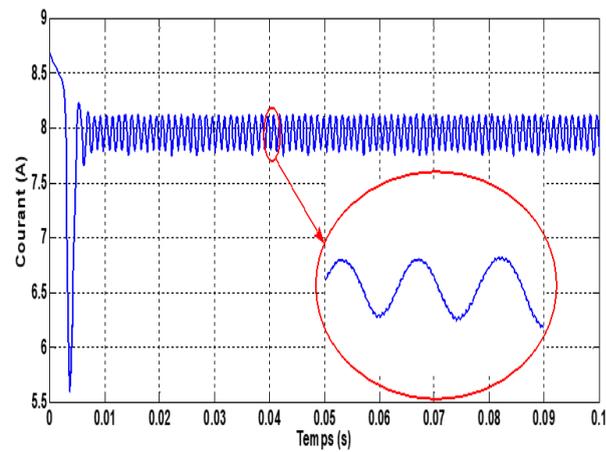


FIGURE III.19 – Courant des panneaux PV

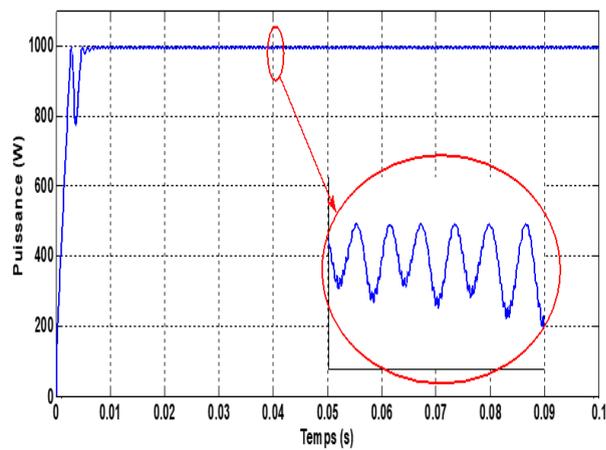


FIGURE III.20 – Puissance des panneaux PV

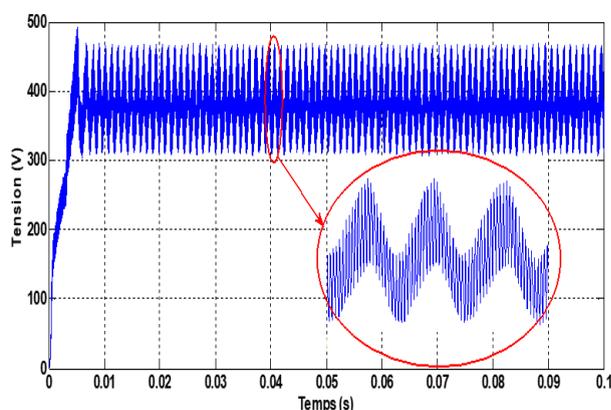


FIGURE III.21 – Tension de charge

III.5.2 Interprétation des résultats

Les figures III.18, III.19 et III.20 montrent les courbes de tension le courant et la puissance à la sortie des (04) panneaux PV en série. Les courbes commencent dans un régime transitoire puis se stabilisent à quelques millièmes près des valeurs correspondantes aux PPM (122.4V, 8.11A et 1000W). Le Zoom sur les signaux montre des petites ondulations et oscillations à cause de la commutation du convertisseur.

La figure III.21 illustre la courbe de tension de charge, à la sortie du hacheur. La courbe commence dans un régime transitoire puis se stabilise aux alentours de la valeur désirée (400V) pour un rapport cyclique de 0.7. La technique de commande MPPT de type P&O a donné des résultats assez bons, si on omet le bref régime transitoire au début.

III.6 Insertion d'un benchmark d'irradiation solaire

La prédiction du rayonnement solaire global est d'une grande importance pour plusieurs applications d'ingénierie, en particulier pour les systèmes PV, pour référencer les performances des installations solaires PV, nous avons besoin d'une variable pour capter la ressource solaire exogène disponible sur le site d'installation. Dans ce contexte, nous avons utilisé un benchmark qui prévoit l'irradiation solaire pendant une durée de 2 secondes

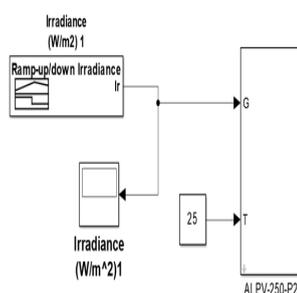


FIGURE III.22 – Insertion du Benchmark d'irradiation

Un benchmark est défini comme une norme par laquelle toutes les autres sont mesurées. Le graphique de référence pour prévoir l'irradiation solaire est présenté dans la figure III.23

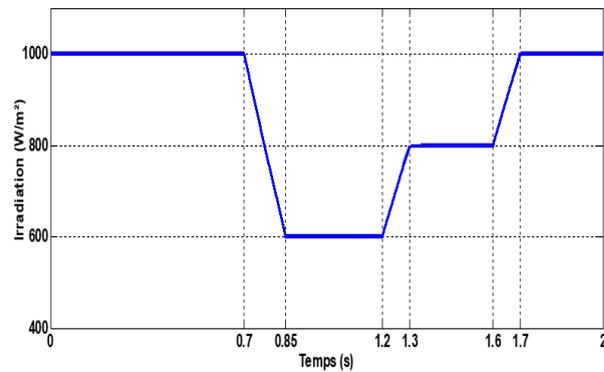


FIGURE III.23 – Graphique du profil d'irradiation

Les variations de cette irradiation ne décroissent pas verticalement puisque c'est supposé être un réel changement de la clarté du ciel comme, par exemple, le passage d'un nuage, qui voilera le soleil pendant un certain instant, puis continuera sa trajectoire en dévoilant de nouveau le soleil.

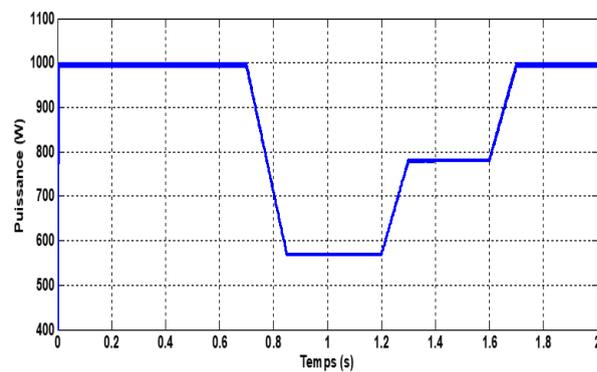
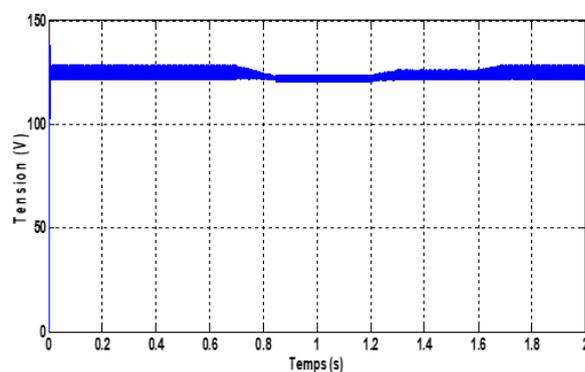
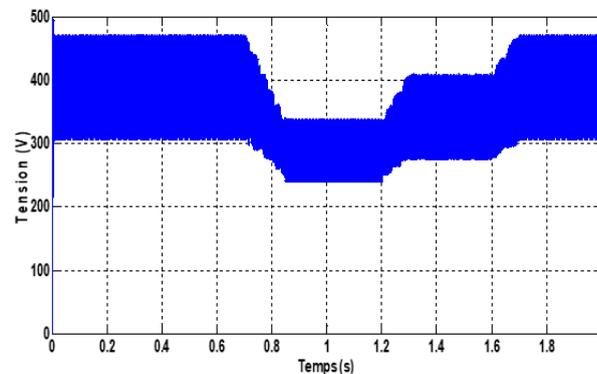


FIGURE III.24 – Allure de la Puissance avec Benchmark

FIGURE III.25 – Allure de V_s avec Benchmark

Cette approche nous a donné beaucoup de crédibilité pour modéliser le système PV.

FIGURE III.26 – Allure de V_c avec Benchmark

III.7 Commande floue

Les méthodes conventionnelles de suivi du point de fonctionnement optimal ont montré leurs limites pendant les changements de température, d'éclairage et de charge reliée au panneau, plusieurs méthodes ont vu le jour pour tenter d'atténuer ces lacunes et améliorer le fonctionnement de ces générateurs. L'approche de l'Intelligence Artificielle dans le cas de la logique floue est mise en œuvre pour améliorer le contrôle, la performance et la recherche du point de puissance maximum par simulation et modélisation d'un contrôleur basé sur la logique floue [9]. La logique floue a retenu l'attention d'un certain nombre de chercheurs dans le domaine de l'électronique de puissance. Cette commande est quelque peu facile à mettre en œuvre car elle n'a pas besoin du modèle mathématique d'un système. Puisqu'elle donne des performances robustes, l'intérêt de l'application pratique de la logique floue se développe rapidement [36]. La logique floue est une forme de logique qui traite un raisonnement approximatif plutôt que fixe et exacte. Contrairement à la logique traditionnelle qui définit généralement la logique à deux valeurs comme vraie ou fausse, la logique floue peut avoir des valeurs variables. Les variables de la logique floue peuvent avoir une valeur vraie ou fausse qui varie à différents degrés et être exprimées par des variables linguistiques. Dans ces cas, le contrôle à logique floue pourrait fournir à la fois une vitesse rapide du processus et la précision nécessaire [7]. La théorie de la logique floue est utilisée pour résoudre le problème de l'oscillation de P&O.

III.7.1 Principe de fonctionnement

Le contrôle par logique floue se compose généralement de trois étapes : la fuzzification, la consultation de la table des règles et la défuzzification. Les entrées du contrôleur flou sont l'erreur et sa variation [18].

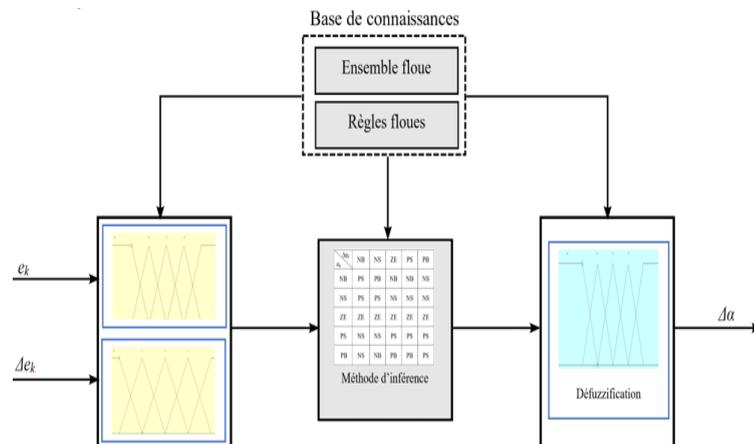


FIGURE III.27 – Structure du régulateur flou

III.7.1-a Fuzzification

La fuzzification permet de transformer les variables réelles en variables floues. La tension (V) et le courant (I) réels du générateur PV peuvent être mesurés en continu et la puissance peut être calculée ($P = V * I$). Les variables d'entrée du régulateur flou proposée sont : l'erreur (e_k) et la variation de l'erreur (Δe_k) [6] Elles sont calculées par l'équation suivante : [18]

$$\begin{cases} e_k = \frac{P_{pvk} - P_{pvk-1}}{V_{pvk} - V_{pvk-1}} \\ \Delta e_k = e_k - e_{k-1} \end{cases} \quad (III.8)$$

III.7.1-b Méthode d'inférence

Dans le processus de fuzzification, les variables d'entrées e_k et Δe_k et la variable de sortie sont converties en variables linguistiques en attribuant des valeurs de fonction d'appartenance. Ces variables sont exprimées en différents ensembles flous : NB (négatif grand), NS (négatif petit), ZE (environ zéro), PS (positif petit), PB (positif grand) [7] Une fois l'erreur et sa variation sont calculées, la phase de fuzzification permet la conversion de ces deux variables en ensembles flous. Dans cette étape, ces entrées seront analysées à l'aide des règles présentés dans la figure III.28 [18]

$\Delta e_k \backslash e_k$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PS	PB	NB	NB	NS
NS	PS	PS	NS	NS	NS
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	NS	NS	PS	PS	PS
PB	NS	NB	PB	PB	PS

FIGURE III.28 – Règles du contrôleur logique floue

III.7.1-c Défuzzification

La sortie du FLC apparaît dans la troisième phase (défuzzification) les sous-ensembles flous de sortie sont convertis en une valeur numérique. La sortie est considérée comme une variation du rapport cyclique qui est utilisée pour calculer le rapport cyclique comme le montre l'équation suivante : [18]

$$\alpha_k = \alpha_{k-1} - \Delta\alpha_k \quad (\text{III.9})$$

Nous avons essayé de remplacer la méthode P&O par un FLC, illustré dans la figure suivante.

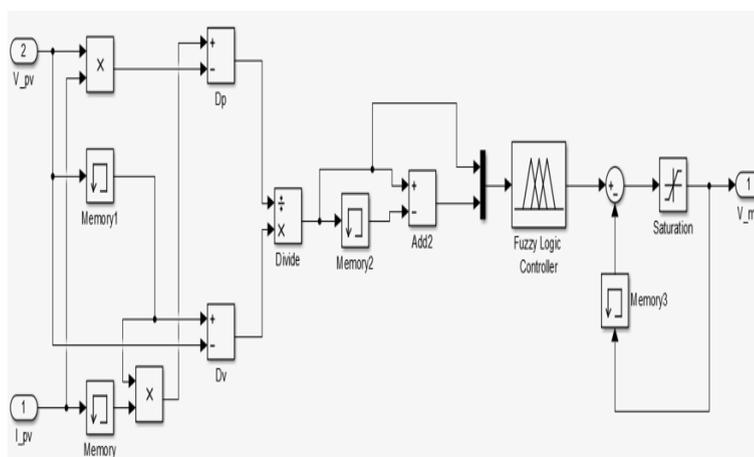


FIGURE III.29 – Schéma bloc d'un contrôleur flou

Malheureusement, et sous contrainte du temps nous n'avons pas aboutis aux résultats désirés.

III.8 Conclusion

Dans le but d'extraire un maximum de puissance d'un GPV, il est nécessaire d'utiliser des composants d'électronique de puissance comme les hacheurs pour convertir la tension à la sortie du module PV. C'est le cas d'étude de ce chapitre, dans lequel nous avons proposé une brève présentation des convertisseurs DC-DC et leurs différentes topologies, en portant notre choix sur un hacheur Boost. Ensuite, il est primordial d'extraire le maximum de puissance à la sortie du GPV, ce qui explique notre utilisation de la commande MPPT de type P&O, puisque la technique à base de logique floue n'a pas abouti. A la fin, nous avons introduit un modèle de référence d'irradiation d'une durée de 2s qui représente les changements atmosphériques qui peuvent se produire durant la journée. Dans le prochain chapitre, nous essayerons de lier notre GPV à une charge linéaire par le biais d'un convertisseur DC-AC et ses différentes techniques de commande.

Chapitre IV

Système photovoltaïque non connecté au réseau

SOMMAIRE

IV.1 INTRODUCTION	59
IV.2 STRUCTURE D'UN SYSTÈME PV NON RACCORDÉ AU RÉSEAU	59
IV.3 ETUDE DE L'ONDULEUR AUTONOME	60
IV.3.1 Structure de l'onduleur en pont	61
IV.3.2 Schéma du montage onduleur	61
IV.3.3 Analyse de fonctionnement	62
IV.3.4 Calcul tension/courant	62
IV.3.5 Chronogrammes	62
IV.4 DIFFÉRENTES STRUCTURES DE COMMANDE DE L'ONDULEUR	63
IV.4.1 Stratégie de commande	63
IV.4.2 Commande par MLI à Hystérésis	64
IV.5 SYNTHÈSE DES RÉGULATEURS DE BUS CONTINU	64
IV.5.1 Régulateur PI	65
IV.5.2 Régulateur IP	66
IV.6 ETUDE DES DIFFÉRENTS TYPES DE FILTRES	67
IV.6.1 Filtre L	67
IV.6.2 Filtre LC	67
IV.6.3 Filtre LCL	68
IV.7 INTRODUCTION DE LA CHARGE AU SYSTÈME	69
IV.8 RÉSULTATS DE SIMULATION ET INTERPRÉTATIONS	69
IV.8.1 Résultats de simulation	69
IV.8.2 Interprétations	70
IV.9 CONCLUSION	70

IV.1 Introduction

La technologie du photovoltaïque suscite, de plus en plus, l'intérêt des chercheurs grâce aux innovations et au développement dans le domaine de l'électronique de puissance. Effectivement, puisque la tension fournie par les panneaux photovoltaïques est une tension de type continu, alors, afin de raccorder un GPV au réseau il est nécessaire d'avoir recours à un dispositif performant (convertisseurs DC-DC et DC-AC) qui permettra d'adapter et d'assurer un bon transfert d'énergie.

Dans notre travail, le système étudié est autonome et débite sur une charge destinée à l'usage domestique ou agricole. Nous aurons alors besoin d'un convertisseur DC-AC dit onduleur autonome, puis de filtres à la sortie de ce dernier afin de réduire les harmoniques qui dégradent la qualité de l'énergie.

L'onduleur choisi est un onduleur de tension monophasé, commandé par hystérésis et MLI à base d'un régulateur PI ou IP. Ensuite, nous allons étudier les différentes topologies des filtres en choisissant un seul type pour au final, modéliser le système au complet dans l'environnement MATLAB, après calcul et choix de la charge.

IV.2 Structure d'un système PV non raccordé au réseau

Pour la configuration d'un système PV non raccordé au réseau, il est nécessaire de relier un convertisseur DC-DC, commandé à base d'une technique MPPT, au GPV afin d'atteindre le point de fonctionnement optimal. Cet ensemble est connecté à un convertisseur DC-AC qui permettra la synchronisation de la source avec la charge, grâce à une stratégie de commande qui sera explicitée dans les paragraphes qui suivent.

La figure IV.1 illustre, à vue de nez, la structure de notre système.

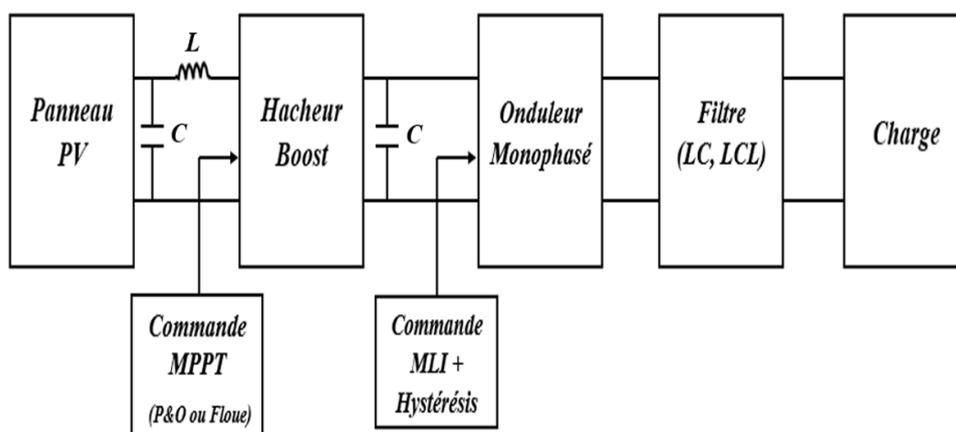


FIGURE IV.1 – Structure d'un système PV autonome.

IV.3 Etude de l'onduleur autonome

Les convertisseurs DC-AC, communément appelés onduleurs sont alimentés en continu, ils modifient de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permettent d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

Contrairement à l'onduleur non autonome qui se contente de réaliser le transfert de puissance d'une source continue vers un réseau alternatif préexistant, l'onduleur autonome génère un réseau alternatif totalement indépendant à partir d'une alimentation continue [25].

Comme un hacheur, un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature de la source et de la charge entre lesquelles il est monté. Cela conduit à distinguer :

- Les onduleurs de tension ; alimentés par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant ; alimentés par une source de courant continu.

Il existe des onduleurs à fréquence fixe et à fréquence variable, des onduleurs monophasés et triphasés.

On va s'intéresser aux onduleurs monophasés qui, à leur tour, se divisent en deux classes selon la présence ou non d'un transformateur. Les onduleurs munis de transformateurs disposent d'une isolation galvanique et évitent les courants de fuite. Dans ce cas-là, on cite l'onduleur à point milieu.

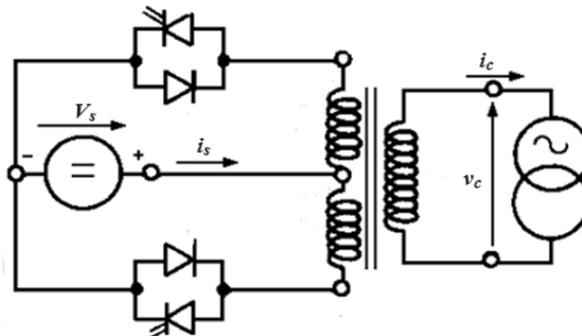


FIGURE IV.2 – Schéma du montage de l'onduleur à point milieu [26].

Néanmoins, un onduleur dépourvu de transformateur est plus avantageux ; il est léger, coûte moins cher et donne de meilleurs rendements. Dans ce cas-ci, on cite l'onduleur en demi pont (Diviseur capacitif ou doubleur de courant) et l'onduleur en pont.

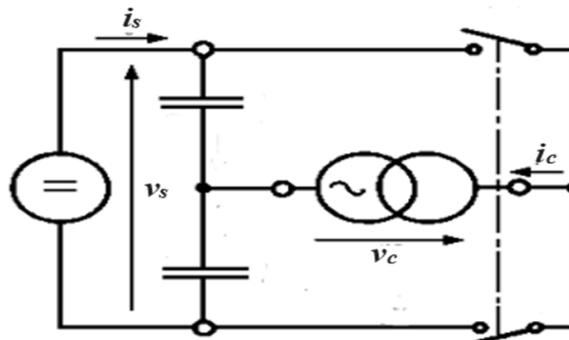


FIGURE IV.3 – Schéma du montage de l'onduleur en demi pont [26].

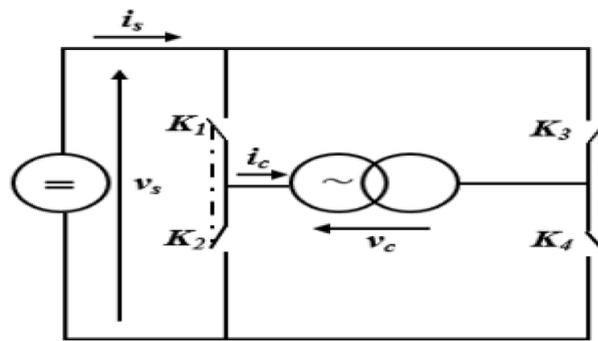


FIGURE IV.4 – Schéma du montage de l'onduleur en pont [26].

Pour la suite de cette étude, notre choix a été porté sur un onduleur monophasé en pont complet.

IV.3.1 Structure de l'onduleur en pont

Comme le montre la figure IV.4, l'onduleur en pont est constitué de quatre interrupteurs K_1 , K_2 , K_3 et K_4 . La liaison entre K_1 - K_2 et K_3 - K_4 montre qu'ils sont complémentaires donc ils ne peuvent être ouverts ou fermés en même temps.

Les interrupteurs utilisés dans notre montage sont des IGBT commandés par MLI comme illustré sur la figure IV.5.

IV.3.2 Schéma du montage onduleur

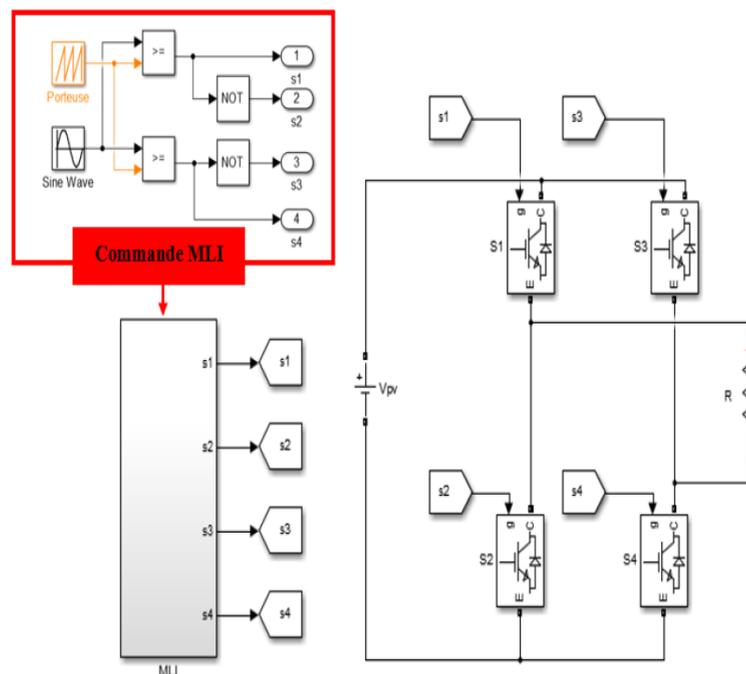


FIGURE IV.5 – Schéma du montage de l'onduleur en pont.

IV.3.3 Analyse de fonctionnement

Les interrupteurs S_1 - S_4 et S_2 - S_3 sont commandés simultanément.

Lorsque $t \in [0; \frac{T}{2}]$, les interrupteur S_1 et S_4 sont fermés, alors que S_2 et S_3 sont bloquées.

$$V_c = V_s \quad \text{et} \quad I_s = I_c$$

Lorsque $t \in [\frac{T}{2}; T]$, les interrupteur S_2 et S_3 sont fermés, alors que S_1 et S_4 sont bloquées.

$$V_c = -V_s \quad \text{et} \quad I_s = -I_c$$

IV.3.4 Calcul tension/courant

Supposons le convertisseur à pertes minimales donc $P_s = P_c$.

$$I_{s_{moy}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_{cm} \times \sin(\omega t - \varphi) d\omega t = \frac{2}{\pi} I_{cm} \times \cos \varphi = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_c \times \cos \varphi \quad (\text{IV.1})$$

$$P_s = P_c \Leftrightarrow V_s I_{s_{moy}} = V_c I_c \cos \varphi \Leftrightarrow V_s = \frac{V_c I_c \cos \varphi}{I_{s_{moy}}} = \frac{V_c I_c \cos \varphi}{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_c \times \cos \varphi} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} V_c \quad (\text{IV.2})$$

$$\Rightarrow V_s = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} V_c \quad (\text{IV.3})$$

Avec V_c et I_c : valeurs efficaces de v_c et i_c respectivement.

IV.3.5 Chronogrammes

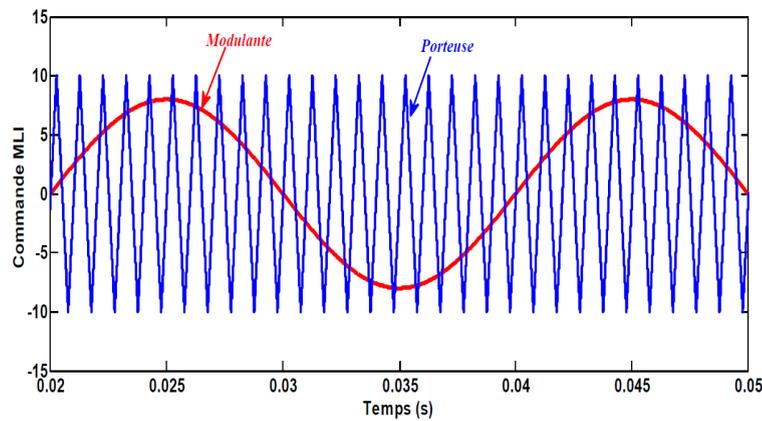


FIGURE IV.6 – Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI sinus-triangle).

Cette commande fait en sorte de comparer un signal sinusoïdal, nommé modulante à un signal en dents de scie, nommé porteuse, de haute fréquence. Elle permet d'avoir une forme de signal sinusoïdale à la sortie de l'onduleur.

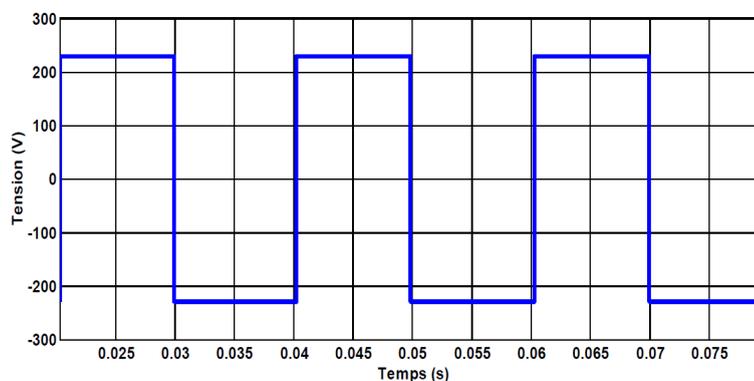


FIGURE IV.7 – Allure de la tension à la sortie de l'onduleur.

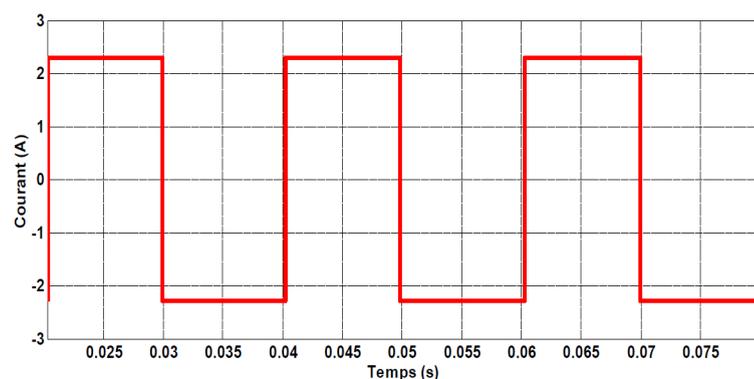


FIGURE IV.8 – Allure du courant à la sortie de l'onduleur.

IV.4 Différentes structures de commande de l'onduleur

IV.4.1 Stratégie de commande

Il existe plusieurs types de commandes d'onduleurs (symétrique, Décalée, MLI). Ces commandes ont pour but d'obtenir une allure sinusoïdale au niveau de la sortie [3].

La structure du système de commande est séparée en deux sous-systèmes ayant des dynamiques différentes : l'une dite rapide qui est liée aux courants, une autre dite lente qui est associée à la tension continue. De ce fait, une synthèse de deux régulateurs pour la boucle interne des courants, et pour la boucle externe de la tension continue peut se faire. D'autre part, il est bien connu que la performance de la boucle des courants joue un rôle essentiel dans la performance globale du système ; c'est pourquoi une commande ayant une réponse rapide et un bon comportement en état stationnaire s'avère nécessaire. Pour le réglage de la tension continue, l'utilisation des commandes classiques, en particulier du type proportionnel intégral, semble être suffisante pour obtenir des performances acceptables.

L'objectif de la commande est de générer les ondes d'ouverture et fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande les plus simples peuvent être utilisées :

- Commande par MLI sinus triangle
- Commande par MLI à hystérésis.

Nous allons choisir la commande MLI à Hystérésis

IV.4.2 Commande par MLI à Hystérésis

La méthode basée sur la MLI met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre la tension et sa référence, détermine le courant de référence de l'onduleur. Ce dernier est ensuite comparé avec un signal sinusoïdal [8].

La sortie du comparateur fournit le courant de référence appliqué à l'entrée du comparateur à hystérésis.

Cette commande est non linéaire, elle utilise l'erreur entre le courant de référence et celui mesuré. La différence entre ces courants est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis. Dès qu'elle excède une amplitude fixée, communément appelée fourchette ou bande hystérésis, la sortie du comparateur fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur pour changer le sens de commutation de telle sorte que l'erreur reste à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis.

Cette commande est simple et robuste mais elle a l'inconvénient d'être libre en fréquence, c'est à dire que la fréquence de commutation n'est pas contrôlée [28].

La figure IV.9 illustre la technique utilisée.

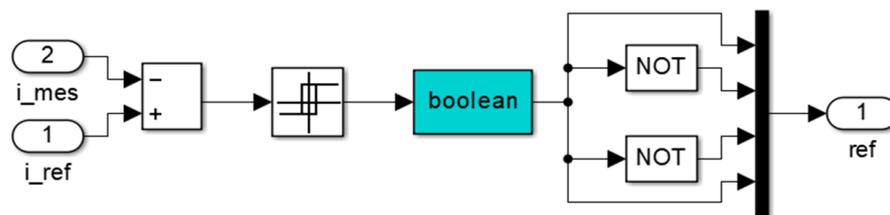


FIGURE IV.9 – Contrôle de courant par hystérésis.

Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis, qui détermine l'erreur sur les courants et la fréquence de commutation, bien que cette dernière reste inconnue [8].

IV.5 Synthèse des régulateurs de bus continu

Dans ce contexte, avec leur action proportionnelle et intégrale, un régulateur de type PI et IP ont été utilisés pour la régulation de la tension du bus continu.

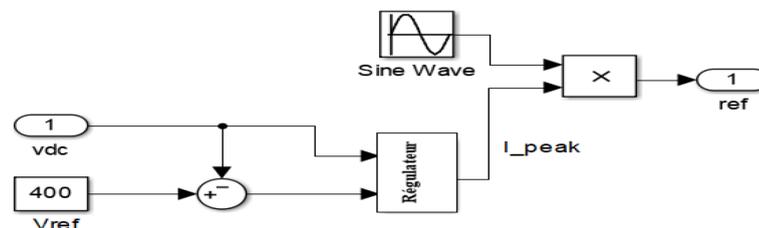


FIGURE IV.10 – Régulateur de tension du bus continu.

IV.5.1 Régulateur PI

Ce type de régulateur, de conception simple, comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et sa propre consigne [11].

Le schéma fonctionnel de la régulation de tension du bus continu est représenté sur la figure suivante :

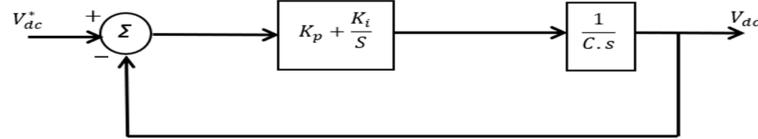


FIGURE IV.11 – Structure du régulateur PI.

Soit $G(s)$ un système de premier ordre donné par sa fonction de transfert

$$G(s) = \frac{1}{C.s} \quad (\text{IV.4})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte intégrant les régulateurs est donnée par

$$G_{BO}(s) = \frac{K_p s + K_i}{C.s^2} \quad (\text{IV.5})$$

La boucle fermée nous donne la fonction de transfert suivante

$$G_{BF}(s) = \frac{k_p s + k_i}{C.s^2 + k_p.s + k_i} \quad (\text{IV.6})$$

La fonction de transfert en boucle fermée, peut être mise sous la forme de celle d'un modèle de second ordre standard de l'équation suivante

$$G(s) = \frac{2.\xi.\omega_n s + \omega_n}{s^2 + 2.\xi.\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{IV.7})$$

Où ξ représente le coefficient d'amortissement et ω_n la pulsation de coupure. En identifiant terme à terme les équations (IV.6) et (IV.7) on obtient

$$\begin{cases} 2.\xi.\omega_n = \frac{k_p}{C} \\ \omega_n^2 = \frac{k_i}{C} \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

Au final, on obtient des équations suivantes, les paramètres k_p et k_i

$$\begin{cases} k_p = \frac{2.\xi.\omega_n}{C} \\ k_i = \frac{\omega_n^2}{C} \end{cases} \quad (\text{IV.9})$$

Afin optimiser les performances et la stabilité du système, le coefficient d'amortissement en boucle fermée est $0.7 \leq \xi < 1$.

Sauf qu'un régulateur PI, malgré le fait qu'il soit employé dans de nombreuses applications industrielles, présente quelques inconvénients comme :

- L'influence des perturbations n'est pas prise en compte lors du dimensionnement.
- Présence de l'action intégrale pouvant amplifier le bruit (instabilité) [24].

Pour remédier à cela, nous allons effectuer la synthèse du régulateur IP puis comparer les deux correcteurs et choisir celui qui présente de meilleures performances pour l'utiliser dans la suite du travail.

IV.5.2 Régulateur IP

Les régulateurs IP sont analogues aux régulateurs PI sauf que les actions proportionnelles et intégrales sont mises en série contrairement aux régulateurs PI. La boucle de régulation est définie par les paramètres (k_{pc}, k_{ic}) .

Le schéma fonctionnel de la régulation de tension du bus continu est représenté sur la figure suivante [24] :

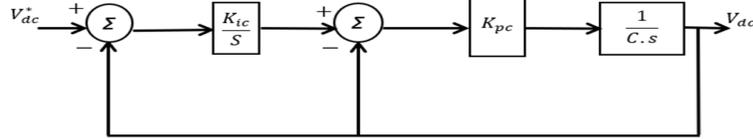


FIGURE IV.12 – Structure du régulateur IP.

La fonction de transfert en boucle ouverte intégrant les régulateurs est donnée par

$$G_{BO}(s) = \frac{K_{pc} \cdot K_{ic}}{C \cdot s} \quad (\text{IV.10})$$

La boucle fermée nous donne la fonction de transfert suivante

$$G_{BF}(s) = \frac{k_{pc} \cdot k_{ic}}{C \cdot s^2 + k_{pc} \cdot s + k_{pc} \cdot k_{ic}} \quad (\text{IV.11})$$

La fonction de transfert en boucle fermée, peut être mise sous la forme de celle d'un modèle de second ordre standard de l'équation suivante

$$G(s) = \frac{2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (\text{IV.12})$$

Où ξ représente le coefficient d'amortissement et ω_n la pulsation de coupure. En identifiant terme à terme les équations (IV.11) et (IV.12) on obtient

$$\begin{cases} 2 \cdot \xi \cdot \omega_n = \frac{k_{pc}}{C} \\ \omega_n^2 = \frac{k_{pc} \cdot k_{ic}}{C} \end{cases} \quad (\text{IV.13})$$

Au final, on obtient des équations suivantes, les paramètres k_{pc} et k_{ic}

$$\begin{cases} k_{pc} = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot C \\ k_{ic} = \frac{\omega_n^2 \cdot C}{k_{pc}} \end{cases} \quad (\text{IV.14})$$

L'absence de zéros dans le numérateur de la fonction de transfert et le choix d'un coefficient d'amortissement ξ égale à l'unité permet d'éviter les dépassements [24].

Afin d'affirmer l'hypothèse qui suggère que le régulateur IP est à favoriser par rapport au PI, nous allons les insérer tour à tour pour la régulation du bus de tension continue de notre système après avoir choisi le filtre et la charge appropriés dans les parties qui suivent puis comparer les résultats obtenus.

IV.6 Etude des différents types de filtres

Suite aux harmoniques qui dégradent la qualité de l'énergie, un onduleur ne peut être connecté directement à la charge choisie, il existe donc différentes normes qui peuvent remédier à cela. Les transformateurs sont à envisager si ce n'est pour leur coût élevé et l'encombrement qu'ils entraînent. Par contre, l'utilisation d'un circuit de filtrage est une bien meilleure idée. Un filtre est un quadripôle linéaire qui ne laisse passer que les signaux compris dans un domaine de fréquence limite appelé bande passante du filtre. Il permet d'éliminer des fréquences parasites indésirables ou d'isoler, dans un signal complexe, la ou les fréquences utiles.

Le principe du filtrage consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer [29]. Il existe différents types de filtres comme les filtres L , LC et LCL .

IV.6.1 Filtre L

Le filtre L , dont le schéma du circuit est présenté dans la figure IV.13, est un filtre de premier ordre avec une atténuation de 20 dB/décade sur toute la gamme de fréquence. Par conséquent, l'application de ce type de filtre convient aux convertisseurs à fréquence de commutation élevée, où l'atténuation est succincte. De l'autre côté, l'inductance diminue considérablement la dynamique de l'ensemble du convertisseur filtre du système [10].

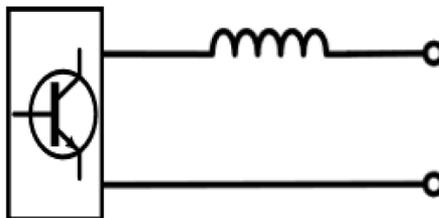


FIGURE IV.13 – Structure du Filtre L .

IV.6.2 Filtre LC

Ce filtre, représenté sur la figure IV.14, est un filtre de deuxième ordre et a de meilleurs comportements d'amortissement qu'un filtre L , sa configuration est simple et facile à concevoir et fonctionne sans problèmes.

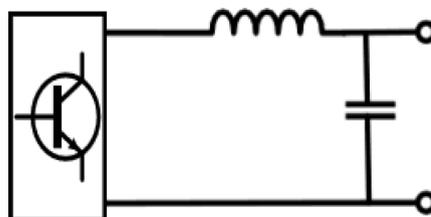


FIGURE IV.14 – Structure du Filtre LC .

Ces filtres sont utilisés dans la domaine de haute fréquence (*HF*). A la résonance comme à la coupure, on a $Z_c = Z_L$ (loi de Thomson), d'où

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \Leftrightarrow L.C.\omega = 1 \Leftrightarrow \omega = \frac{1}{L.C} \Leftrightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{L.C}} \quad (\text{IV.15})$$

$$\Rightarrow 2\pi.f = \frac{1}{\sqrt{L.C}} \quad (\text{IV.16})$$

Sachant que notre choix s'est porté sur le filtre passe bas, nous avons présenté dans le tableau ci-après les quatre montages de base des filtres *LC*.

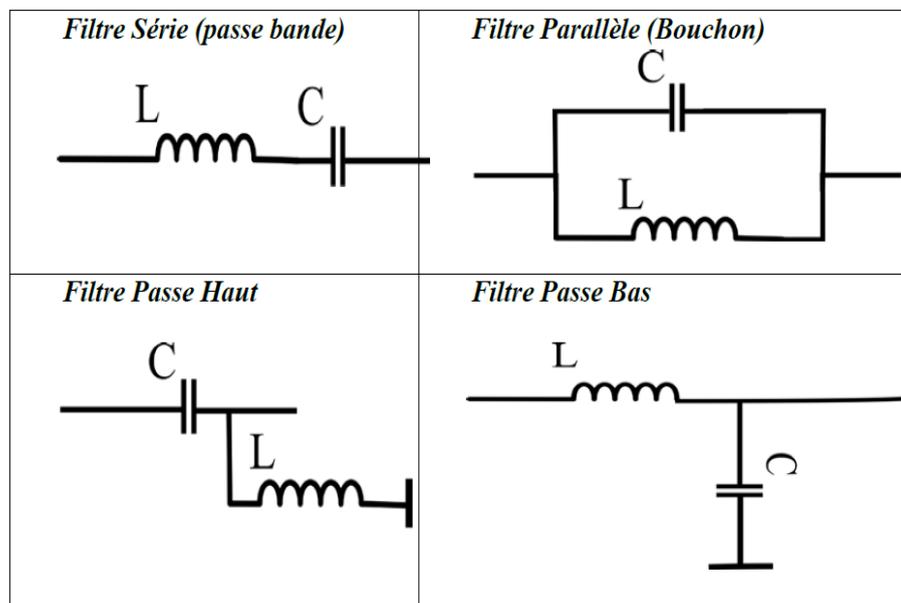


FIGURE IV.15 – Montage des filtres passifs *LC*.

IV.6.3 Filtre *LCL*

Le filtre *LCL* est un de filtre passe-bas du troisième ordre qui garantit le couplage entre les différentes sources et une bonne atténuation pour les fréquences supérieures à la fréquence de coupure.

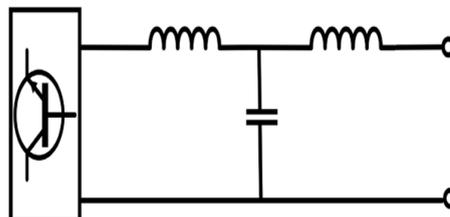


FIGURE IV.16 – Montage des filtres passifs *LC*.

Dans le contexte de notre travail, et comme cité dans les parties précédentes, on cherche à modéliser un onduleur autonome connecté à une charge *R* linéaire via un filtre *LC*.

En effet, l'utilisation d'un filtre LCL compliquerait grandement l'étude, nécessitant une modélisation mathématique avec introduction d'un signal d'entrée supplémentaire.

IV.7 Introduction de la charge au système

La puissance consommée par cette charge sous une tension alternative de 230V est de l'ordre de 1kW on déduit alors la valeur de la charge de l'équation (IV.17)

$$\begin{cases} P = V.I \\ R = \frac{V^2}{P} \\ R = \frac{230^2}{1000} = 52.9 \Omega \end{cases} \quad (\text{IV.17})$$

IV.8 Résultats de simulation et interprétations

IV.8.1 Résultats de simulation

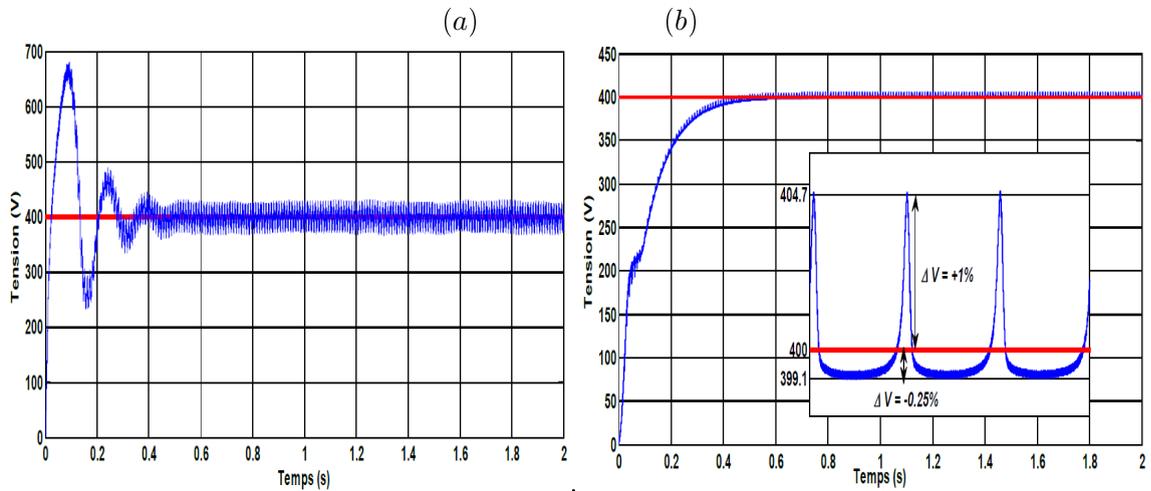


FIGURE IV.17 – Tension du bus continu par régulateur PI (a) et régulateur IP (b).

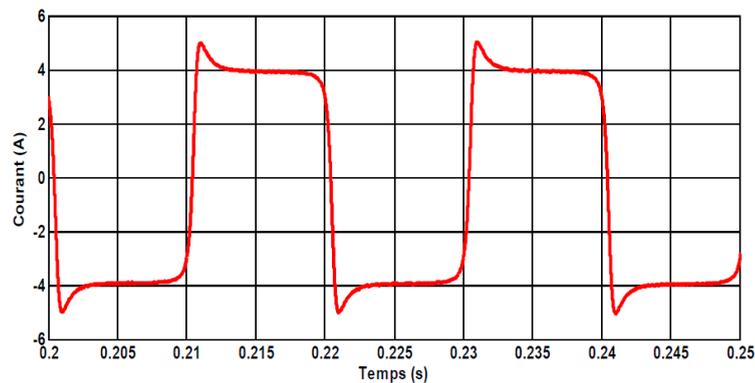


FIGURE IV.18 – Allure du courant de charge.

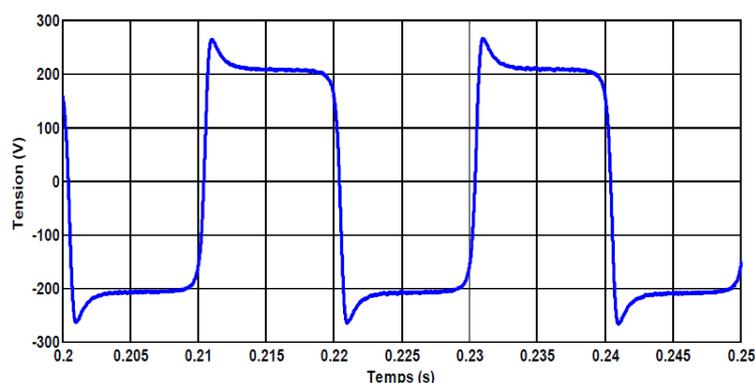


FIGURE IV.19 – Allure tension de charge.

IV.8.2 Interprétations

La figure IV.17, montre que la réponse de tension du bus continue avec un PI présente un dépassement. Par contre, le régulateur IP ne présente pas de dépassement en régime transitoire (pour $K_{ic} = 10$ et $K_{pc} = 0.2$). En régime permanent, on note que les deux régulateurs présentent une erreur statique relativement nulle.

Donc en effet, les résultats de la simulation avec un régulateur PI n'étaient pas assez satisfaisants. C'est pourquoi nous avons favorisé l'utilisation du régulateur IP pour la suite de notre étude qui, à son tour, nous a fourni de meilleurs résultats.

Après introduction de la charge calculée au préalable, les allures du courant et de la tension à la sortie de l'onduleur sont présentées respectivement dans les figures IV.18 et IV.19

On remarque que, le courant de la charge est dans les normes et ne dépasse pas la valeur du courant de référence. La tension de la charge est une tension alternative prédestinée à l'usage domestique ou agricole.

IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons obtenu les résultats de simulation de notre système photovoltaïque autonome sans batterie de stockage constitué d'un GPV, un hacheur Boost, un onduleur de tension monophasé, un filtre LC et la charge. Ces résultats ont révélé un bon comportement face au profile typique solaire et le maintien du transfert d'énergie à la charge en réponse à ces exigences.

Nous avons mis l'accent sur l'étude de l'onduleur autonome, sa structure ainsi que les différentes méthodes assurant sa commande. Concernant la commande de l'onduleur nous avons appliqué la commande par MLI à hystérésis. Dans la régulation du bus continu, nous avons appliqué deux types de régulateur (PI, IP). Une comparaison entre les deux méthodes a été établie dans l'environnement Matlab/Simulink, en vue de décider laquelle est la plus appropriée pour notre système. Enfin, nous avons présenté les différentes topologies des filtres (L , LC , LCL), en portant notre choix sur le filtre LC pour la modélisation du système globale.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent les systèmes photovoltaïques autonomes sans stockage. Un générateur solaire PV tient compte de la conversion directe du rayonnement solaire en énergie électrique.

Le premier chapitre nous a permis de bien comprendre le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque et l'application des modules photovoltaïques dans la production de l'électricité.

Dans le deuxième chapitre, en utilisant un modèle de panneau solaire PV bien détaillé sur MATLAB nous avons réussi à représenter les principales caractéristiques du panneau PV ainsi de déterminer les caractéristiques ($I - V$) et ($P - V$) du panneau. Les performances du générateur se dégradent légèrement avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Ce modèle a été validé en comparant les résultats de simulation avec le modèle *ALPV250 - P60* disponible dans le laboratoire d'automatique de Tlemcen (LAT).

Dans le troisième chapitre, on a étudié, en premier lieu, les différents types de convertisseurs DC-DC pour effectuer un choix final selon les résultats voulus. Dans notre cas, la meilleure valeur de tension de sortie qu'on a pu atteindre pour un rapport cyclique plus proche de la réalité est de $V_c = 100V$. Or, nous avons besoin de plus, la tension de sortie doit alors atteindre les $400V$, c'est pourquoi nous avons choisi une solution, économique et non encombrante, qui consiste à associer quatre panneaux PV à un seul hacheur Boost. En second lieu, nous avons présenté une étude sur les techniques de commande (MPPT) de type P&O et Logique floue. En utilisant un algorithme de commande P&O dans notre système, les résultats expérimentaux obtenus démontrent l'efficacité du convertisseur Boost et de l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale dans l'optimisation de la performance du système PV étudié.

Dans le dernier chapitre, nous avons finalisé notre système en ajoutant un onduleur monophasé autonome en pont en mettant l'accent sur l'étude de sa structure ainsi que les différentes méthodes assurant sa commande et qui sont la commande par MLI sinus triangle et la commande par MLI $\tilde{\Delta}$ Hystérésis. En amont de la commande MLI, nous

avons appliqué deux types de régulateur (PI, IP), pour la régulation du bus continu. Une comparaison entre les deux méthodes a été établie dans l'environnement Matlab/Simulink, en portant un choix final sur l'utilisation du régulateur IP en vue de l'absence du dépassement dans le bus de tension continue. Enfin, nous avons présenté les différentes topologies des filtres (L, LC, LCL), en portant notre choix sur le filtre LC pour la modélisation du système globale en y ajoutant une charge résistive.

Néanmoins les résultats de ce modeste travail constituent les bases d'un travail à poursuivre et à améliorer pour une étude beaucoup plus approfondie qui pourra faire l'objet d'une thèse de doctorat. Ainsi, les perspectives futures sont dans un premier temps la réalisation pratique. Puis nous pouvons améliorer cette recherche en faisant une étude approfondie sur la commande par logique floue et en améliorant les résultats de sa simulation. Ou encore par des études comparatives des différents modèles du MPPT, comme la commande par back-stepping ou par mode glissant. Nous pourrions aussi envisager d'intégrer différentes charges que celle employée, des charges inductives ou bien capacitatives et même essayer d'intégrer le système au réseau de distribution.

Bibliographie

- [1] <https://www.iea.org/reports/solar-pv>. Consulté le 02 mars 2022.
- [2] <https://www.irena.org/solar>. Consulté le 02 mars 2022.
- [3] Bechlaghem Y. ABID, A. : *Etude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque*. mémoire Master. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2017.
- [4] A. AYAD : *Etude et réalisation d'une commande MLI pilotant un hacheur série*. mémoire Master académique, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2014.
- [5] R. Youcef W BELMELIANI, M : *Modélisation d'un Système Photovoltaïque relié au Réseau : Contrôle des puissance active et réactive*. mémoire Master. Université Mustapha Stambouli, Mascara, 2018.
- [6] B BENDIB : *Une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes*. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas, Setif, 2017.
- [7] Y. BENOTMANE : *Commande MPPT à base de la logique floue appliquée à un Système Photovoltaïque*. mémoire Master. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2020.
- [8] Ould El Haiba M K. BETAOUAF, D. : *Commande robuste d'un système photovoltaïque à usage domestique*. mémoire Master. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2013.
- [9] Hamzaoui I I. Hadjammar A. BOUCHAFAA, F. : *Fuzzy Logic Control for the tracking of maximum power point of a PV system*, volume 6. Energy Procedia, 2011.
- [10] O. BOUCHERIT : *Etude et modélisation d'un filtre LCL pour onduleur photovoltaïque connecté au réseau*. mémoire Master. Université Saad Dahlab, Blida, 2019.
- [11] G. BOUKERCHE : *Etude et synthèse d'un contrôleur PI et application*. Université Badji Mokhtar, Annaba, 2017.
- [12] M. BOUKLI-HASSAN, O : *Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleur gestion énergétique*. Magister en Automatique, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2011.
- [13] La cellule photovoltaïque comment ça MARCHE : <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaïque-comment-ça-marche#:~:text=Le%20principe%20de%20fonctionnement,et%20de%20neutrons...%20>. Consulté le 02 mars 2022.
- [14] A. CHEBANA : *Control d'un système photovoltaïque connecté au réseau*. mémoire Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

- [15] F. CHOUIKI, W : *Réalisation d'une commande buck-boost pour PV*. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2018.
- [16] Type de cellules PHOTOVOLTAÏQUE : <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>. Consulté le 02 mars 2022.
- [17] Etat des lieux du déploiement solaire en AFRIQUE : <https://www.pv-magazine.fr/2021/12/17/serie-bilan-2021-etat-des-lieux-du-dploiement-solaire-en-afrique/#:~:text=L'Afrique%20poss%C3%A8de%2040%20%25%20du,efficace%20et%20%C3%A0%20grande%20%C3%A9chelle>. Consulté le 02 mars 2022.
- [18] Y. DRIS : *Etude d'une ferme hybride éolienne-système photovoltaïque utilisant de nouvelles topologies*. Thèse de doctorat. Université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2022.
- [19] H. ESSAKHI : *Modélisation et simulation d'un module photovoltaïque*. Numéro vol.33. LASIME, ESTA Université Ibn Zohr, BP, 2019.
- [20] Allaoui M. FEKIH, Z. : *« Etude d'un convertisseur multi-niveaux pour une commande MPPT dédiée à un système photovoltaïque*. mémoire Master. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2020.
- [21] Ighil D A. GHALEM, K. : *Etude Comparative de Commandes MPPT Appliquées à un Système Photovoltaïque raccordé au réseau électrique*. Mémoire Master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2021.
- [22] Elmenreich W. KHATIB, T. : *Modeling of photovoltaic systems using Matlab : Simplified green codes*. John Wiley & Sons, 2016.
- [23] le nouveau projet d'électricité solaire de L'ALGERIE : https://www.francetvinfo.fr/monde/afrique/algerie/solar-1000-mw-le-nouveau-projet-d-electricite-solaire-de-l-algerie_4896631.html. Consulté le 02 mars 2022.
- [24] Loucif M : *Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur*. Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaid Tlemcen Faculté de Technologie, 2016.
- [25] K. MAMMAR : *Cours d'électronique de puissance et Application avec SimPowerSystems (Matlab/Simulink)*.
- [26] M. MELIANI, S : *Notes de cours : électronique de puissance, Master M1-ELT-CE, Semestre S1 - EC712*. Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, Faculté de Technologie, Département de Génie électrique et Electronique (GEE), 2020.
- [27] M. MISSOUM : *Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie*. Thèse de doctorat. Université Hassiba Benbouali, Chlef, 2011.
- [28] H NINOUH : *Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque et de l'onduleur*. mémoire Master académique, Université Akli Mohand Oulhaj, Bouira, 2016.
- [29] O. OMEIRI : *Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant*. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar, Annaba, 2007.
- [30] Barrade P RUFER, A. : *Cours d'électronique de puissance-Conversion DC/DC*, 2001.

-
- [31] Merrouche Y. SERHANE, M. : *Commande par mode glissant d'un système photovoltaïque connecté à un réseau monophasé via double étages*. mémoire Master. Université Mohamed Seddik Benyahia, Jijel, 2020.
- [32] CNRS LE JOURNAL. L'énergie solaire dans le MONDE : <https://lejournale.cnrs.fr/infographies/lenergie-solaire-dans-le-monde-les-chiffres>. Consulté le 02 mars 2022.
- [33] Convertisseurs STATIQUES : <http://www.electrosup.com/index.php>. 26 mai 2022.
- [34] Kumar L. Ashok Surekha P. SUMATHI, S. : *Solar PV and wind energy conversion systems : an introduction to theory, modeling with MATLAB/SIMULINK, and the role of soft computing techniques*. Springer, Switzerland, 2015.
- [35] G. Gazoli J R. Ruppert Filho E. VILLALVA, M : Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. *Brazilian Journal of Power Electronics*, 14(1):35–45, 2009.
- [36] Y. Kim D H. Kim S C et al WON, C : A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller. *Proceedings of 1994 Power Electronics Specialist Conference-PESC'94*, 1994.

Annexe A : Titre annexe A

Catalogue technique du module photovoltaïque ALPV-250-P60

/// CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT

Tension maximale du système.	DC 1000 volts
Température de fonctionnement.	-40 °C ~ +85 °C
Calibre unitaire des fusibles en série.	15 ampères
NOCT	47 +/-2
Charge statique, frontal, (Neige et vent)	5400 Pa
Charge statique, arrière, (Vent).	2400 Pa
Classe d'application	Classe A
Classe de sécurité	II

/// PERFORMANCES ELECTRIQUES SOUS LES CONDITIONS (STC)

Conditions standards de test : irradiation 1000W/m², température de cellule 25°C, masse d'air 1.5 G

	ALPV 250P60
Puissance (Pmpp).	250,00 W
Tension à puissance max (Umpp).	30,55 V
Intensité à puissance max (Impp).	8,19 A
Tension en circuit ouvert (Uoc).	36,67 V
Intensité du court circuit (Isc).	8,69 A
Rendement module.	15,37 %

PARAMÈTRES TECHNIQUES

Nombre et type de cellule	60 cellules polycristallines 156x156mm
Dimension (Lon x Lar)	1640mm x 992mm (+/-2)
Châssis	Aluminium anodisé, section 40 x 35 mm
Configuration	10 cellules x 6 rangées
Face avant	Verre trempé 3,2 mm
Poids	18,60 Kg
Encapsulant	EVA (Éthylène - Vinyl - Acetate)
Boîtier de connexion	3 diodes bypass, IP65, TUV&UL
Câble	Longueur 900 mm, section 4mm ²
Connecteurs	MC4 compatible

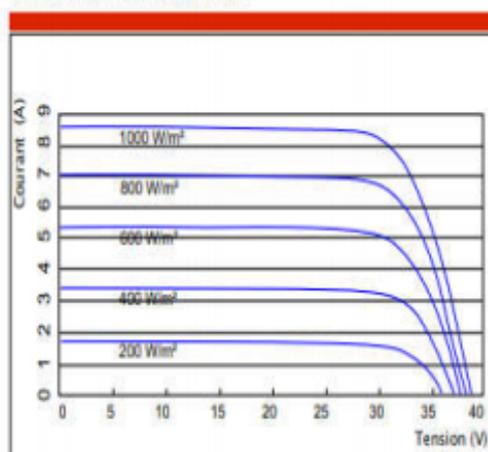
COEFFICIENTS DE TEMPÉRATURE

coefficient de température de P_{max}	- 0,470 % °C
coefficient de température de V_{oc}	- 0,380 % °C
coefficient de température de I_{sc}	+ 0,040 % °C

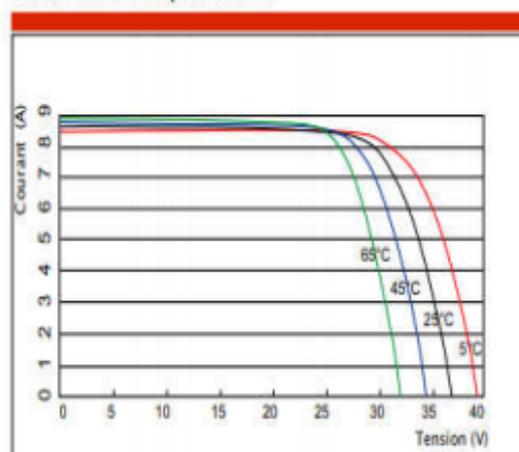
EMBALLAGE

Nombre de modules par palette	: 25
Nombre de modules par conteneur de 40 pieds	: 700
Dimension de la palette	: 1700x1150x1170mm

Caractéristique I-V typique selon différentes irradiances



Caractéristique I-V typique selon différentes températures



Résumé :

Ce mémoire met en œuvre par simulation l'utilisation de l'énergie photovoltaïque raccordé à une charge linéaire via des convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC. L'hacheur utilisé sera alors commandé par le biais d'une technique MPPT de type P&O afin d'extraire le point maximal de puissance du GPV. La facilité de commande des onduleurs et leur efficacité nous permettrons de faire le lien entre l'énergie créée et la charge utilisée. Plusieurs commandes, telles que la commande MLI et la commande par hystérésis en plus d'un régulateur IP ont été appliquées au système afin de garantir de meilleurs rendements. La présence des harmoniques nous a conduit à insérer un circuit de filtrage LC.

Mots clés : Panneaux photovoltaïque, commande MPPT, hacheur, onduleur monophasé autonome, MLI.

Abstract

This thesis shows by simulation the use of photovoltaic energy connected to a linear load via static DC-DC and DC-AC converters. The chopper used will then be controlled through a P&O type MPPT technique in order to extract the maximum power point from the GPV. The ease of controlling the inverters and their efficiency will allow us to make the link between the energy created and the load used. Several controls, such as PWM control and hysteresis control in addition to an IP controller have been applied to the system to ensure better yields. The presence of harmonics led us to insert an LC filter circuit.

Keywords: Photovoltaic panels, MPPT controller, Chopper, stand-alone single-phase inverter, PWM

ملخص

تقدم هذه الأطروحة محاكاة باستخدام الطاقة الشمسية متصلة بحمولة عبر محولات ثابتة DC-DC و DC-AC. سيتم بعد ذلك التحكم في القاطع المستخدم من خلال تقنية MPPT من نوع P&O من أجل استخراج أقصى نقطة للطاقة من المولد. ستسمح لنا سهولة التحكم في العاكس وكفاءته في إنشاء رابط بين الطاقة التي تم إنشاؤها والحمل المستخدم. تم تطبيق العديد من الضوابط، مثل التحكم في PWM والتحكم في التباطؤ بالإضافة إلى وحدة تحكم IP على النظام لضمان عوائد أفضل. قادنا وجود التوافقيات إلى إدخال دائرة استخدام الطاقة الكهروضوئية المتصلة مرشح LC.

الكلمات المفتاحية : لوحة شمسية , تحكم MPPT , قاطع متناوب , عاكس مستقل احادي الطور , تحكم PWM