

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث 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 électriques

Par : Zakaria FEKIH

Et Meriem ALLAOUI

Sujet

**Etude d'un convertisseur multi-niveaux pour une
commande MPPT dédiée à un système
photovoltaïque**

Soutenu en vidéo conférence, le 08/ 07 / 2021 devant le jury composé de :

Boumediene YACOUBI	Maitre assistant 'A'	Univ. Tlemcen	Président
Mourad LOUCIF	Maitre de conférences 'B'	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Abdelkader MECHERNENE	Maitre de conférences 'A'	Univ. Tlemcen	Co-Directeur de mémoire
LAZREG Mohamed Haithèm	Maitre assistant 'B'	Univ. Tlemcen	Examineur 1

Dedicaces 1

Je dédie ce travail :

- à mon père qui est toute ma gratitude, car c'est grâce à lui que j'ai atteint mon but ;
- à mon frère Mohamed et ma soeur chaimaa ;
- à ma mère que je la remercie pour son soutien moral, ses encouragements et ses conseils qui m'ont guidés durant mon parcours ;
- à tous mes amis(es) et spécialement pour Belaredj Mohamed Amine, Embarek Nour Eddine et Sahraoui Amina qui m'ont beaucoup soutenu ;
- À mon binÃ´me Meriem, avec qui je partage cet événement grandiose.
- Enfin à tout ce ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans ce travail.
-

Zakaria FEKIH
Tlemcen, le 17 juin 2021

Je dédie ce travail :

- à mon père qui est toute ma gratitude, car c'est grâce à lui que j'ai atteint mon but ;
- à ma mère que je la remercie pour son soutien moral, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie ;
- à ma sœur Sarah et mes frères Djamal et Abdelhadi, que Dieu les protège ;
- à ma meilleur amie Ghizlane Senouci et ma cousine yasmine boucetla et tous mes amis, spécialement pour Addoun afafe et Karim Boumezrag qui mon beaucoup soutenu.
- à mon binôme Zakaria, avec qui je partage cet événement grandiose ;
- à tout ce ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans ce travail.

Meriem ALLAOUI
Tlemcen, le 17 juin 2021

Remerciements

Il nous est agréable et important de réserver cette page comme un témoin de reconnaissance à toutes les personnes qui nous ont soutenus et encadré pour la réalisation de ce travail. Nous remercions Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé santé, volonté, courage et patience pour accomplir ce modeste travail, en dépit des contraintes causées par l'épidémie de Covid-19.

Nous tiens à remercier notre encadreur, Dr Mourad LOUCIF, Maitre de conférences à l'Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, pour son aide et tous ses conseils, son écoute, sa patience et sa disponibilité. Nous lui exprimons notre profonde gratitude pour s'être fait profiter de ses connaissances, mais aussi de ses méthodes de travail et surtout de sa rigueur scientifique.

Nos infinies remerciements à notre co-encadreur Dr Abdelkader MECHERNENE, Maitre de conférences à l'Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen pour ses aides, ses conseils avisés et ses remarques qui nous ont permis de réaliser notre travail et de le présenter dans sa meilleure forme.

Nous sommes particulièrement sensibles à l'honneur que nous a fait Monsieur Boumediene YACOUBI, Maitre-assistant à la Faculté de Technologie de l'Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen pour avoir accepté de présider et d'honorer de sa présence le jury de soutenance du présent mémoire.

Nous tenons également à adresser nos remerciements à Mademoiselle Mohamed Halthèm LAZREG, Maitre assistant à l'Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen pour avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire au titre de membre du jury.

Nos remerciements aussi tous ceux qui m'ont aidé aussi bien dans mes recherches et documentations que dans mon encadrement et suivi.

à tous nos amis, à tous ceux qui nous ont aidés et à tous ceux qui nous aimons.

Zakaria FEKIH Meriem ALLAOUI
Tlemcen, le 17 juin 2021

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES 1	i
DEDICACES 2	ii
REMERCIEMENTS	iii
NOMENCLATURE	xi
GLOSSAIRE	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES	3
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 L'ÉNERGIE RENOUELABLE	4
I.3 PANNEAUX SOLAIRES	4
I.4 RAYONNEMENT SOLAIRE	4
I.4.1 Rayonnement direct	5
I.4.2 Rayonnement diffus	5
I.4.3 Rayonnement réfléchi (albédo)	5
I.4.4 Rayonnement global	5
I.5 EFFET PHOTOVOLTAÏQUE	5
I.6 CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	6
I.6.1 Constitution d'une cellule	6
I.6.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	7
I.6.3 Différents types de cellules photovoltaïques	8
I.6.3-a Cellules monocristallines	8
I.6.3-b Cellules poly cristallines	8
I.6.3-c Cellules amorphes	9
I.7 EVOLUTION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE EN ALGÉRIE	9
I.7.1 Répartition du potentiel solaire en Algérie	9
I.7.2 Park des énergies renouvelable installé	10
I.7.3 Programme des énergies renouvelables en Algérie	11
I.8 GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE	12
I.9 DIFFÉRENTES STRUCTURES DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES	13
I.9.1 Système autonome	13
I.9.2 Système connecté au réseau	14

I.9.3	Système PV hybride	14
I.10	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE	15
I.10.1	Avantages	15
I.10.2	Inconvénients	15
I.11	CONCLUSION	16
II	MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE	17
II.1	INTRODUCTION	18
II.2	MODÈLE ÉQUIVALENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	18
II.2.1	Modèle à une seule diode	18
II.2.2	Modèle à deux diodes	20
II.3	SIMULATION DE GÉNÉRATEUR ÉLECTRIQUE DU PANNEAU PV	21
II.4	CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	24
II.4.1	Caractéristiques (courant / tension)	24
II.4.2	Caractéristiques (puissance / tension)	25
II.5	SIMULATION DE PANNEAUX À TEMPÉRATURE ET ÉCLAIREMENT VARIABLE	25
II.5.1	Influence de l'éclairement G	26
II.5.2	Influence de la température	27
II.5.3	Influence des résistances série et parallèle	28
II.6	ASSOCIATION DES CELLULES PV	29
II.6.1	Association en série	29
II.6.2	Association en parallèle	29
II.6.3	Association hybride (série/parallèle)	30
II.7	GRANDEURS CARACTÉRISTIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	30
II.7.1	Courant de court-circuit I_{cc}	30
II.7.2	Tension à circuit ouvert V_{co}	30
II.7.3	Rendement photovoltaïque	31
II.7.4	Facteur de forme ff	31
II.8	CONCLUSION	31
III	ÉTUDE DE CONVERTISSEUR CONTINU/CONTINU (HACHEUR)	32
III.1	INTRODUCTION	34
III.2	DIFFÉRENTS TYPES DE CONVERTISSEUR STATIQUE	34
III.3	HACHEUR ABAISSEUR (BUCK)	35
III.3.1	Schéma de montage Buck	35
III.3.2	Analyse de fonctionnement Buck	35
III.3.3	Chronogramme Buck	36
III.3.4	Calcule Buck	37
III.4	CONVERTISSEUR ÉLÉVATEUR (BOOST)	38
III.4.1	Schéma de montage Boost	38
III.4.2	Analyse de fonctionnement Boost	38
III.4.3	Calculs Boost	39
III.4.4	Chronogramme Boost	39
III.5	HACHEUR ABAISSEUR-ÉLÉVATEUR "BUCK- BOOST"	40
III.5.1	Schéma de montage Buck-Boost	40

III.5.2	Analyse de fonctionnement Buck-Boost	41
III.5.3	Chronogramme Buck boost	42
III.5.4	Calcule Buck Boost	42
III.6	HACHEUR CUCK	43
III.6.1	Schéma de montage d'un hacheur Cuck	43
III.6.2	Analyse de fonctionnement	43
III.6.3	Chronogramme Cuck	45
III.6.4	Calcule Cuck	45
III.7	COMMANDE PAR MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION (MLI) DES HACHEURS	46
III.7.1	Cas d'un hacheur Buck (abaisseur)	46
III.7.2	Principe de la modulation	46
III.7.3	Schéma du hacheur et de sa commande	47
III.7.4	Schéma Simulink	47
III.7.5	Résultats de simulation	48
III.7.6	Interprétation	49
III.8	HACHEUR MULTINIVEAUX	49
III.8.1	Schéma de montage d'un hacheur à trois niveaux	50
III.8.2	Configurations du hacheur à trois niveaux	50
III.8.3	Commande en MLI du hacheur à trois niveaux	51
III.8.4	Analyse de fonctionnement d'un hacheur trois niveaux	51
III.8.5	Chronogramme hacheur trois niveaux	52
III.8.6	Interprétation	55
III.9	CONCLUSION	55
IV	SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUE A BASE D'UN CONVERTISSEUR CONTINU/CONTINU	56
IV.1	INTRODUCTION	57
IV.2	SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE À BASE D'UN HACHEUR	57
IV.3	TECHNIQUE D'EXTRACTION DE MAXIMUM DE PUISSANCE	57
IV.3.1	Principe de fonctionnement de MPPT	58
IV.3.2	Algorithme de commande MPPT	59
IV.3.3	Algorithme de perturbation et observation	59
IV.4	CALCUL DES PARAMÈTRES DE BUCK	61
IV.4.1	Rapport cyclique	61
IV.4.2	Détermination de la valeur de l'inductance	61
IV.4.3	Calcule la valeur de la capacité	62
IV.4.4	Calcul de résistance de charge	62
IV.5	SIMULATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE À BASE D'UN HACHEUR À DEUX NIVEAUX	63
IV.5.1	Résultats de simulation hacheur buck deux niveaux	64
IV.5.2	Interprétations hacheur buck deux niveaux	66
IV.6	SIMULATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE À BASE D'UN HACHEUR À TROIS NIVEAUX	67
IV.6.1	Résultats de simulation hacheur à trois niveaux	68
IV.6.2	Interprétations hacheur à trois niveaux	71

IV.7 CONCLUSION	72
CONCLUSION GÉNÉRALE	73
BIBLIOGRAPHIE	76

TABLE DES FIGURES

I.1	Types de rayonnements solaires reçus au sol [13].	5
I.2	Effet photovoltaïque [15].	6
I.3	Constitution d'une cellule [5].	7
I.4	Structure d'une cellule photovoltaïque [3].	7
I.5	Cellule photovoltaïque monocristallines [14].	8
I.6	Cellule photovoltaïque poly-cristallin[14].	8
I.7	Cellule photovoltaïque amorphes.	9
I.8	Irradiation globale journalière au mois de Juillet sur les plans : a- horizontal et b- normal [1].	10
I.9	Irradiation globale journalière au mois de Décembre sur les plans : a- horizontal et b- normal [1].	10
I.10	Objectifs du programme Algérien des énergies renouvelables en 2030.	11
I.11	Différents parks des énergies renouvelable installé dans l'Algérie en 2020.	12
I.12	Champ PV de la cellule.	12
I.13	Champ PV de la cellule.	13
I.14	Système PV autonome ou isolé.	13
I.15	Système PV raccordé au réseau sans batterie.	14
I.16	Système PV hybride.	15
II.1	Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.	18
II.2	Schéma équivalent à deux diodes.	20
II.3	Subsystem de photo-courant.	21
II.4	Subsyteme de courant de saturation.	21
II.5	Subsyteme de courant de saturation inverse.	22
II.6	subsyteme de courant a travers la résistance shunt.	22
II.7	subsyteme de courant de sortie.	23
II.8	Simulation de modèle PV.	23
II.9	Caractéristique (courant-tension) d'un module photovoltaïque pour $G=1000$ W/m^2 et $T = 25^{\circ}C$	24
II.10	Caractéristique (puissance-tension) d'un module photovoltaïque pour $G =$ $1000W/m^2$ et $T = 25^{\circ}C$	25
II.11	Bloc du modèle réel implémenté sous Matlab Simulink.	25
II.12	Caractéristique courant-tension pour différents éclairnements.	26
II.13	Caractéristique puissance-tension pour différents éclairnements.	26
II.14	Caractéristique courant-tension pour différents niveaux de températures.	27
II.15	Caractéristique puissance-tension pour différents niveaux de températures.	27
II.16	Influence la résistance série.	28

II.17 Influence la résistance série.	28
II.18 Caractéristique du groupement en série des cellules identiques.	29
II.19 Caractéristique du groupement en parallèle de cellules identiques.	29
II.20 Caractéristique courant-tension d'un regroupement série et parallèle des cellules photovoltaïque.	30
III.1 Différents types de convertisseurs.	34
III.2 Réversibilité et non réversibilité des convertisseurs statiques.	35
III.3 Schéma de montage d'un hacheur Buck.	35
III.4 Convertisseur Buck durant l'état On.	36
III.5 Convertisseur Buck durant l'état Off.	36
III.6 Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck.	37
III.7 Schéma de montage d'un hacheur Boost.	38
III.8 convertisseur boost durant la phase 1.	38
III.9 Convertisseur boost durant la phase 2.	39
III.10 Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost.	40
III.11 Schéma de montage d'un hacheur Buck-Boost.	40
III.12 Convertisseur Buck-Boost durant l'état On (phase 1).	41
III.13 Convertisseur Buck-Boost durant l'état Off (phase 2).	41
III.14 Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck-Boost.	42
III.15 Schéma de montage hacheur Cuck.	43
III.16 Circuit de convertisseur Cuck quand l'interrupteur S est fermé.	43
III.17 Circuit de convertisseur Cuck quand l'interrupteur S est ouvert.	44
III.18 Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Cuck.	45
III.19 Structure du hacheur série (Buck).	46
III.20 Principe du command en MLI d'un hacheur.	47
III.21 Montage du hacheur abaisseur et de sa commande.	47
III.22 Schéma de simulation d'un hacheur deux niveaux et sa commande.	47
III.23 Tension source et charge de hacheur Buck ($\alpha = 0.5$).	48
III.24 Courant de charge et le courant de source de hacheur Buck ($\alpha = 0.5$).	48
III.25 Tension de l'interrupteur $S1$ et de la diode D ($= 0.5$).	49
III.26 Hacheur trois niveaux et sa commande.	50
III.27 Principe de la modulation command MLI a trois niveaux.	51
III.28 Tension de source et tension de charge.	53
III.29 Courant de source et courant de charge.	53
III.30 Tension de capacité flottante.	53
III.31 Courant de capacité flottante	54
III.32 Tensions aux bornes de diode 1 et diode 2.	54
III.33 Tension au borne de deux Mosfet.	54
IV.1 Schéma simplifié d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur.	57
IV.2 Schéma de principe de la commande MPPT d'un système photovoltaïque.	58
IV.3 Variation du point de puissance maximale avec l'éclairement, la température et la charge.	59

IV.4 Variation du Point de Puissance Maximale avec l'éclairement, la température et la charge.	59
IV.5 Organigramme de la méthode P&O.	60
IV.6 Schéma bloc Simulink de système PV à base d'un hacheur buck deux niveaux.	63
IV.7 Tension de source.	64
IV.8 Courant de source.	64
IV.9 Puissance de sortie du module photovoltaïque.	64
IV.10 Tension de charge.	65
IV.11 Courant de charge.	65
IV.12 Puissance de charge.	65
IV.13 Tension aux bornes de Mosfet.	66
IV.14 Tension aux bornes de diode.	66
IV.15 Schéma de simulation d'un système PV à base de hacheur à trois niveaux.	67
IV.16 Tension de source.	68
IV.17 Courant de source.	68
IV.18 Puissance de sortie du module photovoltaïque.	68
IV.19 Tension de charge.	69
IV.20 Courant de charge.	69
IV.21 Puissance de charge.	69
IV.22 Tension aux bornes du condensateur flottant.	70
IV.23 Courant de la capacité flottant.	70
IV.24 Tension aux bornes de Mosfet.	70
IV.25 Tension aux bornes de la diode.	70

Nomenclature

Les principales notations et abréviations utilisées dans ce mémoire sont explicitées ci-dessous.

Voc : Tension de circuit ouvert.
Pmax : Puissance maximale.
Iph : Photo-courant.
T : Température absolue en K.
 η : Rendement.
P : Puissance.
V : Tension.
I : Courant.
n : Nombre de cellule.
Ns : Nombre de module en série.
Np : Nombre de module en parallèle.
Pm : Puissance maximale (W).
q : Charge électrique $1.6 \cdot 10^{-19}$ (C).
E_{g0} : Energie de Gap de la cellule = 1.1 (eV).
G : Ensoleillement (w/m²).
K : Constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K .
I-V : Courant-tension.
P-V : Puissance-tension
V_{PV} : Tension du module (V).
P_{PV} : Puissance du module (W).
Vref : Tension de signal de référence.
ΔT : Variation de température (°C).
D : Diode.
R : Résistance.
L : L'inductance.
C : Capacité.
Vs : Tension de source.
VT : Tension aux bornes de l'interrepteur.
TOF : Temps fermeture d'interrepteur .

TON : temps ouverture d'interrepteur.

Vp : Tension aux bornes de diode.

Vc : Tension de charge.

Imin : Courant minimal.

Imax : Courant maximal.

α : Rapport cyclique.

IL : Courant de l'inductance

VL : Tension de l'inductance.

PsMOY : Puissance moyen.

Pach : Puissance absorbé par la charge .

Is : Courant de l'interrupteur.

Vppm : Tension au point de puissance maximale

Pppm : Puissance au point de puissance maximale

Glossaire

Acronyme	Signification
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur photovoltaïque
STC	Standard test conditions
DC	Courant Continu
AC	Courant Alternatif
DC/DC	Hacheur Courant Continu/Courant Continu
P&O	Perturbation et Observation
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Trackig
PMW	Pulse width Modulation
PPM	Point de Puissance Maximale
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET	Métal Oxide Silicon Field Effect Transistor

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont des énergies qui se renouvèlent assez rapidement pour être considérées comme inépuisable à l'échelle humaine du temps, on distingue plusieurs sources d'énergies comme l'énergie géothermique, l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque (qui sera étudiée dans ce mémoire), le principale avantage de ces source d'énergie est que leurs utilisation ne polluera pas l'atmosphère et ne produira pas de gaz a effet de serre tels que le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui provoquent le réchauffement climatique.

La production de l'énergie est basée en grande partie sur des ressources fossiles limitées (pétrole, gaz, charbon), en énergie d'origine thermonucléaire (Uranium, Plutonium...), Ces sources deviennent de plus en plus rares pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement.

L'énergie photovoltaïque issue de la conversion de l'énergie solaire souffre d'un problème d'optimisation, dû aux caractéristiques électriques non linéaires (I-V) des cellules photovoltaïques, Ces caractéristiques dépendent de l'ensoleillement et de température.

L'Algérie, pays du soleil et de l'espace, peut s'inspirer de ces programmes pour une exploitation à grande échelle de l'énergie solaire. Elle a les moyens humains et financiers à la mesure de ces programmes. L'enjeu est grand, et vital dans notre pays l'Algérie est dans le monde l'un des pays de fort potentiel d'exportation de l'énergie électrique solaire [12].

La caractéristique I-V du GPV dépendent de l'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble de plus, son point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, nous avons introduit un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour coupler au mieux ces deux composants. Les systèmes photovoltaïques se relie à leurs charges à travers des convertisseurs de puissances. Ces convertisseurs permettent de conditionner la puissance fournie par le champ photovoltaïque aux caractéristiques de la charge. Si cette charge est une charge continue, on doit utiliser un convertisseur continu-continu. La commande de ce hacheur assure la poursuite du point de puissance maximale [14].

Dans la plupart des systèmes de production d'énergie photovoltaïque, il existe une technique ou un algorithme particulier appelé « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) qui permet de suivre le point de puissance maximale. Comme son nom l'indique, Cette technique, traque le MPP dans le temps et permet de tirer le maximum de puissance que

le panneau est apte à fournir. Le MPPT vise à améliorer et à optimiser l'exploitation des systèmes photovoltaïques. Techniquement, le MPPT fait appel à une interface entre le panneau et la charge qui est généralement un dispositif de conversion de puissance.

Habituellement on utilise des hacheurs à deux niveaux dans les systèmes photovoltaïques. Ce type des hacheurs présentent des inconvénients tels que la tension de blocage élevée des interrupteurs dans le cas d'un système de forte puissance. L'utilisation des convertisseurs multiniveaux permet de contourner ces inconvénients.

Dans ce mémoire, on va étudier deux système photovoltaïque autonome, alimentant une charge continue, constitué à la base d'un hacheur a deux niveaux et à trois niveaux.

Le présent travail est subdivisé en quatre chapitres organisés comme suit :

- Le premier chapitre sera dédié aux généralités sur le photovoltaïque, En commençant par des notions sur le rayonnement, Dans un deuxième temps nous montrons le principe de l'effet photovoltaïque En suite nous abordons le fonctionnement des cellules PV qui nous donnera une vision sur la suite de l'étude.
- Le deuxième chapitre présente la modélisation du système photovoltaïque à base d'une seul diode, deux diodes et ses différentes caractéristiques courant/tension et puissance/tension.
- Dans le troisième chapitre, nous étudions les différents types des convertisseurs statiques DC-DC : abaisseur (Buck), élévateur (Boost), abaisseur- élévateur (Buck-Boost), Cuck, et le hacheur multi niveaux. Nous nous intéresse essentiellement au hacheur Buck deux niveaux et hacheur multi niveaux dans le chapitre suivant.
- Le quatrième chapitre, on va présenter la commande MPPT en utilisant l'algorithme Perturbation & observation (P&O) afin d'extraire le maximum de puissance : le premier à base d'un hacheur à deux niveaux et le deuxième à base d'un hacheur à trois niveaux.

Ce travail s'achève par une conclusion générale qui résume tout les travaux présenter et des perspectives pour de futurs travaux sont suggérés.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

SOMMAIRE

I.1	INTRODUCTION	4
I.2	L'ÉNERGIE RENOUVELABLE	4
I.3	PANNEAUX SOLAIRES	4
I.4	RAYONNEMENT SOLAIRE	4
I.4.1	Rayonnement direct	5
I.4.2	Rayonnement diffus	5
I.4.3	Rayonnement réfléchi (albédo)	5
I.4.4	Rayonnement global	5
I.5	EFFET PHOTOVOLTAÏQUE	5
I.6	CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	6
I.6.1	Constitution d'une cellule	6
I.6.2	Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	7
I.6.3	Différents types de cellules photovoltaïques	8
I.7	EVOLUTION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE EN ALGÉRIE	9
I.7.1	Répartition du potentiel solaire en Algérie	9
I.7.2	Park des énergies renouvelable installé	10
I.7.3	Programme des énergies renouvelables en Algérie	11
I.8	GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE	12
I.9	DIFFÉRENTES STRUCTURES DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES	13
I.9.1	Système autonome	13
I.9.2	Système connecté au réseau	14
I.9.3	Système PV hybride	14
I.10	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE	15
I.10.1	Avantages	15
I.10.2	Inconvénients	15
I.11	CONCLUSION	16

I.1 Introduction

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produit par les modules aux spécifications des récepteurs, appelé aussi "Balance Of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale [21].

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en électricité aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel [10].

En effet le mot "photovoltaïque" vient du grec "photo" qui signifie lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité » [14].

I.2 L'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables sont toutes les énergies que la nature constitue ou reconstitue plus rapidement que l'Homme ne les utilise. Elles peuvent ainsi être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain [3].

- Vent : éolienne
- Soleil : thermique, photovoltaïque, thermodynamique.
- Chaleur terrestre : géothermie.
- Eau : hydroélectrique, marémotrice.
- Biodégradation : biomasse.
- Biocarburant

I.3 Panneaux solaires

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules en série ou en parallèle afin d'obtenir une tension souhaitée [3].

I.4 Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1 390 000 *km*, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80 % d'hydrogène, 19 % d'hélium et 1 % d'un mélange de 100 éléments ; soit pratiquement tous les éléments chimiques connus. Il y a une soixantaine d'années, Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance. Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium. La réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

On distingue plusieurs composantes de rayonnement solaire :

I.4.1 Rayonnement direct

Le rayonnement direct est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

I.4.2 Rayonnement diffus

C'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols

I.4.3 Rayonnement réfléchi (albédo)

le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....) .

I.4.4 Rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol). Dans la figure ci-dessous est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre.

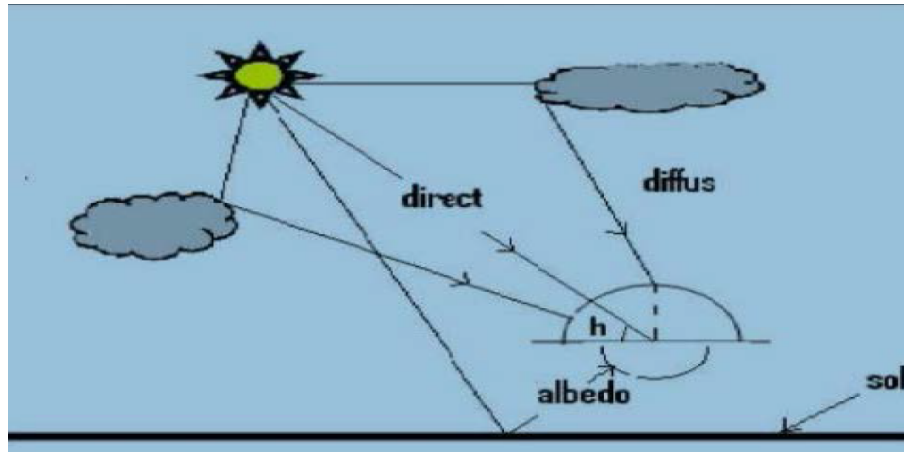


FIGURE I.1 – Types de rayonnements solaires reçus au sol [13].

I.5 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque c'est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés « semi-conducteurs » il y a deux couches dopées p (positif) et dopées n (négatif), dénommées comme jonction p-n (ou n-p) il est 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 sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positive et négative de la cellule [10].

Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent).

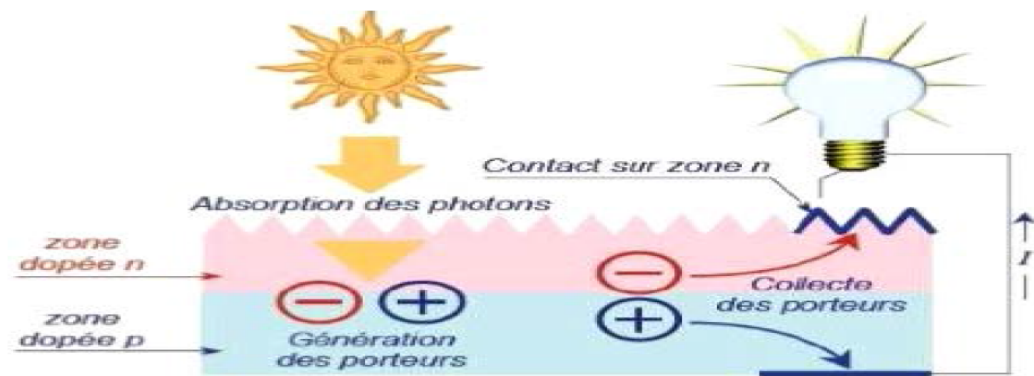


FIGURE I.2 – Effet photovoltaïque [15].

I.6 Cellule photovoltaïque

La cellule PV est un élément le plus petit d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs généralement à base de Silicium elle transforme l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif [14].

I.6.1 Constitution d'une cellule

- Une fine couche semi-conductrice.
- Une couche anti-réflète 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 [15].

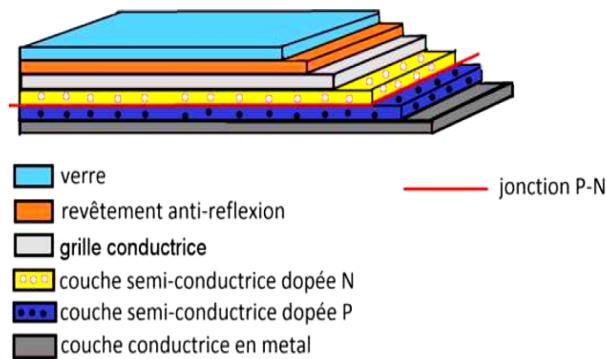


FIGURE I.3 – Constitution d'une cellule [5].

I.6.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement de cette cellule repose sur l'effet photovoltaïque, en effet une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur, ces deux couches sont dopées différemment :

- pour la couche N, apport d'électrons périphériques
- pour la couche P, déficit d'électrons.

La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément qui possède plus d'électron que le silicium. Cette couche possèdera donc, en moyenne, une quantité d'électron supérieure à une couche de silicium pur. Il s'agit d'un semi-conducteur de type N.

La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément qui possède moins d'électron que le silicium. Cette couche possèdera donc, en moyenne, une quantité d'électron inférieure à une couche de silicium pur. Il s'agit d'un semi-conducteur de type P [21].

Pour qu'il y ait conduction, on crée une jonction PN. Lors d'une exposition à la lumière cette dernière doit permettre le passage des électrons entre les deux plaques. Dans les modules solaires, la jonction PN ne s'établit qu'en présence d'un photon. Cette jonction PN va permettre la formation d'un courant électrique.

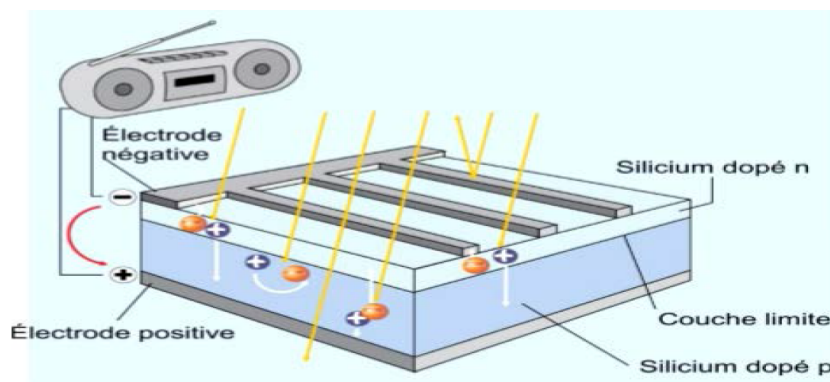


FIGURE I.4 – Structure d'une cellule photovoltaïque [3].

I.6.3 Différents types de cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui est propre. et le type de matériaux utilisés parmi les quelles [15] :

- cellules monocristallines
- cellules poly cristallines
- cellules poly amorphes

I.6.3-a Cellules monocristallines

Elles ont un meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24% en laboratoire) Elles sont composées d'un silicium cristallisé en un seul cristal c'est pourquoi sa couleur est uniforme [15].

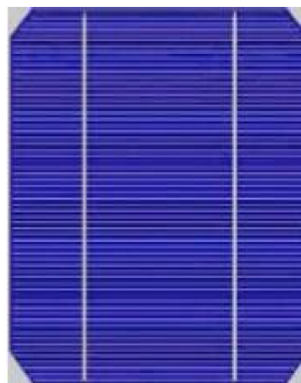


FIGURE I.5 – Cellule photovoltaïque monocristallines [14].

I.6.3-b Cellules poly cristallines

Leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à 19.8 en laboratoire), elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé forme de cristaux multiples, on peut donc déprécier les cristaux [15].



FIGURE I.6 – Cellule photovoltaïque poly-cristallin[14].

I.6.3-c Cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (de 11% à 15% voir jusqu'à 19.8 en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.



FIGURE I.7 – Cellule photovoltaïque amorphes.

I.7 Evolution de l'énergie solaire en Algérie

L'Algérie dispose d'un potentiel d'énergies renouvelables important, notamment le solaire, mais très peu développé. Nous décrivons dans la section suivante la principale ressource renouvelable existante en abondance en Algérie.

De part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m^2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au sud du pays [4].

I.7.1 Répartition du potentiel solaire en Algérie

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée dans le tableau I.1, selon l'ensoleillement reçu annuellement.

TABLE I.1 – Répartition du potentiel solaire en Algérie

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Les figures I.8 et I.9 montrent l'irradiation globale journalière sur les plans horizontal et normal aux mois de Décembre et de Juillet.

Comme le potentiel en énergies renouvelables est très important en Algérie, le gouvernement Algérien veut promouvoir ce type d'énergie et ce, en lançant un programme ambitieux qui sera bien décrit dans la section suivante.

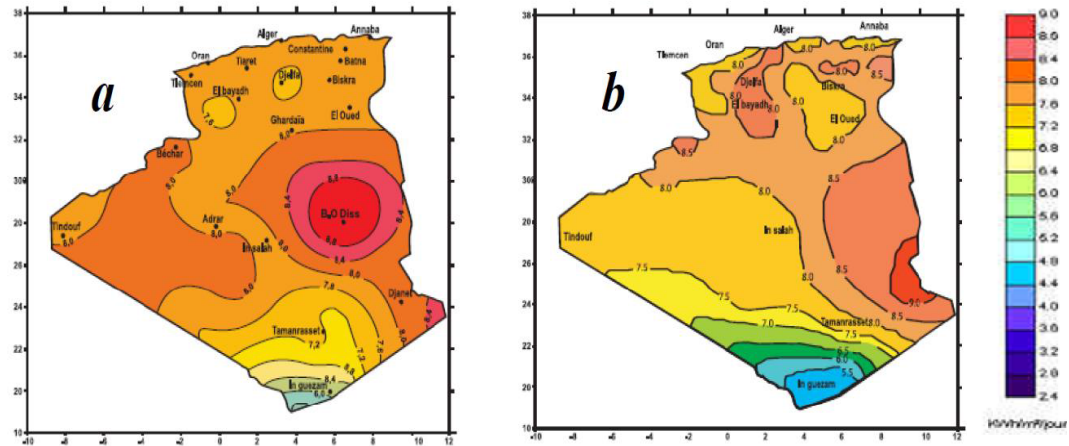


FIGURE I.8 – Irradiation globale journalière au mois de Juillet sur les plans : a- horizontal et b- normal [1].

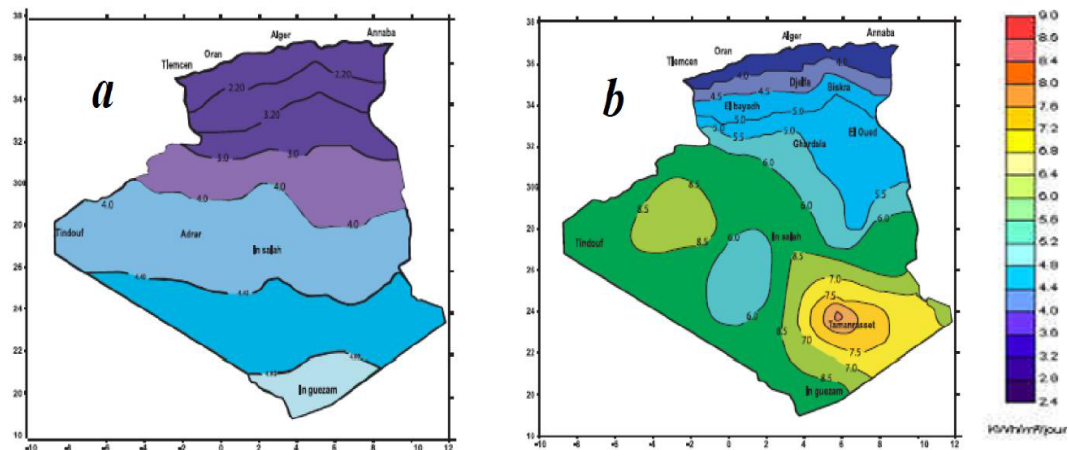


FIGURE I.9 – Irradiation globale journalière au mois de Décembre sur les plans : a- horizontal et b- normal [1].

I.7.2 Park des énergies renouvelable installé

La capacité des énergie renouvelable installé en 2017 :

- Nombre de centrales installées : 24 centrales (23 PV et 01 éolienne)
- Puissance installée : 354,3 MW (344,1 MWc PV et 10,2 MW éolien)

TABLE I.2 – Quelques grandes centrales photovoltaïques

Oued Nechou PV (Ghardaia)	1.1
Sedret Leghzel (Naâma)	20
Oued El kebrit (Souk Ahras)	15
Ain Skhoua (Saida)	30
Ain El Bel (Djelfa) 1 et 2	53
Lekhneg (Laghouat) 1 et 2	60
Telagh (Sidi-Bel-Abbes)	12
Labioudh Sidi Chikh (El-Bayadh)	23
El Hdjira (Ouargla)	30
Ain-El-Melh (M'Sila)	20
Oued El Ma (Batna)	02
Total SKTM (EnR)	354.3

I.7.3 Programme des énergies renouvelables en Algérie

La réalisation du programme permettra d'atteindre à l'horizon 2030 une part de renouvelables de près de 27% dans le bilan national de production d'électricité. Le volume de gaz naturel épargné par les 22 000 MW en renouvelables, atteindra environ 300 milliards de m^3 , soit un volume équivalant à 8 fois la consommation nationale de l'année 2014 [19].

la figure I.10, montre l'objectifs du programme Algérien des énergies renouvelables à l'horison de 2030.

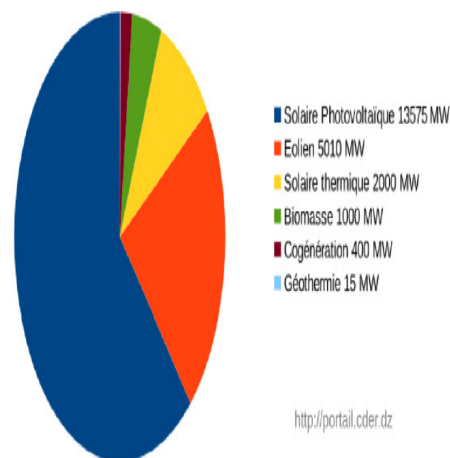


FIGURE I.10 – Objectifs du programme Algérien des énergies renouvelables en 2030.

la figure I.11, montre les différents parks des énergies renouvelable installé dans l'Algérie en 2020.

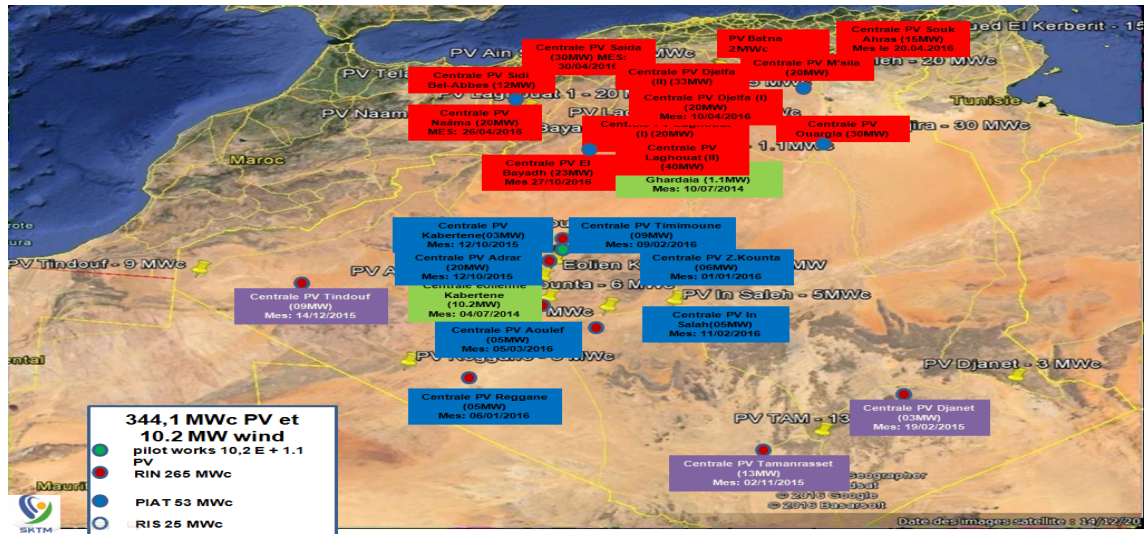


FIGURE I.11 – Différents parks des énergies renouvelable installé dans l'Algérie en 2020.

I.8 Générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire est un petit générateur de très faibles puissances utilisées généralement pour des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées an de créer un module ou un panneau photovoltaïque. 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 dénie selon des conditions spéciques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [15].

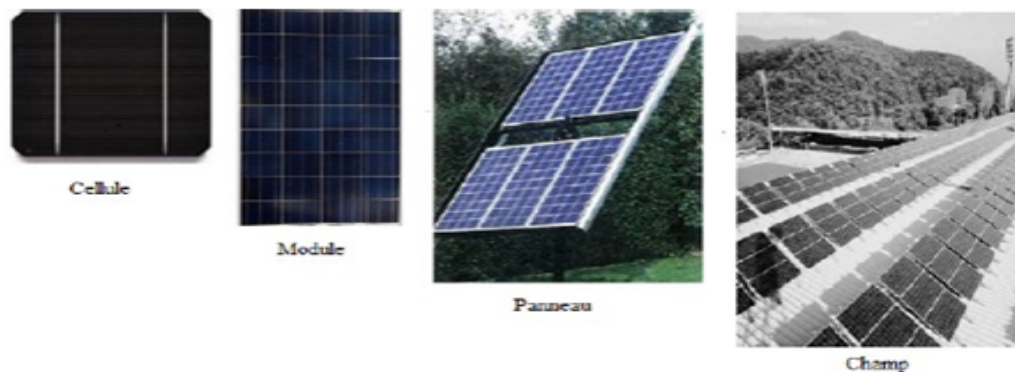


FIGURE I.12 – Champ PV de la cellule.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur

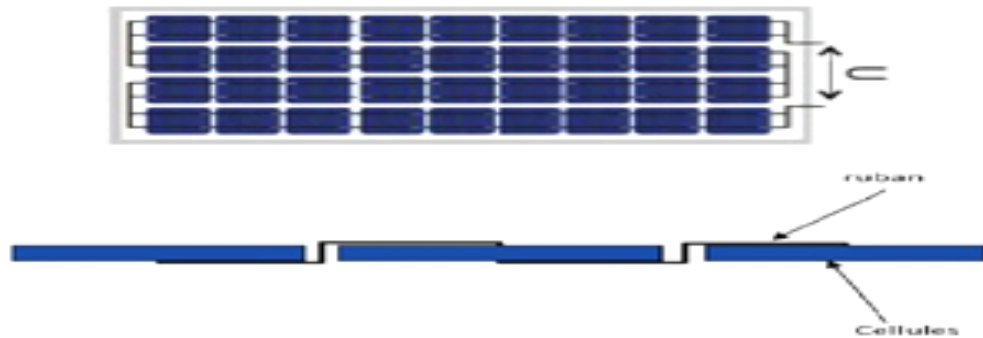


FIGURE I.13 – Champ PV de la cellule.

I.9 Différentes structures des systèmes photovoltaïques

I.9.1 Système autonome

Les systèmes autonome est complètement indépendants des autres sources d'énergie. Ils sont couramment utilisés pour alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes ont les possibilités de couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.

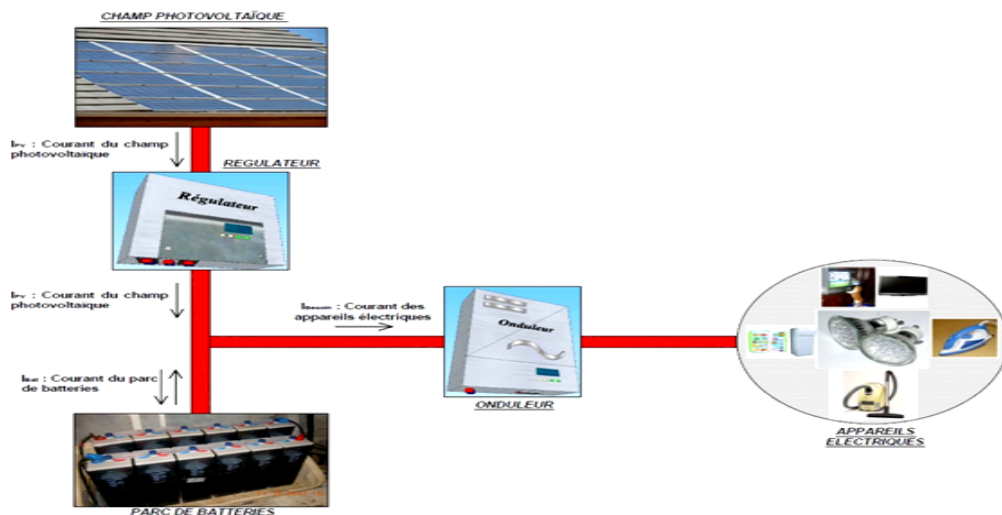


FIGURE I.14 – Système PV autonome ou isolé.

I.9.2 Système connecté au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectée à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Ils produisent leur propre électricité et acheminent leur excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel ils s'approvisionnent au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ces systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau [14].

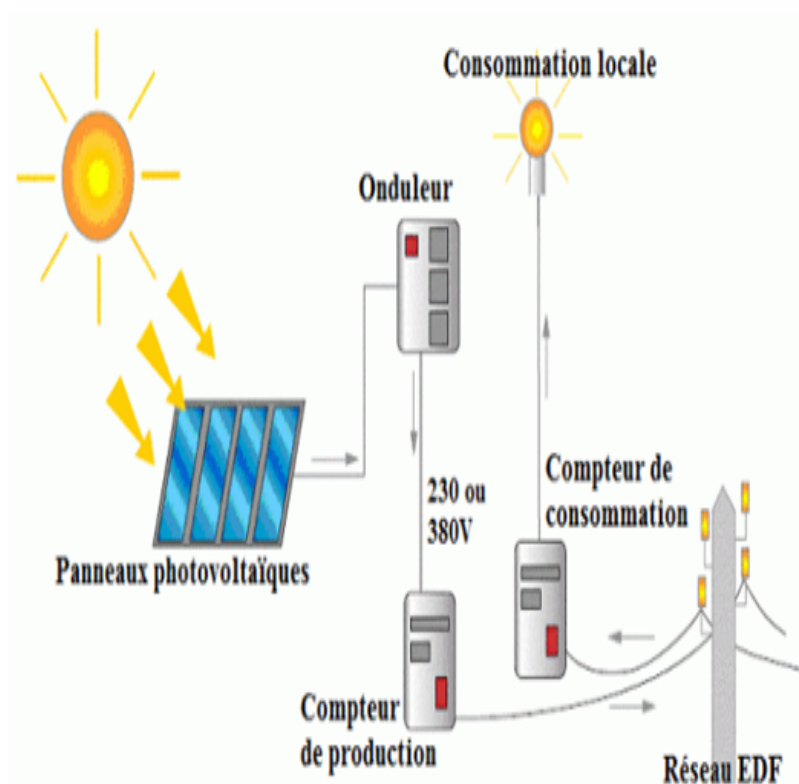


FIGURE I.15 – Système PV raccordé au réseau sans batterie.

I.9.3 Système PV hybride

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène... et même parfois le réseau public d'électricité. En général, un système de batteries stocke l'énergie et permet ainsi de ne pas perdre l'énergie des sources aléatoires telles que le solaire ou l'éolien.

La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimiser, étant entendu que les sources thermiques (gazoil, gaz...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours [14]. L'avantage de ce système réside dans le fait que le générateur solaire n'a pas besoin d'être surdimensionné pour répondre aux besoins quotidiens en énergie, même en période de faible ensoleillement.

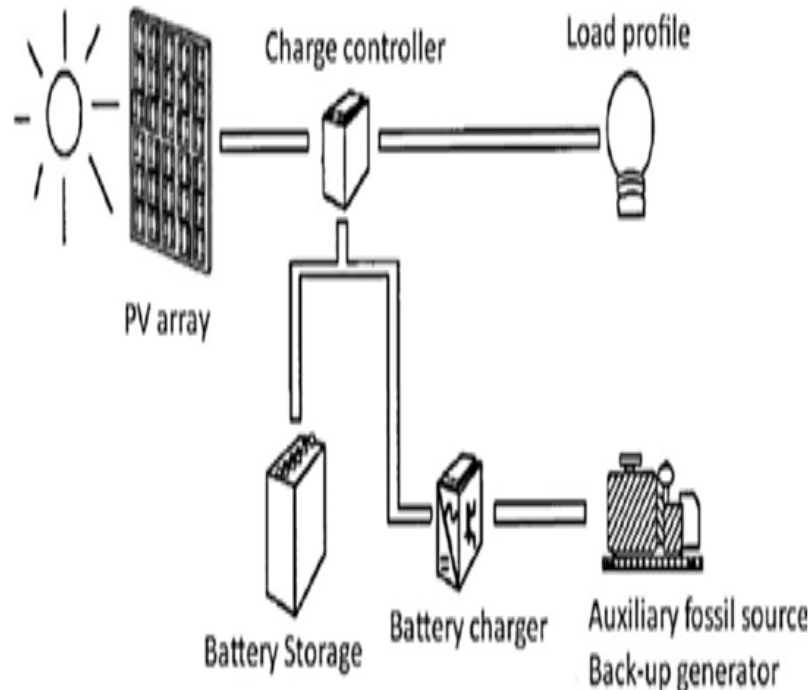


FIGURE I.16 – Système PV hybride.

I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.10.1 Avantages

- Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité
- Absence de bruit, de pollution et d'émissions.
- Maintenance réduite (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules = 20 ans).
- Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3-5 kWh/jour).
- Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente.
- Risque de choc électrique est réduit en 12 ou 24 Vcc et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel [15].

I.10.2 Inconvénients

- Cout d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Faible rendement de conversion de module.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le cout du système photovoltaïque augmente.
- Pollution à la fabrication

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux composants des cellules solaires avec leurs rôles et principes de fonctionnements. Nous parlerons également les différents des types de systèmes PV comme le système autonome, raccordés au réseau et hybride, puis nous nous sommes intéressés aux différentes technologies des éléments constitutifs d'un système PV, finalement nous avons cité les avantages et les inconvénients des systèmes PV en général.

Dans le chapitre suivant, on va présenter la modélisation d'un panneau photovoltaïque à une seul diode et à deux diode et étudie les différents caractéristique d'un panneau photovoltaïque.

Chapitre II

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

SOMMAIRE

II.1	INTRODUCTION	18
II.2	MODÈLE ÉQUIVALENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	18
II.2.1	Modèle à une seule diode	18
II.2.2	Modèle à deux diodes	20
II.3	SIMULATION DE GÉNÉRATEUR ÉLECTRIQUE DU PANNEAU PV	21
II.4	CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	24
II.4.1	Caractéristiques (courant / tension)	24
II.4.2	Caractéristiques (puissance / tension)	25
II.5	SIMULATION DE PANNEAUX À TEMPÉRATURE ET ÉCLAIREMENT VARIABLE	25
II.5.1	Influence de l'éclairement G	26
II.5.2	Influence de la température	27
II.5.3	Influence des résistances série et parallèle	28
II.6	ASSOCIATION DES CELLULES PV	29
II.6.1	Association en série	29
II.6.2	Association en parallèle	29
II.6.3	Association hybride (série/parallèle)	30
II.7	GRANDEURS CARACTÉRISTIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	30
II.7.1	Courant de court-circuit I_{cc}	30
II.7.2	Tension à circuit ouvert V_{co}	30
II.7.3	Rendement photovoltaïque	31
II.7.4	Facteur de forme ff	31
II.8	CONCLUSION	31

II.1 Introduction

Les performances d'un système photovoltaïque dépendent des conditions météorologiques (rayonnement, température,). Afin d'assurer la continuité et la disponibilité de l'énergie extraite des panneaux solaires durant toute l'année, un système photovoltaïque doit être convenablement dimensionné. Pour ce faire, des modèles électriques sont développés pour représenter de comportement non linéaire du système photovoltaïque [2].

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation de rendement ou de diagnostic. Le générateur photovoltaïque est représenté par un schéma équivalent, et chaque paramètre est décrit par des équations qui sont par la suite traduit en schéma bloc sur l'environnement MATLAB/Simulink dans le but d'étudier les différents paramètres régissent les caractéristiques du module.

II.2 Modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque

II.2.1 Modèle à une seule diode

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte des effets résistifs (résistance shunt et série) [22].

- Résistance shunt notée R_{sh} modélise les courants de fuite.
- Résistance série notée R_s modélise les pertes en tension à la sortie de la cellule.

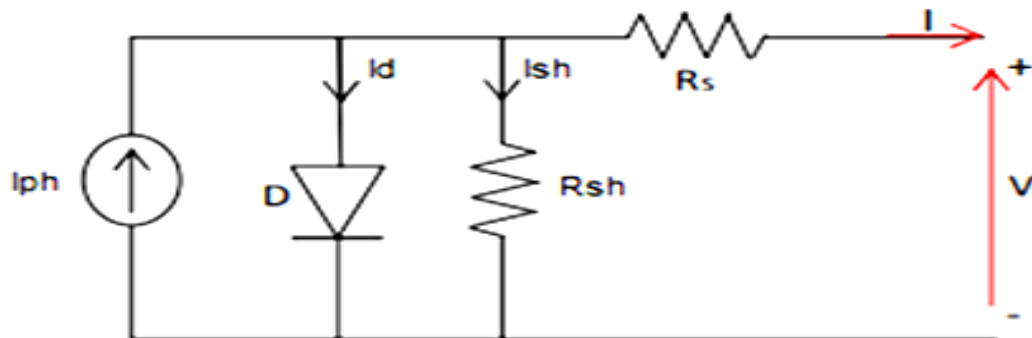


FIGURE II.1 – Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Dans la figure II.1 En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant sera obtenu par l'équation suivante

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

Avec :

Le photon-courant I_{ph} :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i (T - T_n)] \cdot \frac{G}{G_n} \quad (\text{II.2})$$

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - 298)] \cdot \frac{G}{1000} \quad (\text{II.3})$$

I_{ph} : Photo-courant (A)

I_{sc} : Courant de court-circuit (A)

K_i : Coefficient de température de court-circuit a 25° et 1000 W/m² = .0032

T : Température de fonctionnement (k)g

T_n : Température nominale = 298k

G : Ensoleillement (w/m²)

Courant de saturation I_0 est donnees par :

$$I_0 = I_{rs} \cdot \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \cdot \exp \left[\frac{q \times E_{g0}}{n \times k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_n} \right) \right] \quad (\text{II.4})$$

T_n : Température nominale= 298k

q : Charge d'électron= 1.6×10^{-19} coulomb

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

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{n \times N_s \times k \times T}\right)} - 1} \quad (\text{II.5})$$

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

N_s : Nombre de cellule connectée en séries

n : Facteur de qualité de diode = 1.3

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

Courant à travers la résistance shunt :

$$I_{sh} = \left(\frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.6})$$

L'équation d'une cellule photovoltaïque peut se mettre comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q \times (V + R_s \cdot I)}{n \times K \times N_s \times T} - 1 \right) \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.7})$$

N_p : Nombre de modules photovoltaïques connectés en paille

R_s : Résistance séries (Ω) = .221

R_{sh} : Résistance shunt (Ω) = 415.405

V_t : Tension thermique de la diode (V)

II.2.2 Modèle à deux diodes

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique suivant II.2, qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.

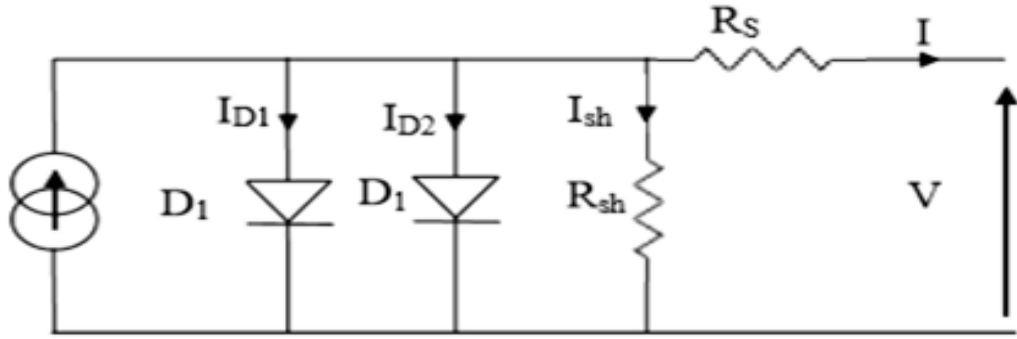


FIGURE II.2 – Schéma équivalent à deux diodes.

Courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{sh} \quad (\text{II.8})$$

Courant de la diode est donné par :

$$I_{D1} = I_{S1} \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{n_1 K T}} - 1 \right] \quad (\text{II.9})$$

$$I_{D2} = I_{S2} \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{n_2 K T}} - 1 \right] \quad (\text{II.10})$$

Avec

I_{01}, I_{02} courant de saturation des diodes.

$$I = I_{ph} - I_{S1} \times \left[e^{\frac{q(V + R_s I)}{n_1 K T}} - 1 \right] - I_{S2} \times \left[e^{\frac{q(V + R_s I)}{n_2 K T}} - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.11})$$

II.3 Simulation de générateur électrique du panneau PV

Les figures II.3, II.4, II.5, II.6, II.7 et la figure II.8 montrent les différents schéma bloc du panneau PV sous Matlab/Simulink sur la base du modèle mathématique précédant de la cellule photovoltaïque, pour une irradiation et une température donnée nominal.

La figure II.3 montre simulation du photo-courant I_{ph}

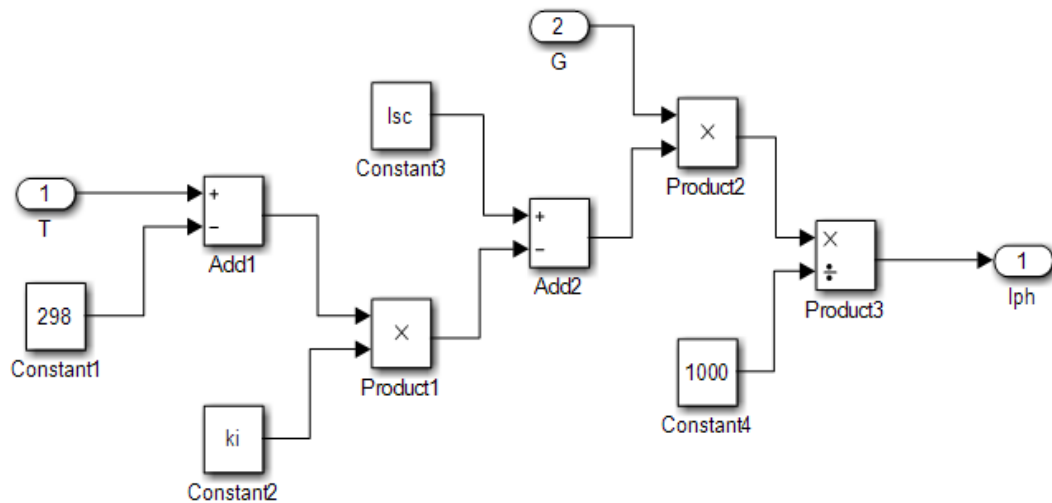


FIGURE II.3 – Subsystem de photo-courant.

La figure II.4 montre simulation du courant de saturation

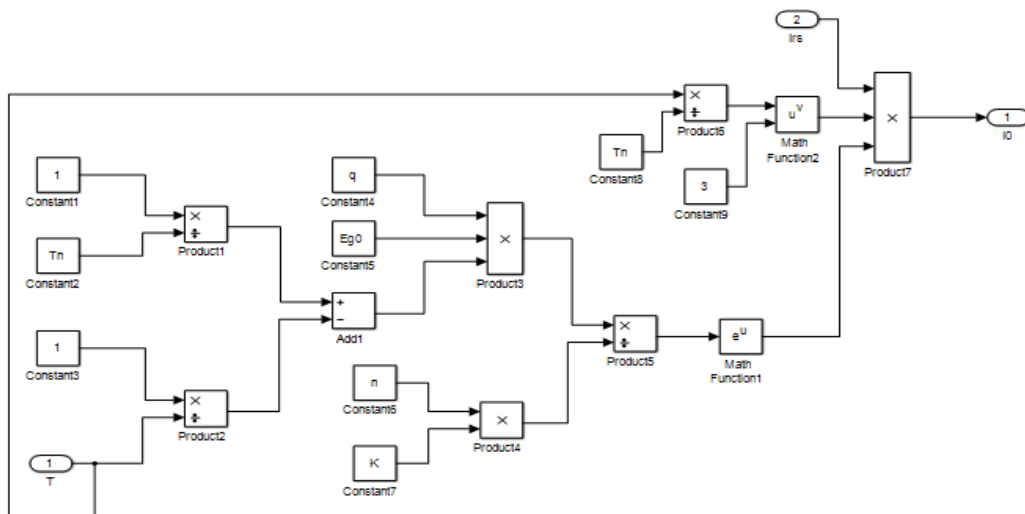


FIGURE II.4 – Subsysteme de courant de saturation.

La figure II.5 montre simulation du courant de saturation inverse

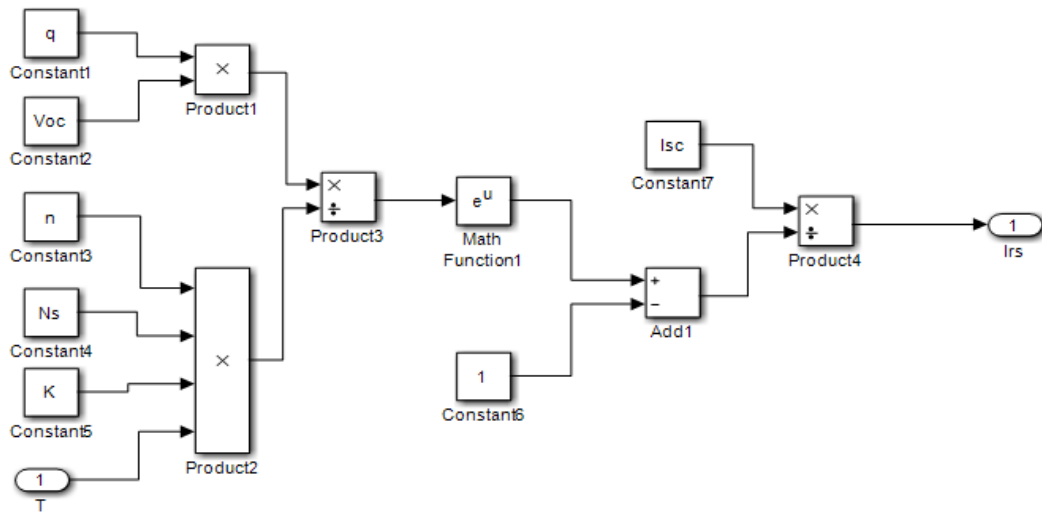


FIGURE II.5 – Subsysteme de courant de saturation inverse.

La figure II.6 montre simulation du courant à travers la résistance shunt

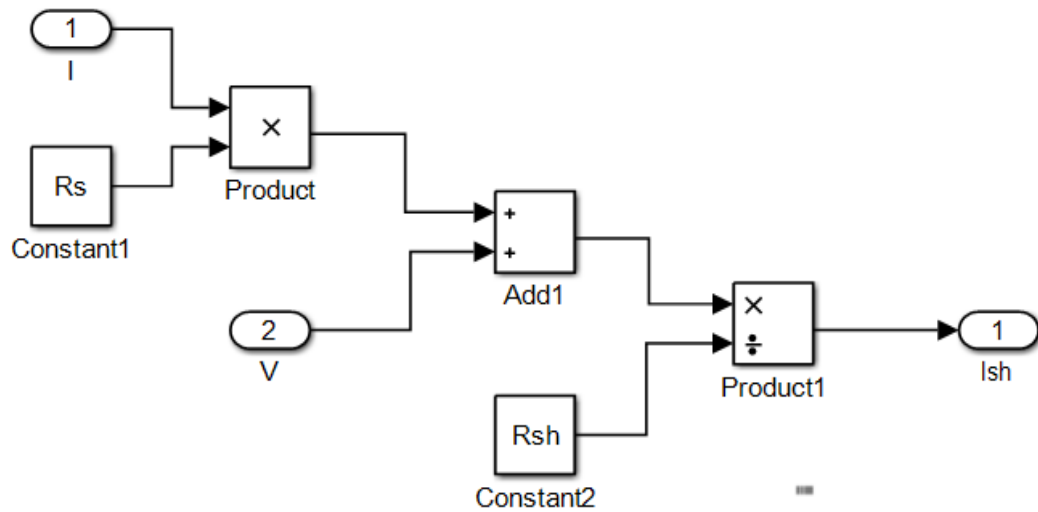


FIGURE II.6 – subsysteme de courant a travers la résistance shunt.

La figure II.7 montre simulation du courant de sortie I

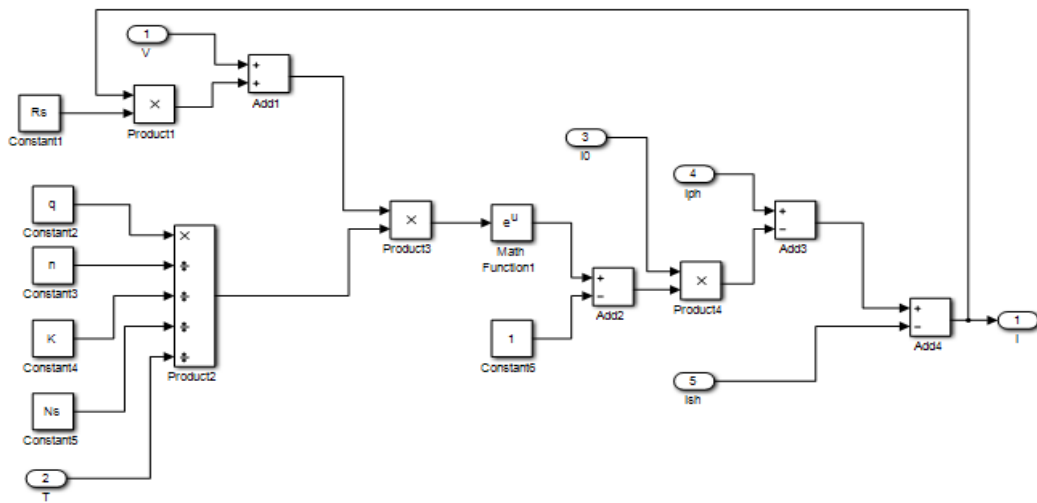


FIGURE II.7 – sousystème de courant de sortie.

La figure II.8 montre simulation du modèle photovoltaïque

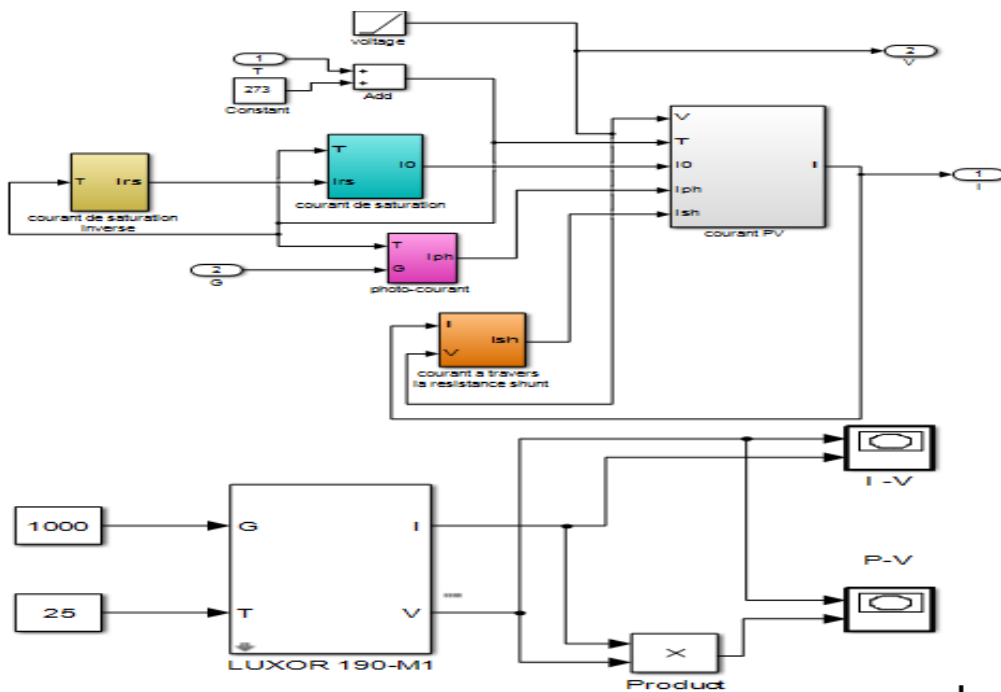


FIGURE II.8 – Simulation de modèle PV.

II.4 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

II.4.1 Caractéristiques (courant / tension)

Le courant produit par un module varie conformément aux diagrammes courant/tension. Il dépend de l'éclairement solaire et de la température des cellules. Les paramètres sont présentés dans le tableau (II.1) :

TABLE II.1 – Valeurs des paramètres du module photovoltaïque [14]

Grandeurs	Valeurs
Puissance nominale (P_{mp})	190W
Tension a puissance maximale (V_{mp})	36.14 V
Courant a puissance maximale (I_{mp})	5.26 A
Tension en circuit-ouvert V_{oc} (V)	43.66 V
Courant de court-circuit I_{sc} (A)	5.7 A
Nombre de cellule en série (N_s)	72
Nombre de cellule en parallèle (N_p)	1
Eclairement	1000 W/m ²
Température de la cellule	25C°

La figure II.9 représente la caractéristique (courant-tension) pour un éclairement $E = 1000 \text{ W/m}^2$ et une température de 25°C :

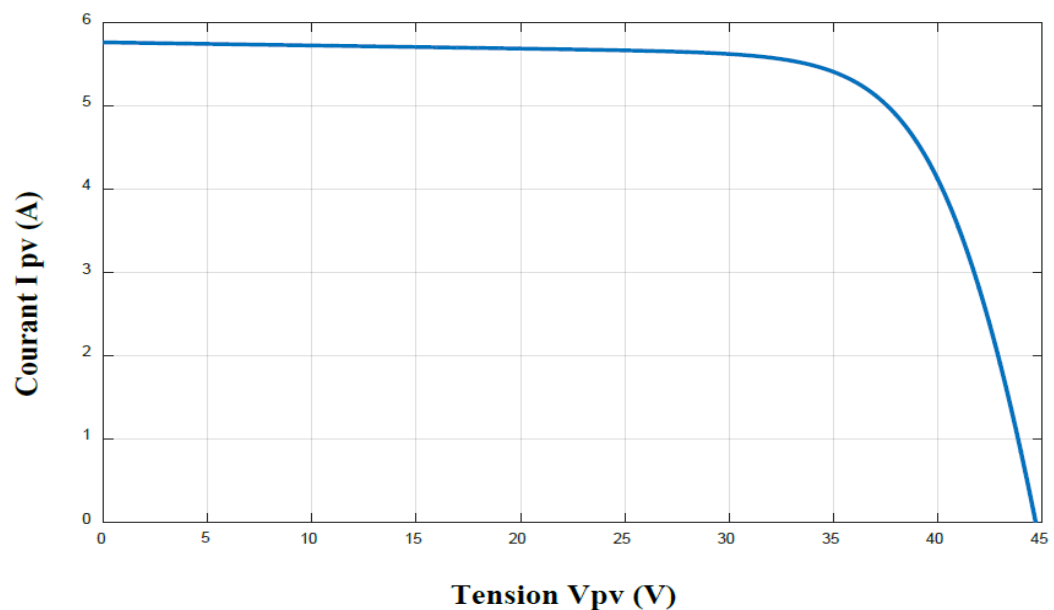


FIGURE II.9 – Caractéristique (courant-tension) d'un module photovoltaïque pour $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$.

II.4.2 Caractéristiques (puissance / tension)

La puissance délivrée par la cellule a pour expression :

$$P_{PV} = V_{PV} \cdot I_{PV} \quad (\text{II.12})$$

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 II.10.

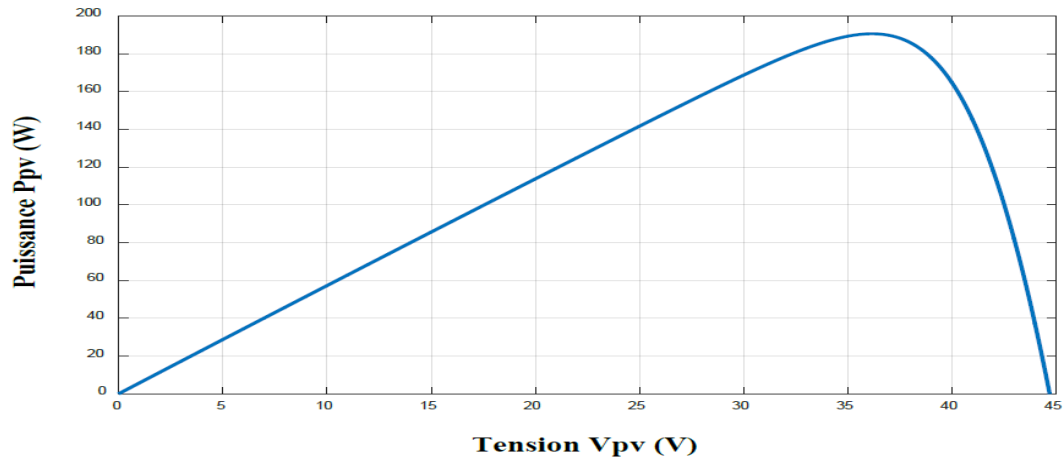


FIGURE II.10 – Caractéristique (puissance-tension) d'un module photovoltaïque pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ \text{C}$.

II.5 Simulation de panneaux à température et éclairement variable

Afin de constater l'influence des conditions externes notamment l'éclairement G et la température T sur les caractéristique (I-V) et (P – V), nous avons adopté la méthode suivante :

- Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température à 25°C et on fait varier l'éclairement.
- Pour un éclairement constant $G = 1000 \text{ [W/m}^2]$ nous ferons varier la température afin de voir l'influence de celle-ci par rapport aux caractéristiques du générateur photovoltaïque.

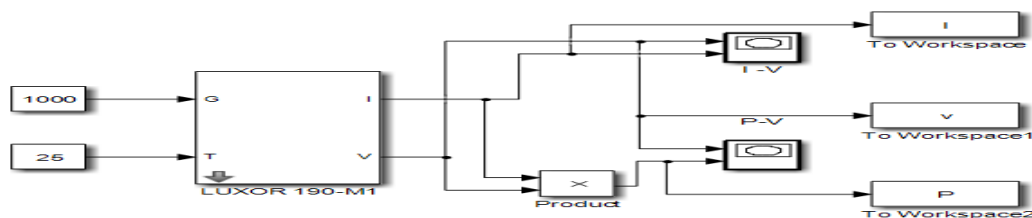


FIGURE II.11 – Bloc du modèle réel implémenté sous Matlab Simulink.

II.5.1 Influence de l'éclairage G

En changeant la valeur de l'éclairage G de 400 à 1000 pour une température constante 25°C , nous avons obtenu les caractéristiques suivantes :

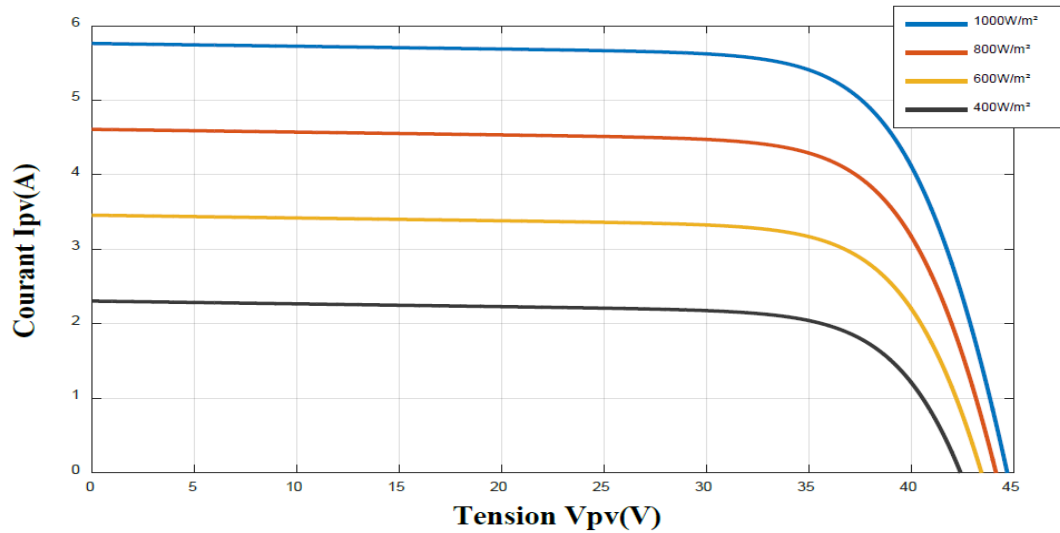


FIGURE II.12 – Caractéristique courant-tension pour différents éclairages.

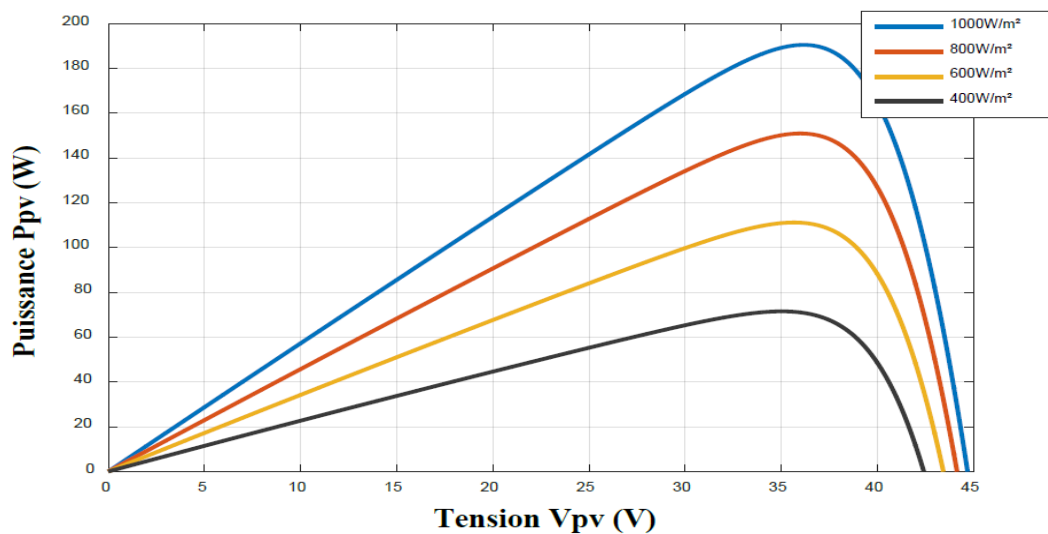


FIGURE II.13 – Caractéristique puissance-tension pour différents éclairages.

La figure II.12 présente la caractéristique courant tension d'une cellule en fonction de l'éclairage à une température constante; le courant est directement proportionnel au rayonnement solaire, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairage.

Plus l'ensoleillement augmente, l'intensité de courant croît ce qui permet au module de produire une puissance électrique importante jusqu'à une puissance maximale.

II.5.2 Influence de la température

La température est un paramètre plus important dans le fonctionnement des panneaux photovoltaïques parce que les propriétés électriques sont très sensibles à la température. Les figures II.14 et II.15 représente la caractéristique courant tension et puissance-tension d'un module photovoltaïque solaire en fonction de la température, à un éclairement constante égale à $1000[W/m^2]$.

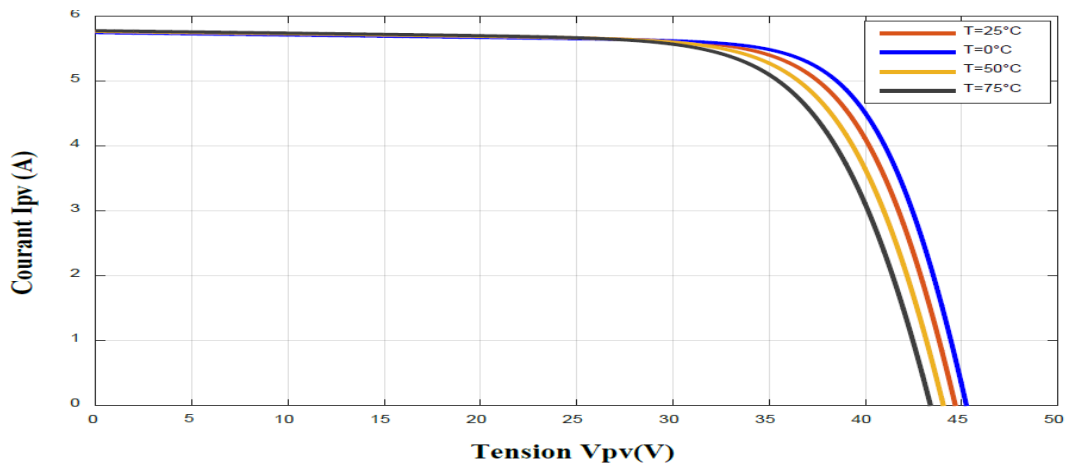


FIGURE II.14 – Caractéristique courant-tension pour différents niveaux de températures.

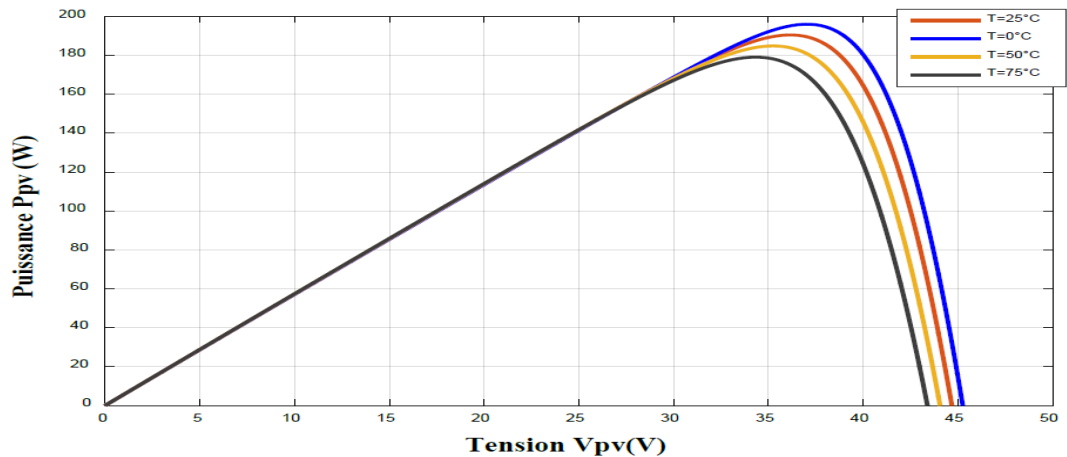


FIGURE II.15 – Caractéristique puissance-tension pour différents niveaux de températures.

L'influence de la température est importante et à des conséquences pour la conception des systèmes photovoltaïques. La température est un paramètre nécessaire puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires. Les courbes de la figure II.15 montre que la tension d'un module baisse fortement avec la température.

Plus la température augmente et moins la cellule est performante. D'autre part Le courant augmente légèrement en intensité, cette augmentation reste négligeable au point de puissance maximale.

II.5.3 Influence des résistances série et parallèle

Lorsque la résistance série est élevée ou que la résistance shunt est faible, Les performances d'une cellule photovoltaïque diminuent davantage. La figure II.17 montrée l'influence de R_s sur la caractéristique I(V). Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe la cellule fonctionne comme source de tension. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule. Quant à la R_{sh} est liée directement au processus de fabrication, son influence pour de très faibles valeurs de courant. La graphique montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspond à un fonctionnement comme source de courant.

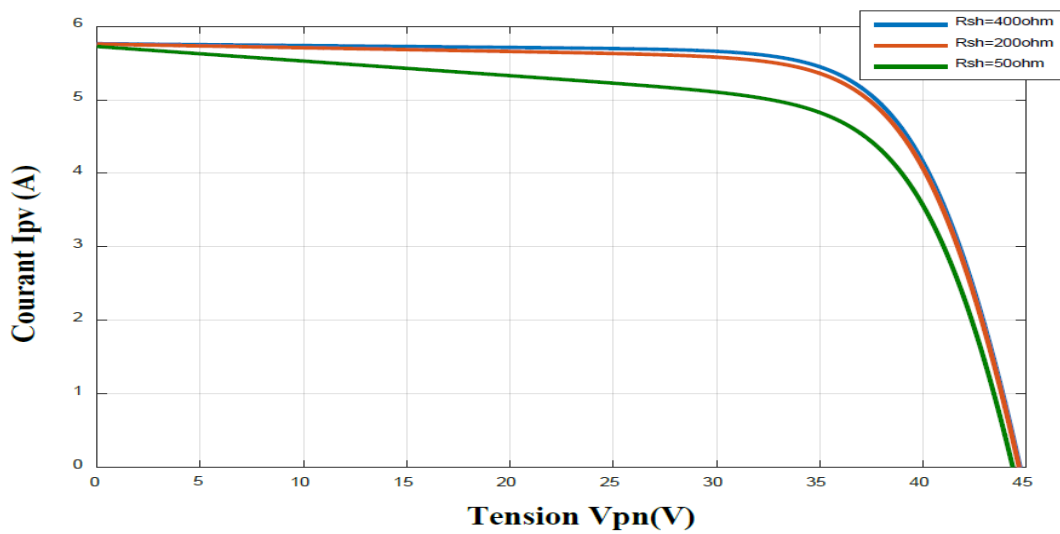


FIGURE II.16 – Influence la résistance série.

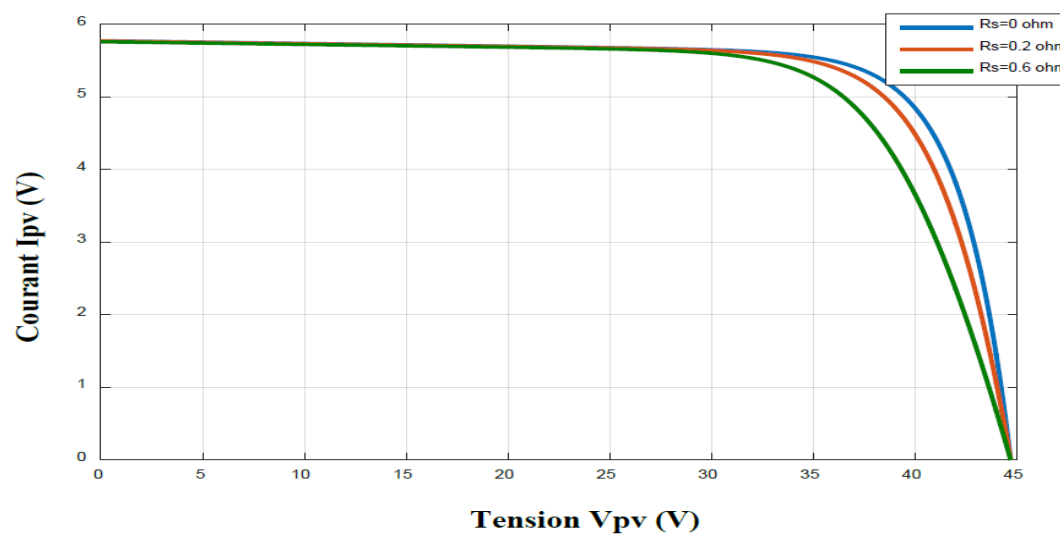


FIGURE II.17 – Influence la résistance série.

II.6 Association des cellules PV

II.6.1 Association en série

Une association de cellules en série N_s permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque et donc accroître la puissance. Les cellules sont alors traversées pour le même courant et la caractéristique résultant du groupement en série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule.

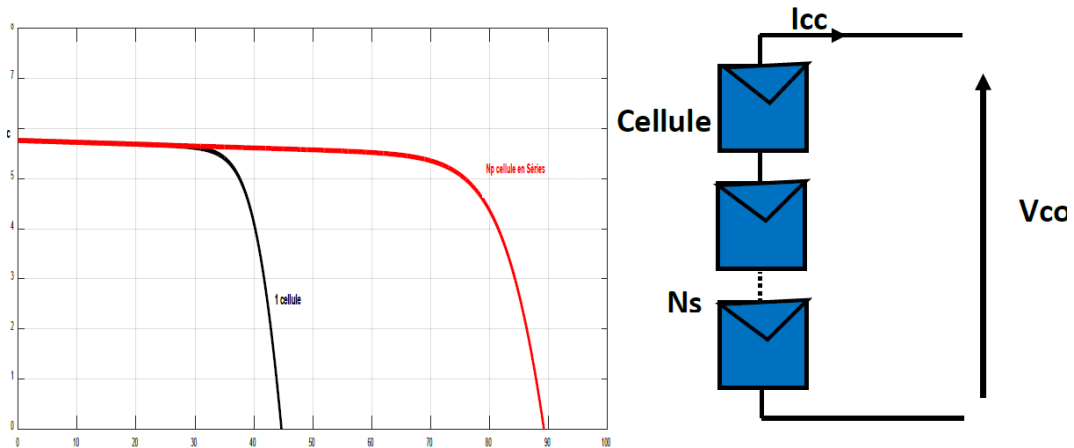


FIGURE II.18 – Caractéristique du groupement en série des cellules identiques.

II.6.2 Association en parallèle

Une association de cellules en parallèle N_p permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectés en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants.

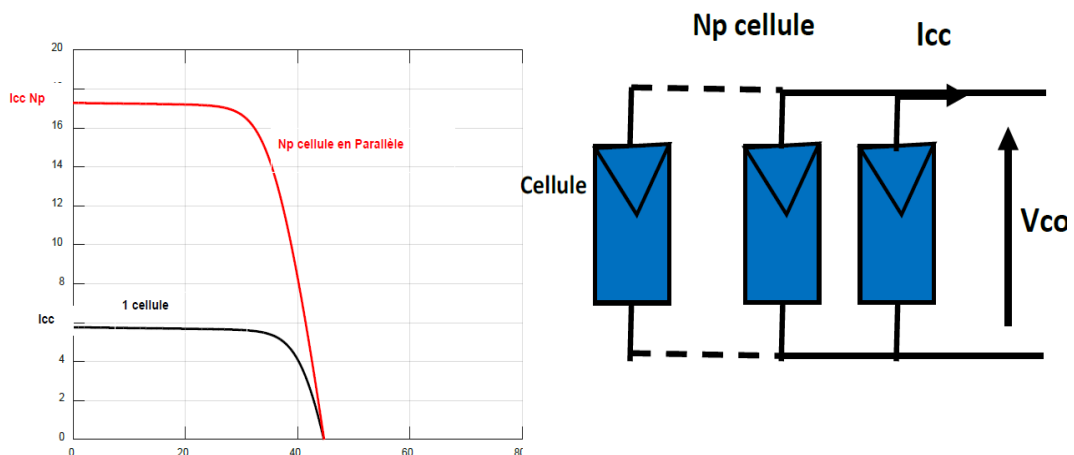


FIGURE II.19 – Caractéristique du groupement en parallèle de cellules identiques.

II.6.3 Association hybride (série/parallèle)

L'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$\begin{aligned} I'_{CC} &= N_P \cdot I_{CC} \\ V'_{CO} &= N_P \cdot V_{CO} \end{aligned}$$

La figure II.20 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série N_s et en parallèle N_p des cellules identiques.

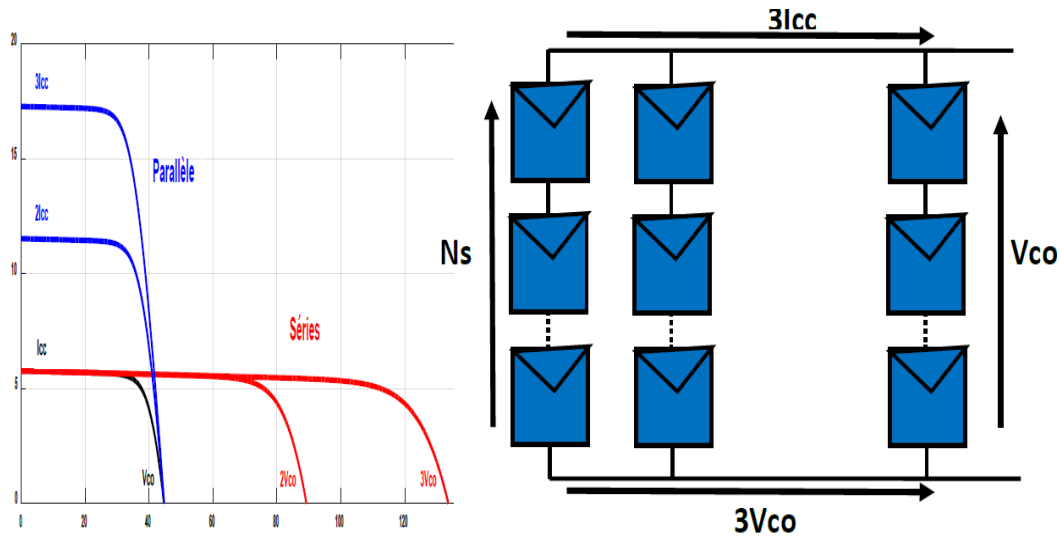


FIGURE II.20 – Caractéristique courant-tension d'un regroupement série et parallèle des cellules photovoltaïques.

II.7 Grandeurs caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Les caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres extrait de caractéristique courant-tension :

II.7.1 Courant de court-circuit I_{cc}

C'est le courant pour le quel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), En court-circuit $V = 0$:

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (II.13)$$

II.7.2 Tension à circuit ouvert V_{co}

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$V_{co} = \frac{VT_c}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (II.14)$$

$\frac{VT_c}{q}$: Représentant la potentielle thermodynamique.
 T_c : Température absolue.

II.7.3 Rendement photovoltaïque

Le rendement énergétique (η) d'une cellule est défini par le rapport entre la puissance maximale (P_m) et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule photovoltaïque. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{E \cdot S} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

n : rendement énergétique,
 E : éclairement (W/m^2)
 S : surface active de la cellule (m^2)

II.7.4 Facteur de forme ff

C'est le rapport entre la puissance maximale P_{\max} fournie par la cellule ou générateur et la puissance optimale. Il représente la mesure de la qualité de la cellule ou d'un générateur, il est défini par la relation :

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc}V_{co}} \quad (\text{II.16})$$

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques électriques fondamentales d'un module photovoltaïque. Le modèle Matlab/Simulink sont construits pour les différentes composantes du système photovoltaïque. D'après les résultats obtenus à partir de la simulation, on remarque que, les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement $1000 \text{ W}/\text{m}^2$.

Il nous reste à modéliser un convertisseur permettant de faire le lien entre les panneaux et une charge. Avec tous ces éléments, on aura un ensemble qui permettra d'extraire la maximale de puissance des panneaux connectés entre eux.

Chapitre III

Etude de convertisseur continu/continu (Hacheur)

SOMMAIRE

III.1 INTRODUCTION	34
III.2 DIFFÉRENTS TYPES DE CONVERTISSEUR STATIQUE	34
III.3 HACHEUR ABAISSEUR (BUCK)	35
III.3.1 Schéma de montage Buck	35
III.3.2 Analyse de fonctionnement Buck	35
III.3.3 Chronogramme Buck	36
III.3.4 Calcule Buck	37
III.4 CONVERTISSEUR ÉLÉVATEUR (BOOST)	38
III.4.1 Schéma de montage Boost	38
III.4.2 Analyse de fonctionnement Boost	38
III.4.3 Calcules Boost	39
III.4.4 Chronogramme Boost	39
III.5 HACHEUR ABAISSEUR-ÉLÉVATEUR "BUCK- BOOST"	40
III.5.1 Schéma de montage Buck-Boost	40
III.5.2 Analyse de fonctionnement Buck-Boost	41
III.5.3 Chronogramme Buck boost	42
III.5.4 Calcule Buck Boost	42
III.6 HACHEUR CUCK	43
III.6.1 Schéma de montage d'un hacheur Cuck	43
III.6.2 Analyse de fonctionnement	43
III.6.3 Chronogramme Cuck	45
III.6.4 Calcule Cuck	45
III.7 COMMANDE PAR MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION (MLI) DES HACHEURS	46
III.7.1 Cas d'un hacheur Buck (abaisseur)	46
III.7.2 Principe de la modulation	46
III.7.3 Schéma du hacheur et de sa commande	47
III.7.4 Schéma Simulink	47
III.7.5 Résultats de simulation	48
III.7.6 Interprétation	49
III.8 HACHEUR MULTINIVEAUX	49
III.8.1 Schéma de montage d'un hacheur à trois niveaux	50
III.8.2 Configurations du hacheur à trois niveaux	50
III.8.3 Commande en MLI du hacheur à trois niveaux	51
III.8.4 Analyse de fonctionnement d'un hacheur trois niveaux	51
III.8.5 Chronogramme hacheur trois niveaux	52

III.8.6 Interprétation	55
III.9 CONCLUSION	55

III.1 Introduction

Les convertisseurs de type DC-DC sert à convertir un niveau de tension, à un autre niveau par action de commutation. Ils ont un très grand domaine d'application. Ils sont largement utilisés dans les ordinateurs personnels, des périphériques informatiques et adaptateurs d'appareils électroniques pour fournir des tensions continues [8], et ils sont pratiqués dans le cadre d'un système photovoltaïque pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux PV (source continu) avec différentes charges pour effectuer le transfert de la puissance maximale [11].

III.2 Différents types de convertisseur statique

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs, à base de semi-conducteur, qui sont capable de transformer de l'énergie électrique disponible en une forme appropriée pour alimenter une charge, principalement par modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique (amplitudes, fréquences, phases)

la figure III.1 montre les différents types de convertisseur d'électronique de puissance.

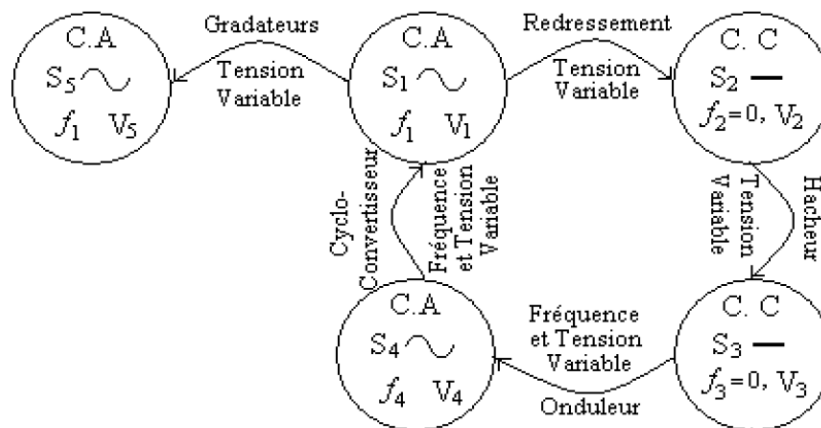


FIGURE III.1 – Différents types de convertisseurs.

Compte tenu le sens de transition, on peut classer les convertisseurs statiques selon deux catégories représenté dans la figure III.2 :

- **les convertisseurs réversible** : lorsque l'énergie, peut transit de manière bidirectionnelle, c'est à dire aussi bien dans un sens que dans l'autre. Les notions d'entrée et de sortie ne sont alors plus évidentes [15].
- **les convertisseurs non réversibles (unidirectionnels)** : transfèrent l'énergie uniquement d'une source vers une charge utilisatrice [6].

Dans ce chapitre on va présenter le convertisseur statique plus particulièrement l'hacheurs (DC-DC), telle que l'hacheur abaisseur (Buck), hacheur élévateur (Boost), hacheur abaisseur-élévateur (Buck-boost), hacheur Cuck, hacheur sepic et hacheur multiniveaux.

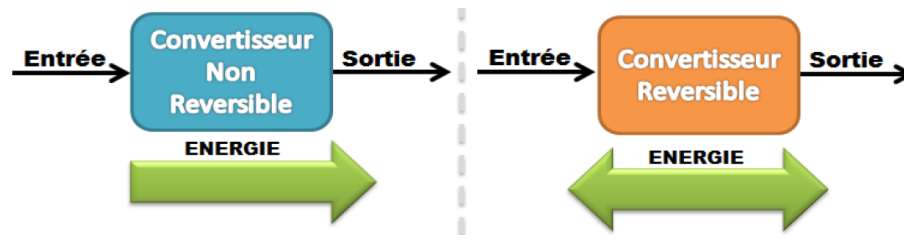


FIGURE III.2 – Réversibilité et non réversibilité des convertisseurs statiques.

III.3 Hacheur abaisseur (Buck)

Le hacheur série (Buck) est un convertisseur statique abaisseur qui permet de transformer une tension continue fixe à une tension plus faible réglable par l'utilisateur, il est constitué d'un interrupteur bicommandable de puissance, d'une diode, d'une inductance et d'un condensateur. Le hacheur série peut servir comme variateur de vitesse pour les moteurs à courant continu [16].

III.3.1 Schéma de montage Buck

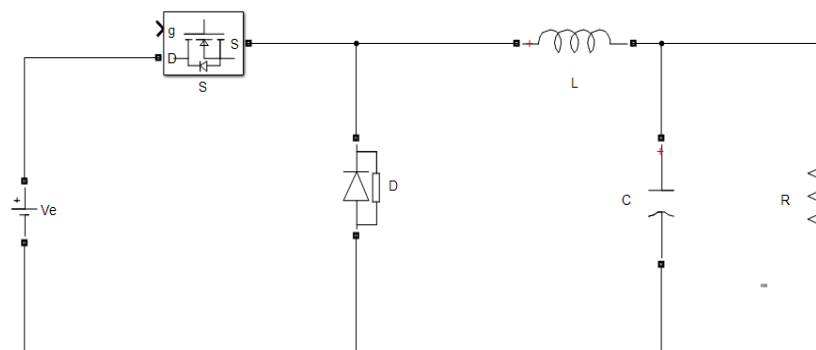


FIGURE III.3 – Schéma de montage d'un hacheur Buck.

Le schéma précédent (figure III.3) présente un hacheur abaisseur (Buck). La tension aux bornes de la charge V_s doit être inférieure à la tension de source V_e . Le commutateur F peut être un IGBT ou ana MOSFET qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt (Etape on, Etape off).

III.3.2 Analyse de fonctionnement Buck

Ce hacheur à deux étapes de fonctionnement :

Etape 1, S fermé : Si l'interrupteur S est fermé (activé), un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode car elle est inversement polarisée. Alors la source d'entrée fournit une énergie à la charge R à travers l'inductance.

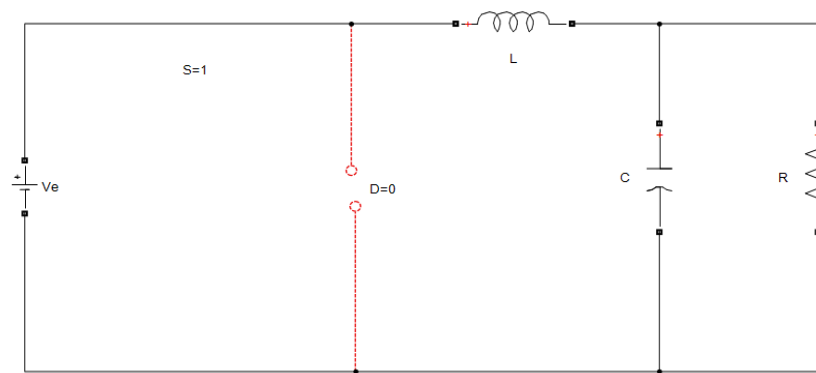


FIGURE III.4 – Convertisseur Buck durant l'état On.

D'après le schéma de la figure III.4 on a :

$$V_T = 0 \quad V_D = -V_s \quad V_c = V_e$$

Dans cette étape, l'inductance emmagasine l'énergie sous forme énergie.

Etape 2, S ouvert : Si l'interrupteur S est ouvert (désactivé), la diode D appelé diode de roue libre assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance sera déchargé dans le condensateur et la résistance.

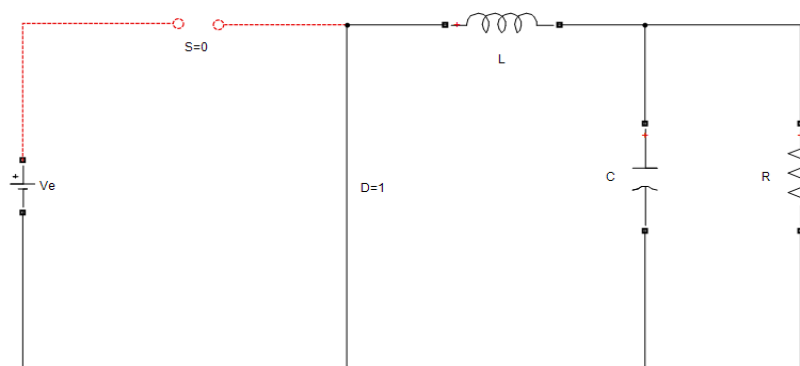


FIGURE III.5 – Convertisseur Buck durant l'état Off.

D'après le schéma (figure III.5) on a : $V_D = 0 \quad V_T = V_s \quad V_c = 0$

Remarque

Les composants du convertisseur sont dimensionnés pour que les tensions et les courants à la sortie présentent de faible ondulations lors du passage de l'interrupteur de la fermeture à l'ouverture et inversement [23]. Quoi qu'il en soit, la valeur moyenne V_c est inférieure à V_s . Dans le cas où la fréquence est augmentée, par exemple jusqu'aux kHz , l'inductance nécessaire peut être réduite considérablement.

III.3.3 Chronogramme Buck

Les allures des tensions et des courants du hacheur abaisseur de tension sont indiquées dans la figure III.6.

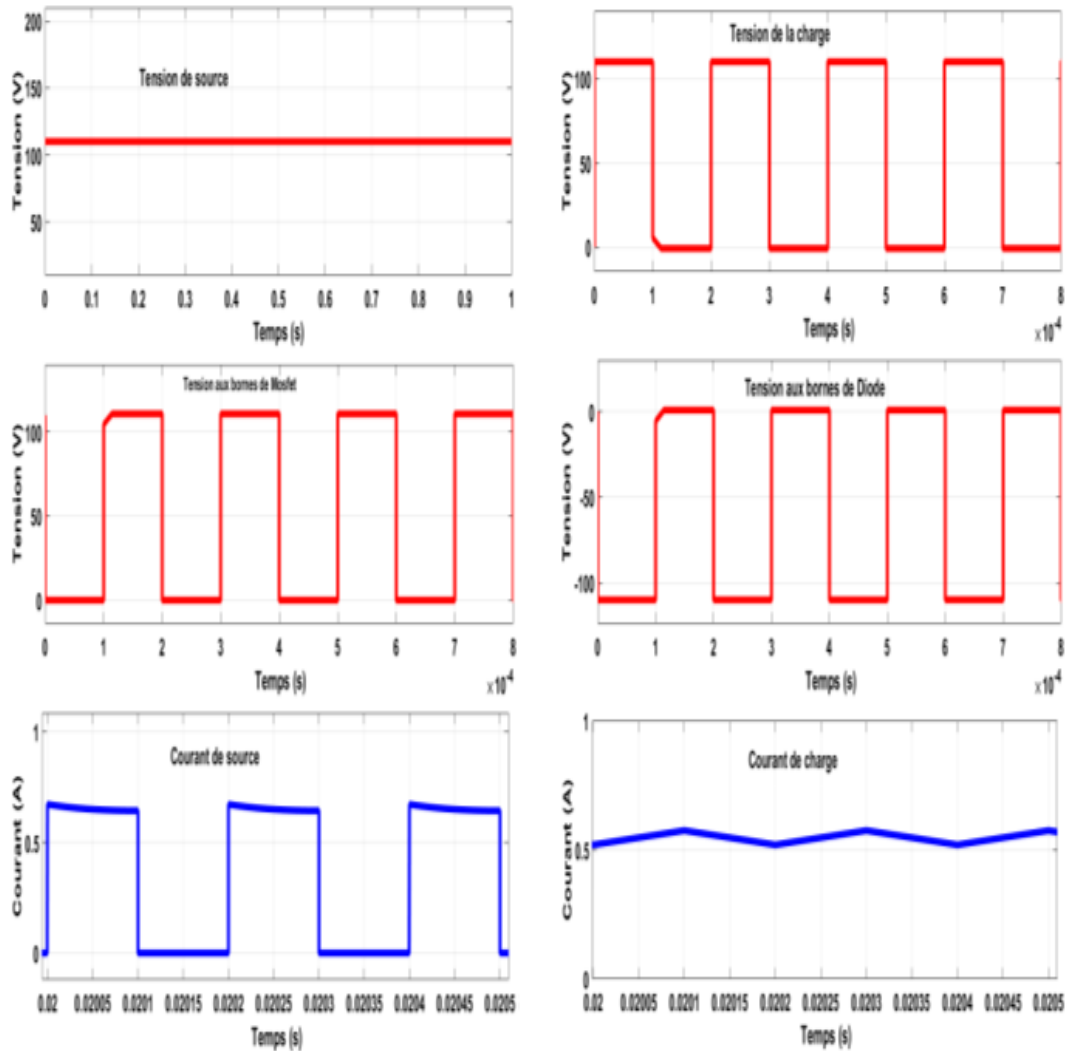


FIGURE III.6 – Formes d’onde des courants et des tensions d’un convertisseur Buck.

III.3.4 Calcule Buck

La tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_c = \frac{T_{on}}{T} V_s = \alpha \cdot V_s \quad (\text{III.1})$$

$$I_c = \frac{I_s}{\alpha} \quad (\text{III.2})$$

T_{on} : la durée de la phase de fermeture de l’interrupteur.

D’après l’équation III.2, on distingue que la tension de sortie est variée linéairement avec le rapport cyclique α

III.4 Convertisseur élévateur (Boost)

Un convertisseur Boost ou hacheur parallèle est une alimentation à découpage permet d'augmenter la tension fournie par la source, le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré. Donc 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 [20].

III.4.1 Schéma de montage Boost

Le schéma de la figure III.7 présent un hacheur boost (survolteur). La tension de la sortie (charge) V_c doit être plus grande que la tension d'entrée (source) V_s .

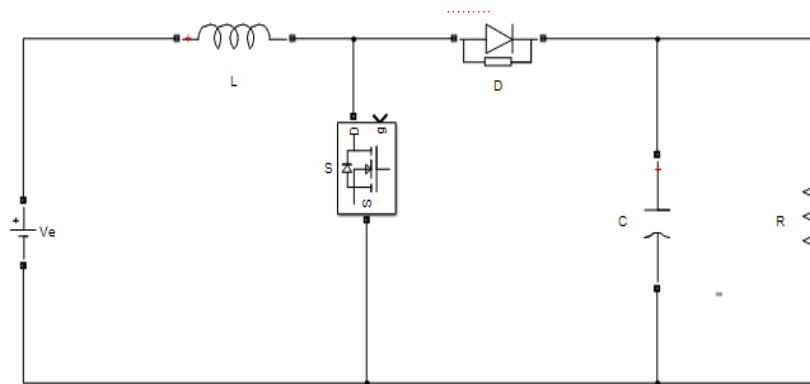


FIGURE III.7 – Schéma de montage d'un hacheur Boost.

III.4.2 Analyse de fonctionnement Boost

Ce hacheur à deux étapes de fonctionnement :

Phase 1, S fermé : phase d'accumulation d'énergie

L'interrupteur S est fermé (activé, $S = 1$). 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.

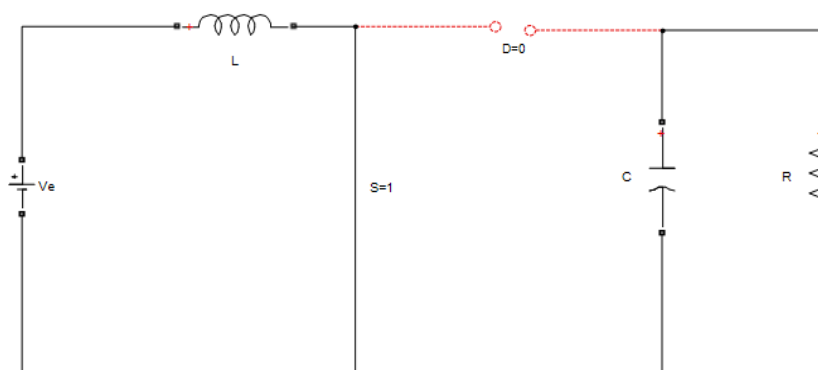


FIGURE III.8 – convertisseur boost durant la phase 1.

D'après cette figure III.8 on a :

$$V_T = 0 \quad V_D = -V_s \quad V_C = 0$$

α étant le rapport cyclique. Il représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur S conduit.

Phase 2, S ouvert :

Lorsque l'interrupteur S est ouvert et la diode D est fermée, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité [20].

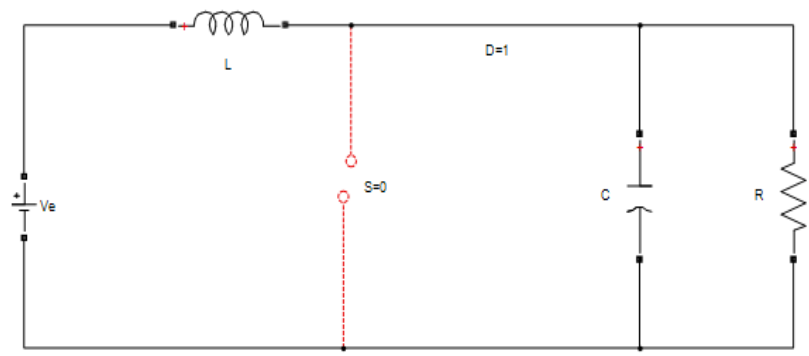


FIGURE III.9 – Convertisseur boost durant la phase 2.

D'après le schéma (figure III.9) on a : $V_D = 0 \quad V_T = V_s \quad V_C = V_s$

III.4.3 Calculs Boost

Les valeurs moyennes de V_C et I_C sont :

$$\frac{V_C}{V_s} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (\text{III.3})$$

$$I_s = (1 - \alpha)I_C \quad (\text{III.4})$$

III.4.4 Chronogramme Boost

Les allures des tensions et des courants du hacheur abaisseur de tension sont indiquées dans la figure I.7.

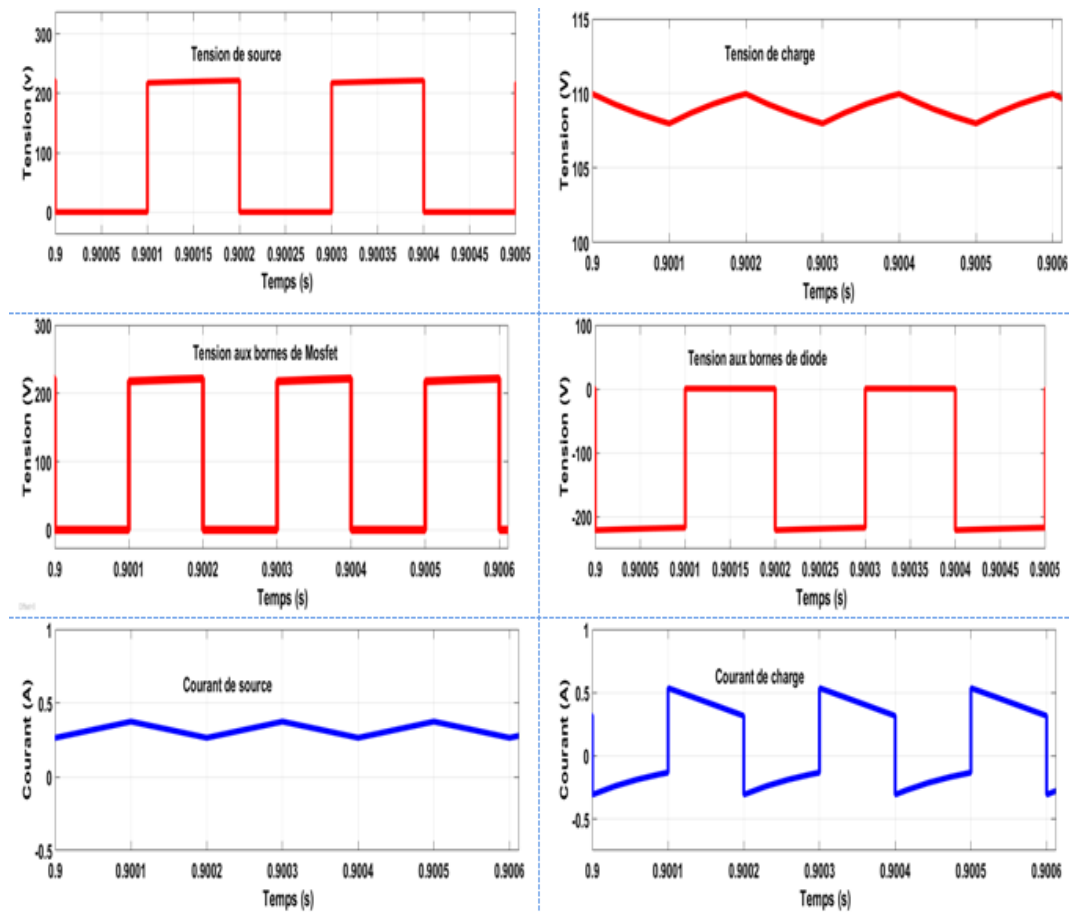


FIGURE III.10 – Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost.

III.5 Hacheur abaisseur-élevateur "Buck- Boost"

Un convertisseur Buck-Boost 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 [7].

III.5.1 Schéma de montage Buck-Boost

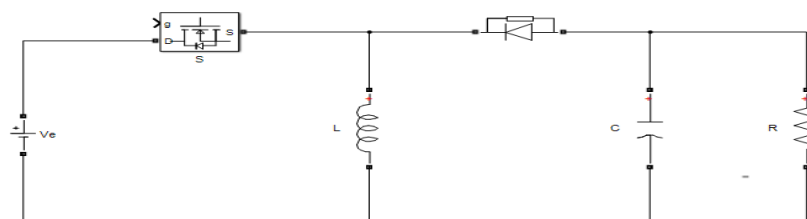


FIGURE III.11 – Schéma de montage d'un hacheur Buck-Boost.

III.5.2 Analyse de fonctionnement Buck-Boost

Ce hacheur à deux phases de fonctionnement :

Phase 1, S fermé (activé) : L'interrupteur S est conducteur pendant le temps $T_{on} = \alpha.T$, l'inductance stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée et la tension de sortie est négative par rapport au point commun : la diode D est alors bloquée.

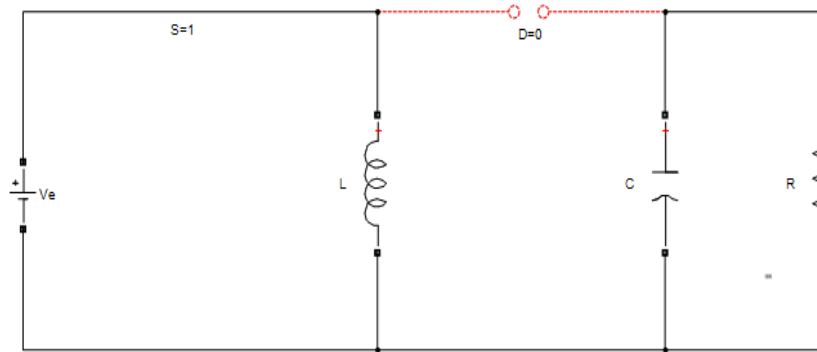


FIGURE III.12 – Convertisseur Buck-Boost durant l'état On (phase 1).

D'après le schéma de la figure III.12, on a : $V_T = 0$ $V_D = -V_s$

La tension aux bornes de l'inductance :

$$V_L = V_s = L \cdot \frac{di}{dt} > 0 \quad (\text{III.5})$$

Le courant I_L se croit linéairement

Phase 2, S ouvert (désactivé) : on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. Le blocage de l'interrupteur S provoque la décharge de l'inductance dans la charge R et le condensateur C . Cette décharge peut être totale ou partielle.

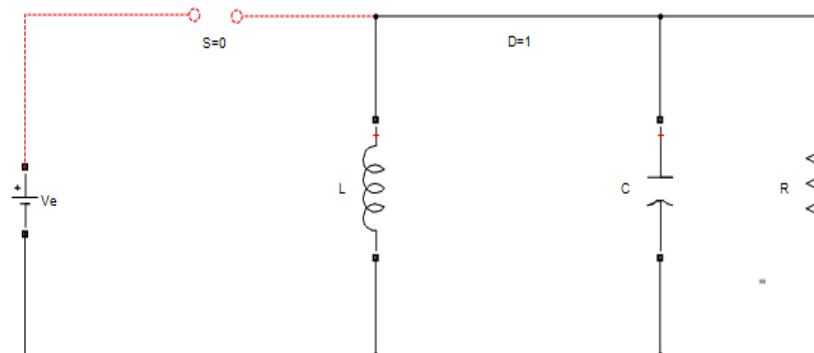


FIGURE III.13 – Convertisseur Buck-Boost durant l'état Off (phase 2).

D'après le schéma de la figure III.13, on a : $V_D = 0$ $V_T = V_s$

$$V_L = V_s = L \cdot \frac{di}{dt} < 0 \quad (\text{III.6})$$

Le courant I_L se décroît linéairement.

En présence de la diode D, le courant circule à travers l'inductance L seulement dans une direction durant les deux phases. Par conséquent, V_c a une polarité opposée à V_s . Pour cette raison, ce circuit Est aussi appelé convertisseur inverseur. Les équations décrivant ce circuit peuvent être obtenues de la même manière qu'auparavant [14].

III.5.3 Chronogramme Buck boost

Les allures deconvertisseur hacheur abaisseur élevéateur sont présentés comme suit :

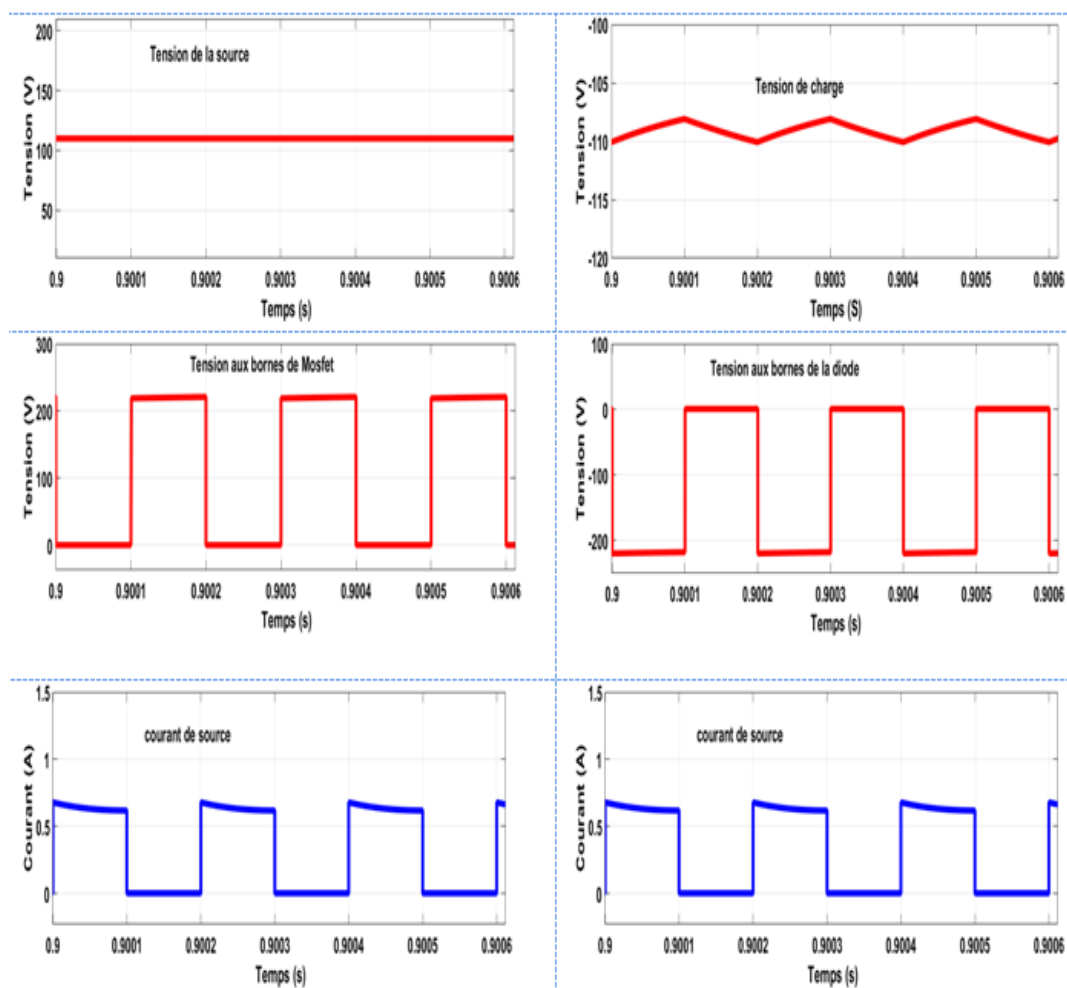


FIGURE III.14 – Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck-Boost.

III.5.4 Calcule Buck Boost

L'amplitude de V_c peut être inférieure ou supérieure à V_s suivant la valeur de T_{On} et T_{Off} :

$$V_c = \frac{T_{On}}{T_{Off}} V_s = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} V_s \quad (\text{III.7})$$

III.6 Hacheur Cuck

Un convertisseur Cuck est une alimentation à découpage qui convertit une tension continu en une autre tension continu de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. Au contraire des autres types de convertisseur, qui utilisent une inductance, un convertisseur Cuck utilise un condensateur pour stocker de l'énergie [12].

III.6.1 Schéma de montage d'un hacheur Cuck

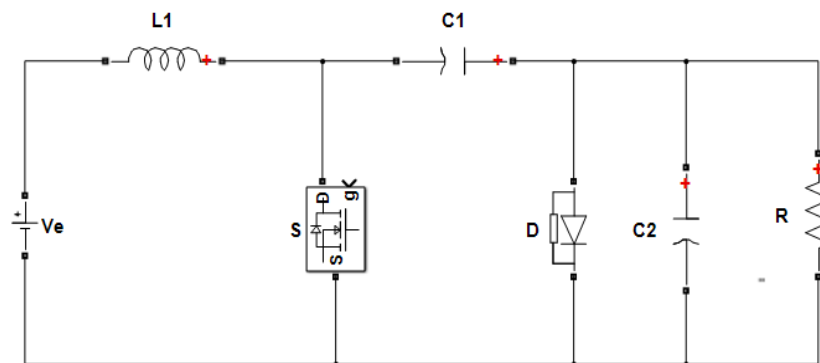


FIGURE III.15 – Schéma de montage hacheur Cuck.

III.6.2 Analyse de fonctionnement

Un inconvénient subsiste concernant l'inversion du signe de la tension de sortie par rapport à celle de l'entrée. Par sa structure, le convertisseur Cuck peut travailler avec des tensions de sortie plus petites ou plus grandes que la tension d'entrée. En régime permanent, les tensions moyennes des inductances sont nulles.

Etape 1, S fermé : la figure (III.13) représente le circuit quand l'interrupteur est fermé.

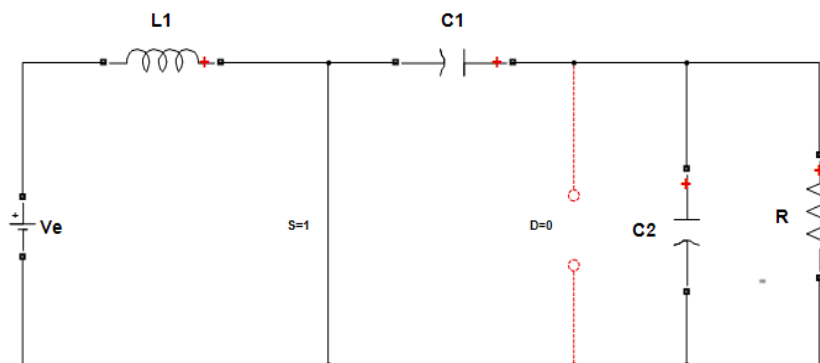


FIGURE III.16 – Circuit de convertisseur Cuck quand l'interrupteur S est fermé.

En appliquant la loi des mailles autour de la boucle extérieure du circuit représenté sur la figure (III.12) on trouve [12] :

$$V_{C_1} = V_s - V_c \quad (\text{III.8})$$

Le condensateur C_1 décharge son énergie dans la charge à travers la boucle formée par l'interrupteur S , C_2 , R et L_2 .

Les inductances sont supposées assez grandes, ainsi que les ondulations de leurs courants sont négligeable [15].

Ce qui donne :

$$I_{C_1} = -I_{L_2}$$

$$I_{C_2} = I_{L_2} - \frac{V_{C_2}}{R}$$

$$V_{L_2} = V_e$$

$$V_{L_2} = V_{C_1} - V_{C_2}$$

Etape 2, S ouvert : la figure (III.17) représente le circuit quand l'interrupteur est fermé.

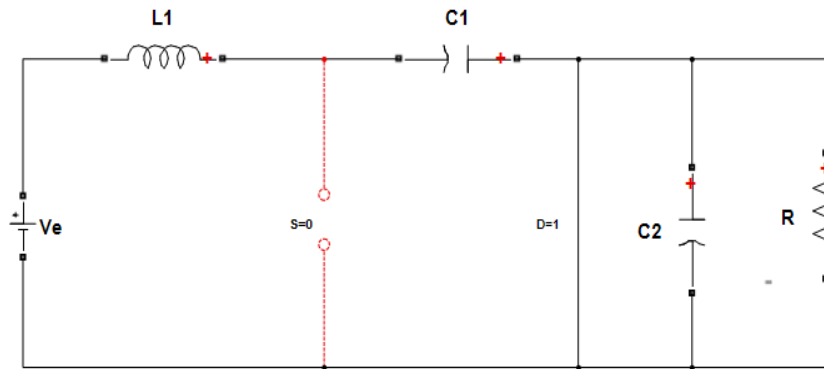


FIGURE III.17 – Circuit de convertisseur Cuck quand l'interrupteur S est ouvert.

Le condensateur (C_1) se charge par la tension d'entrée (V) à travers l'inductance (L_1). L'énergie stockée dans l'inductance (L_2) est transférée à la charge par la boucle constituée de D , C_2 , L_2 et R . [14] ce qui donne :

$$I_{C_1} = I_{L_1}$$

$$I_{C_2} = I_{L_2} - \frac{V_{C_2}}{R}$$

$$V_{L_1} = -V_{C_2}$$

$$V_{L_2} = V_{C_1} - V_{C_2}$$

Comme le phénomène est périodique, le courant moyen du condensateur C_1 est nul, ainsi, des équations (??) et (III.6.2), ce qui donne :

$$[I_{C_1}]_{Q_{ox}} \alpha T + [I_{C_1}]_{Q_{orz}} (1 - \alpha) T = 0 \quad (\text{III.9})$$

Où α est le rapport cyclique, et T est la période de commutation.

III.6.3 Chronogramme Cuck

Les allures des tensions et des courants du hacheur abaisseur élévateur sont indiquées à la figure :

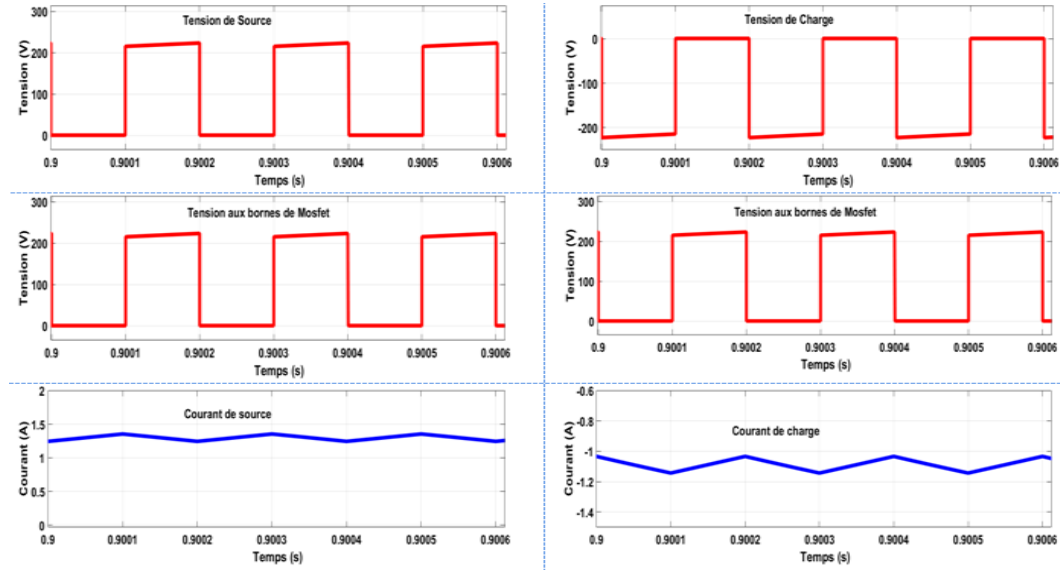


FIGURE III.18 – Formes d’onde des courants et des tensions d’un convertisseur Cuck.

III.6.4 Calcule Cuck

L’équation (III.9) se simplifie à :

$$-I_{L2}\alpha T + I_{L1}(1 - \alpha)T = 0 \quad (\text{III.10})$$

Ce qui conduit à :

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (\text{III.11})$$

En supposant le convertisseur est idéal, la puissance moyenne fournie par la source doit être égale à la puissance absorbée par la charge.

$$P_s = P_c \quad (\text{III.12})$$

Ce qui donne :

$$I_{L1}V_s = I_{L2}V_c \quad (\text{III.13})$$

Alors :

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{V_c}{V_s} \quad (\text{III.14})$$

D’après les équations (III.11) et (III.14) on distingue que la tension de sortie du convertisseur Cuck est :

$$V_c = \frac{\alpha}{1 - \alpha} V_s \quad (\text{III.15})$$

III.7 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) des hacheurs

L'électronique de régulation et commande détermine, à partir des consignes imposées de l'extérieur et des mesures prélevées sur le générateur et la charge, la séquence de conduction et de blocage de l'interrupteur et élabore les signaux logiques nécessaires à sa commande en fonction du type de convertisseur utilisé.

Dans le cas de la commande MLI, on fait varier l'état de l'interrupteur à une cadence qui ne dépend pas de la manière dont évoluent les grandeurs relatives aux systèmes interconnectés par le convertisseur électronique de puissance, cette cadence étant fixée essentiellement en fonction de la vitesse de commutation de l'interrupteur [17].

La commande par modulation en largeur d'impulsions ou commande MLI consiste à choisir une fréquence de commutation pour l'interrupteur et à fixer à l'intérieur de la période de commutation les intervalles de conduction des interrupteurs connectés à une borne de la source en fonction d'un signal de référence qui correspond au potentiel souhaité pour cette borne [14].

III.7.1 Cas d'un hacheur Buck (abaisseur)

Pour le hacheur abaisseur, figure (III.19), en considérant une source de tension parfaite et les interrupteurs électroniques parfaits, la tension de sortie $v(t)$ constitue une image amplifiée du signal de commande $s(t)$ en conduction continue :

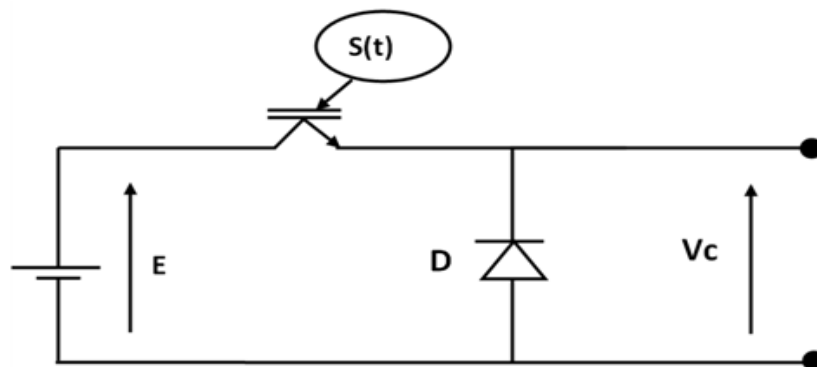


FIGURE III.19 – Structure du hacheur série (Buck).

III.7.2 Principe de la modulation

En comparant un signal de référence d'amplitude α (< 1) avec une porteuse triangulaire d'amplitude égale à 1 (figure III.20), on obtient la fonction de modulation $u(t)$, qui est entièrement définie en utilisant deux paramètres :

- Période T : Elle correspond à la période du transporteur.
- Rapport cyclique α : Il est généralement considéré comme une constante comprise entre 0 et 1, ce qui correspond à un signal de référence fixe d'amplitude égale à α .

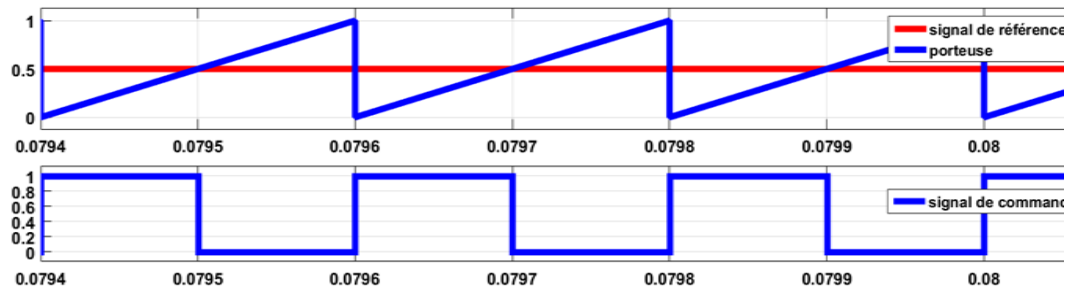


FIGURE III.20 – Principe du command en MLI d'un hacheur.

III.7.3 Schéma du hacheur et de sa commande

La figure III.21 présente un hacheur abaisseur à Mosfet alimentant une charge résistive, commandé en MLI. Le signal de commande est obtenu par comparaison d'une porteuse en dent de scie à une référence fixe.

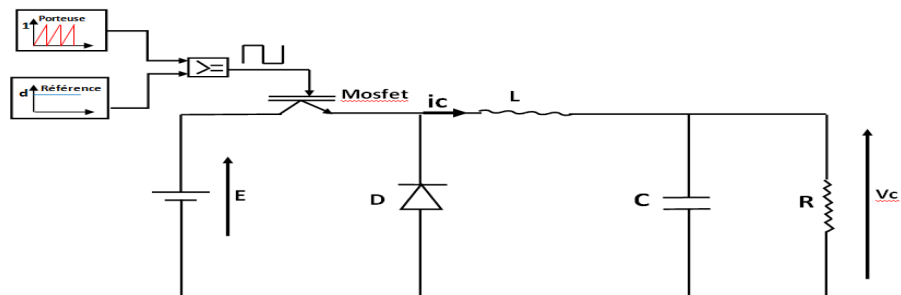


FIGURE III.21 – Montage du hacheur abaisseur et de sa commande.

III.7.4 Schéma Simulink

La figure III.22 indique le schéma de simulation. Il présente l'interrupteur S1 (Mosfet), la diode D, une inductance L, un condensateur de filtrage capacitif C, une charge résistive R et la partie command.

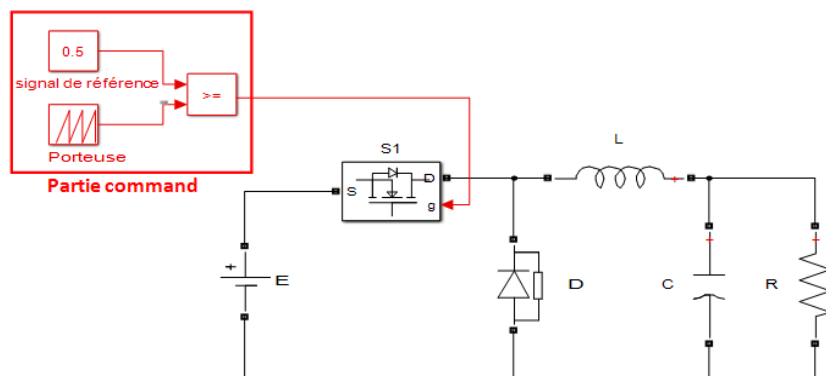


FIGURE III.22 – Schéma de simulation d'un hacheur deux niveaux et sa commande.

III.7.5 Résultats de simulation

On simule le fonctionnement du hacheur à deux niveaux (hacheur Buck) commande en MLI. Les paramètres du modèle sont vrai et disponible dans notre laboratoire d'électronique de puissance :

$$V_s = 110 \text{ V}, R = 100 \Omega, C = 16e - 6 \text{ F}, C_1 = 16e - 6 \text{ F}$$

On simule le modèle pour un rapport cyclique : $\alpha = 0.5$

Cas où $\alpha = 0.5$

Les figures III.23 à III.25 présentent les résultats de simulation.

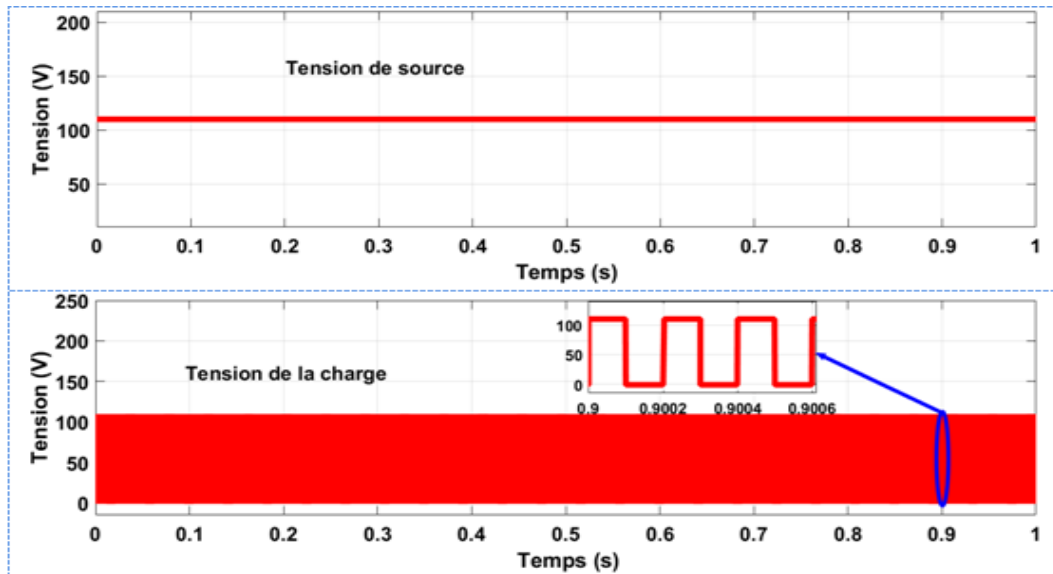


FIGURE III.23 – Tension source et charge de hacheur Buck ($\alpha = 0.5$).

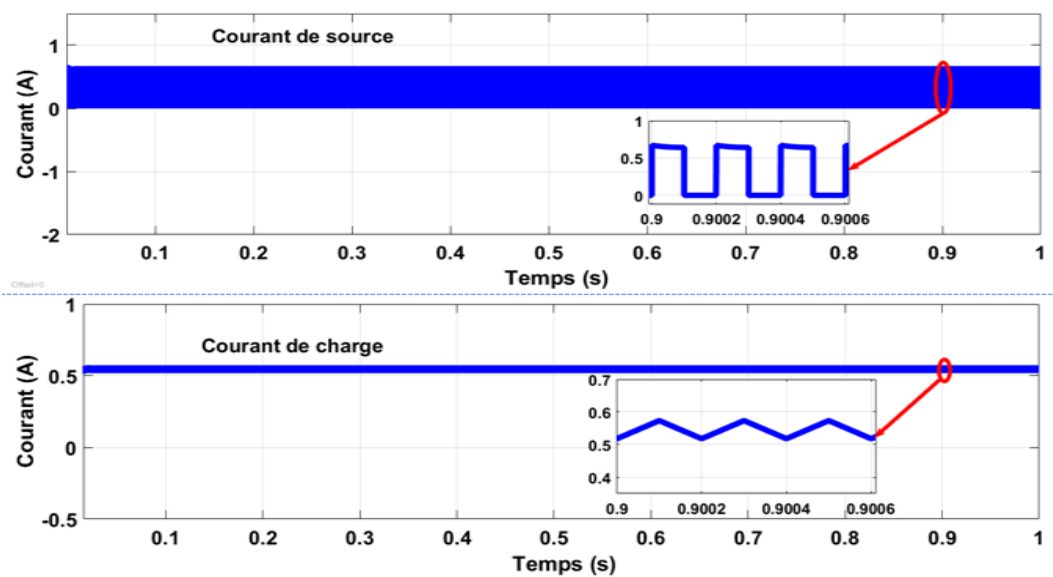
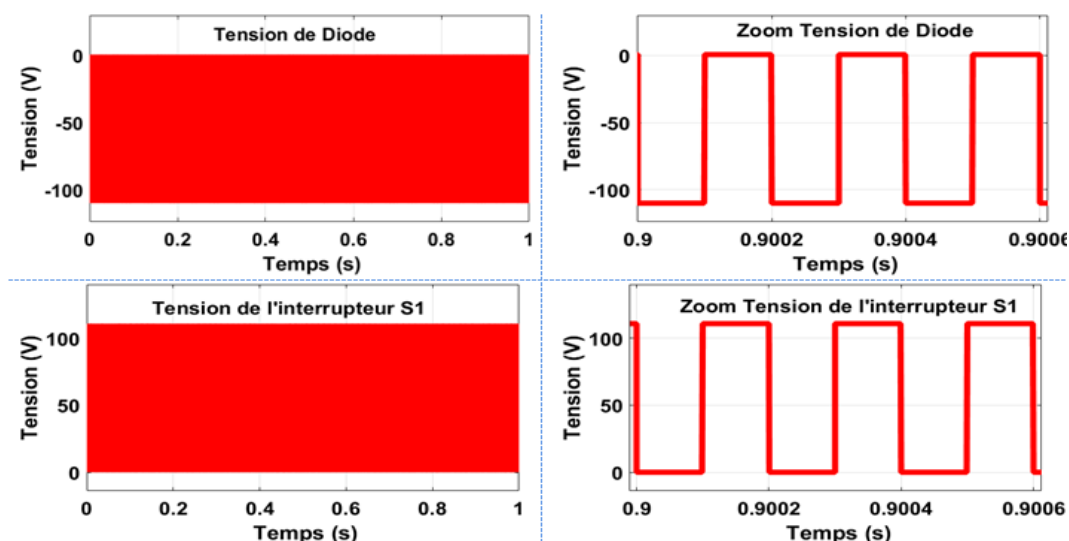


FIGURE III.24 – Courant de charge et le courant de source de hacheur Buck ($\alpha = 0.5$).

FIGURE III.25 – Tension de l'interrupteur S_1 et de la diode D ($= 0.5$).

III.7.6 Interprétation

La figure III.23 montre que la valeur de tension de charge est environ 55 V , ce qui correspond bien au rapport cyclique de 0.5 et à la tension de source de 110 V . La figure III.24 montre le courant de charge sa valeur est d'environ 0.55 A , et il est supérieur au courant de source. Le courant et la tension de charge sont filtrés en raison de la présence de l'inductance de lissage L et le condensateur de filtrage C . La figure III.25 affiche la tension aux bornes de l'interrupteur S_1 et la diode D . La tension aux bornes de diode bascule entre $-V_s = -110\text{ V}$ et $V_s = 0\text{ V}$ lorsqu'elle est conductrice et la tension aux bornes de l'interrupteur S_1 (Mosfet) bascule entre $V_s = 110\text{ V}$ et $V_s = 0\text{ V}$ lorsqu'il est passant. Nous observons un fonctionnement complémentaire entre les deux commutateurs, le commutateur S_1 est inactif durant 50% de la période et actif durant 50% de la période.

III.8 Hacheur multiniveaux

Un convertisseur statique est dit "multiniveaux" lorsqu'il génère une tension de sortie découpée, composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages : D'une part, les structures multiniveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteur de puissance, car chaque composant à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension du bus continu d'entrée que le nombre de niveaux est élevé. D'une part, les qualités spectrales de la tension à la sortie du convertisseur multiniveaux sont remarquables. En fait, la multiplication du nombre de niveaux intermédiaires permet la réduction de l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. Ce qui diminue l'amplitude des raies harmonique. Une commande appropriée des semi-conducteurs de puissance du convertisseur multiniveaux permet de supprimer des familles entières de raies harmoniques [7], [18].

III.8.1 Schéma de montage d'un hacheur à trois niveaux

La figure III.26 indique la structure d'un hacheur trois niveaux et de sa commande en MLI. Il se compose de deux interrupteurs S_1 et S_2 , deux diodes D_1 et D_2 , une inductance, un condensateur de filtrage capacitif et une charge résistive. Une capacité flottante assure la liaison entre les deux points milieu des transistors et diodes. Dans cette topologie, et suivant la valeur du rapport cyclique, le convertisseur peut fournir à sa sortie trois niveaux de tension : 0 , $0,5.V_s$ et V_s

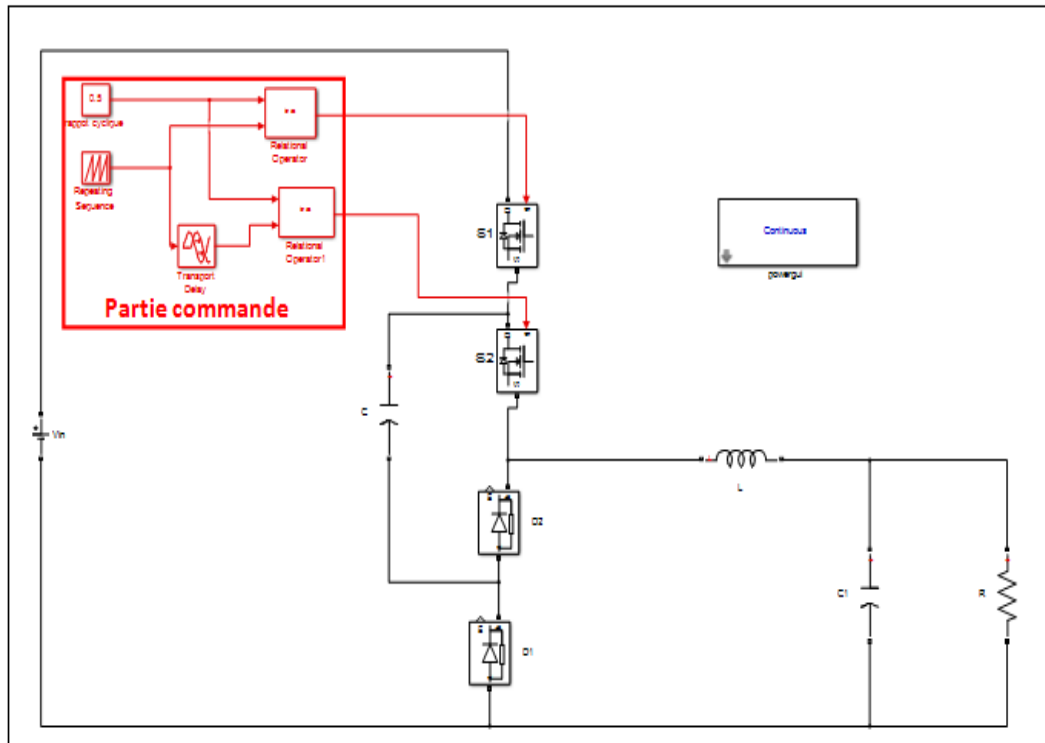


FIGURE III.26 – Hacheur trois niveaux et sa commande.

III.8.2 Configurations du hacheur à trois niveaux

Le hacheur à trois configurations possibles :

- Conduction des deux interrupteurs S_1 et S_2 : La tension de charge dans ce cas est égale à la tension de source V_s
- Conduction de S_1 et blocage de S_2 : La tension de charge est égale à la différence entre la tension de source et la tension de la capacité flottante
- Blocage de S_1 et S_2 : La tension de charge est dans ce cas nulle.

III.8.3 Commande en MLI du hacheur à trois niveaux

La commande des deux interrupteurs est décalée l'une par rapport à l'autre d'une demi-période. Pour avoir ce décalage, le signal de référence, c'est-à-dire le rapport cyclique, est comparé avec deux porteuses en dent de scie, et le décalage entre eux est d'une demi-période, comme indiqué à la figure III.27.

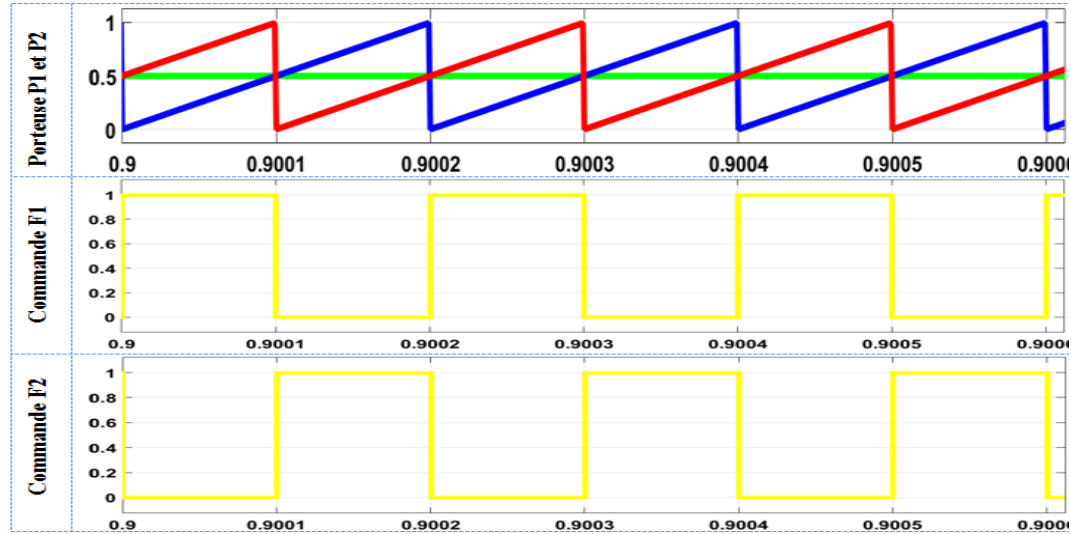


FIGURE III.27 – Principe de la modulation command MLI a trois niveaux.

Il faut distinguer le cas où le rapport cyclique α est inférieur à 0.5 de celui où il lui est supérieur

III.8.4 Analyse de fonctionnement d'un hacheur trois niveaux

Cas $\alpha < 0.5$

Pour $0 < t < \alpha T$, S_1 est fermé, S_2 ouvert.

Le courant i , égal à I' , passe par S_1 , C et D , C se charge

$$V_{S_1} = V_{D_2} = 0 \text{ et } V_{S_2} = V_C \approx \frac{V_s}{2} \text{ et } V_{D_1} = V_C - V_s \approx -\frac{V_s}{2} \quad (\text{III.16})$$

$$V_c = V_s - V_C \approx \frac{V_s}{2} \quad (\text{III.17})$$

$$I' = i \quad (\text{III.18})$$

Pour $\alpha T < t < T/2$, S_1 et S_2 sont ouverts :

Le courant I' passe par D_1 et D_2 , c'est un circuit ouvert :

$$V_{D_1} = V_{D_2} = 0 \text{ et } V_{S_1} = V_s - V_C \approx \frac{V_{in}}{2} \text{ et } V_{S_2} = V_C \approx \frac{V_s}{2} \quad (\text{III.19})$$

$$V_c = 0 \text{ et } i = 0 \quad (\text{III.20})$$

Pour $T/2 < t < T/2 + \alpha T$, S_2 est fermé, S_1 ouvert.

Le courant I passe par $D1, C$ et $S2, C$ se décharge

$$V_{D1} = V_{S2} = 0 \quad \text{et} \quad V_{S1} = V_s - V_C \approx \frac{V_s}{2} \quad \text{et} \quad V_{D2} = -V_C \approx -\frac{V_s}{2} \quad (\text{III.21})$$

$$V_c = V_C \approx \frac{V_s}{2} \quad \text{et} \quad i = 0 \quad (\text{III.22})$$

Pour $T/2 + \alpha T < t < T$, $S1$ et $S2$ sont ouverts.

On trouve les mêmes résultats.

Cas : $\alpha > 0.5$

Pour $0 < t < \alpha T - T/2$, $S1$ et $S2$ sont fermés.

Le courant d'entrée égale le courant de sortie, c'est en circuit ouvert :

$$V_{D1} = -V_s + V_C \approx -\frac{V_s}{2} \quad \text{et} \quad V_{D2} = -V_C \approx -\frac{V_s}{2} \quad \text{et} \quad V_{S1} = V_{S2} = 0 \quad (\text{III.23})$$

$$V_s = V_{oh} \quad \text{et} \quad i = I' \quad (\text{III.24})$$

Pour $\alpha T - T/2 < t < T$, $S1$ est fermé, $S2$ ouvert. Les relations sont les mêmes que pour $0 < t < \alpha T$ quand $\alpha < 0.5$.

Afin de garder la valeur moyenne de V_c égale à $V_s/2$, il suffit de faire changer la durée de la phase décharge de C par rapport à la durée de sa phase de charge.

Si la valeur de capacité est suffisamment grande, la tension aux bornes des transistors bloqués diffère peu de $V_s/2$, et celle aux bornes des diodes bloquées diffère peu de $-V_s/2$.

La tension inverse des interrupteurs est ainsi réduite de moitié par rapport au cas d'un hacheur abaisseur classique.

III.8.5 Chronogramme hacheur trois niveaux

On simule le fonctionnement du hacheur à trois niveaux commandé en MLI. Le schéma de simulation est indiqué à la figure III.26. Les paramètres du modèle sont les suivantes : $V_s = 110V$, $R = 100\Omega$, $C = 16\mu F$, $C_1 = 16 \mu F$, $L = 100 mH$

On simule le modèle pour un rapport cyclique : $= 0,3$.

Cas où $\alpha = 0,3$

On présente les résultats de simulation sur les figures III.28 à III.33.

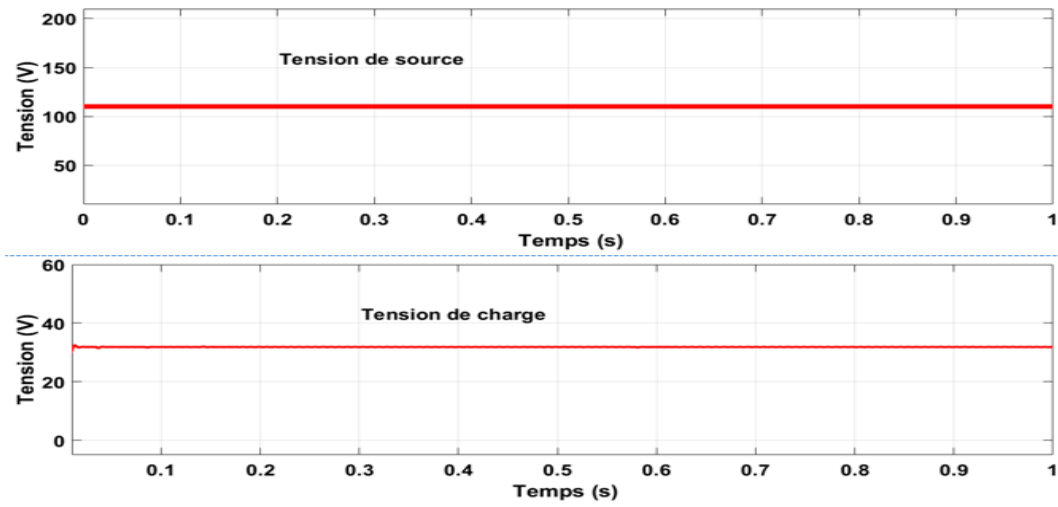


FIGURE III.28 – Tension de source et tension de charge.

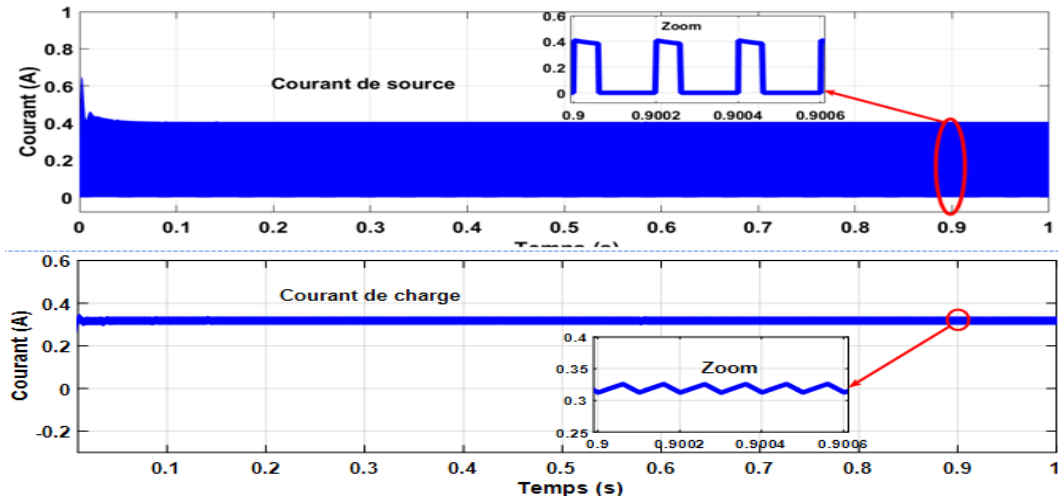


FIGURE III.29 – Courant de source et courant de charge.

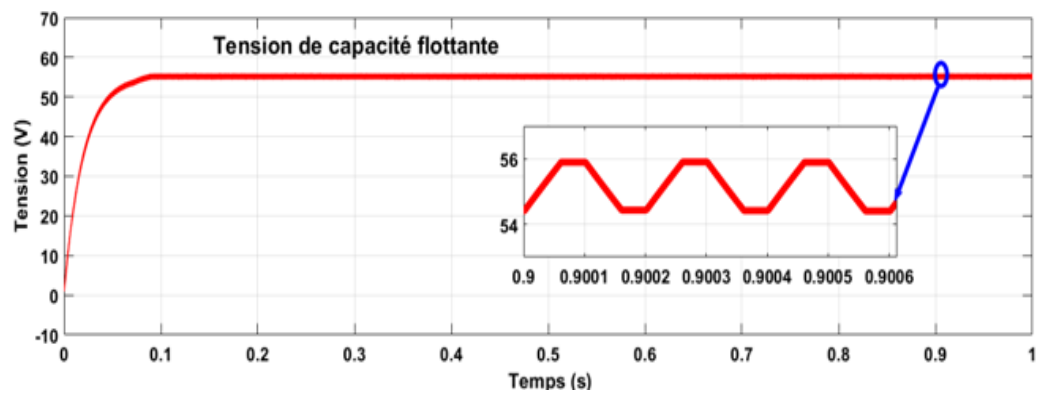


FIGURE III.30 – Tension de capacité flottante.

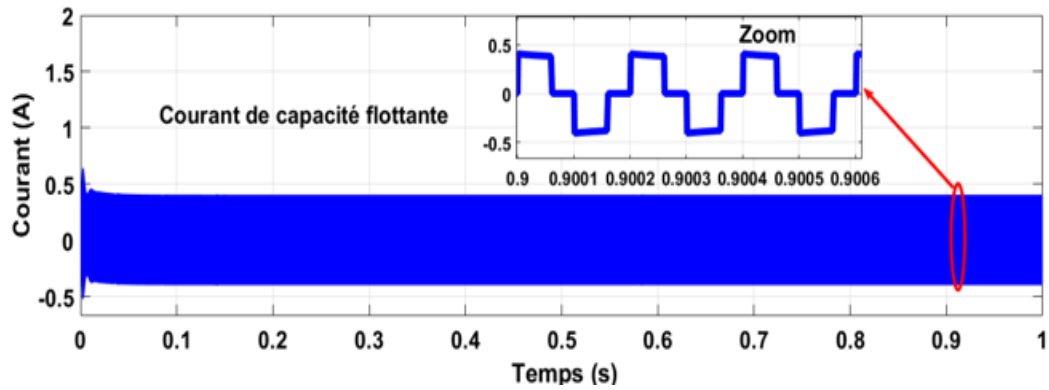


FIGURE III.31 – Courant de capacité flottante .

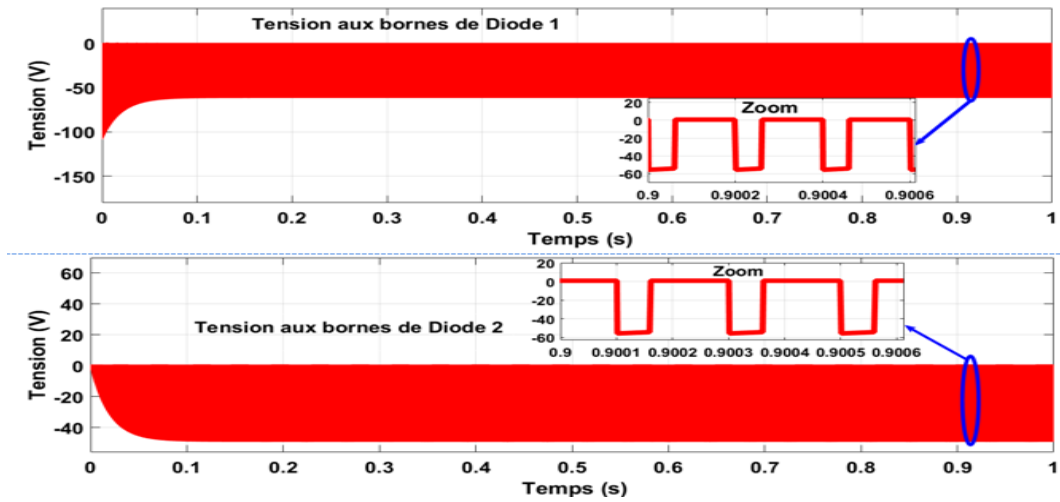


FIGURE III.32 – Tensions aux bornes de diode 1 et diode 2.

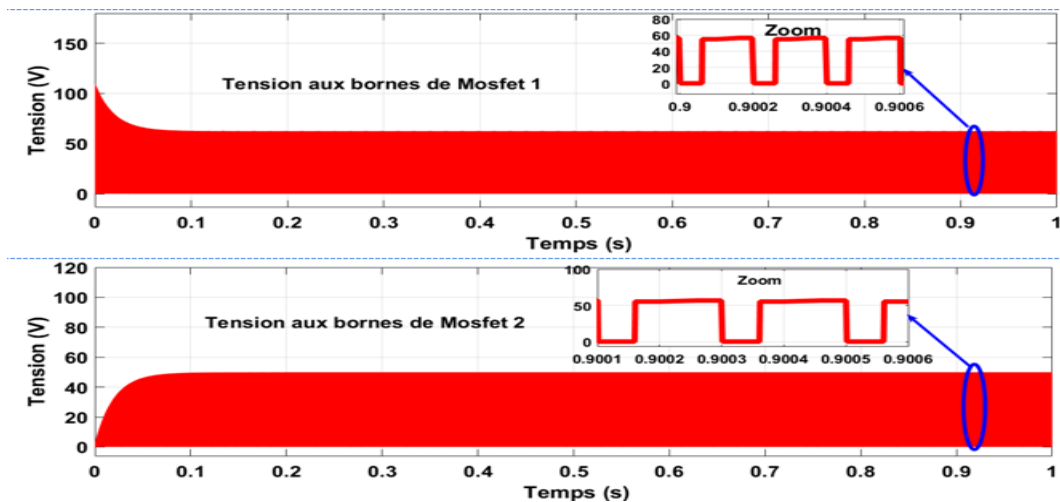


FIGURE III.33 – Tension au borne de deux Mosfet.

III.8.6 Interprétation

La figure III.28 représente la tension de source et la tension de charge. La tension de charge dépend du rapport cyclique et la tension de source V_s ;

$$V_c = \alpha.V_s = 0,3.110 = 33V$$

La figure III.29 représente la forme de courant de source et le courant de charge. Le courant de charge est au environ de 0,32 A supérieure à la valeur de courant de source.

La tension et le courant de charge sont filtrés par l'inductance de lissage L et le condensateur de filtrage.

La figure III.30 représente la tension aux bornes de la capacité flottante. La valeur de la tension est pratiquement égale à la moitié de la tension de source V_s .

La figure III.31 représente le courant qui traverse la capacité flottante.

Le zoom de tension et du courant montre des séquences périodique de chargement et déchargement de capacité flottante.

La figure III.32 représente les tensions aux bornes de diode 1 et diode 2. Le zoom montre que les tensions basculent entre zéro et $-V_s/2$. La figure III.33 représente les tensions aux bornes de Mosfet 1 et Mosfet 2. Le zoom montre que les tensions basculent entre zéro et $V_s/2$. Cela met en évidence un avantage de l'utilisation d'un hacheur à trois niveaux, c'est-à-dire que l'amplitude de la tension inverse appliquée sur chaque commutateur dans l'état de blocage est réduite, et l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension inverse est réduite.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons de manière générale une étude théorique des convertisseurs DC-DC, des différents types des hacheurs, en particulier des hacheurs irréversibles (Buck, Boost, Buck-Boost) et hacheur de stockage capacitif (hacheur Cuck). Nous avons présenté la structure d'un hacheur à trois niveaux et étudié son principe de fonctionnement, chronogramme et calculs de la valeur moyenne.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les commandes MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

Chapitre IV

Systèmes photovoltaïque a base d'un convertisseur continu/continu

SOMMAIRE

IV.1 INTRODUCTION	57
IV.2 SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE À BASE D'UN HACHEUR	57
IV.3 TECHNIQUE D'EXTRACTION DE MAXIMUM DE PUISSANCE	57
IV.3.1 Principe de fonctionnement de MPPT	58
IV.3.2 Algorithme de commande MPPT	59
IV.3.3 Algorithme de perturbation et observation	59
IV.4 CALCUL DES PARAMÈTRES DE BUCK	61
IV.4.1 Rapport cyclique	61
IV.4.2 Détermination de la valeur de l'inductance	61
IV.4.3 Calcule la valeur de la capacité	62
IV.4.4 Calcul de resistance de charge	62
IV.5 SIMULATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE À BASE D'UN HACHEUR À DEUX NIVEAUX	63
IV.5.1 Résultats de simulation hacheur buck deux niveaux	64
IV.5.2 Interprétations hacheur buck deux niveaux	66
IV.6 SIMULATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE À BASE D'UN HACHEUR À TROIS NIVEAUX	67
IV.6.1 Résultats de simulation hacheur à trois niveaux	68
IV.6.2 Interprétations hacheur à trois niveaux	71
IV.7 CONCLUSION	72

IV.1 Introduction

La puissance de fonctionnement des panneaux solaires est facile à calculer. Elle vaut le produit tension courant. Cependant, la détermination de la puissance de référence est plus difficile car celle-ci est fonction de paramètres météorologiques (température et éclairement). Cette référence variable caractérisée par une fonction non linéaire rend plus difficile l'obtention d'un fonctionnement à puissance maximale. Par conséquent, vous devez continuer à exécuter les commandes PPM. Cette commande est appelée algorithme MPPT et peut être plus ou moins compliquée. Il est généralement basé sur l'ajustement du rapport cyclique d'un convertisseur statique jusqu'à ce qu'il soit sur le PPM.

Dans ce chapitre, on va présenter la technique de commande de maximisation de puissance produite d'un panneau photovoltaïque est maximale. Cette méthode est appelé Perturbation et Observation (PO) pour optimiser la puissance.

IV.2 Système photovoltaïque à base d'un hacheur

Les caractéristiques des générateurs photovoltaïques dépendent de l'ensoleillement et de la température. Ces changements climatiques provoquent des fluctuations du point de puissance maximale. Du fait de cette fluctuation, un hacheur contrôlé est généralement intercalé entre le générateur photovoltaïque et le récepteur, permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont appelées MPPT (Maximum Power Point Tracking).

La Figure (IV.1) montre la structure d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur.

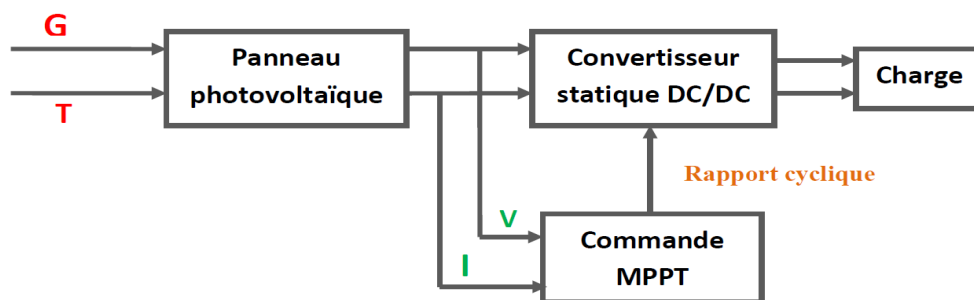


FIGURE IV.1 – Schéma simplifié d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur.

IV.3 Technique d'extraction de maximum de puissance

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques [9].

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [9].

IV.3.1 Principe de fonctionnement de MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}) [9].

L'adaptation d'impédance prend généralement la forme d'un convertisseur DC-DC, comme représenté sur la figure (IV.2).

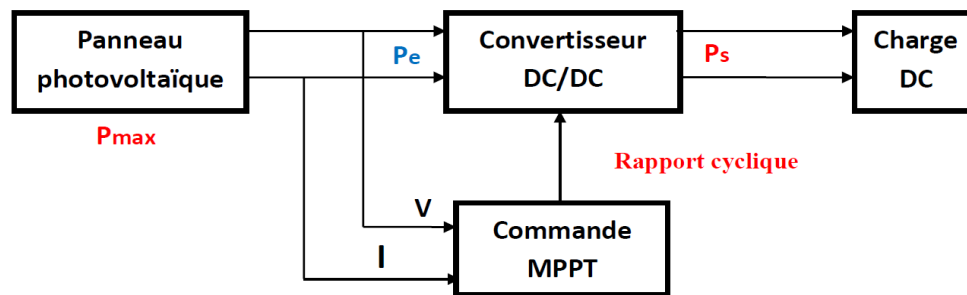


FIGURE IV.2 – Schéma de principe de la commande MPPT d'un système photovoltaïque.

Le principe de fonctionnement de la technique de commande communément utilisée consiste à agir automatiquement sur le rapport cyclique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou changement soudaines de charges qui peuvent survenir.

Nous pouvons citer trois cas de perturbations dans la figure (IV.3). Cette dernière nous montre le basculement du fonctionnement du point de la puissance maximal PPM1 vers un nouveau point PF de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum, par rapport au type de la perturbation.

Nous avons dans le premier cas le réajustement de la valeur du rapport cyclique entraîne la variation de l'ensoleillement, et ceci mène à la convergence vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas *b* grâce à l'action de commande une nouvelle position optimale peut être détectée par la modification du point de fonctionnement entraînée par une variation de charge. Dans le dernier cas *c*, le changement de température de fonctionnement du GPV peut varier point de fonctionnement. Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [24].

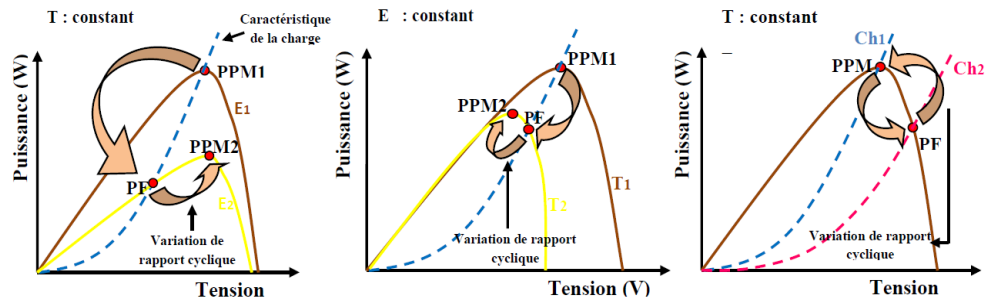


FIGURE IV.3 – Variation du point de puissance maximale avec l'éclairement, la température et la charge.

IV.3.2 Algorithme de commande MPPT

Il existe plusieurs algorithmes de commande MPPT pour trouver la valeur maximale de la puissance, Nous allons exposer et utiliser la méthode les plus reconnues, qui est la méthode de perturbation et observation (P&O)

IV.3.3 Algorithme de perturbation et observation

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension VPV d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance PPV qui en résulte, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la puissance PPV, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique PPV (VPV), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM [22].

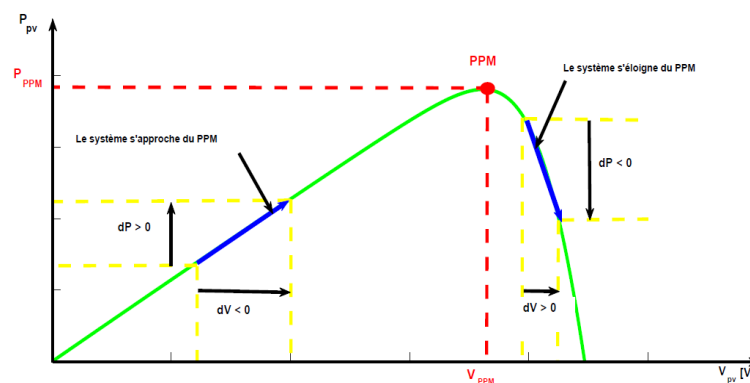


FIGURE IV.4 – Variation du Point de Puissance Maximale avec l'éclairement, la température et la charge.

Cas n°	dP	dV	$\frac{dP}{dV}$	Sens de la poursuite	Action de contrôle
1	+	+	+	Bon	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
2	-	-	+	mauvais	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
3	+	-	-	mauvais	décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$
4	-	+	-	bon	décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$

La figure (IV.5) représente l'algorithme P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Selon cet algorithme, deux capteurs (courant et tension GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance PV pour un temps d'échantillonnage continu, et pour pouvoir calculer les erreurs de tension et de puissance :

$$\Delta V = V_{PV_n} - V_{PV_{(n-1)}} \quad (IV.1)$$

$$\Delta P = P_{PV_n} - P_{PV_{(n-1)}} \quad (IV.2)$$

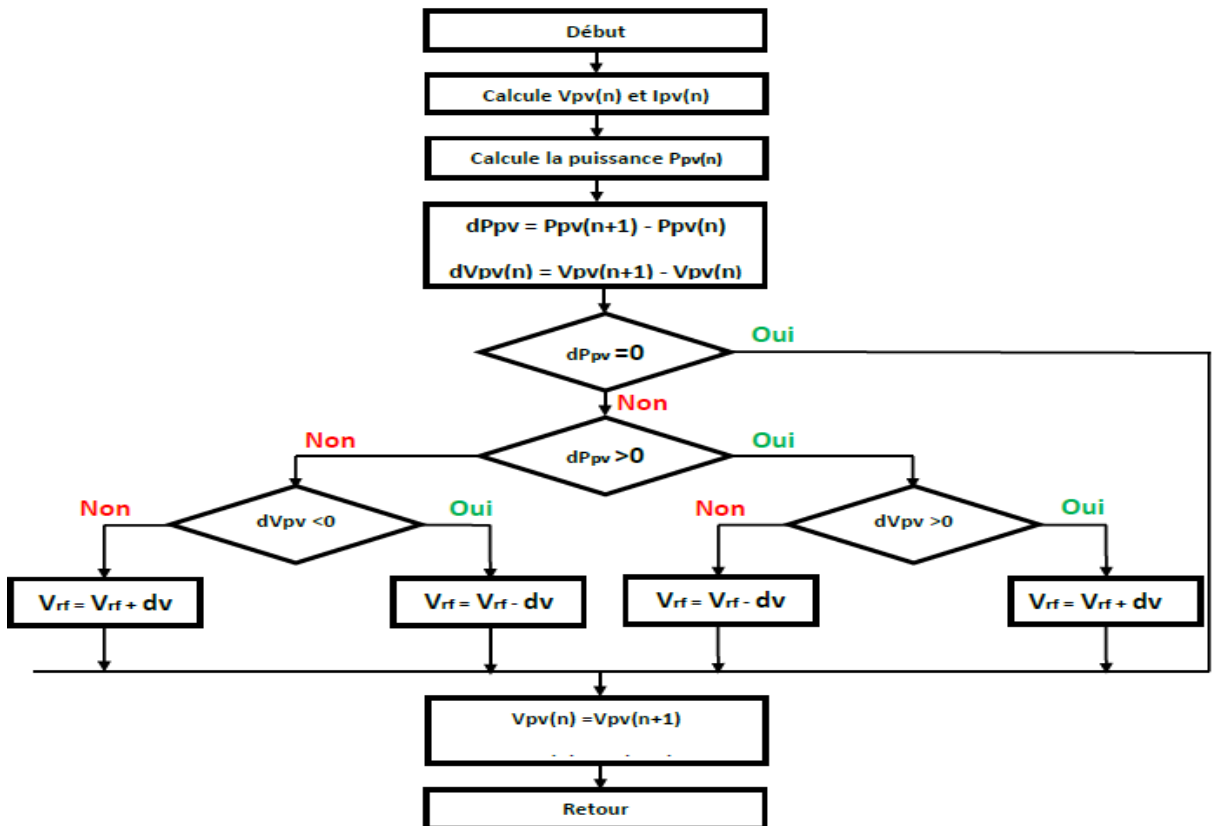


FIGURE IV.5 – Organigramme de la méthode P&O.

L'algorithme P&O a comme avantage d'une réponse précise et rapide. Il peut déterminer le point de puissance maximale pour un éclairement solaire et température ou un niveau de dégradation des caractéristiques. Le problème avec cet algorithme est :

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

IV.4 Calcul des paramètres de buck

Les paramètres du convertisseur buck est déterminé comme suit :

IV.4.1 Rapport cyclique

La valeur optimale du rapport cyclique obtenue à partir de système P&O :

$$\alpha = 0.66 \quad (\text{IV.3})$$

Tension de source (tension à la sortie de panneau), $V_s = 36,5 \text{ V}$
 Courant de source (courant à la sortie de panneau), $I_s = 5,25 \text{ A}$
 Tension de sortie (charge) est calculé comme suit :

$$V_c = \alpha \cdot V_s = 23.93 \text{ V} \quad (\text{IV.4})$$

Courant de sortie (charge) est calculé comme suit :

$$I_c = \frac{I_s}{\alpha} = \frac{5.25}{0.66} = 7.95 \text{ A} \quad (\text{IV.5})$$

IV.4.2 Détermination de la valeur de l'inductance

La valeur de l'inductance est donnée par l'équation ci-dessous :

$$L = \frac{V_s \cdot \alpha}{f \cdot \Delta I_L}$$

Avec

V_s : Tension de source

f : Fréquence de commutation

ΔI_L : l'ondulation actuelle est calculé comme 1030% de I_c

Application numérique

Utilisation d'une fréquence de découpage de 5 kHz et d'un courant d'ondulation équivalent à 30 % du courant de source.

$$L = \frac{V_s \cdot \alpha}{f \cdot 0,3 \cdot I_c} = \frac{36,5 \cdot 0,66}{5000 \cdot 0,3 \cdot 7,95} = 0,002H \quad (\text{IV.7})$$

IV.4.3 Calcule la valeur de la capacité

La valeur du condensateur est calculée par l'équation ci-dessous :

$$C = \frac{I_c \cdot \alpha}{f \cdot \Delta V_c} \quad (\text{IV.8})$$

Avec

ΔV_c : Ondulation de tension qui est contrainte à moins de 1 % de V_c

Application numérique

Avec une fréquence de découpage de 5 kHz et une tension d'ondulation équivalente à 1% de la tension de sortie.

$$C = \frac{I_c \cdot \alpha}{f \cdot 0,01 \cdot V_c} = \frac{7,95 \cdot 0,66}{5000 \cdot 0,01 \cdot 23,93} = 0,0044F \quad (\text{IV.9})$$

IV.4.4 Calcul de resistance de charge

$$R = \frac{V_c}{I_c} \quad (\text{IV.10})$$

Avec

R : Resistance de charge (Ω)

V_c : Tension de charge (V)

I_c : Courant de charge (A)

Application numérique

$$R = \frac{V_c}{I_c} = \frac{23,93}{7,95} = 3\Omega \quad (\text{IV.11})$$

Tableau IV.1 montrent les différents paramètres de charge RLC.

TABLE IV.1 – Différents paramètres du circuit du charge

Paramètres	Valeurs
Résistance R	3Ω
Inductance L	$0.02 H$
Condensateur filtrage source C_1	$1e-2 F$
Condensateur charge C_2	$0.0044 F$

IV.5 Simulation d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur à deux niveaux

On simule le fonctionnement d'un système photovoltaïque contrôlé par MPPT, alimentant une charge résistive via un hacheur à deux niveaux (Buck). Les différents paramètres du circuit du système sont indiqués dans le tableau (IV.1). La fréquence de commutation du hacheur, imposée par la fréquence de la porteuse en dent de scie, est de 5 kHz . L'alimentation photovoltaïque est composée d'un seul panneau ayant les spécifications indiquées dans le tableau (IV.2).

TABLE IV.2 – Différents paramètres de panneau photovoltaïque [14]

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale P_{max}	190 W
Tension à puissance maximale V_{max}	37 V
Courant à puissance maximale I_{max}	5,3 A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	44,5 V
Courant de court-circuit I_{sc}	5,88 V

On utilise le logiciel de simulation MATLAB/Simulink/Simscape. La figure (IV.6) montre le schéma de simulation le fonctionnement de la cascade panneau photovoltaïque associé avec un hacheur buck pour les condition suivant :

- Irradiation solaire fixe à 1000 W/m^2 ,
- Température fixe à $25\text{ }^\circ\text{C}$.

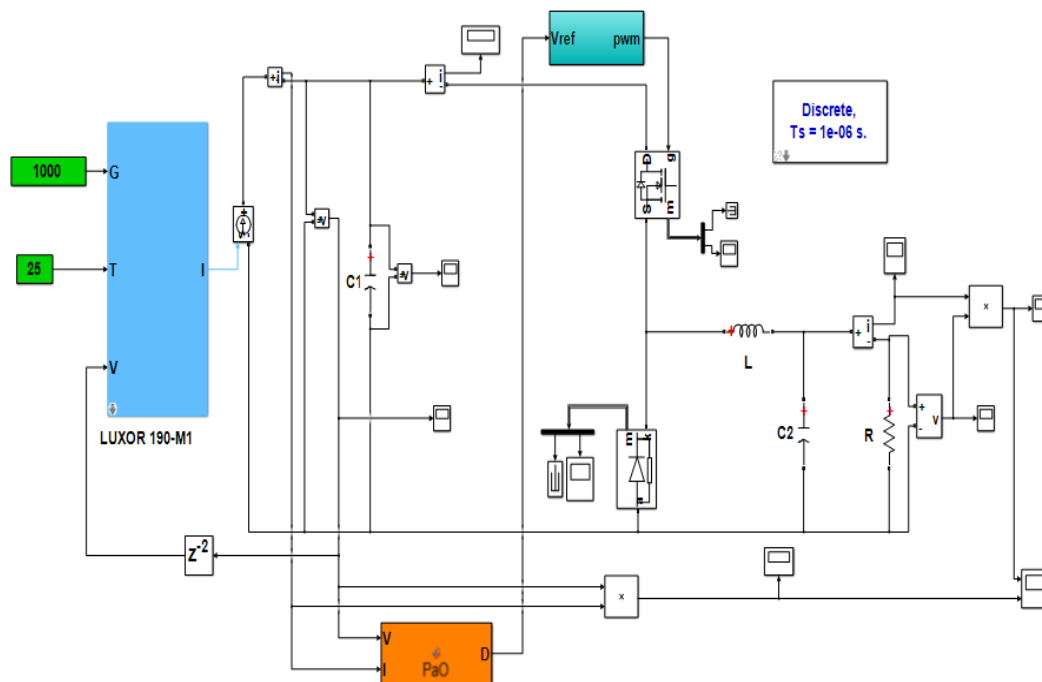


FIGURE IV.6 – Schéma bloc Simulink de système PV à base d'un hacheur buck deux niveaux.

IV.5.1 Résultats de simulation hacheur buck deux niveaux

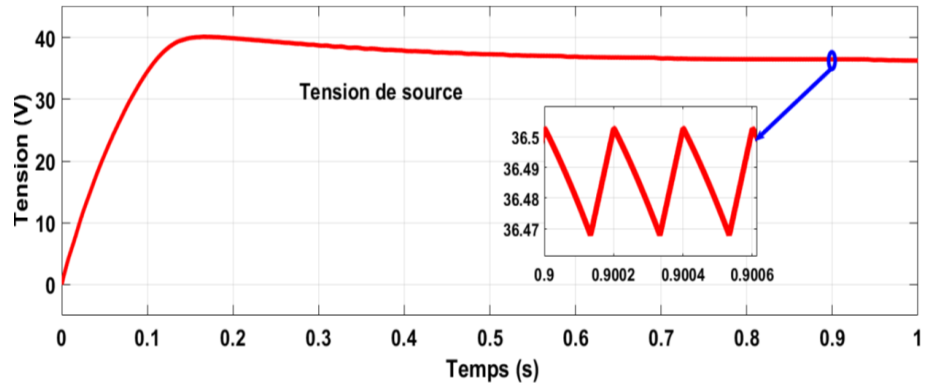


FIGURE IV.7 – Tension de source.

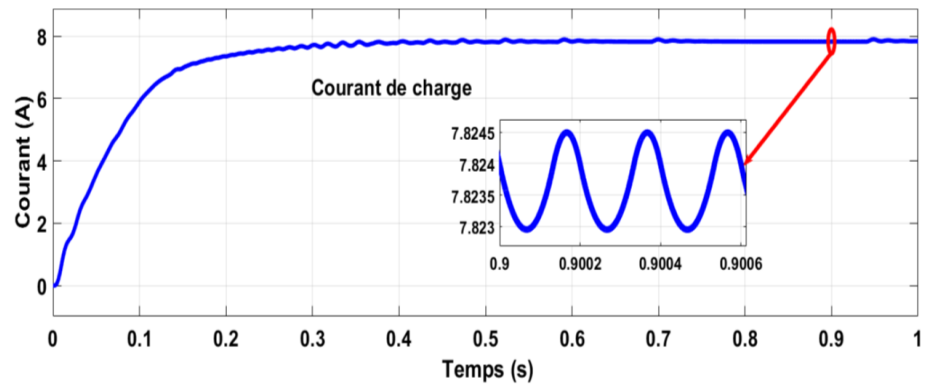


FIGURE IV.8 – Courant de source.

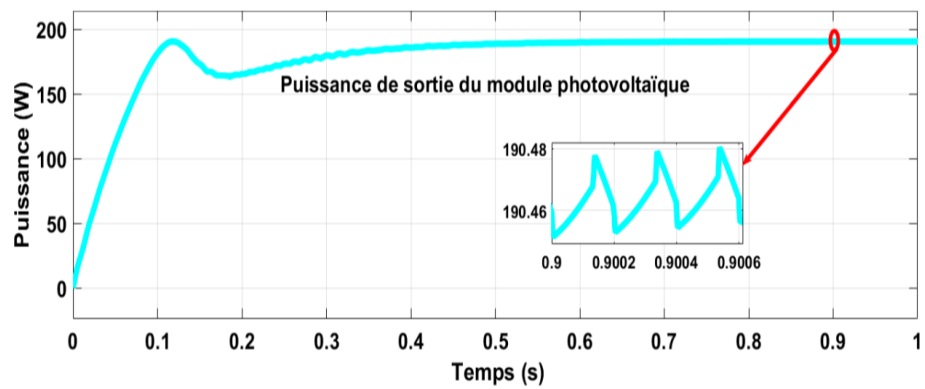


FIGURE IV.9 – Puissance de sortie du module photovoltaïque.

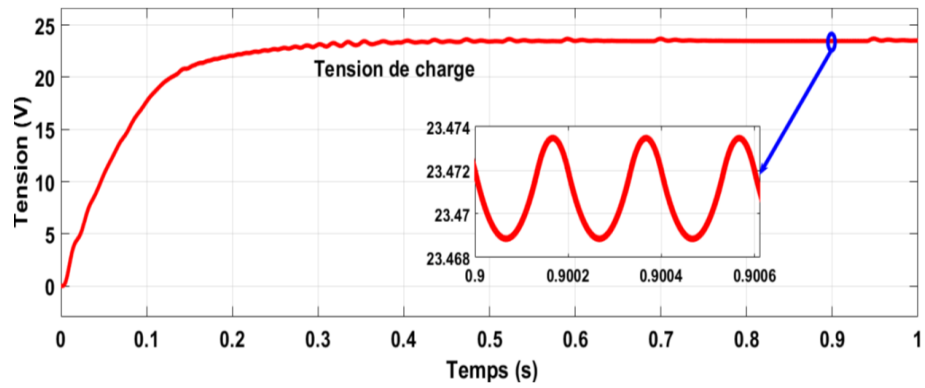


FIGURE IV.10 – Tension de charge.

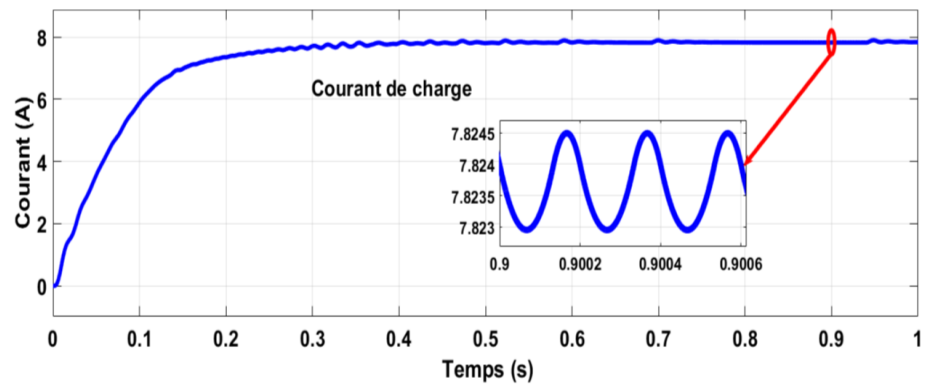


FIGURE IV.11 – Courant de charge.

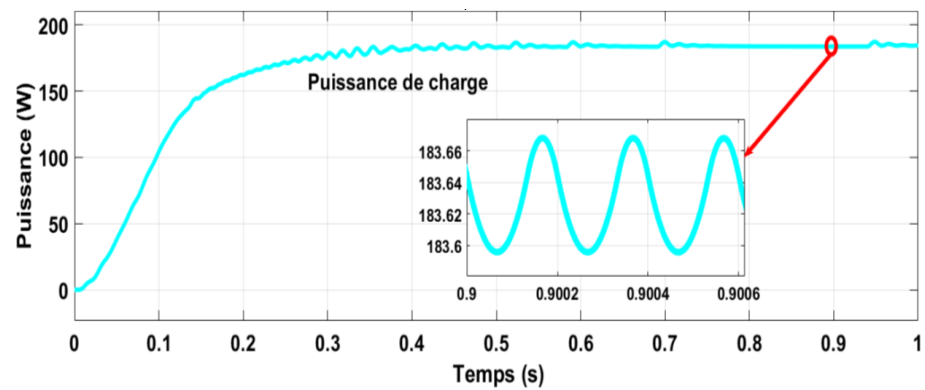


FIGURE IV.12 – Puissance de charge.

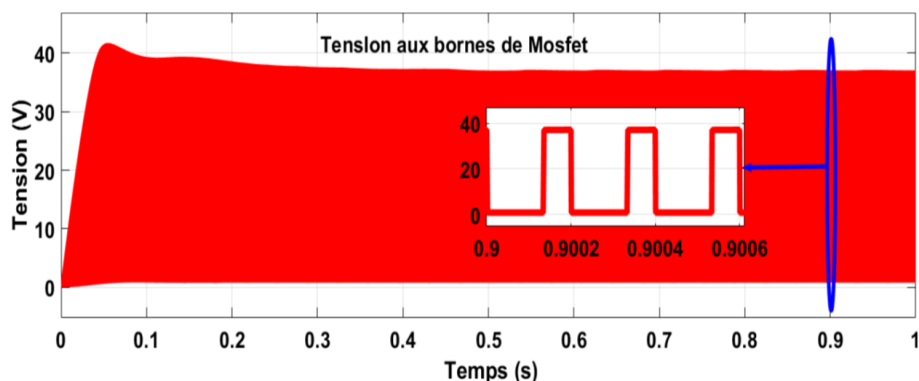


FIGURE IV.13 – Tension aux bornes de Mosfet.

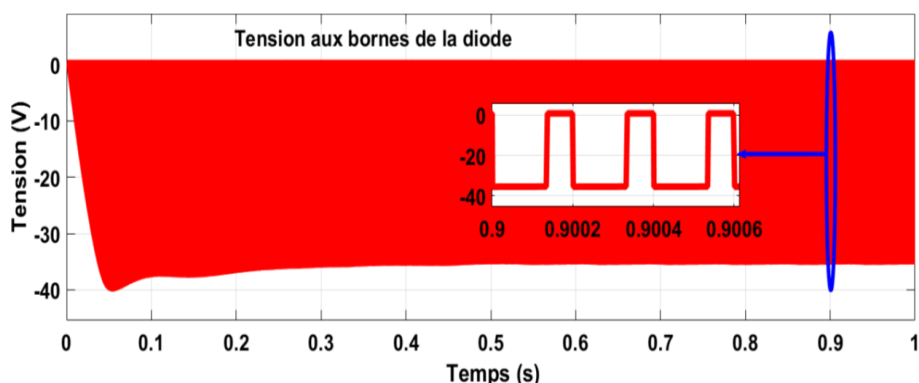


FIGURE IV.14 – Tension aux bornes de diode.

IV.5.2 Interprétations hacheur buck deux niveaux

Les figures (IV.7), (IV.8) et (IV.9) montrent les courbes de tension de source, courant source et la puissance de source .En effet, les graphes commencent par un régime transitoire puis se stabilisent à des valeurs correspondantes au point de puissance maximale (36.2 V, 5.2 A, 190W). Le Zoom sur les signaux montre des petites ondulations et oscillations à cause de la commutation du convertisseur.

Les figures (IV.10), (IV.11) et (IV.12) montrent les courbes de tension de charge, le courant de charge et la puissance de charge. Les courbes commencent par un régime transitoire puis se stabilisent à des valeurs qui correspondante à la tension, le courant et la puissance de panneau et au rapport cyclique du hacheur. La tension de charge 23.49 V est inférieure à celle du panneau, le courant de charge 7.83 A est inférieure à celle du panneau et la puissance de charge 183.9 W est légèrement inférieure à celle du panneau (190 W) à cause d'une faible consommation de puissance au niveau des interrupteurs du hacheur.

$$v_{ch} = \alpha v_s \quad v_{ch} = 0.647 \times 36.2 \quad V_{ch} = 23.45v$$

$$I_{ch} = \alpha \frac{v_s}{R} \quad I_{ch} = 0.647 \times \frac{36.2}{3} \quad I_{ch} = 7.82A$$

$$P_{ch} = v_{ch} \times I_{ch} \quad P_{ch} = 23.45 \times 7.8 \quad P_{ch} = 183.4W$$

Les figures (IV.13) et (IV.14) montrent la tension aux bornes de l'interrupteur S (Mosfet) et la tension aux bornes de la diode. La tension aux bornes de diode bascule entre $-V_{in} = -36.2 V$ et $V_{in} = 0 V$ et la tension aux bornes de l'interrupteur S_1 (Mosfet) bascule entre $V_{in} = 36.2V$ et $V_{in} = 0 V$. Nous observons un fonctionnement complémentaire entre les deux commutateurs, le commutateur S_1 est inactif durant 34% de la période et actif durant 66% de la période.

IV.6 Simulation d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur à trois niveaux

Les conditions de simulations, les paramètres de panneau photovoltaïque et de charge sont cités dans la manipulation précédente, les modèles sous forme de schéma blocs implantés dans l'environnement MATLAB/Simulink/Simscape. Le condensateur flottant du hacheur à trois niveaux capacité $C = 1e^{-4} F$.

La figure (IV.15) montre le schéma de simulation d'un panneau photovoltaïque à base d'un hacheur à trois niveaux.

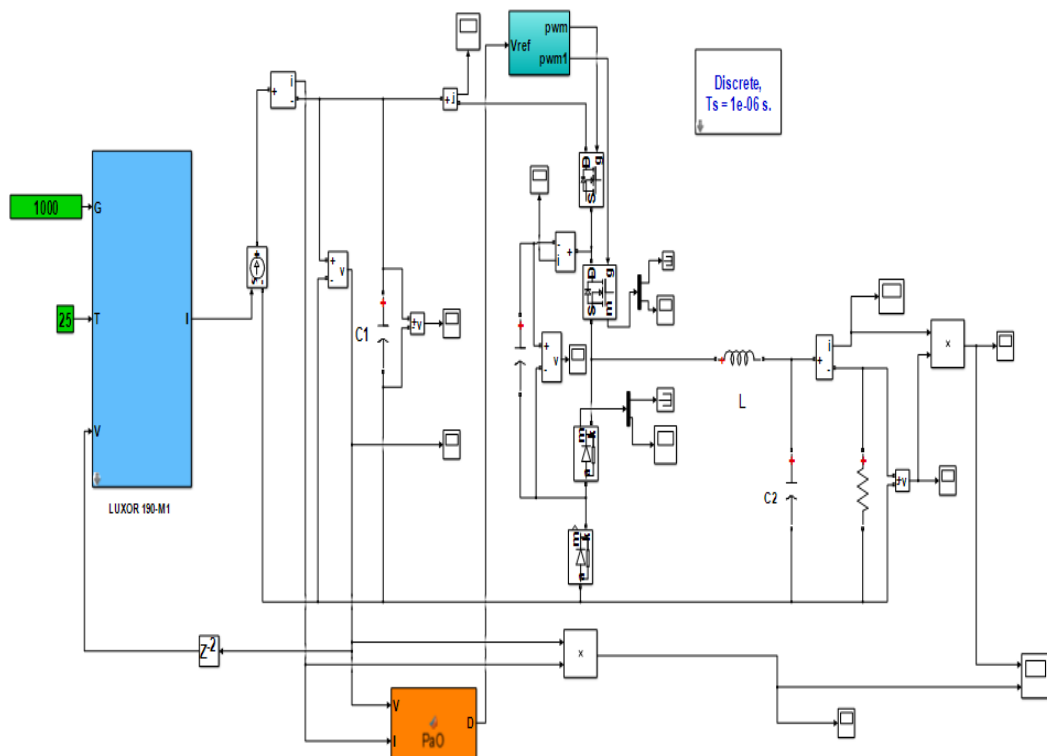


FIGURE IV.15 – Schéma de simulation d'un système PV à base de hacheur à trois niveaux.

IV.6.1 Résultats de simulation hacheur à trois niveaux

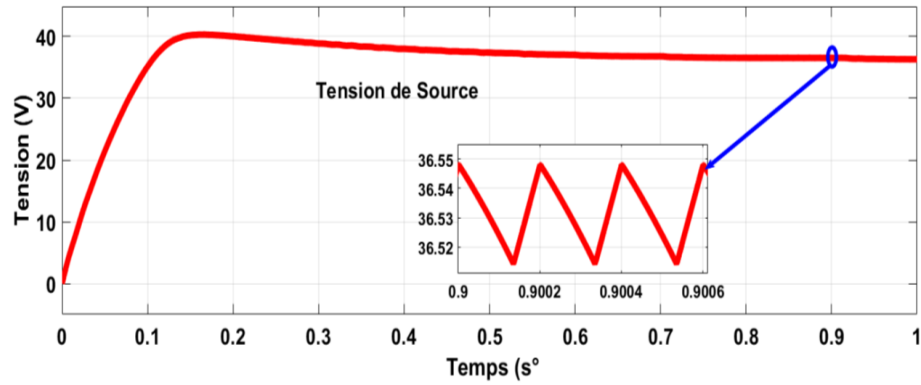


FIGURE IV.16 – Tension de source.

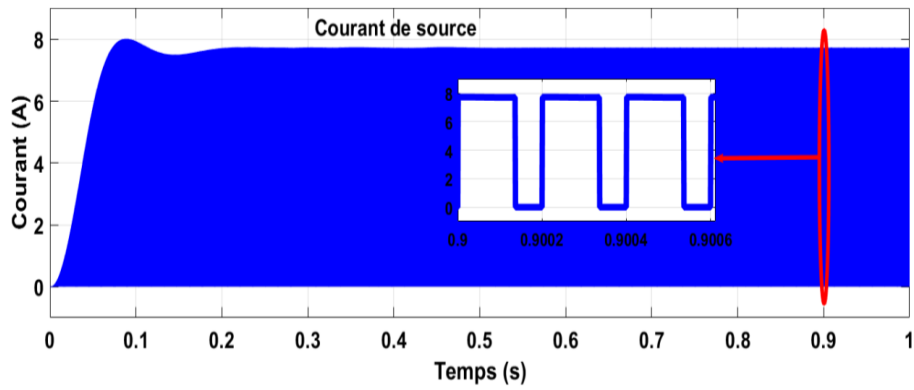


FIGURE IV.17 – Courant de source.

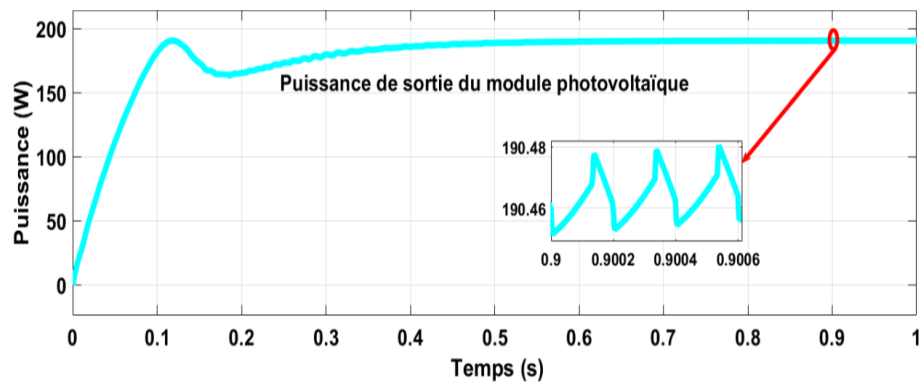


FIGURE IV.18 – Puissance de sortie du module photovoltaïque.

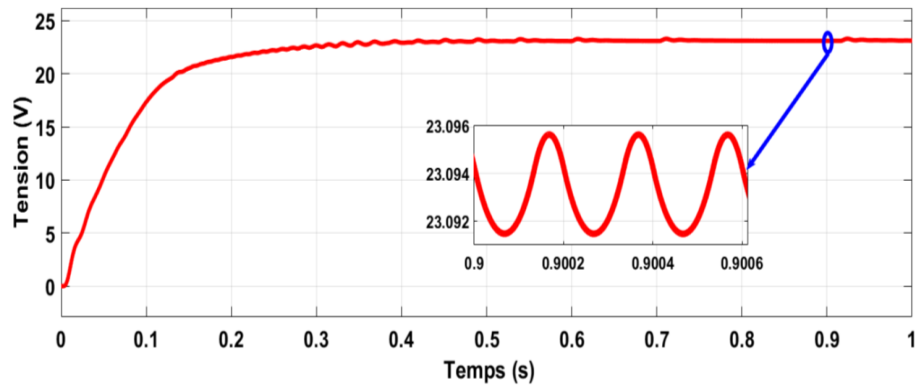


FIGURE IV.19 – Tension de charge.

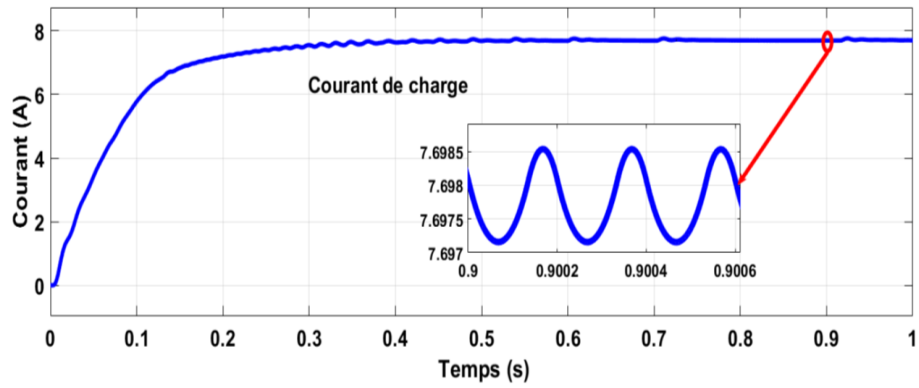


FIGURE IV.20 – Courant de charge.

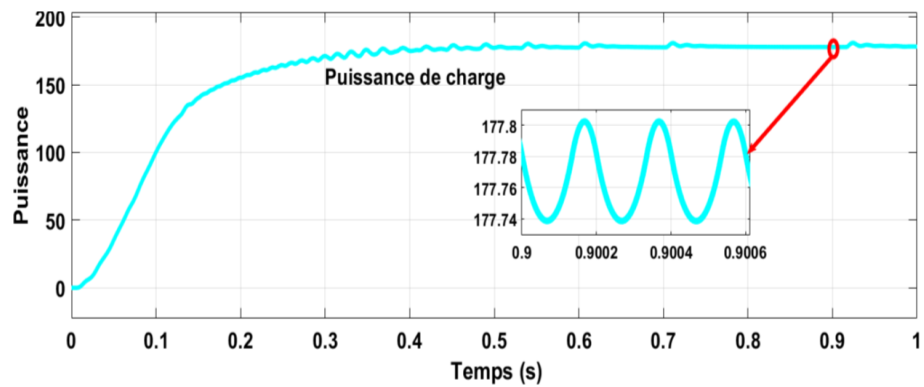


FIGURE IV.21 – Puissance de charge.

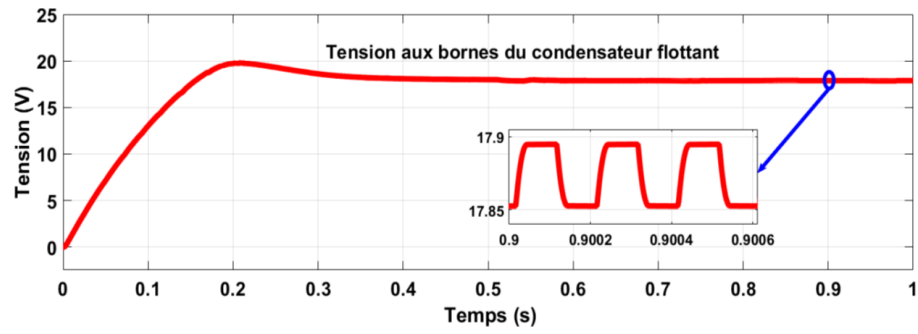


FIGURE IV.22 – Tension aux bornes du condensateur flottant.

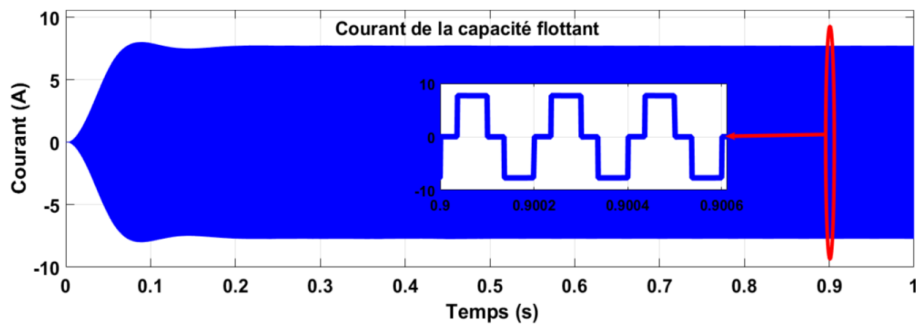


FIGURE IV.23 – Courant de la capacité flottant.

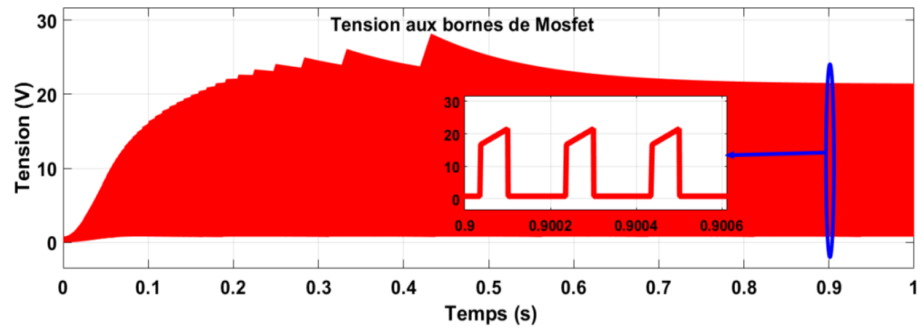


FIGURE IV.24 – Tension aux bornes de Mosfet.

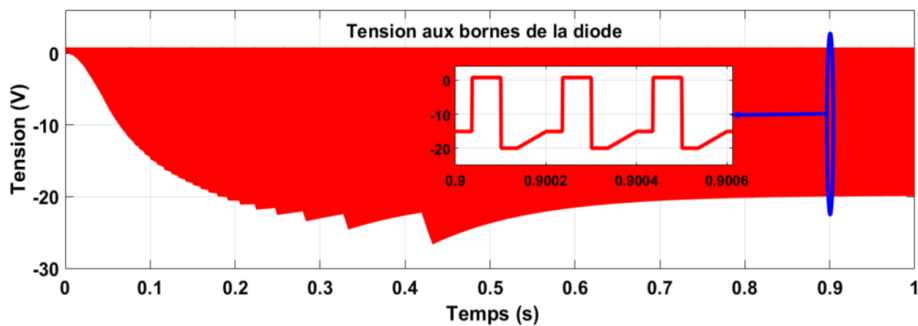


FIGURE IV.25 – Tension aux bornes de la diode.

IV.6.2 Interprétations hacheur à trois niveaux

Les figures (IV.16), (IV.17) et (IV.18) montrent les courbes de tension de source, courant source et la puissance de source. En effet, les graphes commencent par un régime transitoire puis se stabilisent à des valeurs correspondantes au point de puissance maximale (36.2 V, 5.2 A, 190 W). Le Zoom sur les signaux montre des petites ondulations et oscillations à cause de la commutation du convertisseur.

Les figures (IV.19), (IV.20) et (IV.21) montrent les courbes de tension de charge, le courant de charge et la puissance de charge. Les courbes commencent par un régime transitoire puis se stabilisent à des valeurs qui correspondent à la tension, le courant et la puissance de panneau et au rapport cyclique du hacheur. La tension de charge 23.12 V est inférieure à celle du panneau, le courant de charge 7.7 A est inférieur à celui du panneau et la puissance de charge 178.1 W est légèrement inférieure à celle du panneau (190 W) à cause d'une faible consommation de puissance au niveau des interrupteurs du hacheur.

La figure (IV.22) et (IV.23) montrent les courbes de tension et le courant aux bornes de la capacité flottant. La courbe de la tension commence par un régime transitoire puis se stabilise à une valeur approximativement égale 18V. Cette valeur est pratiquement égale à la moitié de la tension de sortie du panneau photovoltaïque (36.2 V), ce qui permet de donner à la tension de sortie trois niveaux de tension possible.

Les figures (IV.24) et (IV.25) montrent la tension aux bornes de l'interrupteur S (Mosfet) et la tension aux bornes de la diode. La tension aux bornes de l'interrupteur S1 (Mosfet) bascule entre le zéro et $V_{in}/2 = 18 V$ et la tension aux bornes de diode bascule entre zéro et $V_{in}/2 = -18 V$. Nous observons un fonctionnement complémentaire entre les deux commutateurs, le commutateur S1 est inactif durant 32% de la période et actif durant 68% de la période.

Nous observons aussi que la tension de l'interrupteur est égale la moitié de la tension d'entrée du hacheur, ce qui prouve l'avantage de l'utilisation du hacheur à trois niveaux par rapport au hacheur à deux niveaux, pour le quelle ces tensions sont comprises entre zéro et la pleine tension d'entrée, égale à 36.2 V, comme mentionné précédemment (figures IV.13 et IV.14).

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on appliqué la commande MPPT « perturbation observation » sur deux systèmes photovoltaïques : le premier à base d'un hacheur à deux niveaux et le deuxième à base d'un hacheur à trois niveaux. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Nous avons observés que la puissance d'entrée et de sortie du convertisseur sont légèrement différentes en raison de la consommation de ceux-ci et nous avons montré l'avantage d'un hacheur à trois niveaux par rapport au hacheur à deux niveaux, à savoir la réduction des efforts de tension imposés sur les interrupteurs lors de la commutation.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire traite de la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque moyennant le logiciel MATLAB (Simulink). Nous avons procédé à cette étude en quatre étapes : état de l'art des énergies renouvelables appropriées (photovoltaïque), la modélisation du système photovoltaïque, nous avons étudié les convertisseurs DC-DC, on a simulé et comparé deux systèmes photovoltaïque, Le premier à base d'un hacheur à deux niveaux et le deuxième à base d'un hacheur à trois niveaux. La commande en MPPT (Perturbe Observ) est appliquée sur les deux systèmes.

Dans le premier chapitre, on a présenté des généralités sur les systèmes PV, nous a permis de bien comprendre le fonctionnement et principe 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 a permis de 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 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 les mesures.

Dans le troisième chapitre, on a étudié les types de convertisseurs DC-DC, décrit leurs types, principes et étapes de fonctionnement. Nous avons simulé leur fonctionnement, en nous concentrant sur le convertisseur multiniveaux et leur avantage par rapport aux convertisseurs à deux niveaux.

Dans le quatrième chapitre, on a simulé le fonctionnement et la commande MPPT d'un système photovoltaïque composé des éléments suivants : générateur, hacheur et charge résistive. Nous avons considéré le cas d'un hacheur à deux niveaux et d'un hacheur à trois niveaux et on a montré les avantages d'utiliser un hacheur à trois niveaux par rapport à un hacheur à deux niveaux par simulation l'avantages d'utiliser un hacheur à trois niveaux par rapport à un hacheur à deux niveaux par simulation.

Perspectives pour de futurs travaux

Les perspectives envisagées dans la suite de ce travail sont :

- Réalisation pratique, car l'existence du banc expérimental en cours de réalisation en

laboratoire automatique Tlemcen (LAT) servira à valider les modèles développés et des stratégies de commande.

- Utiliser d'autre algorithme MPPT (Incrément de Conductance, logique floue, etc.)
- Intégration des panneaux photovoltaïques dans le réseau électrique.
- Stockage de l'énergie dans les batteries.

Bibliographie

- [1] *Guide des énergies renouvelables*. Ministère de l'Energie et des Mines, Edition 2007.
- [2] N. ABOUCHANA : *Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT*. Mémoire de Magistère, Ecole National Polytechnique, Alger, 2009.
- [3] Toudert Dalila ARAB SALIM : *Etude d'un système photovoltaïque*. Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017.
- [4] Y. BAKELLI : *Contribution à l'optimisation du dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome*. Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, Edition 2007.
- [5] Rafik BELABED : *Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque*. Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017.
- [6] M. BELKACEM : *Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT)*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master académique, Université de Tlemcen, Algérie, 2015.
- [7] Mourad BELKACEM : *Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT)*. Thèse de doctorat, 2015.
- [8] Mousumi BISWAL : *Control techniques for DC-DC buck converter with improved performance*. Thèse de doctorat, 2011.
- [9] DENDIB BOUALEM : *Technique conventionnelles et avancée de poursuite mppt pour des applications photovoltaïque : étude comparative. mémoire de magister, Université Ferhat Abbes-Sétif*, 2007.
- [10] Djamil BOUKHERS : *Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque. application au pompage*. 2007.
- [11] Wassila Faiza CHOUIKHI : *Réalisation d'une commande buck-boost pour PV*. Thèse de doctorat.
- [12] Salim DJERIOU : *Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone*. Thèse de doctorat, 2018.
- [13] ENEDIS : *afrique latribune , energie solaire les pays africains champions en la matiere, apr 2021. <https://afrique.latribune.fr/entreprises/la-tribune-afrique-de-l-energie-by-enedis/2019-10-01/energie-solaire-les-pays-africains-champions-en-la-matiere-829404.html>*.

-
- [14] S. Sarri et H. BOUTEFAHA : *Commande en MPPT d'une chaîne photovoltaïque à base d'un hacheur multiniveaux*. Thèse de doctorat, Université de Jijel, 2020.
- [15] A. Abid et Y. BECHLAGHEM : *Etude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque*. Thèse de doctorat.
- [16] Saidi FATIHA : *Implémentation d'un régulateur de type trois pour convertisseur DC-DC sur DSP*. Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2017.
- [17] Sorin GUSIA *et al.* : Modélisation des systèmes électroniques de puissance à commande mli : application aux actionnements électriques. *Université catholique de Louvain, Thèse de doctorat-2005*, 2005.
- [18] Francois LEPLUS : *TP d'électrotechnique par simulation, préparation, manipulation et solution avec PSIMDEMO*. 2 édition avec énergies renouvelables, 2011.
- [19] M. LOUCIF. : *Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur.*, 2016.
- [20] M MEDDAH, M BOURAHLA et N BOUCHETATA : Synthèse des convertisseurs statiques dc/ac pour les systèmes photovoltaïques. *Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 Adrar*, pages 101–112, 2011.
- [21] A. MORSLI : *Etude d'un système solaire photovoltaïque : utilisant des supercondensateurs*. éditions Universitaires Européennes EUE, 2012.
- [22] P. NATTORN : *Analysis and Simulation Tools for Solar Array Pumping Systems*. Thèse de Doctorat, Université Polytechnique de California, USA, 2005.
- [23] Yakoub NETTARI : *Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC*. Thèse de doctorat, 2018.
- [24] TNEG SLIMANE : *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque*. no. *Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued*, 2015.

Résumé

Cette mémoire présente une étude d'un convertisseur multi-niveau pour une commande MPPT dédiée à un système photovoltaïque. La première partie de ce travail à commencer par la modélisation puis la simulation d'un module photovoltaïque pour voir l'influence des différentes conditions météorologique (ensoleillement et la température) sur celui-ci. La deuxième partie consistée à développer la commande MPPT (Maximum Power Point Traking) en cherchant le point de fonctionnement de la puissance maximale. On a choisir un hacheur à trois niveaux au lieu d'un convertisseur à deux niveaux car il peut offrir des avantages en termes d'ondulation de commutation, de pertes, de bande passante ou de taille des composants magnétique.

Mots clés : Energie solaire, convertisseur multi-niveaux, chaine photovoltaïque, commande MPPT

Abstract

This thesis presents a study of a multi-level converter for an MPPT command dedicated to a photovoltaic system. The first part of this work begins with the modeling and then the simulation of a photovoltaic module to see the influence of different meteorological conditions (sunshine and temperature) on it. The second part consisted in developing the MPPT (Maximum Power Point Tracking) command by looking for the operating point of the maximum power. We have chosen a three-level chopper instead of a two-level chopper because it can offer advantages in terms of switching ripples, losses, bandwidth or the size of the magnetic components.

Key word: Solar energy, multi-level converter, photovoltaic chain, MPPT control

ملخص

تقدم هذه المذكرة دراسة عن محول متعددة المستويات و MPPT مخصص لنظام كهر وضوئي. يتمثل الجزء الأول من هذا العمل بنمذجة ثم محاكاة وحدة ضوئية لرؤية تأثير ظروف الأرصاد الجوية المختلفة (أشعة الشمس ودرجة الحرارة) عليه. ويتمثل الجزء الثاني في تطوير MPPT (نقطة الطاقة القصوى) من خلال البحث عن نقطة تشغيل الطاقة القصوى. وتم اختيار محول من ثلاثة مستويات بدلا من محول من مستويين لأنه يمكن ان يقدم ميزات من حيث التموج أو الخسارة أو عرض النطاق الترددي أو حجم المكونات.

كلمات المفتاحية: طاقة شمسية، محول متعدد المستويات، سلسلة كهر وضوئية، تحكم MPPT