



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



Université Amar Telidji- Laghouat -

FACULTE : Technologie

DEPARTEMENT : Electrotechnique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : ZAABTA Walid

FARHAT Ibrahim el Khalil

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Electrotechnique

OPTION : Energies renouvelables

Thème

**Etude expérimentale et simulation énergétique d'une
mini centrale photovoltaïque autonome du poste de garde
Cas étudié : au sein de sud d'Algérie**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
CHTTIH Saliha	Prof	Président
BIRAN Mouhoub	M.C.A	Examineur
BOUCHIBA Oumelkhir	M.C.A	Rapporteur
MERIZGUI Tahar	Dr	Co-Rapporteur

Promotion : 2021-2022

إن استخدام الطاقة المتجددة شهد في السنوات الأخيرة تطورا كبيرا، السر وراء هذا التطور الكبير هو تطور الخلية الضوئية التي كانت موضوع بحث في العديد من المختبرات. يهدف عملنا في هذه المذكرة إلى دراسة نمذجة نظام إنتاج الكهرباء الضوئية. وتستند الدراسة الى المقارنة بين عدة الثنائيات الصمام الثنائي مفردة ومزدوجة لتحديد الخصائص شدة التيار الكهربائي وفرق الكمون في نظام الألواح الشمسية، وأيضا دراسة مقارنة لعدة نماذج تميز الخلية الضوئية وتأثير العوامل الخارجية مثل ودرجة الحرارة والضوء. ويتم أيضا مقارنة أداء تقنيات تتبع نقطة الطاقة القصوى المختلفة لتحديد وقت الوصول إلى أقصى نقطة طاقة بدقة وتقليل التذبذبات في ظل الظروف الجوية المتغيرة بسرعة. يتم تقدير الأداء بناءً على يوم واحد (24 ساعة) من قياسات الإشعاع ودرجة الحرارة. يتم تنفيذ تقنيات تتبع نقطة الطاقة القصوى المختلفة على محول التيار المستمر، وقد استند إلى أنه في جميع الاختبارات، تم تحسين تحقيق تتبع نقطة الطاقة القصوى المختلفة عن طريق استعمال مختلف الخوارزميات.

الكلمات مفتاحية: الخلايا الشمسية، نمذجة، الطاقة الكهربائية، الضوئية.

Résumé

L'utilisation des énergies renouvelables ces dernières années a connu un grand développement, le secret derrière cet énorme développement est le développement de cellules photovoltaïques, qui ont fait l'objet de recherches dans de nombreux laboratoires. Nos objectifs dans ce mémoire et l'étude et la modélisation des systèmes de production d'électricité photovoltaïque. L'étude est basée sur la comparaison entre plusieurs modèles : diode simple et double pour déterminer les caractéristiques de l'intensité du courant électrique et la tension dans le système de panneau solaire, ainsi qu'une étude comparative de plusieurs modèles caractérisent cellule photovoltaïque et l'impact de facteurs externes tels que la température et la lumière. Ainsi nous avons étudié la comparaison entre les performances des différentes techniques MPPT pour déterminer avec précision quand le MPP a été atteint et réduire les oscillations presque jusqu'à la réponse du MPP dans des conditions météorologiques changeant rapidement. Les performances sont estimées et fondées pour une journée (24 h) de mesures d'éclairement et de température. Les techniques MPPTs sont réalisées sur un convertisseur DC/DC.

Mots-clés : cellules solaires, la modélisation, de l'énergie électrique, l'énergie photovoltaïque.

Abstract

The use of renewable energies in recent years has experienced a great development, the secret behind this huge development is the development of photovoltaic cells, which have been researched in many laboratories. Our objectives in this thesis are to study and model photovoltaic power generation systems. The study is based on the comparison between several models: single and double diode to determine the characteristics of the electric current and voltage in the solar panel system, as well as a comparative study of several models characterize photovoltaic cell and the impact of external factors such as temperature and light. Thus, we studied the comparison between the performance of different MPPT techniques to accurately determine when the MPP has been reached and reduce the oscillations almost to the MPP response under rapidly changing weather conditions. The performance is estimated and based on one day (24 h) of illuminance and temperature measurements. The MPPTs techniques are performed on a DC/DC converter.

Keywords: solar cells, modelling, electrical energy, photovoltaic energy.

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu ALLAH le tout puissant et miséricordieux qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail

En second lieu, je remercie notre encadreur Madame BOUCHIBA Oumelkhir et notre Co-encadreur Mr MERIZGUI Tahar pour leurs précieux conseils, leurs aides et pour leurs orientations tout au long de notre recherche

Je remercie chaleureusement l'ensemble des membres du jury pour l'honneur qu'ils ont fait en acceptant d'évaluer notre travail.

Mme CHETTIH Saliha (Président du jury)

Mr BIRAN Mouhoub (Examineur)

Nous tenons à saisir cette occasion pour adresser mes profonds remerciements et mes profondes reconnaissances à

Tous les enseignants du département « Électrotechnique »

Je tiens également à remercier Mlle MIZAT Leïla, pour toute son aide et ses conseils.

Je tiens à remercier très sincèrement tous les membres de notre famille et mes amis pour leurs soutiens et leurs encouragements

Je tiens à remercier toutes personnes qui ont participé de près ou de loin à l'exécution de ce modeste travail.

Dédicace

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifiques parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A ma sœur, mon frère et leur petite famille pour leurs appuis et leur encouragement.

A tous mes amis et toute ma promotion.

A tous ce qui de loin ou de près n'ont pas cessé de m'apporter leur soutien, pendant mes années d'études.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

ZAAABA Walid

Dédicace

Je dédie ce travail à ce que j'ai de plus précieux en ce monde, mes parents, qui ont été à mes côtés, m'ont soutenue et encouragé durant toute ma vie, je ne les remercierai jamais assez pour cela, Que dieu me les garde.

Merci du fond du cœur à ma sœur, mes frères et ma camarade M.Manel , qui n'ont jamais cessé de me pousser vers le haut.

Je tiens à remercier aussi toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de mes études.

Je vous en suis très reconnaissante à toutes et à tous.

Farhat ibrahim El khalil

Resume	i
Remerciements.....	ii
Dédicaces.....	iv
Sommaire	vi
Liste des figures	1
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 01 : Modélisation Et Simulation Des Cellules Photovoltaïques.....	3
1.1. Introduction.....	4
1.2. Modélisation des cellules photovoltaïques.....	5
1.3. Modèle a deux diodes.....	6
1.3.1.Modèle à sept paramètres (2M7P).....	6
1.3.2.Modèle à six paramètres (2M6P).....	12
1.3.3.Modèle à cinq paramètres (2M5P).....	14
1.4. Modèle a une diode.....	16
1.4.1.Modèle à trois paramètres (L3P).....	16
1.4.2.Modèle à quatre paramètres (L4P).....	19
1.4.3.Modèle à cinq paramètres (L5P).....	20
1.5. Résultats et discussion	22
1.5.1. Influence de la résistance shunt.....	22
1.5.2.Influence de la résistance série.....	26
1.6. Conclusion.....	31
Chapitre 02 : Amélioration De Rendement Energétique De Système Photovoltaïque.....	33
1.1. Introduction.....	34
1.2. Théorie du convertisseur « boost » (analyse et principe de fonctionnement).....	34
1.3. Théorie du convertisseur « buck ».....	36
1.4. Théorie du convertisseur « buck-boost » (Analyse et principe de fonctionnement)....	38
1.5. La poursuite du point de puissance maximale	39
1.6. La commande MPPT (Maximum Power Point Tracker).....	39
1.6.1.Principe de la recherche du point de la puissance maximale.....	39
1.6.2.Techniques de recherche de point de puissance maximal MPPT.....	40
1.6.2.1. Principe des techniques “Perturb and Observe” (P&O)	40
1.6.2.2. Principe des techniques “Incrément de conductance” (Inc.CoN)	43
1.6.3.Les avantages et les inconvénients	46
1.6.4.Critères d’évaluation d’une commande MPPT.....	46
1.6.4.1. Simplicité et Coût.....	47

1.6.4.2.	Réponse dynamique.....	47
1.6.4.3.	Flexibilité.....	47
1.6.4.4.	Compétitive sur une large gamme de puissance.....	47
1.7.	Théorie du convertisseur DC/AC « Onduleur » (Analyse et principe de fonctionnement).....	48
1.7.1.	L'onduleur central.....	48
1.7.2.	Les onduleurs strings	49
1.7.3.	Les onduleurs multi-string.....	50
1.8.	Comparaison entre les convertisseurs DC/ AC « onduleur »	52
1.9.	Conclusion.....	53
CHAPITRE III :	Application et Simulation sur la zone étudié.....	54
2.1.	Introduction.....	55
2.2.	Présentation d'un site étudiée.....	55
2.3.	Générateur PV utilisé.....	56
2.4.	Simulation de deux panneaux PV utilisé.....	57
2.5.	Simulation de deux champs PV utilisé.....	60
2.6.	Configuration expérimentale du système proposé.....	62
2.7.	Simulation de total système PV étudiée.....	64
2.7.1.	Simulation de system PV sans MPPT.....	64
2.7.2.	Simulation de system PV avec MPPT(P&O).....	66
2.7.3.	Simulation de system PV avec MPPT (incCond).....	68
2.8.	Etude comparative de simulation de system PV sans et avec MPPTs.....	69
2.9.	Conclusion.....	71
CONCLUSION GENERALE.....		73
Références bibliographies.....		

Figure I.1: Module BP Solar

Figure I.2 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles 2M7P

Figure I.3 : Caractéristiques I (V) et P (V) d'une cellule photovoltaïque 2M7P

Figure I.4 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles 2M6P

Figure I.5 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque 2M6P

Figure I.6 : Schéma équivalent du modèle à deux « exponentielles 2M5P

Figure I.7 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque 2M5P

Figure I.8 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle L3P

Figure I.9 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque L3P

Figure I.10 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle L4P

Figure I.11 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque, L4P

Figure I.12 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle L5P

Figure I.13 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque L5P

Figure I.14 : L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique I (V)

Figure I.16 : L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur les caractéristiques I (V), P(V),
 $G=1000W/m^2$

Figure I.17 : L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur les caractéristiques I (V), P(V),
 $G=250W/m^2$

Figure I.18 : L'influence de la résistance série (R_s) sur la caractéristique I(V) d'une cellule

Figure I.19 : L'influence de la résistance série (R_s) sur la caractéristique P(V) d'une cellule

Figure I.20: Caractéristiques I-V pour les modèles à deux exponentielles

Figure I.21: Caractéristiques P-V pour les modèles à deux exponentielles

Figure I.22: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle

Figure I.23: Caractéristiques P-V pour les modèles à une exponentielle

Figure I.24: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle et à deux exponentielles,
 $G=200W/m^2$. $T=25^\circ C$

Figure I.25: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle et à deux

exponentielles, $G=1000\text{W/m}^2$

Figure I.26: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle et à deux exponentielles, $T=75^\circ\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$

Figure I.27: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle et à deux exponentielles, $T=0^\circ\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$

Figure II.1 Schéma de base d'un convertisseur boost

Figure II.2: Schémas équivalents de l'hacheur parallèle K : fermé

Figure II.3 : Schémas équivalents de l'hacheur parallèle k : ouvert

Figure II.3 : Schémas équivalents de l'hacheur parallèle k : ouvert

Figure II.4: Schéma de base d'un convertisseur Buck

Figure II.5: Schéma équivalents de l'hacheur série S : fermé

Figure II.6: Schémas équivalents de l'hacheur série S : ouvert

Figure II.7: Schéma de base d'un convertisseur buck-boost

Figure II.8 : Schéma de principe de la commande MPPT

Figure II.9. Caractéristique $P(V)$ d'un panneau solaire

Figure II.10 : Organigramme de l'algorithme P&O

Figure II.11 . Positionnement du point de fonctionnement ($G=1\text{kW/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$).

Figure II.12: Organigramme de l'algorithme Inc.CoN

Figure II.13 : Onduleur central

Figure II.14 : Onduleur string

Figure II.15 : Nouvelle structure de conversion multi-string

Figure III.1. Position des instruments de mesure de l'ensoleillement solaire global

Figure III.2. Résultat de la mesure de l'ensoleillement solaire totale en par jour dans la ville de Ghardaïa

Figure III.3 : GPV utilisé dans la présente étude.

Figure III.4.1 : schéma de panneau PV(50w) utilisé sous Matlab/Simulink.

Figure III.4.2 : résultats de la puissance de panneau PV(50w) utilisé sous Matlab/Simulink.

Figure III.4.3 : résultats de courant de panneau PV(50w) utilisé sous Matlab/Simulink

Figure III.5.1 schéma de panneau PV(55w) utilisé sous Matlab/Simulink.

Figure III.5.2 résultats de courant de panneau PV(55w) utilisé sous Matlab/Simulink

Figure III.5.3 résultats de la puissance de panneau PV(55w) utilisé sous Matlab/Simulink.

Figure III.6 : Résultats de simulation de deux champs PV utilisé sous Matlab/Simulink

Figure III.7 : Expérimentale résultats de de deux champs PV utilisé.

Figure III.8. Transfert de puissance via la GPV total.

Figure III.9. Configuration expérimentale du système proposé

Figure III.10 Courant et tension transférés via la charge.

Figure III.11. Puissance total transférés via la charge.

Figure III.12. schema de system PV sans MPPT sous MATLAB SIMULINK

Figure III.13. les resultats des simulation de V_{ac} , rendement energetique, P_{ac} sans MPPT

Figure III.14. schema de system PV avec MPPT(P&O) sous MATLAB SIMULINK

Figure III.15 : les resultats des simulation de rapport cyclique , V_{ac} , P_{ac} ,rendement energetique, avec MPPT(P&O)

Figure III.16 : schema de system PV avec MPPT(inc) sous MATLAB SIMULINK

Figure III.17 : les resultats de simulation obtenue de rapport cyclique , V_{ac} , P_{ac} ,rendement energetique, avec MPPT(IncCond)

Figure III.18 : Caractéristique de comparaison de AC tension entre diffèrent MPPTs techniques (Sans MPPT-P&O-IncCond).

Figure III.19 : Caractéristique de comparaison de rendement énergétique entre diffèrent MPPTs techniques (Sans MPPT-P&O-IncCond

Figure III.20 : Caractéristique de comparaison de rapport cyclique entre P&O-IncCond MPPTs.

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

La demande sur l'énergie électrique ne cesse d'augmenter ces dernières années ainsi que les contraintes liées à sa production, tels que l'effet de pollution et de réchauffement climatique global, conduisent les recherches vers le développement des sources d'énergie renouvelables. Dans ce contexte, les systèmes photovoltaïques (PV) offrent une solution très concurrentielle [1]. 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 [2].

En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs (continu/continu) DC/DC employés comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance et ainsi faire fonctionner le générateur GPV à son point de puissance maximum (MPP) à l'aide d'un contrôleur MPPT (maximum power point tracking), par conséquent, obtenir un courant électrique maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température) [3].

Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaborées depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant [4], aux contrôleurs plus performant utilisant des algorithmes pour calculer MPP du GPV, parmi les techniques les plus utilisées :

- Perturbation et Observation (P&O).
- Incrémentation de la Conductance (IC) [5].

Ces dernières années des techniques de commandes plus robustes ont été associées à la commande MPPT afin d'augmenter le rendement des panneaux solaires [3].

Ce mémoire est divisé en trois chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre nous présenterons les principales caractéristiques d'un générateur photovoltaïque (GVP)
- Dans le deuxième chapitre, on ira miser la lumière sur les différents convertisseurs statiques DC/DC et DC/AC appliqués sur le système photovoltaïque ainsi que les principes d'algorithmes de recherche d'un point de puissance maximale (MPPT) (P&O et IC) pour un GPV développé et les plus répandus.
- Dans le dernier chapitre on présentera les résultats obtenus par la simulation du système PV, les différents résultats de la commande MPPT (P&O et IC) et notre charge.

Chapitre I

Modélisation Et

Simulation Des Cellules

Photovoltaïques

I.1. INTRODUCTION

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi, une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix le plus performant avec moindre coût possible.

La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telle que le rayonnement solaire, la température, la vitesse du vent et l'éclairement. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit être correctement dimensionné. Cependant les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système [6-7]. La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension.

Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations V-I à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou issues de la mesure directe sur le module.

La modélisation de ces dernières s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs. Leurs différences se situent principalement dans le nombre de diodes, la résistance shunt finie ou infinie, le facteur d'idéalité constant ou non, ainsi que les méthodes numériques utilisées pour la détermination des différents paramètres inconnus [7-8].

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles dont les précisions restent tributaires de la modélisation mathématique des différents phénomènes physiques intrinsèques intervenant dans le processus de production d'électricité. Dans la plupart des travaux de la littérature, on trouve principalement le modèle équivalent à quatre paramètres basé sur la modélisation mathématique de la courbe-tension courant [8-10].

I.2. MODELISATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque.

On présentera deux modèles du GPV à savoir [10-11] :

- Modèle à une diode (ou exponentielle simple),
- Modèle à deux diodes (ou double exponentielle).

Tous les deux sont basés sur l'équation de diode bien connue de Shockley.

Nous avons étudié un module BP Solar 340, présenté sur la figure I.1.



Figure I.1: Module BP Solar

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque seront décrites comme suit :

- Le courant de court-circuit (I_{cc}) qui fournit chaque cellule est : Le courant de court-circuit (I_{cc}) qui fournit chaque cellule est :

$$I_{cc}(cellule) = \frac{I_{cc}}{NP} \quad (I.1)$$

- La tension du circuit ouvert (V_{co}) qui fournit chaque cellule est :

$$V_{co}(cellule) = \frac{V_{co}}{Ns} \quad (I.2)$$

- Le courant maximal de chaque cellule est :

$$I_{mp}(cellule) = \frac{I_{mp}}{NP} \quad (I.3)$$

- La tension maximale de chaque cellule est :

$$V_{mp}(cellule) = \frac{V_{mp}}{N_s} \quad (I.4)$$

- La puissance maximale de chaque cellule est :

$$P_{mp}(cellule) = \frac{V_{mp}}{N_s} \quad (I.5)$$

- La résistance série de chaque cellule est :

$$R_s(cellule) = \frac{NP}{N_s} \cdot R_s \quad (I.6)$$

- La résistance shunt de chaque cellule est :

$$R_{sh}(cellule) = \frac{NP}{N_s} \cdot R_{sh} \quad (I.7)$$

I.3. MODELE A DEUX DIODES

I.3.1. Modèle à sept paramètres (2M7P)

Il est connu aussi par le nom 2M7P (Lumped, 2 Mechanism model with 7 Parameters) [7-8]. Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (I-2). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} , les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} dépend de l'éclairement solaire [12-13].

La résistance série R_s , rend compte de la résistivité du matériau de cellule des électrodes et du contact semi-conducteur-Métal. Sa valeur est déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique $I(V)$ pour une tension V égale à V_{co} . Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semi-conducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

La résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit R_{sh} traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible [8-10]. Le modèle à deux-diodes est représenté par une équation implicite du courant qui ne peut être résolue qu'à l'aide de méthodes itératives.

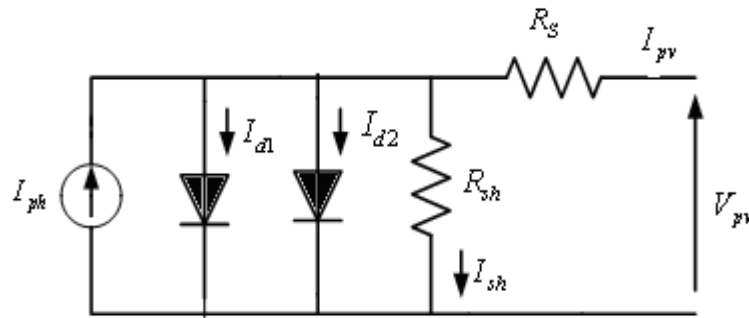


Figure I.2 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles 2M7P

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (I.8)$$

Avec:

I_{ph} : courant photonique

I_{d1} : courant de diode 1

I_{d2} : courant de diode 2

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_{d1} = I_{s1} \left(\exp\left(\frac{v_d}{n_1 \cdot v_t}\right) - 1 \right) \quad (I.9)$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left(\exp\left(\frac{v_d}{n_2 \cdot v_t}\right) - 1 \right) \quad (I.10)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (I.11)$$

Avec :

$v_t = KTC / q$: représentant le potentiel thermodynamique

TC : est la température absolue

q : la constante de charge d'électron, $1.602 \cdot 10^{-23} \text{ C}$

k : la constante de Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

I_{sh} : est la constante de la résistance de shunt

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{v_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{v_t \cdot n_2} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{I.12})$$

Le courant photonique lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence est donné par [35,37] :

$$I_{ph} = I_{ph0} \cdot \frac{E}{E_0} \cdot [1 + (T - T_0) \cdot (5.10^{-4})] \quad (\text{I.13})$$

Avec E : l'éclairement ($E_0=1000\text{W}/\text{m}^2$) ;

T : température en °K ($T_0=298\text{ K}$) ;

I_{ph0} : photo-courant généré par la diode à $T_0=298\text{K}$ (25°C).

➤ Courants de saturation des diodes

$$I_{s1} = K_1 \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (\text{I.14})$$

$$I_{s2} = K_2 \cdot T^{\frac{5}{2}} \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (\text{I.15})$$

Avec : E_g : Energie de gap du semi-conducteur

$$K_1 = 1.2\text{A}/\text{cm}^2 \cdot \text{K}^3;$$

$$K_2 = 2.9\text{A}/\text{cm}^2 \cdot \text{K}^{5/2}.$$

Une valeur de facteur d'idéalité n différent de l'unité es associée à un mécanisme de recombinaison prédominant et elle dépend de la nature et de la position des niveaux pièges.

- $n = 1$: la zone de charge d'espace est dépeuplée (cas idéal)
- $1 < n < 2$: le niveau piège est peu profond dans la zone de charge d'espace et n dépend de la polarisation (39).
- $N = 2$: Les centres de recombinaison sont distribués uniformément dans la zone de charge d'espace et sur un seul niveau au milieu de la bande interdite.
- $2 < n < 4$: les centres de recombinaison son distribués de façon non uniforme avec une densité réduite au centre de la zone de charge d'espace par rapport à la surface E_{gap} énergie

de gap (Silicium cristallin = 1.12 eV, Silicium amorphe =1.7 eV, CIS =1.03 eV, CdTe = 1.5 ev).

a) Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle 2M7P

La caractéristique courant-tension nous montre que la cellule PV est une source de courant constante pour des faibles valeurs de la tension avec un courant approximativement égal au courant de court-circuit I cc. Avec l’augmentation de la tension, le courant commence à diminuer exponentiellement jusqu’à la valeur zéro ou la tension est égale à la tension de circuit ouvert (Vco). Sur la gamme entière, il y a un seul point ou la cellule fonctionne au rendement le plus élevé ; c’est le point de puissance maximal (MPP) [10-12].

Il est possible de déterminer ces caractéristiques par des méthodes numériques itératives : (la méthode de dichotomie, la méthode de Lagrange, la méthode de point fixe et la méthode de Newton Raphson).

La méthode de Newton Raphson est l’une des méthodes les plus utilisées pour la résolution des équations non linéaires. L’algorithme de cette méthode est basé sur l’utilisation du développement de Taylor.

Soit une équation à résoudre de la forme :

$$f(x) = 0 \tag{I.16}$$

A partir d’une valeur initiale X 0 de la solution, on cherche une correction telle que :

$$0 = f(X0+\delta X) \tag{I.17}$$

En faisant un développement de Taylor autour de x = x0, on trouve :

$$0 = f(x_0) + f'(x_0) \cdot \delta X + \left(\frac{f''(x_0) \cdot \delta X^2}{2!}\right) + \left(\frac{f'''(x_0) \cdot \delta X^3}{3!}\right) + \dots \tag{I.18}$$

Il suffit maintenant de négliger les termes d’ordre supérieur ou égal 2 en pour obtenir :

$$f(x_0) + f'(x_0) \cdot \delta X \approx 0 \tag{I.19}$$

On peut alors isoler la correction recherchée :

$$\delta x = \frac{f(x)}{f'(x)} \tag{I.20}$$

La correction est en principe la quantité que l'on doit ajouter pour annuler la fonction $f(x)$ puisque nous avons négligé les termes d'ordre supérieur ou égal à 2 dans le développement de Taylor, cette correction n'est pas parfaite et on pose :

$$X1 = X0 + \delta X \quad (I.21)$$

Donc :

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x)}{f'(x)} \quad (I.22)$$

Avec :

$f'(x)$: est la dérivée de la fonction $f(x)$

$f(x) = 0$, x est une valeur actuelle et x_{i+1} est une prochaine valeur.

$$I_{pv} = I_{cc} - I_{pv} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{v_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{v_t \cdot n_2} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) = 0 \quad (I.23)$$

La substitution de cette équation dans l'équation (III .12) donne l'équation suivante : et le courant de sortie est calculé itérativement.

$$I_{pv(i+1)} = I_{pv(i)} - \frac{I_{cc} - I_{pv} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_2} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{R_{sh}} \right)}{-1 - I_{s1} \cdot \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \cdot \exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_1} \right) - I_{s2} \cdot \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \cdot \exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_2} \right) - \left(\frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (I.24)$$

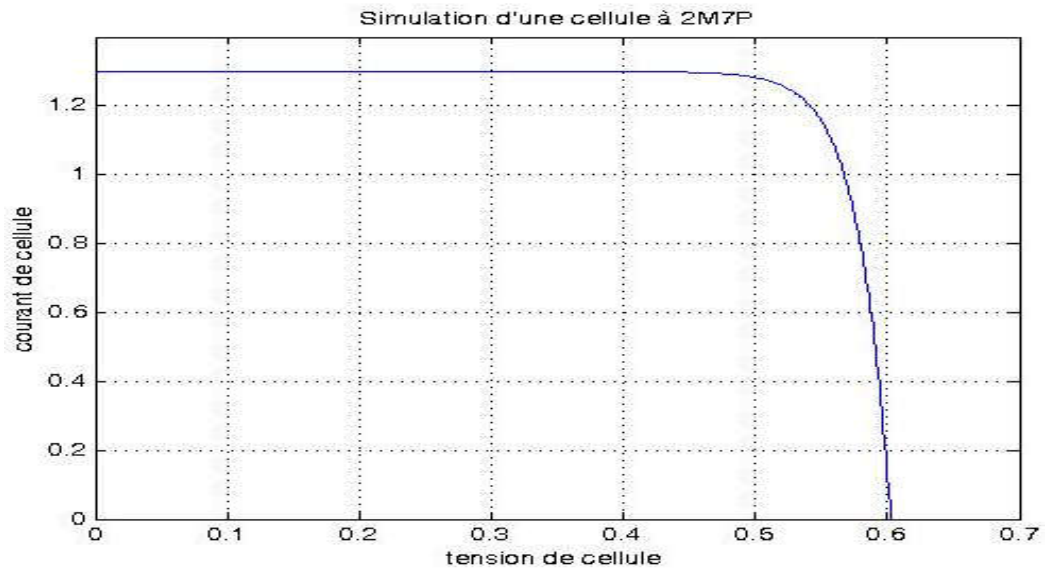
b) Simulation d'une cellule à 2M7P

La stratégie pour modéliser un module PV ne présente aucune différence par rapport à la modélisation d'une cellule PV. Les paramètres sont les mêmes, mais seulement la tension va changer (la tension à circuit ouvert) est différente et doit être divisée par le nombre de cellules.

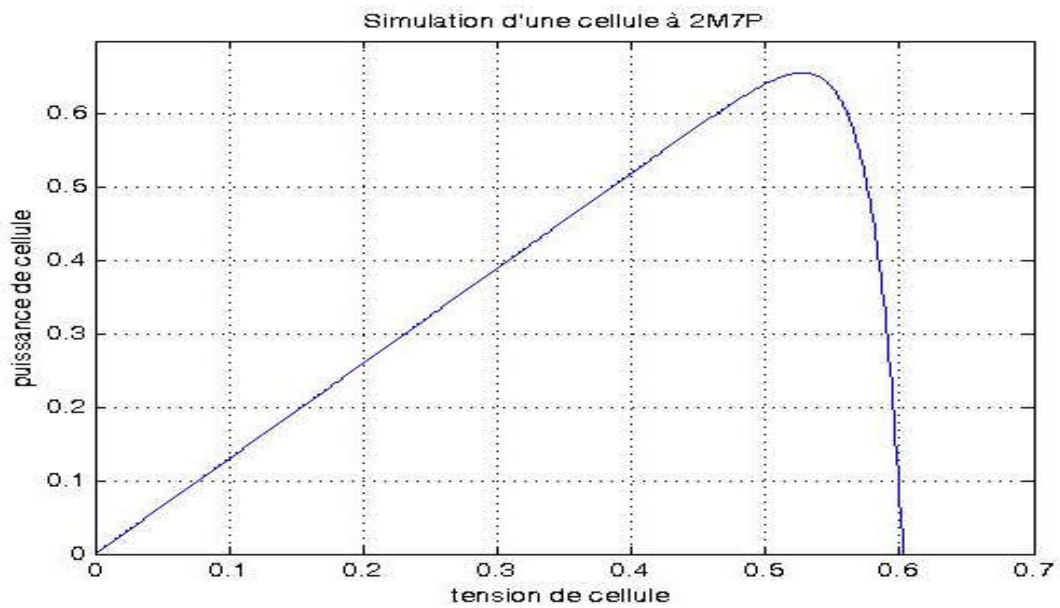
Dans le programme Matlab que nous avons développé des calculs itératifs sont réalisés afin d'assurer la convergence des résultats [17-18].

La méthode employée consiste à développer des programmes script pour la simulation des différents effets sur les caractéristiques tension-courant et puissance –tension telles que,

l'influence de l'éclairement, la température et la résistance shunt. Les résultats obtenus par une cellule du module BP Solar 340 en utilisant 2M7P sont représentés par la figure I-3(a-b)



(a)



(b)

Figure I.3 : Caractéristiques I (V) et P (V) d'une cellule photovoltaïque 2M7P

I.3.2. Modèle à six paramètres (2M6P)

Si la résistance shunt est considérée infinie le nombre de paramètres à déterminer devient 6 et le nom du modèle dans ce cas est 2M6P (Lumped, 2 mechanism model with paramètres) (31-33). Cette simplification est justifiée par le fait que la résistance shunt est d'habitude beaucoup plus grande que les autres résistances don le courant qui la traverse est négligeable.

Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation (équation (I-14) et (équation (I-15). Les facteurs de diode n, et n2, une source de courant produisant un photo-courant (équation (I-13) qui dépend de l'éclairement solaire et de la résistance série R.

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique figure (I.4)

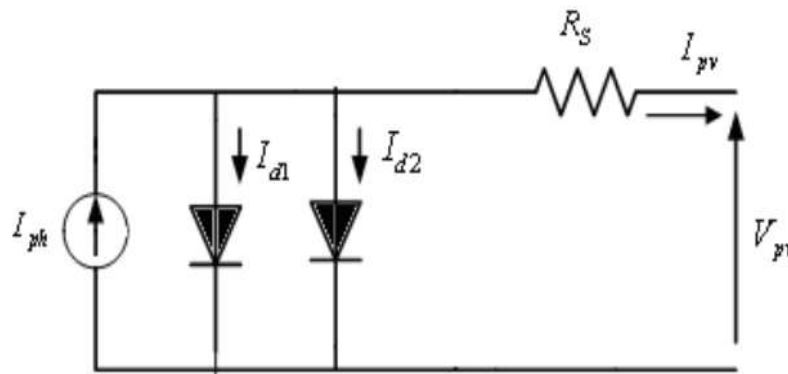


Figure I.4 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles 2M6P

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (I.25)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{v_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{v_t \cdot n_2} \right) - 1 \right) \quad (I.26)$$

a. Caractéristiques courant- tension et puissance- tension du modèle 2M6P

La méthode de Newton Raphson a été utilisée et le courant de sortie est donné par l'équation (I.27).

$$\begin{aligned}
 & I_{pv(i+1)} \\
 & = I_{pv(i)} \\
 & \frac{I_{cc} - I_{pv} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_2} \right) - 1 \right)}{-1 - I_{s1} \cdot \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \cdot \exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_1} \right) - I_{s2} \cdot \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \cdot \exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_2} \right) - \left(\frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (I.27)
 \end{aligned}$$

La figure I.5 représente la caractéristique courant –tension et puissance –tension P(V) d’une cellule photovoltaïque en utilisant le modèle 2M6P.

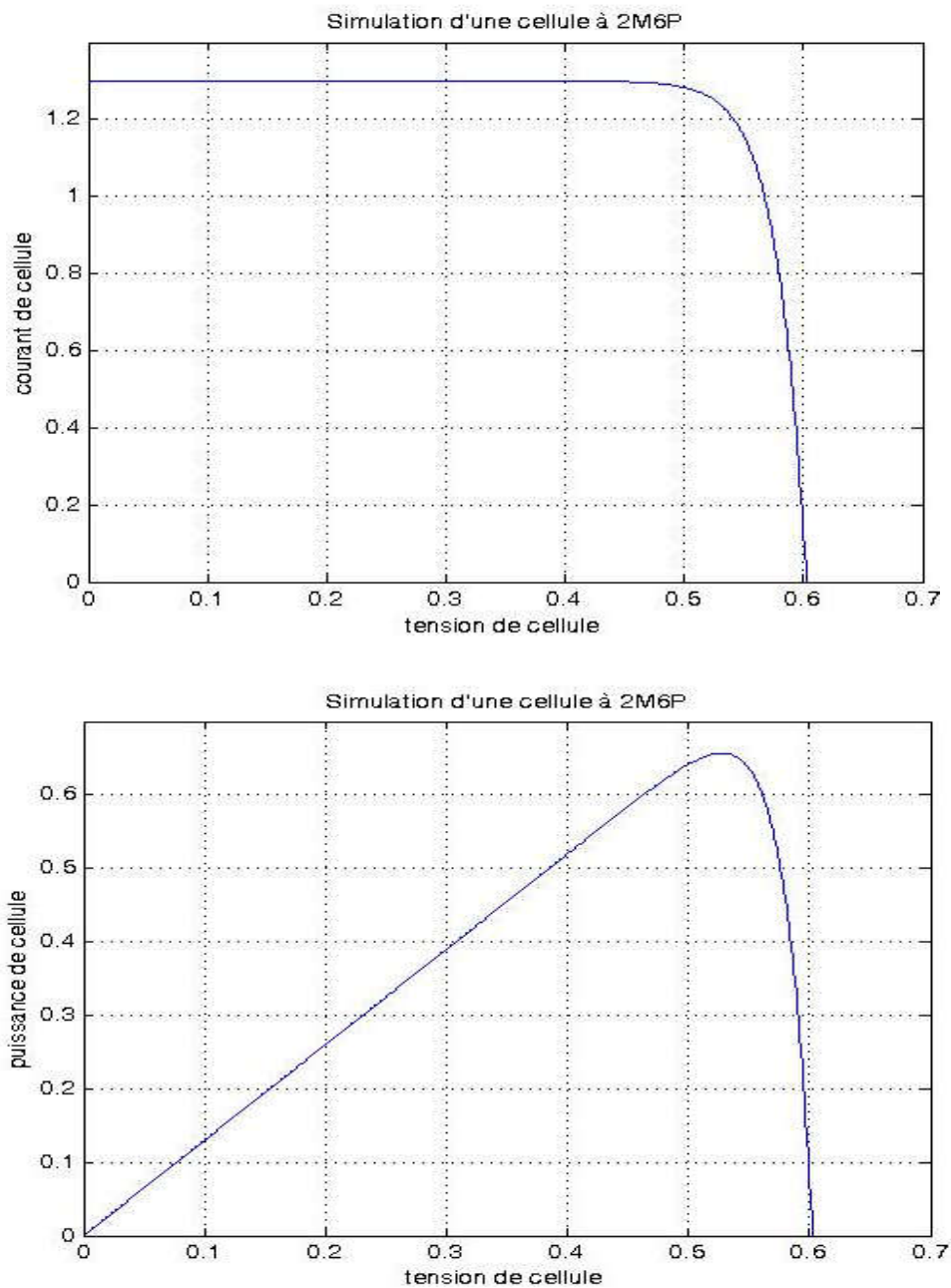


Figure I.5 : Caractéristique I(V) et P(V) d’une cellule photovoltaïque 2M6P

I.3.3. Modèle à cinq paramètres (2M5P)

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant une simplification au circuit du modèle à six paramètres représentés sur la figure (I.4) et le nom du modèle dans ce cas est 2M5P (Lumped, 2 Mechanism model with 5 paramètres). Cette simplification se traduit par supposer que la résistance shunt est infinie ; et la résistance série est nulle [18-19].

Le circuit « équivalent sera représenté comme suit, figure (I.6).

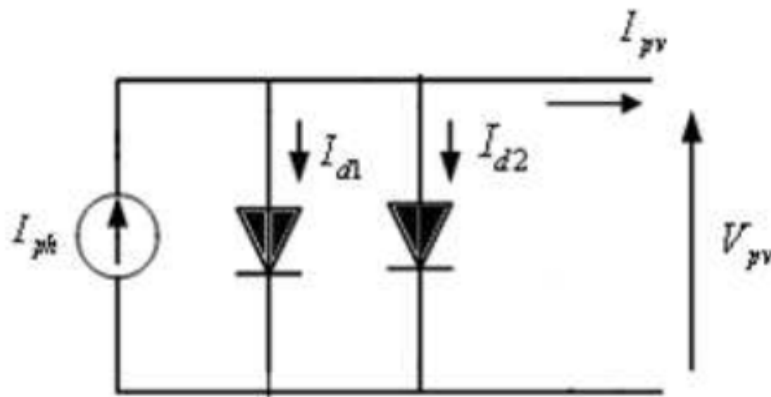


Figure I.6 : Schéma équivalent du modèle à deux « exponentielles 2M5P

Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les cas de saturation (équation (I.14)) et (équation (I.15)), les facteurs de diode, une source de courant produisant une photo –courant (équation (I.13)) qui dépend de l'éclairement solaire et de la température.

L'équation caractéristiques est déduite d'une manière directe à partir de la loi de kirchhoff.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \tag{I.28}$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{v_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{v_t \cdot n_2} \right) - 1 \right) \tag{I.29}$$

a. Caractéristiques courant- tension et puissance- tension du modèle 2M5P

Le courant de sortie est donné par l'équation (I.30).

$$I_{pv(i+1)} = I_{pv(i)} - \frac{I_{cc} - I_{pv} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_2} \right) - 1 \right)}{-1} \quad (I.30)$$

La figure I.7 représente la caractéristique courant-tension I(V) et puissance-tension P (V) pour les mêmes conditions ; une température de référence de 25° C et un éclairement de 1000 W/m2

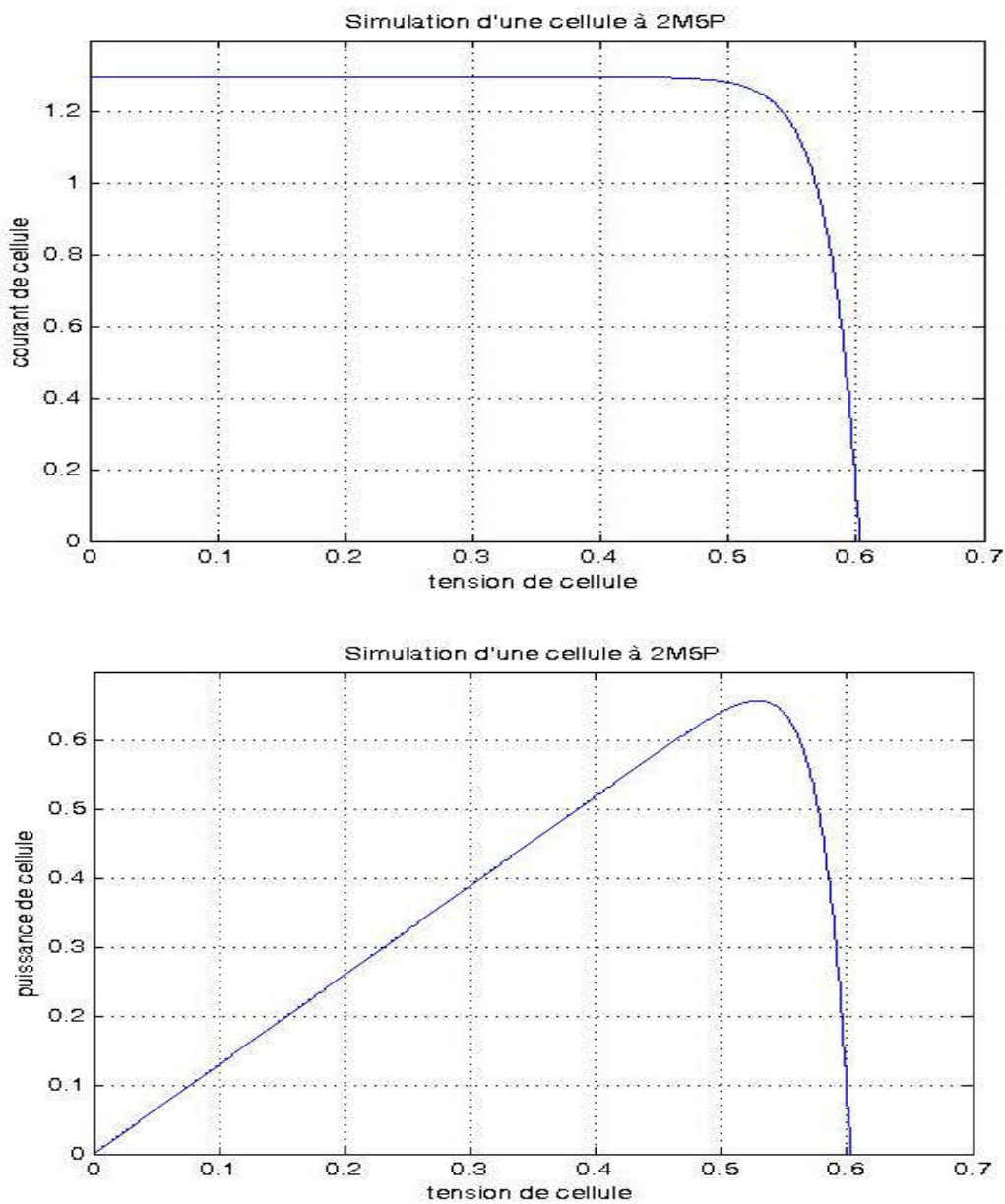


Figure I.7 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque 2M5P

I.4. MODELE A UNE DIODE

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode établie par Shocky pour une seule cellule PV. Il est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle [17].

Une description plus simple est obtenue à partir du modèle à une exponentielle. Ce modèle comporte une diode de moins par rapport au modèle à deux exponentielles, ce qui implique que ce modèle comporte dans l'équation de la caractéristique courant- tension une exponentielle de moins [17], [18].

I.4.1. Modèle à trois paramètres (L3P)

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} (équation (I-13)) proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV. Il est connu aussi sous le nom L3P (Lumped, 1 Mechanism model with 3 Parameters) [13]. Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode. Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté par la figure (I.8) :

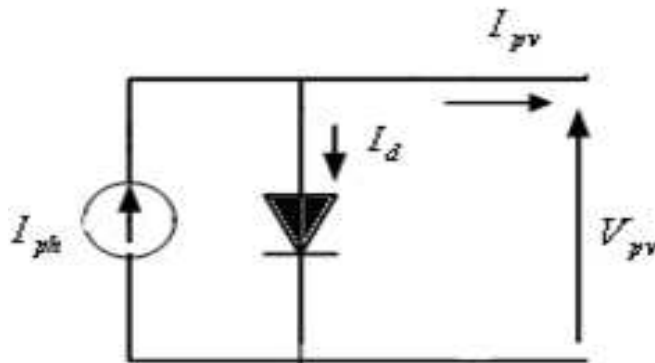


Figure I.8 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle L3P

Dans le cas de cellules solaires au silicium monocristallin, on considère l'hypothèse d'une cellule idéale. Le facteur d'idéalité est alors considéré comme égal à l'unité.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (I.31)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{v_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{I.32})$$

Le courant débité équivaut à :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{v_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{I.33})$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression [45-46-47]:

$$I_s = I_{s_ref} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c_ref}}\right)^3 \exp\left(\frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_{c_ref}}\right) - \left(\frac{1}{T_c}\right)\right) \quad (\text{I.34})$$

a. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle L3P

Le courant de sortie est donné par l'équation (I-35).

$$I_{pv(i+1)} = I_{pv(i)} - \frac{I_{cc} - I_{pv} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_1}\right) - 1 \right)}{-1} \quad (\text{I.35})$$

La Figure I.9 représente la caractéristique courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) d'une cellule photovoltaïque en utilisant le modèle L3P.

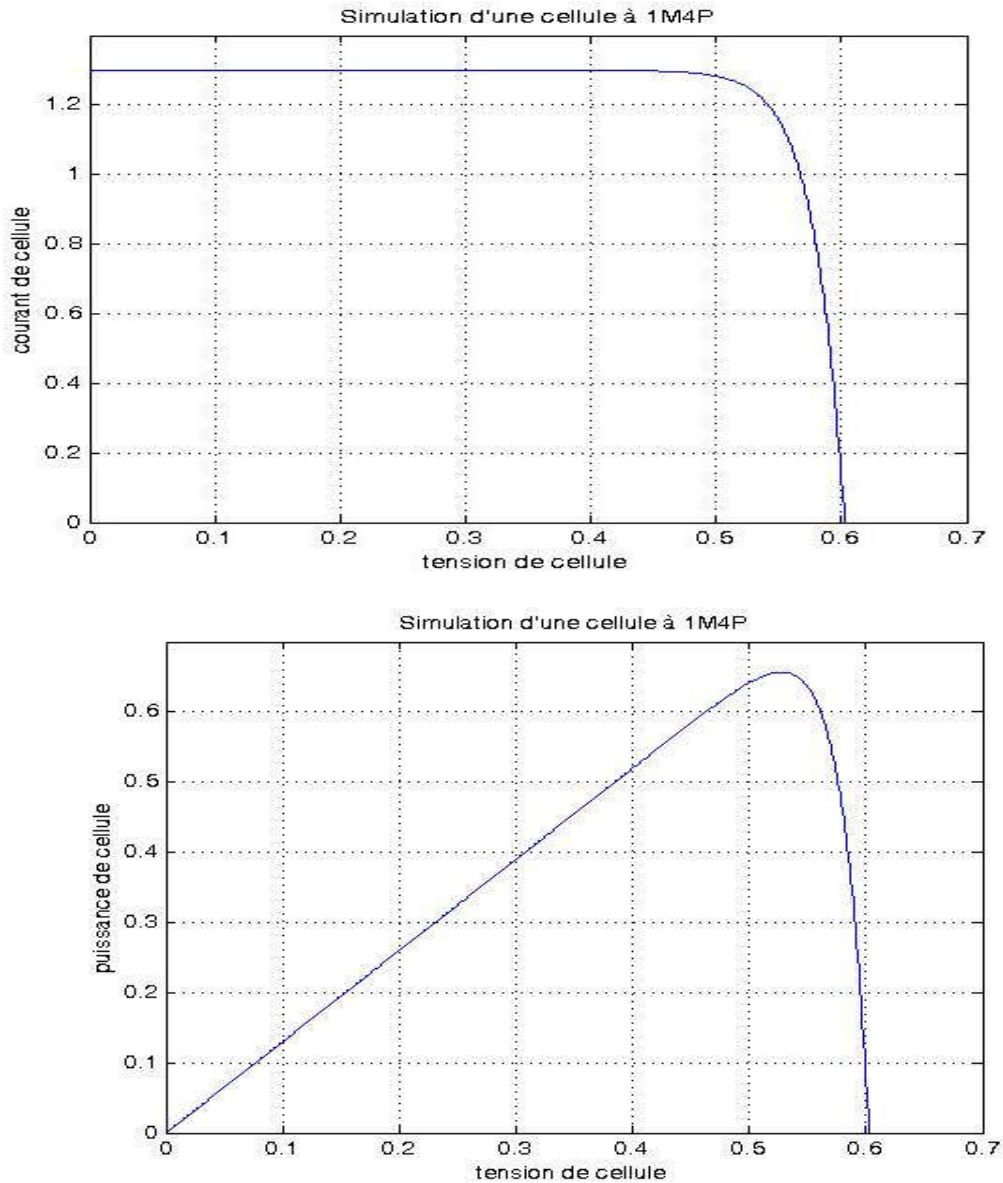


Figure I.9 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque L3P

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans les conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte des pertes de tension, courant de fuite...). Il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque [18-19].

I.4.2. Modèle à quatre paramètres (L4P)

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé ; il a été étudié par Townsend. Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série. Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique I(V) sont le courants photonique I_{ph} (équation (I.13)), la résistance série, et deux caractéristiques de la diode (équation (I.28)), et Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations I (V) pour différents points de fonctionnement (Donnés par les fabricants).

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté sur la figure (I.10) :

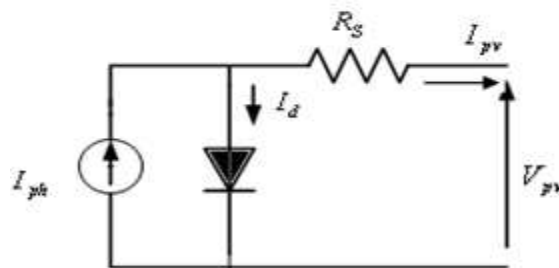


Figure I.10 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle L4P

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{v_t \cdot n} \right) - 1 \right) \quad (I.36)$$

a. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle L4P

Le courant de sortie est donné par l'équation (I.37).

$$I_{pv(i+1)} = I_{pv(i)} - \frac{I_{cc} - I_{pv(i)} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_1} \right) - 1 \right)}{-1 - I_s \cdot \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \cdot \exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_1} \right)} \quad (I.37)$$

La Figure I.11 représente la caractéristique courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) relatif à ce modèle.

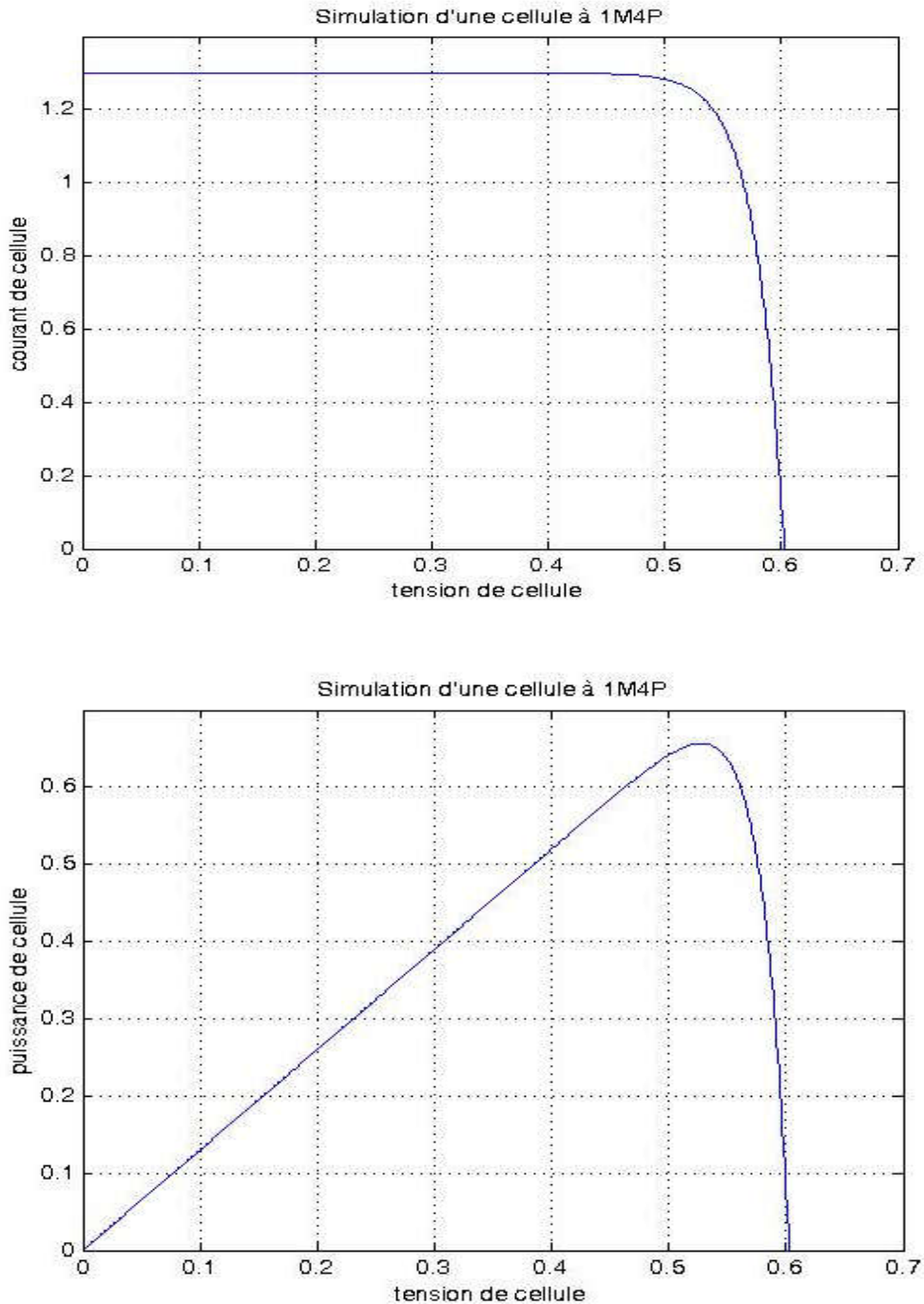


Figure I.11 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque, L4P.

I.4.3. Modèle à cinq paramètres (L5P)

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la figure (I.12) qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt, une résistance série. Le modèle fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants : n, I_{ph} (équation (I.13)), R_s , R_{sh} et I_s (équation (III-28))

Il est connu sous le nom L5P (Lumped, 1 Mechanism, Parameters) [19-20].

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.38)$$

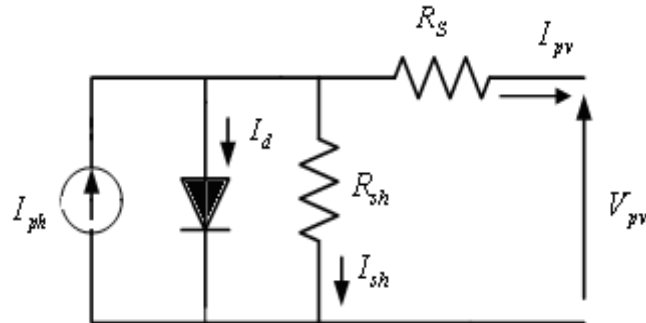


Figure I.12 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle L5P

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante []:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{v_t \cdot n} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (I.39)$$

a. Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle L5P

➤ Le courant de sortie est donné par l'équation (I.40).

$$I_{pv(i+1)} = I_{pv(i)} - \frac{I_{cc} - I_{pv(i)} - I_s \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{R_{sh}} \right)}{-1 - I_s \cdot \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \cdot \exp \left(\frac{V_{pv} + I_{pv(i)} \cdot R_s}{v_t \cdot n_1} \right) - \left(\frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (I.40)$$

La figure I-13 représente la caractéristique courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) en considérant ce modèle.

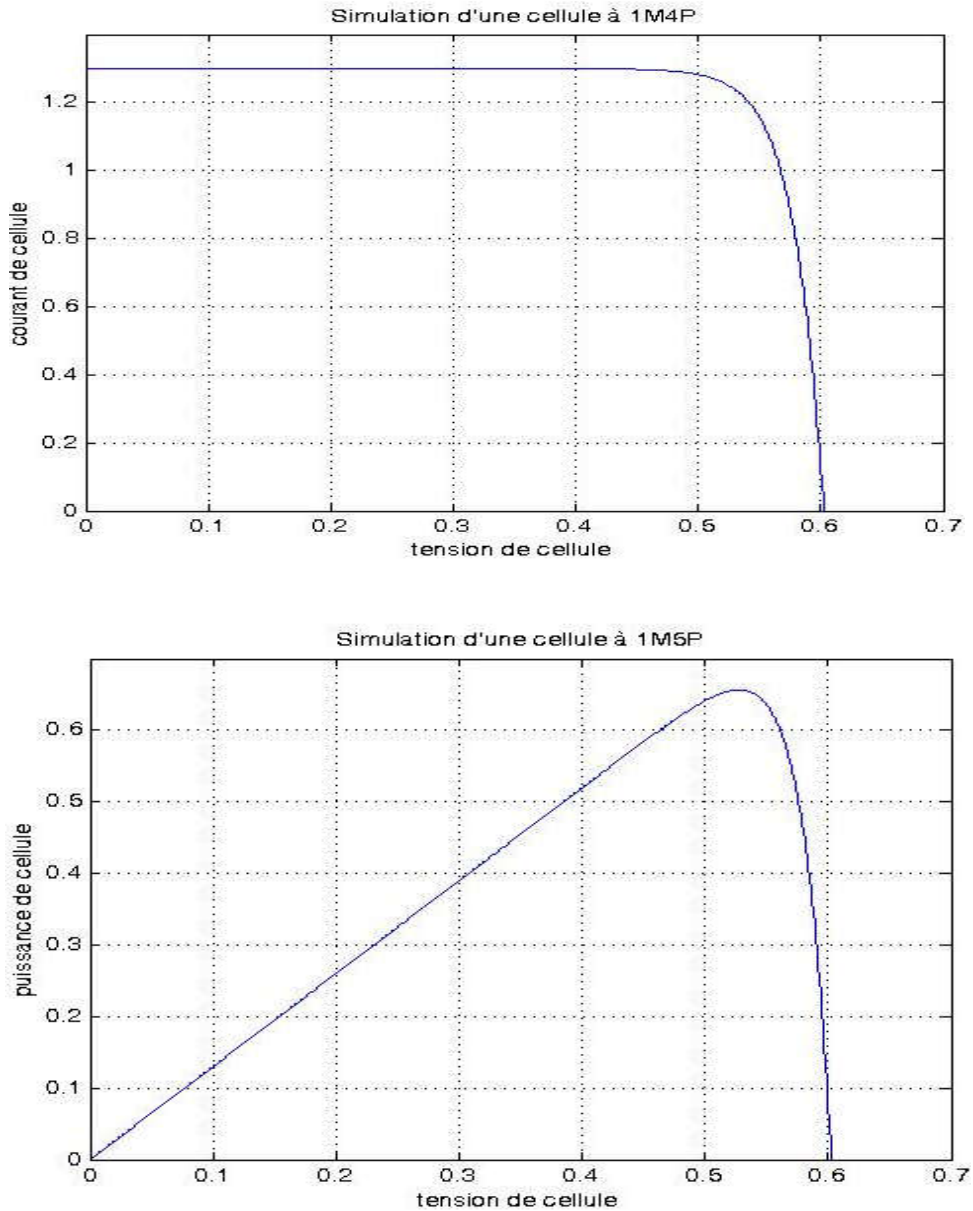


Figure I.13 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque L5P

I.5. RESULTATS ET DISCUSSION

I.5.1. Influence de la résistance shunt

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes d'une photopile. En général, la résistance shunt est très élevée [], son effet se fait sentir surtout dans la partie génération de courant.

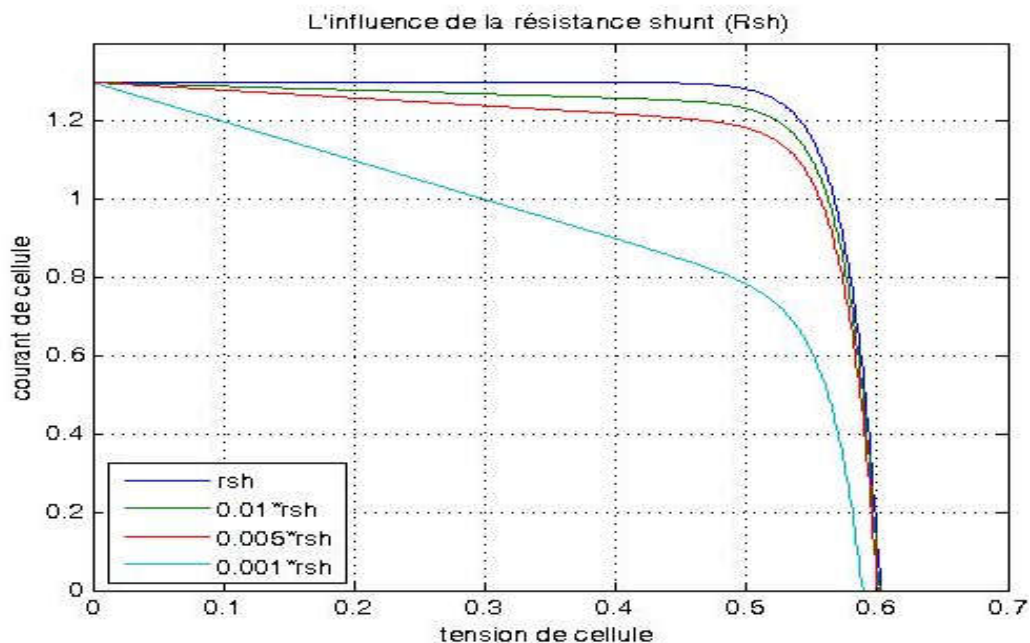


Figure I.14 : L'influence de la résistance shunt (Rsh) sur la caractéristique I (V)

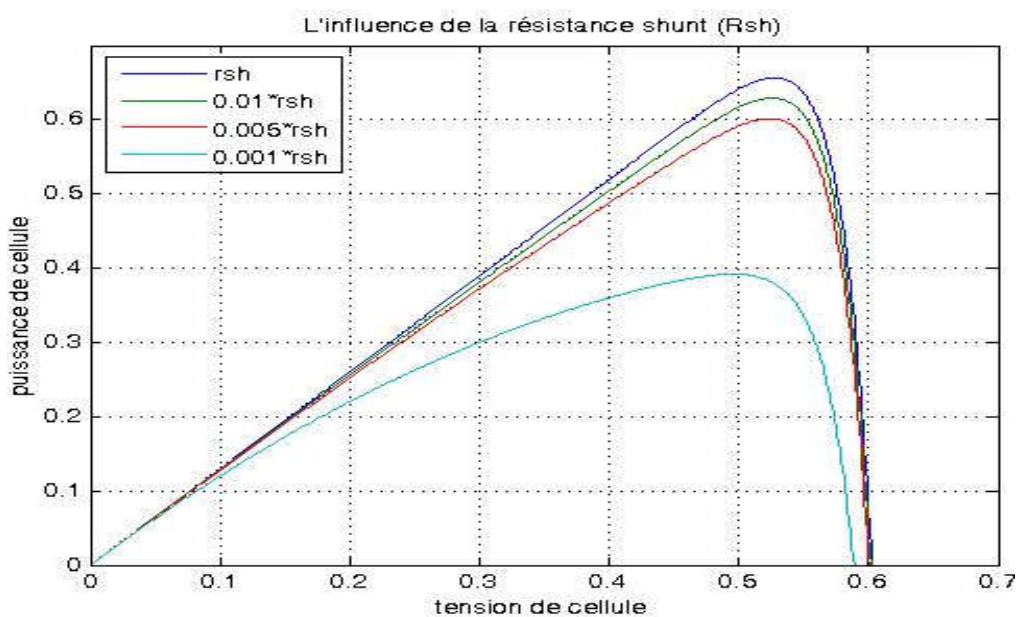


Figure I.15 : L'influence de la résistance shunt (Rsh) sur la caractéristique P(V)

L'influence de la résistance parallèle (shunt) sur la caractéristique courant-tension se traduit par une légère diminution de la tension de circuit ouvert, et une augmentation de la pente de la courbe I-V de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant.

Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée. La

puissance fournie par une cellule solaire varie avec sa résistance parallèle, plus cette résistance est élevée plus la puissance fournie est importante. Une comparaison de l'effet de la résistance shunt sur le comportement des caractéristiques I(V), P(V) est illustrée sur les figures (I.16) et (I.17), aux niveaux d'irradiance de 1000 W/m² et de 250 W/m².

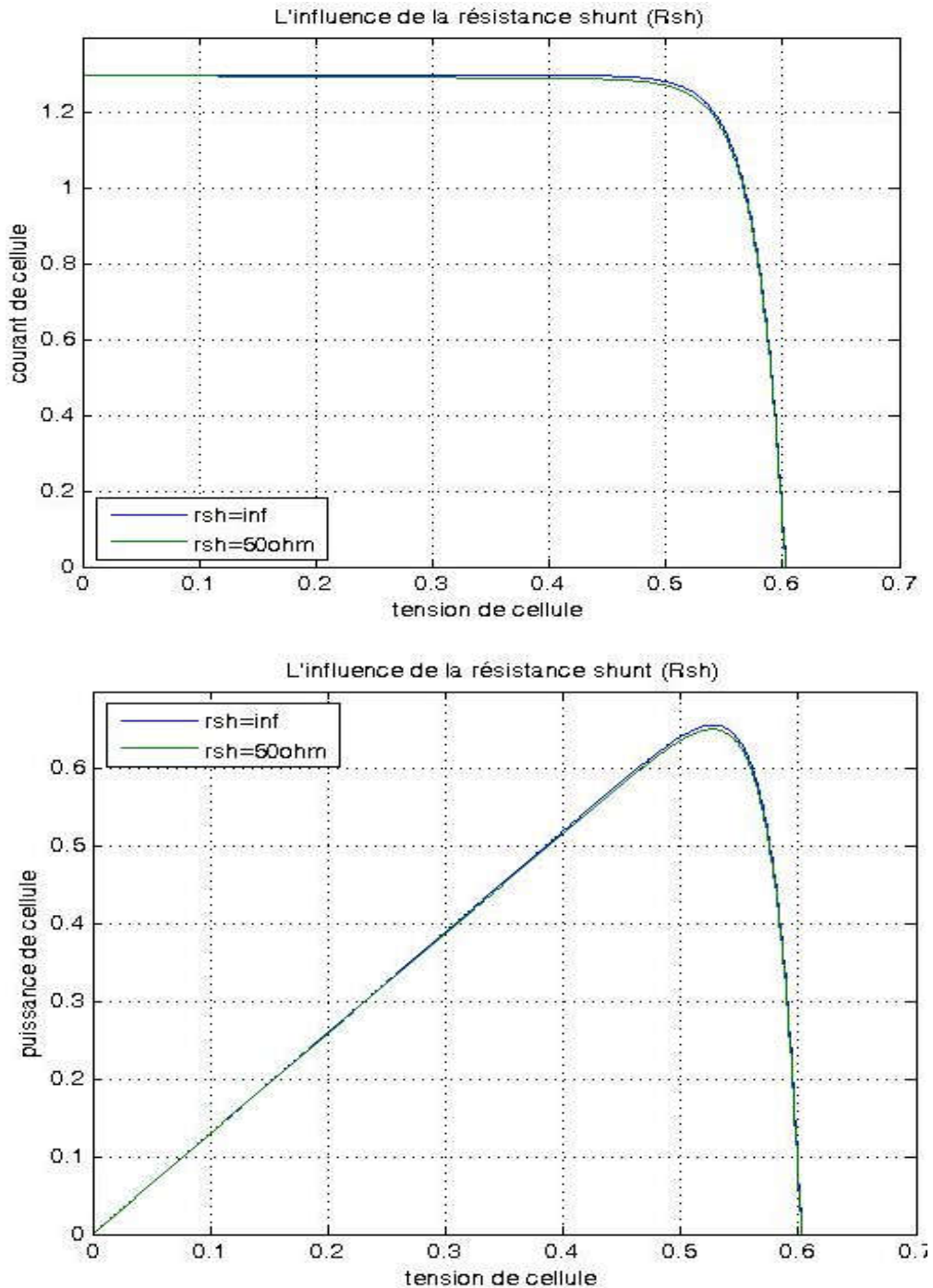


Figure I.16 : L'influence de la résistance shunt (Rsh) sur les caractéristiques I (V), P(V),
G=1000W/m²

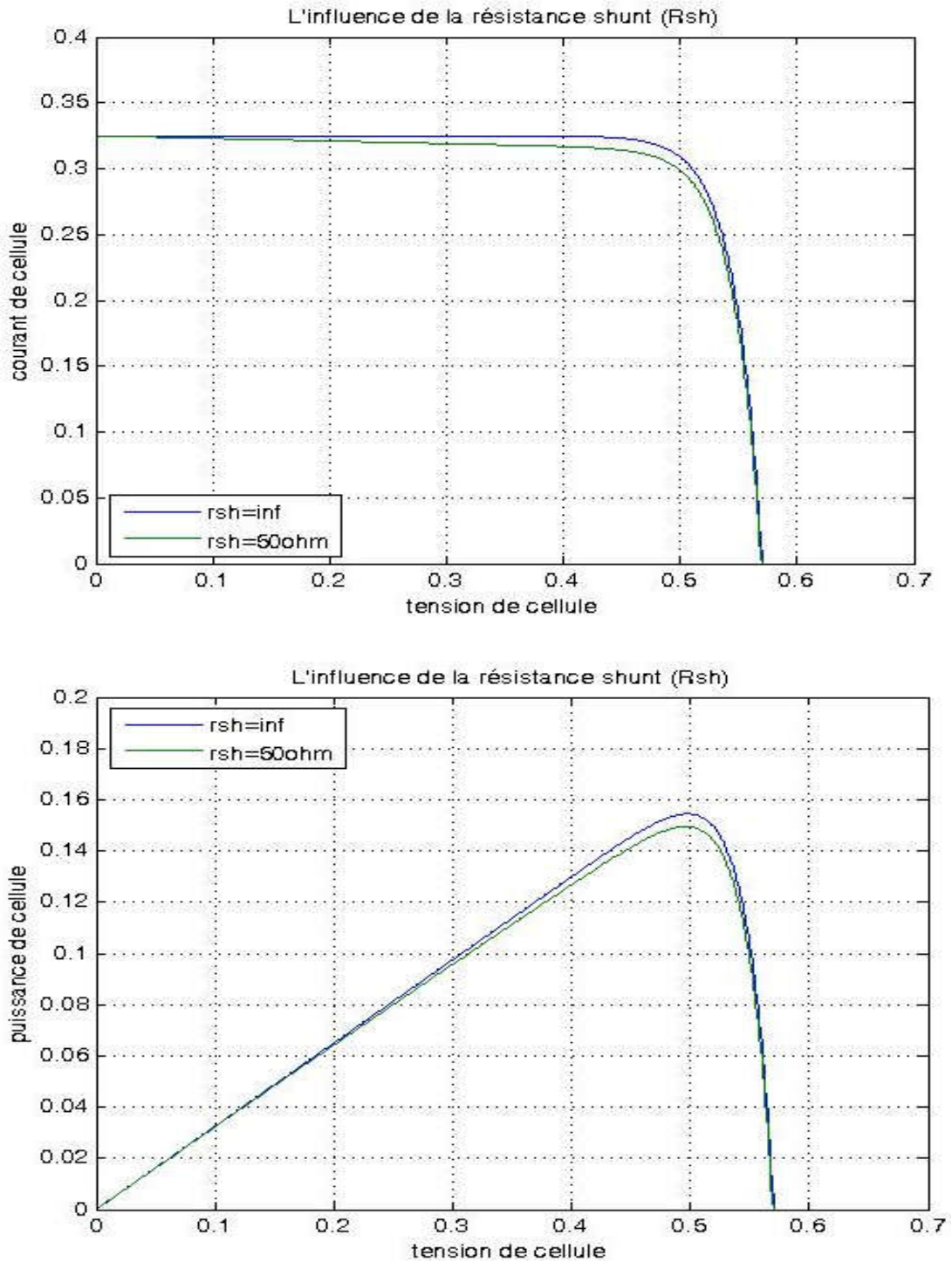


Figure I.17 : L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur les caractéristiques $I(V)$, $P(V)$,
 $G=250W/m^2$

Une courbe assume la résistance infinie de shunt tandis que l'autre assume une résistance de shunt de 50 ohms. À $1000 W/m^2$, la différence entre les deux courbes est à peine perceptible. La différence dans la puissance maximale pour ces deux courbes est environ 0,5%. Pour l'irradiance inférieure ($G=250W/m^2$) représentée sur la figure (III-17), la

différence entre les deux courbes est plus prononcée et la différence dans la puissance maximale est environ 4,2%.

Une autre justification partielle pour la résistance infinie, que les courants de shunt ne sont pas un mécanisme inhérent de perte dicté par les propriétés matérielles. Les courants de shunt sont principalement dus à la fuite courante le long des bords de la cellule, et ces effets sont réduits au minimum en construisant le module dans un cadre de bons isolateurs électriques [20-21].

I.5.2. Influence de la résistance série

Les figures (I-18, I-19) montrent l'influence de la résistance série sur la caractéristique I(V) et P(V) de la cellule photovoltaïque. La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur du courant de court-circuit.

L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance.

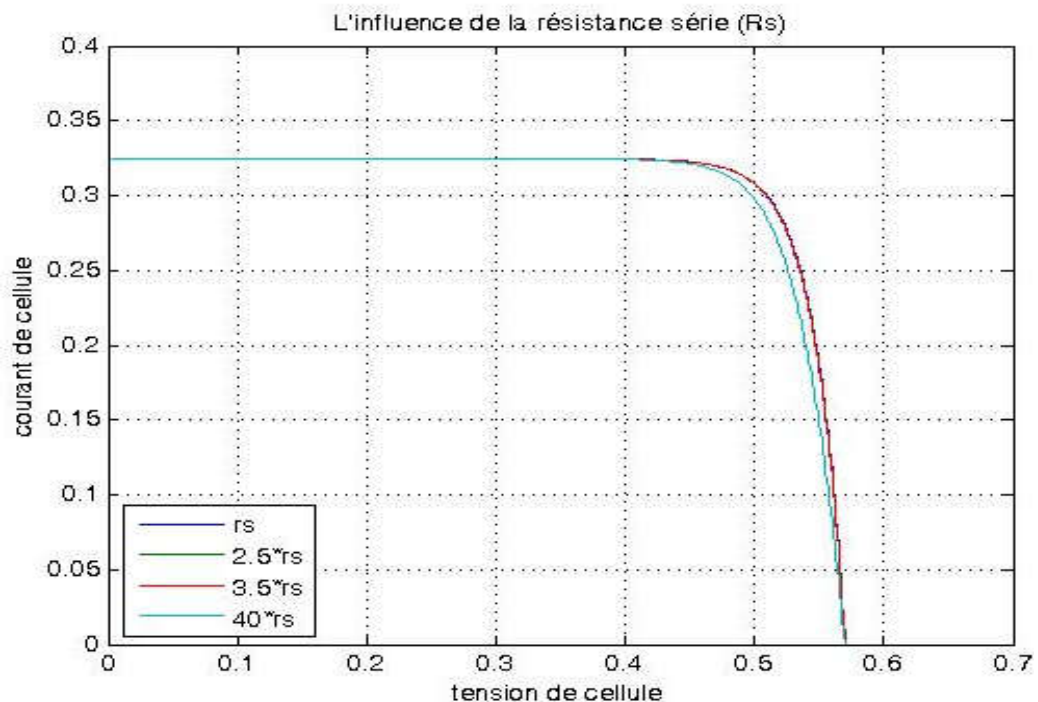


Figure I.18 : L'influence de la résistance série (R_s) sur la caractéristique I(V) d'une cellule

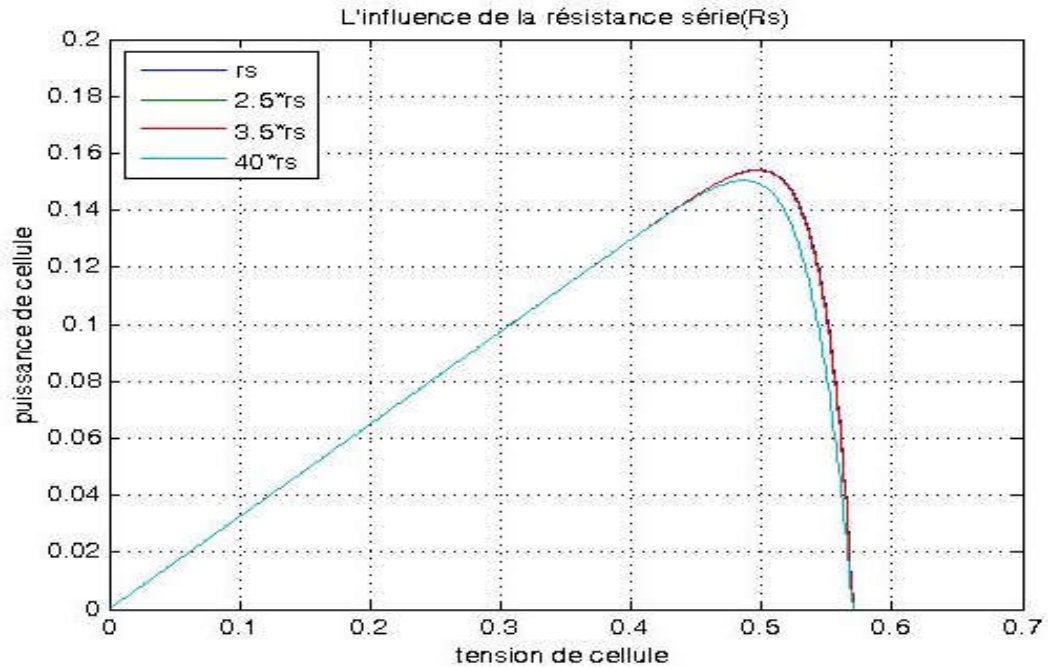


Figure I.19 : L'influence de la résistance série (R_s) sur la caractéristique P(V) d'une cellule

Pour permettre un ensemble cohérent de comparaisons pour un modèle donné, la même condition de référence est choisie pour chaque modèle, (la performance de la cellule solaire est normalement évaluée dans les conditions d'essai normalisé (STC), où un spectre solaire moyen de AM 1.5 est employé, l'éclairement est normalisé à 1000W/m^2 , et la température de 25°C).

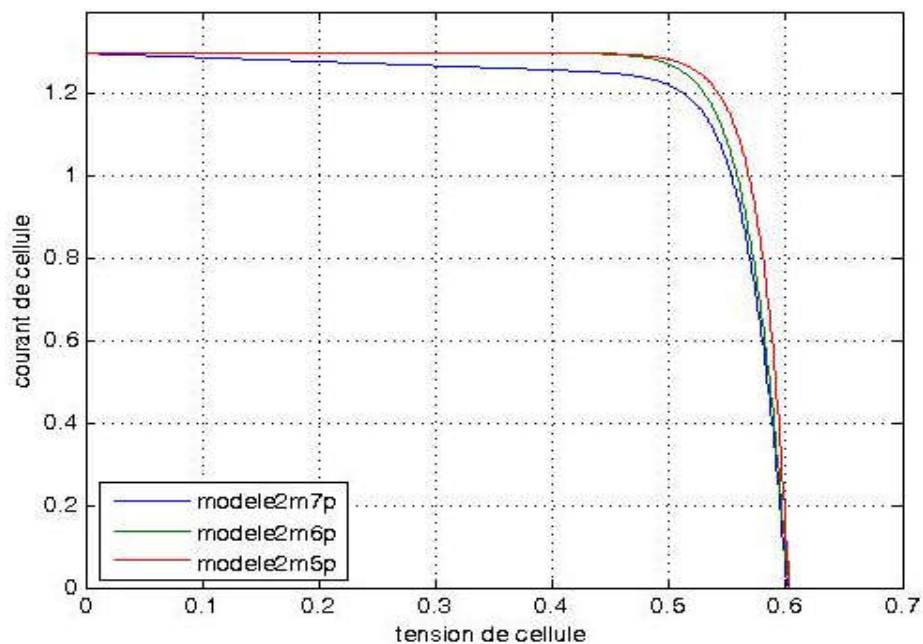


Figure I.20: Caractéristiques I-V pour les modèles à deux exponentielles

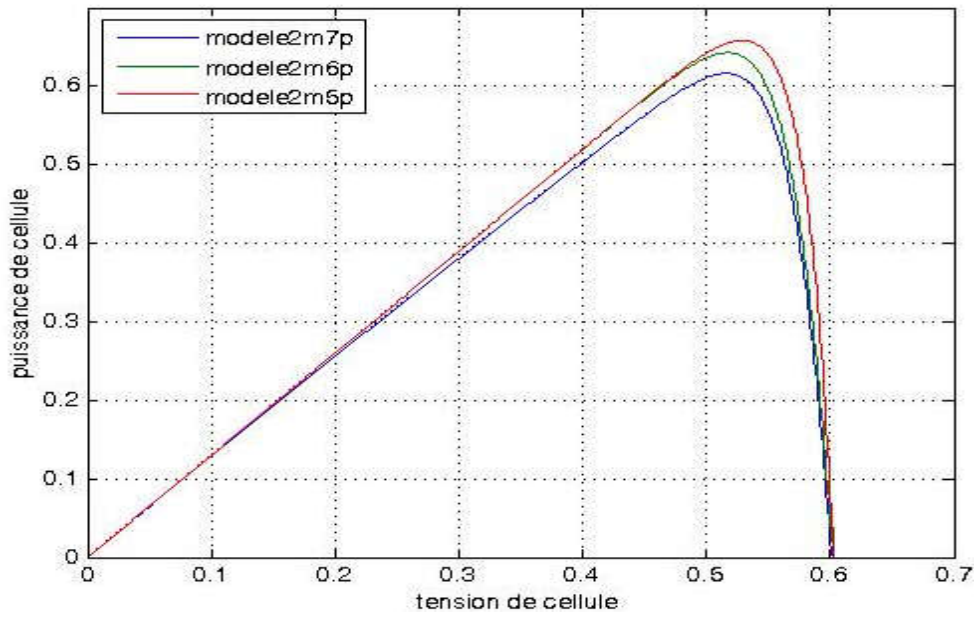


Figure I.21: Caractéristiques P-V pour les modèles à deux exponentielles

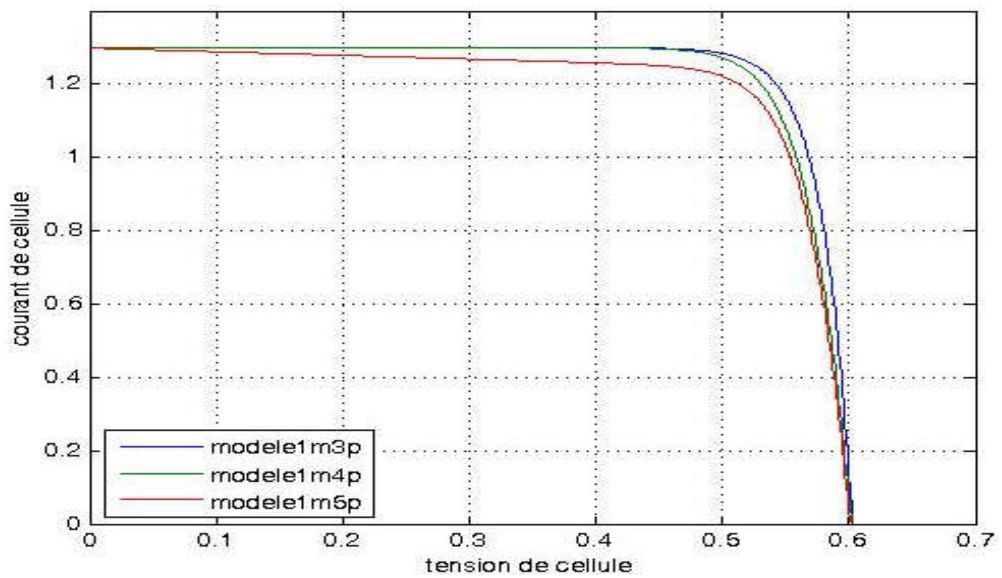


Figure I.22: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle

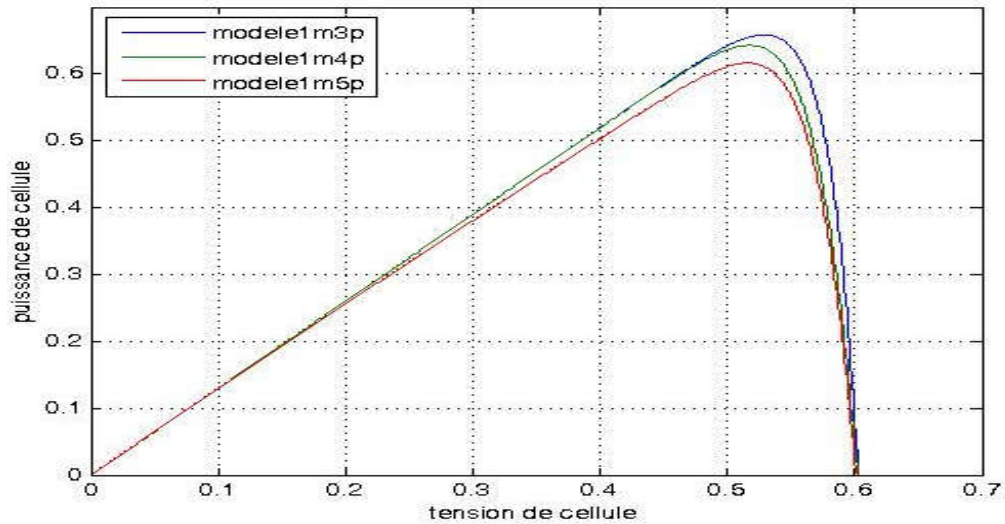


Figure I.23: Caractéristiques P-V pour les modèles à une exponentielle

Les figures (I-20, I-21) comparent entre les différents modèles à deux diodes et les figures (I-22, I-23) à son tour comparent les différents modèles à une diode pour une température de référence de 25 °C et un éclairement de 1000 W/m². Une comparaison entre les résultats de simulation obtenus par ces modèles et les résultats expérimentaux. Nous a permis de tirer les conclusions suivantes : En comparant les modèles 2M7P, 2M6P, et L5P on constate que l'effet de la résistance parallèle est négligeable, par contre en négligeant la résistance série dans le modèle 2M5P et le modèle L3P, cela induit un éloignement entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle. Ce qui montre l'importance de la résistance série qui marque la différence entre les différents modèles. Les courbes I-V globales, obtenues par les modèles L4P et 2M6P sont plus précises [21-22].

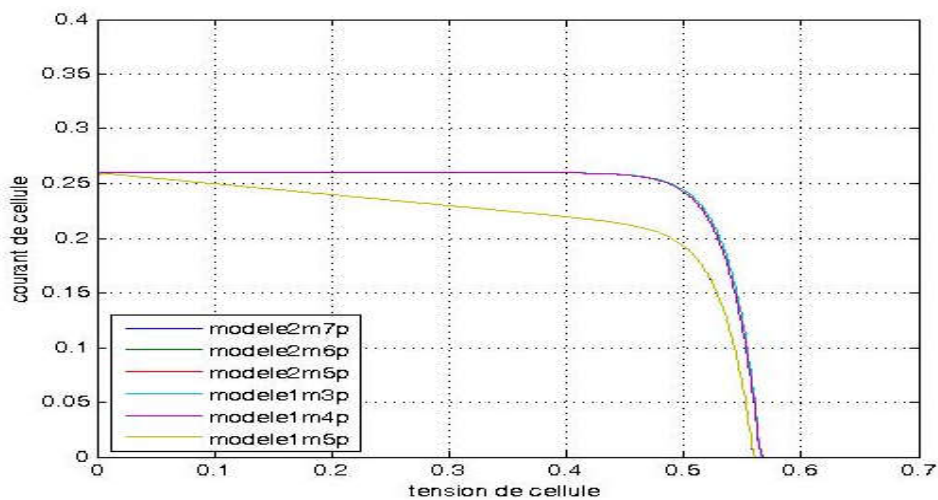


Figure I.24: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle et à deux exponentielles, $G=200\text{W/m}^2$. $T=25^\circ\text{C}$

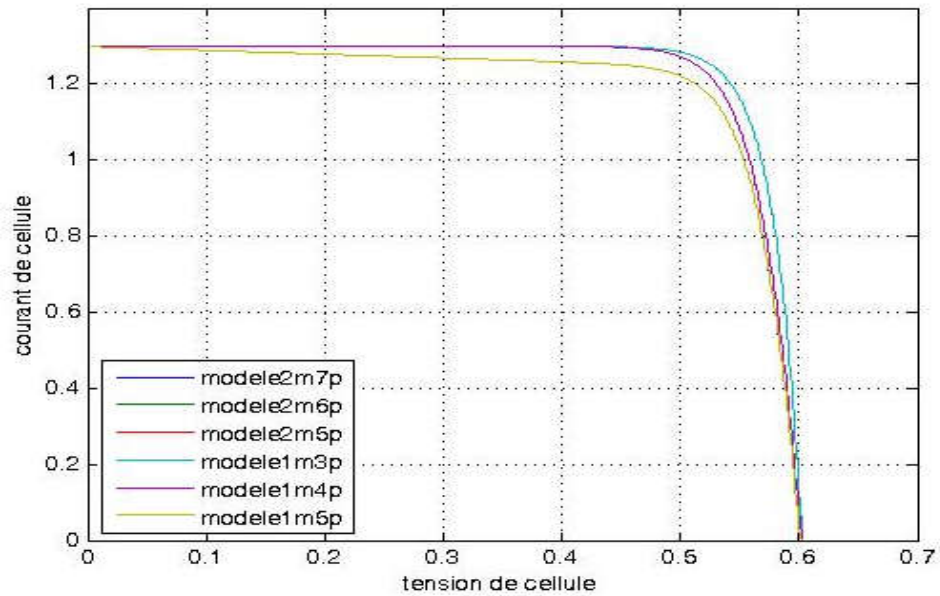


Figure I.25: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle et à deux exponentielles, $G=1000W/m^2$

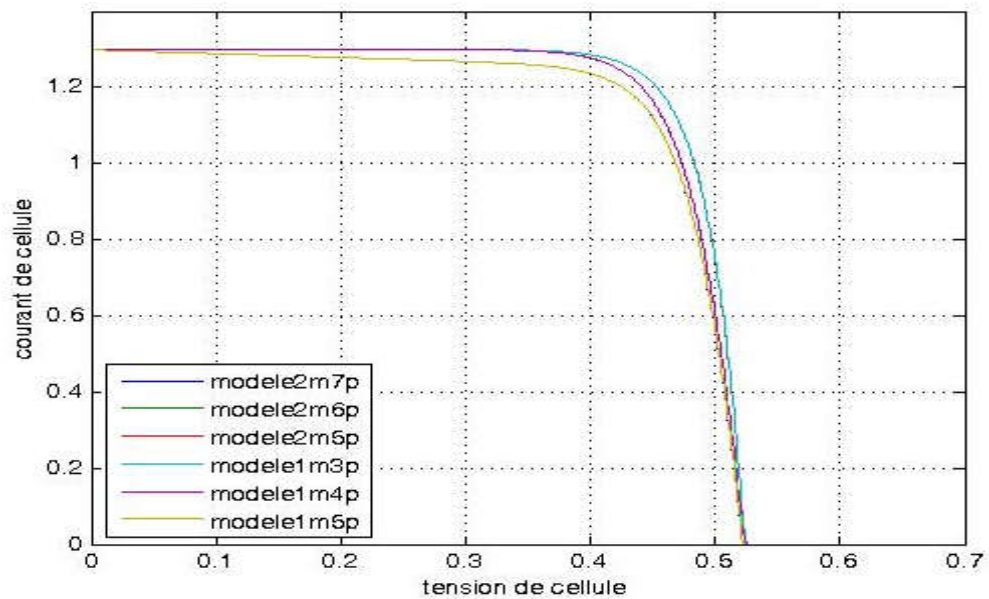


Figure I.26: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle et à deux exponentielles, $T=75^{\circ}C$ et $G=1000W/m^2$

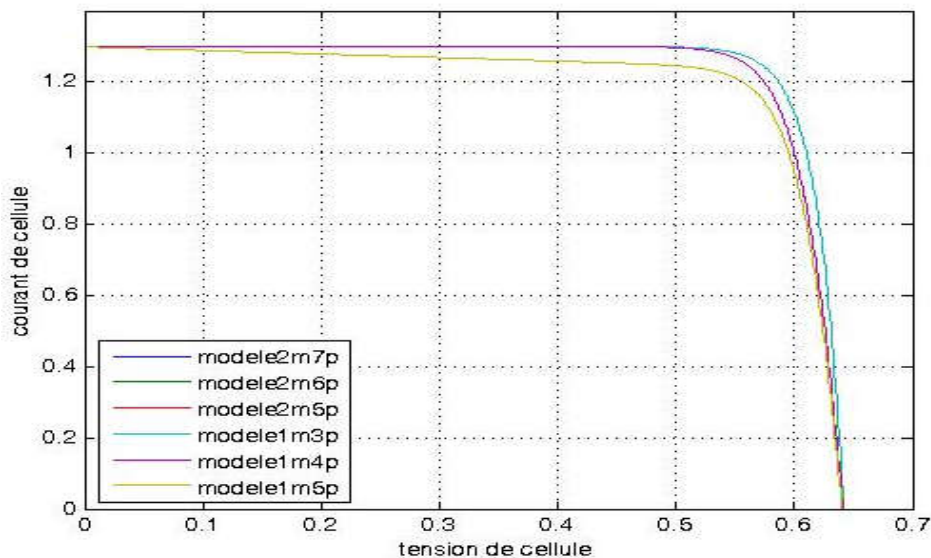


Figure I.27: Caractéristiques I-V pour les modèles à une exponentielle et à deux exponentielles, $T=0^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W}/\text{m}^2$

les figures (I.24), (I.25), (I.26) et (I.27) montrent que les résultats obtenus par les modèles à deux diodes (deux exponentielles) marquent un point important aux niveaux de la zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} (la zone 3 où se situe le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale), la puissance fournie et la tension de circuit ouvert obtenues par ces modèles sont supérieures par rapport aux modèles à une diode quand les irradiances sont basses et la température élevée.

Le modèle à deux diodes a un léger avantage, car il fait appel à la recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume du matériau. (Les branches de chacune des diodes représentent respectivement le courant de diffusion dans la base et l'émetteur (I_{d1}), et le courant de génération-recombinaison (I_{d2}) dans la zone de charge d'espace de la jonction (ZCE)).

I.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques électriques fondamentales d'une cellule photovoltaïque (module photovoltaïque) et les circuits équivalents ont été décrits. Des modèles mathématiques de complexité variable ont été discutés (modélisation), aussi bien que des critères pour choisir un modèle convenablement détaillé. Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire dont il est possible de résoudre

l'équation des caractéristiques. Bien qu'il puisse être possible de trouver la réponse par des plusieurs méthodes, la méthode de Newton Raphson est choisie pour sa convergence rapide. Six modèles d'une cellule photovoltaïque ont été évalués. D'après les résultats de simulation, on peut dire que :

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que R_s est grande ou que R_{sh} est faible.

La représentation d'une cellule photovoltaïque par le circuit équivalent à une ou à deux diodes semble correcte. Malgré ça, le modèle à deux diodes présente quand même un léger avantage, car il fait appel à la recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume du matériau. Le modèle à deux diodes est très bon si l'on possède une quantité suffisante de données expérimentales pour déterminer l'ensemble des paramètres.

Une comparaison entre ces modèles a montré que le modèle L4P combine entre la simplicité et la précision parce qu'il fournit des données qui sont comparables aux données expérimentales.

Chapitre II

*Amélioration de
rendement énergétique
de système
photovoltaïque*

II.1. Introduction

Un GPV présente des caractéristiques I-V non linéaires qui admettent un seul point de fonctionnement optimal dans les conditions homogènes d'éclairement et de température.

Une adaptation d'impédance s'impose et cela peut se faire par un couplage direct d'une charge adaptée ou en insérant entre le GPV et la charge électrique un dispositif électronique.

Ce dispositif n'est autre qu'un convertisseur statique muni d'une commande de poursuite du PPM. Dans le but de concevoir une interface de puissance plus performante, une étude détaillée est faite sur les convertisseurs statiques DC-DC non isolés en mode de conduction continu.

La conception d'un étage d'adaptation muni d'un algorithme MPPT permet d'optimiser la conversion énergétique et de relier aisément un GPV à sa charge. Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'étude du convertisseur DC/DC comme étage de conversion d'énergie, on présentera quelques techniques MPPT existantes qui permettent de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale.

II.2. Théorie du convertisseur « boost » (analyse et principe de fonctionnement)

Un convertisseur boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus forte. La figure II.1 représente le schéma de base d'un convertisseur boost [23].

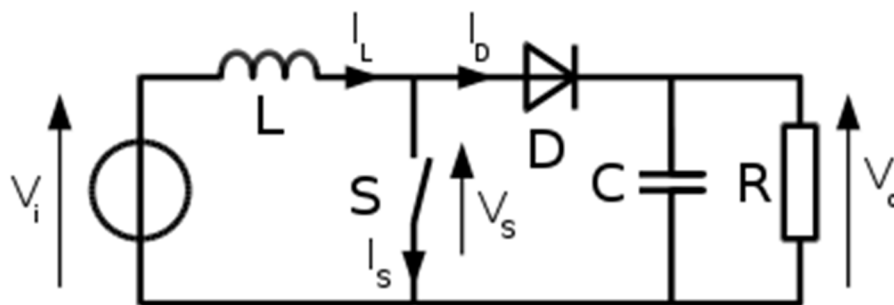


Figure II.1 Schéma de base d'un convertisseur boost [23]

Le principe de fonctionnement d'un convertisseur boost est divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur S :

- Lorsque l'interrupteur S est fermé (état passant), le courant dans l'inductance va augmenter, et une énergie sous forme d'énergie magnétique est stockée. La diode est donc bloquée, et la charge sera déconnectée. L'expression de V_i est donc :

$$V_i = L \frac{dI_L}{dt} \tag{II. 1}$$

A la fin de l'état passant, le courant I_{La} augmenté de la valeur ΔI_{Lon} exprimée par :

$$\Delta I_{LON} = \int_0^{DT} dIL = \int_0^{DT} \frac{VLdt}{L} = \frac{Vi.D.T}{L} \tag{II. 2}$$

D est le rapport cyclique qui représente la fraction de la période T lorsqu'il interrupteur S est passant. $0 < D < 1$.

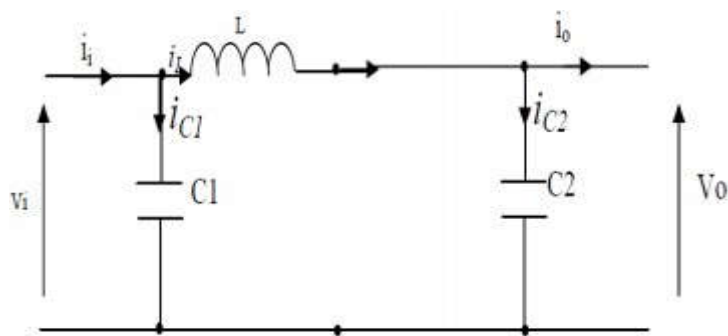


Figure II.2: Schémas équivalents de l'hacheur parallèle K : fermé

- Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance est alors en série avec le générateur et sa tension va s'ajouter à celle du générateur : c'est l'effet survolteur. L'énergie cumulée dans l'inductance va être donc transférée vers la capacité.

L'expression de V_i est alors :

$$V_i - V_o = L \frac{dI_L}{dt} \tag{II.3}$$

La variation de I_L durant l'état bloqué sera donc égale à :

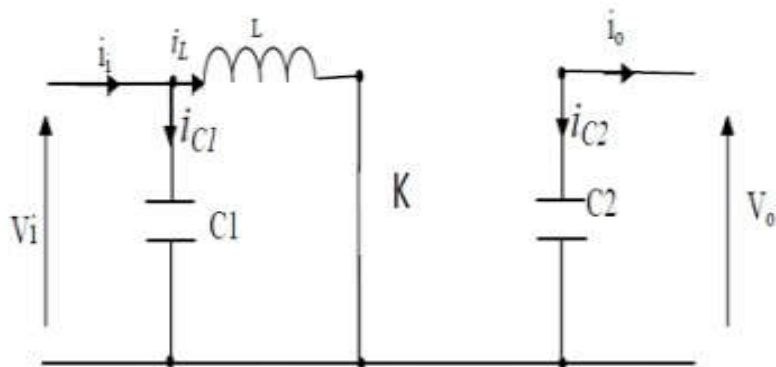


Figure II.3 : Schémas équivalents de l'hacheur parallèle k : ouvert

$$\Delta I_{Loff} = \int_0^{(1-D)} dI_L = \int_0^{(1-D)} \frac{(V_i - V_0)dt}{L} = \frac{(V_i - V_0)(1 - D)T}{L} \quad (II.4)$$

La quantité d'énergie emmagasinée dans chacun de ces composants est la même au début et à la fin d'un cycle de fonctionnement. Par conséquent, le courant I_L est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui permet d'écrire

$$\Delta I_{Ion} + \Delta I_{Loff} = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{L} + \frac{(V_i - V_0)(1 - D)T}{L} \quad (II.5)$$

D'où l'expression de V_0 :

$$V_0 = D \cdot V_i \quad (II.6)$$

II.3. Théorie du convertisseur « buck »

Un convertisseur buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus faible. Le schéma de base d'un convertisseur boost est représenté par la figure II.4 [23].

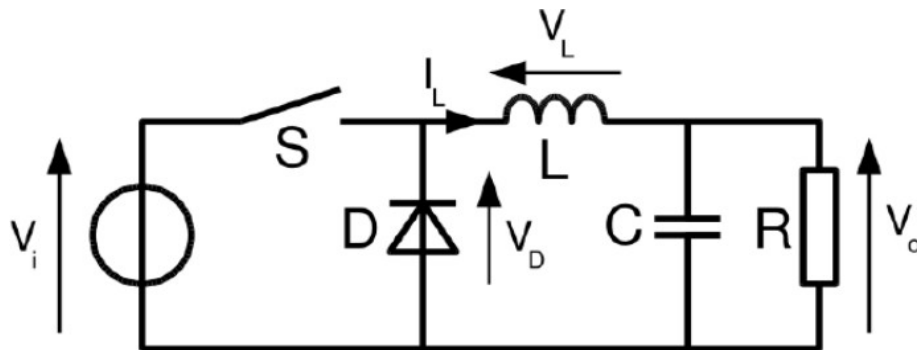


Figure II.4: Schéma de base d'un convertisseur Buck [23].

Le principe de base du fonctionnement de ce type de convertisseur est le suivant :

- Lorsque l'interrupteur S est fermé, la tension aux bornes de l'inductance est égale à $V_l = V_i - V_0$. Le courant I_L croît linéairement et la diode se trouve bloquée. La tension aux bornes de l'inductance L est :

$$V_l = L \frac{dI_L}{dt} \quad (II.7)$$

L'augmentation du courant I_L est donné par :

$$\Delta I_{lon} = \int_0^{DT} dIL = \int_0^{DT} \frac{VLdt}{L} = \frac{(Vi - V0).D.T}{L} \quad (II.8)$$

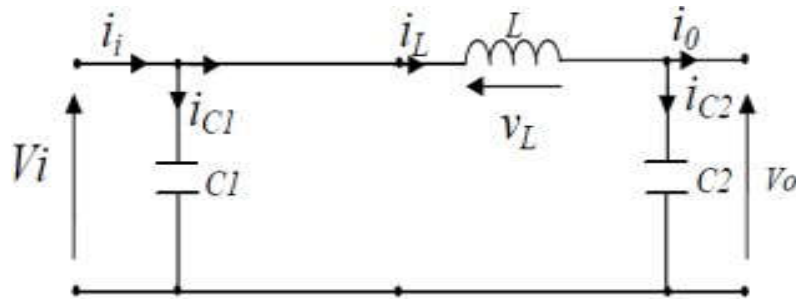


Figure II.5: Schéma équivalents de l'hacheur série S : fermé

- Lorsque l'interrupteur S est ouvert, La diode devient alors passante pour assurer la continuité du courant I_L . La tension V_L est donc égale à $V_L = -V_0$ et le courant I_L décroît.

La diminution du courant I_L dans l'inductance est :

$$\Delta I_{loff} = \int_0^T dIL = \int_0^T \frac{VLdt}{L} = \frac{-V_0(T - D)}{L} \quad (II.9)$$

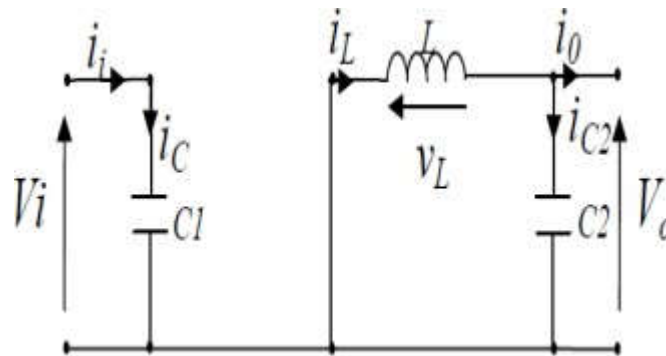


Figure II.6: Schémas équivalents de l'hacheur série S : ouvert

Vu que l'énergie emmagasinée dans les composants et le courant IL ont les mêmes valeurs au début et à la fin de chaque cycle de commutation, on peut écrire :

$$\Delta I_{lon} + \Delta I_{loff} = \frac{(Vi - V0).D.T}{L} - \frac{V_0(T - DT)}{L} = 0 \quad (II.10)$$

D'où l'expression de V_0 :

$$V_0 = D.V_1 \quad (II.11)$$

II.4. Théorie du convertisseur « buck-boost » (Analyse et principe de fonctionnement)

Le convertisseur buck-boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus faible ou plus grande, mais de polarité inverse. Le schéma de principe d'un convertisseur buck-boost est représenté par la figure II.7[23].

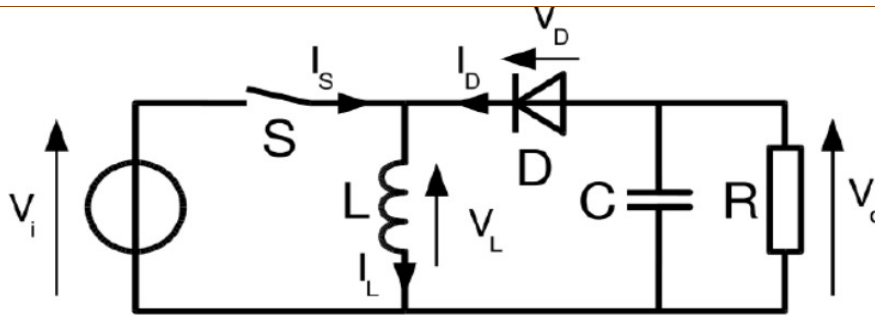


Figure II.7: Schéma de base d'un convertisseur buck-boost [23].

Le fonctionnement du convertisseur buck-boost peut être expliqué selon l'état de l'interrupteur S.

➤ Lorsque l'interrupteur S est fermé, l'énergie stockée dans la bobine va augmenter.

La valeur de la tension Vi est alors :

$$V_i = L \frac{dI_L}{dt} \quad \text{II.12}$$

L'augmentation du courant I_L à la fin de l'état passant est définie par :

$$\Delta I_{lon} = \int_0^{DT} dI_L = \int_0^{DT} \frac{V_i dt}{L} = \frac{V_i dt}{L} \quad \text{II.13}$$

➤ Lorsque l'interrupteur S est ouvert, l'inductance se trouve alors reliée à la charge et à la capacité. L'énergie stockée dans l'inductance va être transférée vers la capacité et la charge. La valeur de la tension Vo est alors :

$$V_0 = L \frac{dI_L}{dt} \quad \text{II.14}$$

Par conséquent, la variation de I_L durant l'état bloqué est alors :

$$\Delta I_{off} = \int_0^{(1-D)T} dI_L = \int_0^{(1-D)T} \frac{V_0 dt}{L} = \frac{V_0(1-D)T}{L} \quad \text{II.15}$$

Si on considère que l'énergie stockée dans chaque composant et le courant IL ont la même valeur au début et à la fin de chaque cycle de commutation, on peut donc écrire :

$$\Delta I_{lon} + \Delta I_{off} = \frac{V_{id}t}{L} + \frac{V_0(1-D)T}{L} = 0 \quad \text{II.16}$$

Le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée est alors :

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{-D}{1-D} \quad \text{II.17}$$

II.5. La poursuite du point de puissance maximale

La poursuite du point à maximum de puissance appelé « Maximum power point trekking » (MPPT) afin que la puissance maximale soit générée en permanence [24]. Par conséquent, plusieurs travaux ont porté sur les systèmes photovoltaïques. Ils ont essayé de développer des algorithmes permettant d'extraire le maximum d'énergie convertie par le panneau et alors qui permet un fonctionnement optimal du système photovoltaïque [25]. On trouve dans la littérature des algorithmes basés sur les méthodes suivantes telles que : Hill Climbing, Perturber & Observer (P&O) et Incrément de la conductance (INC) [26][27].

II.6. La commande MPPT (Maximum Power Point Tracker)

La puissance délivrée par un GPV dépend fortement du niveau d'ensoleillement, de la température des cellules, de l'ombrage et aussi de la nature de la charge alimentée. Elle est de ce fait très imprévisible. Un convertisseur MPPT (Maximum Power Point Tracker) doit donc être utilisé afin de suivre ces changements. Un convertisseur MPPT est un système de conversion de puissance muni d'un algorithme de contrôle approprié permettant d'extraire le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

II.6.1. Principe de la recherche du point de la puissance maximale

Le principe de la commande MPPT 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. La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

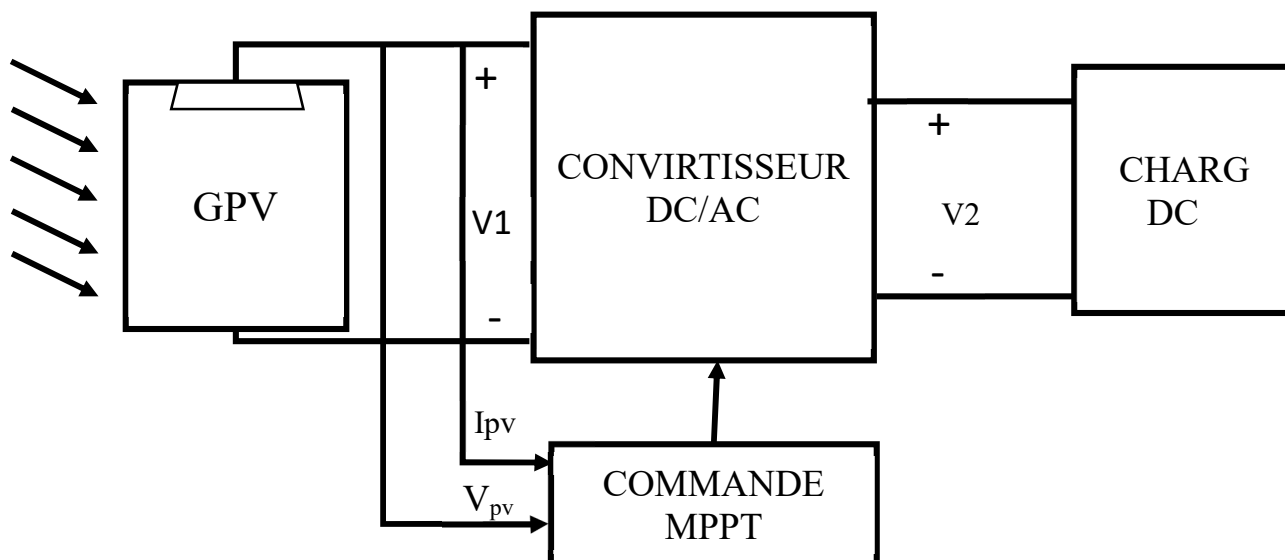


Figure II.8 : Schéma de principe de la commande MPPT

II.6.2. Techniques de recherche de point de puissance maximal MPPT

De nombreuses recherches ont été développées concernant les différents algorithmes du suivi du point de puissance maximale MPP. En tenant compte des variables des paramètres du système et/ou des changements climatiques.

Il y a plusieurs méthodes (classiques et modernes) du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque et qui sont :

- ✓ Méthode de perturbation et observation (P&O).
- ✓ Méthode de conductance Incrémentale (IC).
- ✓ Méthode de logique floue (FL).
- ✓ Méthode de la logique floue optimisée par le PSO (PSO-FL)

Mais dans ce travail nous avons appliqué deux méthodes (P&O ET IC)

II.6.2.1. Principe des techniques “Perturb and Observe” (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 II.9), 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 à partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance P_{pv} augmente, la direction de perturbation est maintenue

Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La (Figure II.9) 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 [28]

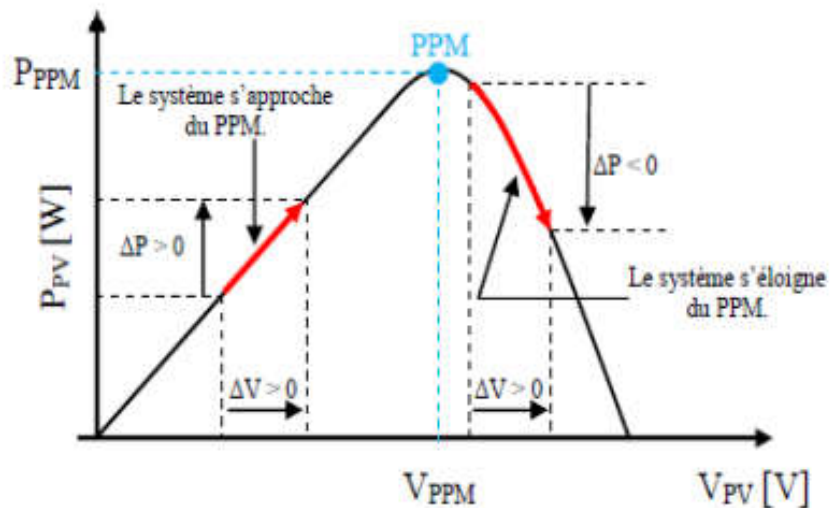


Figure II.9. Caractéristique P(V) d'un panneau solaire

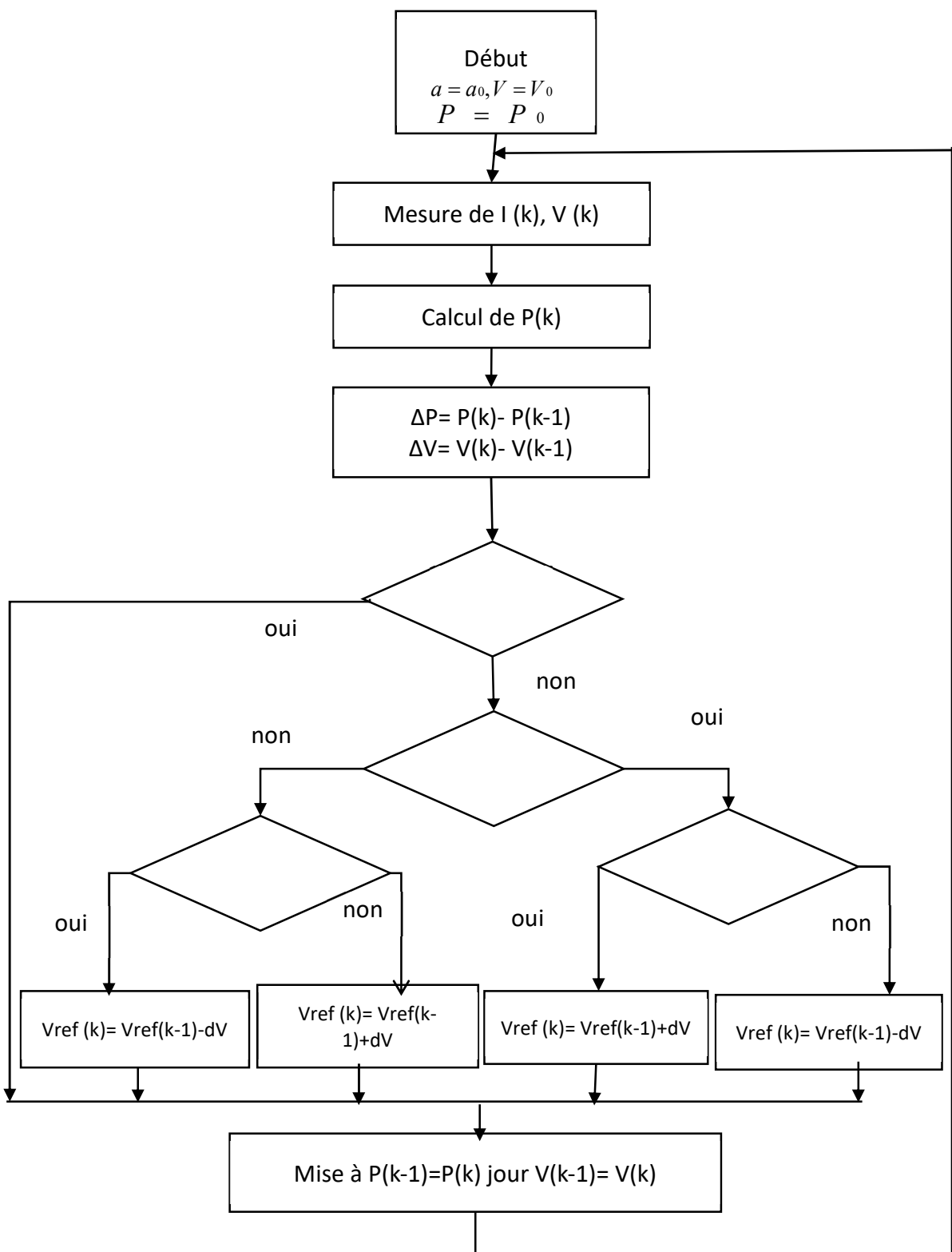


Figure II.10 : Organigramme de l’algorithme P&O

II.6.2.2. Principe des techniques “Incrément de conductance” (Inc.CoN)

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. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous.

$$G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} \tag{II.18}$$

Et une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$G = \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} \tag{II.19}$$

D’autre part, l’évolution de la puissance du module (PPV) par rapport à la tension (VPV) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l’on est sur le PPM, si elle est positive le point d’opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu’elle est négative, on se situe à droite [24].

La (Figure II.10) permet d’écrire les conditions suivantes :

- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ le point de fonctionnement est sur le PPM,
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

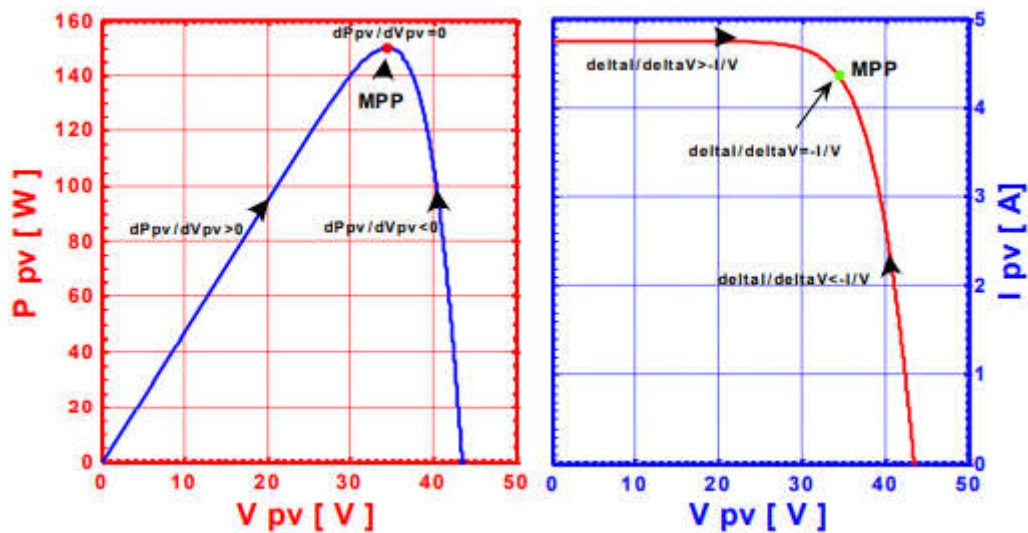


Figure II.11 . Positionnement du point de fonctionnement (G=1kW/m² , T=25C°).

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (II.18) et la dérivée de la puissance $\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}}$ peut-être décrit par l'équation suivante

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d[I_{PV} * V_{PV}]}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} * \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} * \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} \quad \text{II.20}$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance comme celles données par (II.20) sur la dérivée de puissance :

- Si $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM
- Si $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ le point de fonctionnement est sur le PPM
- Si $\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ le point de fonctionnement est sur la droite du PPM.

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance ($\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$) avec celle de l'incrément de conductance ($\frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}}$), comme l'illustre l'algorithme de la (Figure II.11). V_r correspond à la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur. Si on est au PPM, alors la tension V_r correspond bien à la tension optimale V_{OPT} . Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de ΔI_{PV} . Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela, l'algorithme incrémente ou décrémenté la valeur de V_r jusqu'à atteindre le PPM. Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la (Figure II.11) [30] [31].

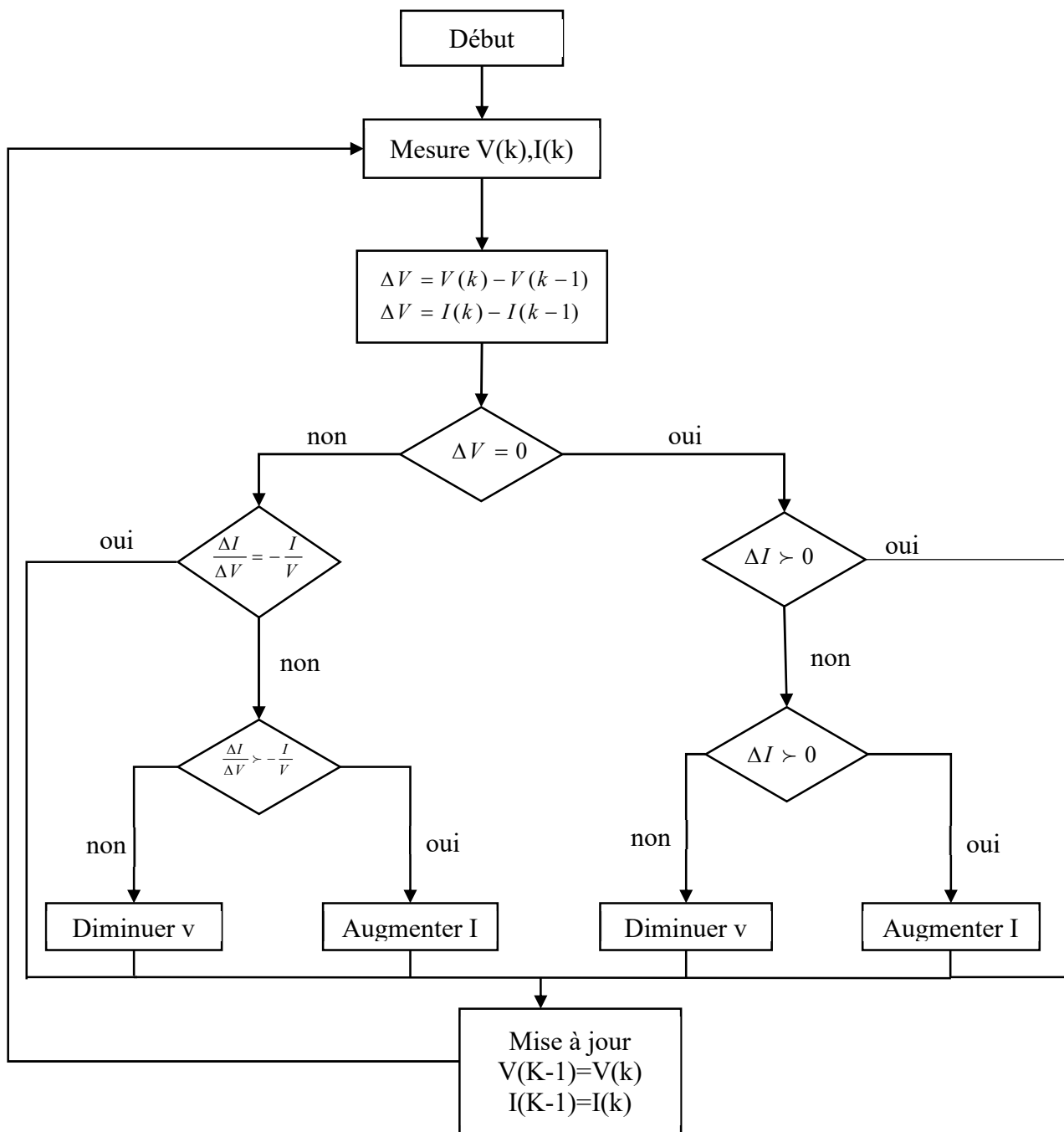


Figure II.12: Organigramme de l’algorithme Inc.CoN

II.6.3. Les avantages et les inconvénients

⊗ **Avantage :**

Parlant de la méthode P&O, parmi les avantages que l'on peut citer c'est la structure de régulation simple ainsi que le nombre des paramètres mesures réduit.

Pour la méthode INC l'avantage principal de cet algorithme est qu'il offre un bon rendement même sous un changement rapide des conditions atmosphériques. En revanche, les rendements de MPPT de la conductance par incrémentation et de l'algorithme P&O sont essentiellement identiques.

⊗ **Inconvénients :**

Pour la méthode P&O il existe un dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques. Néanmoins,

L'inconvénient d'INC est que le circuit de commande est complexe et très couteux

II.6.4. 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. En résumé cela donne le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire [32].

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{in}}{P_{MAX}} \quad (II.21)$$

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 [28, 29]. Nous les détaillerons au fur et à mesure de leur utilisation dans ce document.

II.6.4.1. Simplicité et Coût

En plus de ces 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.

II.6.4.2. 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'éclairage ou de température, soit faite le plus rapidement possible.

II.6.4.3. 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.

II.6.4.4. 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.

II.7. Théorie du convertisseur DC/ AC « Onduleur » (Analyse et principe de fonctionnement)

II.7.1. L'onduleur central

Dans le cas d'onduleur central, les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10kW) sont montés en rangées pour former une chaîne (String en anglais), elle-même couplée en parallèle avec des diodes anti-retours à plusieurs autres, (Figure II.12). Le générateur PV de forte puissance ainsi structuré est relié du côté DC à un seul onduleur. Cet onduleur central présente une grande efficacité énergétique à des coûts réduits. La fonction principale de cet appareil est de créer une tension alternative à partir d'une tension continue la plus compatible avec le réseau et d'examiner en permanence la présence ou non du réseau pour autoriser l'injection du courant. La structure classique de l'onduleur est souvent un circuit en pont permettant de relier chacun des deux pôles d'entrée à chacun des deux pôles de sortie par le biais d'interrupteurs de puissance [35].

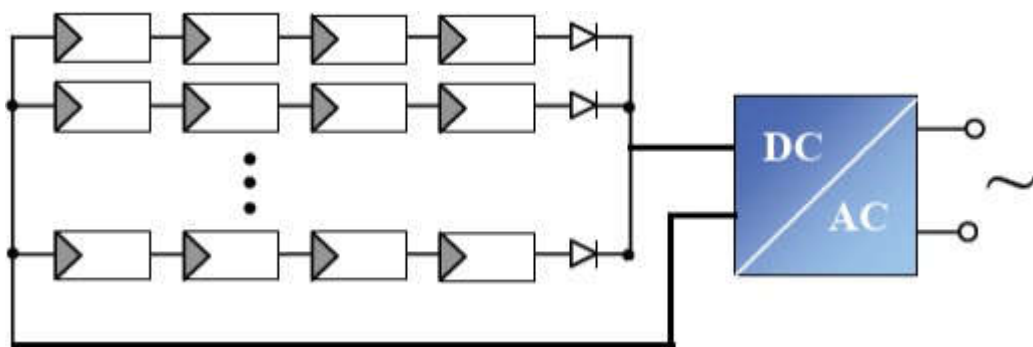


Figure II.13 : Onduleur central

Le couplage direct des installations PV avec des onduleurs sans transformateur gagne en importance. En effet, ils sont peu onéreux et offrent un rendement énergétique imbattable (entre 95% et 97% pour les fortes puissances). Pour pouvoir alimenter le réseau, la tension d'entrée doit toujours dépasser la tension crête de la tension réseau redressée. Soit, pour une valeur de tension efficace réseau de 250V, une source de tension minimale de 354V est nécessaire pour pouvoir injecter un courant sinusoïdal dans le réseau. Par conséquent, un panneau mal adapté ou encore un ombrage partiel porte préjudice à une exploitation optimale de chaque chaîne PV et entraîne une réduction du rendement énergétique. L'onduleur central possède de plus en plus souvent au moins un système de contrôle MPPT lui permettant de

fonctionner à son PPM. Cela marche parfaitement tant que les panneaux sont identiques et qu'ils fonctionnent sous un ensoleillement homogène.

Mais lorsque les caractéristiques électriques entre les panneaux diffèrent, dues à des ombrages, des salissures, au vieillissement ou au stress, la commande MPPT devient incertaine et le champ photovoltaïque ne produit pas autant qu'il le pourrait. En outre, la fiabilité de l'installation est limitée parce qu'elle dépend d'un seul onduleur. Ainsi, lorsqu'une panne de l'onduleur central se produit, elle entraîne l'arrêt complet de l'installation et donc de la production [35]

II.7.2. Les onduleurs strings

De même que pour l'onduleur central, le champ PV est, ici aussi constitué de strings (chaînes). Chaque string est toutefois relié à un onduleur (**Figure II.13**). Chaque string peut ainsi fonctionner à son PPM. Cette technologie réduit considérablement le risque de problèmes d'adaptation ainsi que les pertes dues aux effets d'ombrage, tout en éliminant celles occasionnées par les diodes anti-retours et un câblage prolongé vers le générateur DC. Ces propriétés techniques avantageuses accroissent la fiabilité de l'installation ainsi que sa production énergétique. Mais il faut prendre en compte l'augmentation du nombre d'onduleurs de moyenne puissance disposant de rendement compris entre 92% et 96% [35]

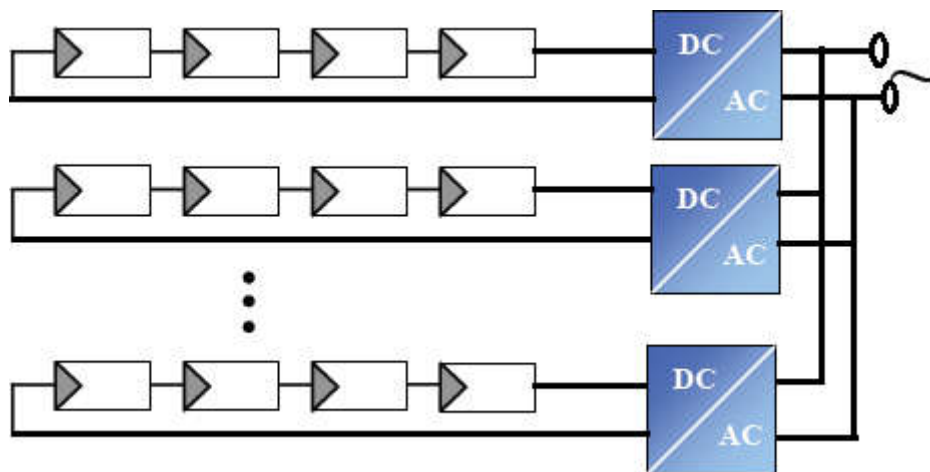


Figure II.14 : Onduleur string

Une étude théorique développée explore les avantages et les bénéfices à utiliser une architecture string comparée à une architecture centralisée. Ces travaux sont focalisés sur l'évaluation des performances des deux types de systèmes en prenant en compte les pertes dans les dispositifs d'électronique de puissance, les dissipations dans les câbles et les sensibilités des GPV vis-à-vis de l'irradiance et des effets d'ombrages. Il en résulte que l'architecture string

apporte un gain en rendement de 1.5% par rapport à une conception centralisée. Cependant, l'aspect économique n'est pas pris en compte ici. Une autre étude en montre que, pour une installation inférieure à 5kWc sur 25 ans, l'architecture string n'est financièrement pas intéressante du fait de son surcoût à l'installation et du coût de la maintenance. Les auteurs intègrent une variable MTTF très intéressante (Mean Time To Failure of inverter). Elle permet d'évaluer le taux de pannes d'un onduleur sur une durée déterminée et donc permet d'estimer plus précisément l'aspect économique d'une architecture par rapport à une autre. Dans certains cas, il est même économiquement plus avantageux de ne pas remplacer un onduleur string défectueux dans un ensemble de grande puissance [35]. Cependant, un paramètre reste toujours incertain dans le contrôle MPPT lorsque la caractéristique de puissance du string possède plusieurs pics de puissance. Dans ce cas, l'onduleur peut fonctionner à un faux point de puissance maximum comme pour les architectures DC présentées précédemment et par conséquent, la puissance délivrée ne sera pas la puissance maximale disponible. Cette configuration peut arriver lors de différentes configurations. Une partie des panneaux peut être sale ou cachée par des ombres ou de la neige ou bien l'orientation des panneaux d'un même string n'est pas identique pour tous les panneaux. Une disposition non optimale des panneaux implique donc qu'un string peut recevoir une irradiance inhomogène pouvant perturber la recherche du PPM. La solution en termes de gain énergétique est d'aller vers une gestion plus individuelle des panneaux en intégrant par exemple un étage d'adaptation par GPV [35].

II.7.3. Les onduleurs multi-string

En fait, la gestion multi-string est née de la combinaison entre la gestion par onduleur central et la gestion par strings. Comme illustré en (**Figure II.14**), le principe de la conversion multi-string est basé sur de nombreux convertisseurs DC-DC modulables connectés à un onduleur central via un bus continu. Chaque convertisseur DC-DC dispose de sa propre commande MPPT permettant à chaque string de fonctionner à son PPM. Par conséquent, le dysfonctionnement d'un GPV peut être rapidement détecté et localisé. Le fonctionnement de l'ensemble du champ ne sera donc pas affecté par le dysfonctionnement d'un seul GPV. Grâce aux convertisseurs DC-DC, il est possible de travailler sur une plus large gamme de tension PV (tension plus faible en entrée des DC/DC) optimisant ainsi la production photovoltaïque [35].

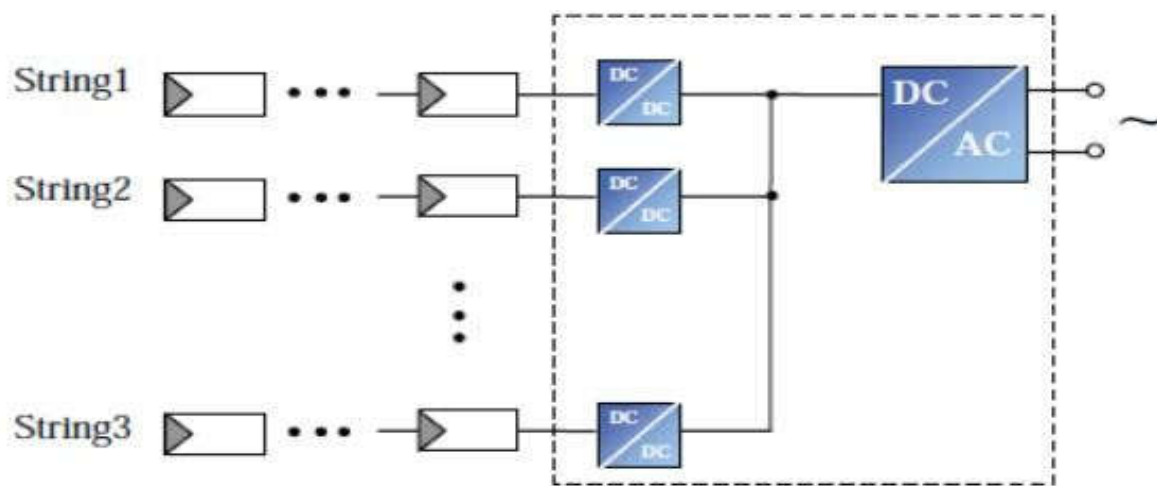


Figure II.15 : Nouvelle structure de conversion multi-string

II.8. Comparaison entre les convertisseurs DC/ AC « onduleur »

Le tableau suivant représente les avantages et inconvénients des convertisseurs DC /AC (les onduleurs)

Tableau II.1:

Structure	Avantages	Inconvénients
Onduleur Central	<ul style="list-style-type: none"> • Peu coûteuse ; • Simple à surveiller ; • Maintenance simple et rapide ; 	<ul style="list-style-type: none"> • Un seul MMPT pour l'ensemble du champ ; • Pertes de conversion; • Pertes et risques électriques ; • Aucune évolutivité ; • Aucune continuité ;
Onduleur String	<ul style="list-style-type: none"> • MPPT sur chaque string : amélioration contrôle puissance ; • Performance meilleure que l'onduleur central en cas de d'ombrage ; • Panne d'un onduleur n'engendre pas l'arrêt total du système ; • Evolutif : string indépendant ; 	<ul style="list-style-type: none"> • Pertes par couplage série des modules d'un même string ; • A faible puissance des modules : mauvais rendement de l'onduleur ;
Onduleur Multistring	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction coût par rapport à l'onduleur string ; • Pas d'intégration de contrôle commande AC dans l'hacheur ; • Pas de détection de courant continu résiduel sur le réseaudans l'hacheur 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de continuité en cas de panne de l'onduleur ;

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la constitution du système photovoltaïque pour le cas d'un étage d'adaptation DC-DC puis pour le cas d'un étage d'adaptation DC-AC. Pour cela, nous avons défini les différentes topologies utilisées dans les deux cas. Les convertisseurs DC-DC les plus utilisés comme étage d'adaptation sont les convertisseurs boost, buck et buck-boost. Une brève description de ces convertisseurs a été faite dans ce chapitre. Pour les convertisseurs DC-AC, les différentes architectures pour monter les onduleurs dans ces installations sont présentées.

Chapitre III
Application et
Simulation sur la zone
étudiée

III.1. Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est de comparer les performances des différentes techniques MPPT pour déterminer avec précision quand le MPP a été atteint et réduire les oscillations presque jusqu'à la réponse du MPP dans des conditions météorologiques changeant rapidement. Les performances sont estimées et fondées pour une journée (24 h) de mesures d'éclairement et de température. Les techniques MPPT sont réalisées sur un convertisseur DC/DC, il a été basé que sur l'ensemble des tests, la réalisation MPPT de la proposition (IncCond/P&O) est améliorée d'environ 1,5% points. Nos algorithmes proposés (IncCond/P&O) exigent que diverses lignes de codes logiciels supplémentaires soient implantées dans les programmes de contrôle MPPT.

III.2. Présentation d'un site étudiée

Dans cette partie, le travail expérimental a consisté à comparer la réalisation de la technique MPPT proposée à travers les méthodes IncCond, et P&O. Les données appliquées pour mettre en œuvre la présente recherche ont été enregistrées à l'Unité de Recherche sur les Energies Renouvelables (URAER) existant dans le sud de l'Algérie, avec la latitude ($+32,37^\circ$), la longitude ($+32,37^\circ$), et l'altitude ($+3,77^\circ$), Figure (III.1 et III.2) ils sont enregistrés toutes les 5 min et consistent en des informations de données d'éclairement solaire complet.



Figure III.1. Position des instruments de mesure de l'ensoleillement solaire global.

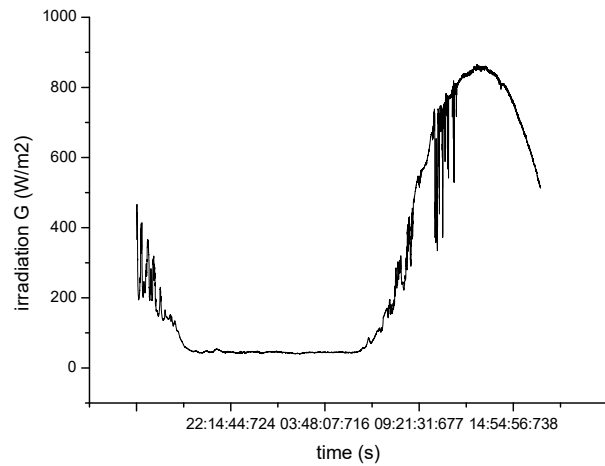


Figure III.2. Résultat de la mesure de l'ensoleillement solaire totale en par jour dans la ville de Ghardaïa

III.3. Générateur PV utilisé

La figure III.3 affiche un schéma du panneau PV utilise dans cette étude avec fiche technique de paramètre électrique correspondant via l'acquisition de données.



Figure III.3 : GPV utilisé dans la présente étude.

III.4. Simulation de deux panneaux PV utilisé

Figure III.4 présent les caractéristiques de courant (I), de puissance (W) en fonction de tension (V) de système réaliser d'après les conditions métrologiques correspondant dans le site étudié on trouve les résultats de simulation sont représentant respectivement

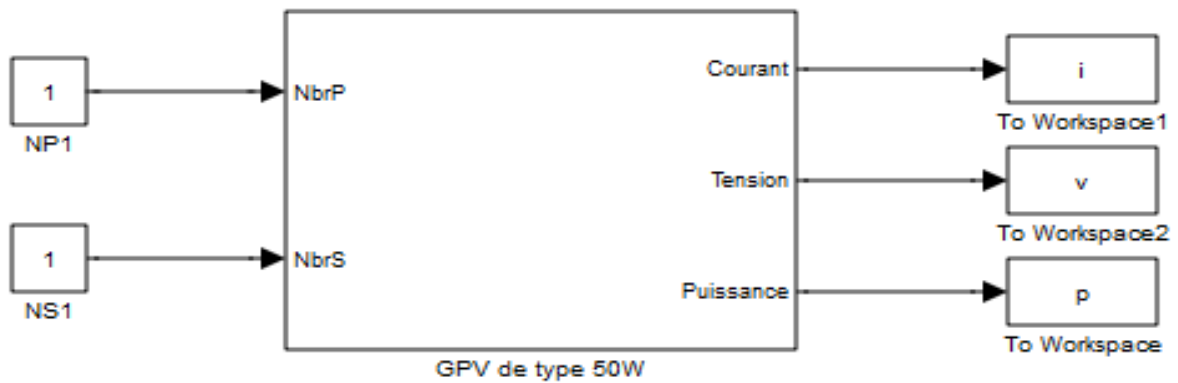


Figure III.4.1 : schéma de panneau PV(50w) utilisé sous Matlab/Simulink.

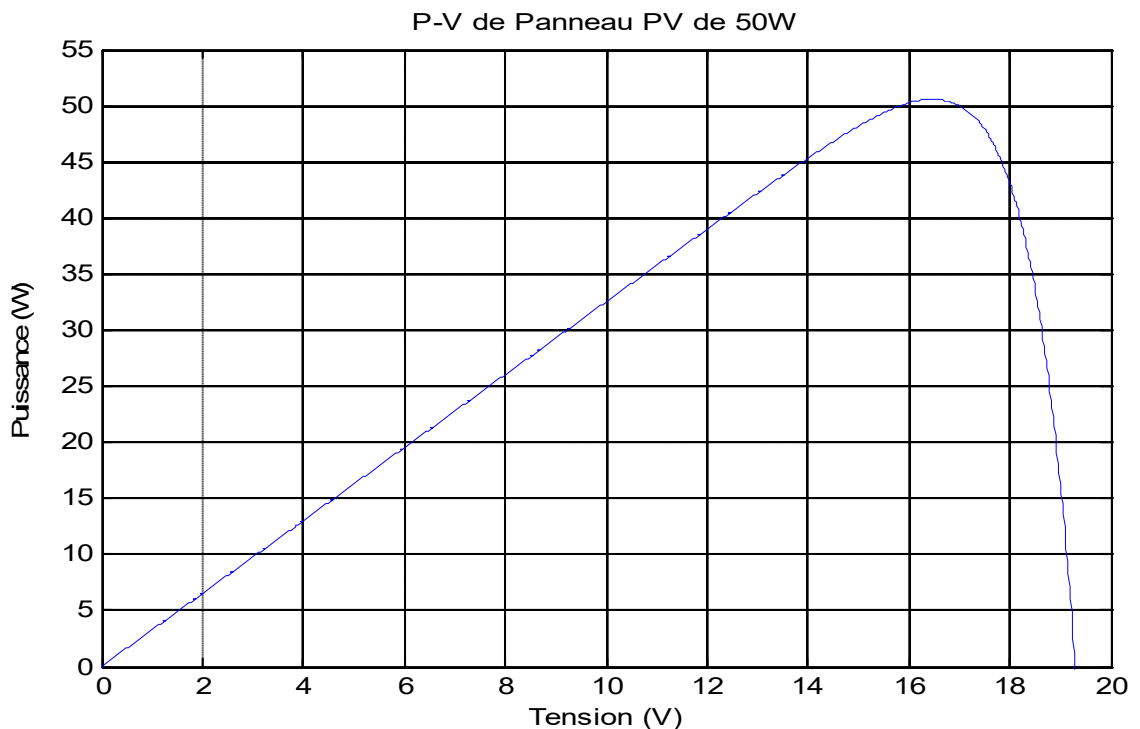


Figure III.4.2 : résultats de la puissance de panneau PV(50w) utilisé sous Matlab/Simulink.

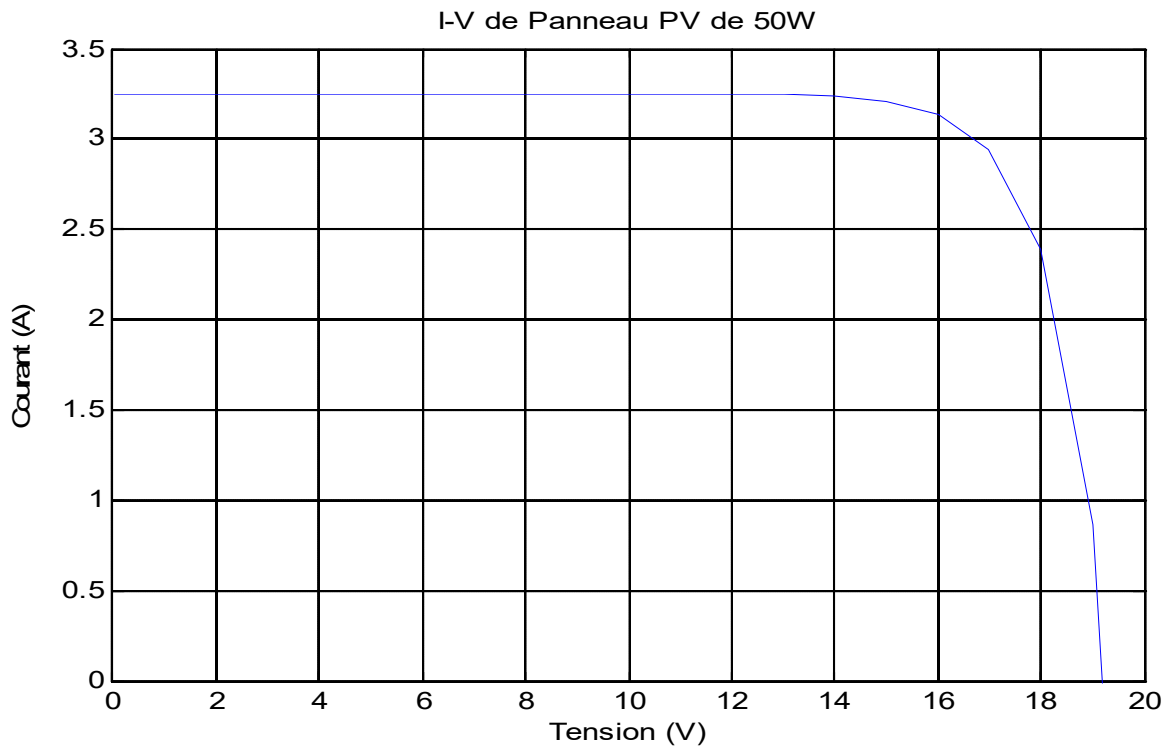


Figure III.4.3 : résultats de courant de panneau PV(50w) utilisé sous Matlab/Simulink

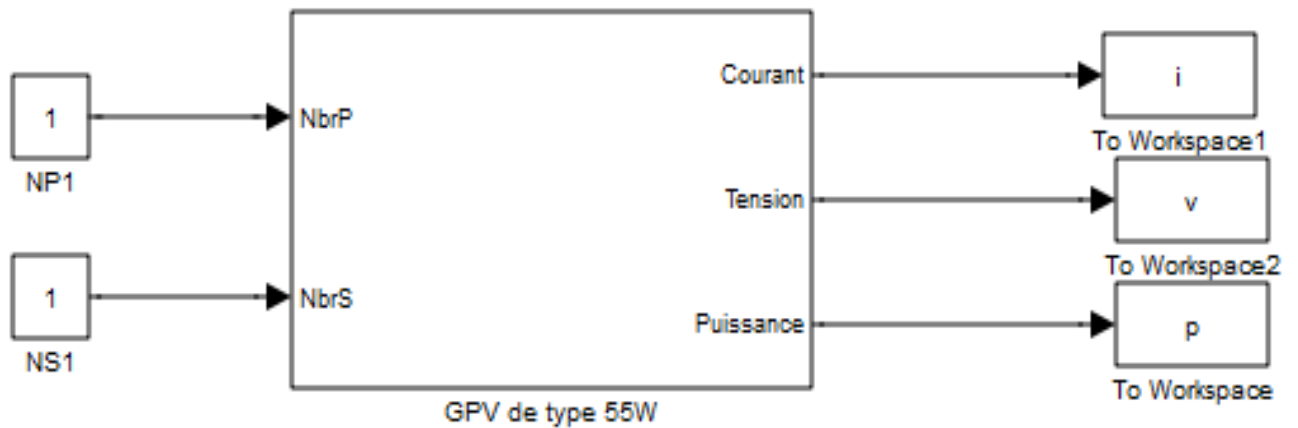


Figure III.5.1 schéma de panneau PV(55w) utilisé sous Matlab/Simulink.

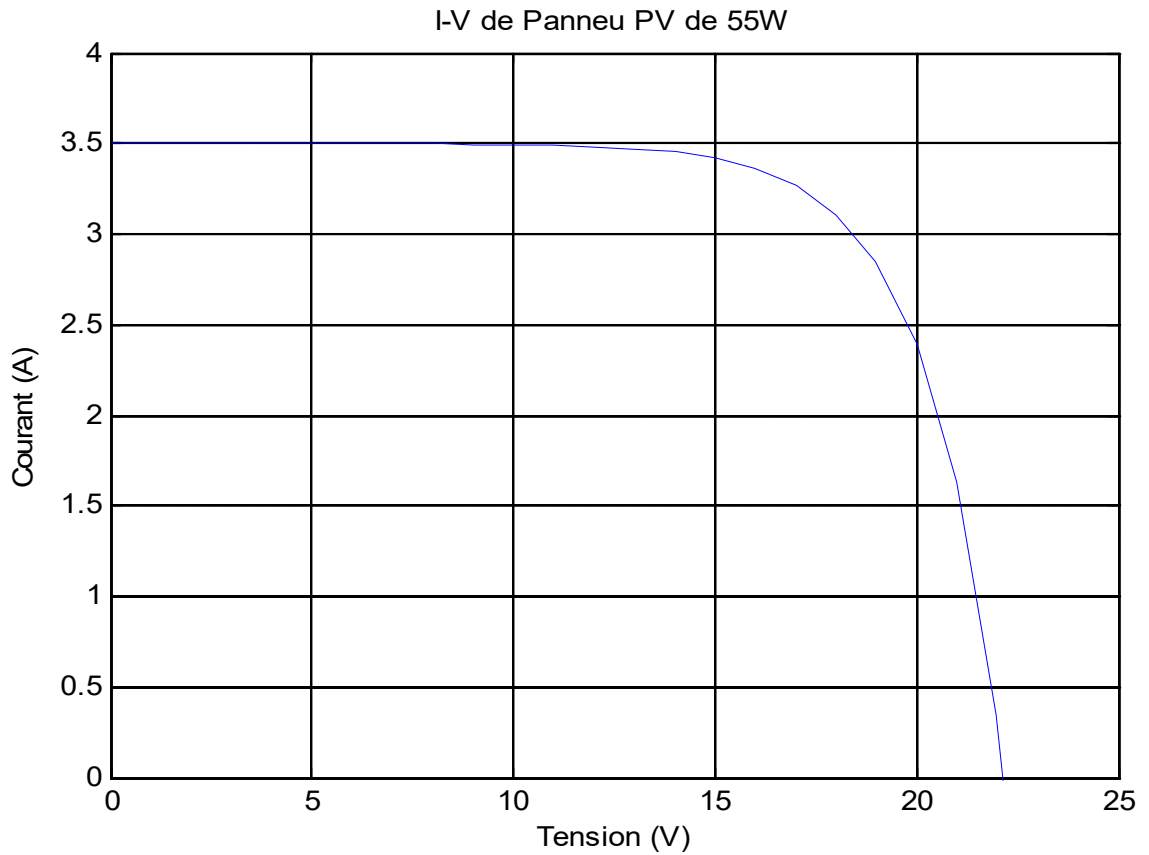


Figure III.5.2 résultats de courant de panneau PV(55w) utilisé sous Matlab/Simulink

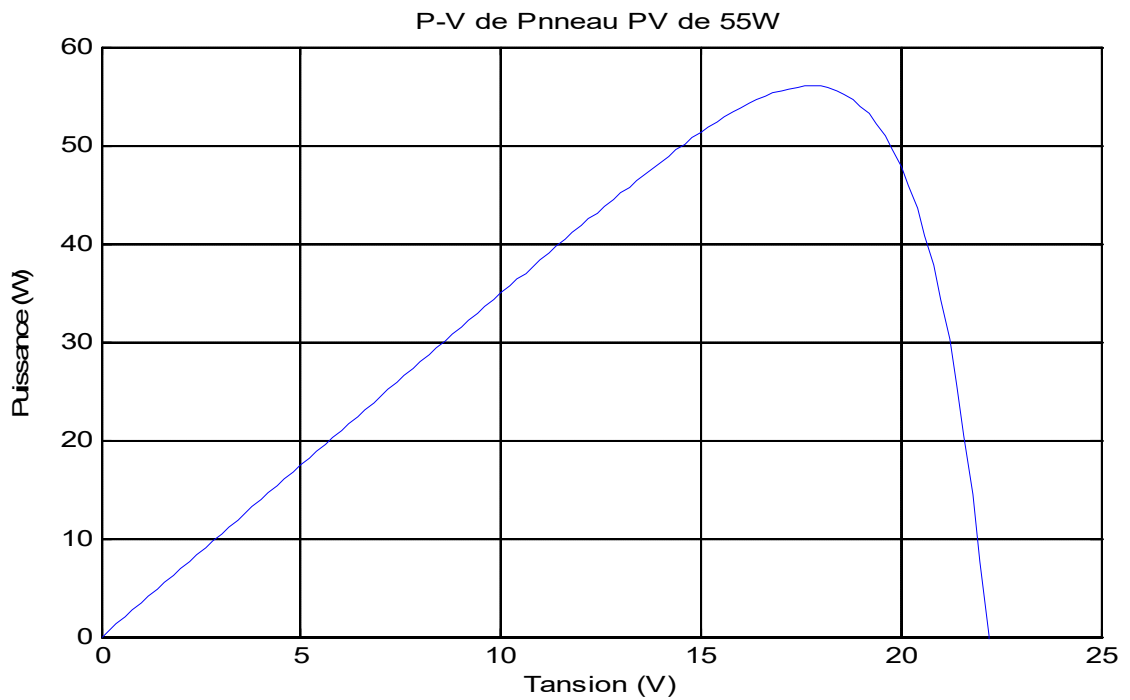
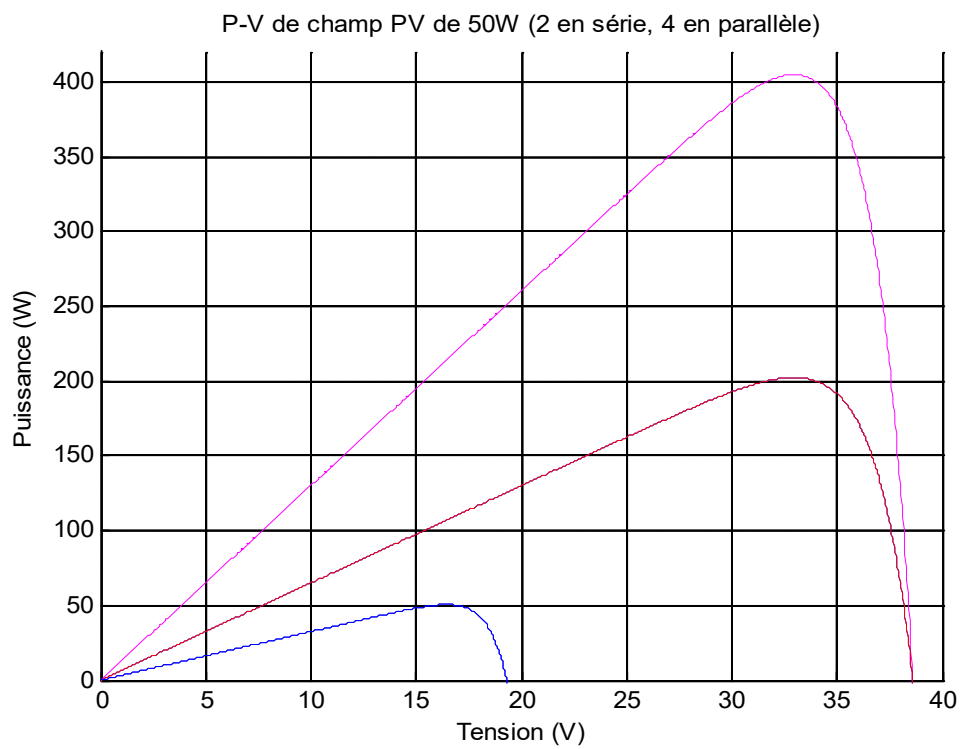
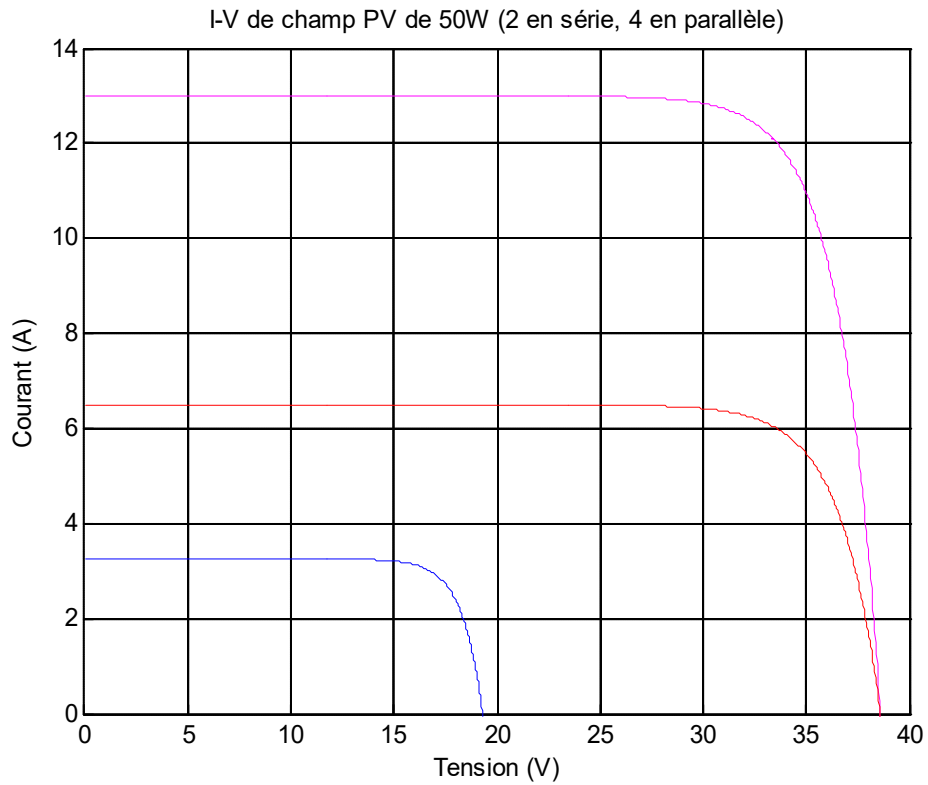


Figure III.5.3 résultats de la puissance de panneau PV(55w) utilisé sous Matlab/Simulink.

III.5. Simulation de deux champs PV utilisé



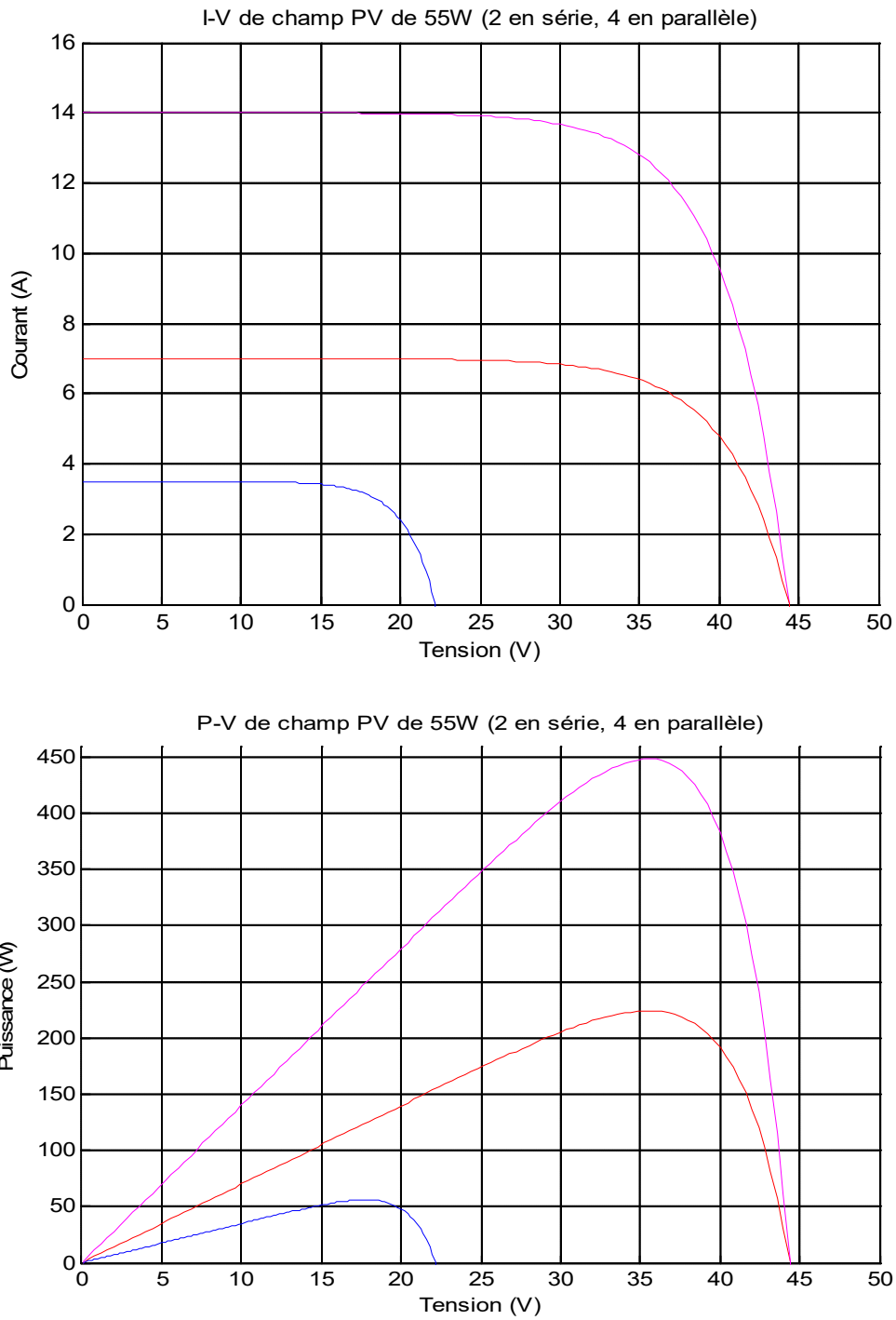


Figure III.6 : Résultats de simulation de deux champs PV utilisé sous Matlab/Simulink.

III.6. Configuration expérimentale du système proposé

Les figures III.6 et III.7 montrent le courant, la tension et la puissance transférés par le réseau GPV pendant une journée au printemps. On peut noter que le courant/tension et la puissance sont proches du pic à midi pour une irradiation supérieure à $G = 935 \text{ W/m}^2$. L'estimation haute du courant/tension de sortie correspond à la valeur minimale de la température. On a pu observer que le courant/tension et la puissance se rapprochaient de la valeur la plus élevée à midi (environ 26 A, 32 V et 700 W) pour un rayonnement solaire $G = 935 \text{ W/m}^2$.

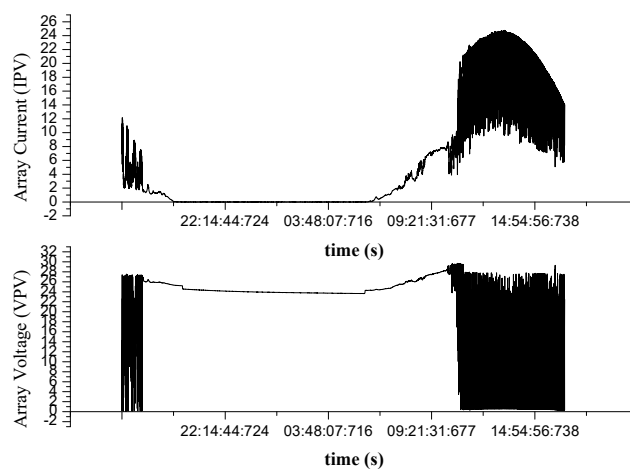


Figure III.7 : Expérimentale résultats de de deux champs PV utilisé.

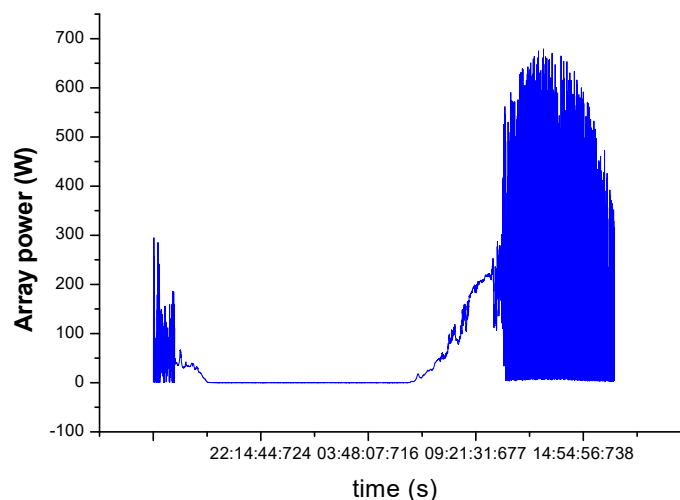


Figure III.8. Transfert de puissance via la GPV total.



Figure III.9. Configuration expérimentale du système proposé.

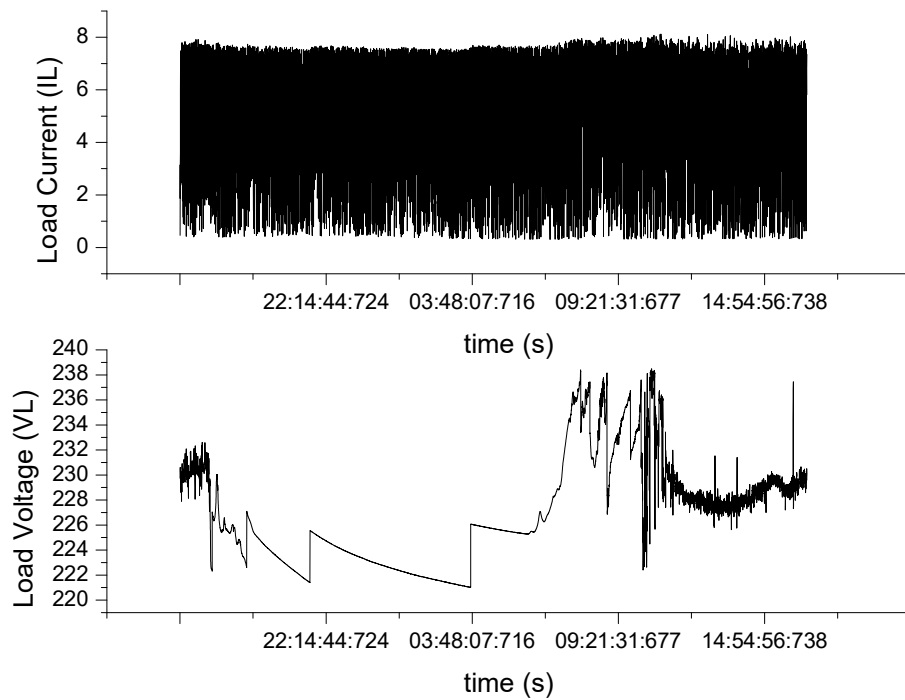


Figure III.10 Courant et tension transférés via la charge.

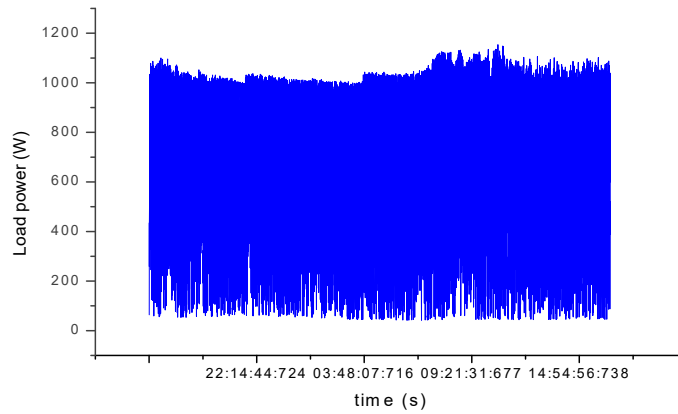


Figure III.11. Puissance total transférés via la charge.

III.7. Simulation de total système PV étudiée

III.7.1. Simulation de system PV sans MPPT

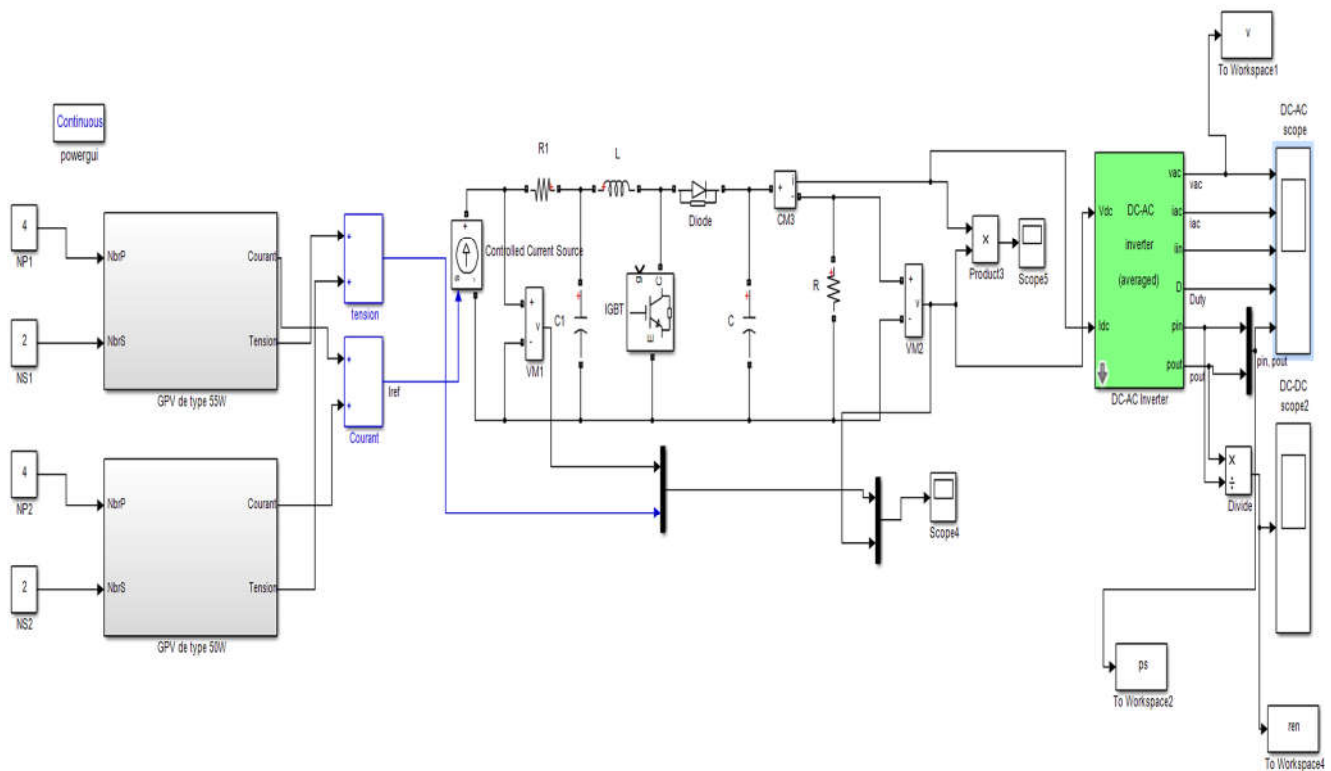


Figure III.12. schema de system PV sans MPPT sous MATLAB SIMULINK

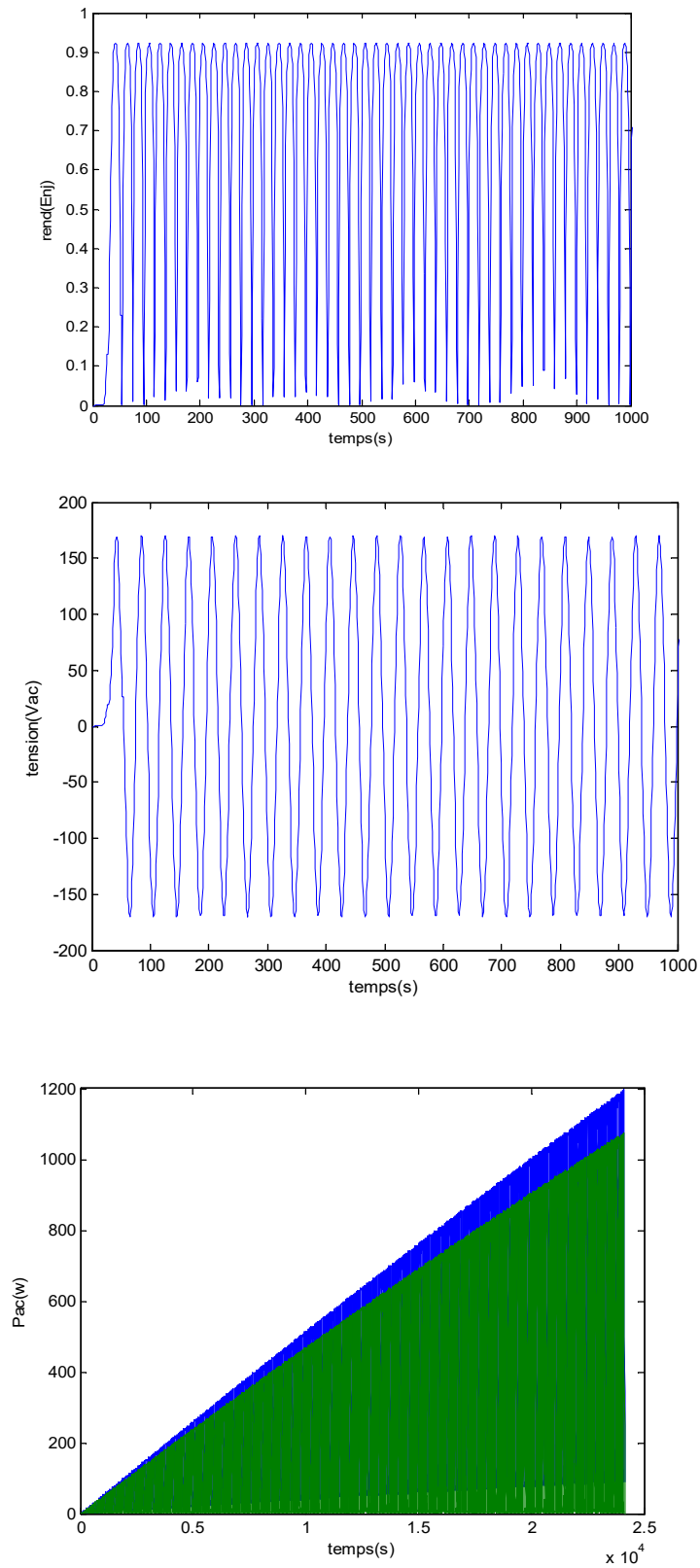


Figure III.13. les resultats des simulation de Vac,rendement energetique, Pac sans MPPT

III.7.2. Simulation de system PV avec MPPT(P&O)

Ce système solaire représente sous MATLAB/SIMULINK la simulation de GPV- Convertisseur DC/DC raccordée par une technique d'amélioration de rendement avec une commande de recherche de point de fonctionnement maximale généré par un GPV présente par P&O technique.

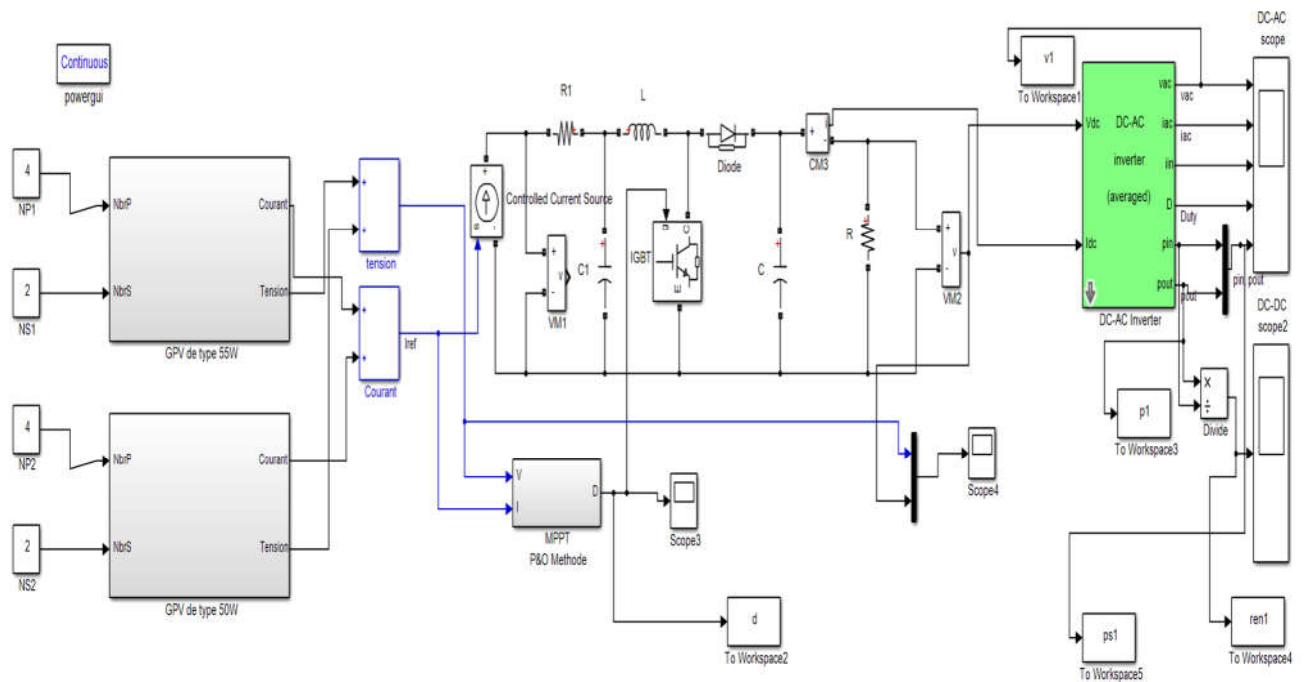


Figure III.14. schema de system PV avec MPPT(P&O) sous MATLAB SIMULINK

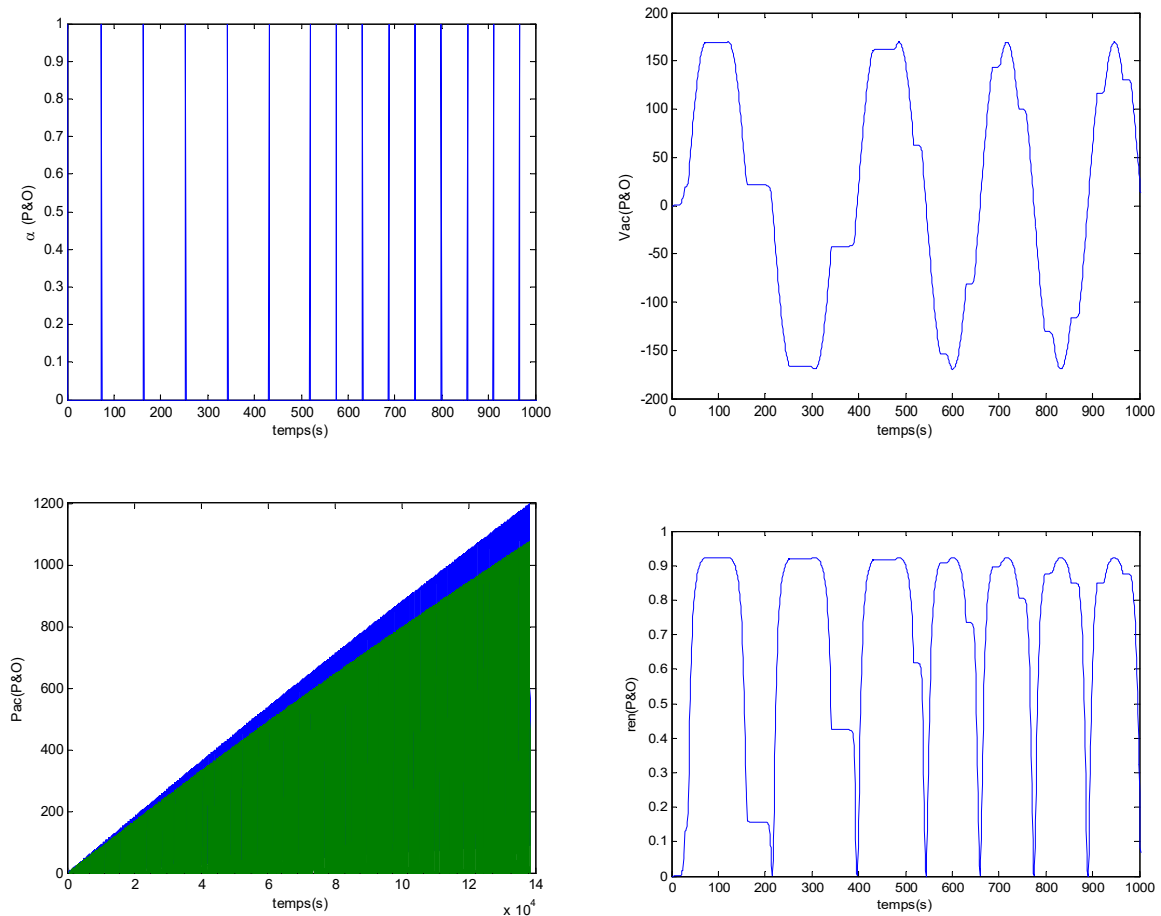


Figure III.15 : les resultats des simulation de rapport cyclique ,Vac, Pac ,rendement energetic, avec MPPT(P&O)

- **Interprtation de resultas**

La tension de générateur photovoltaïque en fonction du temps on constate que la tension ne subit pas beaucoup de chargement selon la variation du rayonnement solaire, et couvre la charge dans tous les cas.

En autre part, le courant électrique génère est proportionnel avec la variation du rayonnement solaire, et on voit aussi que même dans les valeurs les plus basses du rayonnement le courant maintenir à la demande de la charge AC.

La puissance génère suie les variations de rayonnement solaire, et on note que la production de générateur photovoltaïque est plus élevée que les besoins de charge.

III.7.3. Simulation de system PV avec MPPT (incCond)

Ce système solaire représente sous MATLAB/SIMULINK la simulation de GPV- Convertisseur DC/DC raccordée par une technique d'amélioration de rendement avec une commande de recherche de point de fonctionnement maximale généré par un GPV présente par IncCond technique

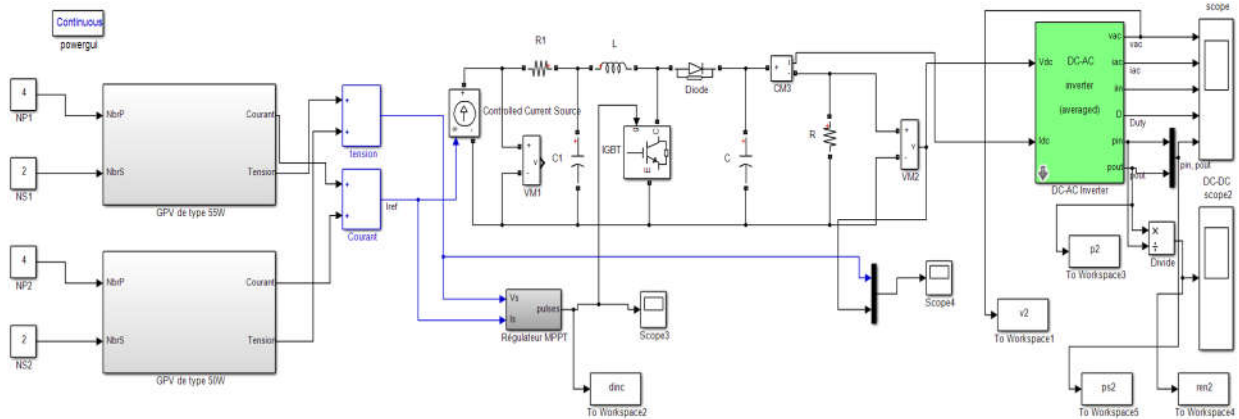


Figure III.16 : schema de system PV avec MPPT(inc) sous MATLAB SIMULINK

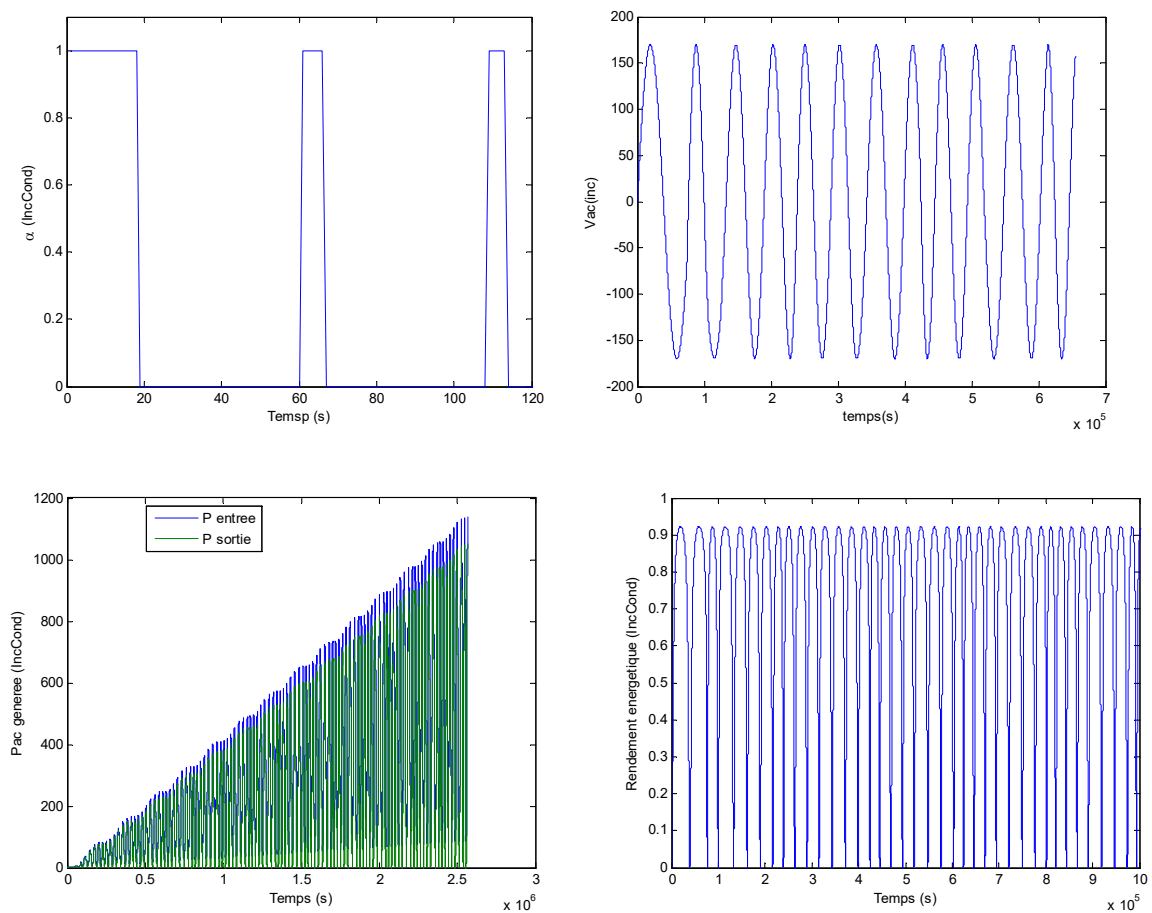


Figure III.17 : les resultats de simulation obtenue de rapport cyclique ,Vac, Pac ,rendement energetique, avec MPPT(IncCond)

- **Interprtation de resultas**

Comme remarque générale par rapport à l'évolution de la tension et la puissance, malgré que nous avons démarré la simulation avec des conditions initiales nulles, la commande IC a permis de retrouver le point de fonctionnement optimal pour un éclairage et une température standards. Les résultats de simulation montrent que la commande utilisée répond correctement aux caractéristiques du panneau qui atteint la valeur maximale de la puissance générée avec un temps relativement rapide. Bien qu'un inconvénient se présente durant le régime permanent qui figure des ondulations d'amplitude. On a utilisé presque les mêmes paramètres de la commande PO, on note aussi avec la diminution du pas du rapport cyclique, les oscillations autour du point de puissance maximale diminuent ce qui rend le système plus stable. Pour le fonctionnement dans des conditions d'éclairage variables, on note que la commande INC répond correctement pour les conditions de fonctionnement du système comme il est vérifié pour la commande PO tel qu'avec l'augmentation de l'éclairage le rapport cyclique diminue bien que la tension de GPV augment suit à celle de la puissance.

III.8. Etude comparative de simulation de system PV sans et avec MPPTs

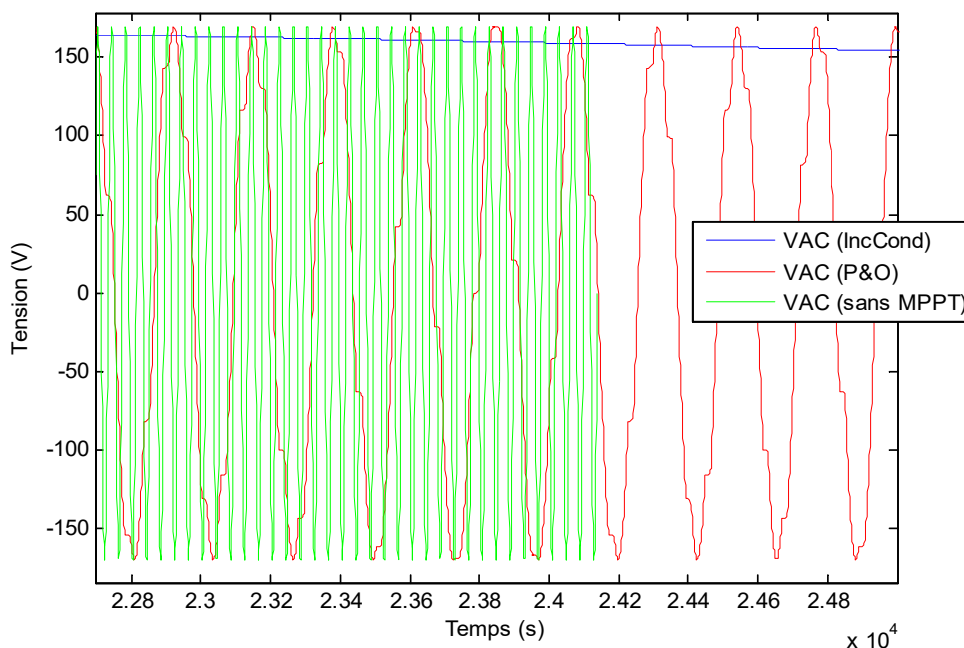


Figure III.18 : Caractéristique de comparaison de AC tension entre différent MPPTs techniques (Sans MPPT-P&O-IncCond).

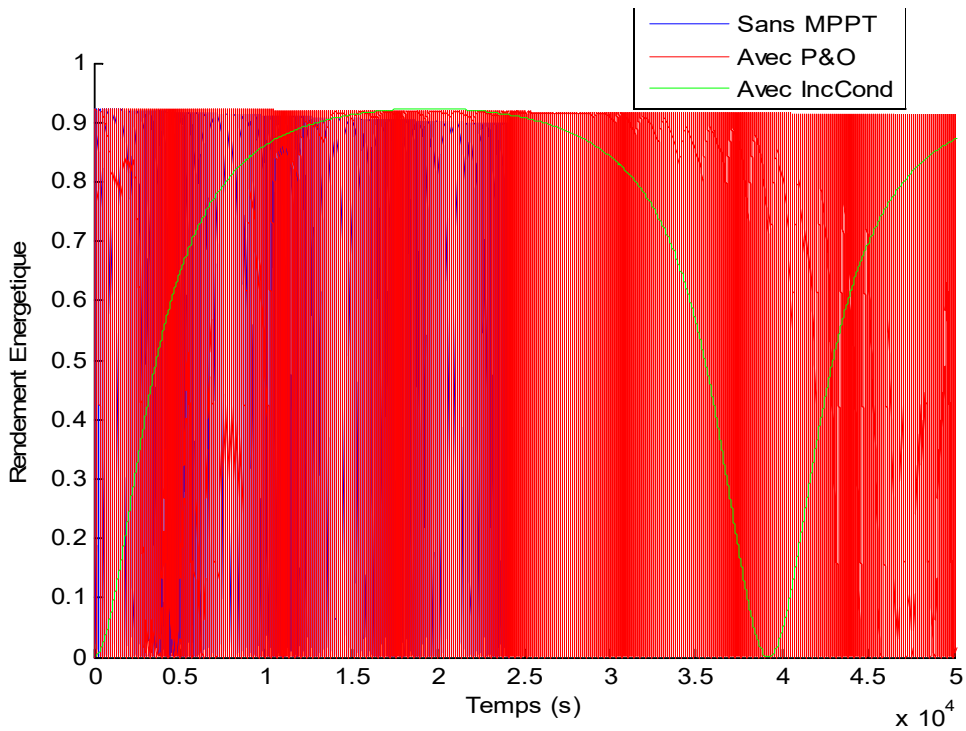


Figure III.19 : Caractéristique de comparaison de rendement énergétique entre différents MPPTs techniques (Sans MPPT-P&O-IncCond).

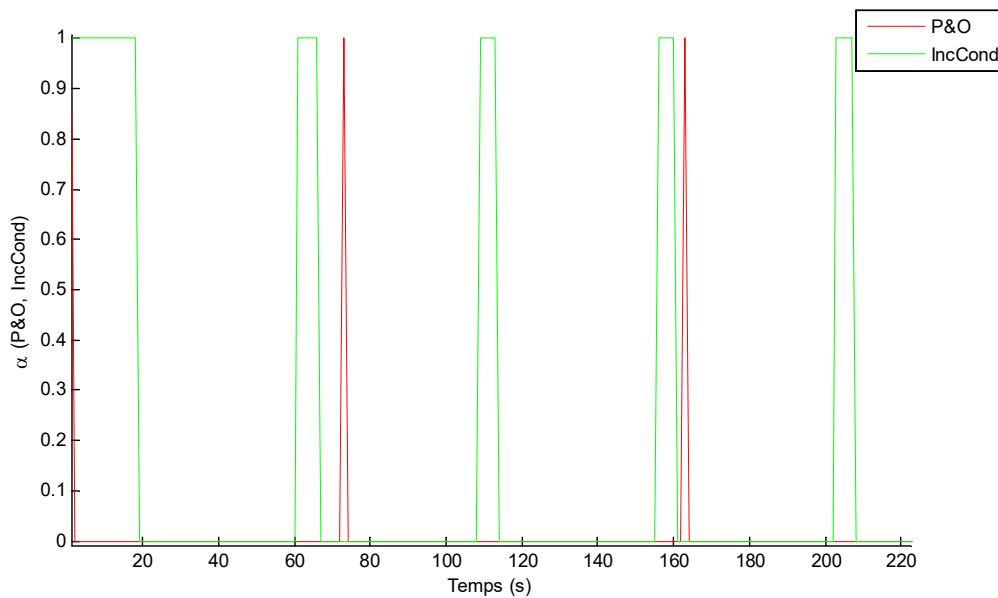


Figure III.20 : Caractéristique de comparaison de rapport cyclique entre P&O-IncCond MPPTs.

III.9. Conclusion

Le travail que nous avons présenté a pour objet de mettre au point un banc d'essai-test photovoltaïque. Le but est d'augmenter le rendement de la conversion. Pour effectuer ce travail, nous sommes passés par une étude théorique des composants de la chaîne photovoltaïque.

La seconde étape a pour objectif le test de performance des méthodes de la recherche de point de puissance maximale MPPT proposées. Pour cela, nous avons utilisé Simulink de Matlab®, qui nous a permis de simuler les méthodes 'P & O' et 'Inc-Cond'.

Conclusion

Générale

CONCLUSION GENERALE

Le générateur photovoltaïque est un convertisseur d'énergie caractérisé par un point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Ce point varie en fonction des conditions atmosphériques. Un mécanisme de poursuite s'avère alors indispensable pour que le générateur photovoltaïque puisse fonctionner avec une efficacité acceptable. Ce processus de poursuite est connu sous le nom de contrôleur MPPT. Une adaptation source/charge est réalisée à travers un algorithme, permettant un transfert maximal de puissance du panneau vers la charge

Dans un premier temps, nous avons donné un aperçu général sur les systèmes photovoltaïques et les notions sur les cellules et les modules photovoltaïque et l'influence de l'éclairement et la température sur le GPV.

Dans la deuxième partie, nous avons exposé quelques commandes MPPT les plus utilisées.

En dernier après avoir donné les différents étapes d'implantation de l'algorithme de la commande de la MPPT et introduit tous les circuits réalisés, nous avons présentés les différents résultats expérimentaux.

Références

- [1] BOUALEM, DENDIB, « Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïques : étude comparative », mémoire de magister, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2007.
- [2] S. NAOUAL, « Modélisation et extraction automatique des paramètres d'un générateur », mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [3] M. Dietschy, «Les cellules photovoltaïques», cours classes préparatoires CPE, Institution des Chartreux Année 2004-2005
- [4] <http://www.solarserver.de/?gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>.
- [5] Oghi Zoulikha, « Mesure automatisée du spectre d'absorption optique des cellules solaires », mémoire de master, Université Med khider Biskra ,2014
- [6] Nichiporuk Oleksiy « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [7] Dang Minh Trung « Elaboration de cellules solaires photovoltaïques a base de polymères conjugués, études des systèmes reticulables ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux1,2009.
- [8] R.Sridhar et al « Modeling of PV Array and Performance Enhancement by MPPT Algorithm ». International Journal of Computer Applications, Volume 7– No.5, 0975 –8887 September 2010.
- [9] Kendouli F « Etat de l'art et modélisation des microcentrales ». Mémoire de magister En Electrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [10] A. Ould mohamed yahia et al « étude et modalisation d'un générateur photovoltaïque » revue des Energie Renouvelables Vol.11 N° 3 2008 pp 473-483, 2008.
- [11] R. Khezzar et al. « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque ». Revue des Energie Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379-388, 2010.
- [12] T.U. Townsend « A Method for Estimating the Long Term Performance of Direct- Coupled Photovoltaic Systems ». MS Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [13] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed « Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models »7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, Août 2002.
- [14] G. Notton et al. « Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1, pp

49-62, 2010.

[15] J.A. Gow and C.D. Manning « Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies ». IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 146, N°2, pp. 193 - 200, 1999.

[16] M.S. Aït Cheikh et al « Mise au point d'une régulation floue pour serre agricole à énergie solaire » Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3, pp 421-443 ,2010.

[17] L.A. Hecktheuer, A. Krenzinger and C.W.M. Prieb « Methodology for Photovoltaic Modules Characterization and Shading Effects Analysis ». Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol. 24, N°1, pp. 26-32, 2002.

[18] Nikhil J.Anthony « Thermal analysis of a solar water distillation and electricity generation system ». A Thesis submitted to the Department of Mechanical Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science Degree Awarded: Fall Semester, 2008.

[19] B Abdellah « Développement de surface à base de dioxyde de titane par PVD pour une application aux cellules solaires ». Thèse de doctorat, Université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2008.

[20] R. Merahi, R. Chenni, M. Houbes « Modélisation et Simulation d'un Module PV par Matlab ». Journal of Scientific Research N° 0 vol 1, 2010.

[21] Adel et Shahat « PV cell module modeling and simulation for smart grid applications » Journal of Theoretical and Applied Information Technology, JATIT All rights reserved, pp 9-20, 2010.

[22] Akihiro Oi « Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System». PhD Thesis Presented to the Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2005.

[23] Salim ABOUDA « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : Application aux systèmes de pompage », Thèse de Doctorat d'état, L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax Tunisie le 14 avril 2015

[24] Mohamed Azab —A New Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems, International Journal of Electrical and Electronics Engineering 3:11 2009

[25] Hairul Nissah Zainudin, Saad Mekhilef, —Comparison Study of Maximum Power Point Tracker Techniques for PV Systems, MEPCON'10, Cairo University, Egypt, December 2010

[26] Liu Xuejun —An improved perturbation and observation maximum power point tracking

algorithm for PV panels, thesis Presented for the Degree of Master of Applied Science at Concordia University Montreal, Quebec, Canada, June 2004

[27] A.Pradeep Kumar Yadav, S.Thirumaliah, G.Haritha “Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC Converters Based PV Systems”, IJAREEIE, Vol. 1, Issue 1, July 2012

[28] V. Boitier, P. Maussion “ Recherche du maximum de puissance sur les générateurs Photovoltaïques”, 1 LAAS-CNRS ; Université de Toulouse ; 7, avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse, France

[29] H. Knopf “analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle”, Theses master of science in electrical engineering, Portland state university 1999.

[30] M. S. Jamri and T. C. Wei Modeling and Control of a Photovoltaic Energy System Using the State-Space Averaging Technique”, American Journal of Applied Sciences 7 (5): 682-691, 2010.

[31] M. Frederick design and implementation of a digitally controlled stand-alone photovoltaic power supply”, Department of electrical. Power engineering, Norwegian university of science and technology o.s bragstads plass 2e, 7491 Trondheim, Norway

[32] 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

[33] A. Cid-Pastor, “Conception et réalisation de modules photovoltaïque électronique”, Thèse Université Paul Sabatier, Toulouse 2006

[34] W. Xiao, W. G. Dunford, “A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems”, IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC’04, Vol. 3, pp. 1957-1963, Jun. 2004

[35] CABAL Cédric « Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié à la Conversion photovoltaïque » Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2008

