

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2020



MEMOIRE

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

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Par : BOUCHTER Ammar
MOKRANE Choayb

Thème

**Comparaison entre différentes techniques de commande
MPPT d'un système solaire**

Soutenu publiquement, le : 30/09/2020 devant le jury composé de :

M. BOULOUH Mesaoud	Professeur	Univ. Guelma	Président
M.FERAGA Chams Eddine	MCA	Univ. Guelma	Examineur
M. MENDACIS Sofiane	MCA	Univ. Guelma	Encadreur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

*Avant tout, nous tenons à remercier Dieu le tout puissant et
miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage pour mener
à bien ce Modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier vivement Mr. MENDACI
Sofiane, notre encadreur, qui a fourni des efforts énormes, par ses
informations, ses conseils et ses encouragements.*

*Nous voudrions aussi exprimer nos remerciements aux membres de
jury d'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.*

*Nous exprimons aussi tous nos remerciements à tous les enseignants
du département de Génie*

Electrotechnique et Automatique

*Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de
loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.*

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à **Mes chers parents** qui ont peiné pour mon éducation, mes études et à mon bien-être.*

Que Dieu Allah le bénit.

*J'adresse également mes remerciements à mon petit fils **Mohamed wail** et mon **épouse**, qui a été admirables pendant tous ces mois pénibles, pendant lesquels mon mémoire a absorbé une grande partie de mon temps. Elle m'a été d'une aide et d'un secours très précieux.*

Mes frères et sœurs,

Toute ma famille,

Et tous mes amis.

BOUCHER ANMAR

Résumé : – Le recours aux énergies renouvelables et particulièrement au photovoltaïque peut être une solution à la demande croissante de l'électricité. Cette issue ne pollue pas l'atmosphère, évite les risques du nucléaire et indépendante des énergies fossiles qui sont mal répartis et épuisables. Cependant, la conversion PV reste à ce jour peu compétitif. Alors, l'optimisation du transfert d'énergie dans la chaîne de production est nécessaire. L'utilisation des convertisseurs statiques dotés de commande MPPT améliore le rendement de conversion sur une vaste plage d'applications.

L'objectif de ce travail est d'étudier et discuter trois types de techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT), à savoir : Perturbation et Observation (P&O), Incrémentation de la conductance (INC ou IncCond) et une version améliorée de l'INC. L'environnement Matlab-Simulink est utilisé pour analyser, puis interpréter les résultats de simulation de ces algorithmes, et par conséquent, montrer les performances et les limites de chaque algorithme.

Mots clés : – *système photovoltaïque – Commande MPPT – Point de puissance maximum – convertisseur DC-DC – énergie renouvelable – énergie solaire – simulation.*

Abstract :– The use of renewables energies, especially those of photovoltaic origin, can be a solution to the growing demand for electricity. This solution does not pollute the atmosphere, avoids nuclear risks and is independent of fossil fuels, which are poorly distributed and exhaustible. However, PV conversion remains to this day uncompetitive. Therefore, the optimization of energy transfer in the PV production systems is necessary. The use of static converters with MPPT control improves conversion efficiency over a wide range of applications.

The objective of this work is to study and discuss three types of maximum power point tracking techniques (MPPT), namely: Disturbance and Observation (P&O), Conductance increment (INC or IncCond) and an improved version of the INC. The Matlab-Simulink environment is used to analyze the simulation results of these algorithms, and therefore shows the performance and limitations of each algorithm.

Key words : –*photovoltaic systems –MPPT command – maximum power point – DC/DC converters - Energy Renewable - Energy Solar – simulation.*

ملخص : إن استخدام الطاقات المتجددة وخاصة الطاقة الكهروضوئية يمكن أن يكون حلاً للطلب المتزايد على الكهرباء. هذه الكيفية لا تلوث الغلاف الجوي، وتجنب مخاطر الطاقة النووية ومستقلة عن الموارد الحفرية المتوزعة بغير انتظام والقابلة للنفاذ. مع ذلك لا يزال التحويل الكهروضوئي إلى اليوم غير قادر على المنافسة. بالتالي، لا بد من الاستفادة المثلى من نقل الطاقة في سلسلة الإنتاج. إن استعمال المحولات الساكنة مع تقنيات التحكم MPPT يحسن من كفاءة التحويل على نطاق واسع من التطبيقات. الهدف من هذا البحث هو المساهمة في الاستفادة المثلى من سلسلة التحويل الكهروضوئية وذلك بدراسة ثلاث تقنيات لمتابعة نقطة الطاقة القصوى.

يتم التحقق من فعالية تقنيات نظام MPPT المقترحة عن طريق المحاكاة ضمن أدوات MATLAB/SIMULINK. بعدها يتم تحليل و مقارنة نتائج هذه المحاكاة بهدف استنتاج فعالية و سرعة كل تقنية.

كلمات مفتاحية : النظام الكهروضوئي- تقنية التحكم MPPT - نقطة الطاقة القصوى - المحولات الساكنة DC / DC - الطاقات المتجددة - الطاقة الشمسية - المحاكاة.

Table des matières

Introduction Générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I

Généralités sur les chaînes de conversion photovoltaïque

1. Introduction :.....	03
2. Cellule photovoltaïque :.....	04
2.1. Effet photovoltaïque :	04
2.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque:	04
2.3. Technologies des cellules solaires.....	05
2.3.1 Cellules solaires de la première génération :	06
2.3.2 Cellules solaires de la deuxième génération :	06
2.3.3 Cellules solaires de la troisième génération :	07
2.4. Nature des pertes dans une cellule solaire.....	08
2.5. Caractéristique courant – tension d'une cellule solaire.....	08
2.6. Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	10
2.6.1 Influence de l'éclairement.....	10
2.6.2 Influence de la température.....	10
3. Générateur photovoltaïque GPV.....	11
3.1. Constitution d'un générateur photovoltaïque	11
3.1.1. Association en série	12
3.1.2. Association en parallèle	13
3.1.3. Association mixte (série-parallèle)	13
3.2. L'ombrage partiel	14
3.3. Protections classiques d'un GPV	15
3.4. Zone de fonctionnement d'un module photovoltaïque	16
4. Installation des panneaux solaires	16
5. Système photovoltaïque	18
5.1. Système photovoltaïque autonome	18
5.2 Système photovoltaïque hybride autonome	18
5.3. Système photovoltaïque raccordé au réseau	19
6. Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	19
6.1. Avantages	19

6.2. Inconvénients	20
7. Conclusion	20

Chapitre II

Modélisation et interfaces d'électronique de puissance pour l'optimisation des systèmes photovoltaïques

1. Introduction	21
2. Générateur photovoltaïque.....	21
2.1. Modélisation d'un GPV	21
2.2. Simulation d'un GPV a une seule diode.....	23
2.3 Influence de l'éclairement et la température sur le GPV.....	26
2.3.1. Influence de l'éclairement.....	26
2.3.2 Influence de la température	27
2.4 Influence des résistances série et parallèle sur le GPV.....	27
3. Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation.....	28
3.1. Hacheur survolteur (BOOST)	29
3.2. Simulation du convertisseur BOOST alimentant une charge résistive.....	31
4. Principe de la recherche du point de puissance maximale.....	33
4.1. Introduction sur les techniques MPPT.....	33
4.2. Classification des technique MPPT	34
5. Conclusion	34

Chapitre III

Comparaison entre plusieurs techniques de commande MPPT

1. Introduction	35
2. La commande Perturbation et Observation.....	35
3. La commande Incrémentation de la Conductance.....	37
4. La commande Incrémentation de la Conductance améliorée.....	40
5. Comparaison par simulation entre les trois méthodes.....	42
6. Conclusion	48
7. Conclusion générale et perspectives.....	49

Liste des Figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Panneaux photovoltaïques.	03
Figure I.2	Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium	05
Figure I.3	Répartition de la production des cellules	05
Figure I.4	Cellule solaire mono- cristalline	06
Figure I.5	Cellule poly cristalline	06
Figure I.6	Cellule MWT [8]	06
Figure I.7	Cellule Amorphe à couche mince	07
Figure I.8	Cellule CdTe	07
Figure I.9	Cellule Solaire multi-jonctions	08
Figure I.10	Cellule Solaire organique	08
Figure I.11	Cellule Solaire à colorant	08
Figure I.12	Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	09
Figure I.13	Influence de l'éclairement sur $I(V)$ et $P(V)$ à $T=25^{\circ}C$ d'une cellule photovoltaïque	10
Figure I.14	Influence de la température sur $I(V)$ et $P(V)$ à $E=1000 \text{ W/m}^2$ d'une cellule PV	11
Figure I.15	Module photovoltaïque	12
Figure I.16	Influence de l'association des cellules en série sur un module photovoltaïque [13]	12
Figure I.17	Influence de l'association des cellules en parallèle [13]	13
Figure I.18	Caractéristiques courant-tension pour différents assemblages de modules photovoltaïques (PV) en parallèle ou série	14
Figure I.19	Défaut d'ombrage partiel [17]	14
Figure I.20	Exemples d'association sécurisée de deux modules PV	15
Figure I.21	Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV [18]	15
Figure I.22	Caractéristiques $I_P(V_{PV})$ et $P_{PV}(V_{PV})$ d'un générateur PV	16
Figure I.23	sur le toit	17
Figure I.24	sur la façade	17
Figure I.25	Installation photovoltaïque autonome	18
Figure I.26	installation photovoltaïque hybride autonome	18
Figure I.27	Installation photovoltaïque couplée au réseau	19
Figure II.1	Modèle à une diode d'une cellule PV	22
Figure II.2	Schéma bloc du courant I_{ph}	24
Figure. II.3	Schéma bloc du courant I_0	24

Figure. II.4	Schéma bloc du courant I_0 dans les conditions STC	24
Figure. II.5	Schéma bloc du courant I_{sh}	25
Figure. II.6	Schéma bloc du courant I_D	25
Figure. II.7	Schéma bloc du courant I_{pv}	25
Figure. II.8	Simulation modèle d'un GPV sous MATLAB/SIMULINK	26
Figure. II.9	Influence de l'irradiation solaire sur les caractéristiques (I-V) (P-V) d'un GPV 200 W	26
Figure. II.10	Influence de température sur les caractéristiques (I-V) (P-V)	27
Figure. II.11	L'influence de la résistance série R_s sur les caractéristiques (I-V) et (P-V)	28
Figure. II.12	Influence de la résistance shunt R_p sur les caractéristiques (I-V) et (P-V)	28
Figure. II.13	Chaîne de conversion photovoltaïque	29
Figure. II.14	Schéma de principe d'un convertisseur BOOST	29
Figure. II.15	Schémas équivalents du hacheur survolteur a) K fermé, (b) : K ouvert	30
Figure. II.16	schéma bloc d'une chaine de conversion photovoltaïque sous Matlab/Simulink	31
Figure. II.17	Courbe du courant et de tension à la sortie du hacheur BOOST	32
Figure. II.18	Courbe de puissance à la sortie du hacheur BOOST	32
Figure. II.19	Recherche du Point de Puissance Maximale [26]	33
Figure III-1	Organigramme de la commande P&O	36
Figure III-2	Diminution de la tension en même temps d'une augmentation de l'irradiation	37
Figure III-3	Signe de la pente de la puissance sur la courbe P-V	38
Figure III-4	Organigramme de la commande IncCond, [32-35]	39
Figure III-5	Organigramme de la commande IncCond améliorée, [35]	40
Figure III-6	Schéma bloc de simulation du système photovoltaïque	42
Figure III-7	Structure de la commande MPPT P&O	43
Figure III-8	Structure de la commande MPPT IncCond	43
Figure III-9	Structure de la commande MPPT IncCond améliorée	44
Figure III-10	Variation de l'irradiation utilisée pour cette étude comparative	44
Figure III-11	Puissance du panneau obtenue par les trois méthodes.....45	45
Figure III-12	Rendement et variation de la puissance en fonction de la tension (P-V)	46
Figure III-13	Performances sans commande MPPT (PWM simple) avec un rapport cyclique optimal pour une irradiation de 1000 W/m ²	47

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Pourcentage approximatif de fonctionnement des modules solaires par rapport à leur orientation et à leur inclinaison [20]	17
Tableau II-1	Caractéristiques du module PV KC200GT (conditions STC)	23
Tableau III-1	Fonctionnement de la méthode P&O	36
Tableau III-2	paramètres du convertisseur Boost	42

Liste des acronymes et symboles

Acronymes

AC	Alternating current
DC/AC	Conversion continu/alternatif
DC/DC	Conversion continu/continu
GPV	Générateurs photovoltaïques
HC	Hill climbing
IncCond	Incrémentation de conductance
PPM	Point de puissance maximale
DC	Direct current
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P&O	Perturbation et observation
PF	Point de fonctionnement
PV	Photovoltaïque
CS	Convertisseur statique
STC	Standard test conditions
Wc	Watt-crête
I-V	Courant-tension
P-V	Puissance-tension
AC	Alternating current

Symboles

Symbole	Désignation
ΔE	Changement d'erreur
$\Delta \alpha$	Changement du Rapport cyclique du convertisseur
q	Charge élémentaire de l'électron
K_B	Constante de Boltzmann
I_{OPT}	Courant optimale de la cellule
I_D	Courant dans la diode
I_{Pv}	Courant de la cellule PV

I_{SC}	Courant de court-circuit de la cellule
I_S	Courant de saturation de la diode
I_{PV}	Courant du GPV
I_o, V_o	Courant et tension du bus continu
I_{max}	Courant maximale dans l'inductance
I_{min}	Courant minimale dans l'inductance
I_{opt}	Courant optimal du GPV
G	Eclairement
a	Facteur d'idéalité de la jonction
FF	facteur de forme de la cellule PV
L, C_1, C_2	Inductance, condensateur d'entrée, condensateur de sortie
N_P	Nombre de branches en parallèle
n_S	Nombre de cellules en série
N_S	Nombre de modules en série
I_{ph}	Photo courant
P	Puissance effectivement délivrée par le panneau
P_{max}	Puissance maximale
α	Rapport cyclique du convertisseur
n	Rendement de la cellule PV
r_p	Résistance parallèle de la cellule
R_P	Résistance parallèle du module PV
r_s	Résistance série de la cellule
R_s	Résistance série du module PV
V_{OPT}	Tension optimale de la cellule
V_{pv}	Tension de cellule PV
V_{OC}	Tension circuit ouvert de la cellule
V_{PV}	Tension du GPV
V_{OPT}	Tension optimale du GPV
V_e, V_S	Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur

Introduction générale

L'augmentation de la consommation mondiale de l'énergie et de l'électricité en particulier, à cause de plusieurs facteurs : voitures électriques, trains électriques, l'électroménager, etc. constitue un très grand défi pour tous les pays du globe. Sachant que les ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon, uranium,..) sont limitées et non (ou difficilement) renouvelables, l'option du recours à des énergies plus propres et renouvelables, est considérée aujourd'hui comme une solution alternative à moyen et court terme (voire à long terme). Parmi ces énergies renouvelables, l'éolien et le solaire (thermique ou photovoltaïque) sont potentiellement inépuisables. [1-5]

C'est dans ce contexte général que vient s'inscrire notre projet de fin d'étude qui porte sur la comparaison par simulation entre trois techniques de suivi du point de puissance maximale (en anglais : Maximum Power Point Tracking, MPPT) appliquées pour optimiser le fonctionnement des systèmes solaires photovoltaïques fonctionnant en mode isolé.

Pour mener à bien ce travail, nous l'avons scindé en trois chapitres :

- Le premier chapitre donne des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Une description générale des chaînes de conversion solaires photovoltaïques sera aussi présentée.
- Le second chapitre est consacré à la modélisation mathématique de tous les éléments qui constituent un système solaires photovoltaïque isolé, à savoir : le panneau solaire et le convertisseur de puissance DC/DC alimentant une charge résistive. Une classification, non exhaustive, des commandes de recherche de la puissance maximale sera présentée à la fin de ce chapitre.
- Dans le dernier chapitre, le plus important de ce mémoire, nous présenterons trois techniques de commande MPPT, ces techniques sont : la méthode de perturbation et observation (P&O), la méthode de l'incrément de la conductance (IncCond) et une version améliorée de la méthode IncCond qui utilise un pas auto-adapté. Une

étude comparative par simulation à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK sera présentée pour tester l'efficacité de chaque méthode.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale et des perspectives pour les futurs travaux sur les commandes MPPT des systèmes solaires PV.

Chapitre I

Généralités sur les chaînes de conversion photovoltaïque

1. Introduction

Le soleil constitue une réserve d'énergie renouvelable inépuisable et gratuite. L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer directement la lumière solaire en énergie électrique qui peut être exploitée directement après un étage d'adaptation. L'énergie solaire photovoltaïque offre une réponse durable aux enjeux énergétiques actuels. Elle contribue à limiter les émissions de CO₂ dans l'atmosphère et constitue une alternative aux énergies fossiles (Figure I.1). [2-6]

Dans cette partie, nous allons présenter des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Nous allons brièvement décrire les cellules solaires et le principe de la conversion photovoltaïque. Les différentes caractéristiques de celle-ci seront détaillées ainsi que les différentes configurations des systèmes photovoltaïques.



Figure I.1 Panneaux photovoltaïques.

2. Cellule photovoltaïque

2.1. Effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921), mais, il faudra attendre jusqu'au 1954 pour que les trois chercheurs américains des laboratoires Bell, Chapin, Pearson et Prince, développent la première cellule PV avec un rendement ne dépassant pas 4,5%. [3]

Le préfixe « photos » vient du grec qui signifie lumière et « voltaïque » vient du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta lequel a énormément contribué à la découverte de l'électricité [4-8].

2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur qui transforme l'énergie lumineuse absorbée en courant électrique. Le principe de fonctionnement est basé sur les propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs [1]. Le choix des matériaux utilisés pour la construction des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques des électrons qui sont susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire. Une fois libérée, le déplacement de ces électrons dans le matériau forme un courant électrique de type continu, qui donne naissance à une force électromotrice aux bornes de la cellule. Ce phénomène physique est appelé effet photovoltaïque. La figure I.2 illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium.

Comme pour le cas d'une diode classique, la cellule PV est généralement réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée positivement et l'autre dopée négativement. Entre les deux zones un champ électrostatique se crée et engendre une barrière de potentiel [5].

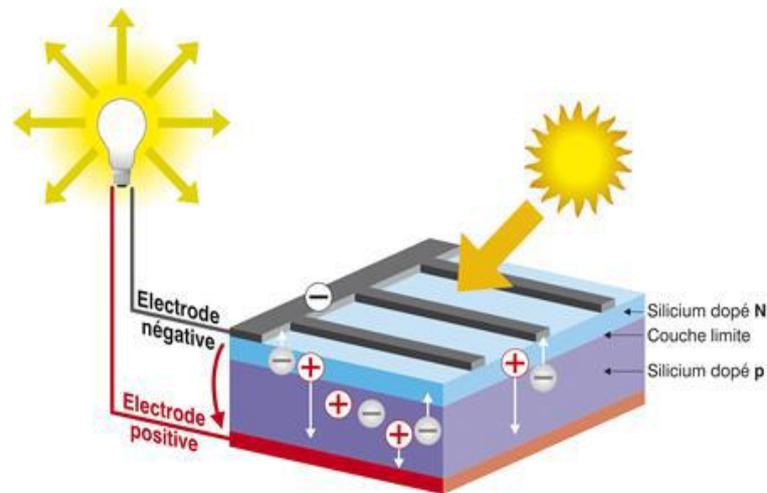


Figure I.2. Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium

2.3. Technologies des cellules solaires

Le matériau de base, utilisé généralement pour la fabrication des cellules PV, est le silicium cristallin. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des cellules plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly cristalline ou mono cristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellure de Cadmium (CdTe), Indium Gallium Phosphide (InGaP), et Cu(InGa) Se₂ comme indique dans la (Figure I.3).

Répartition de la production des cellules 2011

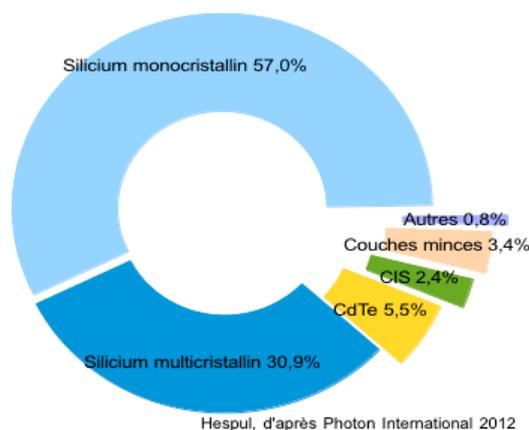


Figure I.3. Répartition de la production des cellules

Le choix parmi ces différentes technologies dépend du prix et du rendement énergétique. Cependant, l'évolution des technologies des cellules PV peuvent être regroupées, en trois générations à savoir, [6]:

2.3.1 Cellules solaires de la première génération

✚ **Silicium cristallin** : Le silicium cristallin (mono ou poly-cristallin) a le grand avantage d'être très abondant dans la croûte terrestre, il offre un rendement élevé de (15 à 25 %), mais l'inconvénient de cette technologie est l'utilisation d'un silicium très pur, dont l'épaisseur est d'environ 200 μm , ce qui augmente le coût des cellules (Figure I.4./I.5)[7].

✚ **Cellule de MWT** : Les cellules de MWT (Metal Wrap Through) parviennent à améliorer le rendement des cellules poly-cristallines en réduisant de moitié les contacts métalliques de la face avant. Ces cellules atteignent un rendement supérieur à 20 %. La technologie MWT présentera en 2020 plus de 60 % du marché mondial (Figure I.6) [8].



Figure I.4. Cellule solaire mono- cristalline



Figure I.5. Cellule poly cristalline



Figure I.6 Cellule MWT [8]

2.3.2 Cellules solaires de la deuxième génération

La seconde génération de cellules est basée sur les matériaux en couches minces. Elle permet d'utiliser des couches de matériaux semi-conducteurs absorbants beaucoup plus fins d'environ 2 μm d'épaisseur, au lieu de 200 μm nécessaires pour les cellules au silicium monocristallin. Les principaux matériaux utilisés comme absorbants en couches minces sont:

✚ **Silicium amorphe (a-Si)** : Les cellules PV à base de silicium amorphe (Figure I.7) sont les cellules les moins chères du marché mais le rendement de conversion théorique est faible (le rendement record est de 10,7 %) [9].

✚ **Cellules à base de tellure de cadmium (CdTe)** : Un rendement record d'environ 21,5 % a été obtenu par la société First Solar en février 2015 (figure I.8) [9].

✚ **Cellules à base de di-séléniure de cuivre et d'indium (CIS) :** Le rendement record obtenu avec le matériau CIGS est de 20,4 % [9].

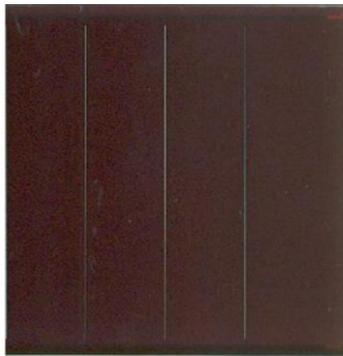


Figure I.7. Cellule Amorphe à couche mince

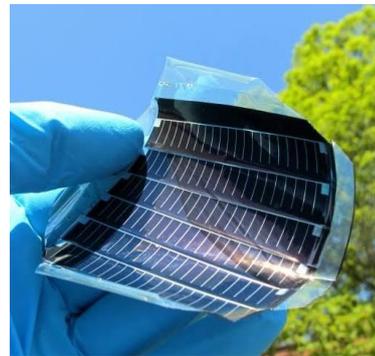


Figure I.8. Cellule CdTe

2.3.3 Cellules solaires de la troisième génération

Cette génération est encore au stade de la recherche, les objectifs sont minimisation des inconvénients rencontrés dans les générations précédentes [8]. Les principales cellules de cette génération sont:

✚ **Cellules multi jonctions :** Elles sont conçues à partir de plusieurs cellules superposées (GaInP / GaInAs /Ge) et utilisées pour des applications spatiales à cause du coût de fabrication très élevé (Figure I.9) [10].

✚ **Cellules photovoltaïques à concentration (CPV) :** Les cellules CPV utilisent des dispositifs optiques tels que: les miroirs parabolique ou les lentilles, la société Solar Junction a récemment obtenu des rendements record d'environ 43,5%, [11].

✚ **Cellules solaires à colorant (Gratzel) :** Elles sont développées dans le début des années 90 par le Pr. Graätzel et son équipe de recherche, s'inspirant du phénomène de la photo - synthèse, ce genre de cellules représente un rendement de 10,4 % en laboratoire obtenu par la société Sharp (Figure I.11) [10].

✚ **Cellules solaires organiques :** Ce genre de cellules se compose d'une couche active, constituée à son tour de plusieurs couches de polymère. Elles sont encore à l'état de recherche avec des rendements ne dépassant pas 5 % (Figure I.10) [10].

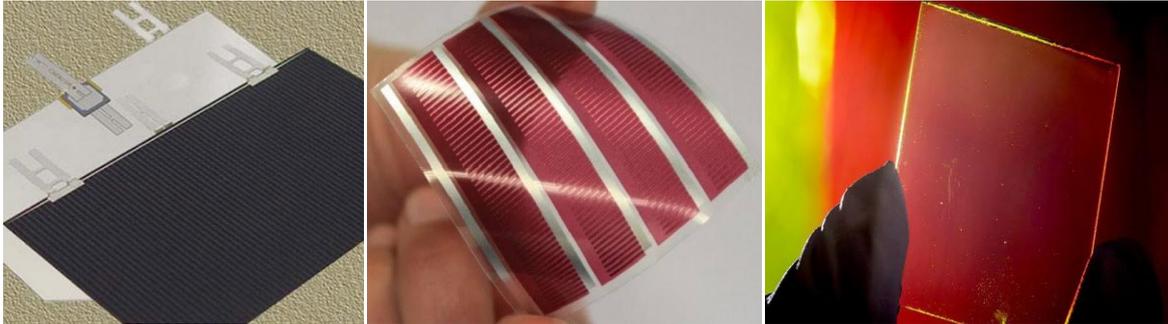


Figure I.9. Cellule Solaire multi - jonctions

Figure. I.10. Cellule Solaire organique

Figure I.11. Cellule Solaire à colorant

2.4. Nature des pertes dans une cellule solaire

Il existe plusieurs facteurs de perte au sein d'une cellule solaire. Ces pertes sont généralement dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée pour la réalisation de la cellule. On peut, entre autres, cité par exemple:

- ✚ Les pertes par effet Joule dues à la résistivité des différents contacts et celles des couches.
- ✚ L'absorption partielle des photons incidents : les photons incidents d'énergie inférieure au gap du semi-conducteur ($h\nu < E_g$) ne peuvent générer de paires électron-trou et sont donc perdus.
- ✚ Les pertes par thermalisation : un photon incident d'énergie supérieure au gap ($h\nu > E_g$) ne génère qu'une seule paire électron-trou; l'excès d'énergie est transféré sous forme de chaleur dans le matériau.
- ✚ Les pertes dues à la réflexion des rayonnements lumineux incidents à la surface : seule une partie du rayonnement solaire est absorbée, l'autre partie étant réfléchi.
- ✚ Les pertes dues à la couverture partielle de la surface de la cellule par les contacts métalliques de la face avant [12].

2.5. Caractéristique courant – tension d'une cellule solaire

Les performances de la cellule solaire sont représentées à travers la caractéristique courant-tension $I(V)$. Cette dernière apporte une lecture claire des paramètres caractérisant la cellule solaire comme le rendement de la cellule, les différents types des résistances parasites et le facteur de forme.

Donc d'après la (Figure I.12), on peut définir les paramètres suivants [12]:

- ✚ **La tension de circuit-ouvert, notée V_{CO}** : tension maximale aux bornes de la cellule à courant nul ($I = 0$), elle dépend essentiellement de la température de la cellule et du spectre de l'éclairement.
- ✚ **Le courant de court-circuit, noté I_{CC}** : est le courant circulant dans la cellule à tension nulle ($V = 0$) ; il dépend principalement de l'intensité de la lumière et de la surface de la cellule.
- ✚ **Point de puissance maximale (PPM)**: c'est le point le plus intéressant de la caractéristique (I-V), puisque il correspond au point de fonctionnement à puissance maximale (PPM) de la cellule PV.
- ✚ **Le facteur de remplissage (Facteur de Forme)**: noté FF, désigne le rapport entre puissance maximale fournie (P_m) sur le produit $I_{CC} V_{CO}$. Il est toujours inférieur à 1.
- ✚ **Le rendement de conversion (η) de la cellule**: est défini par le rapport entre la puissance maximale (P_m) et la puissance du rayonnement solaire incident (P_{in}) sur la cellule photovoltaïque:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{CC} \cdot V_{CO}}{P_{in}} \quad (I.1)$$

Avec :

$$V_{CO} = \frac{n \cdot K_B \cdot T}{q} \times \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (I.2)$$

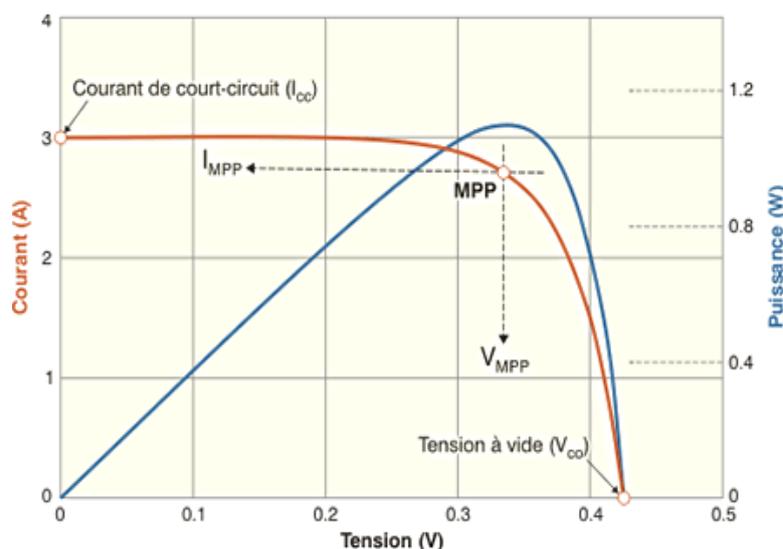


Figure I.12. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

2.6. Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

L'éclairement et la température sont les deux principaux paramètres qui vont modifier les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, et notamment les caractéristiques I-V et P-V. Cette influence se répercute sur la puissance fournie par la cellule photovoltaïque.

2.6.1. Influence de l'éclairement E (W/m^2) [13,6]

Au cours d'une journée, le niveau d'éclairement d'une cellule varie entre son minimum (ex : $0 \text{ W}/\text{m}^2$) et son maximum (ex : $1000 \text{ W}/\text{m}^2$). D'après la Figure I.13, les caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque varient avec l'éclairement solaire (irradiation). On voit bien que quand l'éclairement augmente, l'intensité du courant photovoltaïque croît « La valeur de courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'éclairement ». Quant à la tension, elle est peu sensible aux variations des niveaux d'éclairement. La puissance optimale de la cellule photovoltaïque est pratiquement proportionnelle à l'ensoleillement. Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

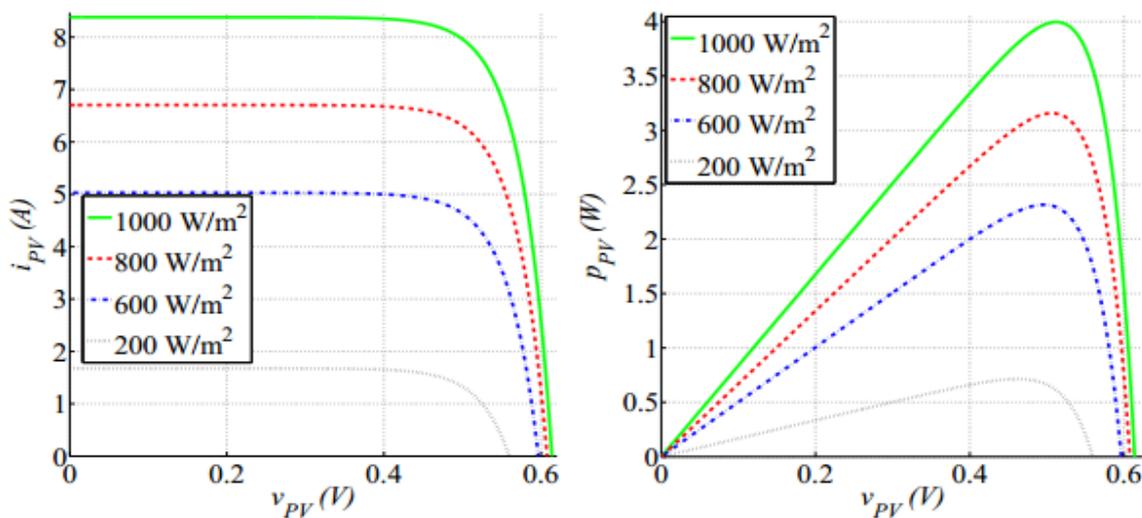


Figure I.13. Influence de l'éclairement sur I(V) et P(V) à $T=25^\circ\text{C}$ d'une cellule photovoltaïque

2.6.2 Influence de la température

La température est aussi un paramètre important dans le comportement des cellules photovoltaïque parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont sensibles à la température [13].

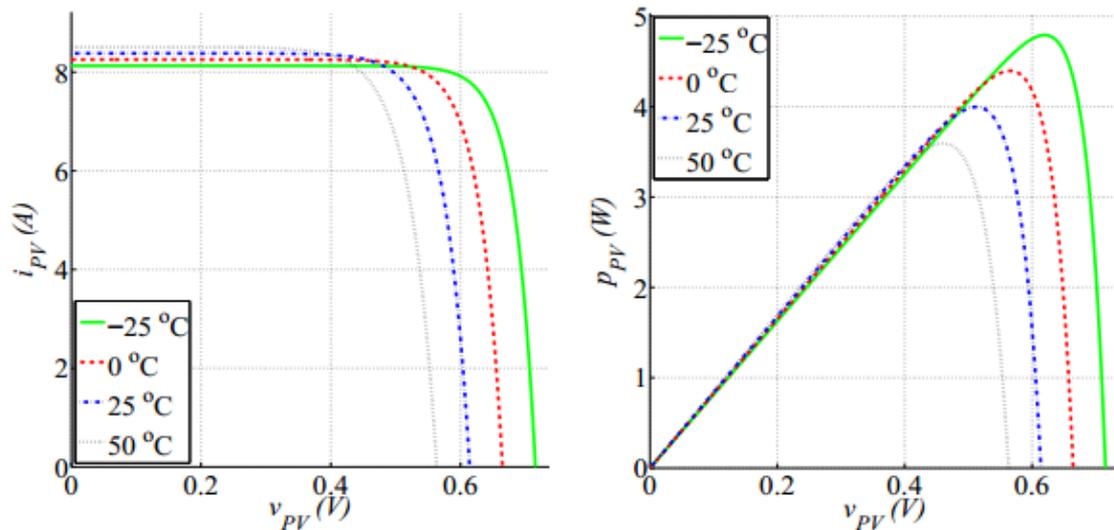


Figure I.14 Influence de la température sur I(V) et P(V) à $E=1000 \text{ W/m}^2$ d'une cellule PV

La Figure I.14 ci-dessus montre que « la tension à vide d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule ». L'ordre de grandeur des pertes est de 2.3 mV / par degré Celsius / par cellule. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température de la cellule (environ 0.05 % par degré Celsius), [14,26].

3. Générateur Photovoltaïque GPV :

3.1. Constitution d'un Générateur Photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyle-acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre trempé à haute transmission et d'une bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'un polyéthylène. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées [15,6].

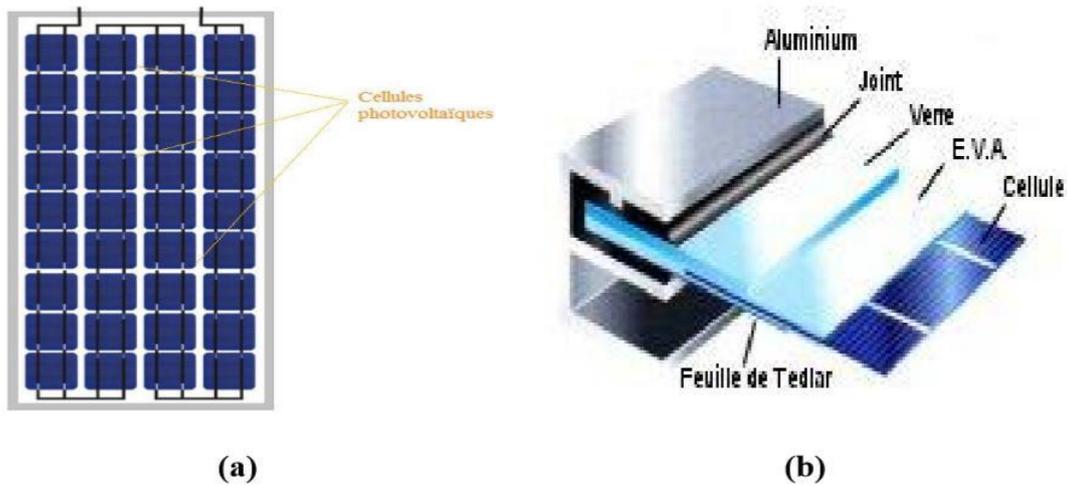


Figure I.15. Module photovoltaïque.

3.1.1. Association en série

Une association de N_s modules en série permet d'augmenter la tension du module Photovoltaïque. Les modules sont alors traversés par le même courant et la tension obtenue est la somme des tensions élémentaires de chaque module (Figure I.16) [16,5].

$$V_{oc,ns} = N_s \cdot V_{oc} \tag{I.3}$$

avec :

$$I_{cc,ns} = I_{cc} \tag{I.4}$$

V_{oc-Ns} : Tension en circuit ouvert pour l'association série

I_{cc-Ns} : Courant de court-circuit pour l'association série

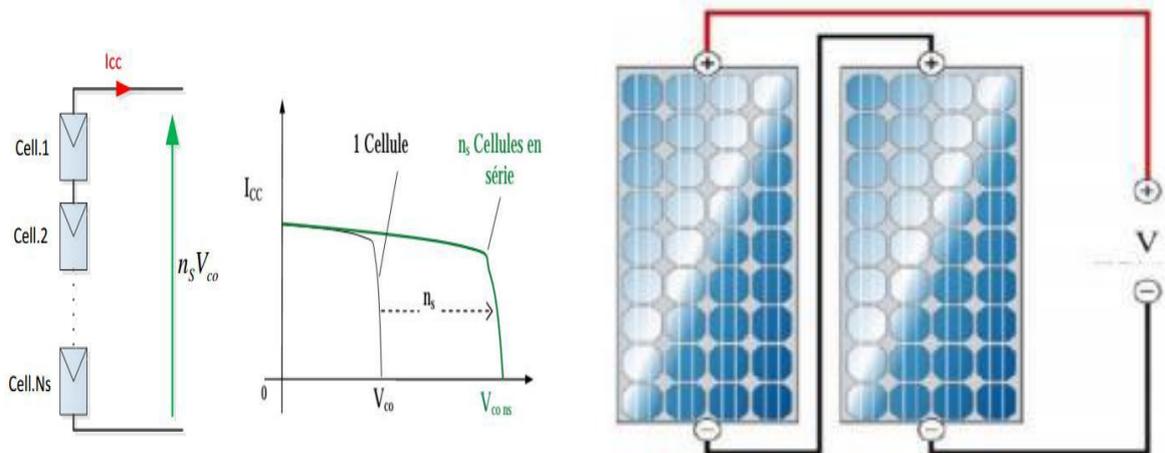


Figure I.16. Influence de l'association des cellules en série sur un module photovoltaïque [13]

3.1.2. Association en parallèle

Une association de N_p modules en parallèle, figure I.17, est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de modules identiques connectés en parallèle, les modules sont soumis à la même tension [16].

$$I_{cc, np} = N_p \cdot I_{cc} \quad (I.5)$$

Avec :

$$V_{oc, np} = V_{oc} \quad (I.6)$$

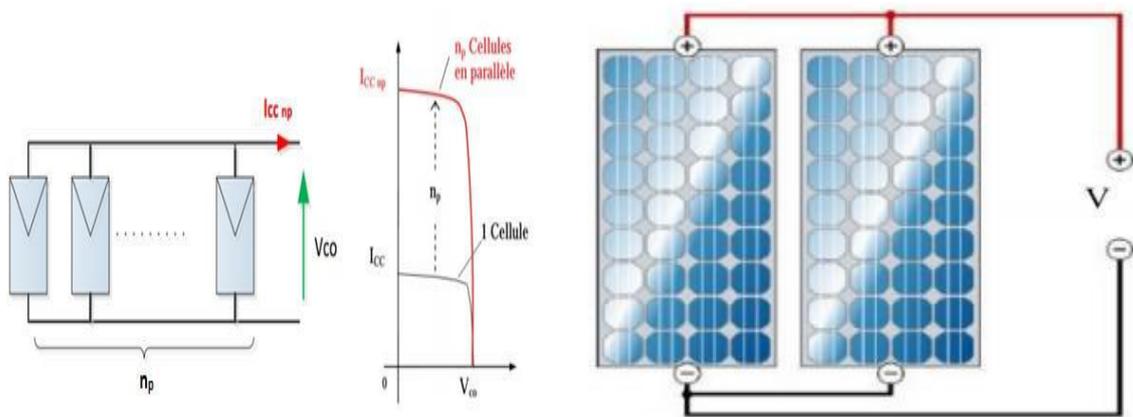


Figure I.17. Influence de l'association des cellules en parallèle [13].

3.1.3. Association mixte (série-parallèle)

Les caractéristiques globales d'un module PV se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des $n_s \times n_p$ (cellules x cellules). La caractéristique d'un générateur constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve si toutes les cellules sont identiques et que l'ensoleillement et la température soient uniformes. La Figure I.18 présente la caractéristique d'un module et d'un générateur composé de n_p module en parallèle et de n_s module en série. Comme pour la cellule élémentaire, les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque dépendent de la température et de l'ensoleillement. Les équations (I.7) et (I.8) résument les caractéristiques électriques d'une association $n_s \times n_p$ (cellules x cellules) [13,14] :

$$I_{cc} = \sum_{np} I_{cci} \quad (I.7)$$

Avec :

$$V_{oc} = \sum_{ns} V_{coi} \quad (I.8)$$

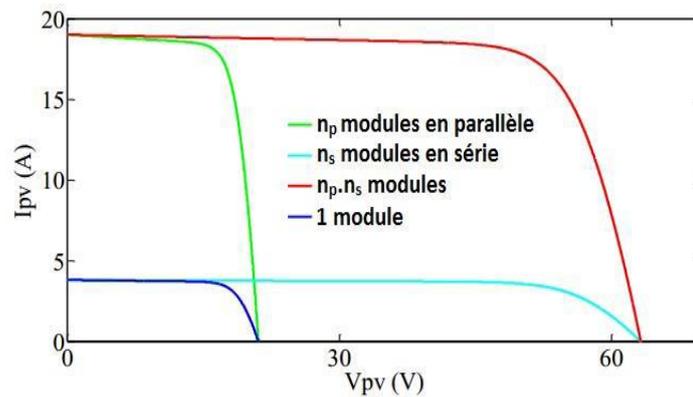


Figure I.18. Caractéristiques courant-tension pour différents assemblages de modules photovoltaïques (PV) en parallèle ou série.

3.2 L'ombrage partiel

L'ombrage partiel est souvent inévitable en milieu urbain car dans certaines conditions, il peut être lié par exemple à des feuilles d'arbre tombées à l'automne, ombres d'infrastructures de bâtiments, des poussières sur l'ensemble des cellules, etc. (Figure I.19). Il est considéré comme le défaut le plus couramment rencontré dans un générateur PV, ce défaut minimise fortement la puissance de sortie et rend parfois la commande des convertisseurs inefficace. Ainsi, lorsqu'une ou plusieurs cellules d'un générateur PV sont éclairées différemment par rapport à ses proches voisines, un comportement dégradé apparaît pour le générateur PV, les cellules recevant moins d'énergie doivent dissiper le surplus de courant délivré par celles qui sont les plus éclairées, créant ainsi des échauffements (haut spot) si le module n'est pas protégé de manière adéquate

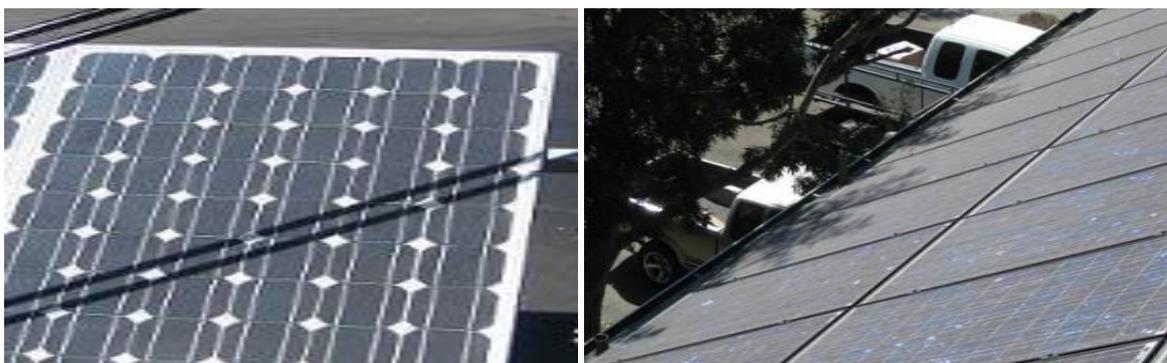


Figure. I.19. Défaut d'ombrage partiel [17]

Jusqu'à présent, pour éviter la surchauffe des cellules ombrées et la détérioration définitive, des diodes de protection sont placées sur les générateurs PV de forte puissance (diode by-pass). Cependant, ces protections sont coûteuses en perte du rendement [17].

3.3 Protections classiques d'un GPV

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules/panneaux en séries/parallèles et à l'ombrage. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles (figure I.20) [5].

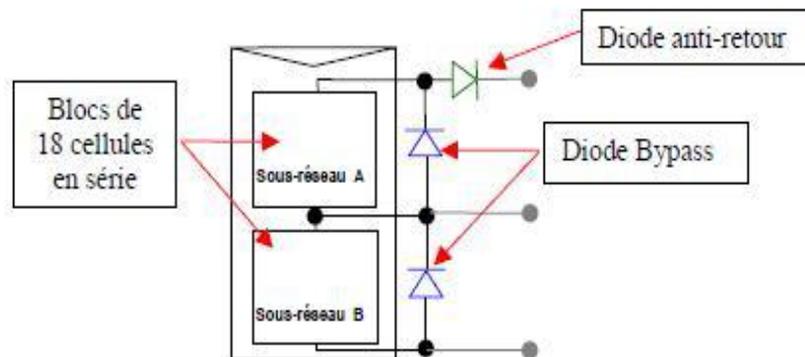


Figure. I.20. Exemples d'association sécurisée de deux modules PV

- La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe bascule en mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, figure I.21, par l'apparition de deux maximums de puissance [18].

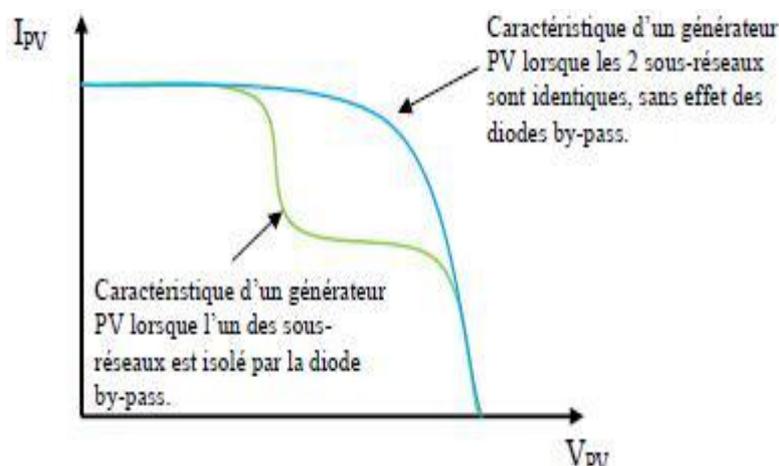


Figure. I.21. Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV [18].

3.4 Zone de fonctionnement d'un module photovoltaïque

Nous pouvons décomposer la caractéristique I-V en trois zones, figure I-22 :

- ✚ **Zone 1** : elle est assimilable à un générateur de courant I_{CC} proportionnel à l'irradiation. Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles (courant élevé et tensions faible).
- ✚ **Zone 2** : elle est assimilable à un générateur de tension V_{CO} , le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles (courant faible et tension élevée).
- ✚ **Zone 3** : elle correspond au coude de cette caractéristique, le fonctionnement du générateur dans cette zone donne des puissances élevées. Un point optimal de puissance "MPP" (maximum power point) peut être identifié au point (I_{opt}, V_{opt}) . Par conséquent, ce point de fonctionnement permet d'utiliser au mieux le panneau solaire [19].

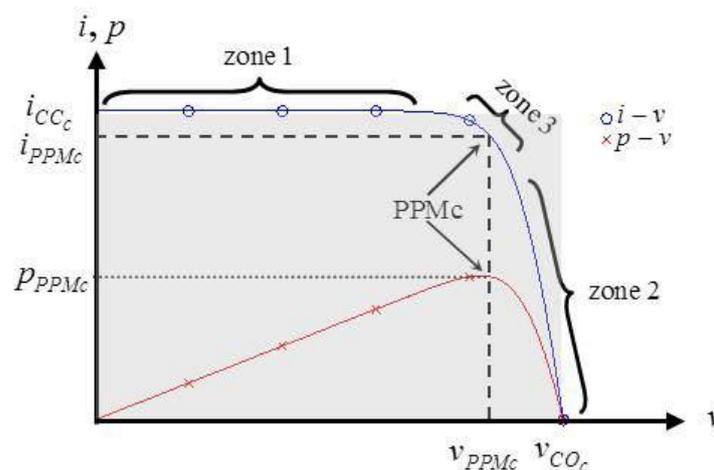


Figure I.22. Caractéristiques $I_p(V_{PV})$ et $P_{PV}(V_{PV})$ d'un générateur PV

4. Installation des panneaux solaires

L'installation des panneaux solaires PV, peut être réalisée sur des supports fixes au sol ou sur des systèmes mobiles de poursuite du soleil appelés : trackers. Dans ce dernier cas, la production électrique augmente d'environ 30 % par rapport à une installation fixe. En dehors de centrales solaires, les installations fixes se font actuellement plutôt sur les toits des logements ou des bâtiments (Figure I.23), soit en façade d'immeuble (Figure I.24). L'endroit de la pose doit être bien dégagé, aéré et protégé. Il est conseillé de laisser

environs 10 cm sous les modules et de les poser avec une inclinaison d'au-moins de 10° pour assurer un auto-nettoyage lors des pluies [6].



Figure I.23. sur le toit



Figure I.24. sur la façade

L'orientation des panneaux solaires par rapport au soleil est très importante si on veut les utiliser au maximum de leurs possibilités. Globalement, l'orientation idéale d'un panneau solaire est très simple à déterminer : Si on est dans l'hémisphère Nord, on le place vers l'équateur (orienté vers le Sud), et si l'on est dans l'hémisphère Sud, il sera orienté vers le Nord. Le tableau ci-dessous donne le pourcentage de fonctionnement des modules solaires par rapport à leur orientation et à leur inclinaison si on est dans l'hémisphère Nord [20].

Tableau I.1. Pourcentage approximatif de fonctionnement des modules solaires par rapport à leur orientation et à leur inclinaison [20].

INCLINAISON		0°	30°	60°	90°
ORIENTATION					
EST		93 %	90 %	78 %	55 %
SUD-EST		93 %	96 %	88 %	66 %
SUD		93 %	100 %	91 %	68 %
SUD-OUEST		93 %	96 %	88 %	66 %
OUEST		93 %	90 %	78 %	55 %

5. Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est une chaîne de conversion d'énergie constituée de plusieurs éléments connectés entre eux, on trouve : le panneau solaire (qui est fixe ou mobile), le câblage, la boîte de jonction, les éléments de protection, la batterie en cas de stockage

d'énergie et son régulateur, des convertisseurs DC/DC (hacheurs) et des convertisseurs DC/AC (l'onduleur). Ces éléments sont : fiables, nécessitent peu d'entretien, ne produisent aucune émission. Il existe plusieurs types de systèmes photovoltaïques [21,16].

5.1. Système photovoltaïque autonome

C'est un système solaire non reliés au réseau, il produit l'énergie électrique qui est utilisée directement ou stockée dans des batteries, Figure I.26. Il possède plusieurs domaines d'applications telles-que : le pompage d'eau, les zones éloignées du réseau électrique, stations industrielles (système de protection, de surveillance et de comptage), stations spatiales, relais de communications, etc....

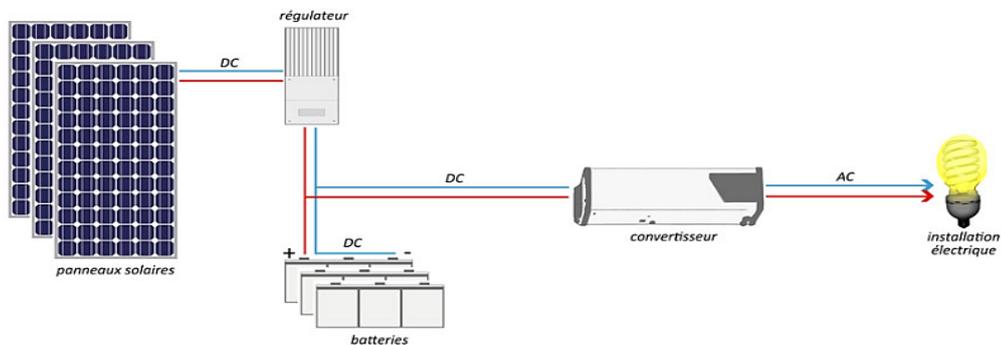


Figure.I.25. Installation photovoltaïque autonome

5.2 Système photovoltaïque hybride autonome

Un système hybride est composé d'un générateur PV combiné à une ou plusieurs sources d'énergies renouvelables ou à un groupe électrogène, ou aux deux à la fois, figure I.27.

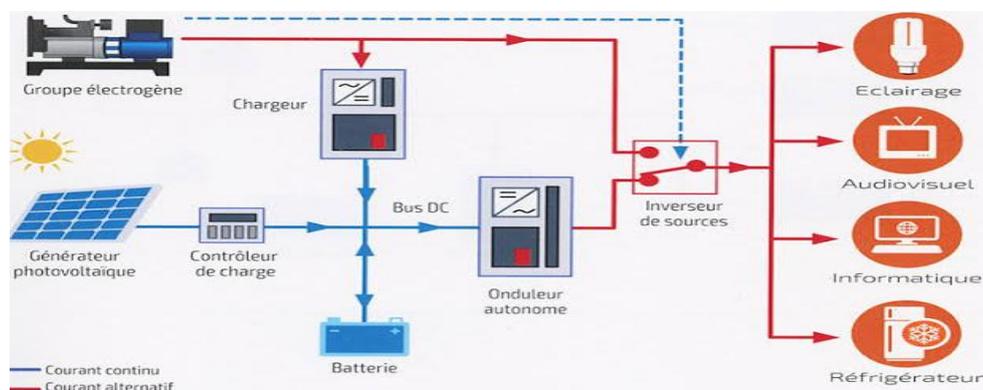


Figure. I.26. installation photovoltaïque hybride autonome

Les avantages de l'hybridation sont principalement : l'amélioration de la qualité du service en assurant la continuité de production d'électricité, l'extension de la durée du service, la réduction de la consommation de carburant (groupe électrogène). Ces types d'installation concernent des applications comme des centres de santé, des écoles, banques et des ensembles résidentiels dans les pays en voie de développement [21,16].

5.3 Système photovoltaïque raccordé au réseau

Dans ce système, l'installation est connectée au réseau électrique après une adaptation des tensions et des fréquences. L'énergie produite est soit consommée par l'utilisateur et le surplus est injecté sur le réseau, soit injectée en totalité dans le réseau électrique. Ces systèmes peuvent être conçus avec ou sans stockage (Figure I.28) [21].

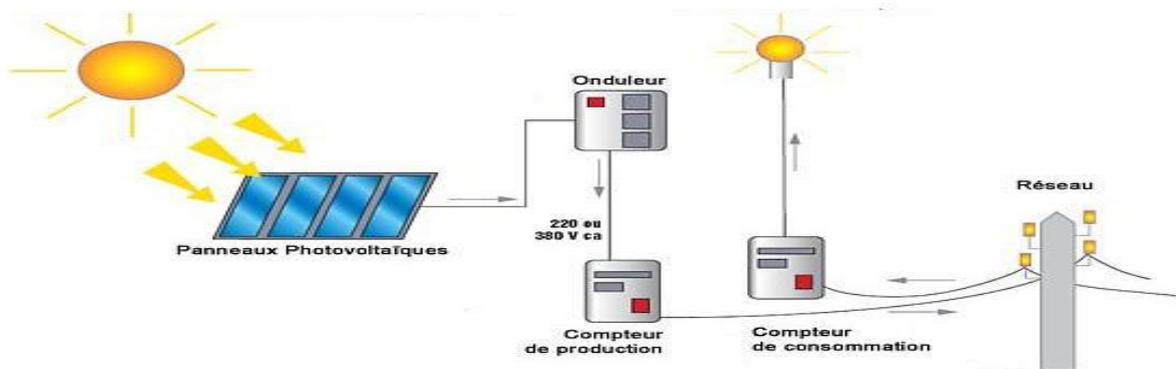


Figure I.27. Installation photovoltaïque couplée au réseau

6. Avantages et inconvénients d'une installation PV

Un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients, [22, 23].

6.1 Avantages

- Une bonne fiabilité à cause de l'absence de pièces mobiles.
- Un système modulaire qui permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers pour des puissances allant du milli Watt au Méga Watt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant.

6.2. Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque requiert un coût d'investissements élevé ;
- Le rendement réel est faible, de l'ordre de 5-25 % avec une limite au laboratoire pour une cellule de 40% selon (<http://photovoltaïque.guidenr.fr>) ;
- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs comparativement aux générateurs diesel, mais ils deviennent plus rentables surtout dans des régions isolées où le transport du carburant coûte une fortune ;
- Le système de stockage de l'énergie est très cher ;
- Tributaire des conditions météorologiques qui causent la diminution du rendement.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques en commençant par la définition de l'effet photovoltaïque, la composition d'un système PV, la protection et l'installation des GPV. Différentes structures et applications des systèmes PV ont été aussi exposées.

L'insertion de convertisseurs statiques avec une commande appropriée, entre le générateur et sa charge, permet d'optimiser le transfert de l'énergie, à cet effet, au chapitre deux, on présente une modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque et un convertisseur statique de type (Boost).

Chapitre II

Modélisation et interfaces d'électronique de puissance pour l'optimisation des SPV

1. Introduction

Comme exposé au premier chapitre, la production d'électricité par les panneaux solaires est non linéaire, elle varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque ne coïncide pas toujours avec le point de puissance maximale, Alors la mise en place d'un étage d'adaptation entre la charge et le générateur PV est nécessaire. Cet étage est constitué d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un algorithme de recherche et de poursuite du point de puissance maximale, appelé « **Maximaum Power Point Tracking** », afin que la puissance maximale soit générée en permanence.

Ce chapitre est composé de trois parties, la première est réservée pour la modélisation et la simulation du panneau photovoltaïque. Dans la deuxième, on présentera le convertisseur survolteur (DC-DC), connu sous le nom de « Boost ». La troisième partie sera dédiée à la classification des techniques de commande MPPT.

2. Générateur photovoltaïque

2.1. Modélisation d'un GPV

De nombreux modèles mathématiques de cellule PV ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire dû à la jonction semi-conductrice. Cependant le modèle à une diode est le plus utilisé dans la littérature. Il contient un générateur de courant I_{ph} (courant photonique), une diode en antiparallèle, une résistance série R_s (représentant les diverses résistances de contacts et de connexions) et une résistance parallèle R_p (caractérisant les divers courants de fuites), figure II.1 [6,1].

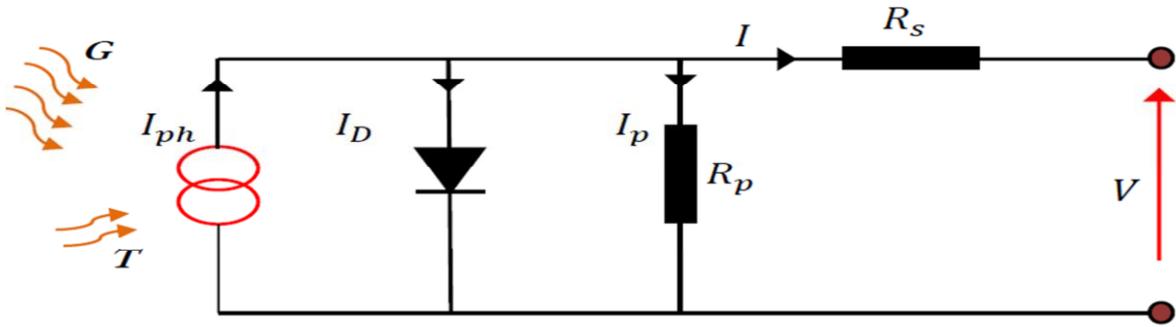


Figure. II.1. Modèle à une diode d'une cellule PV

L'équation caractéristique est déduite à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{PH} - I_D - I_P \quad (II.1)$$

Avec:
$$I_{ph} \approx I_{sc} = \left(I_{sc_{STC}} + K_i(T - T_{STC}) \right) \frac{G}{G_{STC}} \quad (II.2)$$

Et :
$$I_P = \frac{V_D}{R_P} = \frac{V + R_S I}{R_P} \quad (II.3)$$

Le courant de jonction I_D est donnée par :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + R_S I)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (II.4)$$

I_0 : est le courant de saturation de la diode.

n : est le facteur d'idéalité de la jonction,

K : est la constante de Boltzmann ($1,380662 \times 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$),

T : est la température de jonction des cellules,

q : est la charge élémentaire de l'électron ($1,602 \times 10^{-19} \text{C}$),

I_{sc} : le courant de court-circuit ;

$I_{sc_{STC}}$: le courant de court-circuit dans les condition STC ;

G_n : le rayonnement solaire de référence = 1000 w/m²;

K_i : le coefficient de température du courant de court-circuit

T_n : la température nominale ou bien de référence [k].

N_s : Nombre de cellules en séries.

Le courant de saturation inverse est généralement donné par l'équation suivante :

$$I_0 = I_{0STC} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\frac{qE_{g0}}{nK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)} \quad (II.5)$$

Avec:

$$I_{0STC} = \frac{I_{phSTC} \frac{V_{ocSTC}}{R_p}}{e^{\frac{V_{ocSTC}}{V_T}} - 1} \quad (II.6)$$

Le courant qui traverse la résistance parallèle est donné par :

$$I_p = \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (II.7)$$

Finalement, on aura l'équation du courant fourni par le GPV est la suivante :

$$I = \frac{[I_{sc} + K_i(T - T_n)]G}{G_n} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (II.8)$$

R_s : résistance série des N_s cellules séries ($R_s = N_s R_{s,1c}$).

R_p : résistance parallèle des N_s cellules séries ($R_p = N_s R_{p,1c}$).

2.2. Simulation d'un GPV à une seule diode

En utilisant l'environnement MATLAB/SIMULINK, nous avons modélisé et simulé un module PV de type **KC200GT**. Ces caractéristiques sont données dans le tableau (II-1) :

Tableau II-1: Caractéristiques du module PV KC200GT (conditions STC)

Grandeurs	valeurs
Puissance maximale	200 W
Tension au MPP (Vmp)	26.3 V
Courant au MPP (Imp)	7.61 A
Courant de court-circuit (Icc)	8.21 A
Tension de circuit ouvert (Vco)	32.9 V
Coefficient du rendement de la température	0.0049 %
Facteur de forme (FF)	0.771
Nombre de cellules en série (Ns)	54
Nombre de cellules en parallèle (Np)	4
Coefficient de sensibilité de la tension à la température	-0.123 V/K
Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température	+0,0032 A/K

Bloc du courant I_{ph} : d'après l'équation (II.2) on a :

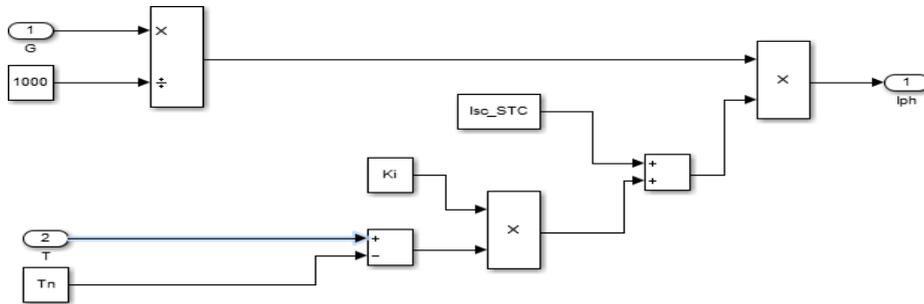


Figure II.2 : Schéma bloc du courant I_{ph}

Bloc du courant I_0 : d'après l'équation (II.5) on a :

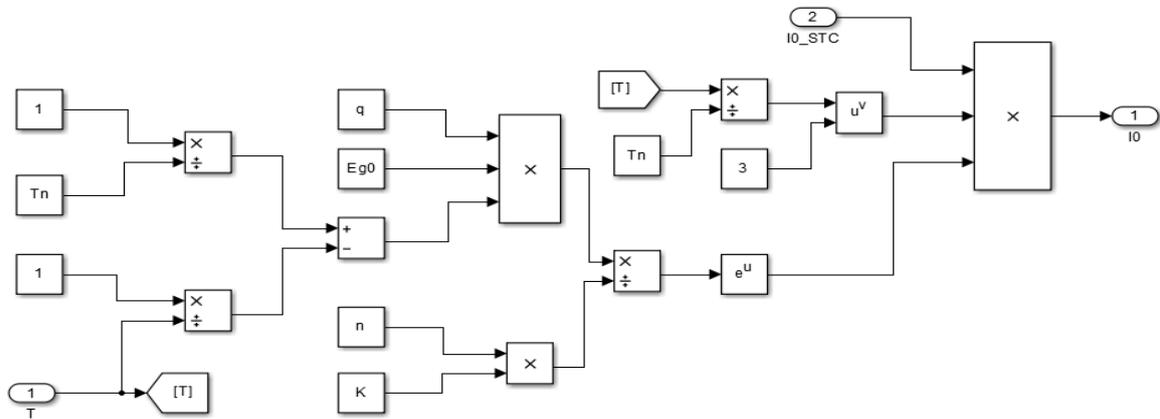


Figure II.3 : Schéma bloc du courant I_0

Bloc du courant I_0 en STC : d'après l'équation (II.6) on a :

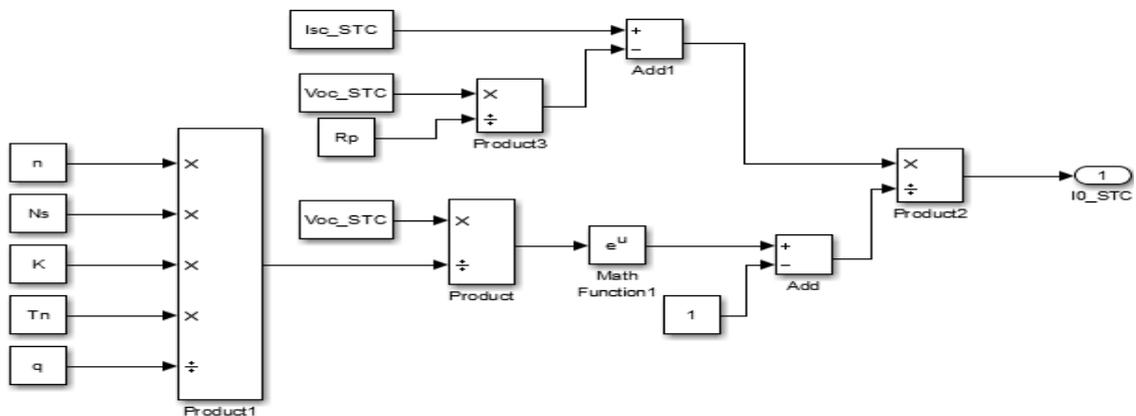


Figure II.4 : Schéma bloc du courant I_0 dans les conditions STC

✚ Bloc du courant I_{sh} : d'après l'équation (II.7) on a :

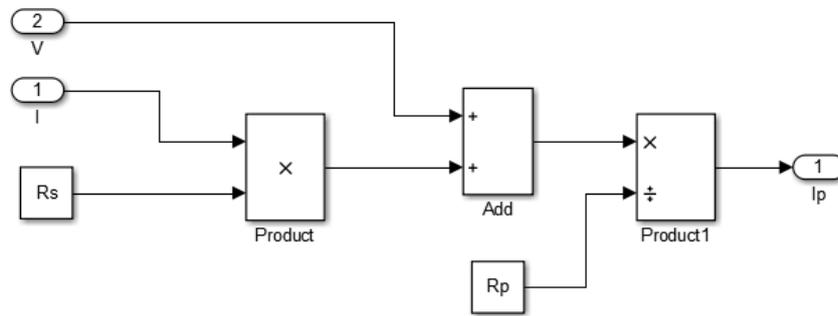


Figure II.5 : Schéma bloc du courant I_{sh} .

✚ Bloc du courant I_D : d'après l'équation (II.4) on a :

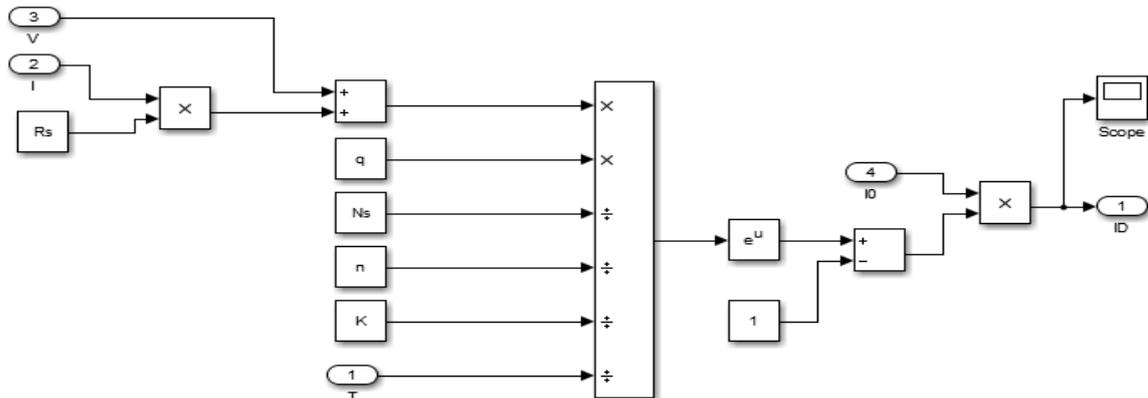


Figure II.6 : Schéma bloc du courant I_D .

✚ Bloc du courant fournie par le GPV (I_{pv}) : d'après l'équation (II.8) on a :

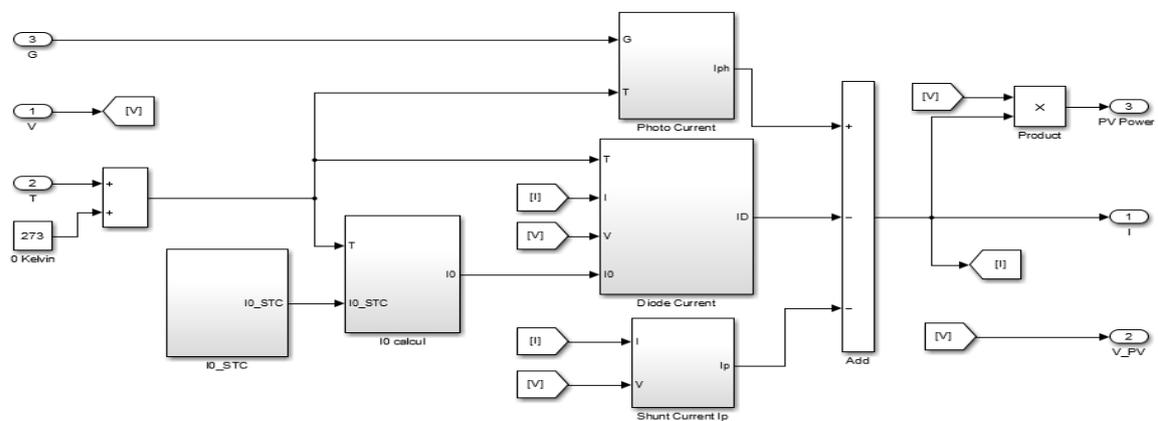


Figure II.7 : Schéma bloc du courant I_{pv} .

Bloc du GPV global :

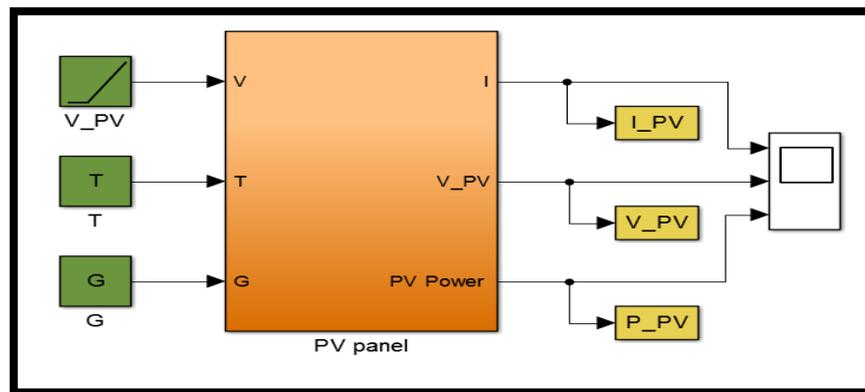


Figure II.8 : Simulation modèle d'un GPV sous MATLAB/SIMULINK

2.3 Influence de l'éclairement et la température sur le GPV

2.3.1 Influence de l'éclairement

Pour une température constante et différentes valeurs d'éclairement appliquées sur le module de 200 W, on obtient les courbes (I_V) et (P_V) suivantes :

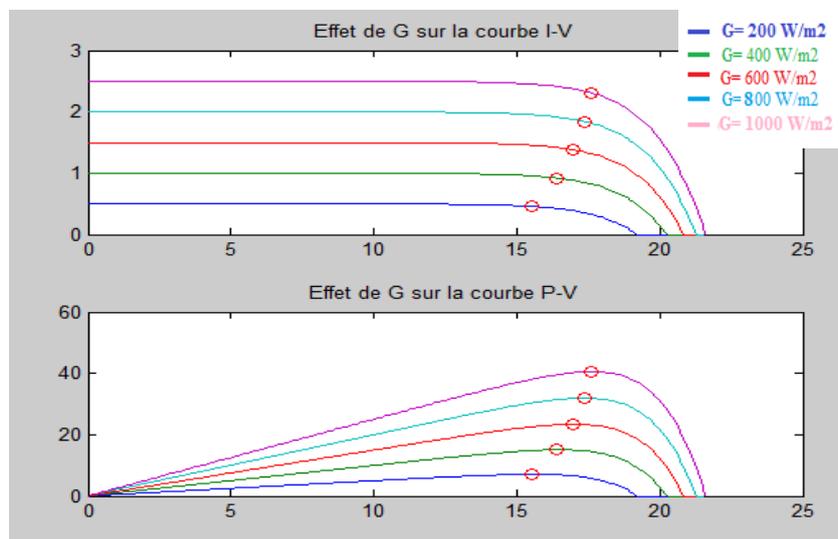


Figure II.9: Influence de l'irradiation solaire sur les caractéristiques (I-V) (P-V) d'un GPV 200 W.

L'éclairement est le paramètre le plus influant sur la cellule PV. En effet, le photo-courant est proportionnel à l'éclairement. La figure II.9 présente respectivement les caractéristiques

I-V et P-V d'un module simulée sous une température de référence de 25 °C et sous divers niveaux d'éclairéments. On remarque que la tension du circuit ouvert v_{oc} reste très peu changée en faisant varier l'éclairement G, par contre le courant du court-circuit i_{cc} varie beaucoup en augmentant l'éclairement ce qui engendre une augmentation de la puissance photovoltaïque.

2.3.2 Influence de la température

La température est le second paramètre le plus important dans le comportement de la photopile. La figure II.10 illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V du module simulée sous un éclairement de 1000W/m² et différentes températures. On remarque que le courant du court-circuit i_{cc} reste très peu sensible à la variation de la température mais la tension du circuit ouvert v_{oc} diminue en augmentant la température ce qui cause une diminution de la puissance à la sortie du module.

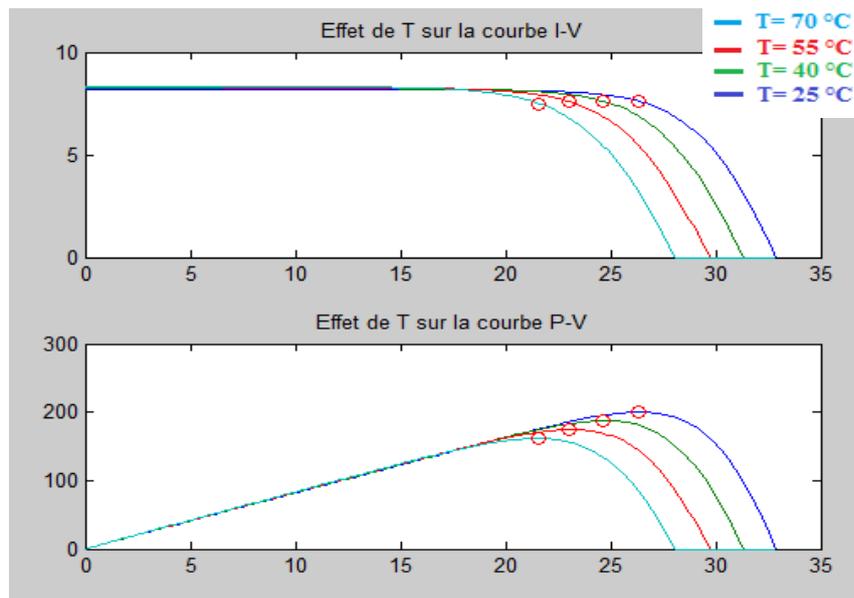


Figure II.10: Influence de température sur les caractéristiques (I-V) (P-V) d'un GPV 200 W.

2.4 Influence des résistances série et parallèle sur le GPV

A partir du circuit équivalent d'un GPV, on constate que d'autant la résistance série est faible et la résistance shunt est grande, on a moins de pertes et donc on collecte plus de courant ce qui implique un maximum de puissance. La figure II.11 illustre respectivement

les caractéristiques I-V et P-V pour différentes résistances série. La figure II.12 montre respectivement les caractéristiques I-V et P-V pour différentes résistances shunt.

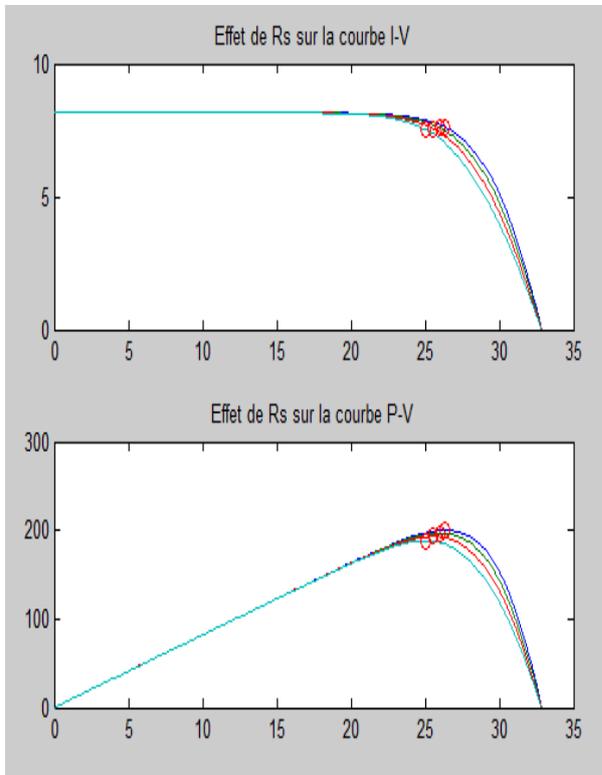


Figure II.11 L'influence de la résistance série R_s sur les caractéristiques (I-V) et (P-V)

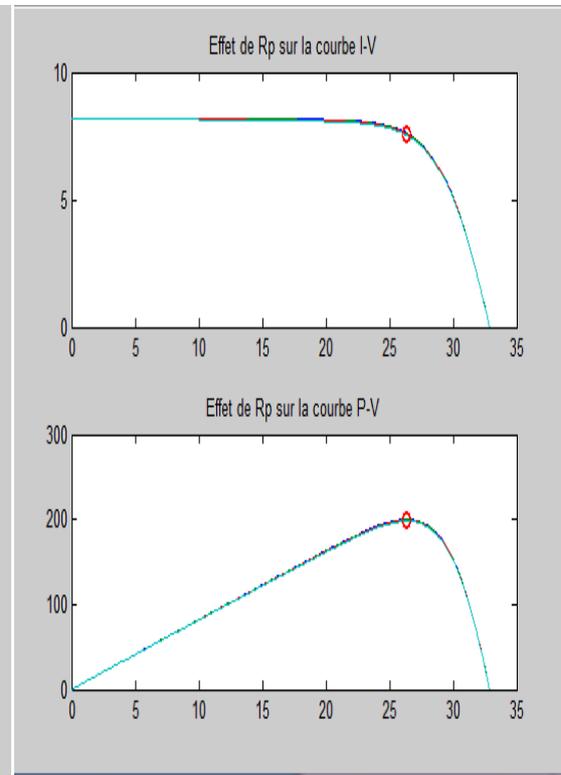


Figure II.12 Influence de la résistance shunt R_p sur les caractéristiques (I-V) et (P-V)

3. Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation

Comme indiqué précédemment, le point de fonctionnement peut se trouver éloigné du point de puissance maximal pour une simple variation de la température et l'éclairement. Donc il est très important d'insérer une interface à base d'électronique de puissance entre la source photovoltaïque et la charge car cela permet d'exploiter le maximum de puissance. Cette interface peut être un convertisseur DC-DC (Buck, Boost, Buck-Boost.... etc).

La Figure II.13 présente le schéma de principe d'une chaîne de conversion photovoltaïque dotée d'un étage d'adaptation DC-DC. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de suivre le point de puissance maximale que peut fournir un générateur photovoltaïque. [13].

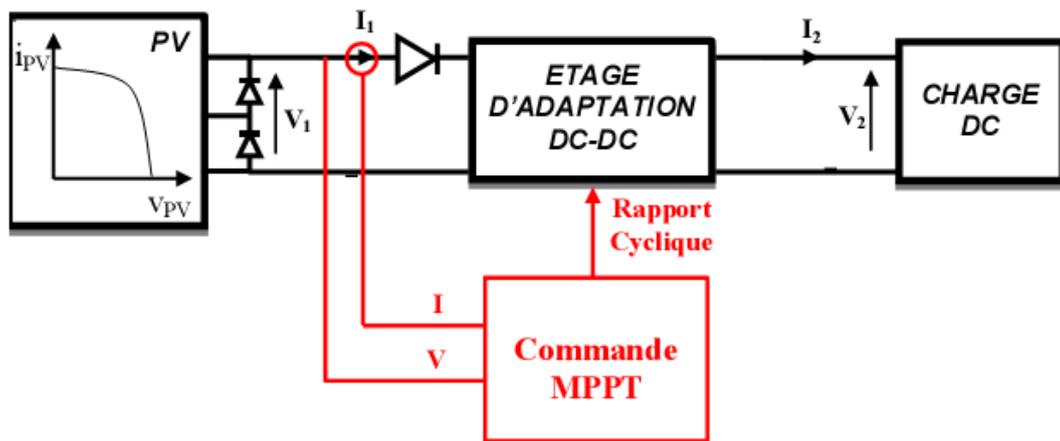


Figure II.13 Chaîne de conversion photovoltaïque

Un convertisseur DC-DC ou hacheur peut être réalisé à l'aide des interrupteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors fonctionnant en régime de commutation (tout ou rien). Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source-charge à l'aide des interrupteurs électroniques. Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de fournir une tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe [24].

3.1. Hacheur survolteur (BOOST)

C'est un convertisseur survolteur, connu sous le nom de « BOOST » ou Hacheur parallèle, qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Le schéma de principe du Boost est montré sur la Figure II.14. [24].

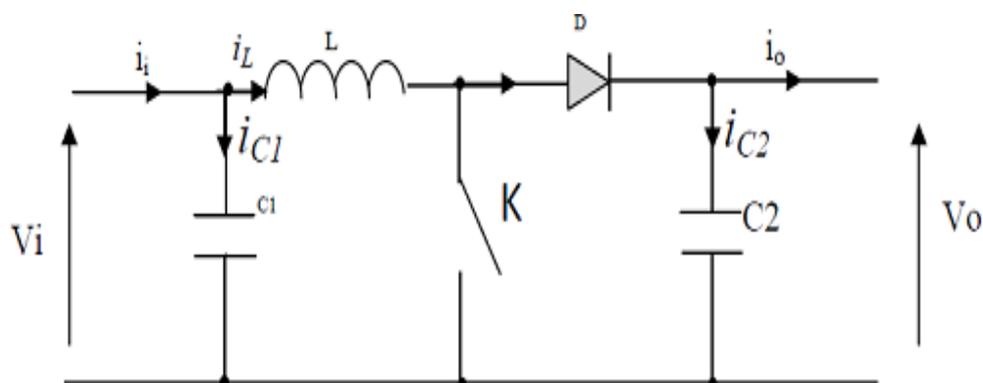


Figure II.14. Schéma de principe d'un convertisseur BOOST

L'état du commutateur K (ON ou OFF) permet d'assurer deux phases de fonctionnement du Boost, figure (II.15).

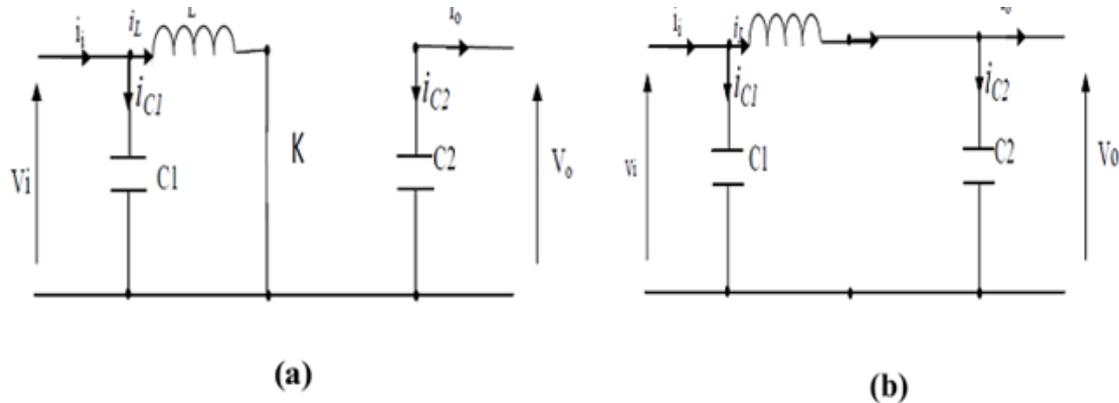


Figure II.15. Schémas équivalents du hacheur survolteur a) K fermé, (b) : K ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure II-15, on obtient les systèmes d'équations suivants

✚ **Pour la première phase (K OFF, pendant αT) :**

Quand l'interrupteur K est fermé (Figure II.15 a) pendant la durée αT , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle ce qui donne les équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_i(t) \end{array} \right. \quad (II.9)$$

✚ **Pour la deuxième phase (K ON, pendant $(1-\alpha)T$):**

Lorsque k est ouvert (Figure II.15b), l'inductance se trouve en série avec le générateur et sa tension s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant i_L traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C1 et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur, Le courant décroît ensuite progressivement, car ($V_o > V_i$) alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{array} \right. \quad (II.10)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour toute la période T, on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left(\frac{dx}{dt} \right) T = \frac{dx}{dt_{\alpha T}} \alpha T + \frac{dx}{dt_{(1-\alpha)T}} (1 - \alpha) T \quad (II.11)$$

En appliquant la relation (II.11) sur les systèmes d'équations (II.9) et (II.10), on trouve le modèle approché du convertisseur survolteur [25,26]:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_L(t) = i_i(t) - C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ i_o(t) = (1 - \alpha) i_L(t) - C_2 \frac{dV_i(t)}{dt} \\ V_i(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1 - \alpha) V_o(t) \end{array} \right. \quad (II.12)$$

3.2. Simulation du convertisseur Boost alimentant une charge résistive

Dans cette partie, nous allons simuler le fonctionnement du système constitué d'une source continue relié à un hacheur alimentant une charge résistive dans lequel on prend les valeurs suivantes ($P_{pv}=300$ W ; $E_{DC}= 55$ V ; $f_{sw} = 5$ kHz ; $V_{charge} =173$ V ; $R= 100$ Ω). Le schéma bloc utilisé est présenté sur la (Figure II.16).

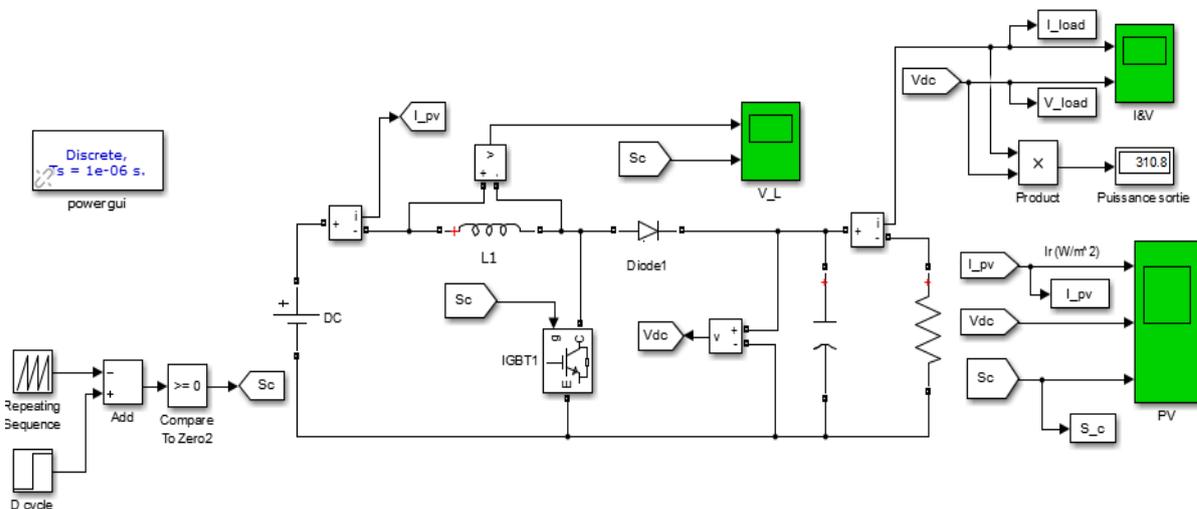


Figure II.16 : schéma bloc d'une chaîne de conversion photovoltaïque sous Matlab/Simulink

Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures II.17 et II.18.

- ✚ Figure II.17 : montre que la tension de sortie d'hacheur est supérieure à celle d'entrée pour un rapport cyclique de 0.68. Le courant et la tension de sortie subie un régime transitoire oscillant puis se stabilisent en régime permanent.
- ✚ Figure II.18 : l'évolution de la puissance consommée par la charge, aussi elle présente de faible oscillation et elle est constante au régime permanent autour de 300 W.

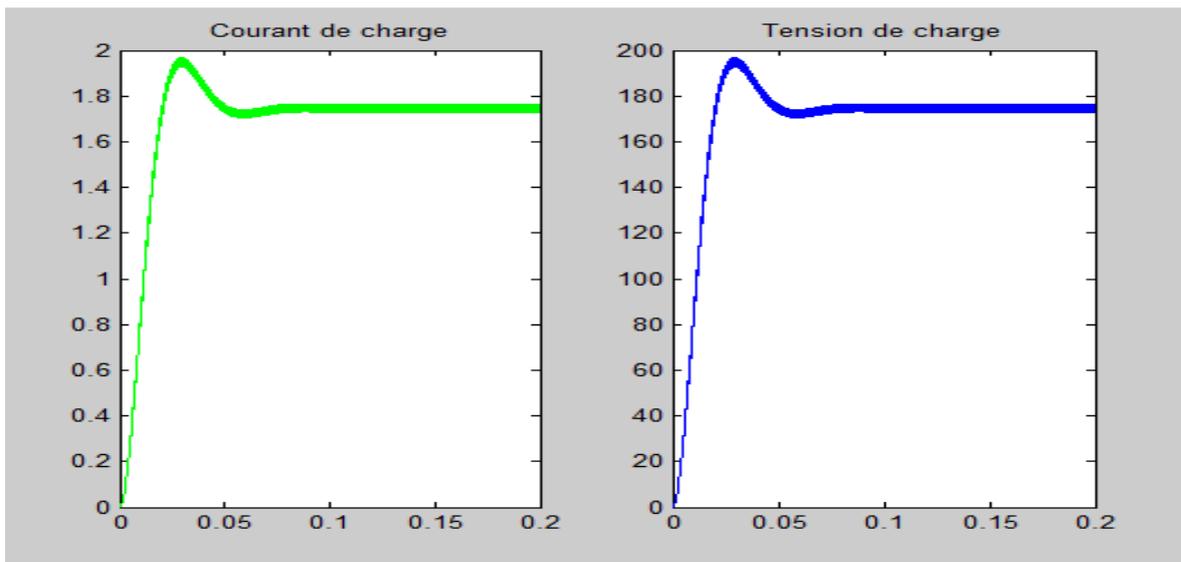


Figure. II.17 : Courbe du courant et de tension à la sortie du hacheur BOOST.

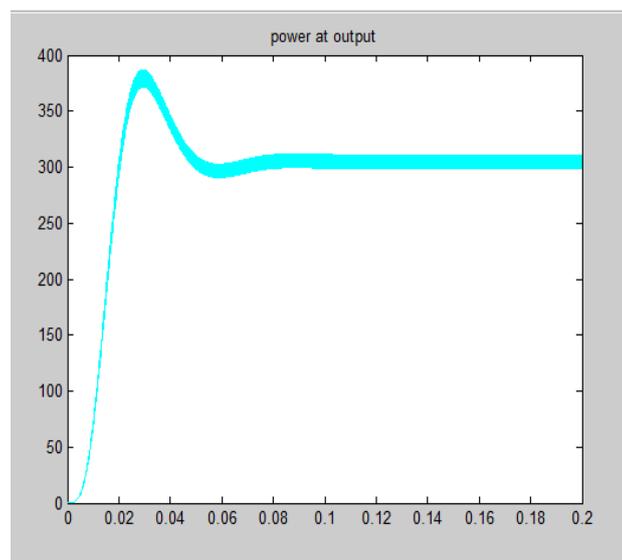


Figure II.18 : Courbe de puissance à la sortie du hacheur BOOST.

4. Principe de la recherche du point de puissance maximale

4.1. Introduction sur les techniques MPPT

La commande MPPT « Maximum Power Point Tracking », est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque (figure II.13). Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau qu'elles que soient les conditions météorologiques ou variations de charges. La figure (II.19) illustre trois cas de perturbation : variation de l'ensoleillement (cas : a), variation de la charge (cas : b) et variation de la température (cas : c), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2 [26].

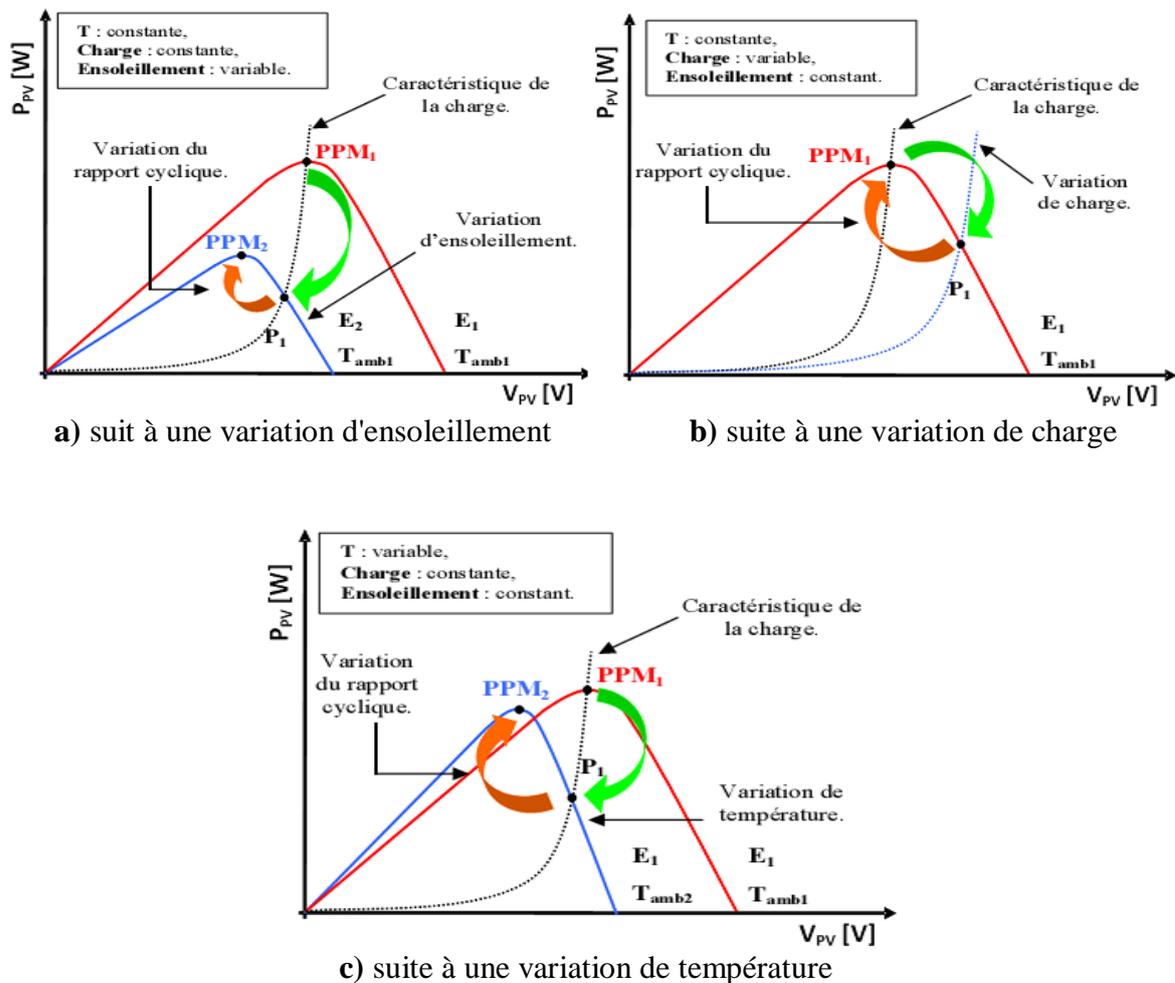


Figure II -19. Recherche du Point de Puissance Maximale [26].

4.2. Différentes des technique MPPT [27]

Le premier algorithme de la commande MPPT est mis en œuvre en 1968. Depuis, différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM ont été publiés. Ces méthodes sont différent en termes de complexité, le nombre et les types des capteurs nécessaires, la mise en œuvre du matériel et chaque méthode a sont avantages et ces inconvénients. Généralement on peut classer ces méthodes on quatre groupes comme suit:

- ✚ Technique directe : Perturbe et observe, Hill Climbing, Incrémentation de conductance.
- ✚ Technique indirecte : Courant de court-circuit, tension de circuit ouvert.
- ✚ Technique basée sur intelligence artificiel : Logique floue, réseau neurone, les algorithmes génétiques et PSO.
- ✚ Autres technique : Mode glissant, théorème de bisection et les méthodes hybrides.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé mathématiquement le panneau solaire. Pour obtenir un modèle exploitable sur SIMULINK, les équations développées ont été réalisées dans des schémas blocs. Ensuite l'intérêt de l'étage d'adaptation dans la chaîne de conversion PV a été abordé. Cet étage consiste à un convertisseur DC/DC. La structure de type Boost a été adoptée pour sa simplicité et son gain en tension relativement plus élevé par rapport aux autres topologies. Enfin, une classification des méthodes de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT) a été présentée.

Dans le troisième chapitre, une comparaison entre trois techniques de commande MPPT sera détaillée, ces méthodes sont : P&O, Incrémentation de conductance et une version améliorée de cette dernière technique.

Chapitre III

Comparaison entre plusieurs techniques de commande MPPT

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude comparative par simulation entre trois techniques de recherche de maximum de puissance (MPPT), ces techniques sont : Perturbation et Observation (P&O), Incrémentation de la conductance (INC ou IncCond) et une version améliorée de l'INC.

Durant toute cette étude, nous allons utiliser le logiciel de simulation MATLAB/SIMULINK pour comparer les performances des techniques proposées pour différentes conditions climatiques.

2. La commande Perturbation et Observation

L'algorithme « Perturb and observe », (P&O) est très populaire actuellement et il est certainement le plus couramment utilisé en pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre et de son efficacité, [30-34].

Le principe de fonctionnement de cet algorithme est simple, après une perturbation (augmentation ou diminution) de la tension du panneau solaire, on mesure la puissance délivrée par le panneau, ou on la calcule par le produit de la tension et du courant du PV. L'action qui sera prise lors de l'étape suivante dépendra de la valeur de la puissance et de l'action précédente sur la tension, [30-34] :

- Si la puissance a augmentée après une augmentation (diminution) de la tension, alors on augmente (diminue) de nouveau la tension du panneau.
- Si la puissance a diminuée après une augmentation (diminution) de la tension, alors on diminue (augmente) la tension du panneau.

- Si la puissance ne change pas, on ne change pas la tension du panneau.

L'organigramme de cette technique de commande est donné dans la figure III-1, [30-34].

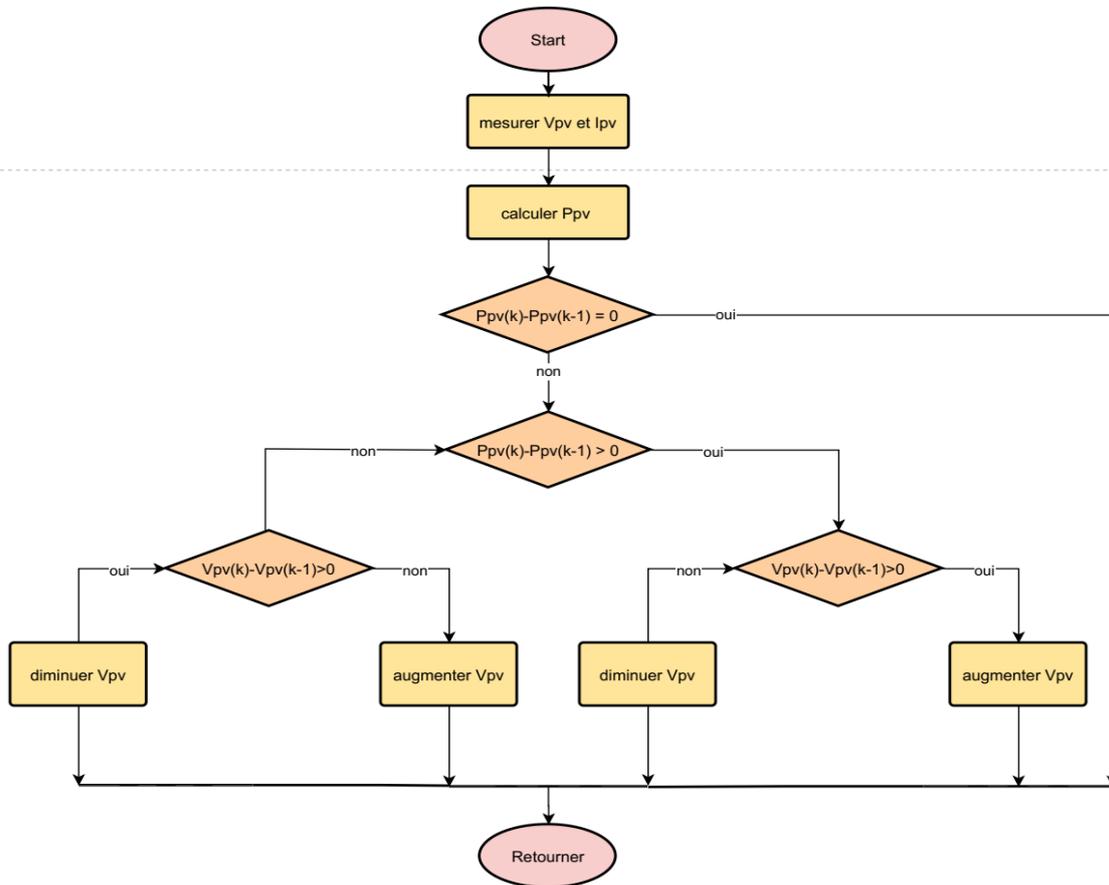


Figure III-1 Organigramme de la commande P&O

Le tableau III-1, résume le fonctionnement de cet algorithme, [32].

Tableau III-1 Fonctionnement de la méthode P&O

Perturbation précédente	Changement dans la puissance	Perturbation prochaine
Positive	Positive	Positive
Positive	Négative	Négative
Négative	Positive	Négative
Négative	Négative	Positive

Cette technique est connue pour sa simplicité et ses bonnes performances. Cependant, elle présente quelques défauts, on peut citer :

- Ces performances dépendent de la valeur de la perturbation de la tension : une grande perturbation accélère la recherche mais augmente les oscillations autour de la puissance maximale MPP. Une petite perturbation engendre l'effet inverse.
- Le rendement change en fonction de la perturbation choisie.
- Pour les fortes variations des conditions climatiques, l'algorithme peut se tromper et son action produit l'inverse de ce qui est désiré. Sur la figure III-2, [32], une diminution de la tension en même temps d'une augmentation de l'irradiation, donc de la puissance, conduit la commande à considérer que l'augmentation de la puissance est due à une diminution de la tension.

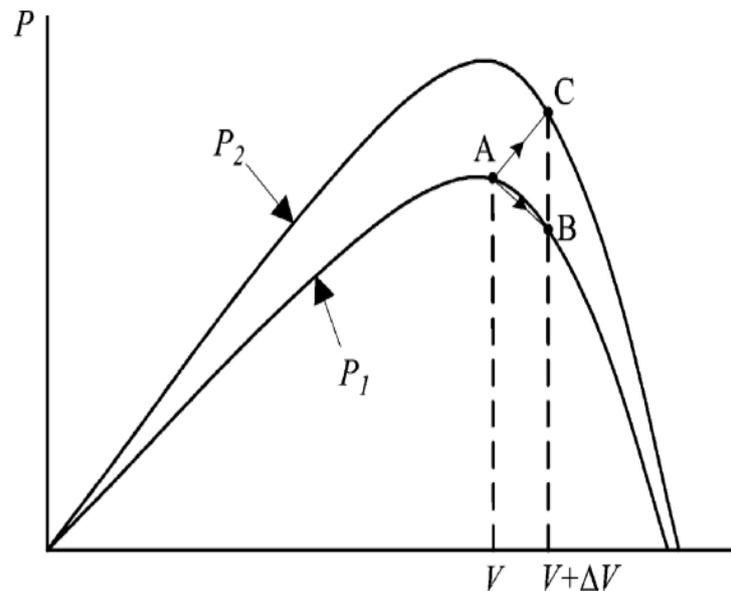


Figure III-2 Diminution de la tension en même temps d'une augmentation de l'irradiation, [32]

3. La commande Incrémentation de la Conductance

La technique Incrémentation de la Conductance (en anglais : Incremental conductance « IncCond ») est, comme la méthode P&O, très utilisée pour la recherche de la puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques [30, 32-35]. Elle est relativement simple et performante et elle fonctionne correctement pour les très fortes variations des conditions climatiques, notamment l'irradiation, [32].

Cette technique est basée sur le fait que la pente de la dérivée de la puissance par rapport à la tension de la courbe de puissance-tension (P-V) du générateur photovoltaïque est nulle au point de puissance max MPP, positive à gauche du MPP et négative à droite, Figure III-3.

Sachant que le courant du panneau dépend de la tension, la dérivée de la puissance par rapport à la tension peut s'écrire :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (\text{III-1})$$

A partir de l'équation (III-1), on peut tirer les conclusions suivantes :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad P = P_{max}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad P \text{ à gauche de } P_{max} \quad (\text{III-2})$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad P \text{ à droite de } P_{max}$$

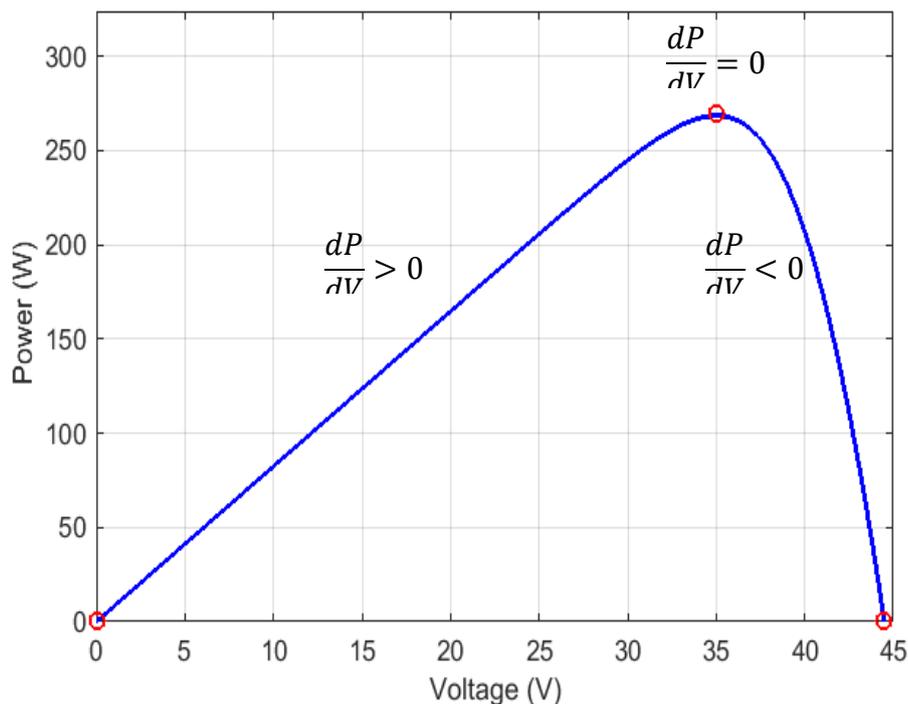


Figure III-3 Signe de la pente de la puissance sur la courbe P-V

Le MPP est donc recherché par la comparaison entre la conductance G (I/V) et l'incrément de la conductance $dG(dI/dV)$ instantanées. Une fois le MPP est trouvé, on ne change plus la tension jusqu'à une variation du courant. Dans ce cas, l'algorithme commence de nouveau la recherche du nouveau MPP, [32-35].

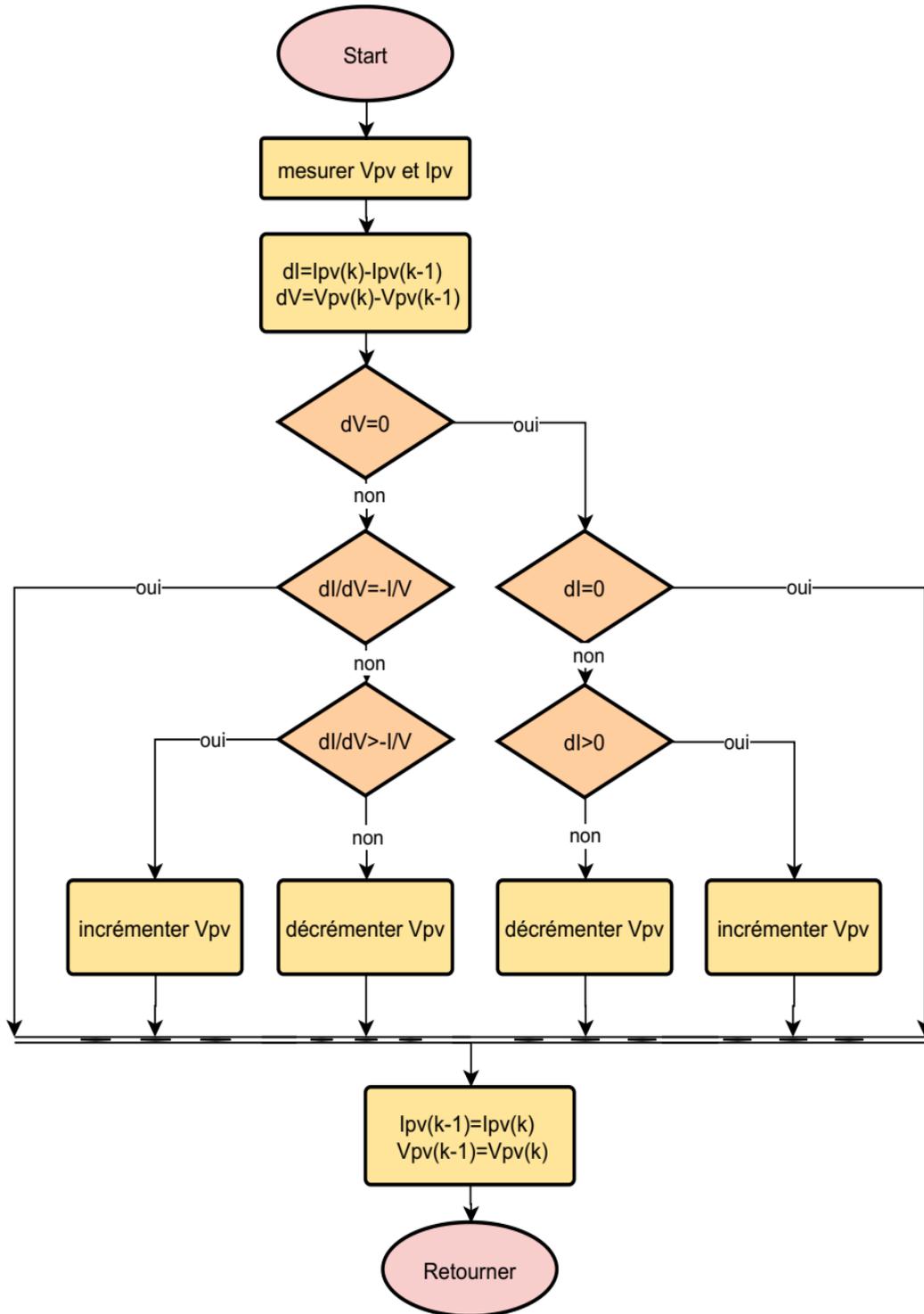


Figure III-4 Organigramme de la commande IncCond, [32-35]

Comme la méthode P&O, cette technique (IncCond) souffre du choix de la valeur de la perturbation, une grande perturbation accélère la recherche mais augmente les oscillations autour du MPP au régime permanent. Une petite perturbation diminue les oscillations mais ralentit la convergence vers le MPP.

4. La commande Incrémentation de la Conductance améliorée

L'algorithme IncCond classique utilise un pas de perturbation de la tension fixe, ce qui empêche d'obtenir simultanément une réponse dynamique rapide et une bonne précision de suivi de la puissance maximale, car si la taille du pas est augmentée pour obtenir une réponse rapide, la précision de suivi du MPP est diminuée et vice versa, [32-35].

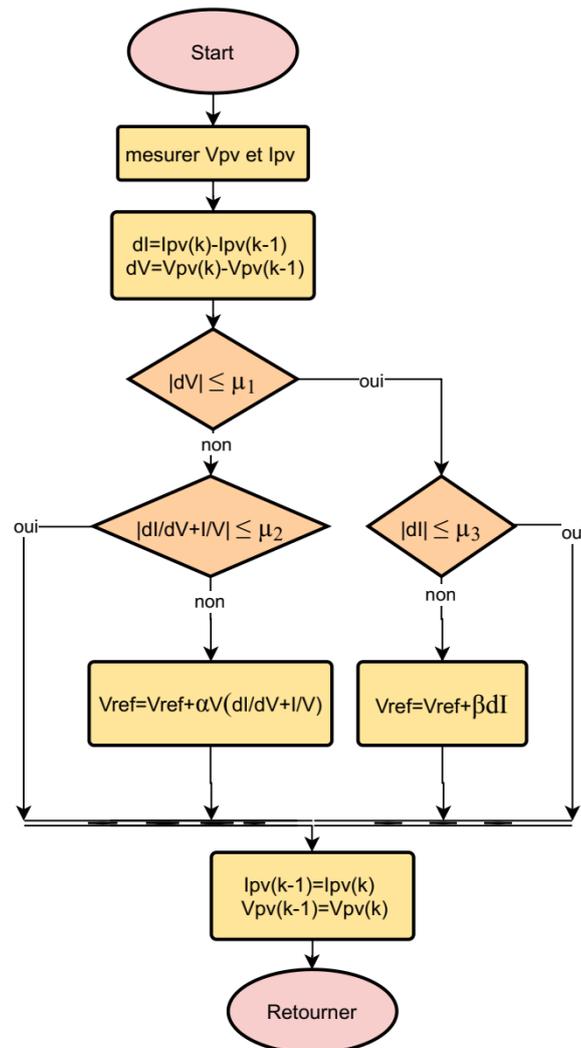


Figure III-5 Organigramme de la commande IncCond améliorée, [35]

Pour surmonter ce problème de « oscillations vs rapidité », un algorithme amélioré, figure III-5, avec un pas variable a été proposé dans l'article [35]. Cette perturbation variable dépend de la position de la puissance actuelle par rapport au point max MPP, si le point actuel est loin du MPP, l'algorithme utilise un grand pas pour augmenter la dynamique. En revanche, si le point est proche du MPP, l'algorithme utilise un faible pas pour réduire les oscillations autour du MPP et augmenter l'énergie captée, donc le rendement du système

s'améliore. Notons que l'adaptation du pas est effectuée d'une manière automatique, [34,35].

Globalement, le fonctionnement de cette méthode est le suivant :

- Après la mesure de la tension V et du courant I , on calcule les différences dV et dI .
- Si la variation de la tension dV est inférieure à une petite constante μ_1 , donc la tension n'a pas été trop changée précédemment, l'algorithme vérifie dans ce cas la variation du courant. S'il y a une variation du courant (donc variation de l'irradiation) supérieure à μ_3 , la tension est adaptée par la quantité βdI . Sinon (s'il n'y a pas de variation du courant), on garde la même tension précédente.
- Si la variation de la tension dV est supérieure à μ_1 (tension modifiée dans l'itération précédente), l'algorithme teste la dérivée de la puissance si elle est inférieure à une constante μ_2 (très faible), dans ce cas la puissance est maximale(ou presque) et la tension ne sera pas changée. En revanche, si la dérivée de la puissance est supérieure à μ_2 , la tension est perturbée par un pas qui dépend de la pente de la puissance, de la tension et d'une variable α . Donc, on aura au final un pas variable et auto-adapté en fonction de la position par rapport au MPP.

Les paramètres μ_1 , μ_2 et μ_3 (positifs et proches de zéro) sont introduits pour ne pas trop solliciter la tension si la puissance est proche du MPP. Cela permettra de réduire les oscillations, [34, 35].

Les facteurs d'accélération α et β sont choisis de la manière suivante, [35] :

- β doit être positif et relativement faible.
- α doit respecter la condition suivante :

$$\alpha \leq \frac{Pas_{\max}}{\left| \frac{dI}{dV} \right|_{\max}} \approx \frac{Pas_{\max}}{\left| \frac{mI|_{V=mV_{oc}}}{m-1} \right|} \quad (\text{III} - 3)$$

Pas_{\max} est la perturbation maximale que l'on peut choisir. m est un nombre très proche de 1 (ex : 0.98). V_{oc} est la tension du panneau sans charge (circuit ouvert). $I_{V=mV_{oc}}$ est le courant qui correspond à la tension $V=mV_{oc}$, donc il est très faible.

5. Comparaison par simulation entre les trois méthodes

Pour faire une comparaison entre les performances des trois méthodes présentées précédemment, nous avons utilisé le logiciel MATLAB/SIMULINK. Le schéma bloc construit, utilisé pour toutes les simulations, est donné par la figure III-6.

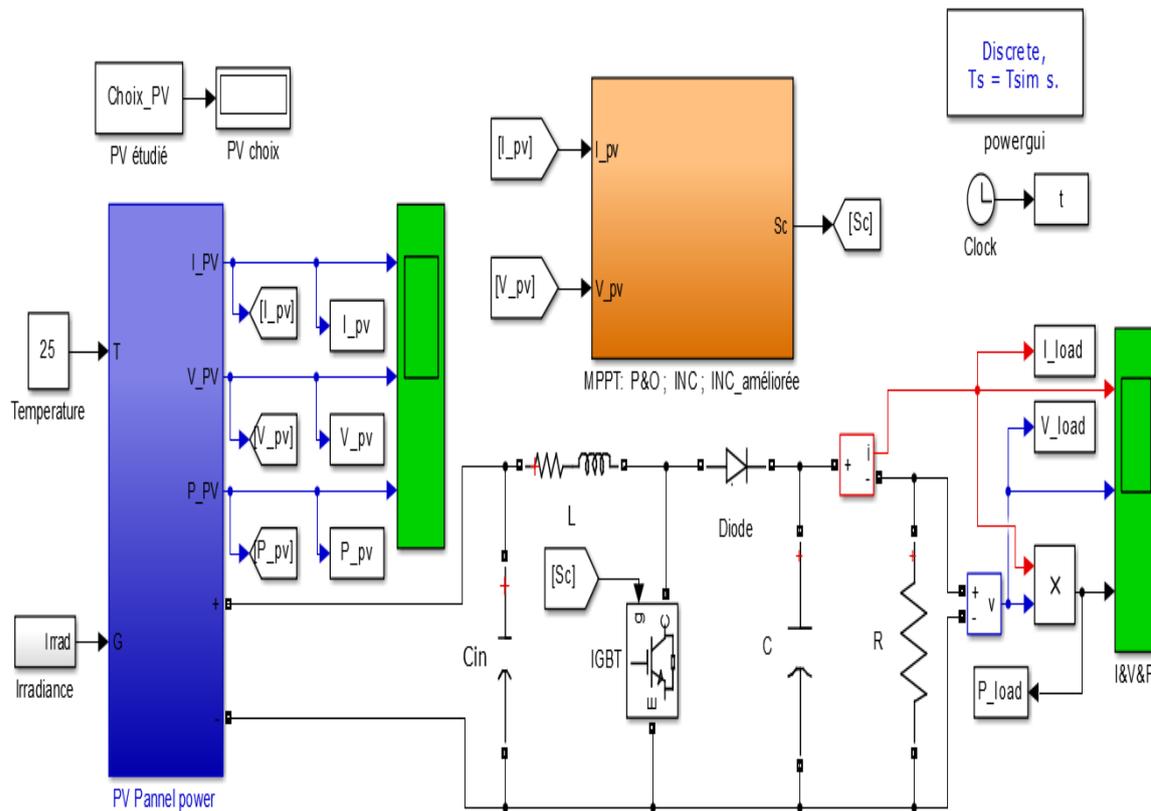


Figure III-6 Schéma bloc de simulation du système photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque que nous avons utilisé est de 200 W de marque **KC200GT** [28, 29] associé à un convertisseur DC-DC élévateur (Boost) alimentant une charge résistive de 50 Ω. Les paramètres du convertisseur sont donnés dans le tableau III-2.

Tableau III-2 paramètres du convertisseur Boost

Puissance	200 W	Condensateur d'entrée	73.53 10⁻⁶ F
Condensateur de sortie	73.53 10 ⁻⁶ F	Inductance	0.0024 H

La structure de la commande P&O réalisée sur MATLAB est donnée par la figure suivante :

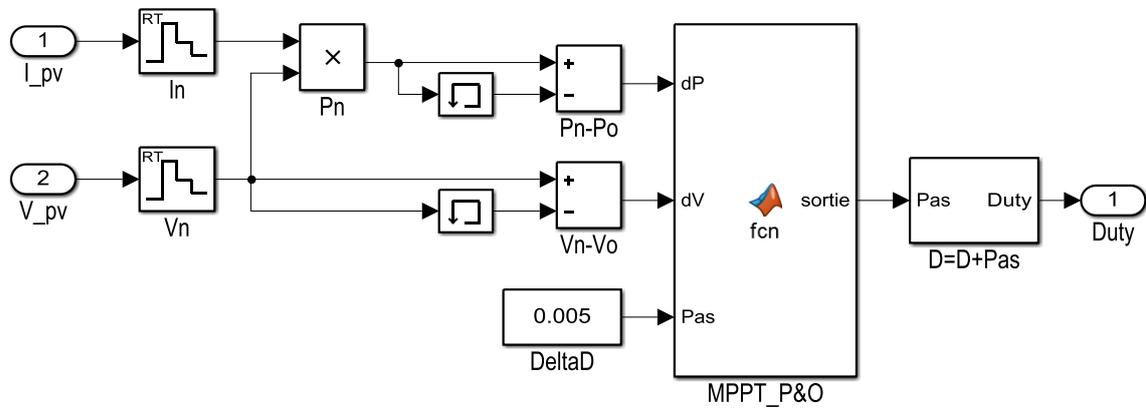


Figure III-7 Structure de la commande MPPT P&O

Pour la commande IncCond, son schéma bloc est donné par la figure III-8.

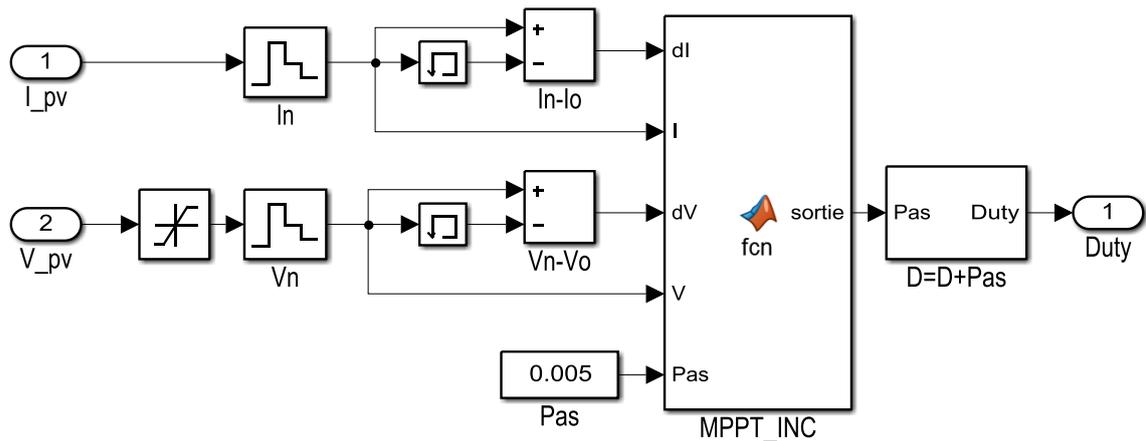


Figure III-8 Structure de la commande MPPT IncCond

Les fonctions MATLAB utilisées dans les schémas bloc des deux méthodes P&O et INC génèrent le signe de l'incrément en fonction de l'algorithme de chaque méthode. Par contre la perturbation (ou le pas) est fixe. Dans notre étude, le pas choisi pour les deux techniques de commande (P&O et INC) est très faible : 0.005.

Dans le cas de la commande IncCond-améliorée, sa structure est plus simple que celle de la commande IncCon à pas fixe. Son schéma bloc est donné par la figure III-9.

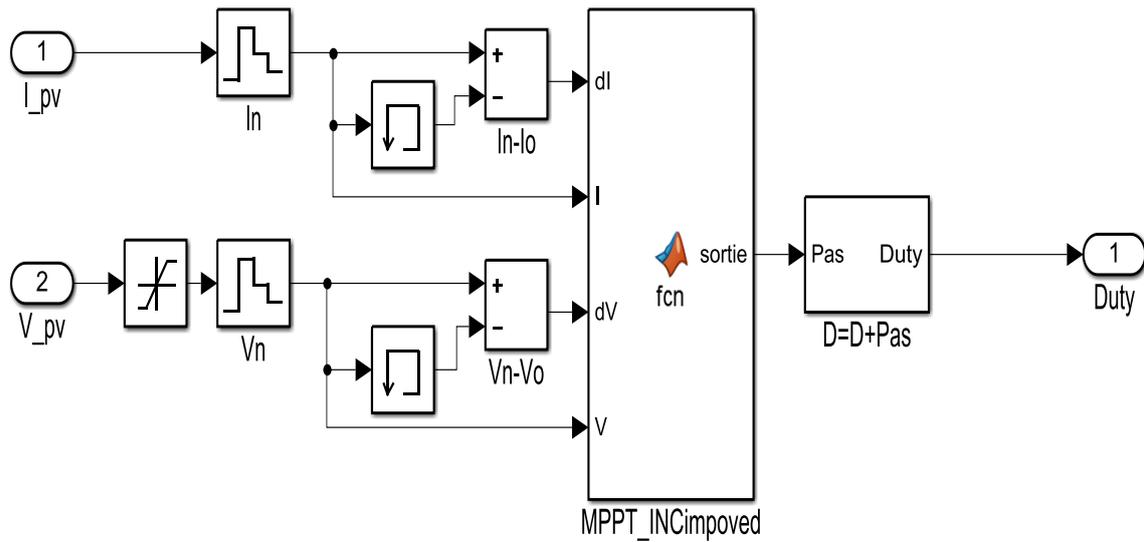


Figure III-9 Structure de la commande MPPT IncCond améliorée

Les paramètres de contrôle de cet algorithme sont fixés après plusieurs tests de simulations, les valeurs utilisées pour cette étude sont :

$$\mu_1 = 0.1 ; \mu_2 = 0.1 ; \mu_3 = 0.8 ; \alpha = 0.5 ; \beta = 10 ;$$

Pour tester l'efficacité du suivi du point max MPP et le rendement pour des variations de l'irradiation, nous avons utilisé le profil de l'irradiation donné par la figure III-10.

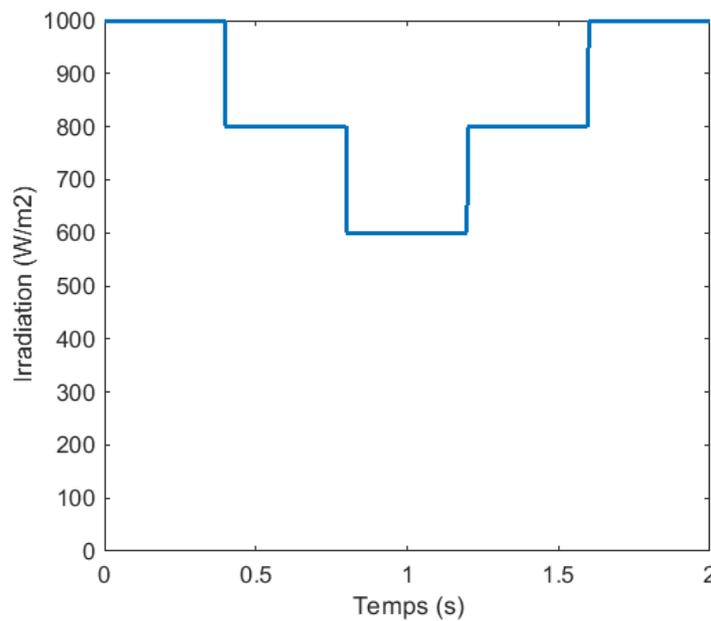


Figure III-10 Variation de l'irradiation utilisée pour cette étude comparative

Les puissances obtenues par les trois méthodes sont donnée sur la figure III-11.

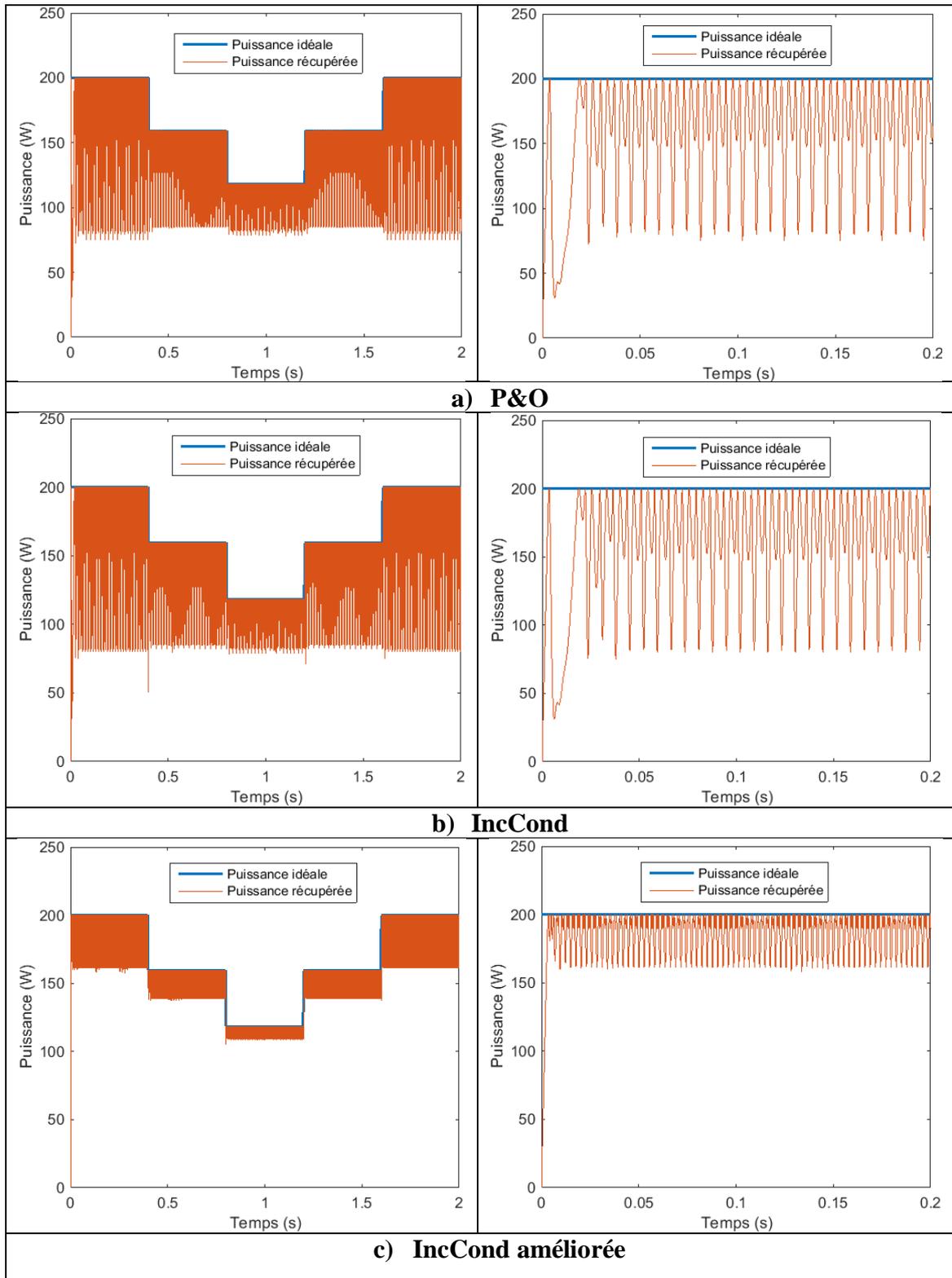


Figure III-11 Puissance du panneau obtenue par les trois méthodes

Les rendements et les courbes de la variation de la puissance en fonction de la tension du panneau sont donnés par la figure III-12.

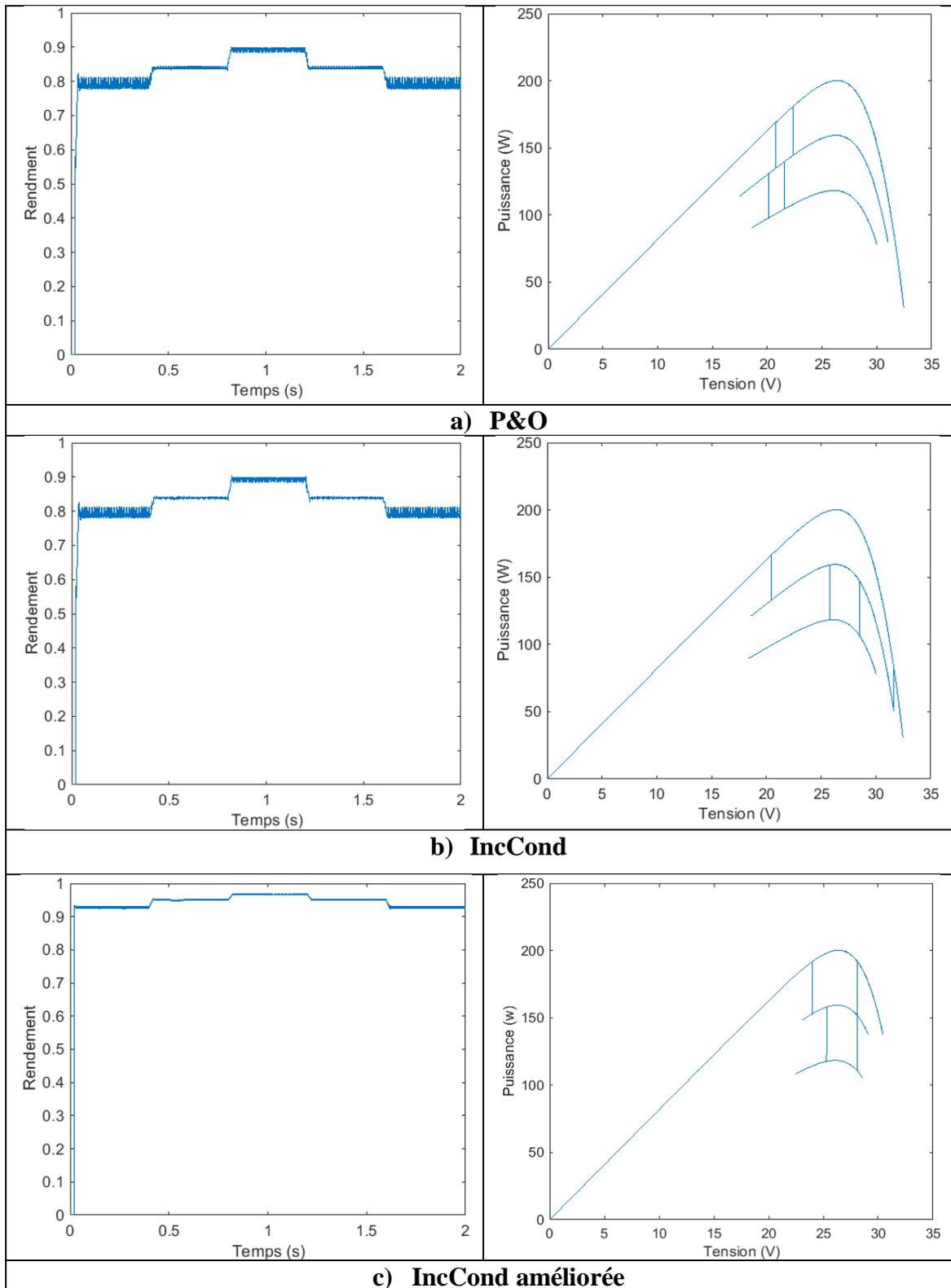


Figure III-12 Rendement et variation de la puissance en fonction de la tension (P-V)

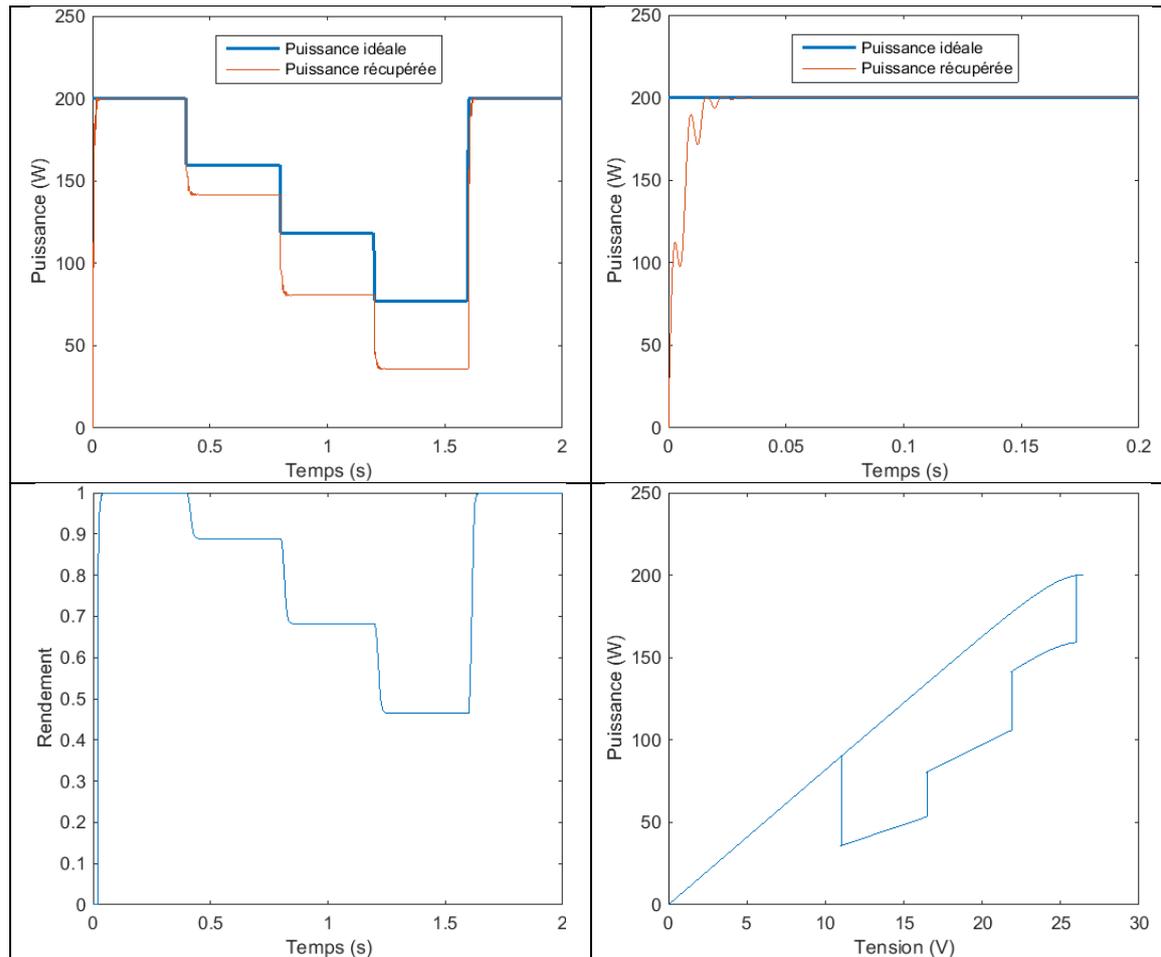


Figure III-13 Performances sans commande MPPT (PWM simple) avec un rapport cyclique optimal pour une irradiation de 1000 W/m^2

La figure III-11, montre clairement que les deux techniques P&O et IncCond donnent des puissances et des performances pratiquement similaires (dynamique de recherche et oscillations autour du MPP) pour le même pas de variation de la tension du panneau. En revanche, la méthode IncCond permet une très bonne dynamique de recherche de la puissance maximale tout en assurant de faibles oscillations autour du MPP, ce qui se traduit par un meilleur rendement par rapport aux deux autres méthodes comme indiqué sur la figure III-12. Ces bonnes performances sont possibles à cause du pas auto-adapté et de la présence de plusieurs paramètres de contrôle qui permettent une meilleur flexibilité et adaptation de la méthode IncCond améliorée.

Notons que l'on peut réduire les oscillations et améliorer le rendement des deux méthodes P&O et IncCond en réduisant le pas de perturbation de la tension. Malheureusement, dans ce cas la dynamique de recherche sera très lente.

La figure III-13, montre les performances du système sans une commande MPPT (un rapport cyclique fixe et égale au rapport optimal du cas de l'irradiation 1000 W/m²). On voit bien que la puissance et le rendement diminuent fortement si l'irradiation diminue en dessous de 1000 W/m². Cela montre, que la commande MPPT est presque indispensable notamment pour les systèmes de grande puissance. En comparant les résultats obtenus, on peut dire que les trois méthodes MPPT surpassent largement le cas de commande sans MPPT surtout dans le cas des fortes variations climatiques.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter le principe des trois techniques de commande MPPT, à savoir : la méthode P&O, la méthode IncCond et une version améliorée de cette dernière utilisant un pas variable.

Une comparaison par simulation entre les trois méthodes étudiées a été effectuée à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK. Nous avons constaté que les deux méthodes « P&O » et « IncCond » donnent pratiquement les mêmes performances si elles utilisent la même valeur de la perturbation de la tension. En revanche, la méthode IncCond améliorée a donné la meilleure dynamique, les plus faibles oscillations de la puissance et le meilleur rendement. Ces performances remarquables sont la conséquence du pas auto-adapté utilisées dans la méthode IncCond améliorée. Cependant, les trois méthodes, arrivent à suivre le point de puissance maximale même pour des variations brusques de l'irradiation.

Nous signalons que, à cause de la situation actuelle du pays : fermeture des universités et le confinement partiel à cause de COVID-19, nous n'avons pas pu réaliser pratiquement les différentes techniques proposées à l'aide de la carte de développement dSPACE 1104 que nous disposons dans notre département.

Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail nous avons présenté une étude comparative par simulation entre différentes techniques de commande MPPT des systèmes solaires photovoltaïques.

Pour bien mener ce travail, nous avons commencé dans le premier chapitre par des généralités sur l'énergie solaire.

Nous avons entamé le deuxième chapitre, par le développement du modèle mathématique du panneau solaire et du convertisseur de puissance DC/DC élévateur (Boost) alimentant une charge résistive. Une classification, non exhaustive, des techniques de suivi et d'optimisation de la puissance du panneau a été présentée dans la dernière partie de ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, une présentation des trois techniques de commande MPPT a été faite, à savoir : la méthode de perturbation et observation (P&O), la méthode de l'incrémentation de la conductance (IncCond) et une version améliorée de la méthode IncCond qui utilise un pas auto-adapté. Les résultats de cette étude montrent que la technique IncCond à pas variable surpasse les deux autres techniques (P&O et IncCond) et permet une très bonne dynamique de recherche de la puissance maximale et un faible taux d'oscillations autour du point MPP.

Parmi les perspectives de ce travail, on peut citer :

- Implémentation pratique des techniques étudiées à l'aide de la carte dSPACE.
- Etudier d'autres techniques de commande MPPT (logique floue...) et faire une comparaison entre elles.
- Utiliser des méthodes d'optimisation pour choisir les meilleurs paramètres de contrôle de la méthode IncCond améliorée (à pas variable).
- Etudier d'autres types de convertisseurs DC/DC avec (ou sans) système de stockage.

Références Bibliographiques

1. Rafika khezar « Optimisation de chaîne de conversion d'énergie Photovoltaïque en énergie électrique » Thèse de doctorat de L'Université El-Hadj Lakhdar - Batna 1 (2017).
2. MAASOUM Sara : « Contrôle avec les techniques de l'intelligence artificielle d'une source d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » Thèse de doctorat de L'Université DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES.
3. le photovoltaïque –module 3- fonctionnement et technologie institut bruxellois pour la gestion de l'environnement 2010.
4. AMARDJIA Adnani hania « Livre Algérie énergie solaire et Hydrogène développement durable » 2007.
5. ABOUDA Salim « Contribution a la commande des systèmes photovoltaïques Application aux systèmes de pompage » Thèse de doctorat en co-tutelle de L'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax 2015.
6. BELKAID Abdelhakim : « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome » thèse doctorat de L'Université FERHAT ABBAS - SETIF 1 (2015).
7. C. Roger, Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques, Thèse de Doctorat de L'Université de Grenoble, (2006).
8. F. Bandou, Contribution à l'analyse des performances électriques et thermiques des modules photovoltaïques de différentes technologies, Thèse de Doctorat de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2015).
9. V. Foncrose, Nanocristaux : « films et cellules photovoltaïques de Cu₂ZnSn (SSe) 4 par impression d'encres », Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, (2015).
10. M. Mimoune, Etude des capteurs photovoltaïques basés sur les nanotechnologies, Thèse de Doctorat de l'Université de Québec, (2016).
11. <https://www.connaissance-des-energies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque>.
12. Abdoulwahab Adaine : « Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN ». Thèse de doctorat de l'Université de Lorraine, 2018. Français.

13. CUONG HUNG TRAN : «Améliorations d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement ». Thèse de doctorat de l'Université de REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE 2019.
14. ZAGHBA Layachi : « Etude et Commande Adaptative par les Techniques Intelligentes Des Systèmes Non linéaires Application aux Systèmes Photovoltaïques » Thèse de doctorat de L'Université Mohamed Khider – Biskra 2017
15. Cédric CABAL « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ». Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2008. Français: 2008.
16. M. Mustapha BELARBI « Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome » Thèse de doctorat de l'université Mohamed BOUDIAF D'oran 2015
17. KHENFAR Riyad: « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques » Thèse de doctorat de l'université Ferhat Abbas - SETIF 2015.
18. Amrouayache Mohamed: « Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque ». Thèse de doctorat de l'université de Constantine 2014
19. Azeddine HOUARI « contribution a l'étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques ». Thèse de doctorat de l'université de Lorraine, Français 2012.
20. JBILOU Mokhtaria : «Etude, simulation et réalisation d'un onduleur pour système photovoltaïque ». Thèse de doctorat l'université de DJILLALI Liabes de Sidi-Bel-Abbes 2019.
21. BOUTLILIS Fatima « Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique » Thèse de doctorat de l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem 2018.
22. BELHADJ Mohamed: « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome ». Mémoire de Magistère du centre universitaire de Bechar 2008.
23. Seghir BENHALIMA : « Modélisation et Contrôle des Systèmes Éoliens-Solaire Intégrés au Réseau VSC-HVDC » Thèse de doctorat d'école de technologie supérieure université du QUÉBEC 2019.
24. ATTOUI Hadjira : « Contribution à la synthèse de nouvelles stratégies de commande des systèmes d'énergie renouvelable » Thèse de doctorat de l'université FERHAT Abbas SETIF-1 2017.
25. BRAHAMI IMEN SOUHILA Epouse BOUSMAHA: « Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires » Thèse de doctorat de l'université DJILLALI Liabes de SIDI-BEL-ABBES 2018.

26. Dris Mida « Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Énergie Électrique Hybride Éolien – Photovoltaïque ». Thèse de doctorat de Mohamed Khider – Biskra 2019.
27. Amrani Mohamed Nader: « Conception d'un onduleur solaire avec MPPT intégré ». Thèse de doctorat l'université LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI 2017.
28. KC200GT High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module Datasheet Kyocera. [online]. Available: <https://www.energymatters.com.au/images/kyocera/KC200GT.pdf>
29. A. Elkholy, A.A. Abou El-Ela, « Optimal parameters estimation and modelling of photovoltaic modules using analytical method », *ELSEVIER, Heliyon* 5 (2019).
30. **Shweta Soni**, « Review of Maximum Power Point Tracking: History, Developments and Challenges », *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 7(2): 07-10(2018).
31. TATI Fethallah, BEN LAMOUDI Oussama, « Étude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue », Mémoire de MASTER en Electrotechnique Industrielle, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 25/06/2018.
32. Trishan ESRAM, Patrick L. Chapman, « Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques », *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 22, NO. 2, JUNE 2007.
33. HADJI Slimane, "Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque ", Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2018.
34. R. Boukenoui, M. Ghanes, J.-P. Barbot, R. Bradai, A. Mellit, H. Salhi, "Experimental assessment of maximum power point tracking methods for photovoltaic systems ", *Energy* (2017), doi: 10.1016/j.energy.2017.05.087.
35. Liu B., Duan S., Liu F., Xu P., Analysis and Improvement of Maximum Power Point Tracking Algorithm Based on Incremental Conductance Method for Photovoltaic Array, 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2007.