



الجمهورية الجزائرية
الديبلوماسية الشعبية
Republique Algerienne Democratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث
العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي
الطيب

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département du Génie Electrique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Systèmes

Par : Abdelmalek Malek et Teranti Foudhil

Sujet

COMMANDE D'UN SYSTEME SOLAIRE

Présenté et soutenu, le 23/06/2021, devant le jury composé de :

Dr. Yousfi Laatra

MCB

Présidente

Dr. Soufi Youcef

Pr

Rapporteur

Dr. Ounnas Djamel

MCB

Examineur

Promotion : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Louange à Allah le tout puissant qui m'a accordé la foi, le courage et la patience pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à remercier infiniment mon encadreur, Pr. Youcef SOUFI, pour son aide, sans réserve, sa patience et ses conseils précieux qui m'ont été très utiles.

Je remercie également les membres du jury qui m'ont honoré en acceptant de juger et d'enrichir ce travail.

Ces remerciements vont aussi à toute ma famille, et tous mes amis pour leur aide et leur soutien.

Je tiens à remercier également tous mes enseignants.

*Abdelmalek Malek
Terranti Foudhil*

Dédicace

*A mon chère et adorable père "NOUAR" en témoignage de ma
grande affection.*

*A ma chère et adorable mère "SAMIRA" en témoignage de ma
grande affection.*

A mes sœurs: pour leurs soutiens morales.

A mon frère : SAIF EDDINE

A tous les membres de ma famille.

A tous mes amis surtout :

AMINE, ZAKARIA, KARIM, AZIZ, WALID

A mon amie est aussi binôme « FOU DHIL »

Mes camarades de la promotion 2020-2021

A tous les personnes que j'aime.

Je dédiece travail.

MALEK

Dédicace

*A mon chère et adorable père "Mourad" en témoignage de ma
grande affection.*

*A ma chère et adorable mère "Naima" en témoignage de ma
grande affection.*

A mes frères : Salem, Adem pour leurs soutiens morales.

A tous les membres de ma famille.

A tous mes amis surtout : Zakaria, amine, Karim,

A mon amie est aussi binôme « MALÉK »

Mes camarades de la promotion 2020-2021.

A tous les personnes que j'aime.

Je dédiece travail.

FOUDHIL

Notations et Abréviations

I_{ph}		Courant <i>Photo</i> électrique
R_s	:	<i>R</i> ésistance <i>S</i> érie
R_p		<i>R</i> ésistance <i>P</i> arallèle
I_{0S}		Courant de saturation de la diode dans les conditions standards
I_d	:	Courant traversant la <i>d</i> iode
K_{cc}	:	Coefficient de courant de <i>court-c</i> circuit en fonction de la température
I_{cc}	:	Courant de <i>court-c</i> circuit sous les conditions standards
I_0		Courant de saturation
I_p		le courant à travers la résistance montée en parallèle
E_g	:	<i>E</i> nergie de la bande interdite
T_f	:	<i>T</i> empérature de <i>f</i> onctionnement de la cellule
T_s	:	<i>T</i> empérature standard
G_f	:	Irradiation lors du fonctionnement
G_s	:	Irradiation standard
K_b	:	Constante de Boltzmann
F	:	<i>F</i> acteur d'idéalité de la diode
F_1	:	<i>F</i> acteur d'idéalité de la première diode
F_2	:	<i>F</i> acteur d'idéalité de la deuxième diode
U_t	:	Tension thermique
q		la charge élémentaire
η	:	Rendement énergétique
P_{max}	:	la <i>p</i> uissance électrique <i>max</i> imale fournie par la cellule
P_{inc}	:	la <i>p</i> uissance <i>inc</i> idente de cellule
V_{co}	:	la tension de court-circuit
GPV	:	G énérateur P hoto V oltaïque
E	:	Irradiation solaire
PPM	:	P oint de P uissance M aximale
DC-DC	:	D irect C ourant (convertisseurs continu-continu)
I_L	:	Courant de l'inductance
V_S	:	Tension de la charge

V_i	:	Tension de source
α, D	:	Le rapport cyclique
I_c	:	Courant de capacité
V_g	:	Tension d'entrée
MPPT	:	Maximum Power Point Tracking
P_{PV}	:	Puissance de panneau PhotoVoltaire
P&O	:	Perturbation et Observation
INC IncCond	:	INC rément de COND uctance
(W)	:	Watt
(V)	:	Volt
Cte	:	Constante
CS	:	Convertisseur Statique
PLL	:	Phase Locked Loop

Liste des figures

Figure		Titre	Page
Chapitre 1			
Fig. I.1	:	Chaîne de conversion photovoltaïque	5
Fig. I.2	:	Le principe de la cellule photovoltaïque	6
Fig. I.3	:	Représentation schématique d'une cellule solaire	7
Fig. I.4	:	Moyenne annuelle de l'énergie reçue en Algérie	8
Fig. I.5	:	Système photovoltaïque raccordé au réseau	10
Fig. I.6	:	Système photovoltaïque avec stockage	11
Fig. I.7	:	Systèmes d'alimentation autonome hybride Photovoltaïque / groupe électrogène	12
Fig. I.8	:	Etage d'adaptation entre le générateur PV et une charge	13
Fig. I.9	:	Schéma électrique de raccordement classique sans photovoltaïque	14
Fig. I.10	:	Schéma électrique de raccordement photovoltaïque avec injection de la totalité de la production	14
Fig. I.11	:	Schéma électrique de raccordement photovoltaïque avec injection du surplus de la production	14
Fig. I.12	:	Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une seule Diode (cas réel)	15
Fig. I.13	:	Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une seule Diode (cas idéal)	16
Fig. I.14	:	Schéma équivalent d'une cellule PV dans le Simulink	17
Fig. I.15		Schéma d'association de module photovoltaïque	18
Fig. I.16		Caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque	19
Fig. I.17		L'influence de l'irradiation sur Caractéristique $I(V)$	20
Fig. I.18		L'influence de l'irradiation sur Caractéristique $P(V)$	20
Fig. I.19		L'influence de la température sur Caractéristique $I(V)$	21
Fig. I.20		L'influence de la température sur Caractéristique $p(V)$	21
Fig. I.21		Association de N modules solaires en série	22
Fig. I.22		Association de N modules solaires en parallèle	22
Chapitre 2			
Fig. II.1	:	Connexion directe entre un GPV et une charge	26
Fig. II.2	:	Etage d'adaptation d'un GPV-charge	27
Fig. II.3	:	Circuit électrique de base du hacheur dévolteur	28

Fig. II.4	: Caractéristique de la tension et des courants dans le transistor et l'inductance d'un convertisseur Buck.	29
Fig. II.5	: Circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur	29
Fig. II.6	: Caractéristique de la tension et des courants Buck-Boost	30
Fig. II.7	: Répartition de la caractéristique selon le fonctionnement du hacheur utilisé	30
Fig. II.8	: Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur	31
Fig. II.9	: Allure des variables dynamiques IL.	32
Fig. II.10	: Répartition de la caractéristique selon le fonctionnement du hacheur	34
Chapitre 3		
Fig. III.1	: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque contact	37
Fig. III.2	: Interface de puissance entre le GPV et la charge	38
Fig. III.3	: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal	39
Fig. III.3.a	: suite à une variation d'ensoleillement	39
Fig. III.3.b	: suite à une variation de charge.....	39
Fig. III.3.c	: suite à une variation de température	39
Fig. III.4	: Principe de la première commande MPPT numérique	41
Fig. III.5	: Principe de fonctionnement d'une commande MPPT	42
Fig. III.6	: Conséquence du changement d'éclairement la puissance d'un GPV et sur l'adaptation source-charge	43
Fig. III.7	: Caractéristique PPV (VPV) d'un panneau solaire	46
Fig. III.8	: Algorithme type de la méthode	47
Fig. III.9	: Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation	48
Fig. III.10	: Relation entre PPV et le rapport cyclique "D" du convertisseur statique.	48
Fig. III.11	: Algorithme type de la commande "Hill Climbing"	49
Fig. III.12	: Schéma de principe de la commande "Hill	50
Fig. III.13	: Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe	50
Fig. III.13.a	: $dPPV/dVPV$ sur la caractéristique de puissance	50
Fig. III.13.b	: $\Delta IPV/\Delta VPV$ sur la caractéristique de courant	50
Fig. III.14	: Fonctionnement d'une commande MPPT de type <i>IncCond</i> illustré sur une chaîne élémentaire de conversion PV	51
Fig. III.15	: Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode	52
Chapitre 4		
Fig. IV.1	: Une structure de système photovoltaïque relié au réseau	57
Fig. IV.2	: Architecture des systèmes photovoltaïques	58
Fig. IV.3	: Contrôle de la puissance active et la puissance réactive injectées au réseau	59
Fig. IV.4	: Système PV raccordé au réseau sous Simulink	61

Fig. IV.5	:	Contrôle des puissances injectées au réseau sous Simulink	62
Fig. IV.6	:	Schéma synoptique du système photovoltaïque connecté au réseau électrique considéré	62
Fig. IV.7	:	Caractéristiques électriques du Module Sanyo HIP-225HDE1	63
Fig. IV.8	:	Caractéristiques $P=f(v)$ et $I=f(v)$ du panneau photovoltaïque	64
Fig. IV.9	:	Profil d'irradiation	64
Fig. IV.10	:	Puissance délivrée par les panneaux PV	65
Fig. IV.10	:	Tension délivrée par les panneaux PV	65
Fig. IV.10	:	Rapport cyclique convertisseur Boost	66
Fig. IV.10	:	Tension V_{dc_ref} et V_{dc_mes}	66
Fig. IV.10	:	La tension V_{ab} à la sortie de l'onduleur	67
Fig. IV.10	:	Zoom de la tension V_{ab} à la sortie de l'onduleur	67
Fig. IV.10	:	Tension V_{abc} coté réseau électrique	68
Fig. IV.10	:	Zoom Tension V_{abc} coté réseau	68
Fig. IV.10	:	Courant I_{abc} coté réseau électrique	69
Fig. IV.10	:	Zoom Courant I_{abc} coté réseau électrique	69
Fig. IV.10	:	Puissance injecté au réseau électrique	70

ملخص

تُعتبر الكهرباء الشمسية من أهم الطاقات المتجددة في العصر الحديث من الناحية الطاقوية، الاقتصادية والبيئية كما تتغير مع التطورات التكنولوجية الجديدة وباستخدام تكنولوجيات مبتكرة على أنظمة تحويل الطاقة الكهربائية. ومن خصائص الألواح الشمسية أنها لا تعطي استطاعتها العظمى إلا في نقطة مُعينة ومتغيرة بتغير الظروف المناخية المحيطة بها، كالتغير شدة الضوء والحرارة. لذلك وجب استعمال نظام تعقب للاستغلال الأمثل للطاقة المنتجة. الهدف من هذا العمل هو دراسة ومحاكاة مولد كهربائي شمسي مكون من لوح شمسي ومقطع رافع للجهد الكهربائي بتقنية تعقب نقطة الاستطاعة العظمى و المنطق الضبابي الذي يسمح بالاستغلال الأمثل للطاقة الشمسية المولدة و ذلك باستخدام خوارزمية " التشويش والمراقبة" لاستخراج الطاقة القصوى في حالة تغيير الحمل والظروف الجوية.

Le système solaire photovoltaïque est aujourd'hui en pleine mutation sur de nouveaux développements technologiques, en particulier, l'intégration et l'utilisation de technologies innovantes sur les systèmes de conversion d'énergie électrique. Un générateur photovoltaïque ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV.

Ce travail présente l'étude, la modélisation et la commande d'un système photovoltaïque solaire destiné à la production de l'énergie électrique. L'analyse du fonctionnement de cette technologie, les méthodes d'extractions du point maximum, la notion du rendement et l'étude par simulation d'un système photovoltaïque composé d'un générateur photovoltaïque, un interface DC-DC pour la conversion de l'énergie produite associée à l'algorithme perturbations et observations afin d'extraire le maximum de puissance sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques ont été abordés.

The solar photovoltaic system is now undergoing major changes on new technological developments, in particular, the integration and use of innovative technologies on electrical energy conversion systems. A photovoltaic generator can only deliver maximum power for particular values of current and voltage. To overcome the efficiency problem of solar panels and achieve maximum efficiency, it is necessary to optimize the design of all parts of the PV system.

This work presents the study, the analysis of the operation of this technology, methods of extraction of the maximum point, the notion of performance and simulation study of a photovoltaic system consists of a photovoltaic generator, DC-DC energy conversion interface associated to perturb and observe algorithm to extract the maximum power in case of load and atmospheric conditions changes.

SOMMAIRE

Le Sommaire

<i>Remerciements</i>	I
<i>Dédicace</i>	II
<i>Dédicace</i>	III
<i>Notations et Abréviations</i>	IV
Liste des figures.....	V
RESUME	VI
Introduction Générale.....	1

CHAPITRE I Généralités sur les Générateurs Photovoltaïques

I.1. Introduction	4
I.2. Les sources d'énergies renouvelables	4
I.3. L'énergie solaire	5
I.3.1. L'effet photovoltaïque.....	6
I.3.2. La cellule photovoltaïque.....	7
I.3.3. Gisement solaire	7
I.4. Composition d'un système photovoltaïque	9
I.4.1. système photovoltaïque en site isolé.....	9
I.4.2. Système photovoltaïque connecté au réseau sans stockage d'énergie ...	9
I.4.3. Système photovoltaïque connecté au réseau avec stockage d'énergie.	11
I.4.4. Les systèmes photovoltaïques hybrides	11
I.5. Eléments de base d'un système photovoltaïque	12
I.5.1. Générateur photovoltaïque.....	12
I.5.2. Etage d'adaptation entre le générateur PV et une charge.....	13
I.6. Différents schémas de raccordement au réseau	13
I.7. Modélisation du générateur photovoltaïque	15
I.7.1. Modèle de la Cellule à Une diode.....	15
I.7.2. Modèle de la Cellule à Une Diode dans MATLAB.....	17
I.8. Rendement énergétique	17
I.9. Facteur de forme	17
I.10. Performances d'un générateur photovoltaïque	18

I.11. Protection du générateur photovoltaïque	19
I.12. Caractéristiques du générateur photovoltaïque.....	19
I.12.1 Caractéristique courant –tension.....	19
I.12.2. Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	20
I.13. L'association des modules PV	22
I.13.1. L'association série des modules PV	22
I.13.2. L'association parallèle des modules PV	22
I.14. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire	23
I.15 Conclusion.....	24

CHAPITRE II

Modélisation du convertisseur DC/DC

II.1. Introduction	25
II.2. Connexion directe source-charge.....	26
II.3. Etage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge....	26
II.4. Convertisseurs DC/DC.....	27
II.4.1. Hacheur dévolteur (Buck).....	28
II.4.2. Hacheur Buck-Boost.....	29
II.4.3. Le hacheur survolteur (Boost).....	30
II.5. Principe de fonctionnement	31
II.6. Dimensionnement des composants du convertisseur	33
II.7. Mécanisme d'adaptation de l'impédance.....	33
II.8. Limitation de la commande MPPT.....	35
II.9. Conclusion	36

CHAPITRE III

Techniques de recherche du point de puissance maximale (MPPT) d'un GPV

III.1. Introduction	37
III.2. Généralité sur la commande MPPT	37
III.3. Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature	40

III.4. Principe de la commande MPPT numérique	40
III.5. Evolution du point d’opération du générateur photovoltaïque	42
III.6. Différents types de commandes MPPT :.....	44
III.6.1. MPPT à implantation analogique.....	44
III.6.2. MPPT à implantation mixte logique et analogique.....	44
III.6.3. MPPT à implantation numérique.....	44
III.7. Les différents algorithmes de contrôle MPPT	45
III.7.1. Méthode de perturbation et observation (P&O)	45
III.7.2. Principe des commandes “Hill Climbing”	48
III.7.3 Principe des commandes “Incrément de conductance” (IncCond).....	50
III.8. Synthèse des commandes MPPT.....	53
III.9. Critères d’évaluation d’une commande MPPT	53
III.9.1. Simplicité et Coût	54
III.9.2. Réponse dynamique	54
III.9.3. Flexibilité.....	54
III.9.4. Compétitive sur une large gamme de puissance.....	54
III.10. Conclusion.....	55

CHAPITRE IV

Commande et Simulation du système solaire

VI.1. Introduction.....	56
VI.2. Les systèmes de conversion de puissance photovoltaïque	56
VI.3. Configurations des systèmes PV reliés au réseau.....	58
VI.4. Contrôle de la puissance active et la puissance réactive injectées au réseau	59
VI.4.1 Stratégie de contrôle.....	59
VI.5. Système photovoltaïque connecté au réseau électrique considéré	62
VI.5.1. Générateur photovoltaïque.....	63
VI.6. Résultats de simulations	64
VI.7. Interprétations des résultats	70
VI.8. Conclusion.....	72

Conclusion Générale.....	73
<i>Bibliographie.....</i>	74

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction Générale

Actuellement et face à la croissance démographique continue des populations, à la modernisation de la société, l'épuisement, l'incertain et l'instabilité des prix des énergies fossiles, la conscience environnementale, la libéralisation du marché électrique sont des préoccupations majeures pour les acteurs mondiaux pour l'intégration et le développement des énergies renouvelables qui atteint une maturité technique qui leurs permet de devenir un segment important de l'industrie de l'énergie. Ces dernières se développent à un rythme rapide dans le monde pour générer le besoin d'électricité et pour diminuer la pollution. Cependant, en raison de leur dépendance aux conditions météorologiques, les sources renouvelables imposent de nouveaux défis au système électrique.

L'utilisation des énergies renouvelables en général présente des avantages certains. Ce sont des énergies non polluantes, modulables, décentralisées et transportables. Cette utilisation doit être encouragée par des mesures appropriés et une politique énergétique des états.

L'électricité photovoltaïque présente une option technique et économique intéressante pour des sites non raccordés au réseau de distribution centralisée. Lorsque les besoins à couvrir sont faibles où l'absence d'une maintenance lourde. C'est une énergie décentralisée et peut être utilisée au moment même où elle est produite et installée dans toutes les régions ensoleillées et isolés. Elle permet de couvrir les besoins d'une habitation en électricité tels que l'éclairage, le pompage de l'eau et la production du froid.

L'électrification rurale hors réseau (décentralisée) est appliquée dans le secteur des habitations secondaires, des refuges de montagnes, et dans les régions déshéritées telle que le sud algérien où l'isolement est très accentué.

L'Algérie, de par sa situation géographique, dispose d'un important et fort potentiel en énergie doit bénéficier des conditions favorables à l'utilisation de énergies solaire d'origine photovoltaïque et l'introduction de cette nouvelle énergie pourrait être aisément envisagée sur de nombreux sites comme elle pourra s'inspirer des programmes internationaux pour une meilleur exploitation à grande échelle de l'énergie solaire surtout qu'elle a les moyens humains et financiers qui lui permet l'exploitation et l'exploration rationnelle de cette dernière. On assiste aujourd'hui à une transition énergétique au bout de laquelle se définiront les énergies du futur.

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante, une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité (solaire photovoltaïque). La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques. La technologie photovoltaïque (PV) est une solution attrayante comme

remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité. Sur ce, de nombreuses études scientifiques se sont concentrées sur la dynamique modélisation, simulation et la commande du système photovoltaïque en afin de décrire son modèle physique dynamique et de prédire l'évolution de ses sorties telles que le courant, la tension et la puissance.

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution à l'étude, la modélisation et la commande d'un système de conversion de l'énergie photovoltaïque en énergie électrique. Ce choix est justifié par l'intérêt que portent les chercheurs et les industriels à ce type de structures photovoltaïque. En effet, le développement actuel dans le domaine des matériaux magnétiques permet une meilleure utilisation des générateurs photovoltaïques. La modélisation, la simulation et la commande d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque connectée aux réseaux ont été présentés. Dans un premier temps, le modèle de chaque élément constituant la chaîne de conversion est proposée. Les différents constituants de la chaîne de conversion sont ensuite connectés entre eux afin de former le modèle complet qui est par la suite simulé dans l'environnement Matlab. Les résultats de simulation obtenus ont permis d'analyser le comportement du système de conversion d'énergie photovoltaïque considéré qui peuvent être utiles à la mise en œuvre d'un système de commande et de contrôle adéquat.

Dans cette étude, le modèle du système photovoltaïque, qui prend en compte la dynamique électrique du générateur en vue de sa commande est abordé. Le logiciel Matlab/Simulink est utilisé pour la simulation du modèle du système considéré. Les simulations apportées sur le système de conversion considéré associée au convertisseur électroniques de puissance et d'adaptation de puissance ont été analysés en fonction des performances lors de diverses entrées de l'irradiation. Par conséquent, les résultats de la simulation du modèle mathématique du système complet est réalisé dans ce mémoire et les résultats de simulation obtenus montrent la validité et l'efficacité du système proposé.

Pour ce faire et pour l'établissement de cette étude, outre une introduction générale et une conclusion générale, le contenu de ce mémoire est réparti en quatre chapitres :

Le premier chapitre décrit d'une manière générale les différents éléments de base d'un système photovoltaïque tout en présentant le principe de l'effet photovoltaïque, le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque et le modèle mathématique décrivant respectivement les caractéristiques courant-tension $I=f(V)$ et la puissance du générateur photovoltaïque en fonction de la variation de l'irradiation et la température) en cherchant le point maximum de puissance avec de différentes techniques dans le chapitre suivant.

Le second chapitre décrit les différents types des convertisseurs continu-continu utilisés dans les chaînes de conversions photovoltaïques, en donnant leur principe de fonctionnement. Ensuite, Une étude détaillée du convertisseur DC-DC utilisé comme moyenne d'interface et d'adaptation de puissance entre le générateur photovoltaïque et la charge correspondant au point de fonctionnement optimal a été présenté.

Le troisième chapitre est réservé à l'étude des différentes techniques de recherche du point de puissance maximale pour des différents profils de variations d'éclairement et sous différentes conditions de fonctionnement.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats issus de la simulation du système solaire photovoltaïque considéré sous différentes conditions de fonctionnement et de variations des conditions météorologiques : d'éclairement et de température. Les résultats issus de la simulation de ce chapitre ont été présentés, analysés et discutés à la fin de ce chapitre et nous terminons ce travail par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I

Généralités sur les Générateurs Photovoltaïques

I.1. Introduction

Actuellement et face à l'épuisement, l'instabilité à plus ou moins long terme des prix des énergies fossiles, la conscience environnementale et la libéralisation du marché électrique, différentes solutions de substitution ont été envisagées par les acteurs mondiaux pour l'intégration et le développement des énergies renouvelables qui atteint une maturité technique qui leurs permet de devenir un segment important de l'industrie de l'énergie dont l'ultime objectif est de s'affranchir de la dépendance vis-à-vis des sources conventionnelles d'énergies. Récemment, cette tendance a été accrue, d'autant plus, par des considérations d'ordre écologique. En effet, la consommation élevée des sources énergétiques fossiles traditionnelles cause de sérieux dommages environnementaux. Aussi, tous les pays sont appelés aujourd'hui à contribuer à l'effort international de lutte contre les changements climatiques.

Dans ce chapitre nous allons décrire d'une manière générale les différents éléments de base d'un système photovoltaïque tout en présentant le principe de l'effet photovoltaïque, le schéma équivalant de la cellule photovoltaïque et le modèle mathématique décrivant respectivement les caractéristiques courant-tension $I=f(V)$ et la puissance du générateur photovoltaïque en fonction de la variation de l'irradiation et la température) en cherchant le point maximum de puissance avec de différentes techniques dans le chapitre suivant.

I.2. Les sources d'énergies renouvelables

Il s'agit de sources qui se renouvellent et ne s'épuiseront donc jamais à l'échelle du temps humain. Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le soleil mais aussi la lune et la terre. Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : d'origine mécanique (éolien), d'origine photovoltaïque (modules photovoltaïques) ou d'origine thermique (géothermie, solaire thermique, ...). En particulier, l'énergie solaire peut être convertie en énergie électrique. Cette dernière forme de conversion s'est considérablement développée dans le monde, aussi bien à travers des applications domestiques ou bien industrielles en connexion avec le réseau de puissance électrique.

I.3. L'énergie solaire

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus encourageante, gratuite et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque est le résultat d'une transformation directe de la lumière du soleil en électricité au moyen des cellules PV. Elles sont essentiellement constituées d'une jonction PN.

Le rayonnement solaire est répartie sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Le principe de la conversion photovoltaïque en énergie électrique est donné par la figure suivante.

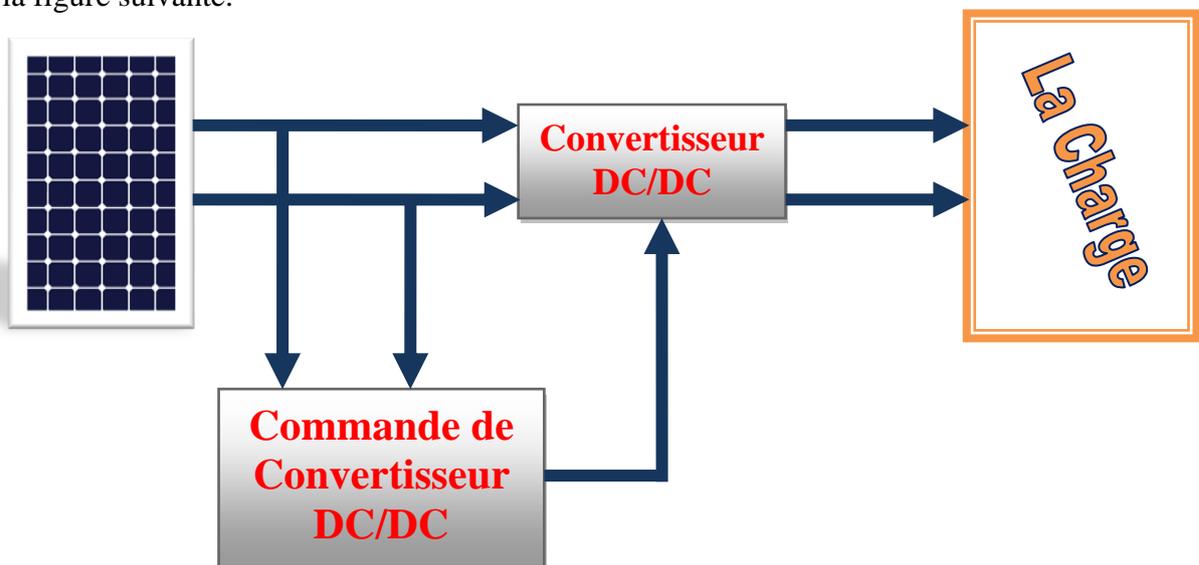


Fig I.1. Chaîne de conversion photovoltaïque

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante, une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité (solaire photovoltaïque). La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an.

Les cellules peuvent être groupées pour former des modules. Les modules peuvent être regroupés pour former des champs photovoltaïques. Le terme module est habituellement utilisé pour décrire un système photovoltaïque (avec plusieurs cellules connectées en série et / ou parallèle).

I.3.1. L'effet photovoltaïque

L'origine du mot « photovoltaïque » vient du grec « volta » qui signifie la lumière, l'énergie photovoltaïque est extraordinairement abondante dans le monde, la terre chaque année recevoir 10 000 fois la consommation mondiale actuelle d'énergie primaire parvenir de l'irradiation du soleil.

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé aux photons de la lumière, produit de l'électricité. Cet effet photovoltaïque fut découvert en 1839 par le physicien français Antoine Becquerel. Il faut attendre les années 1960 et les satellites spatiaux pour que les cellules trouvent de réelles applications. Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons . Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire. Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium , ils arrachent des électrons à ses atomes . Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.

L'effet photovoltaïque dans les cellules solaires avec La conversion directe de l'énergie lumineuse des rayons solaire en électricité dans un matériau semi-conducteur constitué des charges positives et négatives sous l'effet de la lumière. Un champ électrique est créé entre elles qu'il tend repousser les trous vers la zone p et les électrons dans la zone n. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue (figure I.2). Les cellules peuvent être groupées pour former des modules. Les modules peuvent être regroupés pour former des champs photovoltaïques. Le terme module est habituellement utilisé pour décrire un système photovoltaïque (avec plusieurs cellules connectées en série et / ou parallèle) [1].

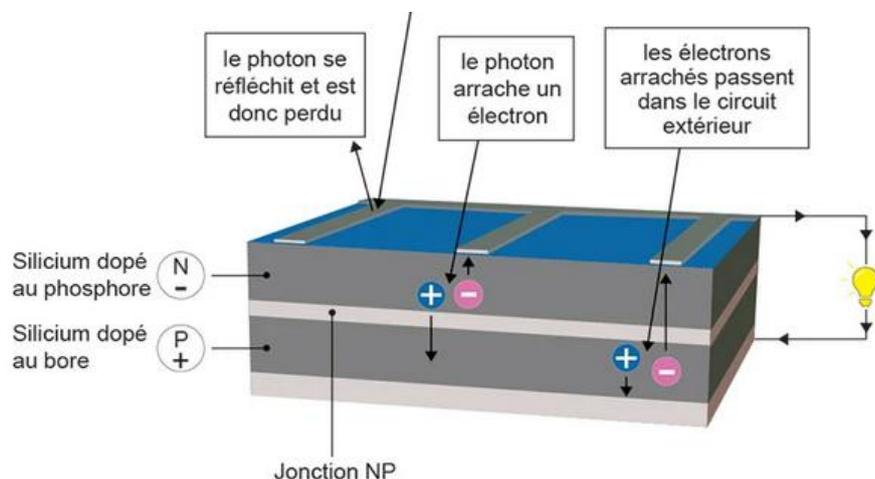


Fig. I.2. Le principe de la cellule photovoltaïque

I.3.2. La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un élément électronique qui, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque, exposé à des photons (la lumière). La tension obtenue est fonction de la lumière incidente. La tension délivrée par la cellule est continue. Les cellules photovoltaïques qui constituées de semi-conducteurs sont les plus répandues, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : sélénure de cuivre et d'indium ($\text{CuIn}(\text{Se})_2$ ou $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$), tellure de cadmium (CdTe), etc. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre. Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée (Figure (I.3)) [2].

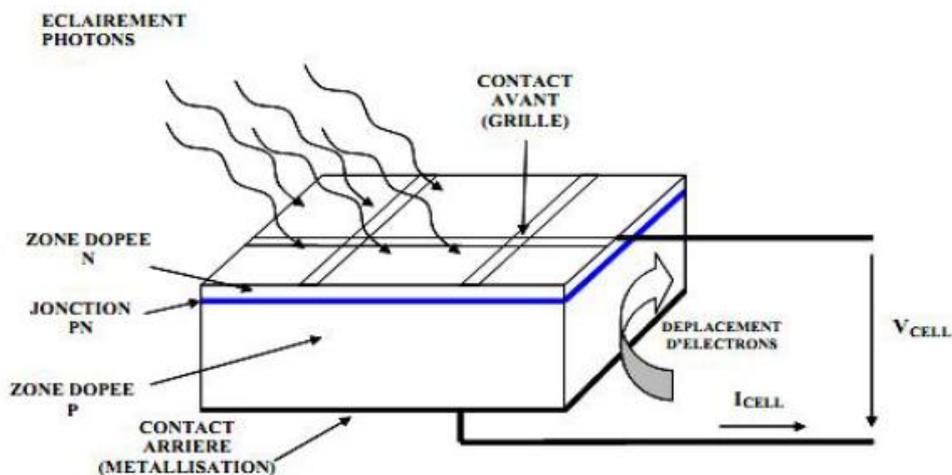


Fig. I.3. Représentation schématique d'une cellule solaire

I.3.3. Gisement solaire

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour déterminer l'énergie reçue par un système énergétique solaire et aide au dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes à satisfaire. La connaissance du gisement solaire d'une région est plus ou moins précise selon les critères suivants :

- La densité des stations pour lesquelles on a des données.
- Le nombre d'années de mesures disponibles.
- Le pas de temps des données (mois, jour, heure).
- La nature des données : durée d'ensoleillement, composante directe et le globale du rayonnement solaire, etc.....

A cet effet, concernant la mesure du rayonnement solaire en Algérie, le réseau de mesures est peu dense relativement à la superficie du territoire. En effet, seules sept stations

météorologiques sur la soixantaine que compte le réseau de l'office national de la météorologie assurent la mesure des composantes diffuse et globale du rayonnement solaire reçu sur le plan horizontal.

Pour pallier aux insuffisances des réseaux de mesures, des modèles sont proposés, ils sont basés essentiellement sur l'utilisation des données météorologiques en particulier la durée d'insolation.

Les différentes irradiances solaires utilisées par les concepteurs de systèmes solaires, sont :

- L'irradiation directe à incidence normale.
- Les irradiances de base, la composante diffuse et la composante globale mesurées sur plan horizontal.
- L'irradiation solaire globale reçue sur des plans verticaux orientés Est, Ouest et Sud.
- L'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu et orienté Sud.

La distribution de l'énergie reçue en Algérie, en moyenne annuelle, est donnée par la figure I.4 ci-dessous. Elle présente les différents niveaux énergétiques qui donnent ainsi un découpage du pays en régions iso énergétiques.

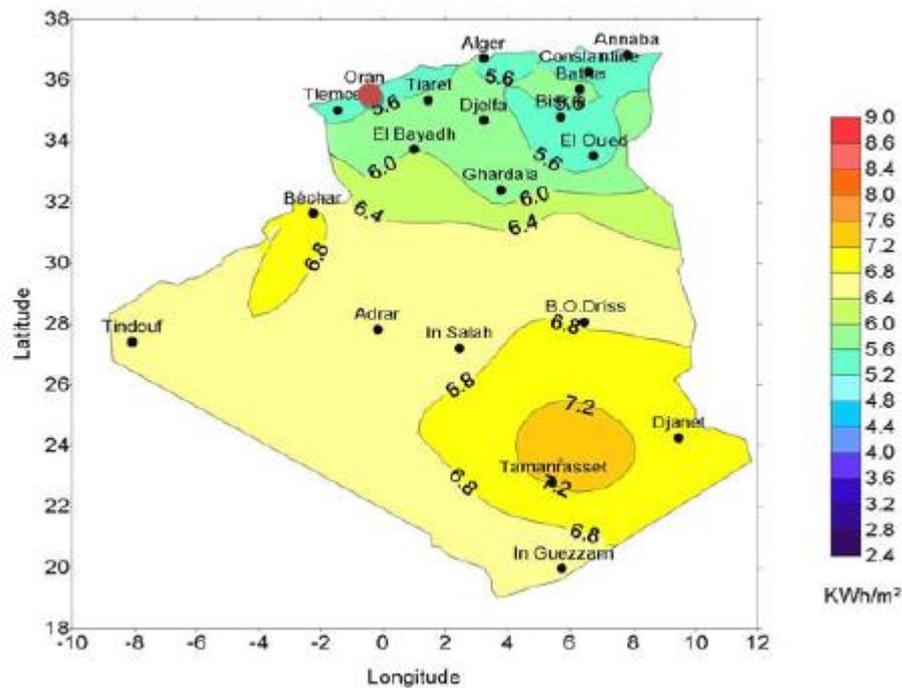


Fig.I .4 . Moyenne annuelle de l'énergie reçue en Algérie [3]

I.4. Composition d'un système photovoltaïque

Les principaux composants d'un système photovoltaïque dépendent du type d'application

I.4.1. système photovoltaïque en site isolé

- Les principaux composants en site isolé sont :
 - Panneaux photovoltaïques (+ structure de support)
 - Chargeur/régulateur DC/DC
 - Système de stockage (batteries, condensateurs, ...)
 - Eventuellement un onduleur si la consommation est alimentée en courant alternatif.
 - Eventuellement un groupe électrogène en appoint
 - Facultatif : système de monitoring/supervision pour enregistrer les données et éventuellement y accéder à distance ou via un portail web
- Pour les systèmes électriques isolés, autonomes ou non raccordés au réseau électrique, le photovoltaïque est une source d'énergie particulièrement adaptée et rentable. De nombreux relais de communication, balises en mer, sont équipés de générateurs photovoltaïques fournissent une énergie fiable et constante nécessitant peu de maintenance. Les systèmes photovoltaïques dits isolés ou embarqués sont également utilisés pour les applications portables : montres, lampes-torches, chargeur basse-tension...

L'énergie solaire captée par les panneaux est soit utilisée, soit stockée dans des batteries et utilisable ultérieurement. Le régulateur veille à la charge des batteries dans des conditions optimales afin de garantir une durée de vie plus élevée à celles-ci. Le convertisseur et l'onduleur transforme l'énergie en 12V DC, 230V AC, 24V DC.... Il suffit donc de protéger l'installation par disjoncteurs, différentiel et l'énergie accumulée est utilisable par tous les appareils courants. Il est nécessaire de maîtriser sa consommation électrique afin de ne pas épuiser trop rapidement les réserves.

I.4.2. Système photovoltaïque connecté au réseau sans stockage d'énergie

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local ou national. Et ceci sans limite quantitative, donc toute l'énergie est récupérée. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif au travers d'un onduleur, et celui-ci doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant, car il doit respecter des normes sur sa qualité « sinusoïdale ». Ces systèmes ne sont pas des alimentations de secours en cas de coupure du réseau, car ils ne comportent aucune réserve d'énergie

(figure I.5). Dans certains cas, on ajoute au système une batterie de secours pour les coupures de courte durée.

Les principaux composants d'un système photovoltaïque connecté au réseau sont :

- Panneaux photovoltaïques (+ structure de support)
- Coffret de coupure et de protection courant continu DC
- Onduleurs
- Coffret de coupure et de protection courant alternatif AC
- Facultatif : système de monitoring/supervision pour enregistrer les données et éventuellement y accéder à distance ou via un portail web

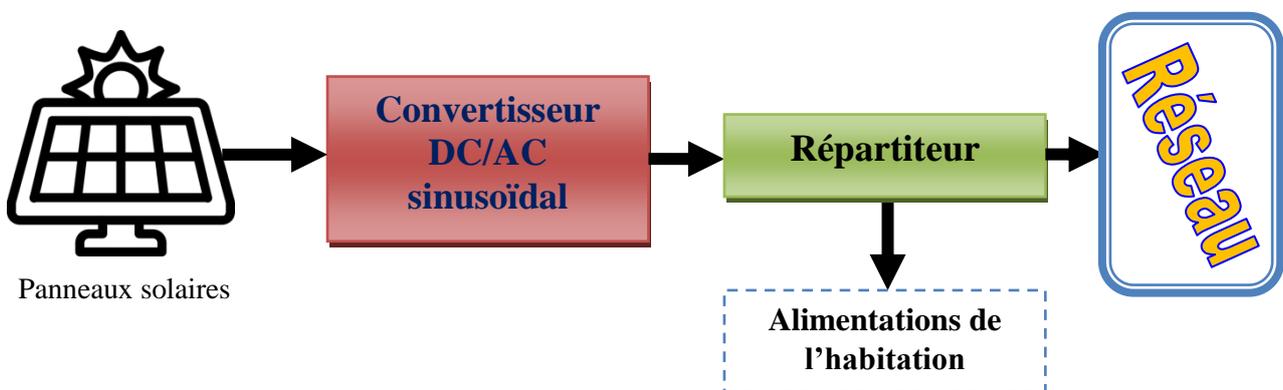


Fig. I. 5. Système photovoltaïque raccordé au réseau

Par rapport à un système autonome, le système photovoltaïque raccordé au réseau offre les avantages suivants :

- Exploitation de la totalité de l'énergie photovoltaïque issue des panneaux (le stockage est « infini ») ;
- Economie de l'ordre de 40% sur les investissements (les batteries en moins) ;
- Maintenance quasi inexistante (ce sont les batteries qui demandent le plus d'attention) ;
- Meilleure durée de vie du système.

Cette solution est plus rentable que l'alimentation photovoltaïque purement indépendante, mais malheureusement encore très onéreuse en comparaison d'une alimentation électrique à 100% réseau. Cependant, grâce à des mesures incitatives, énormément d'installations ont été mises en place ces dernières années.

I.4.3. Système photovoltaïque connecté au réseau avec stockage d'énergie

La configuration d'un système photovoltaïque connecté au réseau avec stockage d'énergie est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes que les anglophones appellent Stand-Alone Systems (figure I. 6). L'ensemble est le plus souvent en courant continu (*DC*). La batterie d'un tel système se charge le jour, et sert de « réservoir » d'énergie en permanence. Elle peut sans problème, à un instant donné, recevoir un courant de charge et débité un courant de décharge de valeur différente. Les appareils alimentés sont donc câblés sur la batterie au travers du régulateur de charge. Lorsque la batterie est pleine, ce dernier, coupe la charge pour éviter qu'elle ne souffre de surcharge, ceci a pour conséquence la perte d'une part de l'énergie produite en été notamment sous nos climats.

Quand un récepteur doit nécessairement fonctionner en courant alternatif. On recourt à une conversion *DC/AC* (de courant continu en alternatif) en sortie de batterie ce qui conduit à des conséquences, notamment :

- Augmentation du coût et de l'encombrement de l'installation ;
- Réduction du rendement énergétique (aucun convertisseur ne restitue 100% de l'énergie) ;
- Risque de panne complète en cas de problème sur le convertisseur si toute l'installation électrique est alimentée par son intermédiaire.

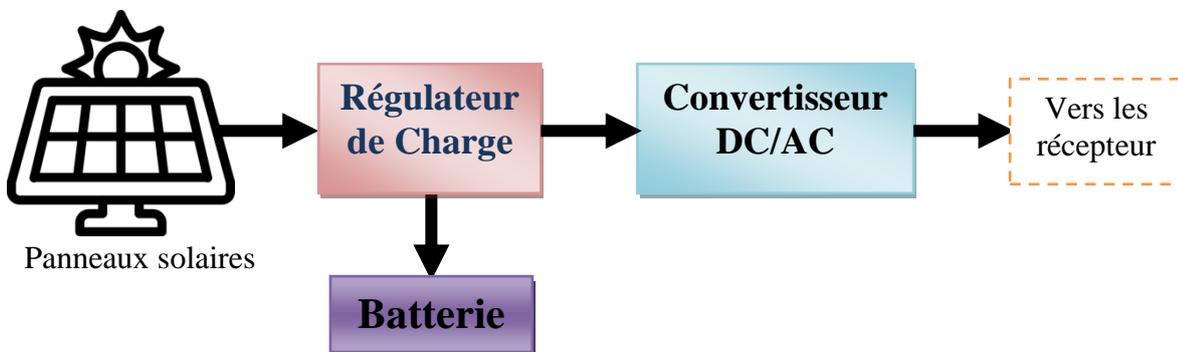


Fig I. 6. Système photovoltaïque avec stockage

I.4.4. Les systèmes photovoltaïques hybrides

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène, système hydroélectrique... 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 (gasoil, gaz...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours.

Aujourd'hui des systèmes à grande échelle intègrent une gestion fine des systèmes photovoltaïques, on parle souvent de "smart-grid" c'est à dire des réseaux au sein desquels une régulation intelligente et coordonnée assure l'optimisation des différentes sources d'énergie.

I.4.4.1. Les systèmes photovoltaïques autonomes hybrides

Une des limites d'un système autonome purement photovoltaïque, comme on vient de le décrire, est qu'il fournit une puissance donnée, variable selon la saison, mais que l'on ne peut pas dépasser, au risque de détruire la batterie par décharge profonde. Or, les consommateurs que nous sommes ne sont pas des machines et ont des besoins qui évoluent, et pas forcément en phase avec les saisons.

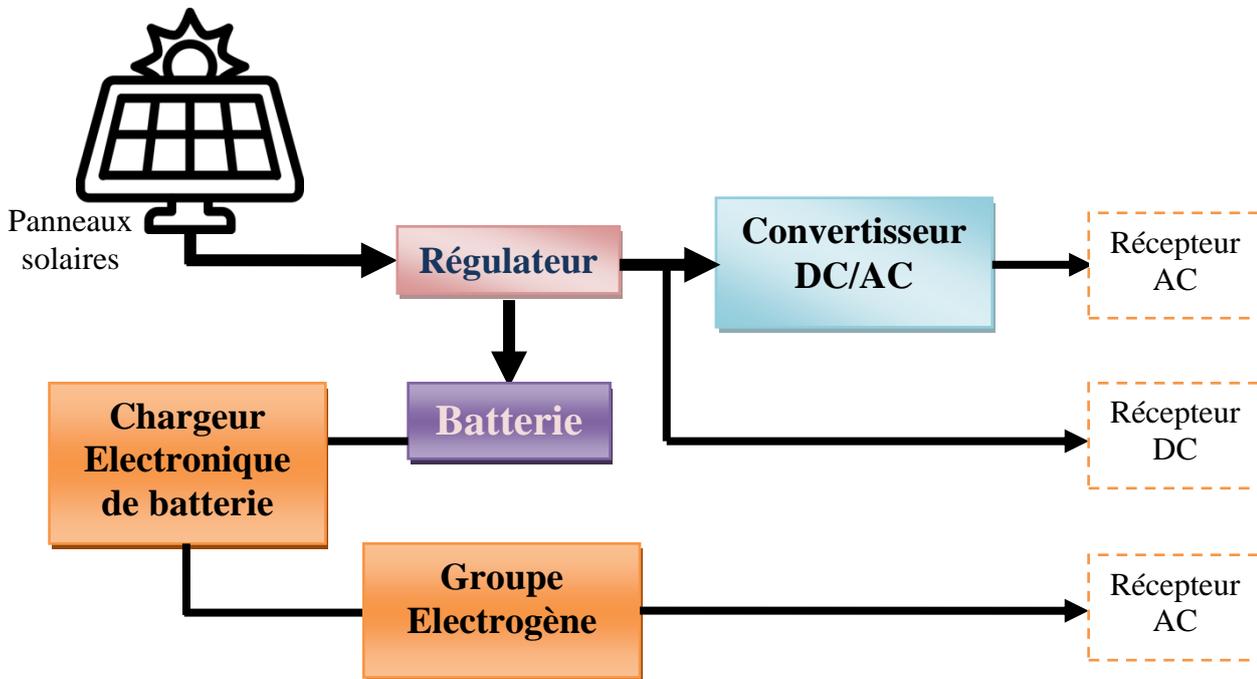


Fig I. 7. Systèmes d'alimentation autonome hybride Photovoltaïque / groupe

I.5. Eléments de base d'un système photovoltaïque

I.5.1. Générateur photovoltaïque

La cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. Cette dernière est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), génère une tension électrique (volt) (appelé l'effet photovoltaïque). Le courant obtenu est un courant continu et la tension obtenue est de l'ordre de 0,5 V. Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de sulfure de cadmium (CdS) ou de tellure de cadmium (CdTe).

Elles se présentent sous la forme de deux fines plaques en contact étroit. Ce semi-conducteur est pris en sandwich entre deux électrodes métalliques et le tout est protégé par une plaque de verre.

I.5.2. Etage d'adaptation entre le générateur PV et une charge

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques $i=f(v)$ non linéaire avec des points de maximum de puissance (PPM). Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon caractéristiques de la charge sur laquelle le générateur photovoltaïque débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes de générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge décrit par la figure I.8. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert de maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche de la puissance maximale disponible.



Fig I. 8. Etage d'adaptation entre le générateur PV et une charge.

I.6. Différents schémas de raccordement au réseau

Il existe deux types de raccordements au réseau :

- Connexion avec injection de la totalité de la production photovoltaïque
- Connexion avec injection du "surplus" de la production photovoltaïque

Il existe aussi les systèmes connectés au réseau "sécurisés" équipés d'un système de stockage (batterie d'accumulateurs) auquel est connecté l'onduleur qui peut alimenter directement le circuit en aval du compteur électrique de la maison ou du bâtiment concerné.

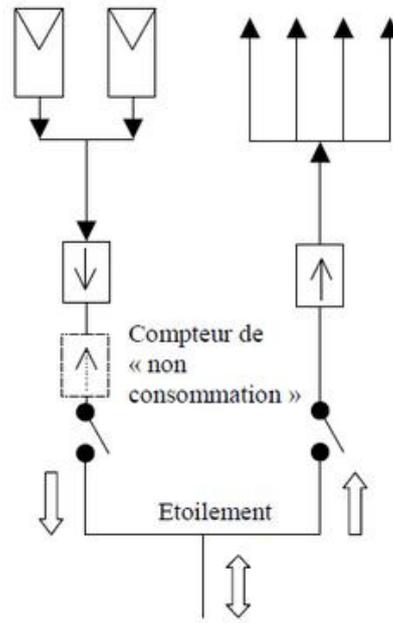
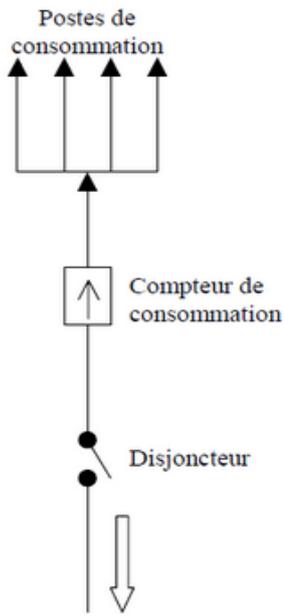


Fig I. 9. Schéma électrique de raccordement classique sans photovoltaïque

Fig I. 10. Schéma électrique de raccordement photovoltaïque Avec injection de la totalité de la production

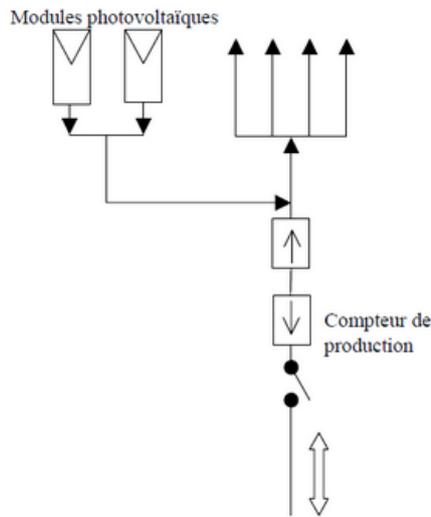


Fig I. 11. Schéma électrique de raccordement photovoltaïque avec injection du surplus de la production

I.7. Modélisation du générateur photovoltaïque

I.7.1. Modèle de la Cellule à Une diode

- Cas Réel : Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle est illustré par la figure I.12.

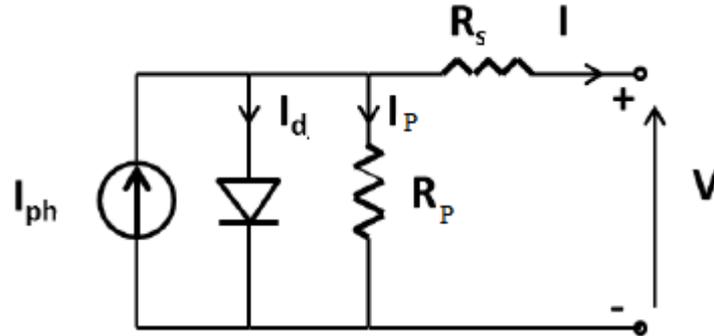


Fig I. 12.Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une seule Diode (cas réel)

Il est principalement constitué d'une source de courant photoélectrique (I_{ph}), une diode (D), une résistance parallèle (R_p) et une résistance série (R_s).

A partir du schéma et en appliquant la loi de Kirchoff le courant produit par la cellule sera donné par la relation suivante:

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

Où :

$$I_{ph} = I_{cc} - k_{cc}(T_f - T_s) \frac{Gf}{G_s} \quad (\text{I.2})$$

Le courant de court-circuit correspond aux conditions de la température et l'irradiation standards: $T=25^\circ\text{C}$ et $G=1000\text{w/m}^2$. Les autres paramètres sont définis dans la nomenclature.

Le courant (I_d) qui traverse la diode est exprimé par la relation suivante [10] :

$$I_d = I_0 \left[\text{Exp} \left(\frac{q(U_{pv} + R_s I_{pv})}{F K_B T_f} \right) - 1 \right] \quad (\text{I.3})$$

Où :

q : est la charge élémentaire égale à $1.602 \cdot 10^{-19}$ Colomb, $K_B = 1.38 \cdot 10^{-23}\text{j/K}$ est la constante Boltzmann, le courant de saturation (I_0) de la diode dépend de la température de fonctionnement selon l'équation ci-dessus :

$$I_0(T_f) = I_{0s} \left(\frac{T_f}{T_s} \right)^3 \text{Exp} \left(\frac{T_f T_s E_g}{T_f U_f} \right) \quad (\text{I.4})$$

Où :

I_{0s} représente le courant de saturation de la diode dans les conditions standards.

La tension thermique (U_t) et le courant à travers la résistance montée en parallèle (I_p) sont définis, respectivement, par les expressions ((I.5) et (I.6).

$$U_t = \frac{FKT_f}{q} \quad (\text{I.5})$$

$$I_p = \frac{U_{pv} - R_s I_{pv}}{R_p} \quad (\text{I.6})$$

➤ *Cas Idéal:* Le cas idéal est obtenu en considérant que la résistance série est négligeable ($R_s \approx 0$) soit les pertes nulles et que la résistance parallèle est infiniment grande ($R_p = \infty$). En tenant compte de ces considérations la Fig. 2 illustre le modèle idéal d'une cellule PV à une diode.

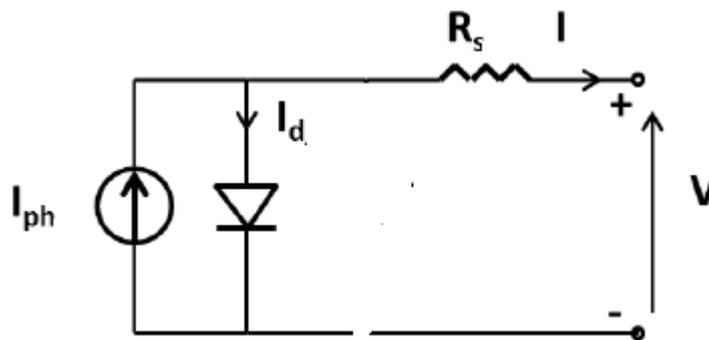


Fig I.13. Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une seule Diode (cas idéal)

En appliquant la loi de Kirchhoff, on obtient:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{I.7})$$

Où, I_{ph} est identique à celle de cas du modèle réel et I_d est exprimé, ainsi:

$$I_d = I_0 \left[\text{Exp} \left(\frac{q U_{pv}}{FK_b T_f} \right) - 1 \right] \quad (\text{I.8})$$

La même relation de la tension thermique (U_t) et la variation du courant de saturation de la diode en fonction de la température ambiante ($I_0(T_f)$), restent identiques au cas précédent [3].

I.7.2. Modèle de la Cellule à Une Diode dans MATLAB

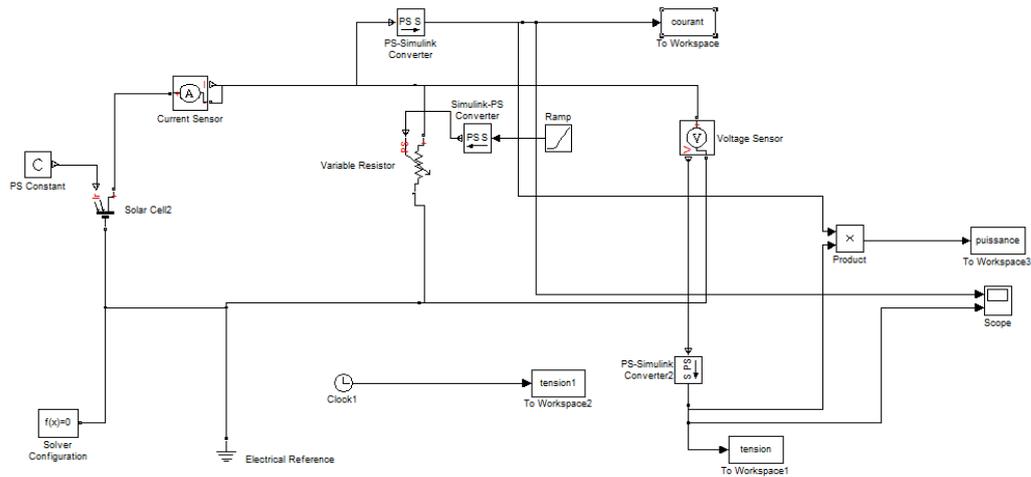


Fig I.14. Schéma équivalent d'une cellule PV dans le Simulink

I.8. Rendement énergétique

Pour calculer le rendement d'une cellule photovoltaïque nous avons besoin de la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance incidente de cellule et le rendement c'est le rapport entre eux, tel que :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} \times V_{op}}{P_{inc}} \tag{I.9}$$

$$P_{max} : I_{op} \times U_{opt} \tag{I.10}$$

P_{inc} : c'est le produit de l'éclairement et la surface des photopiles (il nous donne la quantité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique).

I.9. Facteur de forme

On appelle facteur de forme « FF » ou facteur de remplissage (fill factor), le FF calculé par le rapport entre la puissance maximale d'une cellule et le produit entre le courant de court-circuit I_{cc} par la tension de court-circuit V_{co} (la puissance d'une cellule idéale). Ce facteur indique la qualité de cellule, il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes, et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_{set} R_{sh} . Il est défini par :

$$FF = P_{max} / I_{cc} \times V_{co} = I_{op} \times V_{op} / I_{cc} \times V_{co} \tag{I.11}$$

I.10. Performances d'un générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est composé particulièrement de [4] :

- ✚ **Les cellules solaires** : Une cellule solaire photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur), capable de convertir directement la lumière en électricité. Cet effet est appelé l'effet photovoltaïque. Le courant obtenu est un courant continu et la valeur de la tension obtenue est de l'ordre de 0,5 V
- ✚ **Les modules (ou panneaux)** : La cellule individuelle, unité de base d'un system photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, on va assemblez les cellules pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité.
- ✚ **Le générateur photovoltaïque** : L'interconnexion des modules entre eux, en série ou en parallèle, pour obtenir une puissance plus grande, définit la notion de générateur photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

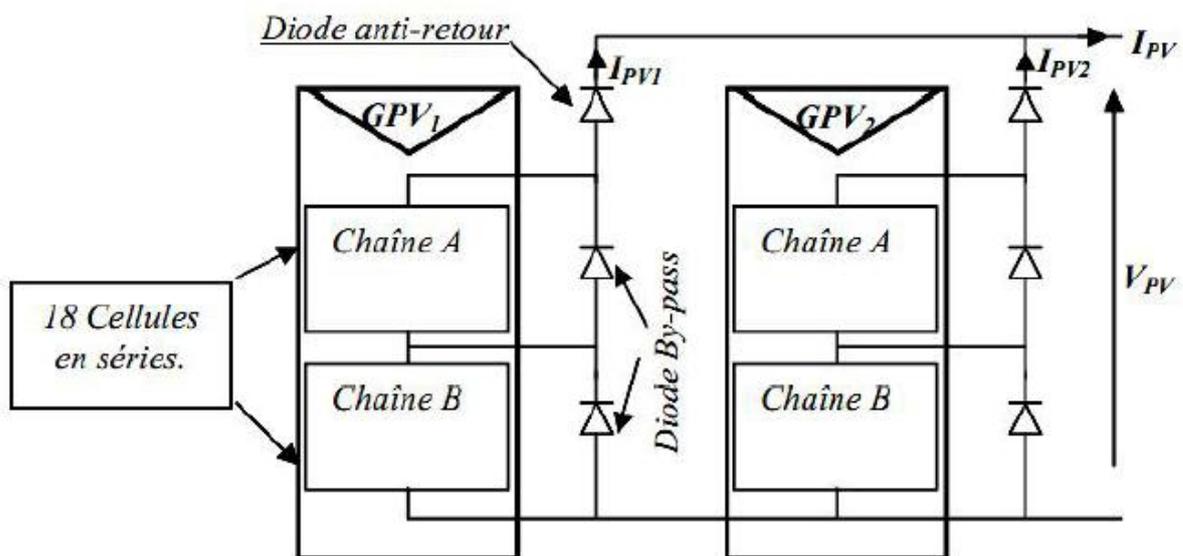


Fig I. 15. : Schéma d'association de module photovoltaïque

I.11. Protection du générateur photovoltaïque

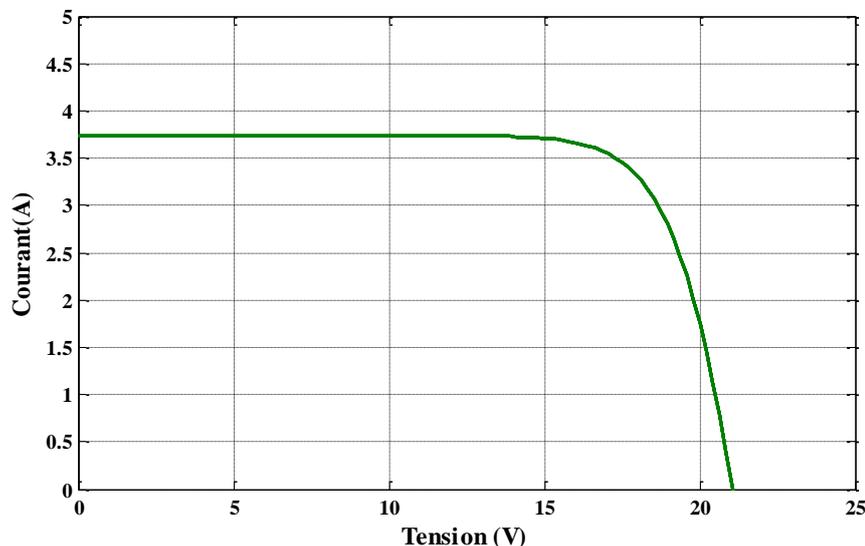
La protection de l'installation photovoltaïque doit être assurée afin d'augmenter sa durée de vie en évitant particulièrement les pannes destructives qu'ils sont liées à l'association des cellules et leur fonctionnement. Pour cela il y a deux type de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [5] :

- La protection en cas de connexions en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (Diode anti-retour).
- La protection en cas de connexions en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (Diode by-pass).

I.12. Caractéristiques du générateur photovoltaïque

I.12.1 Caractéristique courant –tension

On utilise notre modèle de cellule dans des conditions standards lequel : irradiation solaire $E = 1000 \text{ w/m}^2$ et température ambiante $T = 25^\circ \text{ C}$ et on obtient les caractéristiques courant-tension dans la figure (I.16), On constate que la caractéristique de la cellule se comporte comme une source de courant constant dans la partie horizontale et comme un générateur de tension constant dans la partie verticale, on note aussi qu'il existe toujours un point de puissance maximale.



FigI.16. Caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque

I.12.2. Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

I.12.2.1 Influence de l'éclairement :

La figure I.17 montre la variation de la courbe $I=f(V)$ avec une température fixe ($T=25^{\circ}\text{C}$) on remarque que le courant subit une variation importante au contraire la tension varie légèrement, on constate que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement (l'éclairement influe sur le courant et un peu sur la tension)

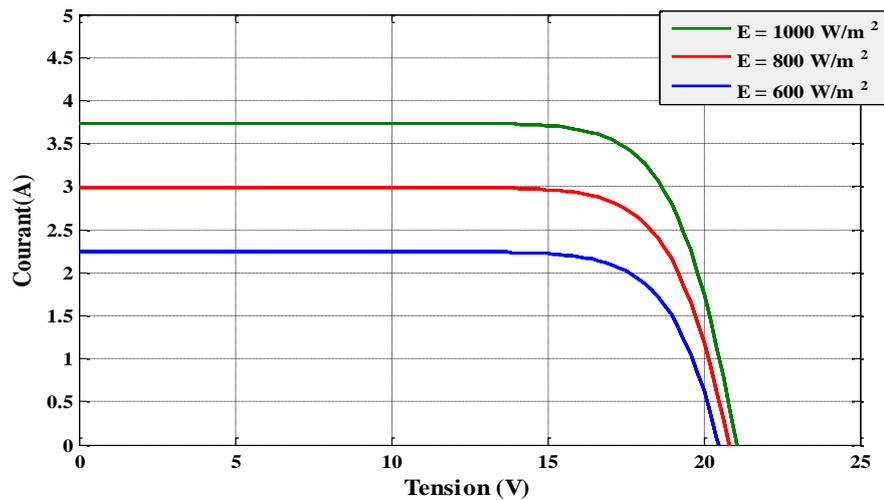
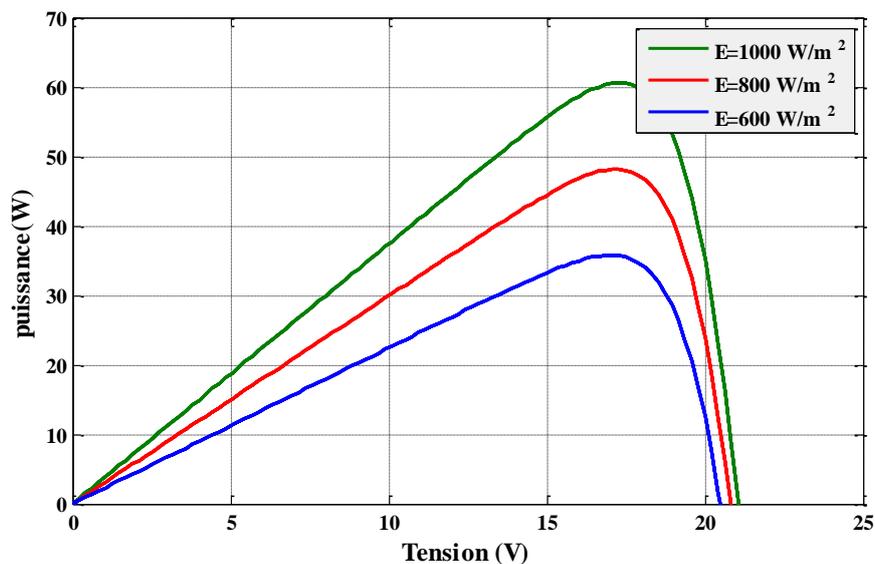


Fig.I.17.L'influence de l'irradiation sur Caractéristique $I(V)$

La figure I.18 illustre la variation de la puissance générée par la cellule en fonction de la tension avec différents valeurs de l'éclairement.



FigI.18.L'influence de l'irradiation sur Caractéristique $P(V)$

I.12.2.2. Influence de température

La figure I.19 représente l'influence de température sur les caractéristiques $I(V)$, le changement de la température de la cellule influe légèrement sur la tension de circuit ouvert.

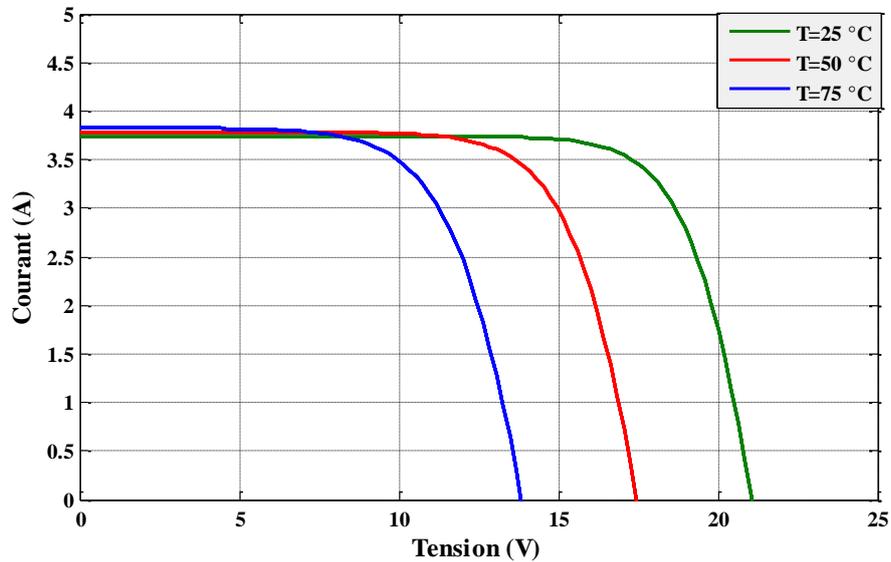
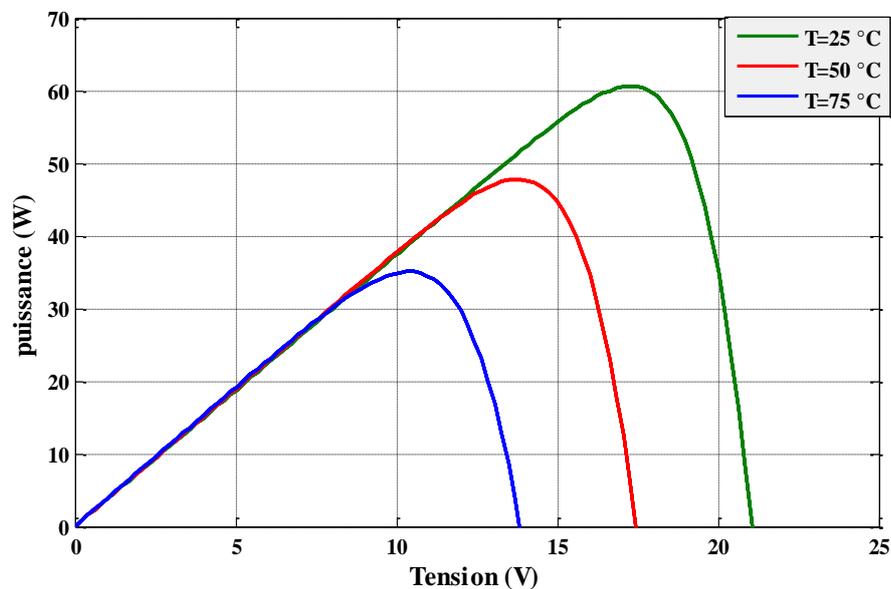


Fig I.19. L'influence de la température sur Caractéristique $I(V)$

La figure I.20 illustre l'influence de le changement de la température sur la puissance délivrée par la cellule.



FigI.20. l'influence de la température sur Caractéristique $p(V)$

I.13. L'association des modules PV

I.13.1. L'association série des modules PV

Le montage en série des panneaux photovoltaïques est assurément le type de montage le plus utilisé, surtout lorsqu'on souhaite produire de l'électricité en 230 volts. Pour réaliser ce montage, il suffit de brancher les panneaux les uns à la suite des autres, c'est à dire la sortie de l'un sur l'entrée de l'autre (autrement dit : le câble « + » d'un panneau sera à brancher sur le câble « - » du panneau suivant, et ainsi de suite), figure (I.21) [6]:

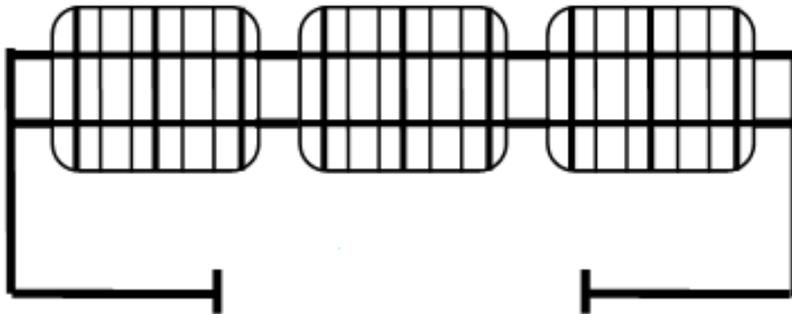


Fig I. 21. Association de N modules solaires en série

Le premier avantage de ce montage est de pouvoir rester en basse tension. En effet, lorsque tous les modules photovoltaïques sont branchés en parallèle, la tension résultante de cet ensemble de panneau est égale à la tension d'un seul panneau. Par contre, le courant total est quant à lui égal à la somme des courants fournis par chacun des panneaux.

I.13.2. L'association parallèle des modules PV

Un autre type de montage très utilisé est le montage parallèle. Dans ce cas, toutes les bornes « + » des panneaux solaires sont reliées entre eux ainsi que les bornes « - » figure I.22

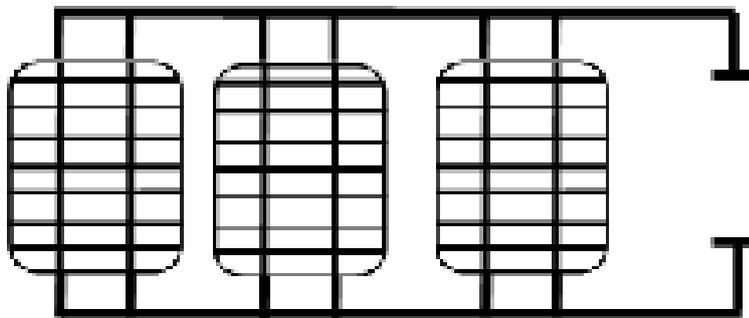


Fig. I.22. Association de N modules solaires en parallèle

Le premier avantage de ce montage est de pouvoir rester en basse tension. En effet, lorsque tous les modules photovoltaïques sont branchés en parallèle, la tension résultante de cet ensemble de panneau est égale à la tension d'un seul panneau. Par contre, le courant total est quant à lui égal à la somme des courants fournis par chacun des panneaux [6].

I.14. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

Inconvénients :

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients...

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

I.15 Conclusion

Dans ce chapitre les différents éléments de base d'un système photovoltaïque, le principe de l'effet photovoltaïque, le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque et le modèle mathématique décrivant respectivement les caractéristiques courant-tension $I=f(V)$ et la puissance du générateur photovoltaïque en fonction de la variation de l'irradiation et la température). Les simulations obtenues issues du modèle de la cellule considérée avec les caractéristiques électriques ont été présentées et analysés. Les techniques de maximisation de la puissance seront abordées dans le prochain

CHAPITRE II

Modélisation du convertisseur DC/DC

II.1. Introduction

La connexion entre un générateur photovoltaïque (GPV) et une charge de type continu reste encore un sujet d'étude. L'adaptation d'impédance entre un générateur PV et une charge de type continu est un problème technologique que signifie essentiellement le transfert du maximum de puissance du générateur PV à la charge. La littérature propose une grande quantité de solutions sur l'algorithme de contrôle effectuant une recherche de PPM lorsque le GPV et la charge sont connectés à travers un convertisseur statique.

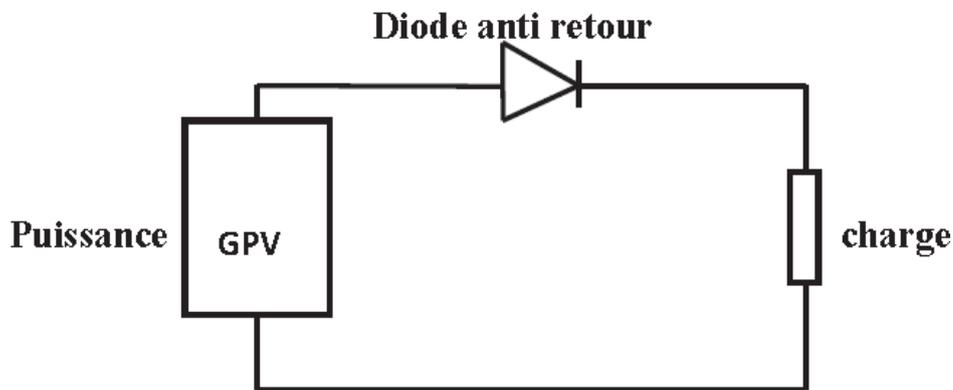
La caractéristique I-V du GPV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, son point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, nous introduisons un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour coupler les deux éléments le plus parfaitement possible.

Le problème du couplage parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue n'est pas encore réellement résolu. Un des verrous technologiques qui existe dans ce type de couplage est le problème du transfert de la puissance maximale du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge qui souffre souvent d'une mauvaise adaptation. Le point de fonctionnement qui en découle est alors parfois très éloigné du point de puissance maximale (PPM). La littérature propose une grande quantité de solutions sur l'algorithme de contrôle qui effectue une recherche de point de puissance maximale lorsque le GPV est couplé à une charge à travers un convertisseur statique.

Ce chapitre décrit les différents types des convertisseurs continu-continu utilisés dans les chaînes de conversions photovoltaïques avec leurs principes de fonctionnement. Ensuite, Une étude détaillée du convertisseur *DC-DC* utilisé comme moyenne d'interface et d'adaptation de puissance entre le générateur photovoltaïque et la charge correspondant au point de fonctionnement optimal a été présenté.

II.2. Connexion directe source-charge

La figure II.1 présente la connexion directe entre un générateur photovoltaïque et une charge. Ce choix est justifié par l'absence d'électronique de puissance, la simplicité de l'opération et le très faible degré de fiabilité. On considère que la charge était une batterie, le module pourrait fonctionner comme un récepteur lorsqu'il n'est pas éclairé, donc la batterie pourrait se décharger sur le générateur photovoltaïque et en plus l'endommager irrémédiablement. On va éviter cette situation à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge en sachant que cette configuration n'offre aucun type de réglage et/ou limitation de la tension de la batterie. La puissance maximale disponible aux bornes du générateur photovoltaïque transféré vers la charge [8].



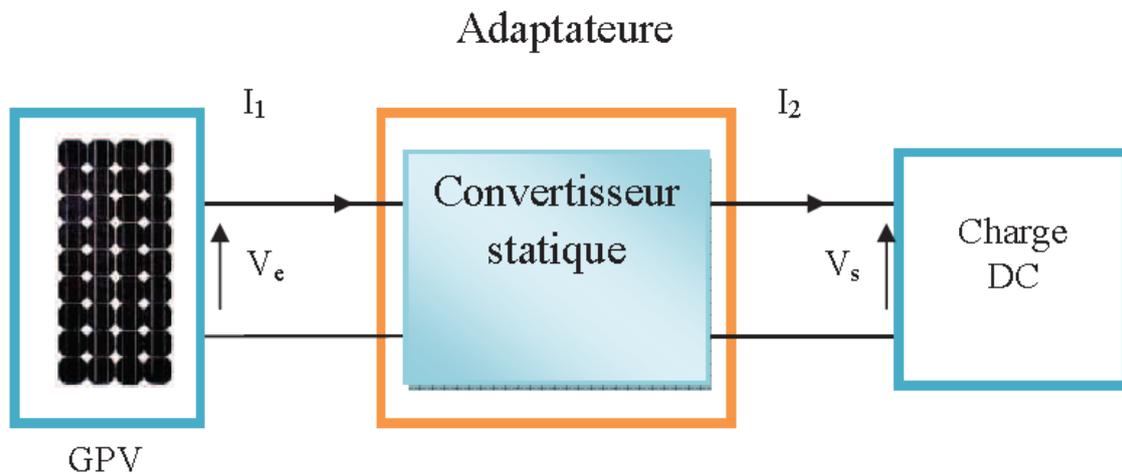
FigII .1.Connexion directe entre un GPV et une charge

II.3. Etage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques $I-V$ non linéaires avec de point de puissance maximum PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, d'après les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, en mode connexion directe nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance transférée réellement à la charge et la puissance potentielle du générateur.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge présenté par la figure II.2. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance

fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible [9].



FigII.2. Etage d'adaptation d'un GPV-charge

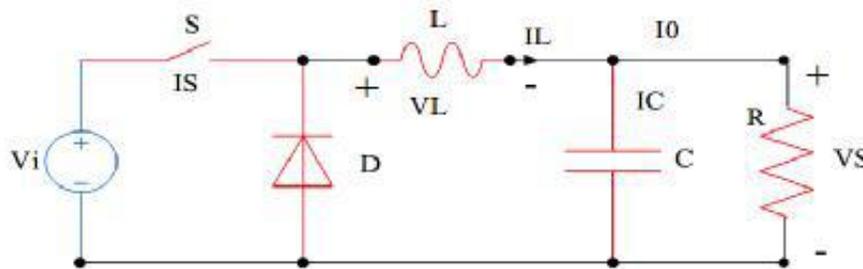
II.4. Convertisseurs DC/DC

Le hacheur, ou convertisseur continu - continu, est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandent, ce qui permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue avec un rendement élevé. Durant ces dernières années, la technologie des convertisseurs de puissance a connue un développement fabuleux grâce au développement des technologies des semi- conducteurs et des techniques numériques. Le développement est assuré que ce soit sur le volet architecture que la capacité de conversion. Le développement dans le domaine énergétique a poussé l'intégration de ces derniers dans les réseaux de transport d'énergie. Nous présentons dans ce qui suit des généralités sur les hacheurs et plus particulièrement le hacheur boost, qui est souvent utilise dans le domaine de photovoltaïque pour charger pour augmenter la tension délivrée par des panneaux [7].

Trois topologies de base de circuit de conversion seront décrites dans les suivants (*DC-DC*). On va présenter dans ce qui suit le principe des trois types de convertisseurs *DC/DC* (Buck, Boost et Buck photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités).

II.4.1. Hacheur dévolteur (Buck)

Le hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la figure II.3. Les composantes clés sont l'inductance (L), le commutateur (Transistor) (S), la diode (D) et le condensateur (C). Celui-ci se charge par le commutateur (S) qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture ce qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement.

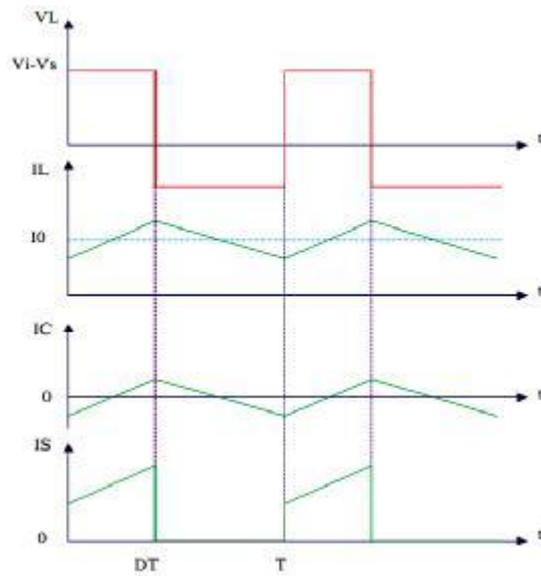


FigII .3.Circuit électrique de base du hacheur dévolteur

Le processus de commutation est décrit par la position de l'interrupteur (S). Dans le premier intervalle de temps (αT) le thyristor est dans un état passant, alors l'inductance (L) se charge d'énergie avec augmentation du courant I_L . Dans le deuxième laps de temps $(1-\alpha)T$, l'inductance (L) libère cette énergie à la charge avec une diminution de courant I_L . Lorsque le courant de l'inductance ne se décroît pas vers zéro avant la commutation du transistor, le convertisseur fonctionne dans le mode de conduction continu, comme illustré sur la figure II.4, et dans ce cas, si la tension de charge dépend seulement de la tension de source et du rapport cyclique $\alpha = T_{on}/T$ la tension aux bornes de la charge :

$$V_s = \alpha V_i. \quad (\text{II.1})$$

Dans le mode de conduction discontinu le courant de l'inductance s'annule dans un cycle de commutation entre le transistor (S) et la diode. Dans ce cas, la tension de charge dépend d'une manière plus complexe du rapport cyclique et le courant de la charge. Les caractéristiques des courants et la tension représentant le fonctionnement du hacheur dévolteur sont données par figure II.4 [11] :

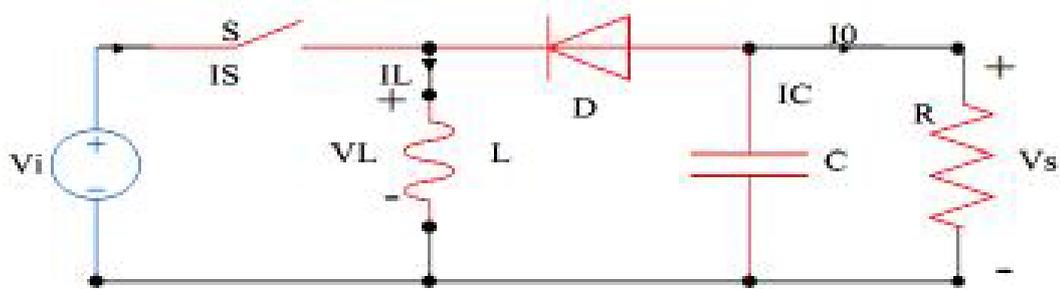


FigII .4.Caractéristique de la tension et des courants dans le transistor Et l'inductance d'un convertisseur Buck.

II.4.2. Hacheur Buck-Boost

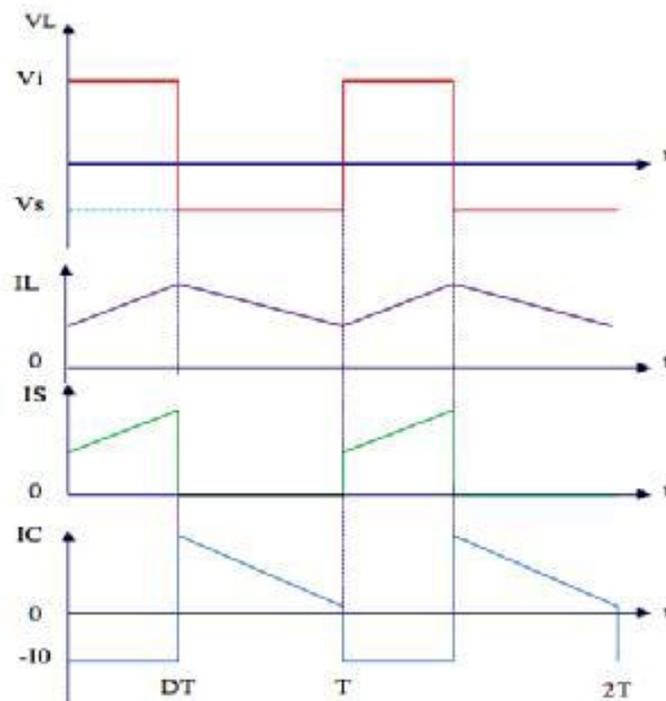
La deuxième topologie de base du convertisseur *DC/DC* est donnée par la figure II.5. Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le thyristor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée, et quand le commutateur se met sur la position (off) la tension à travers l'inductance est inversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donné par l'équation suivante [10] :

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_i \tag{II.2}$$



FigII .5. Circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur

Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur, et les caractéristiques du courant et de la tension de charge sont données par la figure II.6.



FigII .6. Caractéristique de la tension et des courants Buck-Boost

II.4.3. Le hacheur survolteur (Boost)

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure II.7, représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps (αT), l'interrupteur(s)est fermé, le courant dans l'inductance croit progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie. Ensuite, l'interrupteur(S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (I_L) et génère une tension qui s'ajoute à la tension de la source qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D) [12].

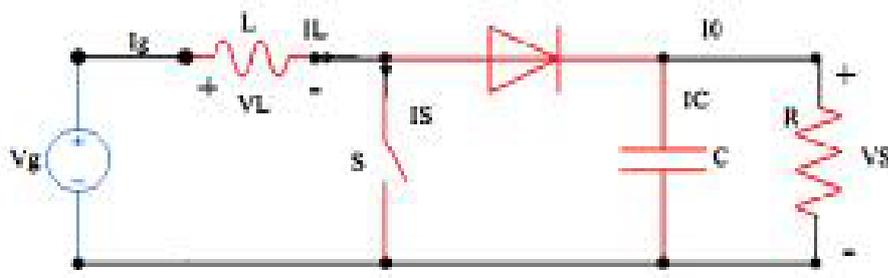
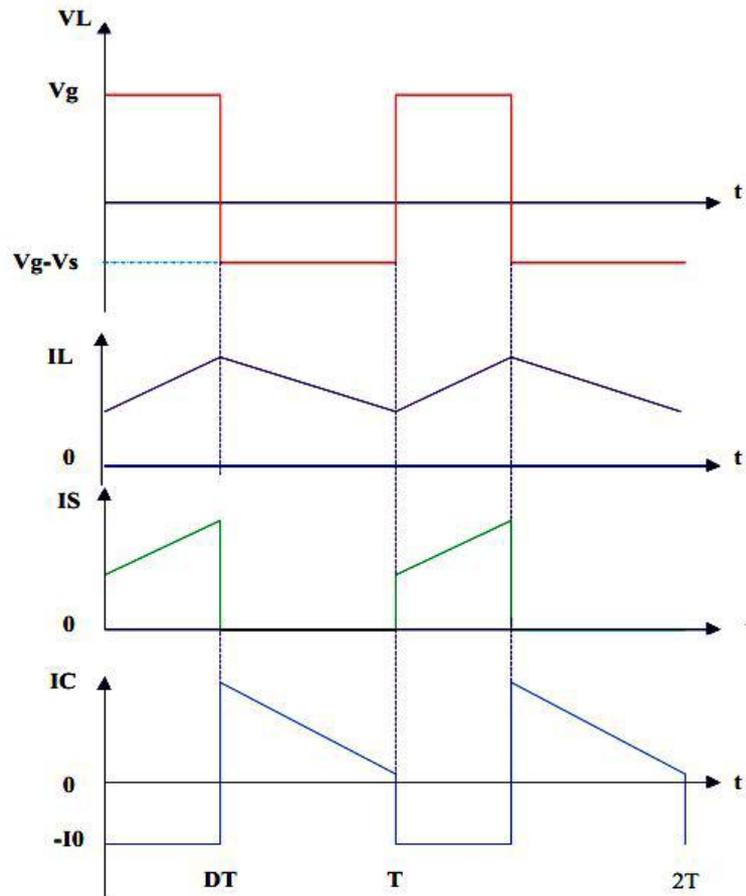


Figure II .7 .Circuit électrique de base du hacheur survolteur.



FigII .8.Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur

II.5. Principe de fonctionnement

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

✚ Pour la première période αTs :

$$V_i = \frac{di_L}{dt} = V_g \tag{II.3}$$

$$I_c = c \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \tag{II.4}$$

✚ Pour la première période $(1-\alpha) Ts$:

$$V_L = \frac{di_L}{dt} = V_g - V_0 \tag{II.5}$$

$$I_c = c \frac{dV_0}{dt} = I_1 - I_0 \tag{II.6}$$

Les systèmes d'équations de base (II.3, 4, 5,6)) représentent le convertisseur Boost pour une période αTs et $(1-\alpha) Ts$ respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique

approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques I_c , V_L est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment $e^\varepsilon \approx 1 + \varepsilon$ Si ($\varepsilon \ll 1$) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante. Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique x sur les deux intervalles de temps αT_s et $(1-\alpha) T_s$ [11].

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt} \alpha T_s + \frac{dx}{dt} (1-\alpha) T_s \quad (\text{II.7})$$

Où :

$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur une période T_s

Dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de forme linéaire comme le montre la figure II.8 et II.9.

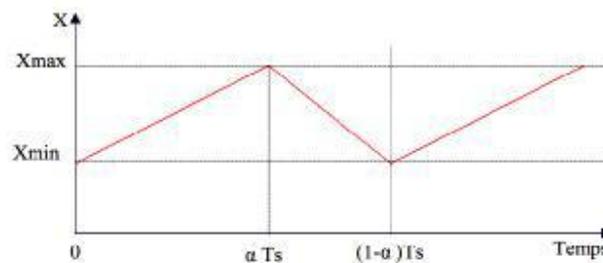


Fig II .9 . Allure des variables dynamiques II.

En appliquant la relation (II.7) sur les systèmes d'équations (II 2,3, 4, 5 et 6), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$I_c = C \frac{dV_0}{dt} \alpha T_s = -I_0 (\alpha T_s) + (I_L - I_0)(1-\alpha) T_s \quad (\text{II.8})$$

$$V_i = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_s = V_g (\alpha T_s) + (V_g - V_0)(1-\alpha) T_s \quad (\text{II.9})$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation en valeur moyenne du Convertisseur Boost.

$$I_L = I_g \quad (\text{II.10})$$

$$I_0 = (1 - \alpha) I_L \quad (\text{II.11})$$

$$V_g = (1 - \alpha) V_0 \quad (\text{II.12})$$

II.6. Dimensionnement des composants du convertisseur

Pour le dimensionnement des différents composants du circuit du convertisseur afin de diminuer les ondulations des courants et des tensions sans faire un surdimensionnement ce qui accroîtrait le poids et le prix des circuits, un calcul de ces composants en fonction des ondulations voulues est nécessaire. Cette remarque est très importante pour le dimensionnement de l'inductance L afin de respecter le courant admissible par l'interrupteur où dans le cas pratique les ondulations du courant I_L sont plus importantes par rapport aux autres ondulations [11].

✚ En appliquant la relation $V_L = L \frac{dI}{dt}$ est on obtient :

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_L}{L} \approx \frac{V_g}{L} \quad (\text{II.13})$$

✚ La valeur crête à crête du courant I_L est donné par :

$$I_{Lcc} = 2\Delta I_L \approx \frac{V_g}{L} \alpha T_s \quad (\text{II.14})$$

✚ La valeur de l'inductance L à choisir pour certaine ondulation ΔI_L est :

$$L \approx \frac{V_g}{2\Delta I_L} \alpha T_s \quad (\text{II.15})$$

✚ Pour le calcul de la capacité C du condensateur on a :

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{I_c}{c} \approx \frac{I_0}{c} \quad (\text{II.16})$$

✚ La valeur d'ondulation crête à crête de tension de sortie est :

$$V_{ccc} = 2\Delta V_c \approx \frac{I_0}{c} \alpha T_s \quad (\text{II.17})$$

✚ La valeur de la capacité C est données par :

$$C \approx \frac{I_0}{2\Delta V_c} \alpha T_s \quad (\text{II.18})$$

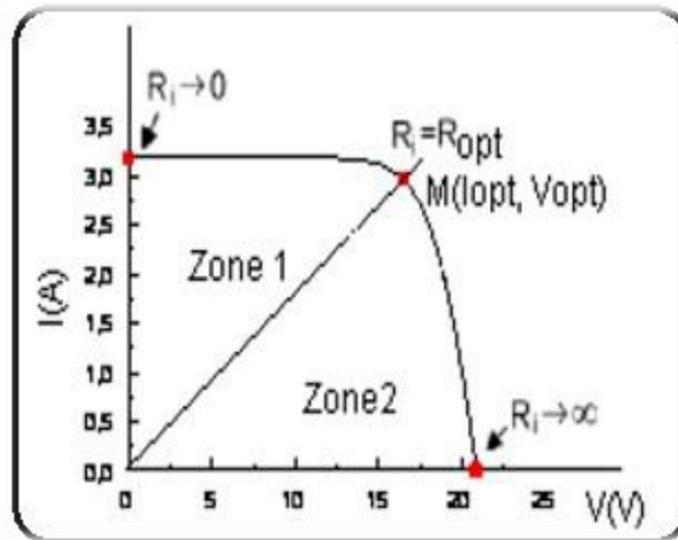
II.7. Mécanisme d'adaptation de l'impédance

Le convertisseur d'énergie photovoltaïque choisi est un hacheur de type survolteur ou dévolteur ou dévolteur- survolteur selon les applications de la charge. Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal (Figure (II.10)). Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Dans la Figure II.7, la zone (1) de la caractéristique courant-tension $I-V$ est une zone de fonctionnement dans le mode « hacheur dévolteur » et l'MPPT est assurée pour toute

résistance R_i comprise entre $[0, R_{opt}]$. Ceci s'inverse pour la zone (2) de la caractéristique courant-tension $I-V$ qui présente la zone de fonctionnement dans le mode «hacheur survolteur» ou le fonctionnement du MPPT est assuré pour toute résistance R_i comprise entre $[R_{opt}, \infty]$.

Donc, un choix de convertisseur dévolteur ou survolteur pour une charge donnée est impératif et on peut utiliser l'un des deux types de convertisseur selon la configuration du circuit. Si il'y a une possibilité de fluctuation de la tension demandée par la charge au-dessous est au-dessus de celle débité par la source, un Hacheur dévolteur/survolteur s'avère nécessaire. Dans cette partie on se limite au hacheur survolteur [13].



FigII .10. Répartition de la caractéristique selon le fonctionnement du hacheur utilisé

L'impédance vue par PV est l'impédance d'entrée du convertisseur. En utilisant notre cas du convertisseur BOOST, la relation de donnant l'impédance R_{in} vue par le panneau est [11].:

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \quad (\text{II.19})$$

Et nous avons démontré précédemment qu'en valeur moyenne :

$$V_0 = \frac{1}{1-D} V_{in} \quad (\text{II.20})$$

Et que :

$$I_{in} = \frac{1}{1-D} I_0 \quad (\text{II.21})$$

$$D'où : R_{in} = (1 - D)^2 . R_{ch} \quad (\text{II.22})$$

Où:

D est le rapport cyclique du convertisseur BOOST

- Si le point de fonctionnement est à gauche du PPM on doit donc augmenter la tension du panneau pour l'atteindre et cela en augmentant la valeur de R_{in} par diminution du rapport cyclique D .
- Si le point de fonctionnement est à droite du PPM la diminution de R_{in} va déplacer la tension de fonctionnement vers la gauche par l'action d'augmentation du rapport D .

II.8. Limitation de la commande MPPT

Le principal inconvénient de la commande MPPT est qu'il n'y a pas de régulation sur la sortie lors de la poursuite du point de puissance maximale. L'algorithme ne peut pas asservir l'entrée et la sortie en même temps. On peut voir les variations de la tension et du courant de sortie pour des variations atmosphérique.

La commande MPPT agit sur le rapport cyclique pour que l'impédance d'entrée du convertisseur+charge corresponde à l'impédance optimale du module photovoltaïque, on peut écrire donc :

$$R_{in} = R_{opt} = \frac{V_{ppm}}{I_{ppm}} \quad (\text{II.23})$$

L'équation (2.20) pour le convertisseur BOOST est résolue pour le rapport cyclique (D) :

$$D = 1 - \sqrt{\frac{R_{in}}{R_{ch}}} \quad (\text{II.24})$$

De l'équation (II.12), la tension de sortie du convertisseur est le suivant:

$$V_0 = \frac{1}{1-D} \times V_i \quad (\text{II.22})$$

De l'équation (II.11), le courant de sortie du convertisseur est le suivant:

$$I_0 = (1-D)I_i \quad (\text{II.23})$$

II.9. Conclusion

Ce chapitre a présenté une analyse du convertisseur DC/DC utiliser comme interface entre la charge est le générateur photovoltaïque pour que celui-ci fonctionne à un rendement optimal. Le mécanisme d'adaptation de l'impédance du convertisseur-charge à l'impédance optimale du GPV a été développé.

Nous avons vu aussi dans ce chapitre que la connexion des GPV à une charge à travers l'étage d'adaptation DC /DC demande le branchement des batteries de stockage pour ne pas limiter le rôle de la commande MPPT sinon le GPV doit être connecté à un système qui peut absorber toute l'énergie produite telle que le réseau électrique.

CHAPITRE III

Techniques de recherche du point de puissance maximale (MPPT) d'un GPV

III.1. Introduction

L'énergie électrique provenant des générateurs photovoltaïques est aléatoire et dépendent directement des conditions météorologiques. Ainsi, le dimensionnement et l'exploitation optimale de l'énergie produite par ces générateurs exige l'utilisation de méthodes de gestion appropriées. De même, l'amélioration du rendement du système photovoltaïque nécessite la maximisation de la puissance du générateur photovoltaïque qui permet d'établir la commande adéquate en vue d'extraire le maximum de puissance.

Les panneaux photovoltaïques sont utilisés pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques nécessitant une puissance requit. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)) est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courant-tension des cellules surtout leur caractéristique est affectée par l'éclairement et la température.

Dans ce contexte plusieurs méthodes de poursuite et algorithmes ont été mises en application, chacune présente des avantages et des inconvénients. Ce chapitre décrit d'une manière générale les deux fameux méthodes ou techniques de poursuite du point de puissance maximale les plus répandues et les plus utilisées.

III.2. Généralité sur la commande MPPT

Une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT est donnée par la figure III.1. La commande *MPPT* est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le *GPV* et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur *DC/DC* de telle sorte que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque corresponde à la puissance maximale (P_{MAX}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge [15].

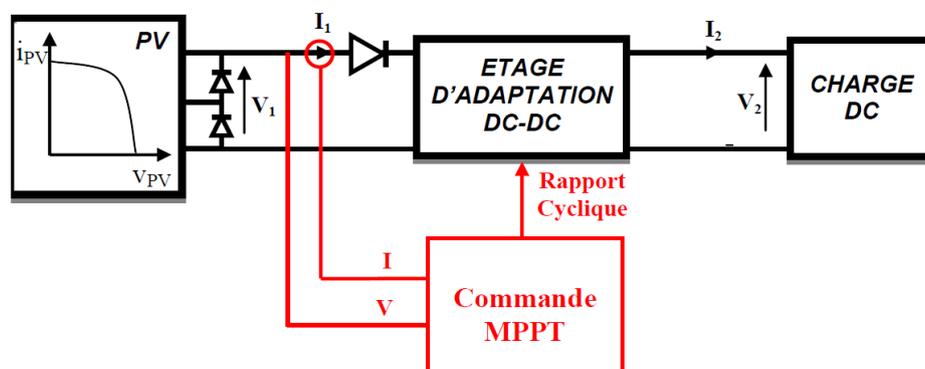


Fig III. .1 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

Une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quelle que soit la tension de la batterie, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum [16].

Dans le domaine de la conversion d'énergie, la commande MPPT contrôle le convertisseur DC-DC assurant l'interface de puissance du générateur photovoltaïque et la charge. Cette commande permet au générateur d'énergie de fournir une puissance maximale à la charge.

L'adaptation du générateur photovoltaïque à la charge peut se faire par le biais du convertisseur en réglant le rapport cyclique du signal commandant l'interrupteur du convertisseur en assurant à travers cette action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la valeur maximale disponible (figure III.2).

L'énergie en sortie produite par un système photovoltaïque n'est pas automatiquement adaptée à la charge. Pour cela, il est nécessaire d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, il doit être doté d'un régulateur, permettant de tirer le maximum d'énergie d'une installation solaire photovoltaïque. Ce régulateur peut être un régulateur MPPT réalisé par l'une des méthodes les plus utilisées P&O, INC ou par la logique floue ... selon les applications.

Le problème qui se pose est de concevoir une approche d'adaptation (commande MPPT: Maximum Power Point Tracking) qui permet d'ajuster ce rapport cyclique d'une manière automatique à sa valeur optimale en fonction des instabilités météorologiques ou variations de la charge qui peuvent survenir à tout moment.

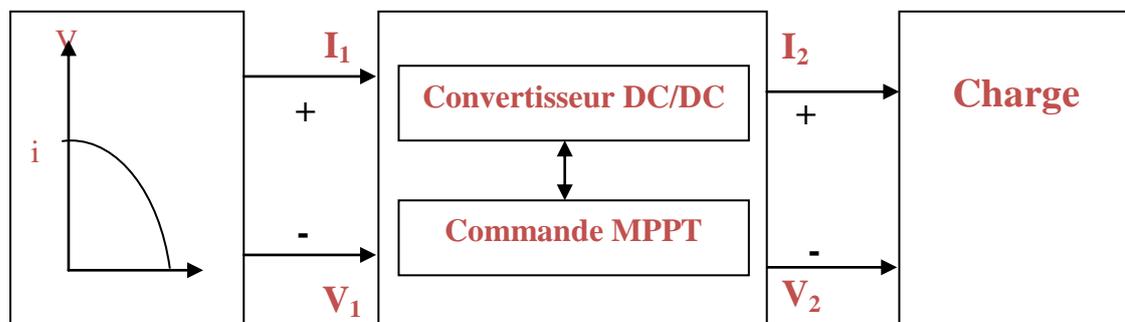


Fig. III.2. Interface de puissance entre le GPV et la charge

Les trois cas de perturbations engendré sont illustrés par la Figure III.3. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du générateur photovoltaïque (cas c) [15].

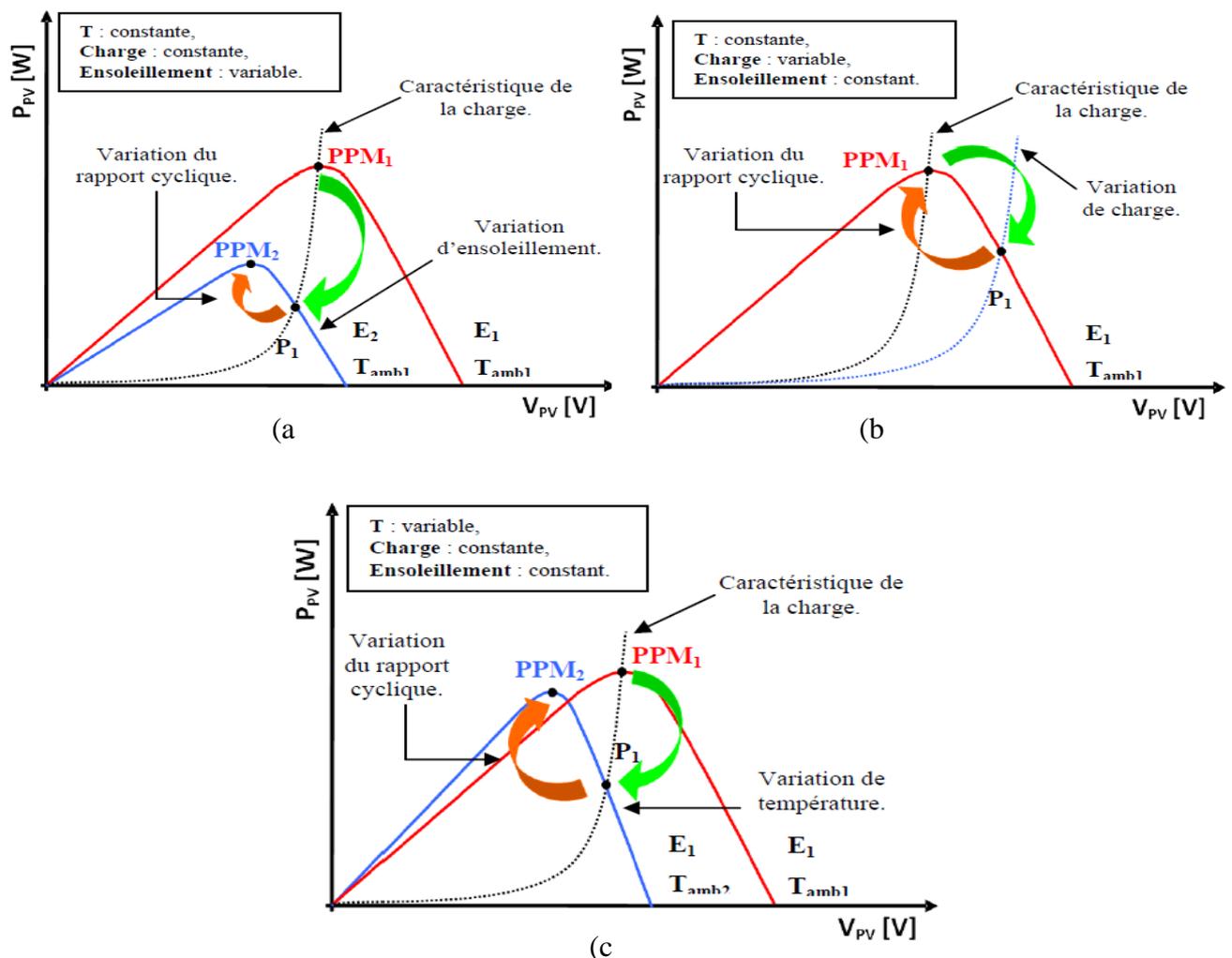


Fig III. 3. Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal [15]

- (a) suite à une variation d'ensoleillement
- (b) suite à une variation de charge
- (c) suite à une variation de température

III.3. Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature

Il existe des lois de commandes spécifiques, ont le rôle d'amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (*MPPT*). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (*PPM*) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

En ce qui concerne la conception des commandes MPPT, différentes approches d'adaptation sont disponibles : implantation analogique, analogique-numérique et numérique. Ainsi, la classification, des MPPT, s'est effectuée selon différents critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative.

Dans ce chapitre, nous avons choisi la commande MPPT numérique pour l'approche d'adaptation grâce à sa simplicité de réalisation malgré son cout élevé, comparée aux autres méthodes.

III.4. Principe de la commande MPPT numérique

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres. Appliqué initialement au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Boehringer [16]. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM). Ce dernier est décrit en (Fig.III.4) et peut être entièrement implémenté en numérique. Il consiste à calculer la puissance à l'instant t_i à partir des mesures de I_{PV} et V_{PV} , et de la comparer à celle stockée en mémoire. De là, un nouveau rapport cyclique "D" est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants. Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche du PPM associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le PPM même temporairement.

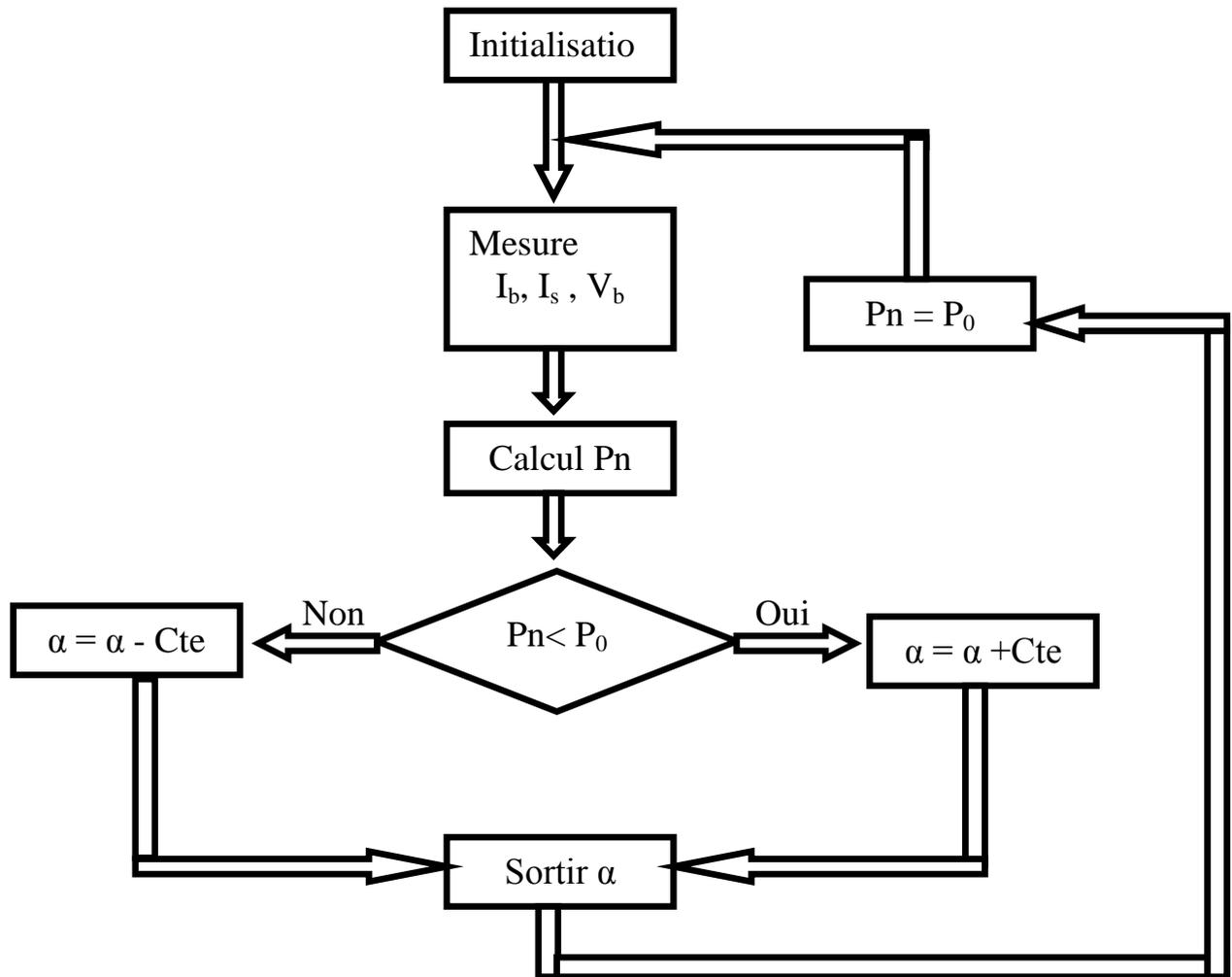


Fig III. 4. Principe de la première commande MPPT numérique [16]

Le système démarre d'un rapport cyclique initial α_0 et d'une puissance initiale P_0 . Après avoir effectué la mesure du courant I_b et de la tension V_b aux bornes de la batterie et du courant de charge I_s , le produit $[(I_b + I_s) \cdot \alpha \cdot V_b]$ est calculé. Ce dernier est l'image de la puissance instantanée P_n délivrée par le générateur photovoltaïque à l'instant où la mesure a été effectuée. Cette image est alors comparée à la puissance P_0 , si P_n est inférieure à P_0 , alors α est incrémenté, sinon α est réduit. Une fois α modifié, P_0 prend la valeur P_n et on effectue une nouvelle mesure de I_b , V_b et I_s pour calculer la nouvelle puissance P_n .

Ainsi, par un algorithme numérique de recherche, on peut régler la précision de cette commande de façon à obtenir un rendement proche de 100% en fonction de l'algorithme

implanté. De plus, le temps de calcul de la MPPT est directement fonction de l'algorithme implanté.

III.5. Evolution du point d'opération du générateur photovoltaïque

Pour la recherche du point de puissance maximal, la comparaison entre un point de puissance (P_2) mesuré à l'instant (t) avec un point de puissance (P_1) mesuré à l'instant ($t-1$) doit se faire (**Figure III.5**).

- Si $P_1 < P_2$, la dérivée est positive, cela signifie que nous rapprochons du PPM, et si la dérivée de la puissance est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le PPM. Ainsi au démarrage du système, la recherche de PPM se fait progressivement, en cherchant le premier maximum.

Les commandes MPPT présentant finalement un bon compromis de rendements en statique et dynamique mais aussi de robustesse sont basées sur une continuelle évaluation de la puissance et une comparaison avec l'état à l'instant précédent [17],

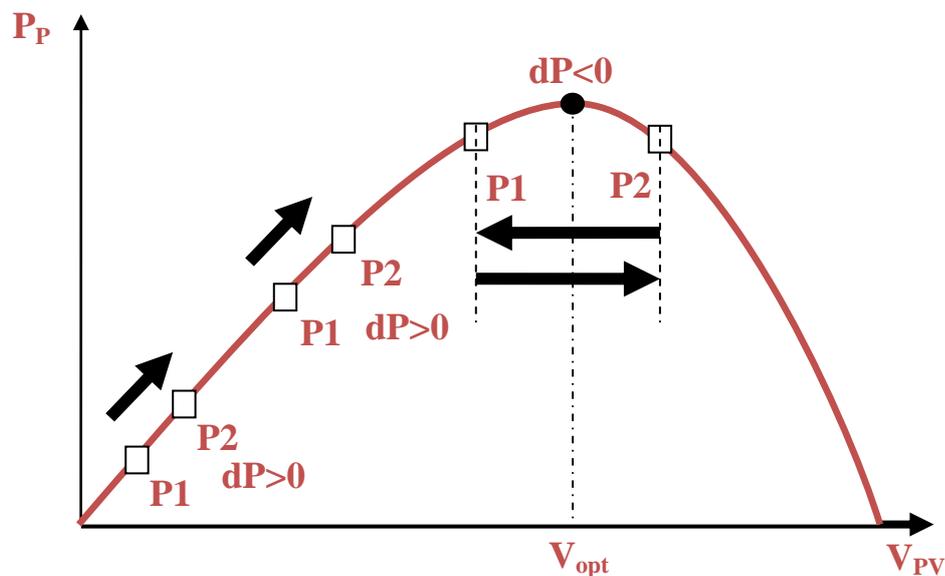


Figure. III.5. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT [17].

Cependant, pour la plupart des commandes MPPT, pour arriver à converger dans de bonnes conditions, quel que soit l'algorithme, il faut que les courbes de puissance délivrées par le générateur soient constantes ou lentement variables.

Si cette hypothèse n'est pas respectée (changements brutaux des conditions de fonctionnement) le système peut diverger. Les différents problèmes qui peuvent survenir sont les suivants :

- La puissance délivrée par le GPV peut présenter plusieurs maximums. Cela peut se produire, en particulier, lorsque les diodes de protection (diode by-pass) des cellules PV associées en série et ou en parallèle se ferment.
- Des changements brutaux d'éclairement et de la charge peuvent survenir à tout moment sans que la fréquence de ces changements soit prévisible. Ainsi, le GPV peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée et donc son PPM comme l'illustre la figure III.6.

Le point de fonctionnement (P1) se trouve sur la partie montante de la courbe de puissance (A) avant le changement d'éclairement. Suite à la variation d'éclairement, le point de fonctionnement passe de P1 à P2 qui se trouve sur la courbe de puissance (B). En comparant la puissance P2 et P1, on en déduit une dérivée négative, donc on inverse le sens de poursuite pensant avoir dépassé le PPM, ici la commande MPPT perd momentanément le PPM. De plus le changement du sens de la poursuite fait éloigner encore plus le point d'opération du PPM.

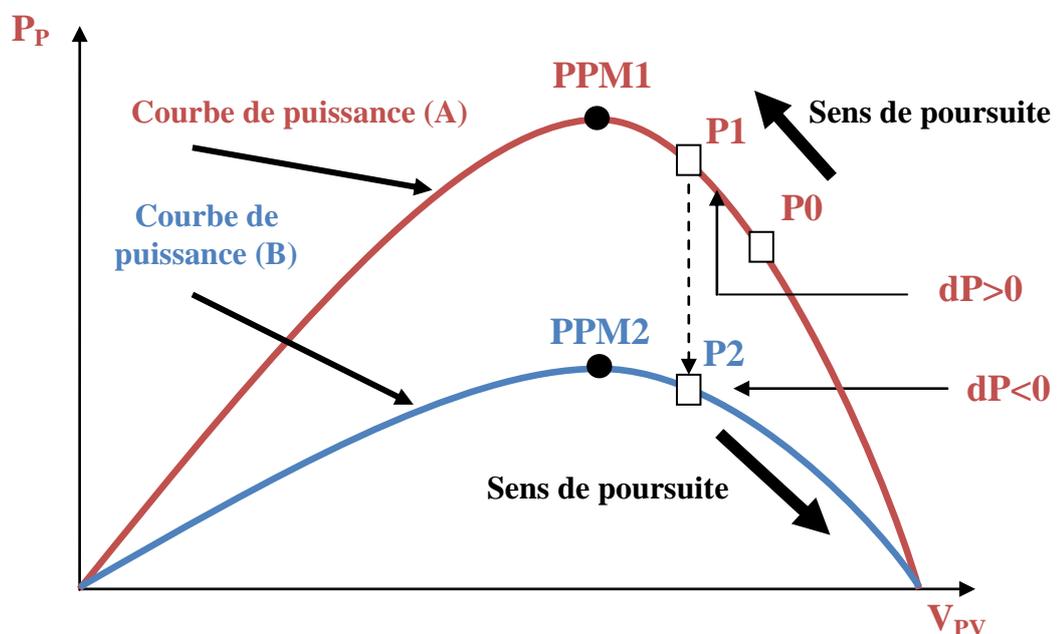


Fig. III.6. Conséquence du changement d'éclairement la puissance d'un GPV
Et sur l'adaptation source-charge [17].

III.6. Différents types de commandes MPPT :

Afin de poursuivre le point PPM réel, il serait nécessaire d'obtenir de l'information sur la puissance réelle extraite du module PV. Ceci peut être réalisé en mesurant la tension V_{pv} à la sortie du panneau et le courant I_{pv} qu'il peut fournir. A partir de la puissance électrique ($P = V_{pv} * I_{pv}$), on pourra utiliser différents algorithmes de contrôle pour poursuivre le PPM du module PV. Trois implantations de commande MPPT sont possibles [18]:

III.6.1. MPPT à implantation analogique

Elle se caractérise par une simplicité dans la conception et une grande dynamique vis à vis de son équivalente numérique et aussi des diverses perturbations. Elle peut être complètement réalisée avec des composants analogiques et logiques sans qu'aucun calcul ne soit nécessaire. L'autre avantage de cette commande est sa capacité de fonctionner à des fréquences de découpages élevées. Elle peut dépasser facilement le 1MHz. Cela permet donc de réduire considérablement la taille des composants passifs (capacités et inductances) constituant le convertisseur d'énergie.

III.6.2. MPPT à implantation mixte logique et analogique

Qui est basé sur l'addition d'un filtre nommé LFR (loss free resistor). Ce concept a été développé par S. Singer dans le cas général de source de puissance fortement non linéaire [18].

III.6.3. MPPT à implantation numérique

La pièce principale de ces commandes est un microcontrôleur. Elles sont souvent incluses avec diverses fonctions notamment des protections. L'algorithme implanté est plus ou moins lourd selon la précision du système, la robustesse et la rapidité de la boucle de commande.

Ainsi, parmi les nouvelles MPPT publiées récemment, on peut citer : la commande MPPT de type numérique proposée par M. Matsui. Celle-ci est basée sur la mesure des tensions de sortie et d'entrée d'un convertisseur de type boost [19.] . En effet, connaissant le lien entre les grandeurs d'entrée et de sortie d'un convertisseur statique en fonction de son rapport cyclique, une fois les mesures effectuées, on peut calculer la valeur du rapport cyclique

permettant de faire la meilleure adaptation source- charge. Ces types de commande sont valables en basses fréquences et puissances élevées. Leur inconvénient se manifeste lorsque la fréquence de système de conversion augmente, elles peuvent induire alors des erreurs sur la détermination du rapport cyclique optimal. De ce fait, elles peuvent entraîner des pertes importantes en rendement. Ces commandes numériques se basent sur des algorithmes de contrôle adaptatifs, permettant de maintenir le système à son PPM.

III.7. Les différents algorithmes de contrôle MPPT

Les trois méthodes pour la recherche les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement : Hill Climbing, Perturb & Observ (P&O) et l'incrément de conductance (IncCond). Pour une meilleure compréhension des performances de ces commandes, nous rappelons brièvement leurs différents principes dans les paragraphes suivants.

III.7.1. Méthode de perturbation et observation (P&O)

Le principe des commandes *MPPT* de type *P&O* consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure III.7, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du *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. 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* [15].

L'avantage de cette méthode c'est qu'elle a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètre de mesure. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température, pour toutes ces raisons, la méthode P&O est devenue une approche largement répandue dans la recherche du MPPT.

L'inconvénient majeur de cette technique réside dans le cas de changement rapide des conditions atmosphériques (comme une journée nuageuse avec éclaircies), cette méthode peut déplacer le point de fonctionnement dans une direction fautive et les pertes de puissance risquent d'être encore plus importantes; cet ajustement incorrect continuera jusqu'à

ce que le changement de l'éclairement ralentisse ou se stabilise, et avant que de nouvelles perturbations soient effectuées il est nécessaire que le convertisseur statique fonctionne en régime établi c'est pour cela cette méthode est jugée trop lente à retrouver le nouveau point de fonctionnement [17].

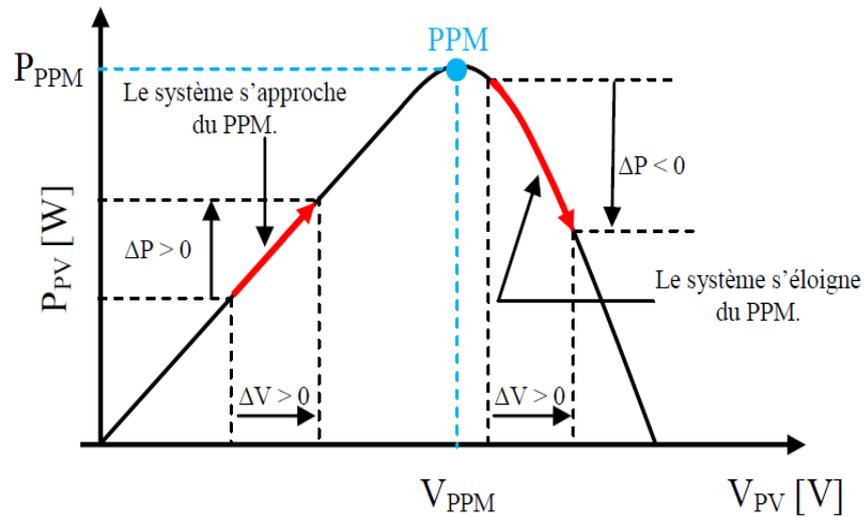


Fig III. 7. Caractéristique PPV (VPV) d'un panneau solaire

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

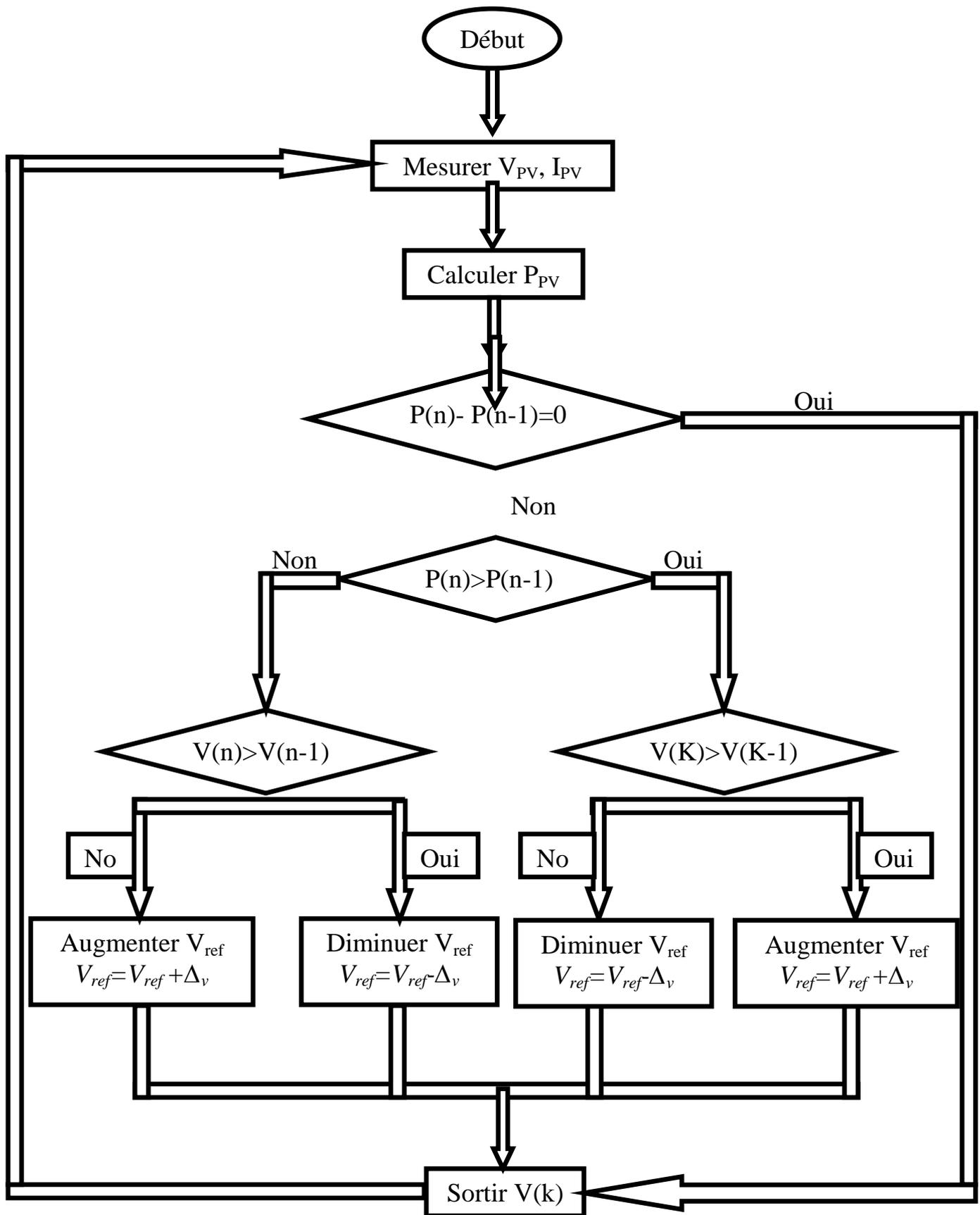


Fig III.8. Algorithme type de la méthode P&O

En effet, si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le PPM lorsque des variations brusques des conditions climatiques ou/et de charge apparaissent, comme cela est décrit sur (Fig. 3.6).

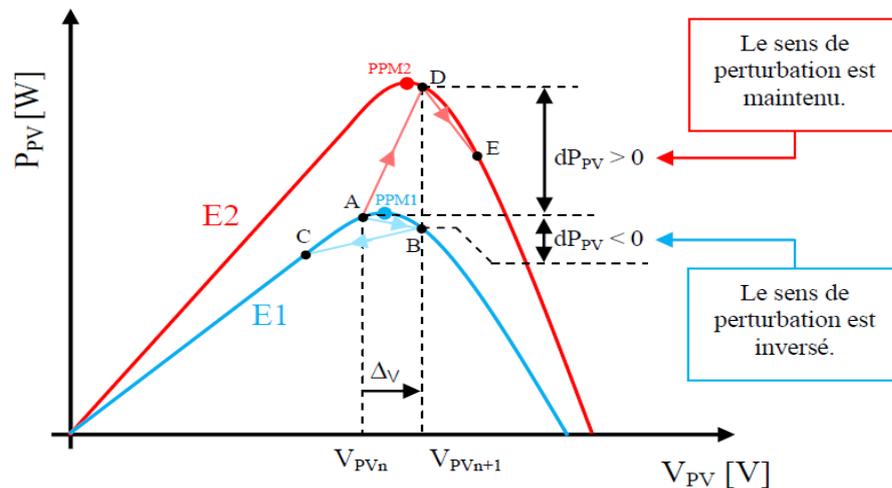


Fig. III.9. Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation

III.7.2. Principe des commandes "Hill Climbing"

La technique de contrôle nommée *Hill Climbing* consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au CS. Mathématiquement, le PPM est atteint lorsque dP_{PV}/dD est forcé à zéro par la commande, comme le montre la figure III.10 suivante [20-21].

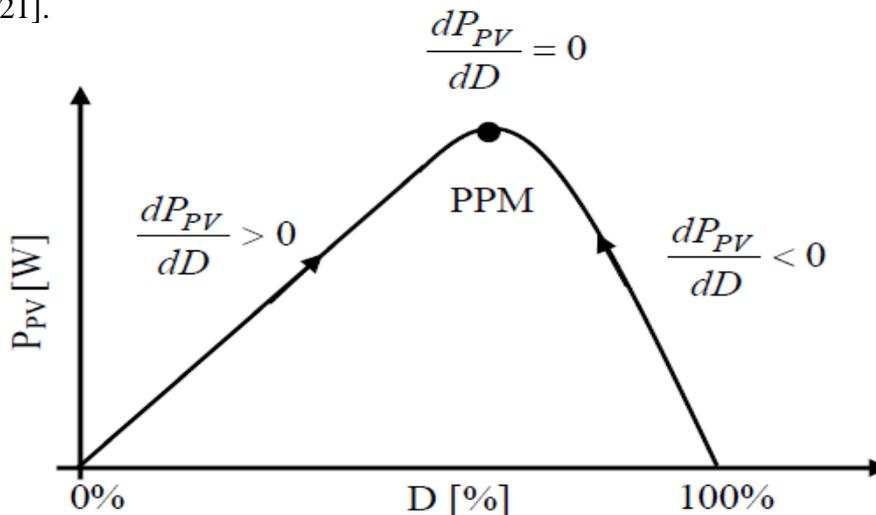


Fig III.10. Relation entre PPV et le rapport cyclique "D" du convertisseur statique.

L'algorithme de cette méthode est illustré sur la Figure III. 11.

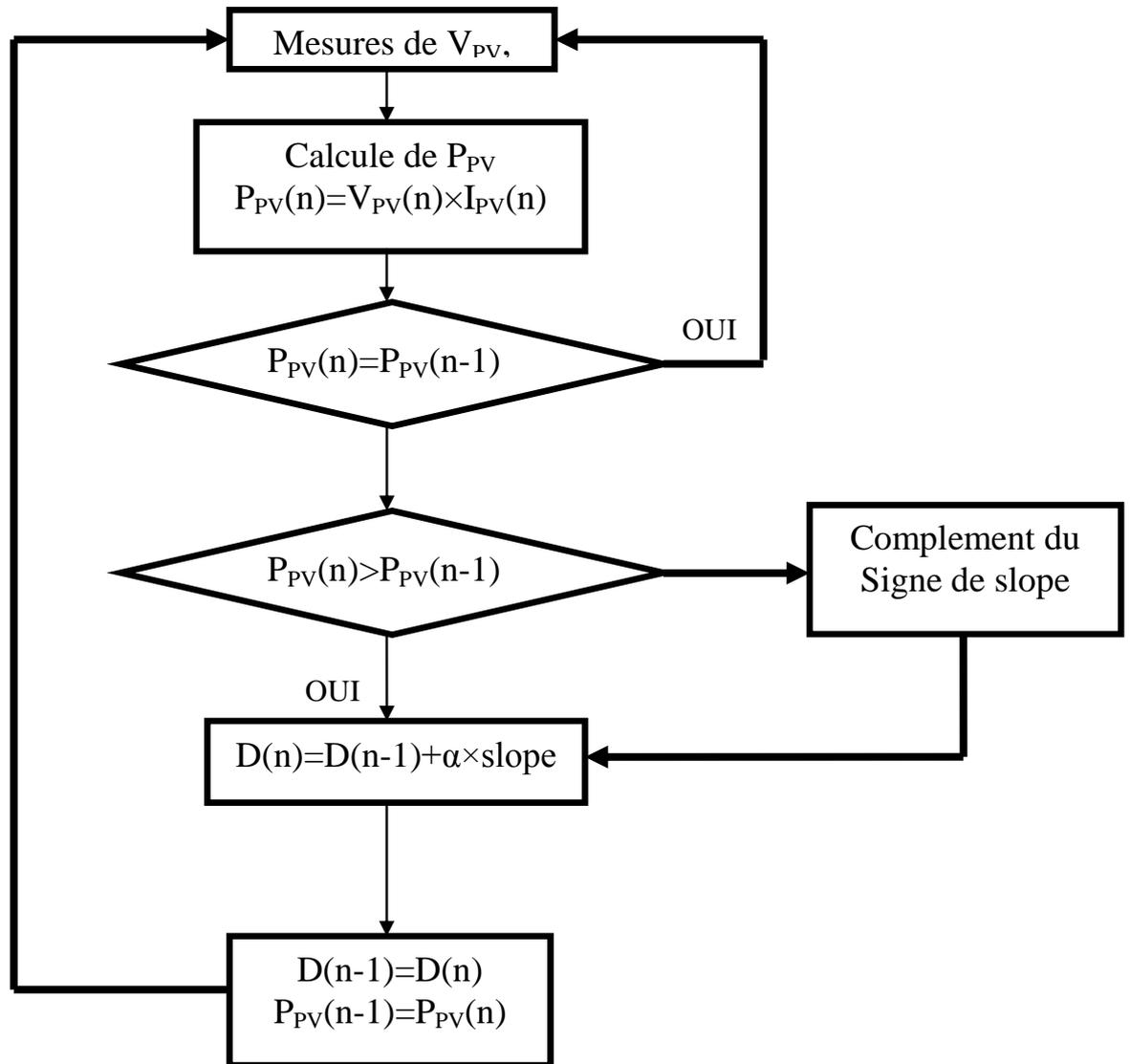


Fig III. 11. Algorithme type de la commande "Hill Climbing"

Le fonctionnement de cette commande est illustré sur la Figure III. 12 en reprenant la chaîne de conversion PV élémentaire.

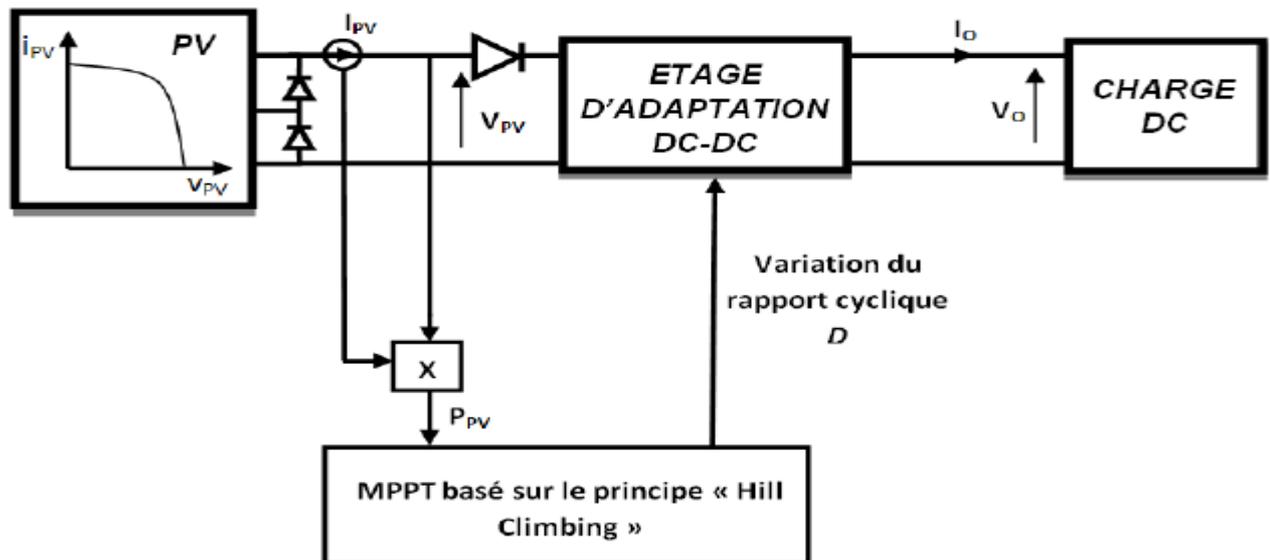


Fig III. 12. Schéma de principe de la commande "Hill Climbing"

III.7.3 Principe des commandes "Incrément de conductance" (IncCond)

Pour rechercher les PPM, cette autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM figure III.13. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV [22-23]

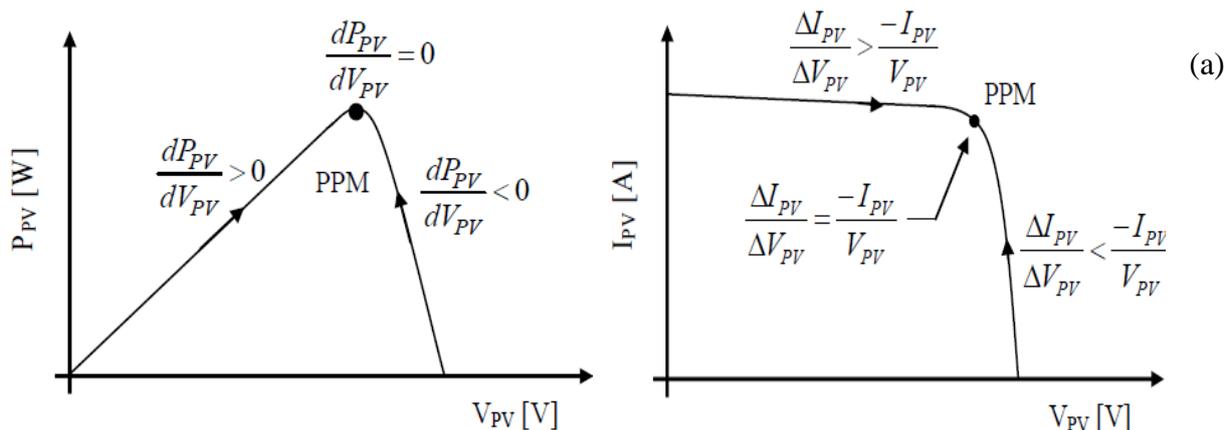
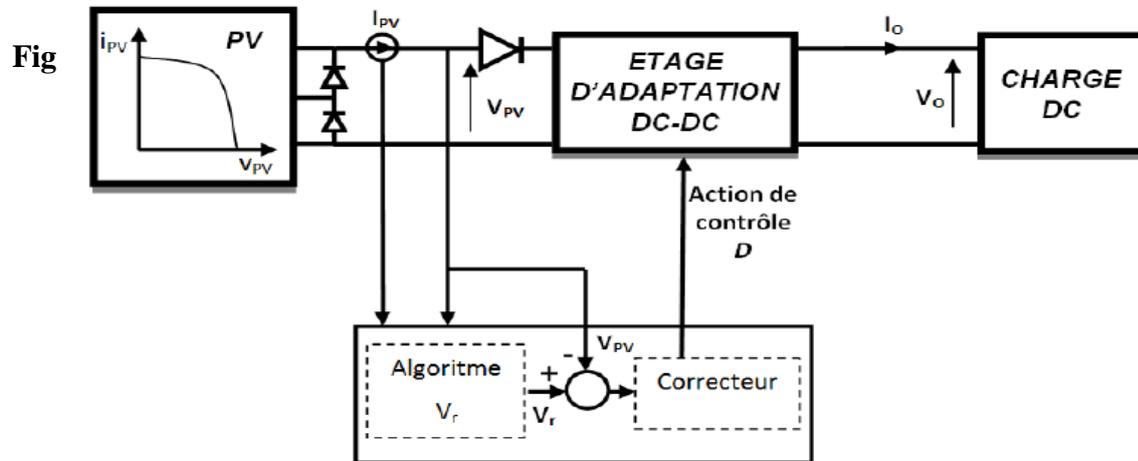


Fig III.13. Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe

- (a) dP_{PV}/dV_{PV} sur la caractéristique de puissance
- (b) $\Delta I_{PV}/\Delta V_{PV}$ sur la caractéristique de courant



III.14. Fonctionnement d'une commande *MPPT* de type *IncCond*

Illustré sur une chaîne élémentaire de conversion *PV*

Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la figure III.15.

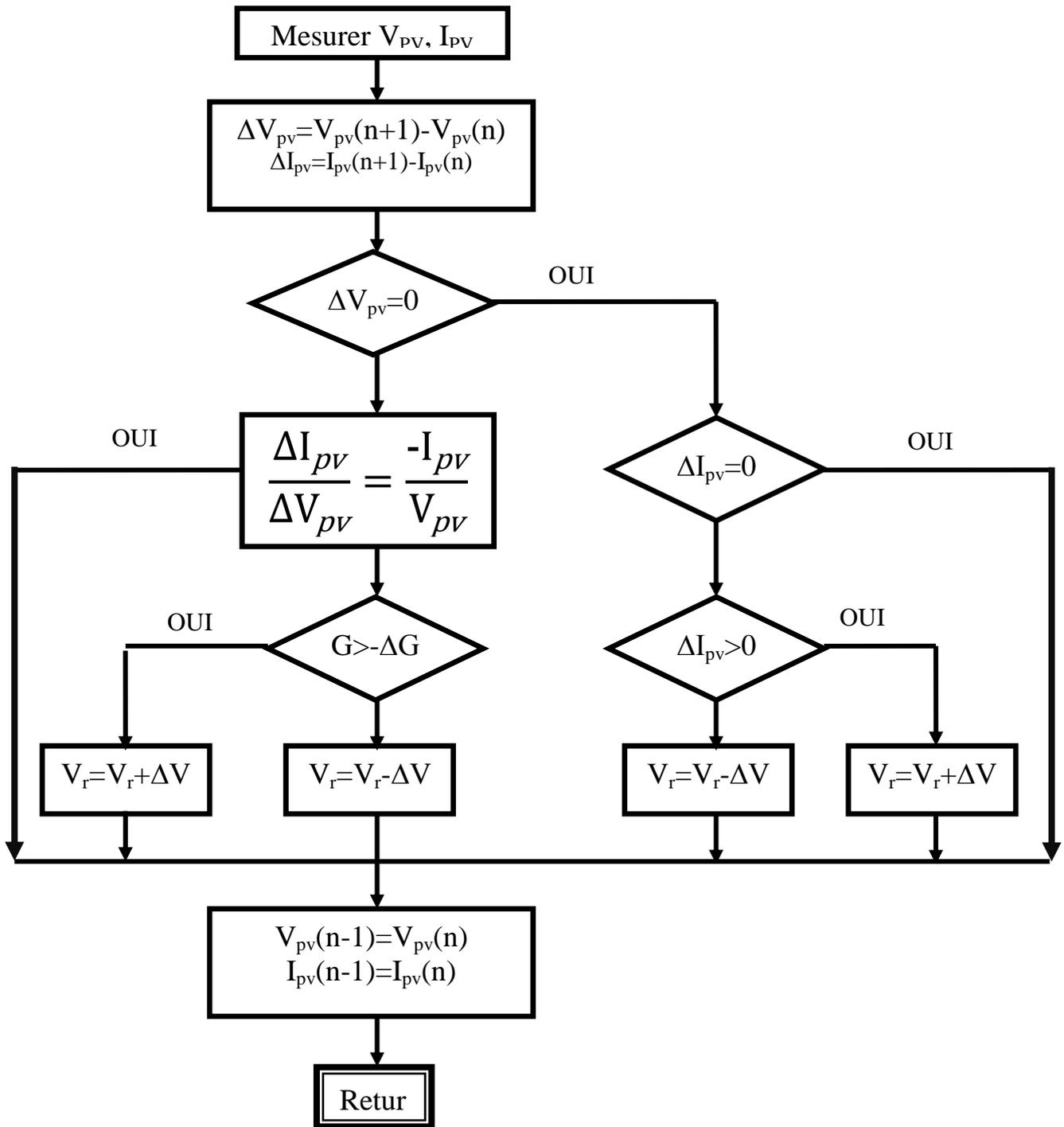


Fig III.15. Algorithme d'une commande *MPPT* basée sur la méthode
Incrément de Conductance

III.8. Synthèse des commandes *MPPT*

Il faut adopter plusieurs critères pour pouvoir les évaluer sans mesure et très rapidement. Ainsi, nous avons choisi leur degré de dépendance à la source *GPV* employée. Ce critère est pour nous important pour savoir le degré de généricité de ces commandes et le degré d'intervention humaine à prévoir pour effectuer par exemple des pré-réglages. Leur mode de conception donnant une idée sur le cout de revient, l'encombrement, la puissance consommée. Leur précision maximale théorique escomptée et leur temps de réponse minimum à prévoir en recouvrement de *PPM*. Pour les commandes utilisant une variable d'incrément, nous avons vu d'après la littérature que les performances en termes de rendement et de temps de réponse dépendent considérablement de la valeur de l'incrément choisi. Ainsi, le terme « variable » au niveau du tableau signifie que ces commandes peuvent être très performantes si le réglage de cet incrément est maîtrisé.

En résumé, il ressort de la littérature une complexité de ce domaine et un manque de critères de références d'évaluation qui serait reconnu par la communauté. Nous avons ainsi recherché pour pouvoir évaluer notre travail par rapport à l'existant des modes de critères plus précis. Nous commençons par rappeler dans ce chapitre ceux liés aux définitions originales sur les rendements qui nous ont servi tout au long de nos travaux. Nous verrons lors des mesures comment nous mettons du point de vue pratique ces critères.

III.9. Critères d'évaluation d'une commande *MPPT*

La qualité d'une commande *MPPT* peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au *PPM*. La puissance P_{in} effectivement délivrée par le *GPV* dépend de la commande utilisée au niveau du convertisseur (*MPPT*, asservissement de tension, connexion directe). Le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons η_{MPPT} , permet de mesurer l'efficacité de la commande qui a en charge le contrôle du convertisseur de puissance.

Les performances d'une commande *MPPT* ne se résument pas à ce seul paramètre (η_{MPPT}). D'autres critères, présentés dans la suite du document, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance sont importants pour évaluer les qualités de ce type de commande. Nous les détaillerons au fur et à mesure de leur utilisation dans ce document.

III.9.1. Simplicité et Coût

En plus de ses performances théoriques, il est important de connaître le niveau de complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implémentation et des pertes liées directement au nombre de calculs nécessaires. En résumé, une commande *MPPT* doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré. En effet, il ne faut pas oublier que dans un contexte énergétique fortement concurrentiel, le fait d'insérer un étage d'adaptation avec une commande *MPPT* doit avoir un gain du point de vue énergétique recouvrant le surplus économique. Sinon, cette solution ne sera jamais viable du point de vue industriel. Dans le cas contraire, la commande aussi performante qu'elle soit en termes de rendement, présente trop de contraintes pour être choisie pour ce type d'application.

III.9.2. Réponse dynamique

Une commande *MPPT* doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau *PPM*, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible.

III.9.3. Flexibilité

Une commande *MPPT* doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de panneau. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux de différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse.

III.9.4. Compétitive sur une large gamme de puissance

Par définition, une commande *MPPT*, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée traquer le *PPM* généré par un module *PV*, quel que soit le niveau d'ensoleillement. La commande *MPPT* est dite compétitive si le *PPM* est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au *PPM*, relativement faible sur une large gamme de puissance.

III.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les différents types des algorithmes de la commande *MPPT* d'une chaîne de conversion photovoltaïque et mis en évidence les problèmes de transfert de puissance entre la source et la charge lors d'une connexion directe. Et une solution permettant d'optimiser la puissance fournie par le *GPV*, consistant à introduire un étage d'adaptation associé à une commande de recherche du point de puissance maximum.

La comparaison des différentes méthodes a alors été dressée en fonction de plusieurs critères, ce dernier peut être une aide pour un concepteur, dans le choix d'une commande *MPPT*, en fonction de ses exigences (coût, complexité, précision, vitesse de convergence,...). Les critères de qualité que nous avons avancés dans ce chapitre se veulent contribuer à une réflexion générale et ne sont en aucun cas exhaustifs. Ils nous ont cependant aidés à mettre au point une commande *MPPT* qui soit la plus performante possible dans une large plage de fonctionnement.

CHAPITRE VI

Commande et Simulation du système solaire

VI.1. Introduction

Les systèmes photovoltaïques se divisent en deux catégories : les systèmes autonomes et les systèmes raccordés au réseau de distribution. Les avancées technologiques de l'électronique de puissance ont permis de lever la plupart des verrous techniques liés à l'interaction entre les systèmes photovoltaïques et le réseau, ce qui résulte en une croissance rapide de ces systèmes au détriment des systèmes autonomes. La capacité cumulée des systèmes photovoltaïques installés dans le monde a atteint un chiffre important de système photovoltaïque connecté au réseau. Ce constat indique qu'il est primordial de concentrer les efforts de recherche dans cette thématique. Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique, ces derniers sont directement raccordés au réseau à l'aide d'un onduleur ou un étage de convertisseurs continu-continu/continu-alternatif.

Il y a un certain nombre de contraintes technologiques qui sont associées à cette liaison, en particulier la qualité du signal électrique réinjecté sur le réseau. Pour des raisons de sécurité, l'onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller toute éventuelle perturbation pouvant subvenir sur le réseau et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure.

Après avoir étudié et cité les différents composants d'un générateur photovoltaïque, et les différentes techniques de maximisation de puissance. L'étude, la commande et la simulation du système de conversion d'énergie solaire photovoltaïque considéré sans stockage est proposée.

VI.2. Les systèmes de conversion de puissance photovoltaïque

Ces dernières années, les établissements de recherche universitaires et les fournisseurs d'énergie électrique ont concentré leurs efforts à l'étude des impacts possibles des générateurs de puissance distribués (dont les systèmes photovoltaïques) sur le réseau de distribution électrique. La plupart de ces recherches se focalisent sur l'étude des réponses (statiques et dynamiques) et des performances des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique (lors de changements soudains de la tension du réseau, des défauts du système, de fluctuations de puissance dues au caractère intermittent de l'énergie solaire. Afin de détecter les défauts et de protéger les dispositifs et les systèmes, diverses solutions de contrôle ont été développées. Néanmoins, l'intégration des systèmes photovoltaïques dans les réseaux de distributions basse tension n'a pas eu beaucoup d'intérêt dans le passé, et les efforts de recherche étaient principalement focalisés sur le cas des réseaux

de distribution haute et moyenne tension. De nos jours, les réseaux de distribution doivent être plus actifs compte tenu des systèmes de production décentralisés qui y sont raccordés. Il était donc primordial de revoir les approches d'analyse afin de faire des investigations plus précises sur l'impact de l'intégration des systèmes photovoltaïques sur le réseau.

La conversion de puissance peut contenir les deux étapes, une première conversion DC/DC puis une conversion DC/AC. Dans les systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux, le convertisseur DC/DC a généralement le rôle d'augmenter la tension pour que l'onduleur puisse réaliser un courant sinusoïdal à la tension du réseau. Une des structures des systèmes photovoltaïques connectés au réseau est présentée par la figure VI.1 [24].

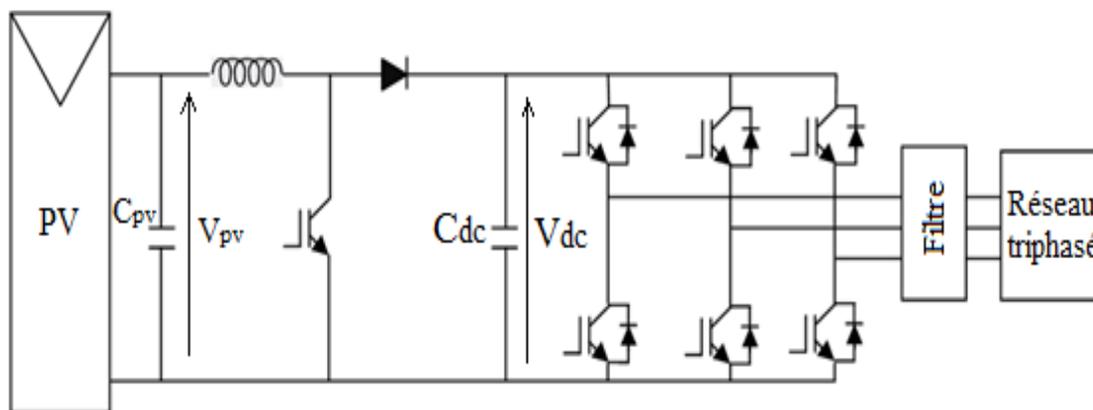


Fig VI. 1. Une structure de système photovoltaïque relié au réseau

Le système présenté par la figure précédente se compose des éléments suivants :

- Un générateur photovoltaïque obtenu par la mise en série/parallèle de panneaux photovoltaïques ;
- Un convertisseur DC-DC boost commandé pour assurer la fonction MPPT pour chaque module ;
- Un onduleur dont la fonction est le raccordement du générateur PV au réseau ;
- Le contrôle proposé vise à assurer une tension continue fixe côté DC (entrée de l'onduleur) et un courant alternatif de bonne qualité (moins de distorsion harmonique) et synchronisé avec la tension du réseau (facteur de puissance très proche de l'unité). Un signal MLI est utilisé pour ce contrôle.

VI.3. Configurations des systèmes PV reliés au réseau

Selon le type de connexion du générateur PV à l'unité de conditionnement de puissance, les systèmes PV reliés au réseau peuvent être classifiés en 4 configurations : onduleur par module, onduleur par chaîne de modules, onduleur par multi-chaîne et onduleur centralisé (figure VI.2). Chaque configuration est caractérisée par la façon de regrouper les modules panneaux photovoltaïques et la configuration de l'onduleur utilisée.

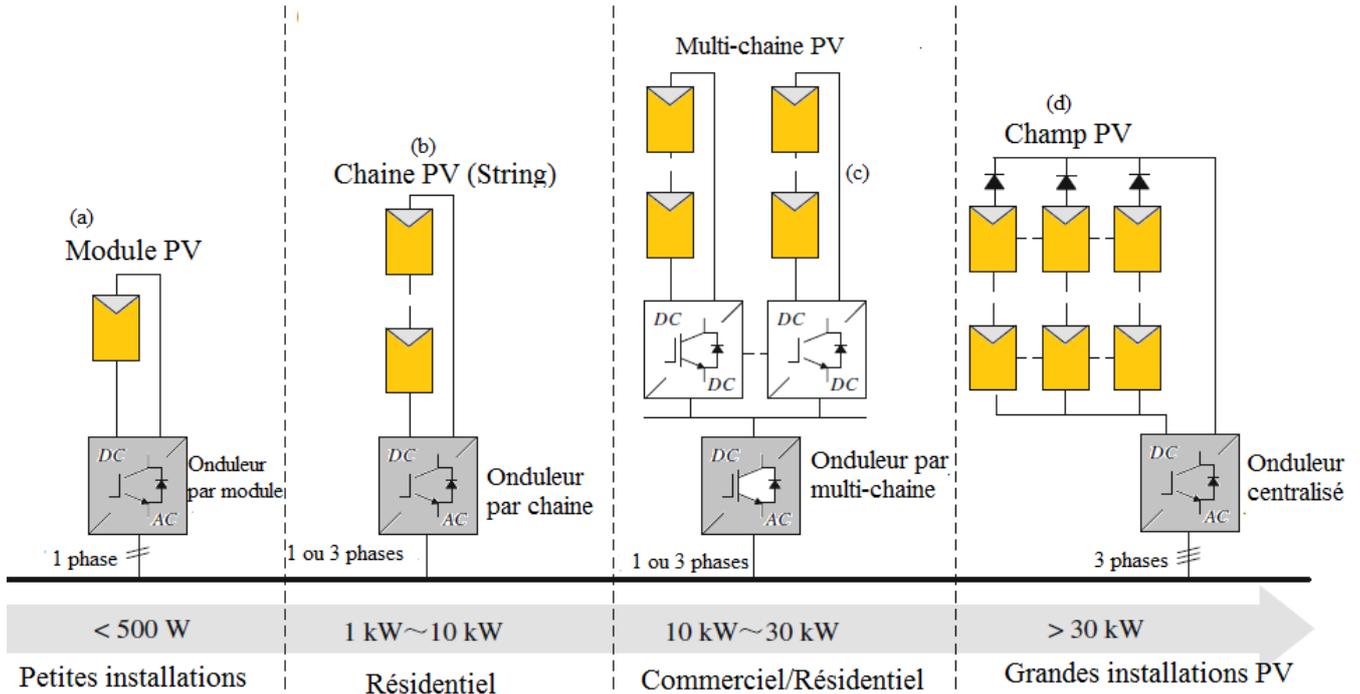


Fig VI. 2. Architectures des systèmes photovoltaïques [25]

(a) onduleur par module, (b) onduleur par chaîne, (c) onduleur par multi-chaîne, (d) onduleur centralisé

Les systèmes PV peuvent être raccordés soit au niveau du transport de l'énergie électrique soit à la distribution. Ces systèmes sont classés, en fonction de leur puissance, en trois catégories. Les systèmes reliés à la haute tension, de puissance de 1 à 10 MW, sont généralement connectés en les trois phases du réseau et nécessitent des transformateurs de connexion. Les systèmes de niveau moyen se situent entre 10 à 1000 kW de puissance et sont connectés au niveau de la distribution. Ces systèmes alimentent de grands bâtis (sites gouvernementaux, buildings commerciaux...). Les systèmes PV de niveau inférieur (moins de 10kW de puissance) sont connectés au niveau du réseau résidentiel et ne nécessitent pas l'utilisation de transformateurs pour leur connexion.

VI.4. Contrôle de la puissance active et la puissance réactive injectées au réseau

Un système photovoltaïque est appelé surtout à fournir de la puissance active à des charges ou au réseau. Dans le cas des systèmes connectés au réseau, la puissance active injectée doit être contrôlée de façon à ne pas perturber le bon fonctionnement du réseau. Deux modes de fonctionnement sont possibles. Le mode le plus commun est l'injection d'un courant sinusoïdal parfaitement synchronisé avec la tension du réseau. Ceci est souvent exigé par le fournisseur d'énergie électrique où aucune injection de puissance réactive n'est permise. Plusieurs contrôles sont développés à cette fin. Dans le deuxième mode de fonctionnement, le système photovoltaïque peut être appelé, en plus d'assurer de la puissance active, d'injecter de la puissance réactive afin de compenser la puissance réactive des charges inductives. Les charges inductives (en particulier les moteurs) imposant un déphasage du courant par rapport à la tension et ceci pose énormément de problème pour le réseau (surdimensionnement de ses composants...). La solution la plus commune est l'emploi de bancs de batteries pour compenser la puissance réactive des charges inductives. Cette fonction peut en effet être assurée par les systèmes photovoltaïques déjà installés. Il suffit de contrôler l'amplitude et le déphasage du courant injecté (donc la puissance réactive injectée). Le contrôle proposé permet un fonctionnement en mode « synchronisation » ou en mode « compensation de la puissance réactive » [26].

VI.4.1 Stratégie de contrôle

Le contrôle se fait via une boucle qui régule la puissance active et la puissance réactive injectées au réseau.

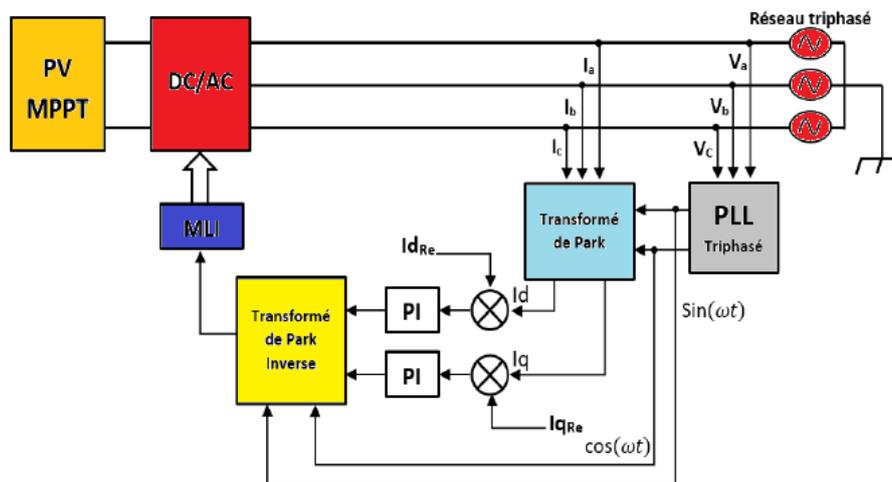


Fig VI. 3. Contrôle de la puissance active et la puissance réactive injectées au réseau

Ce contrôle consiste à appliquer la transformée de Clark-Park (dq_0) pour les courants du réseau. Cette transformée permet dans le cas de réseau triphasé équilibré de transformer trois grandeurs alternatives en deux grandeurs stationnaires. Cela simplifie considérablement les calculs. Une fois la solution calculée, la transformation dq_0 inverse est utilisée pour retrouver les grandeurs triphasées correspondantes. Une PLL triphasée est nécessaire pour avoir les informations de la fréquence et de la phase des tensions du réseau, nécessaires au calcul des transformées dq_0 et dq_0 inverse.

Les composantes I_d et I_q du courant dans le nouveau repère dq sont donnés par :

$$I_d = \frac{2}{3} \left[I_a \sin(\omega t) + I_b \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{VI.1})$$

$$I_q = \frac{2}{3} \left[I_a \cos(\omega t) + I_b \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_c \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{VI.2})$$

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \quad (\text{VI.3})$$

Dans le repère $d-q$, les puissances active et réactive sont données par les formules suivantes :

$$P = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (\text{VI.4})$$

$$Q = \frac{3}{2} (V_d I_d \pm V_q I_q) \quad (\text{VI.5})$$

V_q est nulle. Les expressions de la puissance active et la puissance réactive deviennent donc :

$$P = \frac{3}{2} (V_d I_d) \quad (\text{VI.6})$$

$$Q = -\frac{3}{2} (V_d I_q) \quad (\text{VI.7})$$

V_d est la tension maximale entre phase et est donc égale à $\sqrt{3} * 220V$

Le contrôle de la puissance active se fait donc en contrôlant le courant I_d et le contrôle de la puissance réactive se fait en contrôlant le courant I_q . Ce contrôle vectoriel permet un contrôle découplé indépendant de la puissance active et réactive.

Les écarts entre les valeurs actuelles et les valeurs de référence des courants I_q et I_d sont introduites à des correcteurs PI pour générer des signaux de référence pour le générateur MLI utilisé pour commander l'onduleur triphasé.

Les puissances active et réactive de référence ont des valeurs stationnaires dans le repère dq, il suffit donc d'utiliser des correcteurs PI pour contrôler les puissances active et réactive actuelles. Les sorties des correcteurs PI doivent subir une transformée dq_0 inverse pour retourner au repère triphasé naturel ou un control vectoriel par MLI est possible. Le control MLI présente l'avantage d'éloigner les fréquences des harmoniques et faciliter grandement le filtrage. La figure VI.4 et VI.5 présentent le système photovoltaïque connecté aux réseaux et le contrôle des puissances injectées au réseau sous Simulink.

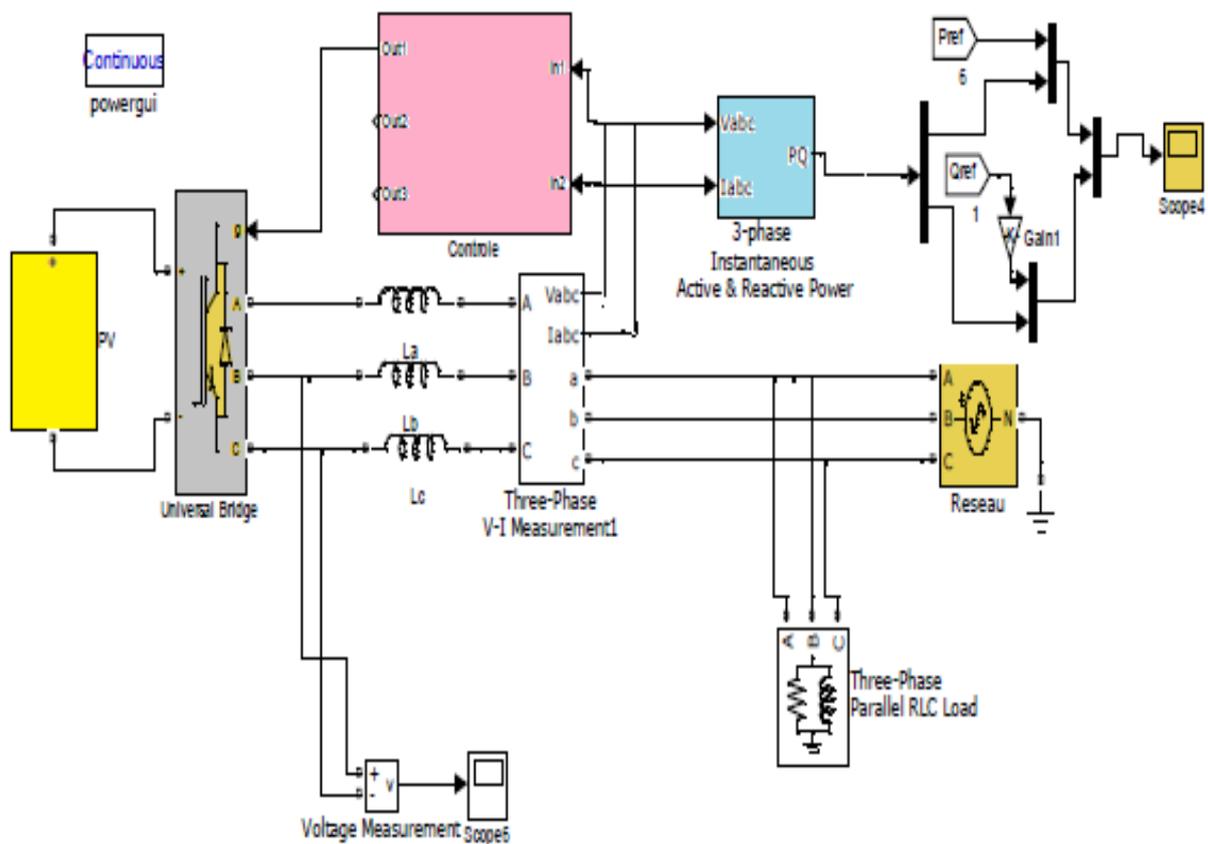


Fig.VI.4.Système PV raccordé au réseau sous Simulink

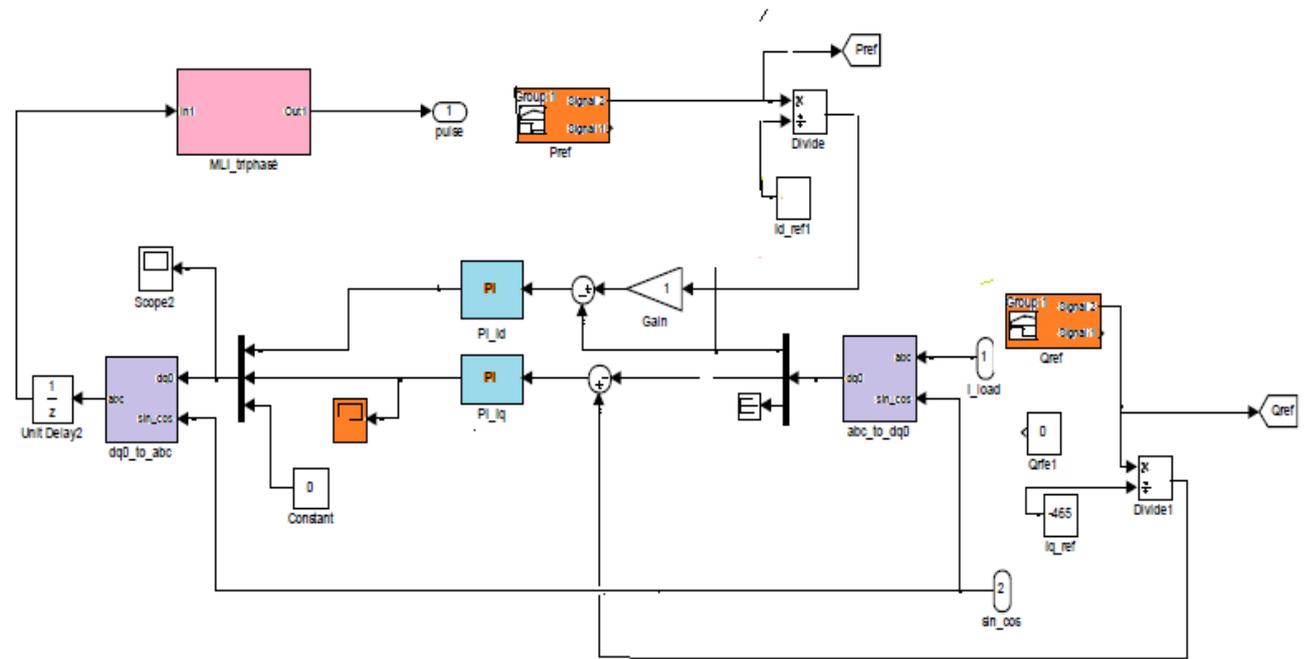


Fig.VI.5. Contrôle des puissances injectées au réseau sous Simulink.

VI.5. Système photovoltaïque connecté au réseau électrique considéré

Le système considéré sous Simulink est représenté par la figure VI.5 suivante :

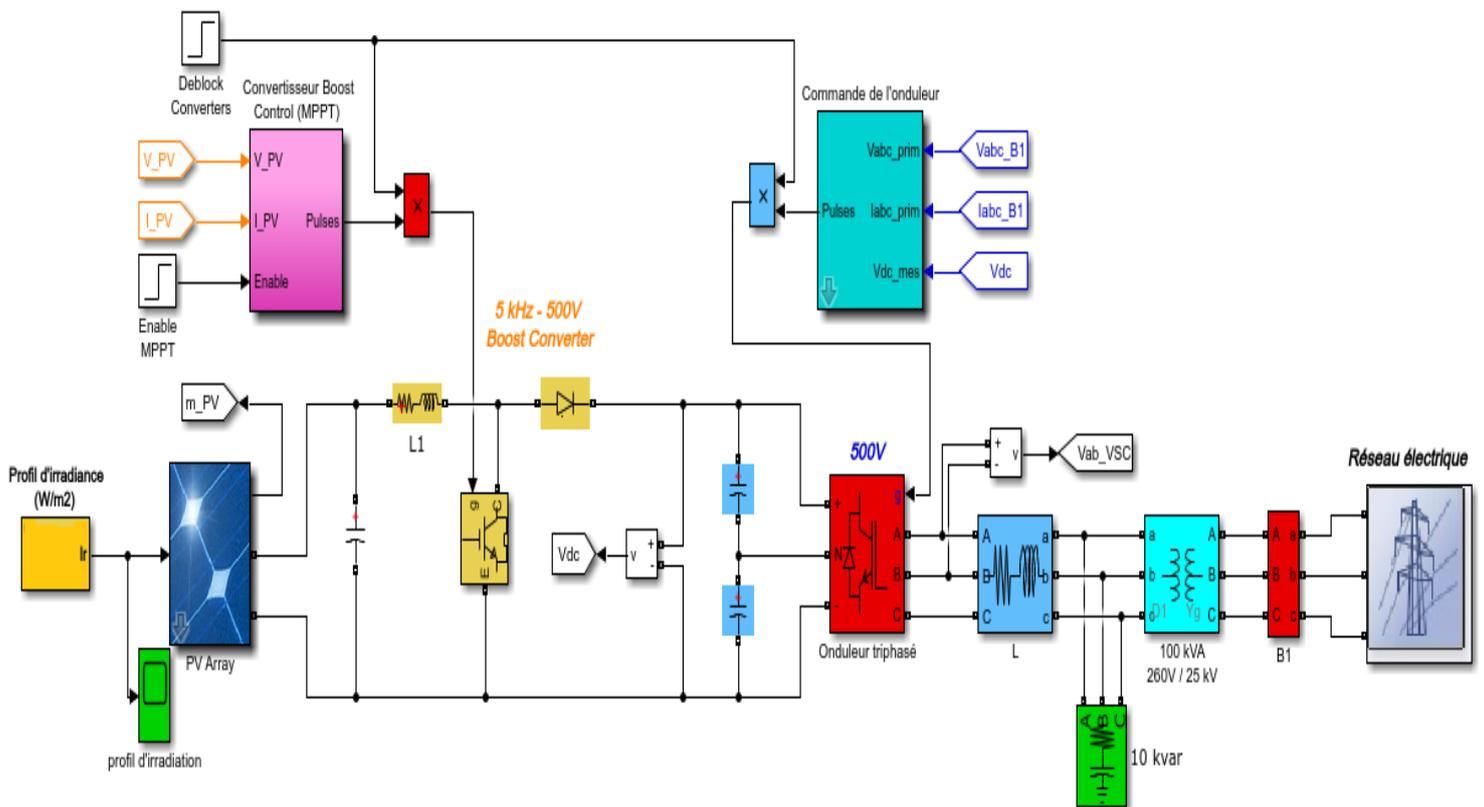


Fig.VI.6. Schéma synoptique du système photovoltaïque connecté au réseau électrique considéré

IV.5.1. Générateur photovoltaïque

Dans cette étude, nous avons utilisé le module Sanyo HIP-225HDE1 d'une puissance de 150W qui contient 60 cellules PV en série. Les caractéristiques électriques du module PV sont données par le figure VI.7 suivante :

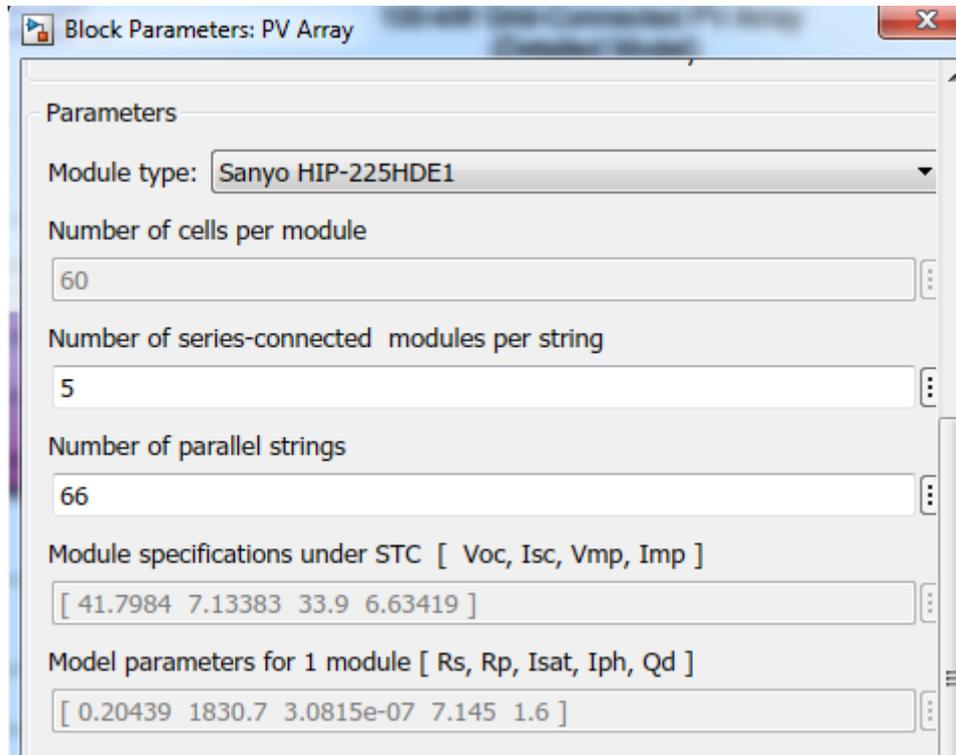


Fig.VI.7.Caractéristiques électriques du Module Sanyo HIP-225HDE1

VI.6. Résultats de simulations

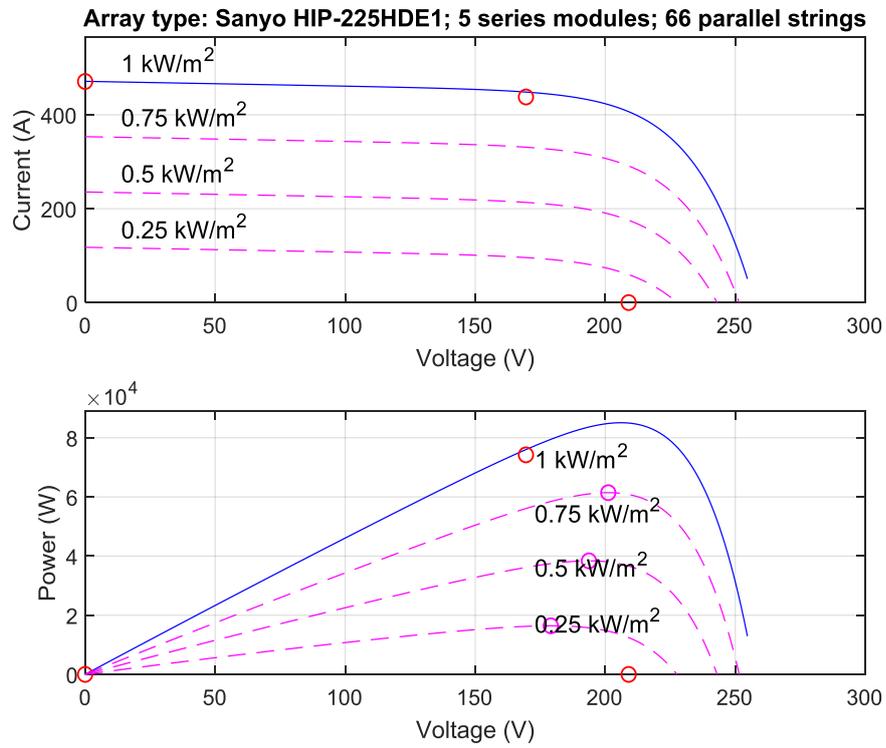


Fig VI.8. Caractéristiques $P=f(v)$ et $I=f(v)$ du panneau photovoltaïque utilisé

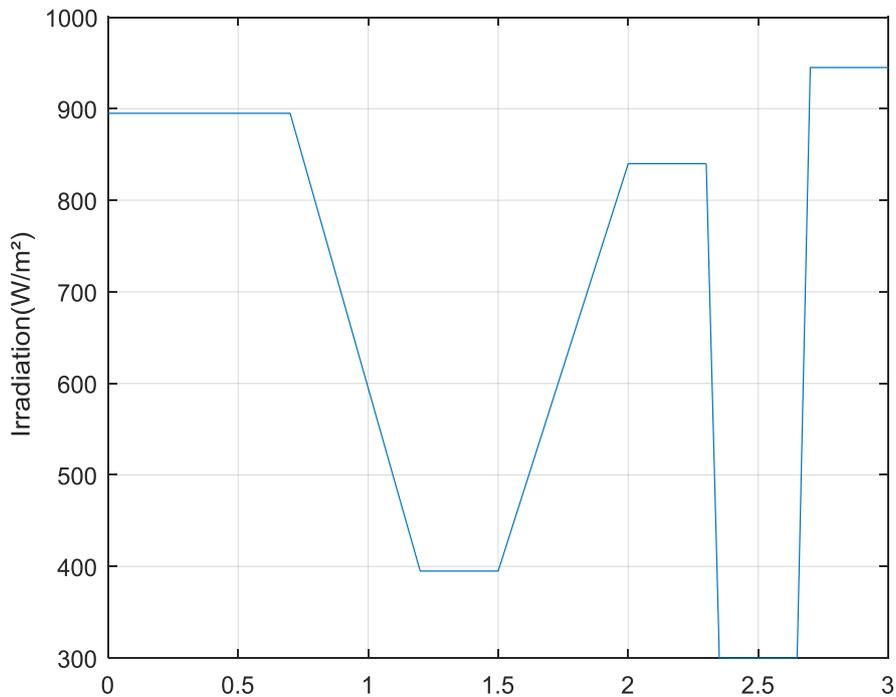


Fig. VI.9. Profil d'irradiation solaire

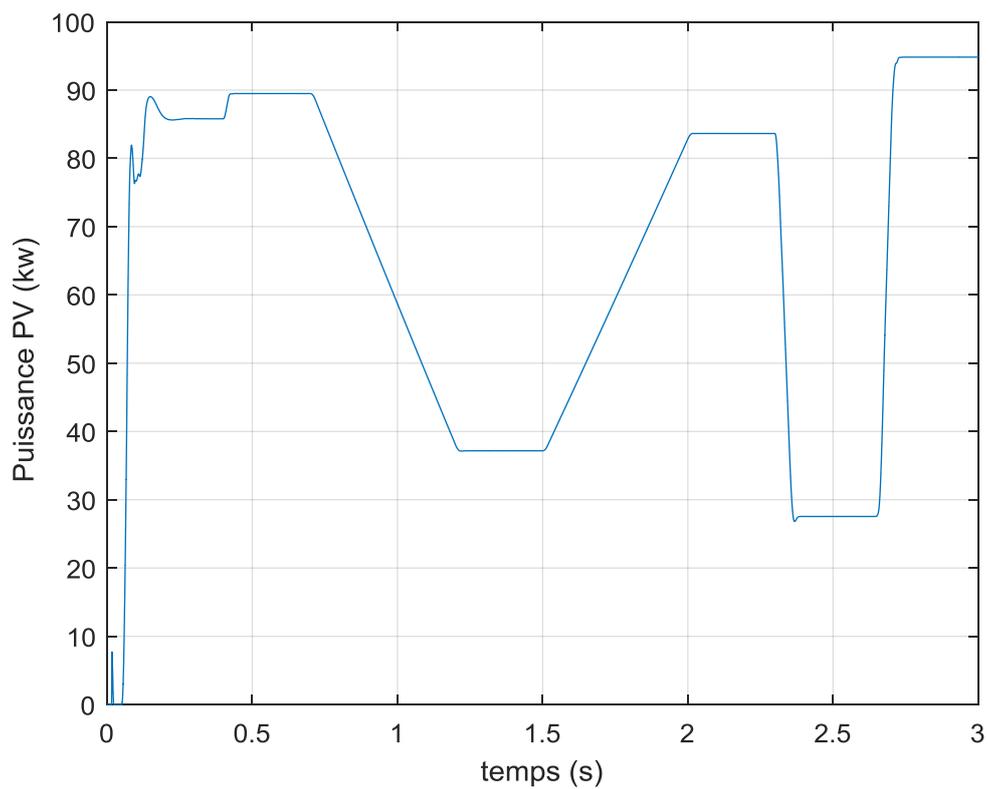


Fig. VI. 10. Puissance délivrée par les panneaux PV

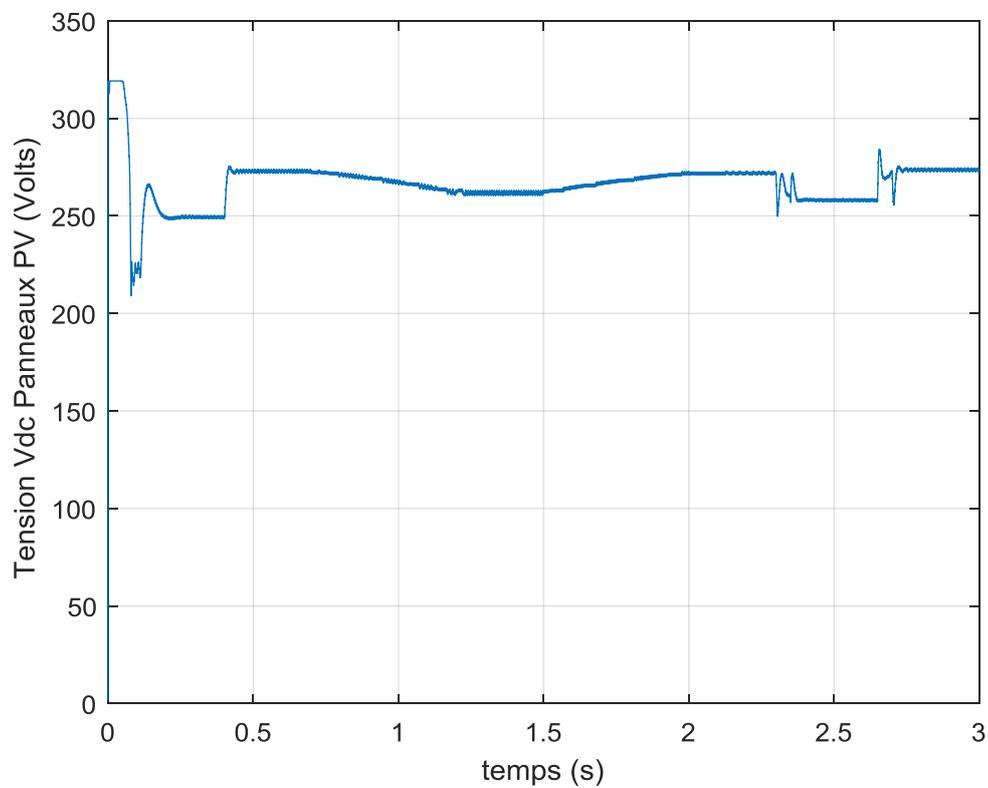


Fig. VI.11. Tension délivrée par les panneaux PV

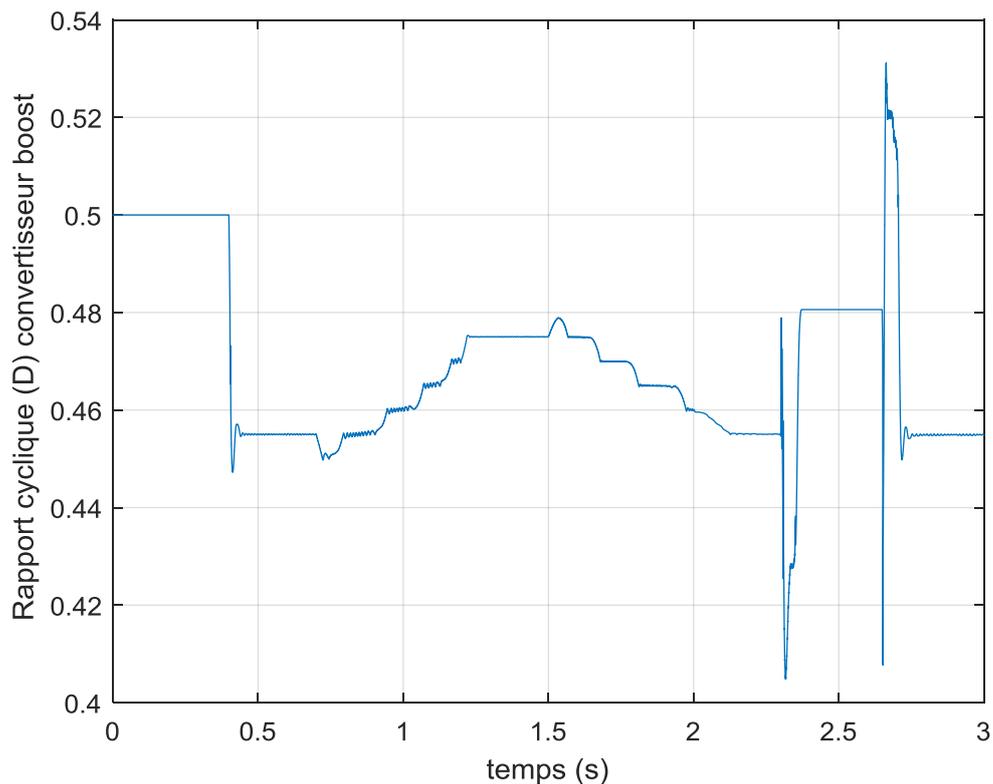


Fig. VI.12. Rapport cyclique convertisseur Boost

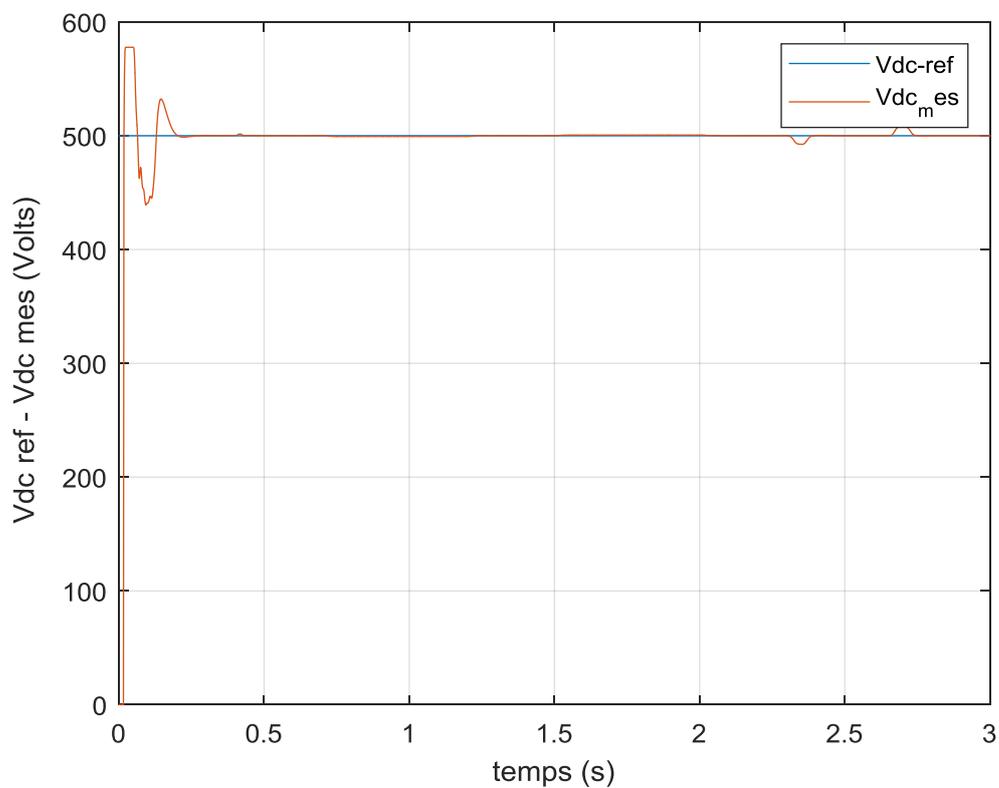


Fig. VI.13. Tension V_{dc_ref} et V_{dc_mes} boostée

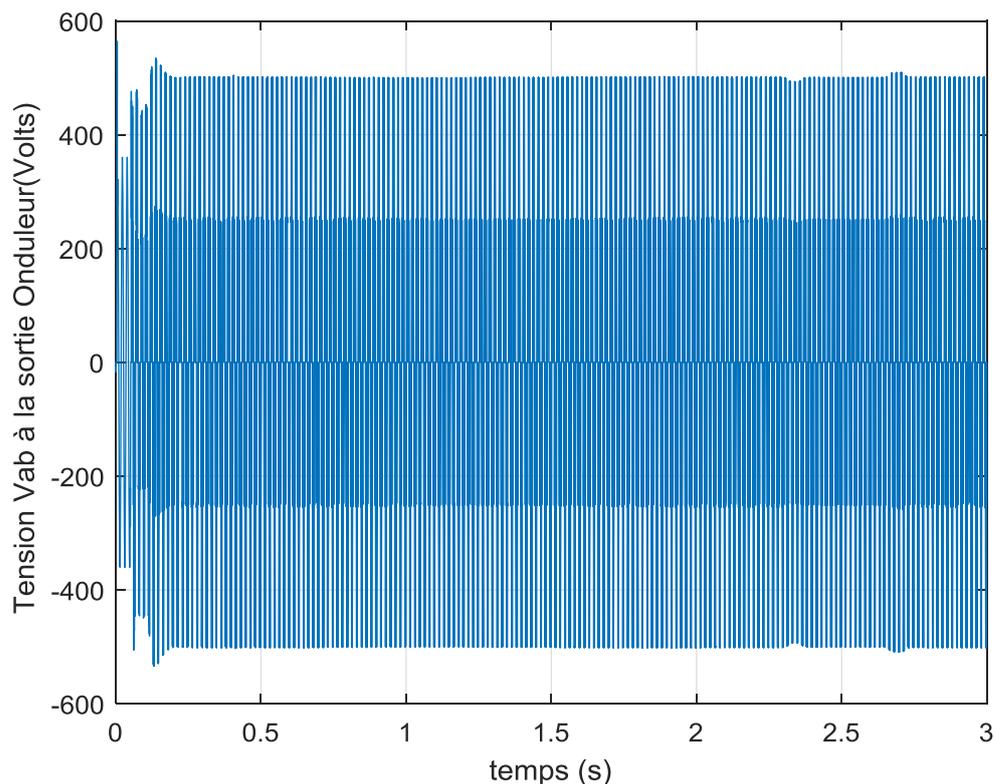


Fig. VI.14. La tension V_{ab} à la sortie de l'onduleur délivrée par les panneaux PV

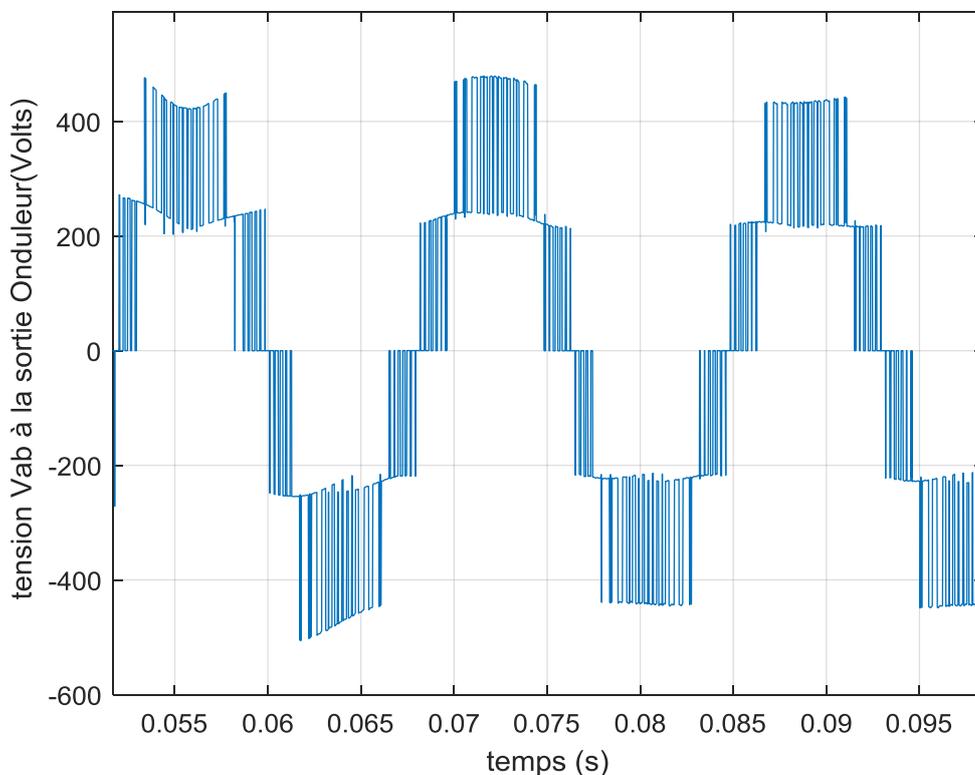


Fig. VI.15. Zoom de la tension V_{ab} à la sortie de l'onduleur délivrée par les panneaux PV

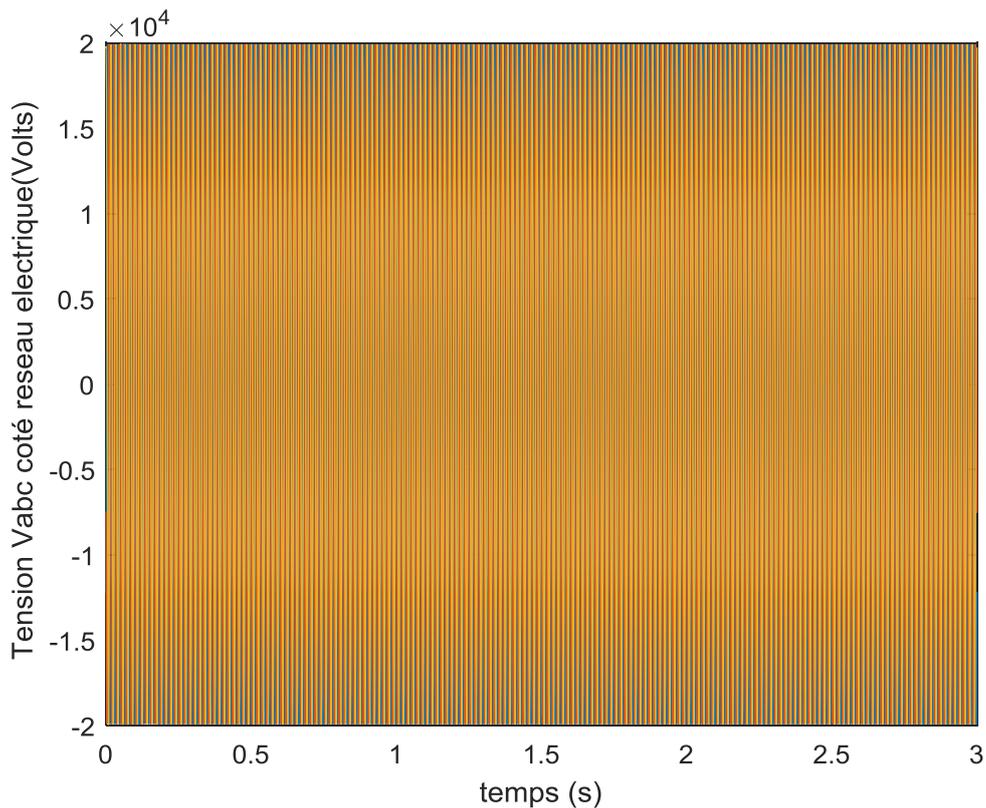


Fig. VI.16.Tension V_{abc} coté réseau électrique

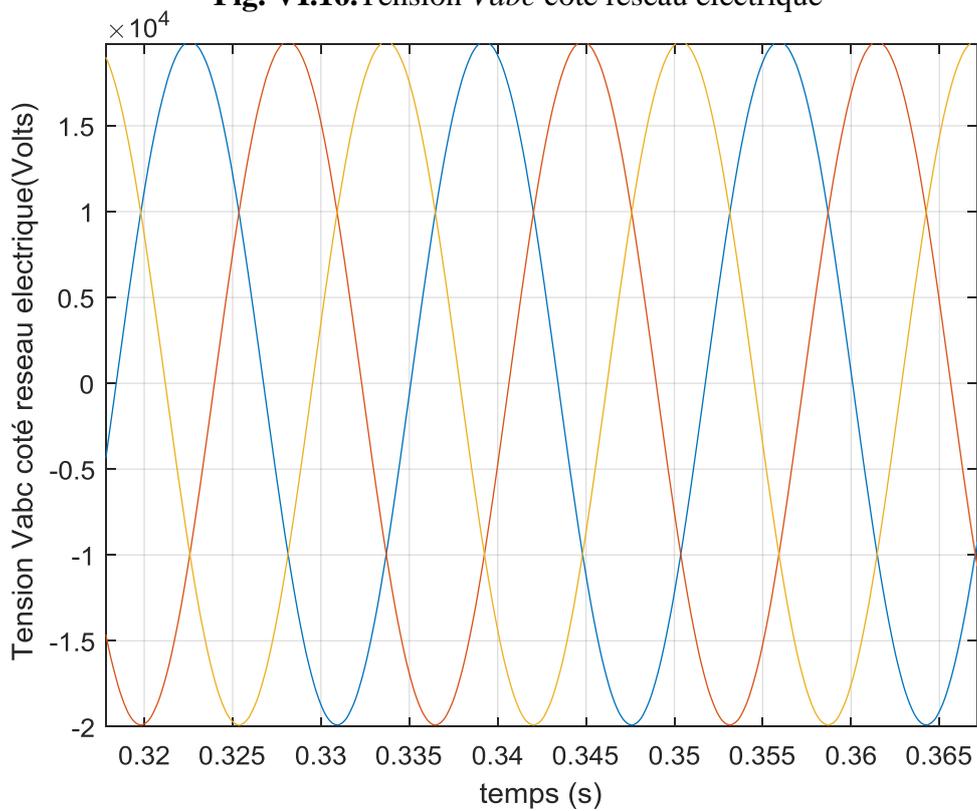


Fig. VI.17.Zoom Tension V_{abc} coté réseau électrique

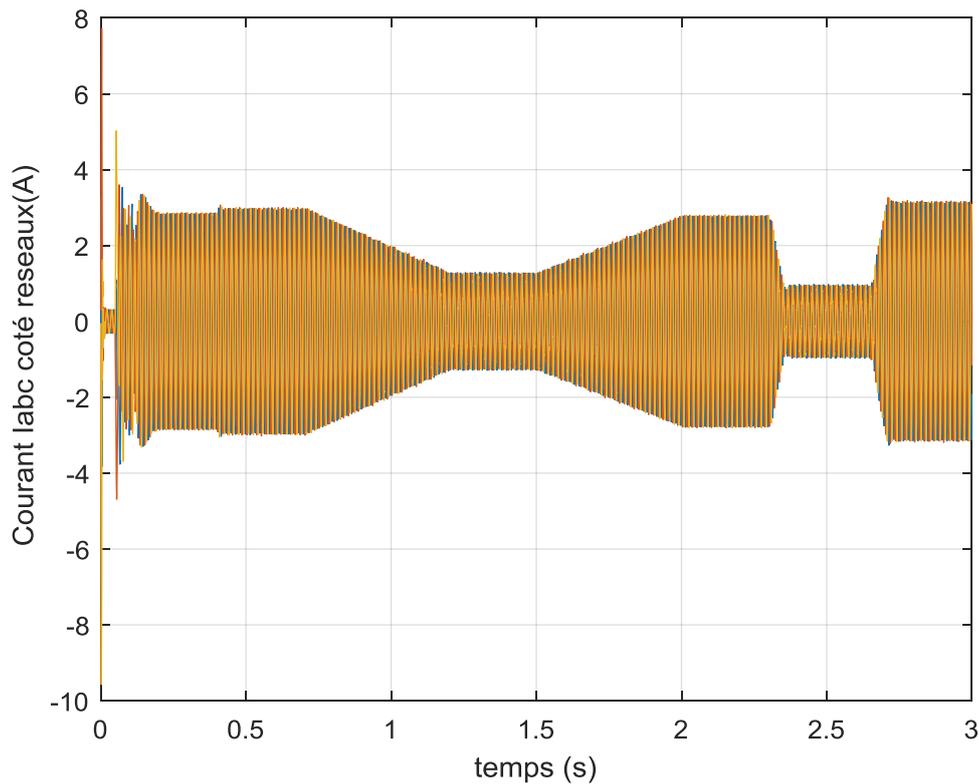


Fig. VI.18.Courant I_{abc} coté réseau électrique

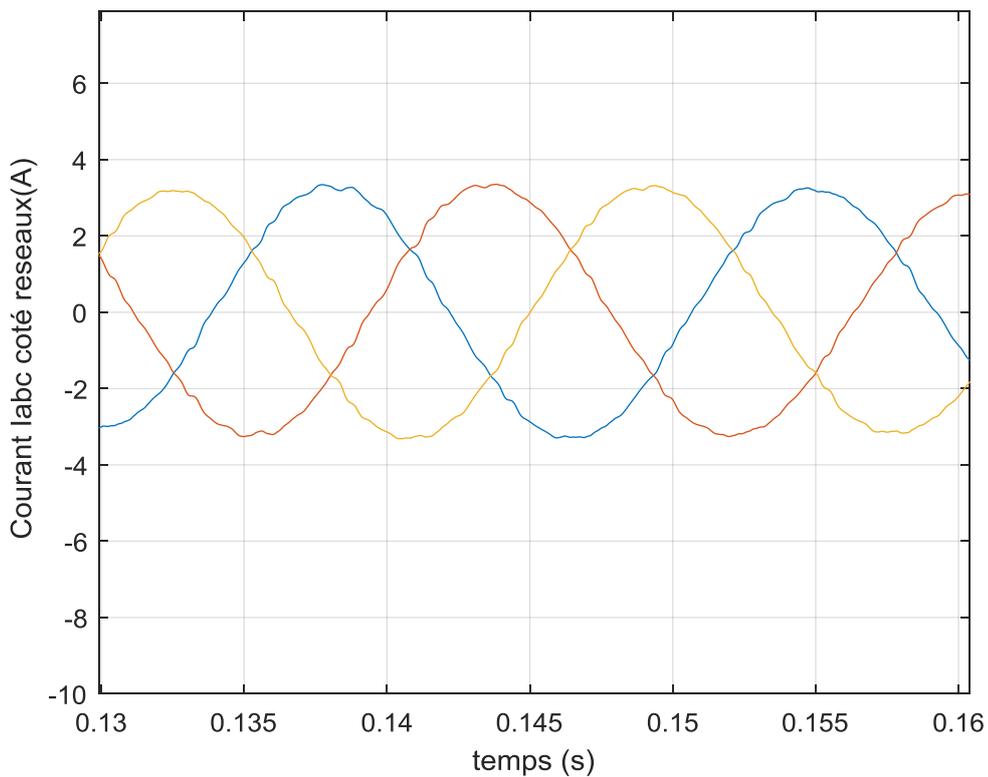


Fig. VI.19.Zoom Courant I_{abc} coté réseau électrique

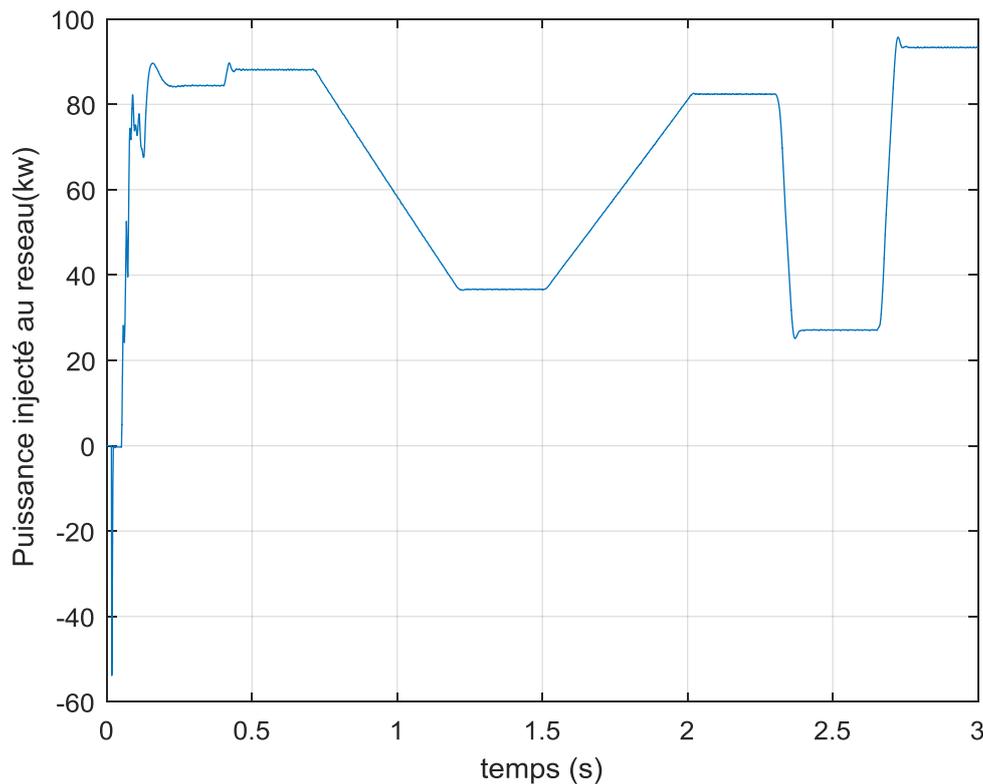


Fig. VI.20. Puissance injecté au réseau électrique

VI.7. Interprétations des résultats

La simulation du GPV sous les conditions standard ($E = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ$), les courbes de ses caractéristiques électriques $P=f(v)$ et $I=f(v)$ du panneau photovoltaïque considéré sont donnés par la figure VI.8 pour observer l'influence des conditions externes éclairément et température sur ces caractéristiques.

Afin d'analyser le comportement du système et en particulier la commande MPPT incrémental inductance, nous avons fait varier le niveau de rayonnement selon le profil donné par la figure VI.9. Au début, il commence à partir de 900 w/m^2 , puis il décroît jusqu'à la valeur de 400 W/m^2 et il augmente jusqu' atteindre une valeur de 950 W/m^2 .

Les différents paramètres de simulation sont : fréquence du MPPT 50Hz, fréquence de commutation de l'hacheur Boost 5 kHz, le pas de perturbation de la commande MPPT 0.05, le rapport cyclique initial 0.5.

La figure VI.10 présente la puissance produite par le GPV qui atteint 95 kW lorsque le niveau de rayonnement est de 950 W/m^2 . La puissance diminue aussi tôt que le niveau de l'éclairément diminue. On voit bien sur la figure que la commande MPPT incrémental inductance parvient à poursuivre le MPP pour tout changement de l'éclairément.

Le maximum de puissance MPP est atteint après 0.45 secondes. A l'instant 0.5, le MPP change de position à cause de la baisse du niveau de rayonnement, ce qui se traduit par une baisse de la puissance produite. A l'instant 1,5, le MPP change encore à cause de l'augmentation du niveau de rayonnement.

Sur la Figure VI.11, on voit que la tension du GPV augmentent par palier, ce qui correspond à la commande MPPT incrémentale inductance ce qui montre son impact sur la puissance produite. On remarque que la tension MPP varie peu en comparaison avec le courant MPP lors de la variation du niveau de rayonnement.

Sur la figure VI.12, Le rapport cyclique initial vaut 0.5. La commande MPPT incrémentale inductance varie ce dernier afin d'atteindre le MPP. Une oscillation apparaît une fois que le MPP est atteint. On remarque que, la valeur du rapport cyclique change pour poursuivre et atteindre le nouveau MPP. La figure VI.13 montre la validité de la commande proposée, on remarque que la tension mesurée suit parfaitement la tension de référence.

La figure VI.14 et VI.15 représente respectivement la tension a la sortie de l'onduleur et son zoom et la figure VI.16 et VI.17 illustre les deux grandeurs : tension et courant avec leur zoom coté réseau électrique et la dernière figure VI.20 montre l'allure de la puissance injectée au réseau électrique.

VI.8. Conclusion

Dans ce chapitre la simulation du système photovoltaïque global raccordé au réseau électrique avec tous les équipements formant le système considéré a été présentée. Cette étude a montré l'intérêt de la commande MPPT dans un système photovoltaïque et afin de montrer aussi le fonctionnement d'une source PV associée à un réseau électrique via un onduleur triphasé. La simulation des différents étages d'adaptation de puissance est réalisée. Le but de la modélisation et la simulation des composants du système considéré grâce au logiciel Matlab/Simulink est d'aider à comprendre les critères de conception et de dimensionnement des systèmes PV connectés au réseau. Ces critères permettent de déduire l'énergie électrique injectée au réseau.

Les résultats de simulation obtenus aussi bien en régime permanent qu'en transitoire sont présentés dans ce chapitre. Ils montrent la faisabilité de cette approche développée et valident ainsi les algorithmes de commande élaborés. La commande envisagée avec l'adaptateur MPPT permet d'optimiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement. Ce qui a permis de faire fonctionner la station au point de fonctionnement optimal de la source photovoltaïque.

*CONCLUSION
GENERALE*

Conclusion Générale

Actuellement et suite à l'accroissement la demande d'énergie électrique dans le monde et l'augmentation néfaste de l'effet de serrent poussés les scientifiques et les acteurs mondiaux à chercher à résoudre ces problèmes par l'intégration des nouvelles énergies renouvelables, abondante et non polluantes. Parmi ces énergies, l'énergie électrique produite par la conversion de l'énergie solaire photovoltaïque dont son majeur problème réside dans le fonctionnement optimal des panneaux photovoltaïques. La modélisation et la caractérisation électriques des panneaux actuellement commercialisés sont nécessaires afin d'optimiser leur fonctionnement et augmenter leur rendement d'une manière efficace.

La modélisation, la simulation, la commande et l'analyse du système de conversion d'énergie photovoltaïque connectée au réseau envisagé ont été abordé, adapté par des commandes numériques assurant la poursuite de la puissance maximale fournie parle générateur photovoltaïque. Ce choix est justifié par l'intérêt que portent les chercheurs et les industriels à ce type de structures photovoltaïque. En effet, le développement actuel dans le domaine des matériaux magnétiques qui permet une meilleure utilisation des générateurs photovoltaïques.

Dans un premier temps, le modèle de chaque élément constituant la chaîne de conversion a été proposée. Les différents constituants de la chaîne de conversion sont ensuite connectés entre eux afin de former le modèle complet qui est par la suite simulé dans l'environnement Matlab. Les résultats de simulation obtenus ont permis d'analyser le comportement du système de conversion d'énergie photovoltaïque considéré qui peuvent être utiles à la mise en œuvre d'un système de commande adéquat. Ensuite, le mécanisme de la poursuite du point maximum de puissance pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement a été simulé et analysé. Aussi, le modèle du système photovoltaïque, qui prend en compte la dynamique électrique du générateur en vue de sa commande est abordé. Le logiciel Matlab/Simulink est utilisé pour la simulation du modèle du système considéré. Les simulations apportées sur le système de conversion considéré associée au convertisseur électroniques de puissance d'adaptation de puissance ont été analysés en fonction des performances lors de diverses entrées de l'irradiation. Par conséquent, les résultats de la simulation du le modèle mathématique du système complet est réalisé dans ce mémoire et les résultats de simulation obtenues montrent la validité et l'efficacité du système proposé.

BIBLIOGRAPHIQUE

Bibliographie

[1]	L'effet photovoltaïque (photovoltaïque-energie.fr) https://photovoltaïque-energie.fr/l-effet-photovoltaïque.html
[2]	http://www.grenoble-isere.com/etudes-et-erritoires/pdf_filieres/Photovoltaïque_Etude2010_V14-Fr.pdf
[3]	Z.Layate, T.Bahi, H.Bouzeria, S.Lekhchine. Analyse de Deux Modèles Types de la Cellule Photovoltaïque Le 3ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, 2014.
[4]	L.Mohamed Lakhdar, Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla, thèse de magister, 93 page, page 17,18, 2008.
[5]	Seif Eddine NAFFOUTI, Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque, mémoire de projet de fin d'études, 97 pages, page 26,2012
[6]	L'association des modules PV, www.le_solaire_pour_tout.fr
[7]	André T.T. Guingane, Z. Koalaga, E. Simonguy, F. Zougmore, D. Bonkougou, modélisation simulation d'un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur elevateur de tension(boost) avec le logiciel matlab/simulink, journal international de technologie, de l'innovation, de la physique, de l'énergie et de l'environnement, issn, 2016.
[8]	A.C. Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques, " Institut National de Science Appliquée de Toulouse, Thèse de doctorat.29/09/2006
[9]	A.Lyes, "Etude de connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque," UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU, Mémoire de Magister, 2011
[10]	M. SLAMA Fateh 'Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques Interconnectés au réseau électrique ' Mémoire de Magister, université Ferhat Abbas - Sétif-24/06/2012
[11]	Yaakoub Benyahia, 'Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT', Mémoire de fin d'études, 60 pages, page 34-35, 22/06/2013
[12]	bensaci wafa 'modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapte par une commande MPPT ' thèse master en génie électrique université de Ouargla 2011.
[13]	malki sihem 'maximum power point tracking(MPPT) for photovoltaic Systems ',these magister, université de Boumerdass, 2011
[14]	Akihiro Oi'design and simulation of photovoltaic water pumping system'', A Thesis Presented to the Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2005
[15]	Cédric CABAL, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque. T H E S E OCTORAT DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE Délivré par l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, Le 15 Décembre 2008
[16]	A. F. Boehinger, "Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply", IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems, pp. 102-111, 1968.

[17]	Alayat Mahmoud , Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents , mémoire de master ,Université Badji Mokhtar Annaba , juin 2017
[18]	Abdelhak AZIZ « Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques, Conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire » UNIVERSITE TOULOUSE
[19]	Hannes Knopf, AAnalysis " Simulation and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar owerd vehicle" thesis, Portland state university 1999.
[20]	W. J. A. Teulings, J. C. Marpinard, A. Capel, and D. O'Sullivan, "A new maximum power point tracking system", IEEE Power Electronics Specialists Conference 1993, PESC'93, pp. 833-838, Jun. 1993.
[21]	W. Xiao, W. G. Dunford, "Evaluating maximum power point tracking performance by using artificial lights", Industrial Electronics Society, IEEE IECON'04, Vol. 3, pp. 2883-2887, Nov. 2004.
[22]	J. H. Lee, H. B. Bo, H. Cho, "Advanced incremental conductance MPPT algorithm with a variable step size", Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, EPE-PEMC 2006. 12th International, pp. 603-607, Aug. 2006.
[23]	T. Y. Kim, H. G. Ahn, S. K. Park, Y. K. Le, "A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation", IEEE International Symposium on, Vol. 2, pp. 1011-1014, Jun. 2001.
[24]	Azzeddine Hocine Abdelhak, "Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques avec stockage connectés au réseau", thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Boudiaf, Oran, 2016.
[25]	T. K. Freddy, N. Abd Rahim. Photovoltaic Inverter Topologies for Grid Integration Applications. in : M.R. Islam, F.Rahman, W. Xu (Editeurs). Advances in Solar Photovoltaic Power Plants. Springer, Berlin Heidelberg, 2016, pp 13-42.
[26]	Belmeliani Mohammed Réda et YoucefWahiba,"Modélisation d'un système photovoltaïque relié au réseau : Contrôle des puissances active et réactive", Université Mustapha Stambouli De Mascara, 2018