

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electronique des Systèmes Embarqués Spécialité : Electronique

Par

- **NAILI Walid**
- **ZIDI Mohamed El Mabrouk**

THEME

*Etude d'une nouvelle méthode MPPT dédiée aux systèmes
photovoltaïques : Conductance Incrémentale à pas variable.*

Soutenu le : 25/06/2024

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Benradouane Abdallah</i>	<i>MAB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. DAACHI Mohamed El Hossine</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Sarra Mostafa</i>	<i>Professeur</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2023/2024

REMERCIEMENTS

Le plus grand merci s'adresse à ALLAH, le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur Dr. DAACHI MOHAMEDEL HOSSINE d'abord pour avoir proposé ce thème, ensuite pour avoir assumé la responsabilité de notre encadrement, enfin pour nous avoir orienté et nous avoir conseillé tout au long de la réalisation de ce travail ainsi que pour la confiance qu'il nous a accordé.

Nous remercions les membres du jury M. Benradouane Abdallah et

M. Sarra Mustapha qui ont bien voulu accepter d'examiner ce mémoire et à cet égard nous leurs présentons nos profonds respects, et notre grande gratitude.

Et enfin, notre profonde gratitude s'adresse aussi à l'ensemble des Enseignants qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

Nous remercions également toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'aident à l'élaboration de ce mémoire.

Merci à tous les amies et les membres de la famille pour leurs aides leur soutien et leurs encouragements dans les moments difficile.

DEDICACE

C'est avec une grande fierté que nous dédions cet humble travail à

chers Parents, Aucune dédicace ne peut exprimer nos respects, nos amours éternels et non considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour notre éducation et notre bien-être, pour tout le soutien et l'amour que vous nous apportez, merci, merci et merci. Avec toute notre tendresse.

À ceux qui nous ont vraiment aidés par leurs encouragements et leur soutien pour accomplir ce travail.

À tous nos amis et collègues et les membres de nos familles.

Résumé :

Les commandes MPPT issues de la littérature les plus connues sont la commande Perturb and observe (P&O) et la conductance Incrémentale (IC). Dans les premières années qui suivent leur proposition, la mise à jour du rapport cyclique se fait par un pas fixe. Aussitôt, les chercheurs se sont rendu compte que lorsque le point de fonctionnement est loin du point optimal, le temps mis pour atteindre le point optimal serait important, alors qu'un grand pas engendre des oscillations en régime permanent, d'où vient l'idée que le pas ne devrait pas être constant mais plus tôt variable ou adaptatif. Le travail réalisé dans ce mémoire est d'étudier une nouvelle variante de commande MPPT relevant de la Conductance Incrémentale à pas variable tout en s'inspirant des travaux de recherche récents. Pour la première approche, le pas d'adaptation du rapport cyclique est exprimé comme étant le rapport entre la variation de la puissance et la variation du courant. S'agissant de la deuxième approche, le pas d'adaptation est exprimé par le rapport entre la variation de la puissance et la variation de la tension. En raison d'approfondir notre étude en ce qui concerne ce type de commande MMPT, nous allons tout d'abord introduire de légères modifications qui consiste en la multiplication par des constantes, de valeurs choisies d'une façon heuristique, pour satisfaire aux conditions de l'homogénéité de l'expression mathématique (respect des équations aux dimensions). Quant à la troisième approche dont nous désirons tester et que nous avons proposée nous-même, il s'agit de la combinaison des deux approches modifiées.

Abstract :

The best known MPPT commands from the literature are the Perturb and observe (P&O) command and the Incremental conductance (IC). In the first years following their proposal, the updating of the cyclical ratio is done at a fixed rate. Immediately, the researchers realized that when the operating point is far from the optimal point, the time taken to reach the optimal point would be significant, whereas a large step generates oscillations in steady state, which is where the idea that the step should not be constant but rather variable or adaptive. The work carried out in this dissertation is to study a new variant of MPPT control relating to Incremental Conductance with variable rate while drawing inspiration from recent research work. For the first approach, the adaptation step of the duty cycle is expressed as the ratio between the variation of the power and the variation of the current. Regarding the second approach, the adaptation step is expressed by the ratio between the variation in power and the variation in voltage. Due to deepening our study regarding this type of MMPT command, we will first introduce slight modifications which consist of the multiplication by constants, of values chosen in a heuristical way, to satisfy the conditions of the homogeneity of the mathematical expression (respect of the equations with dimensions). As for the third approach which we wish to test and which we have proposed ourselves, it is the combination of the two modified approaches.

المخلص:

أشهر أوامر MPPT من الأدبيات هي أمر الاضطراب والمراقبة (P&O) والتوصيل التزايدى (IC). وفي السنوات الأولى بعد اقتراحهم، يتم تحديث النسبة الدورية بمعدل ثابت. وعلى الفور، أدرك الباحثون أنه عندما تكون نقطة التشغيل بعيدة عن النقطة المثالية، فإن الوقت المستغرق للوصول إلى النقطة المثالية سيكون كبيراً، في حين أن الخطوة الكبيرة تولد تذبذبات في حالة مستقرة، وهنا ظهرت فكرة أن الخطوة لا ينبغي أن تكون ثابتة ولكنها متغيرة أو متكيفة. العمل المنجز في هذه الأطروحة هو دراسة متغير جديد للتحكم MPPT المتعلق بالتوصيل التزايدى مع درجة متغيرة مع استخلاص الإلهام من الأعمال البحثية الأخيرة. بالنسبة للنهج الأول، يتم التعبير عن خطوة التكيف لدورة العمل كنسبة بين تغير القدرة والتغير الحالي. وفيما يتعلق بالنهج الثاني، يتم التعبير عن خطوة التكيف من خلال النسبة بين التغير في القدرة والتغير في الجهد. ونظراً لتعميق دراستنا لهذا النوع من أوامر MMPT، سندخل أولاً تعديلات طفيفة تتمثل في الضرب بالتوابت، للقيم المختارة بطريقة إرشادية، لتلبية شروط تجانس التعبير الرياضي (فيما يتعلق المعادلات ذات الأبعاد). أما النهج الثالث الذي نريد اختباره والذي اقترحناه بأنفسنا فهو الجمع بين النهجين المعدلين.

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des Abréviations	

Introduction générale

Introduction générale	2
-----------------------------	---

Chapitre 1 : Sur les générateurs photovoltaïques

I.1.Introduction	5
I.2.Les sources d'énergie photovoltaïque	5
I.3.L'effet photovoltaïque.....	6
I.4.Les cellules photovoltaïques.....	7
I.4.1.Les différents types de cellules photovoltaïques	7
I.5.Les modules Photovoltaïques	9
I.5.1.Modélisation du module photovoltaïque	9
I.6.Caractéristiques électriques d'une cellule solaire	11
I.7.Couplage d'une photo génératrice avec un récepteur et Nécessité d'adaptation d'impédance	13
I.8.Association de cellules photovoltaïques en série	15
I.9.Association de cellules photovoltaïques en parallèle	16
I.10.Protections d'un générateur	17
I.10.1. Les deux types de protections classiques.....	18
I.11.Influence (effet) des différents paramètres sur la caractéristiques d'un panneau PV.....	18
I.11.1.Influence de l'ensoleillement	18
I.11.2.Influence de la température.....	20
I.11.3.Influence de la résistance série.....	21
I.11.4.Influence de la résistance shunt.....	21
I.12.Conclusion.....	22

Chapitre 2 : CONVERTISSEUR DC-DC ET COMMANDE MPPT

II.1.Introduction	24
II.2.Convertisseurs statiques DC-DC	24
II.2.1.Définition.....	24
II.2.2.Principes de Fonctionnement	25
II.2.3.Utilisation des Convertisseurs DC-DC.....	25
II.2.4.Les différents types de Convertisseurs DC-DC	25
II.3.La commande (MPPT).....	33
II.3.1.Principe de la commande MPPT	33
II.3.2.Les différents algorithmes de la commande MPPT	34
II.4.Conclusion :	40

Chapitre3 : Conductance Incrémentale à pas variable et résultats de simulation

III.1.Introduction :	43
III.2.Approches à tester par simulation :	43
III.3.Résultats de simulation :	45
III.3.1.Résultats de simulation issus de l'emploi de la première approche :	47
III.3.2.Résultats de simulation relatifs à la deuxième approche :	49
III.3.3.Résultats de simulation issus de l'emploi de la troisième approche :	51
III.4. Conclusion :	53

Conclusion générale

Conclusion générale.....	55
--------------------------	----

Liste des figures

Figures du chapitre I

Figure 1.1 Fonctionnement d'une cellule solaire PV.....	6
Figure 1.2 Un échantillon schématique d'une configuration de la cellule PV	7
Figure 1.3 Cellule au Silicium Monocristallin	8
Figure 1.4 Cellule au poly cristallines.....	8
Figure 1.5 Cellule au Silicium amorphe.....	9
Figure 1.6 Module photovoltaïque.....	9
Figure 1.7 Circuit électrique idéal du module PV	10
Figure 1.8 Circuit électrique réel du module PV	11
Figure 1.9 Courbe I - V de la cellule SPV.....	12
Figure 1.10 Courbe P-V de la cellule SPV	13
Figure 1.11 Optimisation du couplage photo-générateur – ventilateur.....	14
Figure 1.12 Couplage d'un photo-générateur et d'une batterie.	15
Figure 1.13 Caractéristique I-V de deux cellules photovoltaïques raccordées en série	16
Figure 1.14 Caractéristique I-V de deux cellules photovoltaïques raccordées en parallèle.	17
Figure 1.15 Schéma d'un GPV élémentaire avec diodes bypass et diode antiretour	18
Figure 16 Caractéristique P/V d'un panneau PV pour un rayonnement G variable.	19
Figure 1.17 Caractéristique I/V d'un panneau PV pour un rayonnement G variable	19
Figure 1.18 : Caractéristique P/V d'un panneau PV pour et une température variable	20
Figure 1.19 Caractéristique I/V d'un panneau PV pour une température variable.....	20
Figure 1.20 Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs de R_s	21
Figure 1.21 Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs de R_{sh}	21

Figures du chapitre II

Figure 2.1 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur	
Buck.....	26
Figure 2.2 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost.....	28
Figure 2.3 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost.....	29
Figure 2.4 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Cuk	31
Figure 2.5 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Sepic	32
Figure 2.6 Principe de la méthode Conductance incrémentale	35
Figure 2.7 Organigramme de l'algorithme de conductance incrémental.	37
Figure 2.8 Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.....	38

Figure 2.9 : L'organigramme de l'algorithme classique associé à une commande MPPT du type P&O	39
---	----

Figures du chapitre III

Figure 3.1: Schéma synoptique utilisé pour la simulation.....	46
Figure 3.2 Courbes de puissance issues de la conductance incrémentale à pas variable et à pas fixe.....	47
Figure 3.3 Courbes de puissance correspondant à l'application de la conductance incrémentale à pas variable modifiée et à pas fixe.....	48
Figure 3.4 Courbe de puissance obtenue via l'application de la Conductance Incrémentale modifiée vs la courbe de puissance issue de la conductance incrémentale à pas variable sans modification	49
Figure 3.5 Courbe de puissance obtenue via l'application de la deuxième approche vs la courbe de puissance issue de la conductance incrémentale à pas fixe	49
Figure 3.6 Courbe de puissance obtenue via l'application de la deuxième approche après modification vs la courbe de puissance issue de la conductance incrémentale classique.	50
Figure 3.7 Courbe de puissance obtenue via l'application de la deuxième approche après modification vs la courbe de puissance issue de la conductance incrémentale classique	51
Figure 3.8 Courbe de puissance issue de l'approche 3 vs celle issue de l'approche classique....	52
Figure 3.9 Courbe de puissance issues de l'approche 3 vs celle issue de l'approche 1 modifiée.....	52

List des tableaux

Tableau (1.1) : Caractéristiques du module KC200GT

Tableau (3.1): Paramètres de module solaire (Sun Power SPR-305-WHT)

Liste des Abréviations

MPPT : Poursuite du Point de Puissance Maximale, «Maximum Power Point TracKing»

DC/DC : Hacheur (convertisseur statique)

PV : Photovoltaïque.

IGBT : Transistors bipolaires à grille isolée.

CCM : Customer communications management.

DCM : Dilated cardiomyopathie.

SEPIC : Single Ended Primary Inductor Converter.

IC : Incremental Conductance (Incrémental Conductance).

P&O : Perturb and Observe (Perturbation et Observation)

PPM : Point de puissance maximale.

GPV : Cellule Photovoltaïque.

Voc : Tension en circuit ouvert d'un module solaire [V].

Vopt : Tension PV correspondant au PPM.

Isc : Courant de court-circuit.

Iopt : Courant de référence.

Introduction générale

Introduction générale

Le développement technologique a suggéré, entre autres, un besoin accru à l'énergie qui ne cesse d'augmenter jour après jour. En effet, les énergies fossiles, telles que le pétrole, le charbon et le gaz naturel, sont issues de sources non renouvelables et génèrent des émissions de gaz à effet de serre responsables du changement climatique. L'exploitation massive de l'énergie fossile conduit de facto à l'épuisement du stock naturel et augmente davantage les problèmes de la pollution. Par conséquent, le recours aux énergies renouvelables, tels que le solaire, l'éolien, l'hydroélectricité et la biomasse issus de ressources naturelles inépuisables et produisent peu ou pas d'émissions de gaz à effet de serre est devenu une nécessité absolue.

L'énergie photovoltaïque issue de l'énergie solaire est souvent considérée comme l'une des formes d'énergie renouvelable les plus prometteuses et les plus importantes pour l'avenir de notre approvisionnement énergétique en raison de l'abondance et de la disponibilité mondiale du soleil, sa propriété et respect de l'environnement.

Cependant, le point de fonctionnement d'un générateur PV est rarement où il coïncide avec le point de fonctionnement optimal fournissant alors un maximum de puissance, d'où la nécessité de l'introduction d'un étage adaptateur d'impédance entre le générateur PV et la charge en raison d'extraire toujours une énergie maximale quelque soient les conditions météorologiques. L'adaptation d'impédance consiste en l'introduction d'un convertisseur statique DC-DC commandé par un signal avec comme rapport cyclique calculé en permanence par une commande MPPT, acronyme de Maximum Power Point Tracking en Anglais. Les commandes MPPT relevant de la littérature les plus connues sont la commande Perturb and Observe (P&O) et la conductance Incrémentale (IC). Dans les premières années suivant leur proposition, la mise à jour du rapport cyclique se faisait par un pas fixe. Aussitôt, les chercheurs se sont rendu compte que lorsque le point de fonctionnement est loin du point optimal, le temps mis pour atteindre ce dernier serait important pour un petit pas, alors qu'un grand pas engendre des oscillations en régime permanent, d'où vient l'idée que le pas ne devrait pas être constant mais plus tôt variable ou adaptatif. Le travail à réaliser dans ce mémoire est d'étudier une nouvelle variante de commande MPPT relevant de la Conductance Incrémentale à pas variable tout en s'inspirant des travaux de recherche récents [1]. En premier temps, il s'agit de tester ces approches telles qu'elles sont proposées, puis avec introduction de modifications. Le point important serait la combinaison des deux approches.

Par ailleurs, outre cette introduction générale, notre manuscrit est organisé en trois chapitres suivis d'une conclusion générale. Dans le premier chapitre, nous allons parler du générateur PV commençant par la cellule PV en évoquant le principe de la conversion rayons solaires / électricité, modélisation et caractérisation électrique. Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter les différents convertisseurs statique DC-DC tout en évoquant le principe d'adaptation d'impédance dédié aux systèmes PV, en raison de faire fonctionner le générateur PV en un point de puissance maximale quelques soient les conditions environnementales. Nous présenterons également quelques commandes MPPT issues de la littérature avec la mise en relief de la méthode de la conductance Incrémentale. Le troisième chapitre quant à lui est réservé à la présentation de quelques variantes de la conductance incrémentale qui s'inspirent de ce qui est déjà proposé dans la littérature [1] [2]. Nous terminerons notre manuscrit par une conclusion générale et quelques perspectives.

*Chapitre 1 : Sur les
générateurs
photovoltaïques*

I.1.Introduction

Les générateurs photovoltaïques, aussi appelés systèmes solaires photovoltaïques (PV), sont des dispositifs qui convertissent la lumière du soleil en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Cette technologie repose sur l'utilisation de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, pour produire de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Dans ce chapitre, nous présenter tout d'abord des généralités le photovoltaïque, puis nous allons aborder le générateur photovoltaïque allant de la cellule PV. Aussi, nous allons mettre l'accent sur la modélisation et la caractérisation électrique.

I.2.Les sources d'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque tire son origine de diverses sources, principalement du rayonnement solaire. Voici quelques-unes de ces sources :

- 1. Rayonnement solaire direct :** Il s'agit de la principale source d'énergie pour les systèmes photovoltaïques. Les cellules photovoltaïques captent directement la lumière du soleil et la convertissent en électricité.
- 2. Rayonnement solaire diffus :** En plus du rayonnement solaire direct, les cellules photovoltaïques peuvent également convertir le rayonnement solaire diffus, qui est la lumière solaire dispersée dans l'atmosphère, en électricité.
- 3. Réflexion solaire :** Certaines surfaces réfléchissantes, comme les surfaces blanches ou métalliques, peuvent réfléchir une partie du rayonnement solaire vers les cellules photovoltaïques, augmentant ainsi leur rendement.
- 4. Diffusion de la lumière :** Même par temps nuageux, une certaine quantité de lumière solaire parvient à traverser les nuages et à atteindre les cellules photovoltaïques, ce qui permet toujours de produire de l'électricité.
- 5. Lumière ambiante :** Même en l'absence de lumière solaire directe, les cellules photovoltaïques peuvent encore capter et convertir la lumière ambiante, telle que la lumière artificielle ou la lumière réfléchie, en électricité, bien que dans des proportions moindres que sous une lumière solaire directe.

Ces sources combinées permettent aux systèmes photovoltaïques de fonctionner dans une variété de conditions d'éclairage, ce qui en fait une source d'énergie renouvelable polyvalente.

I.3.L'effet photovoltaïque

La conversion d'énergie solaire en électricité par photovoltaïque repose sur l'effet photovoltaïque, un processus physique où la lumière est directement transformée en électricité lorsqu'elle frappe une cellule généralement fabriquée en silicium. Cette cellule, un composant semi-conducteur électronique, absorbe les photons, les particules élémentaires de la lumière, ce qui libère des électrons chargés négativement et des "trous" chargés positivement. Ces charges sont ensuite séparées grâce à un champ électrique interne et collectées par une grille à l'avant et un contact à l'arrière de la cellule. Ainsi, la cellule photovoltaïque agit comme un générateur électrique élémentaire. L'effet photovoltaïque, un phénomène optoélectronique, a été découvert en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel. Cependant, ce n'est qu'en 1954 que trois chercheurs américains des laboratoires Bell, Chaplin, Pearson et Prince, ont développé la première cellule photovoltaïque, alors que l'industrie spatiale émergente cherchait de nouvelles solutions pour alimenter ses satellites. À l'époque, le rendement énergétique de ces cellules ne dépassait pas 4,5%. [3]

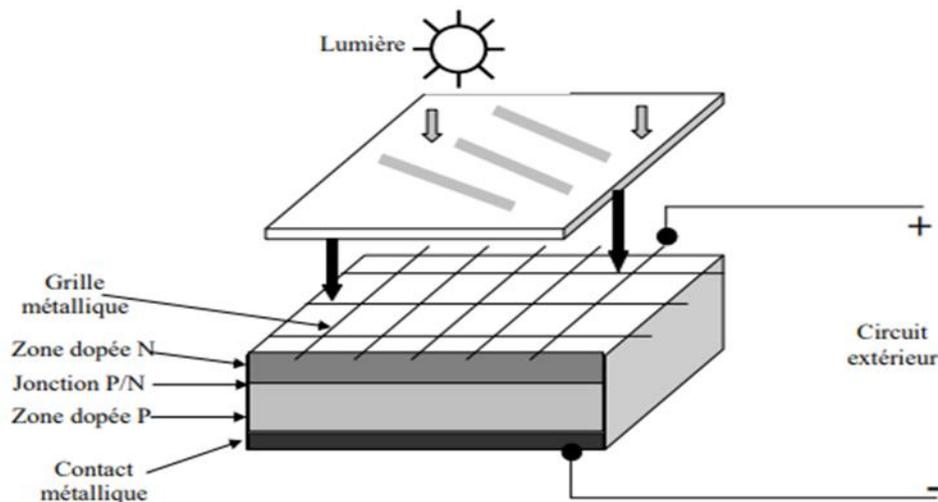


Figure 1.1 Fonctionnement d'une cellule solaire PV

I.4. Les cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque, un élément optoélectronique découvert par E. Becquerel en 1839, a la capacité de convertir directement la lumière solaire en électricité. Elle est composée d'un matériau semi-conducteur de type P-N. Les dimensions de chaque cellule varient de quelques centimètres carrés à plus de 100, avec des formes pouvant être circulaires, carrées ou des dérivées de ces deux géométries. [4]

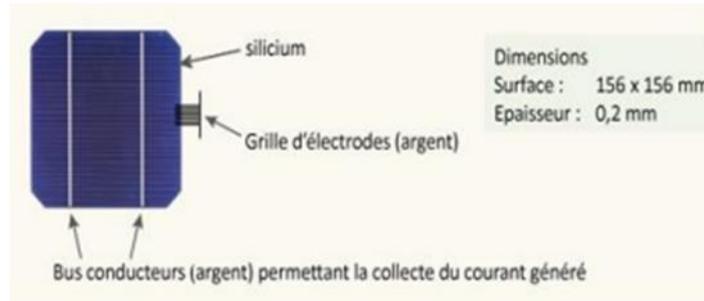


Figure 1.2 Représente un échantillon schématique d'une configuration de la cellule PV

I.4.1. Les différents types de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules. [5]

I.4.1.1. Les cellules monocristallines :

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. [5]



Figure 1.3 Cellule au Silicium Monocristallin

I.4.1.2. Les cellules poly cristallines :

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux. [5]

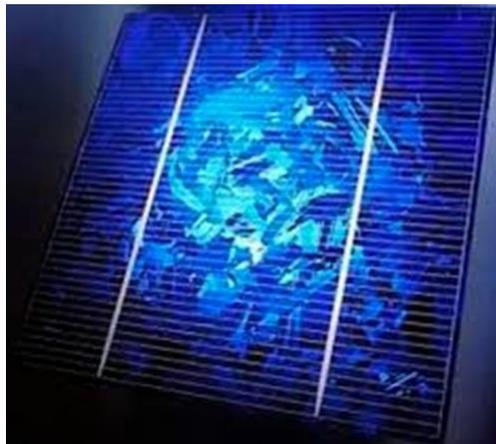


Figure 1.4 Cellule au poly cristallines

I.4.1.3. Les cellules amorphes :

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires". [5]



Figure 1.5 Cellule au Silicium amorphe

I.5. Les modules Photovoltaïques

L'élément essentiel de toute installation photovoltaïque est le module photovoltaïque, composé de cellules solaires interconnectées. Ces modules sont assemblés en champs afin de répondre à divers besoins en énergie. La figure (1.6) illustre un module photovoltaïque. Des modules de plus en plus puissants sont disponibles sur le marché, notamment pour les connexions au réseau, bien qu'il existe toujours une limite en termes de poids et de manipulation.



Figure 1.6 Module photovoltaïque

I.5.1. Modélisation du module photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques de modules photovoltaïques, ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique Courant-Tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. [6]

I.5.1.1. Modèle électrique idéal

Le module photovoltaïque peut être représenté par le circuit électrique équivalent donné par la figure (1.7) composé d'un générateur de courant qui produit un courant proportionnel à la puissance lumineuse incidente, et d'une diode parallèle qui correspond à l'aire de transition P-N du module PV. Le courant généré par le module s'écrit : [6]

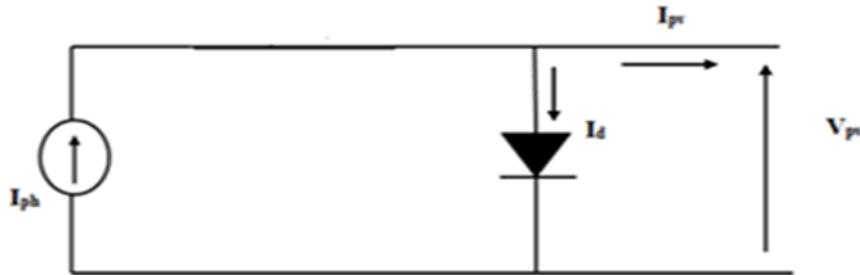


Figure 1.7 Circuit électrique idéal du module PV

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (1.1)$$

Où I_{pv} est le courant délivré par le module PV, I_{ph} est le photo-courant et I_d est le courant de la diode. La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique Courant-Tension est donnée par la relation.

$$I_d = I_0 \left(e^{\alpha \frac{V_{pv}}{v_t}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

Où I_0 est le courant de saturation de diode, V_{pv} est la tension délivrée par le module PV, $v_t = \frac{kT}{q}$ est la tension thermique, T est la température absolue en K et I_{ph} est le photo-courant. Donc, la relation (1.1) sera :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\alpha \frac{V_{pv}}{v_t}} - 1 \right) \quad (1.3)$$

I.5.1.2. Modèle électrique réel

Dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite, alors le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. On modélise donc

cette perte de tension par une résistance en série et les courants de fuite par une résistance en parallèle. [6]

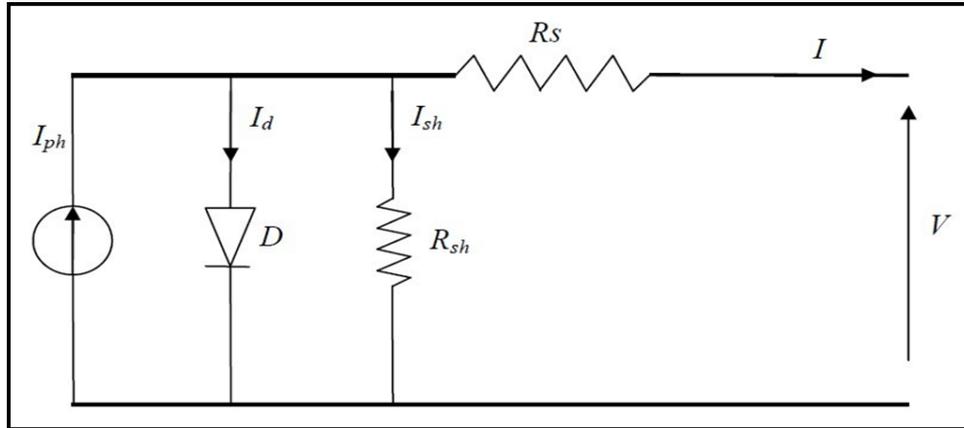


Figure 1.8 Circuit électrique réel du module PV

Le courant généré par le module PV est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh}$$

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (1.4)$$

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{(v+IR_s)}{\alpha V_t}} - 1 \right) \quad (1.5)$$

$$I_{sh} = \left(\frac{V+IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (1.6)$$

$$I = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{(v+IR_s)}{\alpha V_t}} - 1 \right) - \left(\frac{V+IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (1.7)$$

I.6. Caractéristiques électriques d'une cellule solaire

Pour la représentation des caractéristiques électriques d'une cellule solaire, nous sommes inspirés de la référence [1]. Pour cela, il a été considéré le module KC200GT possédant les caractéristiques suivantes à 1000 (w /m²) et 5, 15, 25, 35, et 45°C. [1]

Tableau (1.1) : Caractéristiques du module KC200GT

Paramètre de PV cell	Spécification
Puissance de sortie maximale (P_{mpp})	200 w (+10 % / -5 %)
Tension en condition de circuit ouvert (V_{co})	32.9 V
Courant en condition de court-circuit (I_{sh})	8.21 A
Courant à puissance maximale (I_{mpp})	7.61 A
Tension à puissance maximale (V_{mpp})	26.3 V
Coefficient de température à I_{sc}	$3.18 * 10^{-3}$ A/C
Coefficient de température à V_{oc}	$-1.23 * 10^{-1}$ V/C

Les figures suivantes représentent les caractéristiques d'une cellule PV pour un rayonnement constant de 1000W /m2 et plusieurs températures 5, 15, 25, 35, et 45°C.

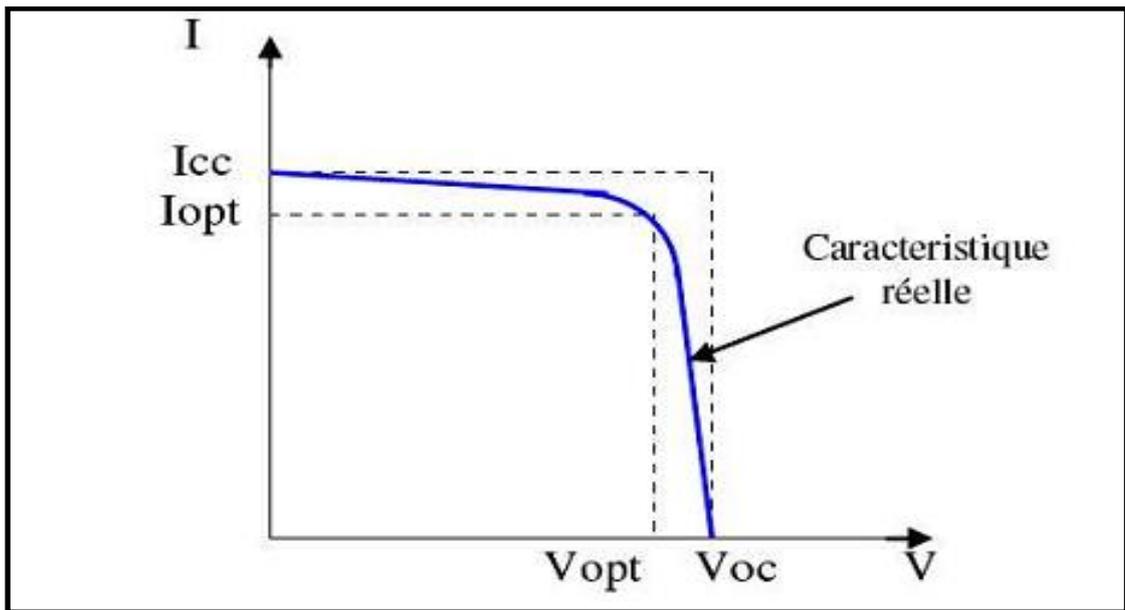


Figure 1.9 Courbe I - V de la cellule SPV

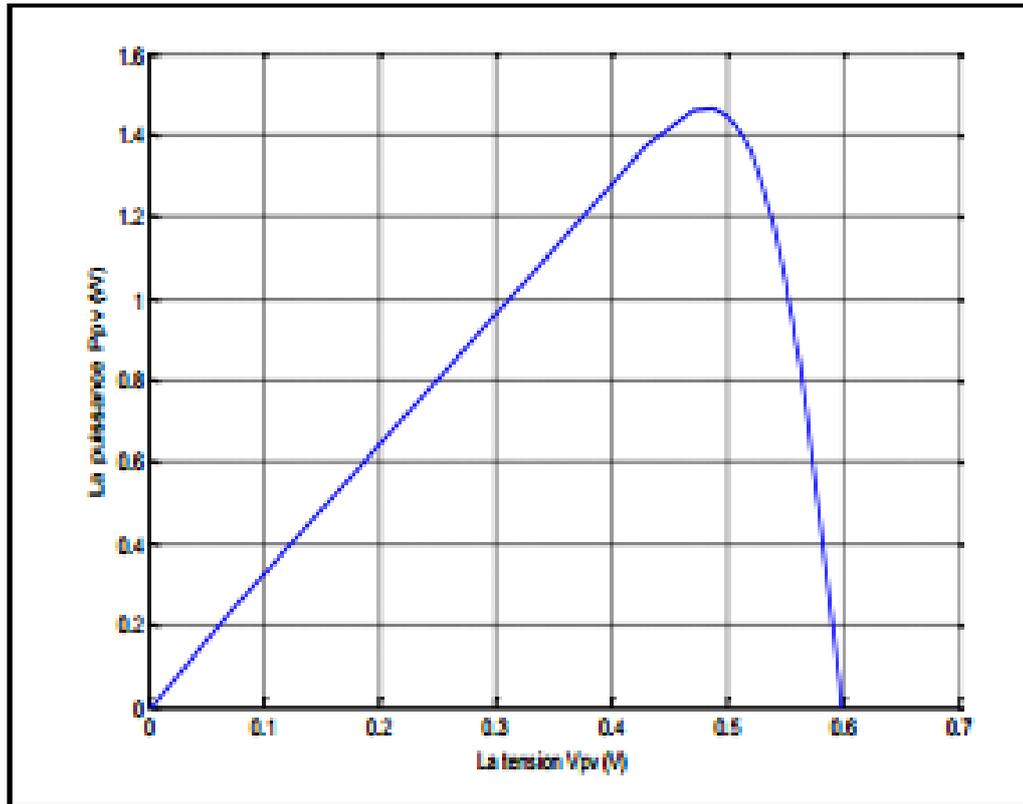


Figure 1.10 Courbe P-V de la cellule SPV [5]

I.7. Couplage d'une photo génératrice avec un récepteur et Nécessité d'adaptation d'impédance

Sur quel point de sa caractéristique le photo-générateur se placerait-il ? Cela dépend du circuit extérieur. Nous allons voir deux exemples types : le couplage avec un récepteur assimilable à résistor, et le couplage avec une batterie. [7]

- **Exemple 1 : le ventilateur**

Prenons un photo-générateur de $U_{co} = 17 \text{ V}$, $I_{cc} = 0,7 \text{ A} = 700 \text{ mA}$. Couplons-le directement aux bornes d'un ventilateur, assimilable à un résistor de 28Ω . La courbe caractéristique de ce dernier, $U = rI$, est une droite représentée en trait plein sur la figure (1.11). [7]

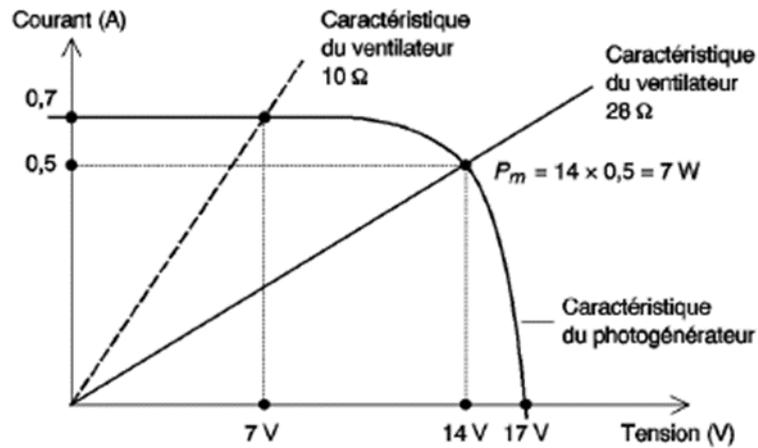


Figure 1.11 Optimisation du couplage photo-générateur – ventilateur

Ce couplage est idéal : les deux caractéristiques du générateur et du récepteur se croisent au point de puissance maximale du photo-générateur. Le ventilateur recevra dans ces conditions une puissance qui le fera fonctionner de :

$$14 \text{ V} * 0,5 \text{ A} = 7 \text{ W}$$

Si l'on avait mis un ventilateur de 10Ω (droite en pointillés sur la figure (1.11), il n'aurait reçu que :

$$7 \text{ V} * 0,7 \text{ A} = 4,9 \text{ W}$$

Le photo-générateur aurait alors été sous-utilisé, car inadapté en tension.

- **Exemple 2 : charge d'une batterie**

Si l'on charge une batterie au lieu d'alimenter directement un récepteur (figure 1.12), c'est la tension batterie qui impose le point de fonctionnement. [7]

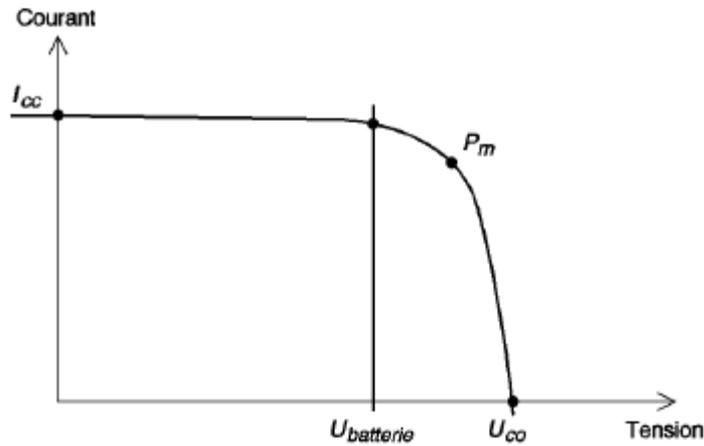


Figure 1.12 Couplage d'un photo-générateur et d'une batterie.

D'après les deux exemples cités dans ce point, il est clair qu'un générateur PV connecté directement à la charge est rarement où il coïncide avec le point de fonctionnement optimal. Donc c'est la raison pour laquelle un étage d'adaptation d'impédance est toujours associé de sorte à faire fonctionner le générateur PV à un point de fonctionnement optimal, c'est-à-dire que le générateur PV délivre en permanence une puissance maximale. Cet étage adaptateur d'impédance consiste en un convertisseur DC-DC dont le rapport cyclique est calculé moyennant un algorithme dit MPPT, acronyme anglais de **Maximum Power Point Tracking**.

I.8. Association de cellules photovoltaïques en série

Lorsque des cellules sont regroupées en série, le courant traversant chaque cellule reste constant, et la caractéristique globale du groupe en série est obtenue en additionnant les tensions à un courant donné. La figure (1.13) illustre la caractéristique globale (ICS et VCS) obtenue en associant en série NS cellules identiques (IC et VC).

[8]

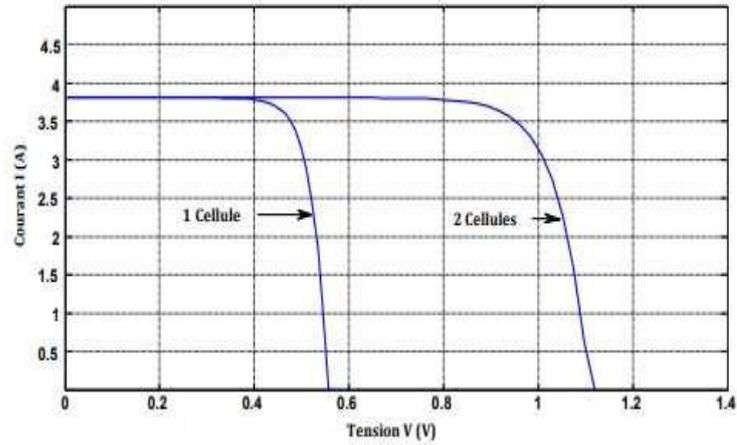


Figure 1.13 Caractéristique I-V de deux cellules photovoltaïques raccordées en série

$$I_{CS} = I_C \quad (I.8)$$

Et

$$V_{CS} = N_S * V_C \quad (I.9)$$

I.9. Association de cellules photovoltaïques en parallèle

Les caractéristiques du regroupement de cellules en parallèle sont inverses de celles du regroupement en série. Ainsi, lorsque des cellules sont connectées en parallèle, elles sont soumises à la même tension et la caractéristique globale du regroupement est obtenue en additionnant les courants à une tension donnée. La figure (1.14) illustre la caractéristique globale (I_{cp} et V_{cp}) obtenue en associant en parallèle NP cellules identiques (I_C et V_C). [8]

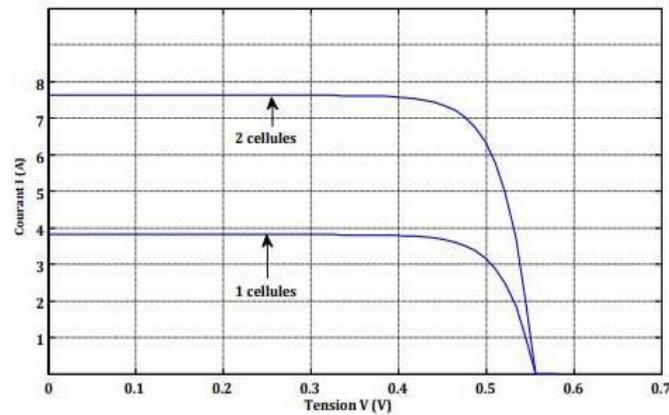


Figure 1.14 Caractéristique I-V de deux cellules photovoltaïques raccordées en parallèle.

$$I_{CP} = N_p * I_c \quad (I.10)$$

avec

$$V_{cp} = V_c \quad (I.11)$$

I.10. Protections d'un générateur

Lorsque des cellules photovoltaïques sont regroupées, un effet indésirable se produit lorsque le module est partiellement ombragé ou lorsque les cellules ne reçoivent pas un éclairage uniforme. Pour garantir une durabilité sur plusieurs années des installations photovoltaïques destinées à produire de l'électricité, des protections électriques doivent être intégrées aux modules afin d'éviter les pannes destructrices causées par l'association de cellules en série et de panneaux en parallèle. Ainsi, deux types de protections classiques sont couramment utilisés dans les installations actuelles. (La figure (1.15)). [7]

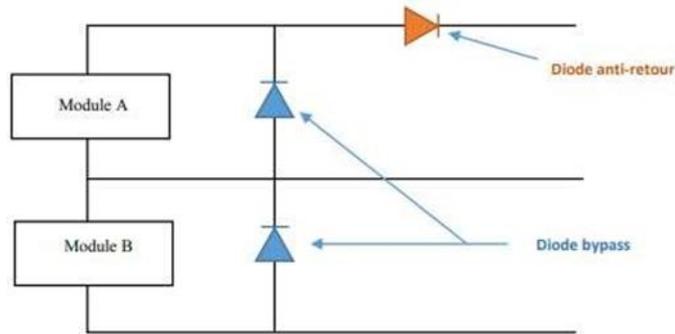


Figure 1.15 Schéma d'un GPV élémentaire avec diodes bypass et diode antiretour

I.10.1. Les deux types de protections classiques

a-Diode de bypass : la diode de bypass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules pour protéger les cellules les plus faibles contre la polarisation inverse. [7]

b- Diode anti-retour : La tension produite par chaque string peut être différente. Lors de la mise en parallèle de ces strings pour former un champ, le string avec la tension la plus faible peut absorber un courant inverse provenant des autres strings. Pour éviter ces courants inverses, une diode anti-retour est placée au bout de chaque string. L'utilisation de la diode anti-retour introduit pourtant une perte dans la production du fait de la chute de tension causée par cette diode pendant le fonctionnement normal du champ PV. Un fusible est parfois utilisé à la place de la diode anti-retour. Par contre, l'utilisation du fusible ne permet pas de protéger le string contre le courant inverse. [7]

I.11. Influence (effet) des différents paramètres sur la caractéristiques d'un panneau PV

I.11.1. Influence de l'ensoleillement

Une réduction de l'ensoleillement entraîne une diminution de la génération de paires électrons-trous, tandis que le courant en l'absence de lumière reste constant. Étant donné que le courant du panneau solaire est obtenu en soustrayant le courant de diode à l'obscurité du photo-courant, une diminution de l'irradiance solaire entraîne une baisse proportionnelle du courant solaire ICCM. Cela s'accompagne d'une légère diminution de la tension VCOM, déplaçant ainsi le point de puissance maximale (Pmax) du panneau solaire vers des valeurs de puissance plus faibles. [9]

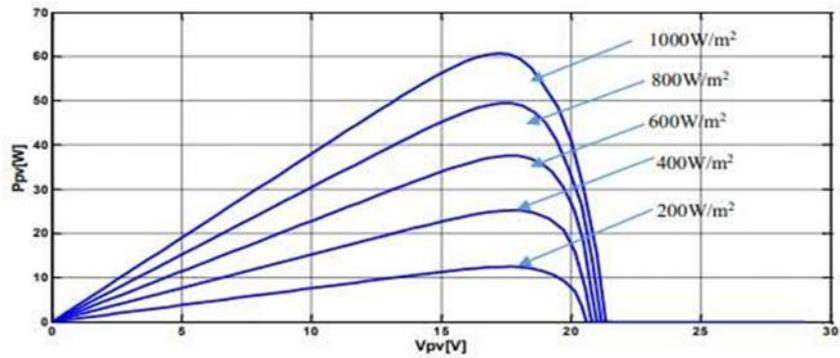


Figure 1.16 Caractéristique P/V d'un panneau PV pour un rayonnement G variable.

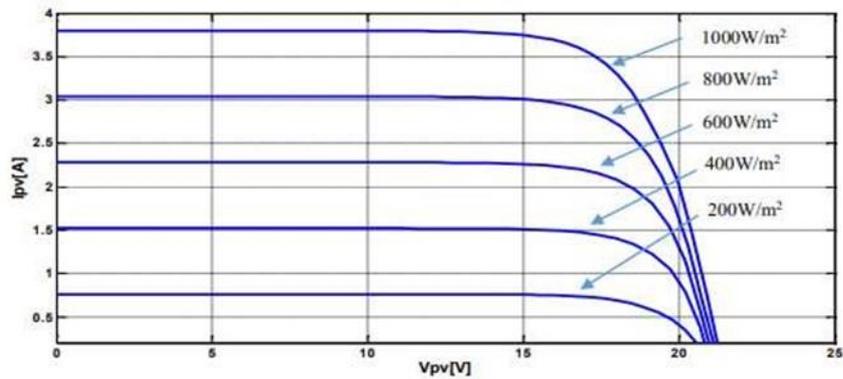


Figure 1.17 Caractéristique I/V d'un panneau PV pour un rayonnement G variable

Les figures précédentes illustrent l'impact de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension à une température constante. Il est évident que le courant de court-circuit augmente proportionnellement avec l'intensité du rayonnement solaire. En revanche, la tension en circuit ouvert ne change pas de manière significative et reste quasiment constante, même avec une faible luminosité. Cela signifie que la puissance optimale de la cellule (P_{max}) est quasiment proportionnelle à l'éclairement. Ainsi, les points de puissance maximale se trouvent à peu près à la même tension. [9]

I.11.2. Influence de la température

On observe que le courant fourni par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule photovoltaïque. Si l'on considère le réchauffement d'un module PV de 25°C à 50°C, et si l'on admet que la température de la face arrière de chaque cellule est proche de celle de la jonction PN, on peut alors examiner l'influence de la température. On constate que la tension en circuit ouvert diminue avec l'augmentation de la température, ce qui entraîne une réduction de la puissance disponible aux bornes du module PV. De plus, les figures suivantes montrent les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour un rayonnement constant et différentes températures. [9]

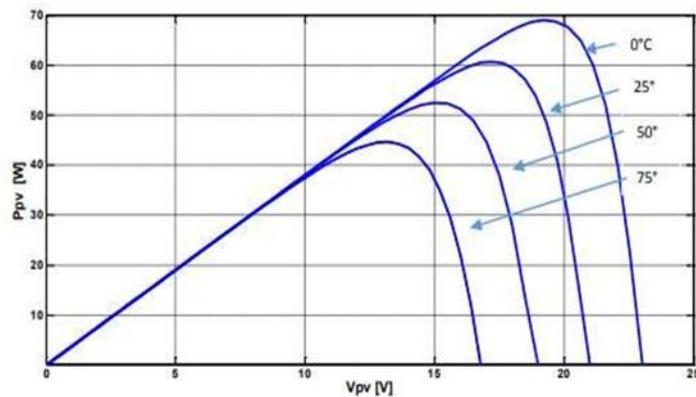


Figure 1.18 : Caractéristique P/V d'un panneau PV pour une température variable

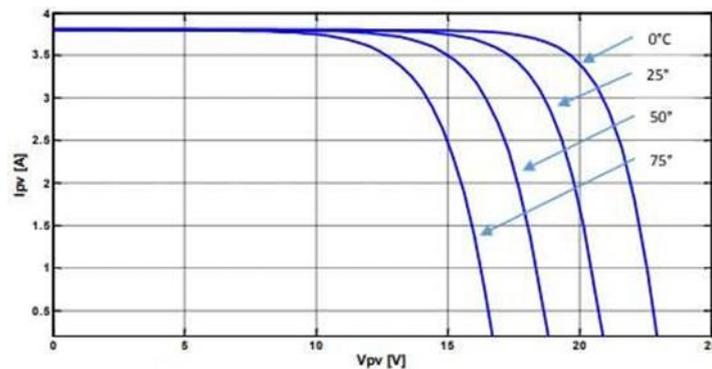


Figure 1.19 : Caractéristique I/V d'un panneau PV pour une température variable.

Nous constatons que la tension à vide d'un module photovoltaïque (ou d'une cellule solaire) diminue lorsque la température du module (ou de la cellule) augmente. En revanche, le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'élévation de la température du module PV (ou de la cellule solaire). De plus, il est également

observable que l'augmentation de la température entraîne une réduction de la puissance maximale disponible. [9]

I.11.3. Influence de la résistance série

La résistance série est généralement très faible, et dans certains cas, elle peut être considérée comme négligeable. Cependant, pour rendre le modèle approprié pour n'importe quel module photovoltaïque donné, il est possible de faire varier cette résistance et prédire l'influence de sa variation sur les sorties du module PV. Comme on le voit dans la figure (1.20), la variation de R_s affecte l'angle de la courbe I-V en résultant une déviation de la pente du point de puissance maximale. [10]

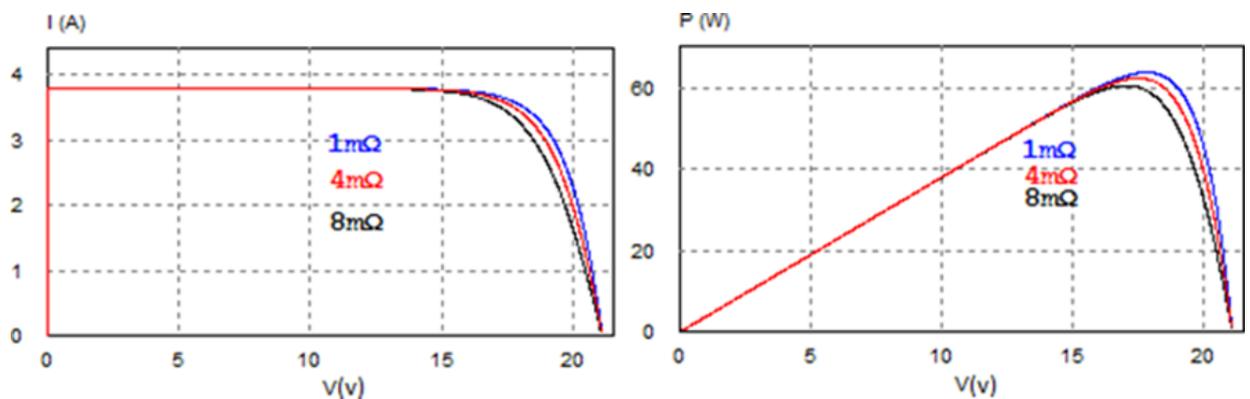


Figure 1.20 Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs de R_s

I.11.4. Influence de la résistance shunt

Pour obtenir une meilleure puissance de sortie et un bon facteur de remplissage, la résistance de shunt doit être suffisamment élevée. En effet, une faible résistance de shunt provoque une chute plus marquée du courant, ce qui entraîne des pertes de puissance importantes et un faible facteur de remplissage (comme illustré à la figure (1.21)). [10]

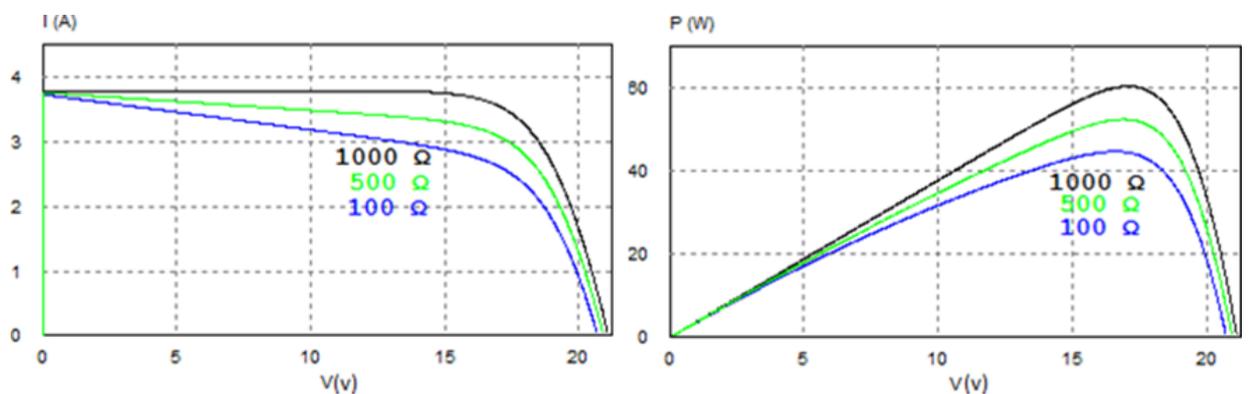


Figure 1.21 Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs de R_{sh}

I.12. Conclusion

Les générateurs photovoltaïques remplacent toute la technologie dans la transition vers des sources d'énergie renouvelables et durables. Il convertit également la lumière solaire en tension électrique en effet photovoltaïque, lui permettant de répondre à toutes les sources d'énergie et d'éliminer le dioxyde de carbone. Dans ce chapitre, on a vu l'importance du générateur PV dans la production de l'énergie, tout en commençant par introduire le principe de l'effet photovoltaïque et les différentes technologies de productions de la cellule PV. .Dans le chapitre prochain, nous présenterons une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

Chapitre 2 :
CONVERTISSEUR
DC-DC ET
COMMANDE
MPPT

II.1.Introduction

Les panneaux photovoltaïques, en tant que pierre angulaire de la capture de l'énergie solaire, sont essentiels pour convertir le rayonnement solaire en énergie électrique. Cependant, il est crucial de souligner que ces panneaux fonctionnent uniquement comme des convertisseurs d'énergie, dépourvus de mécanismes de stockage intrinsèques. La production maximale d'énergie d'un panneau photovoltaïque dépend d'une multitude de variables, notamment la température, la charge, l'ombrage et l'irradiance solaire incidente. De plus, les fluctuations météorologiques peuvent induire des perturbations dans la courbe courant-tension (I-V) du panneau, modifiant ainsi potentiellement la production maximale d'énergie.

Pour optimiser les performances des systèmes photovoltaïques, des techniques sophistiquées telles que le suivi du Point de Puissance Maximale (MPPT acronyme de Maximum Power Point Tracking) sont utilisées. Les techniques MPPT permettent le suivi du point de puissance maximale du panneau, garantissant une extraction optimale de l'énergie même en présence de conditions environnementales changeantes. Aussi, la littérature universitaire expose divers algorithmes MPPT, fournissant des définitions précises et des analyses comparatives pour élucider leur efficacité et leur applicabilité. En effet, les techniques MPPT consistent en le calcul d'un rapport cyclique nécessaire à la commande d'un convertisseur statique DC-DC (hacheur).

Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu les différents convertisseurs statiques DC-DC dédiés aux systèmes PV, puis nous donnons les différents algorithmes de la commande MPPT issus de la littérature.

II.2.Convertisseurs statiques DC-DC

II.2.1.Définition

Les convertisseurs DC-DC sont des composants clés dans l'architecture de l'électronique moderne. Ils transforment une tension continue d'un niveau à un autre, permettant ainsi d'alimenter divers circuits et composants qui requièrent des tensions spécifiques. [11]

II.2.2.Principes de Fonctionnement

Ces dispositifs fonctionnent en stockant temporairement l'énergie dans des éléments inductifs ou capacitifs et en la relâchant ensuite à une tension différente. Des commutateurs électroniques, comme les transistors, gérés par des circuits de commande, facilitent ce processus. [11]

II.2.3.Utilisation des Convertisseurs DC-DC

Ils trouvent leur application dans les systèmes embarqués, les alimentations stabilisées, et les réseaux de communication, assurant la stabilité et l'efficacité des systèmes électroniques en adaptant la tension pour chaque composant. [11]

II.2.4.Les différents types de Convertisseurs DC-DC [12]

- **Convertisseur Buck:** Diminue la tension d'entrée pour une sortie plus basse.
- **Convertisseur Boost:** Élève la tension d'entrée pour une sortie plus haute.
- **Convertisseur Buck-Boost:** Ajuste la tension de sortie pour être soit supérieure, soit inférieure à celle d'entrée.
- **Convertisseur Ćuk :** Il fonctionne sur le principe de transfert d'énergie par l'intermédiaire d'une capacité et se distingue par sa capacité à maintenir l'entrée et la sortie avec des courants continus, réduisant ainsi le bruit et les interférences.
- **Convertisseur SEPIC :** Offre une flexibilité similaire au Buck-Boost mais avec une topologie différente.

II.2.4.1.Le Convertisseur Buck

Un convertisseur Buck (figure 2.1), également connu sous le nom de hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus faible. Il est utilisé pour des applications permettant d'obtenir une tension réglable mais toujours inférieure à celle présente à l'entrée.

Le convertisseur Buck possède une seule cellule de commutation, composée d'un interrupteur commandable (généralement un MOSFET ou IGBT) et d'une diode qui fonctionnent alternativement dans des modes opposés¹. Plus la durée d'activation de l'interrupteur est prolongée, plus la tension de sortie augmentera par rapport à la tension d'entrée¹. Le réseau de sortie (inducteur L avec Cout) peut être considéré

comme un filtre passe-bas destiné à réduire les harmoniques de commutation tout en stockant l'énergie lorsque l'interrupteur est éteint. [13]

La figure (2.1) montre également les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur qui est caractérisé par la disposition en série de l'interrupteur avec la source.

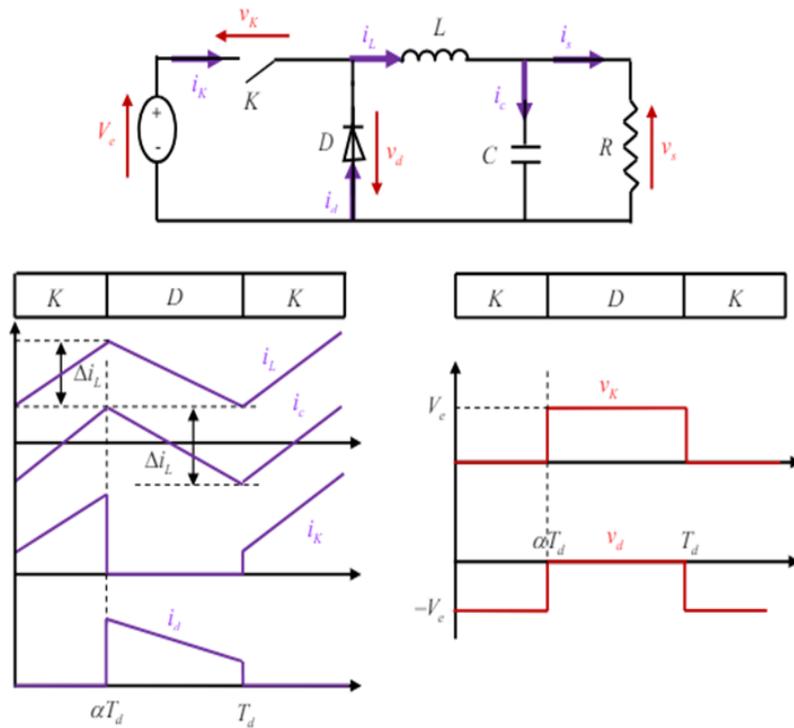


Figure 2.1 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck

La tension de sortie en valeur moyenne, l'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie sont donnés respectivement par: [3]

$$V_s = \alpha \cdot V_e \tag{II.1}$$

$$\Delta i_L = \frac{\alpha(1 - \alpha) \cdot V_e}{L \cdot f} \tag{II.2}$$

$$\Delta v_s = \frac{\Delta i_L}{8cf} = \frac{\alpha(1 - \alpha)v_e}{8cLf^2} \tag{II.3}$$

D'après l'expression de la tension de sortie V_s et vu que le rapport cyclique α est compris entre zéro et un, il est tout à fait clair que le convertisseur est un abaisseur en tension. [3]

❖ Avantages

Un convertisseur Buck bien conçu possède un fort rendement (jusqu'à 95 %) et offre la possibilité de réguler la tension de sortie. [13]

II.2.4.2. Le Convertisseur Buck-Boost

Le convertisseur Buck-Boost est un type de convertisseur DC-DC qui a la capacité unique d'abaisser ou d'augmenter la tension électrique d'entrée. Il est utilisé dans une variété d'applications, des petits appareils électroniques aux systèmes d'alimentation pour véhicules électriques.

Le convertisseur Buck-Boost peut être vu comme une combinaison d'un convertisseur Buck (abaisseur de tension) et d'un convertisseur Boost (élevateur de tension). Il convertit une tension d'entrée DC en une tension de sortie DC qui peut être soit supérieure, soit inférieure à la tension d'entrée. [14]

La structure du convertisseur ainsi que les formes d'ondes de courant et de tension obtenues sont présentées à la figure (2.2).

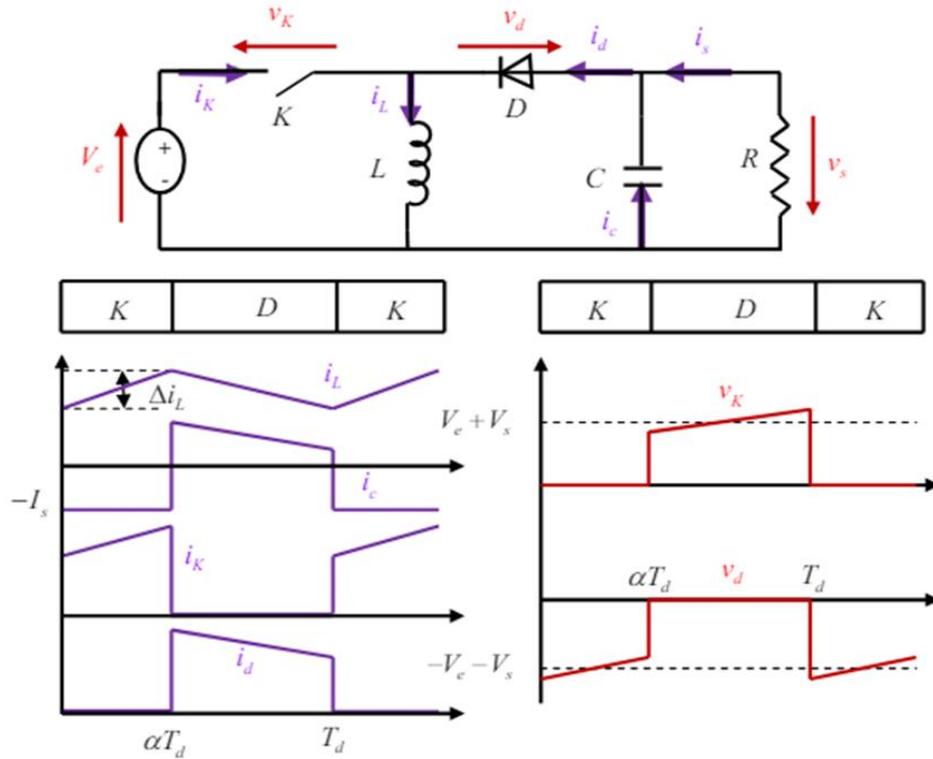


Figure 2.2 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost

La tension de sortie moyenne est donnée par: [3]

$$v_s = \frac{\alpha v_e}{1 - \alpha} \quad (\text{II.4})$$

L'ondulation de courant dans l'inductance est donnée par :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha v_e}{L f} \quad (\text{II.5})$$

et l'ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta v_s = \frac{\alpha I_s}{C f} = \frac{\alpha^2 v_e}{(1 - \alpha) R C f} \quad (\text{II.6})$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension

d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur-inverseur en tension. [3]

❖ **Avantages**

Le convertisseur Buck-Boost offre plusieurs avantages, notamment une flexibilité de gestion de la tension et une efficacité énergétique élevée, en particulier dans les systèmes où la tension d'entrée varie considérablement. [14]

II.2.4.3. Convertisseur Boost (convertisseur élévateur)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, sert à convertir une tension continue à une autre tension continue de plus forte valeur, Il est basé sur deux interrupteurs (MOSFET et Diode) qui fonctionnent en complémentaire durant une période, un filtre LC et une résistance prise comme une charge, Le convertisseur peut fonctionner suivant deux modes de fonctionnements dépendants, le mode de conduction continue (CCM) et le mode de conduction discontinue (DCM). [15]

La figure (II.3) illustre schéma électrique du convertisseur Boost ainsi que les formes d'ondes des courants et des tensions.

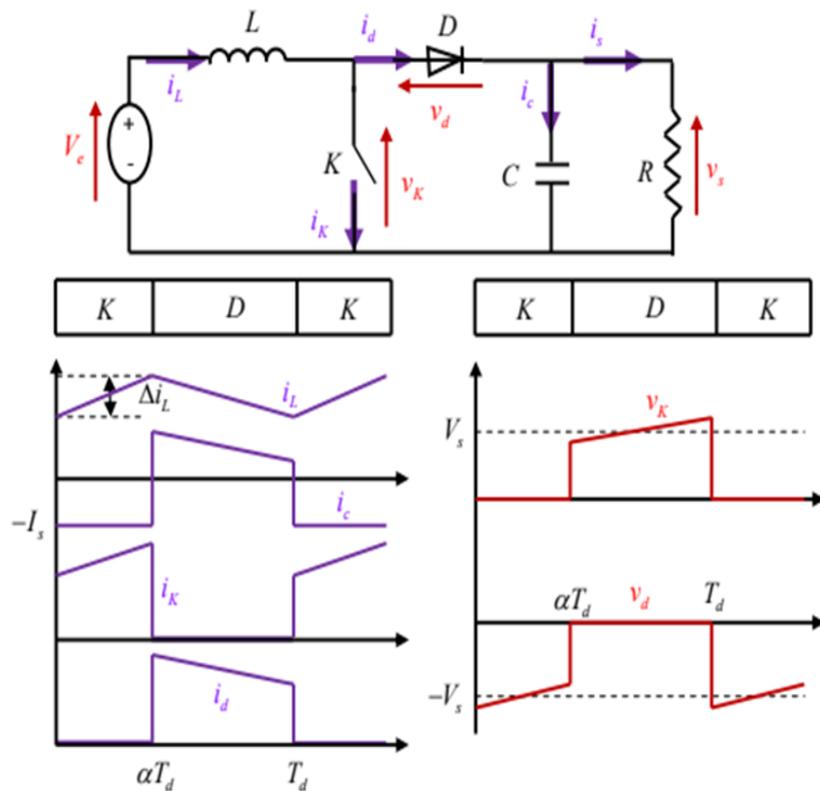


Figure 2.3 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost

L'expression de la valeur moyenne de la tension de sortie v_s est donnée par : [3]

$$v_s = \frac{1}{1 - \alpha} v_e \quad (\text{II.7})$$

Aussi, la valeur moyenne du courant dans l'inductance I_L et l'ondulation de courant dans l'inductance Δi_L Sont données respectivement par les équations :

$$I_L = \frac{1}{1 - \alpha} I_s \quad (\text{II.8})$$

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L} T_d = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (\text{II.9})$$

Avec f la fréquence de découpage. [3]

❖ Avantages

Les convertisseurs Boost offrent plusieurs avantages, notamment l'efficacité énergétique et la capacité de fournir une tension stable à partir d'une alimentation variable. [14]

II.2.4.4. Le Convertisseur Ćuk

Le convertisseur Ćuk (figure II.4) est un type de convertisseur DC-DC qui offre des performances améliorées par rapport aux convertisseurs traditionnels. Il est nommé d'après son inventeur, Slobodan Ćuk. Ce dispositif est largement utilisé dans diverses applications électroniques pour convertir et contrôler efficacement la tension et le courant électrique. [16]

S'agissant de son principe de fonctionnement, le convertisseur Ćuk fonctionne en se basant sur le principe de transfert d'énergie à travers un condensateur intermédiaire. En effet, il est composé de deux inductances, deux condensateurs et un interrupteur, généralement un transistor MOSFET. Son principe de fonctionnement réside dans la façon dont l'énergie est transférée du circuit d'entrée au circuit de sortie via le condensateur couplé. [16]

Le principe de fonctionnement du convertisseur SEPIC repose sur deux inductances principales : l'inductance d'entrée (L_1) et l'inductance de couplage (L_2). Ces inductances travaillent conjointement pour stocker et transférer l'énergie du côté entrée au côté sortie du circuit. Un élément clé du SEPIC est le condensateur de couplage (C_1), qui permet de séparer la tension d'entrée de la tension de sortie tout en transférant l'énergie entre les inductances. [17]

Les différentes formes d'ondes relatives au convertisseur Sepic (tensions et courants) sont données dans la figure(II.5).

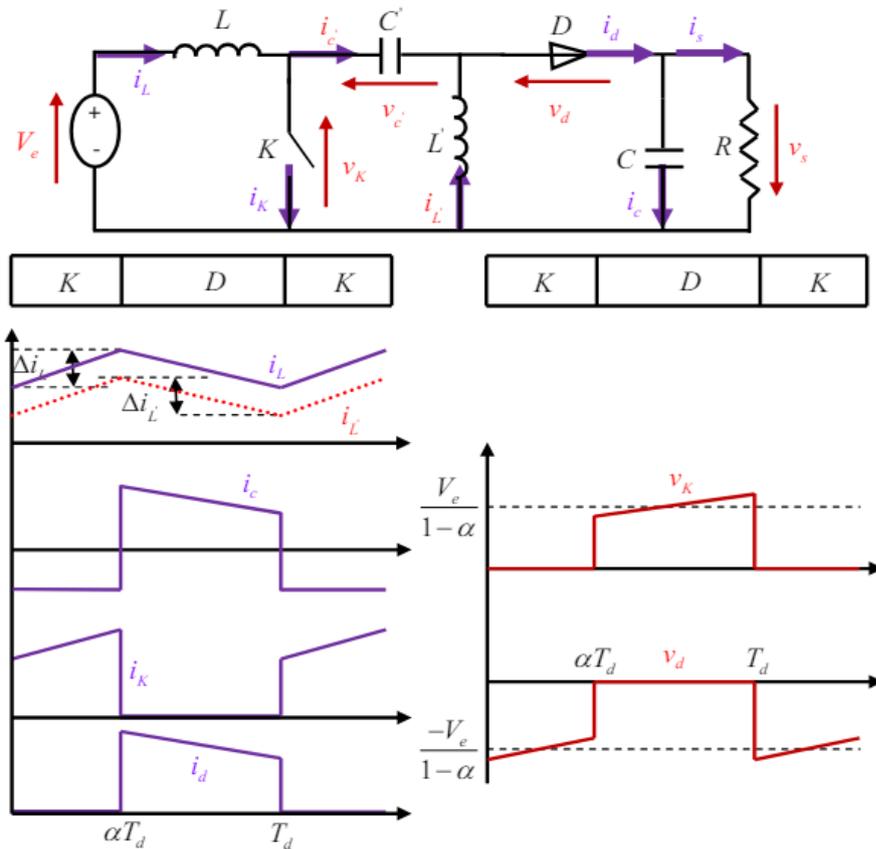


Figure 2.5 Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Sepic

Les caractéristiques de ce convertisseur sont identiques à celles du Cuk, mais il n'est pas inverseur en tension.

La tension de sortie moyenne est donnée par: [3]

$$v_s = \frac{\alpha}{1 - \alpha} v_e \tag{II.11}$$

L'expression reliant les valeurs moyennes des courants est :

Les ondulations de courant dans les deux inductances :

$$I_L = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) I'_L = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) I_s \quad (\text{II.12})$$

$$\Delta i_L = \frac{\alpha c}{Lf} \quad (\text{II.13})$$

$$\Delta i_{L'} = \frac{\alpha v_e}{L'f} \quad (\text{II.14})$$

Pour plus de détail concernant les différents types de convertisseurs, nous renvoyons le lecteur à la référence. Qui selon nous représente une très bonne référence.

❖ Avantages

Le convertisseur SEPIC est apprécié pour sa polyvalence et sa capacité à maintenir une tension de sortie stable malgré les variations de la tension d'entrée.

Il est souvent utilisé dans des dispositifs électroniques portables, des systèmes d'alimentation de secours, et des applications où la tension d'entrée peut fluctuer considérablement, comme dans les véhicules électriques. [3]

II.3. La commande (MPPT)

La commande MPPT acronyme Anglais de « **Maximum Power Point Tracking** » est une commande indispensable au fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque. Le principe de ce contrôle est basé sur la variation automatique du rapport cyclique dû à une valeur optimale qui maximise la puissance fournie par le module PV. [18]

II.3.1. Principe de la commande MPPT

La commande MPPT est associée à un convertisseur DC/DC. Le panneau solaire est connecté à la charge via ce convertisseur DC/DC. Les dispositifs de

surveillance de la puissance maximale détectent en permanence les changements de courant et de tension dans le panneau solaire et ajustent le convertisseur DC/DC en conséquence.

Généralement, le contrôleur MPPT suit le point de puissance maximale du panneau solaire en temps réel pour maximiser l'efficacité du panneau solaire. Plus la tension est élevée, plus le courant peut être généré grâce au suivi de puissance maximale, ce qui améliore l'efficacité de la charge. En ce sens, les contrôleurs de charge et de décharge solaires MPPT devraient à terme remplacer les contrôleurs solaires traditionnels. [19]

II.3.2 Les différents algorithmes de la commande MPPT

Il existe plusieurs algorithmes MPPT dans la littérature. Les plus utilisés sont :

1. Conductance incrémentale
2. Perturbation et Observation
3. Algorithme du Courant constant
4. Algorithme de la tension Constante

II.3.2.1. Conductance Incrémentale (Incremental Conductance : IC)

Comme mentionné précédemment, la conductance Incrémentale (IC) est la technique la plus couramment utilisée offrant une meilleure efficacité de suivi, une réponse rapide et un meilleur contrôle de la puissance extraite par rapport à la technique P&O. Les conditions de fonctionnement de la MPPT IC découlent du fait que $(dp/di) > 0$ à gauche du point de puissance maximale, $(dp/di) < 0$ à droite du point de puissance maximale et zéro au point de puissance maximale comme indiqué dans équations. [1]

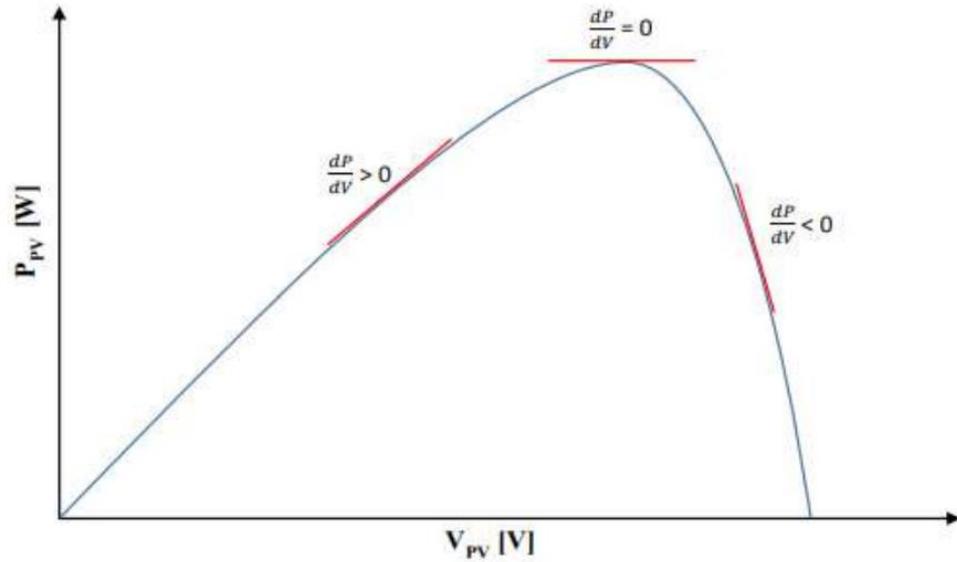


Figure 2.6 Principe de la méthode Conductance incrémentale

$$dp/di = 0, \text{ ou } dp/dv = 0 \text{ "Point de puissance maximale" (PPM)} \quad (\text{II.15})$$

$$d(iv)/dv = 0 \quad (\text{II.16})$$

$$idv/dv + vdi/dv = 0 \quad (\text{II.17})$$

$$di/dv = -1/v \text{ "Point de puissance maximale" (PPM)} \quad (\text{II.18})$$

$$di/dv > -1/v \text{ "à gauche du PPM"} \quad (\text{II.19})$$

$$di/dv < -1/v \text{ "à droite du PPM"} \quad (\text{II.20})$$

Comme indiqué ci-dessus dans les équations (II.18) à (II.20), la direction de la perturbation dans la commande IC est déterminée en fonction de la relation entre di/dv

et $-1/v$. La taille de pas de la technique MPPT IC joue un rôle clé dans la détermination du système photovoltaïque. Une meilleure estimation de la taille de pas est obtenue en prenant la valeur absolue du changement fractionnaire de puissance par rapport au courant, ce qui conduit à l'amélioration des performances du système global. L'algorithme de la conductance Incrémentale (IC) proposée, utilisant un pas variable est présenté ci-dessous: [1]

$$d = \text{abs}((P_n - P_{n-1}) / (I_n - I_{n-1})) \quad (\text{II.21})$$

$$d = \text{abs}(dp/di). \quad (\text{II.22})$$

Avec :

P_n : La puissance de sortie à l'instant t

I_n : Le courant de sortie à l'instant t

P_{n-1} : La puissance de sortie à l'instant $t - 1$

I_{n-1} : Le courant de sortie à l'instant $t - 1$

À partir des équations ci-dessus, l'algorithme IC peut être représenté par l'organigramme suivant :

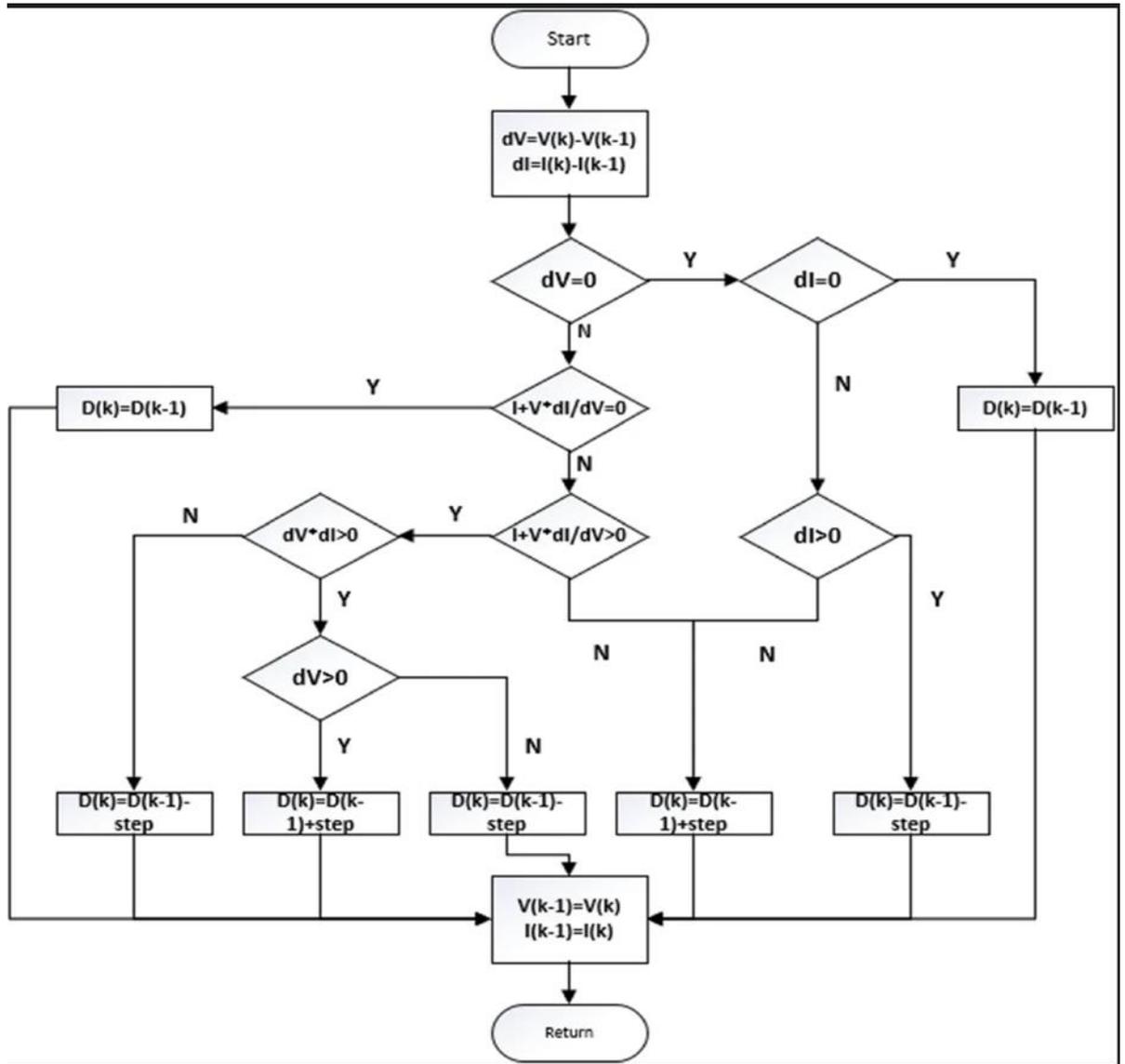


Figure 2.7 Organigramme de l'algorithme de conductance incrémental.

II.3.2.2. Perturbation et Observation (P&O, Perturbe and Observe)

L'algorithme de perturbation et d'observation (communément appelé P&O) est du type Hill Climbing.

C'est le plus couramment utilisé dans la littérature et il est surtout utilisé dans la pratique car il est facile à mettre en œuvre. Cet algorithme vise à faire fonctionner le système à des performances maximales en augmentant ou en diminuant la tension de point de fonctionnement et en observant l'effet de cette perturbation sur la puissance délivrée par le GPV. Selon cette observation, l'algorithme détermine l'action à réaliser lors de la prochaine itération [12]. Quatre situations P&O sont considérées dans la figure (2.8).

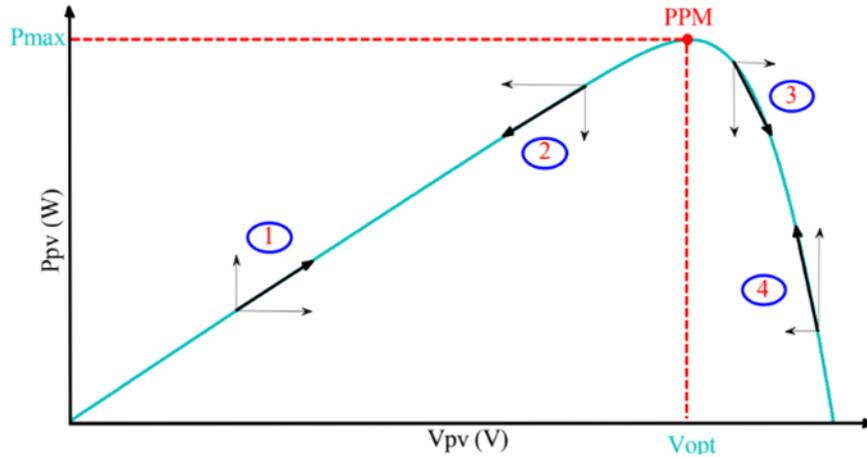


Figure 2.8 Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.

L'algorithme de la commande Perturb and Observ P&O (Figure 2.15) présente les avantages de la précision et de la réactivité. Cela permet de déterminer le point de puissance et la température maximale de la lumière solaire ou le degré de dégradation de ses propriétés. Le problème avec cet algorithme est le suivant:

- Variation autour des PPM dans des conditions normales de fonctionnement.
- Mauvaise convergence de l'algorithme lors de changements brusques de température et/ou d'ensoleillement.

Il est à noter que l'utilisation d'un petit pas utilisé pour la mise à jour du rapport cyclique peut réduire les fluctuations autour du point de puissance maximal, mais au détriment du temps de convergence. Par conséquent, le choix de cette étape de mise à jour nécessite un compromis entre précision et rapidité. [3]

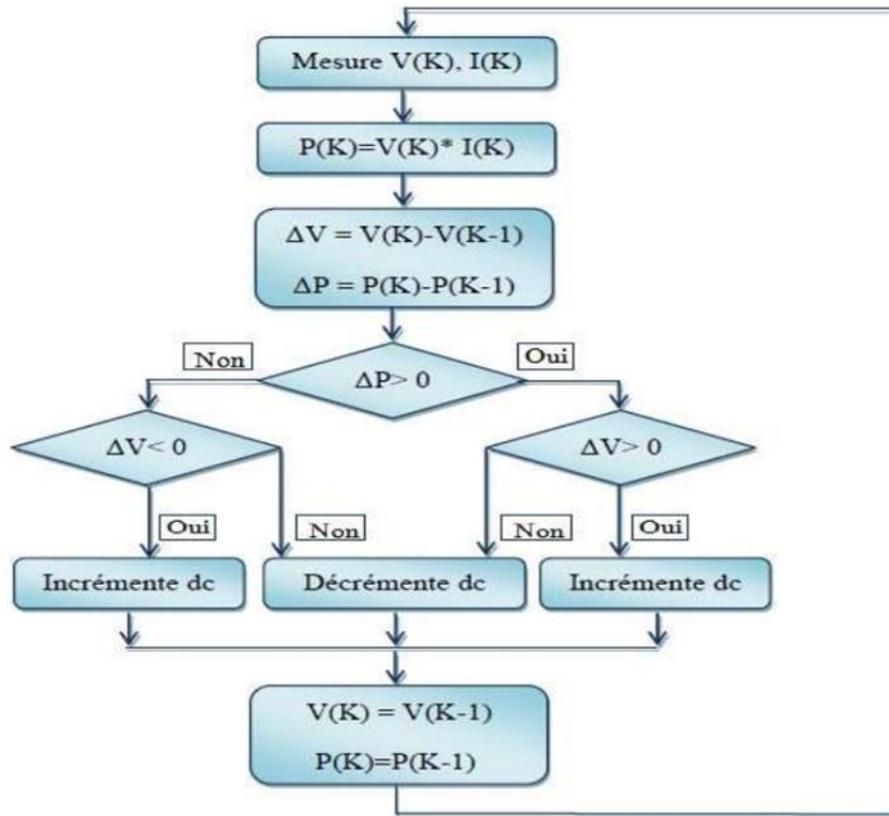


Figure 2.9 L'organigramme de l'algorithme classique associé à une commande MPPT du type P&O

II.3.2.3. Méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert

Cette méthode est basée sur l'utilisation d'une cellule solaire comme référence standard. Cette cellule standard n'est pas chargée et placée à côté du module PV, et la valeur de la tension en circuit ouvert peut être mesurée en temps réel, déterminant ainsi la tension de référence [3].

Pour déterminer le point de fonctionnement correspondant au point de puissance maximale en fonction de la tension v_{oc} , la figure $V_{opt} = f(V_{oc})$ est dessinée. Cette fonction obtenue n'est pas linéaire. Pour simplifier le calcul, le calcul doit être linéaire.

Ce qui donne :

$$v_{opt} = 0,7v_{oc} + 0,328 \quad (II.23)$$

Avec : V_{opt} la tension PV correspondant au PPM.

Malgré que le point de fonctionnement soit proche de la puissance maximale, certaines critiques ont été émises à l'égard de cette méthode.

- Totalement dépendant des cellules standards, sous réserve de modifications et d'anomalies.
- Ne tient pas compte des écarts dans les caractéristiques des modules photovoltaïques.
- Tension V_{opt} représente 75 à 95 pour la tension c , donc la linéarisation réduit la précision.

II.3.2.4.Méthode basée sur la mesure du courant en court-circuit :

Cette méthode est basée sur le calcul du courant de référence I_{opt} en fonction du courant de court-circuit I_{sc}

Selon la relation proportionnelle suivante :

$$I_{opt} = kI_{sc} \quad (II.24)$$

Le courant I_{sc} est mesuré périodiquement en effectuant des courts-circuits du GPV. Cette méthode ne nécessite qu'un seul capteur, ce qui la rend plus facile à mettre en œuvre et légèrement moins coûteuse. Cependant, cette méthode présente les inconvénients suivants : [3]

- En pratique, le courant optimal est de 85 à 95 % du courant de court-circuit, ce qui signifie qu'il n'est pas vraiment linéaire et moins précis.
- Les propriétés du générateur PV n'ont pas pu être prises en compte en raison de paramètres externes.
- Perte d'énergie pendant la période de court-circuit nécessaire à la mesure de la référence.

II.4.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types des convertisseurs statiques DC-DC. Aussi, nous avons présenté les différentes techniques de commande MPPT. Chaque technique de commande présentée est commentée dans le but d'en étudier les performances. En effet, notre choix est porté sur la commande MPPT issue de la commande incrémentale à pas variable. C'est ce que nous allons employer dans

Chapitre 2 : CONVERTISSEURS DC-DC ET COMMANDE MPPT

notre simulation dans le chapitre 3. Notre choix s'explique du fait que cette technique est caractérisée par de bonnes performances notamment lorsqu'il s'agit de changements brusques des conditions atmosphériques à la différence de la technique perturb and observe.

Chapitre 3:
Conductance
Incrémental a pas
variable et résultats
de simulation

III.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous étudions des variantes de la commande MPPT issues de la conductance Incrémentale à pas variable [1][2]. Pour la première approche, le pas d'adaptation du rapport cyclique est exprimé comme étant le rapport entre la variation de la puissance et la variation du courant. S'agissant de la deuxième approche, le pas d'adaptation est exprimé par le rapport entre la variation de la puissance et la variation de la tension. En raison d'approfondir notre étude en ce qui concerne ce type de commande MMPT, nous allons tout d'abord introduire de légères modifications consistant en la multiplication par des constantes, de valeurs choisies d'une façon heuristiques, pour satisfaire aux conditions de l'homogénéité de l'expression (respect des équations aux dimensions). Quant à la troisième approche dont nous désirons tester et que nous avons proposée nous-même, il s'agit de la combinaison des deux approches modifiées.

III.2.Approches à tester par simulation :

Dans ce qui suit, nous allons tester les différentes approches dont nous avons parlées dans l'introduction par des simulations dans l'environnement Matlab. Une comparaison sera également effectuée pour en savoir de leurs performances.

En ce qui concerne l'algorithme de la conductance Incrémentale, nous tenons à rappeler qu'il est présenté dans le chapitre II. En effet pour la technique de la Conductance Incrémentale, il est tout à fait clair que la direction de la perturbation (le pas) est déterminée en fonction de la relation entre $\frac{dI}{dV}$ et $-\frac{I}{V}$. La taille du pas de la technique de la conductance incrémentale a un impact direct sur les performances du système photovoltaïque. Une meilleure estimation de la taille du pas est obtenue en prenant la valeur absolue du rapport de la variation de la puissance par rapport au courant. [1]

Les différentes approches dont nous désirons étudier se diffèrent donc les unes des autres par la façon dont laquelle le pas d'adaptation du rapport cyclique est calculé.

Il est à noter, selon notre recherche effectuée, que La plupart des expressions dédiées au calcul du pas, relevant de la littérature, ne faisaient pas signe à l'importance d'explicitier le problème d'homogénéité en ce qui concerne les unités. C'est pour cette raison que nous avons

mis en relief cette importante question et pris en considération l'homogénéité des équations quant aux unités.

Les différentes approches dont nous désirons étudier dans ce chapitre, y compris celle que nous avons proposée, sont données dans cet ordre :

- **Première approche :** [1]

$$D(t) = D(t - 1) \pm \Delta D = D(t - 1) \pm \left| \frac{P_t - P_{t-1}}{I_t - I_{t-1}} \right| \quad (\text{III.1})$$

Avec:

- D : rapport cyclique,
- D_0 : rapport cycle initial,
- ΔD : pas d'adaptation du rapport cyclique,
- P_t : puissance actuelle à l'instant t ,
- P_{t-1} Puissance à l'instant $t - 1$,
- I_t : courant actuel à l'instant t ,
- I_{t-1} : courant à l'instant $t - 1$.

Pour cette première, nous introduisons une légère modification. La modification consiste en la multiplication par une constante λ_1 ce qui donne:

$$\Delta D = \lambda_1 \left| \frac{P_t - P_{t-1}}{I_t - I_{t-1}} \right| \quad (\text{III.2})$$

Avec:

λ_1 est exprimée en A/W .

- **Deuxième approche :** [2].

$$D(t) = D(t - 1) \pm \Delta D = D(t - 1) \pm \lambda_2 \left| \frac{P_t - P_{t-1}}{V_t - V_{t-1}} \right| \quad (\text{III.3})$$

Cette deuxième approche s'inspire de celle de la référence [2]. Nous avons introduit également une légère modification. Cette modification consiste en la multiplication par une constante λ_2 , ce qui donne :

$$\Delta D = \lambda_2 \left| \frac{P_t - P_{t-1}}{V_t - V_{t-1}} \right| \quad (\text{III.4})$$

Avec:

- λ_2 est exprimée en V/W .
- D : rapport cyclique,
- D_0 : rapport cycle initial,
- ΔD : pas d'adaptation du rapport cyclique,
- P_t : puissance actuelle à l'instant t ,
- P_{t-1} : puissance à l'instant $t - 1$,
- V_t : tension actuelle à l'instant t ,
- V_{t-1} : tension à l'instant $t - 1$.
- **Troisième approche (Approche proposée):**

En raison d'exploiter les performances des deux approches précédentes réunies, nous avons pensé à faire une combinaison des deux. Il existe plusieurs façons de réaliser cette combinaison et il en résulte autant d'approches. Pour un début, nous proposons d'effectuer une simple addition des deux expressions à savoir:

Dans notre mémoire, le choix des différentes constantes est fait d'une façon heuristique.

$$\Delta D = \lambda_1 \left| \frac{P_t - P_{t-1}}{I_t - I_{t-1}} \right| + \lambda_2 \left| \frac{P_t - P_{t-1}}{V_t - V_{t-1}} \right| \quad (\text{III.5})$$

III.3. Résultats de simulation :

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation dans l'environnement Matlab relatifs aux différentes approches citées ci-dessus. Pour notre simulation, nous utilisons le module solaire (générateur photovoltaïque) (SunPower SPR-305-WHT) disponible dans la bibliothèque de Matlab.

Tableau (3.1) : Paramètres de module solaire (Sun Power SPR-305-WHT).

Nombre de modules par string connectés en série	5
Nombre de strings en parallèle	66
Nombre de cellule par module	96
Courant de court-circuit pour un module I_{sc}	5,96 A
Tension de circuit ouvert pour un module V_{oc}	64,2 V

Concernant les conditions météorologiques dans lesquelles sont réalisées nos simulation, nous considérons une température $T= 25^{\circ}\text{C}$, et un ensoleillement variant.

Le convertisseur statique DC-DC (hacheur) utilisé est de type boost dont le principe de fonctionnement est donné est dans le chapitre 2.

S’agissant des résultats de simulation dont il s’agit de présenter dans cette partie concerne exclusivement la puissance délivrée.

Les différentes simulations ont été réalisées selon le schéma de la figure 3.1, suivante :

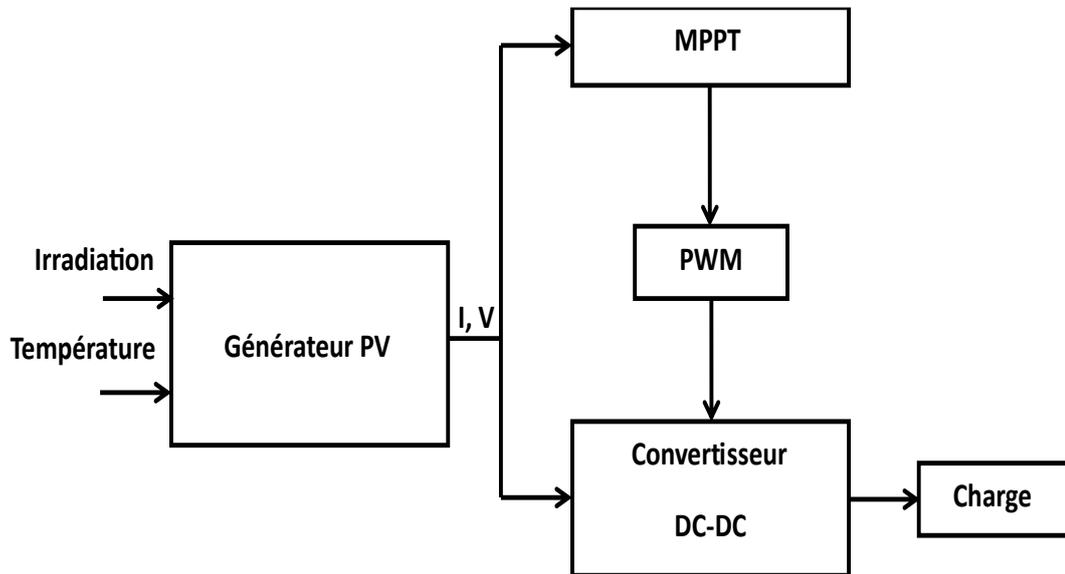


Figure 3.1 Schéma synoptique utilisé pour la simulation

III.3.1. Résultats de simulation issus de l'emploi de la première approche :

- a. Dans cette partie, nous présentons les courbes de puissance issues de l'application de la conductance incrémentale à pas variable vs la conductance incrémentale à pas fixe (classique). En raison de mettre en relief les performances en termes de puissance délivrée en régime permanent de chaque variante, nous avons effectué un Zoom dans l'intervalle qui lui correspond.

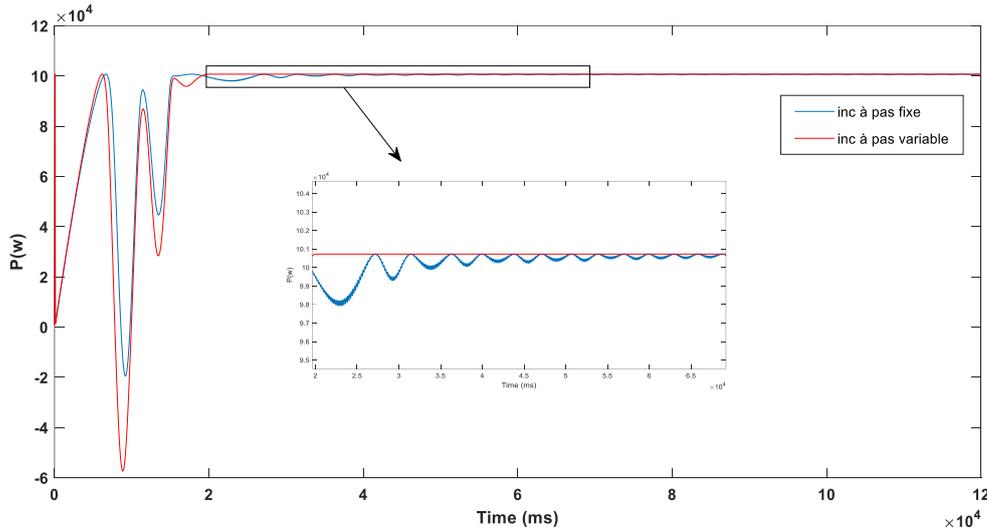


Figure 3.2 Courbes de puissance issue de la conductance incrémentale à pas variable et à pas fixe.

Cette fois-ci, nous présentons les courbes de puissance issues de l'application de la conductance incrémentale à pas variable modifiée (multiplication par un gain pour le calcul du pas) vs la conductance incrémentale à pas fixe (classique). Comme dans la partie précédente, nous effectuons également un Zoom pour éclaircir en mieux le comportement de chaque variante en régime permanent.

Comme nous le constatons sur la figure (3.3), il est clair que les résultats obtenus en appliquant la technique de la conductance incrémentale à pas variable modifiée sont mieux que ceux issus de la conductance incrémentale à pas fixe en termes de puissance en régime permanent.

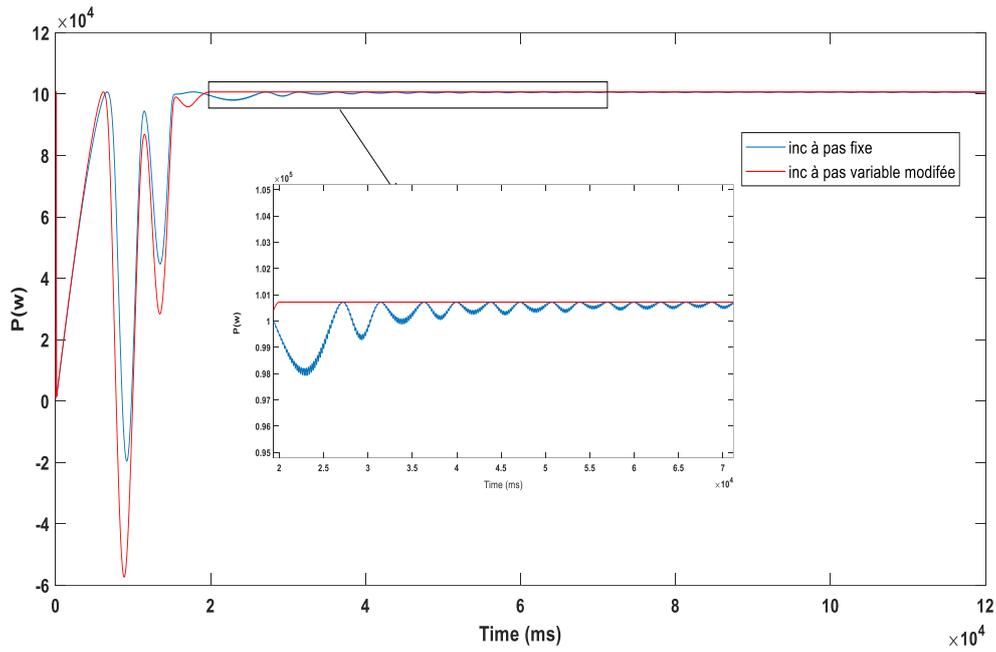


Figure 3.3 Courbes de puissance correspondant à l'application de la conductance incrémentale à pas variable modifiée et à pas fixe.

- b. Pour savoir ds performances de la technique IC sur laquelle nous avons introduit une légère modification, nous la comparons à la IC à pas variable de base. Les résultats de simulation sont donnés dans la figure (3.4).
- c. Un simple examen de la figure (3.4) montre une nette amelioration de la courbe de puissance en appliquant la conductance incrémentale à pas variable modifiée.

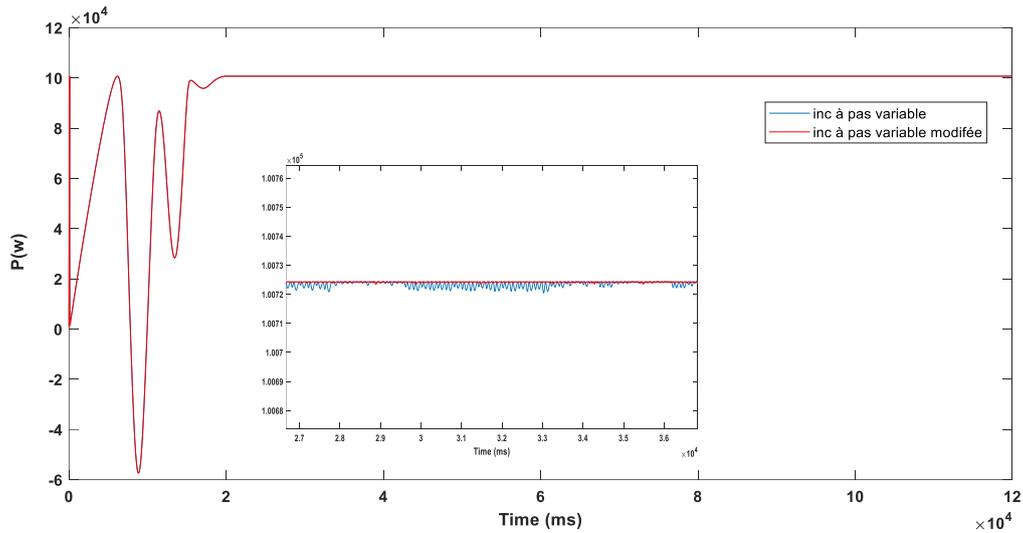


Figure 3.4 Courbe de puissance obtenue via l'application de la Conductance Incrémentale modifiée vs la courbe de puissance issue de la conductance incrémentale à pas variable sans modification

III.3.2. Résultats de simulation relatifs à la deuxième approche :

- Dans ce point, nous présentons les courbes de puissance issues de la deuxième approche avant et après modification avec une comparaison.

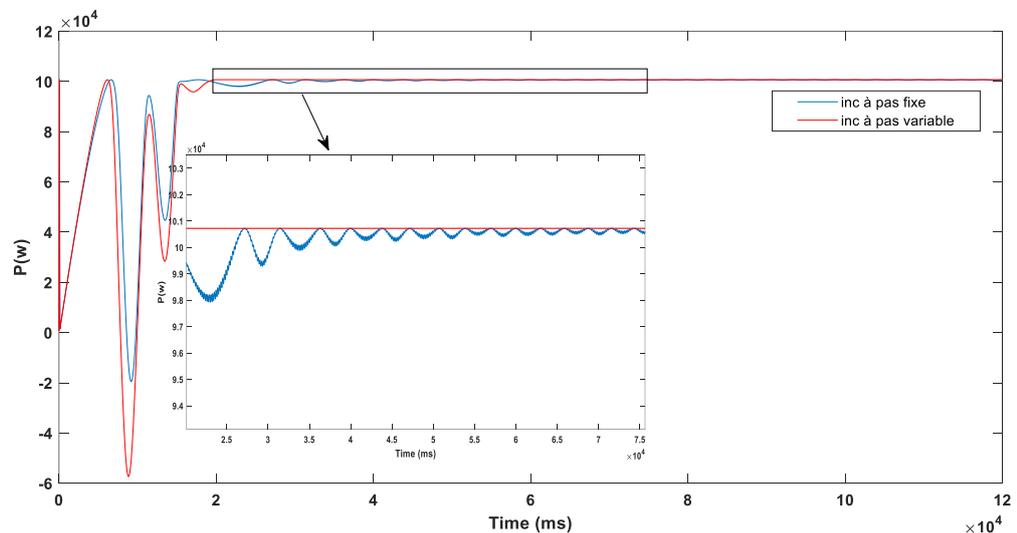


Figure 3.5 Courbe de puissance obtenue via l'application de la deuxième approche vs la courbe de puissance issue de la conductance incrémentale à pas fixe

Un simple examen de la figure (3.5) montre une nette amélioration de la courbe de puissance issue de l'application de la deuxième approche vs la puissance issue de l'approche classique.

- b. Dans cette partie, nous présentons les courbes de puissance issues de l'application de la deuxième approche après modification avec une comparaison aux résultats obtenus par l'approche classique (à pas fixe).

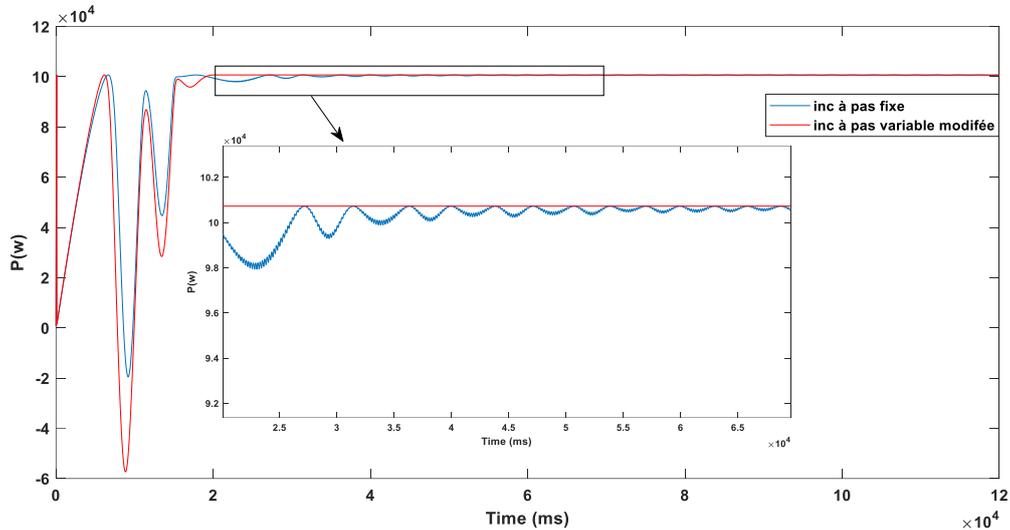


Figure 3.6 Courbe de puissance obtenue via l'application de la deuxième approche après modification vs la courbe de puissance issue de la conductance incrémentale classique.

D'après la figure (3.6), il est clair que la puissance issue de l'approche 2 modifiée est beaucoup plus améliorée par comparaison à celle issue de l'approche Classique (à pas fixe).

La figure (3.7) suivante représente la puissance obtenue par l'emploi de la deuxième approche avant et après modification.

Les résultats de simulation tels que le montre la figure (3.7), montre bel et bien la supériorité de l'approche 2 modifiée par rapport à cette même approche avant modification.

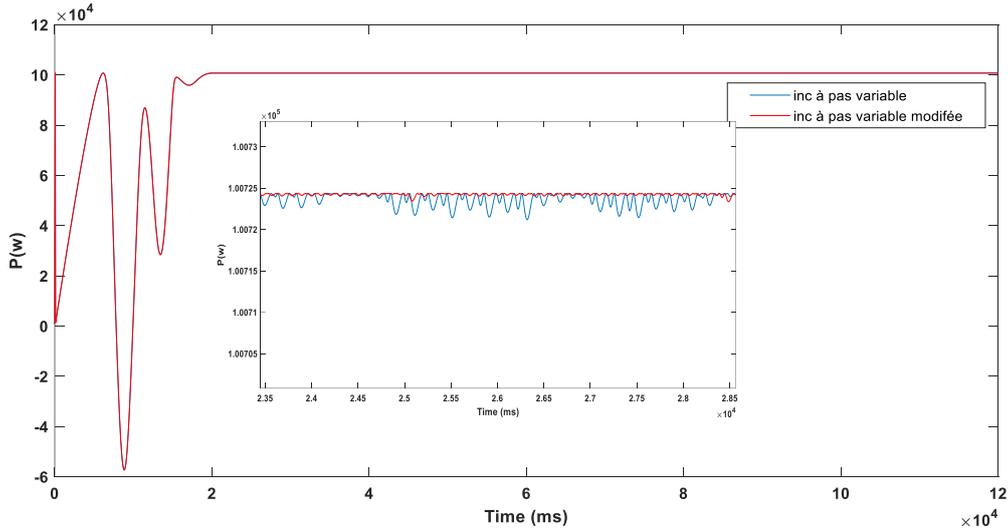


Figure 3.7 Courbe de puissance obtenue via l'application de la deuxième approche après modification vs la courbe de puissance issue de la conductance incrémentale classique

III.3.3. Résultats de simulation issus de l'emploi de la troisième approche :

$$\Delta D = \lambda_1 \left| \frac{P_t - P_{t-1}}{I_t - I_{t-1}} \right| + \lambda_2 \left| \frac{P_t - P_{t-1}}{V_t - V_{t-1}} \right|$$

Le point fort de cette nouvelle approche, que nous avons proposée nous-même, réside dans la combinaison des deux approches dans le but de bénéficier des avantages qui leur sont relatifs tous réunis. Nous présentons tout d'abord les résultats de simulation de cette nouvelle approche comparée à ceux donnés par l'approche classique, puis nous réalisons une comparaison avec les résultats issus de la première approche modifiée.

En examinant la figure (3.8), nous pouvons conclure facilement que la puissance issue de l'approche 3 est beaucoup plus améliorée que celle donnée par l'approche Classique (à pas fixe), c'est qui est bien attendu.

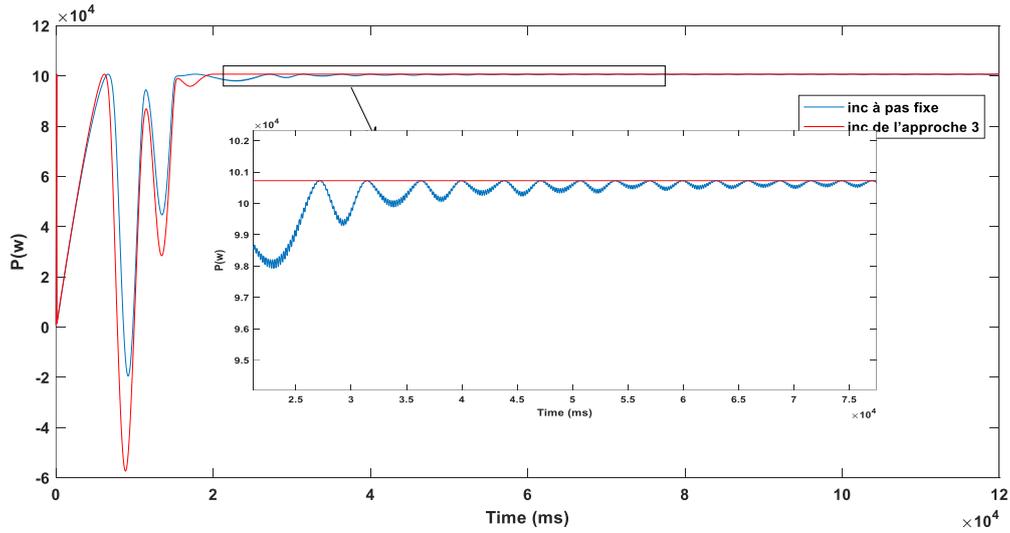


Figure 3.8 Courbe de puissance issue de l'approche 3 vs celle issue de l'approche classique

Dans la figure (3.9) suivante, nous présentons la puissance issue de la nouvelle approche à celle de la première approche modifiée.

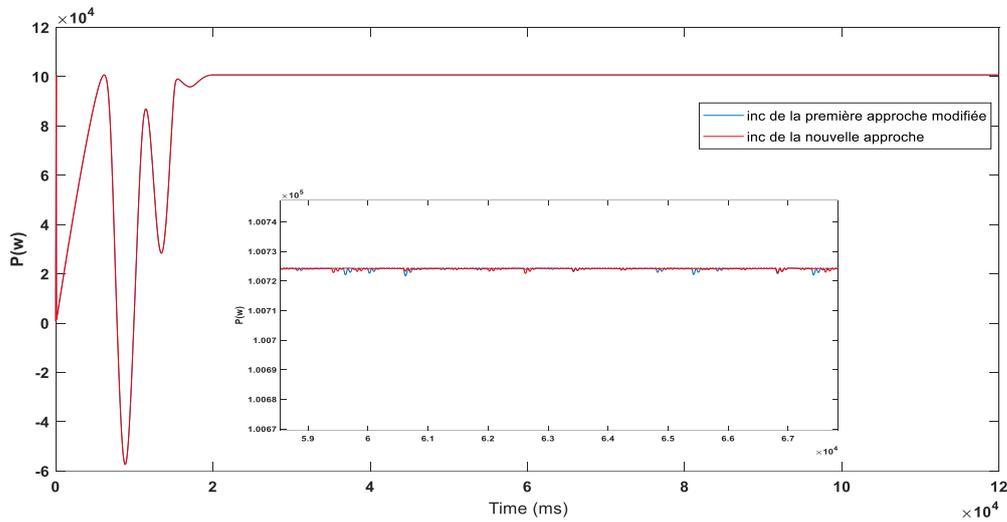


Figure 3.9 Courbe de puissance issues de l'approche 3 vs celle issue de l'approche 1 modifiée.

La puissance issue de la nouvelle approche manifeste une importante amélioration en comparaison à celle obtenue de l'approche 1 modifiée. Cela en fait une nouvelle approche intéressante.

En résumé, d'après les figures ci-dessus donnant la puissance en régime permanent, il est clair que la technique de la conductance incrémentale à pas variable est plus performante que

celle à pas fixe. Aussi, nous constatons que la conductance incrémentale à pas adaptatif modifiée, concernant l'approche 1 et 2, est à son tour plus performante que celles à pas variable avant modification. Quant à la troisième approche, qui consiste en la combinaison des deux approches constitue une nouvelle approche intéressante.

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté tout d'abord deux approches MPPT basées sur la conductance incrémentale à pas variable sur lesquelles nous avons introduit de légères modifications. Ces modifications consistent en la multiplication par des gains (constantes choisies de façon heuristique). Ensuite, nous avons proposé une nouvelle approche en combinant les deux approches. Bien que la combinaison puisse se faire selon plusieurs façons, nous avons tout simplement fait la somme des deux approches modifiées. Les résultats de simulation obtenus en termes de puissance manifestent les bonnes performances des différentes approches après modifications, notamment celle que nous avons proposée. En effet, nous pouvons conclure que la troisième approche est d'un intérêt crucial.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans notre mémoire de fin d'étude, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux techniques de commande MPPT basées sur la conductance incrémentale (incrémental conductance IC) dédiées aux systèmes photovoltaïques. En effet, l'introduction d'un étage adaptateur d'impédance (commande MPPT) dans les systèmes PV est d'autant nécessaire dans le but d'extraire le maximum d'énergie quelques soient la charge et les conditions environnementales. Nous avons tout d'abord présenté les générateurs PV commençant par la cellule PV en tant qu'élément de base. Nous avons également présenté les caractéristiques électriques d'un générateur PV : courant-tension et puissance-tension. Ensuite, nous nous sommes penchés sur l'étude des différentes commandes MPPT relevant de la littérature en mettant l'accent sur la conductance incrémentale. Les performances de telle commande dépendent exclusivement de la façon dont est réalisée la mise à jour du rapport cyclique. Or pour un petit pas, lorsque le point de fonctionnement est loin du point optimal, le temps mis pour atteindre le point optimal serait important, alors qu'un grand pas engendre des oscillations en régime permanent, d'où vient l'idée que le pas ne devrait pas être constant mais plus tôt variable ou adaptatif. C'est dans ce contexte que notre travail est réalisé. En effet, nous avons étudié trois variantes de la commande de la conductance incrémentale. Les deux premières sont issues de la littérature, cependant que la troisième approche nous l'avons proposée nous-même. S'agissant de la première approche, le pas d'adaptation du rapport cyclique est exprimé comme étant le rapport entre la variation de la puissance et la variation du courant. Pour la deuxième approche, le pas d'adaptation est exprimé par le rapport entre la variation de la puissance et la variation de la tension. En raison d'approfondir notre étude en ce qui concerne ce type de commande MMPT, nous avons tout d'abord introduit de légères modifications consistant en la multiplication par des constantes (facteur d'échelle), de valeurs choisies d'une façon heuristique, pour satisfaire aux conditions de l'homogénéité de l'expression. Quant à la troisième approche, il s'agit de la combinaison des deux approches en réalisant une simple addition. Les résultats de simulation obtenus sont très satisfaisants aussi bien pour les deux premières approches que pour celle que nous avons-nous-même proposée. Comme perspectives à ce présent travail, il serait très intéressant de revoir les différentes approches étudiées, notamment la troisième, en faisant appel à des méthodes d'optimisation pour le calcul des différentes constantes.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Yagyadatta Goswami, S. Rana, Vineet Kumar. Goswami, (Performance Analysis of an Improved Variable Step-Size IC MPPT Technique for SPV System), International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems éd, India, 2021.
- [2] Shanxu Duan, Fei Liu, Bangyin Liu, Yong Kang, ««A Variabl Step Size INC MPPT Method for PV Systems,»» IEEE Transaction On Industriel Electronics, Chine, 2008.
- [3] Belkaid ABDELHAKIM, «Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome,» Thèse de Doctorat , Université Ferhat Abbas , Setif, 2015.
- [4] K. Ben Zahia et R. Touahir , «contrôleur neuronal pour la poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque,». Mémoire de mastre, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2015.
- [5] M. A. Soraya, (dimensionnement et simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter un habitat dans la wilaya d'Ouargla), Mémoire de magister, Université kasdi merbah, Ouargla, 2005.
- [6] M. Gergaud et H. Ben Ahmed, «Analysis and Experimental Validation of various Photovoltaic System Models,» 7th International ELECTRIMACS Congress, Montreal (Canada), 2002.
- [7] Long Bun, ««D´détection et localisation de d´défauts dans un système photovoltaïque. Energie ´électrique,» Thèse de Doctorat , Université Grenoble, Grenoble, 2011.
- [8] Abdellatif Miraoui, Khadija El Kadri, Abdesslem. Djerdir, « Maquette pédagogique associant un générateur photovoltaïque et des super condensateurs dans une application transport»,» Rapport L2ES Belfort Cedex, , France , 2002.
- [9] C. Cabal, «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque." », Thèse Doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, Toulouse, 2008.
- [10] Aziz Derouich, Abdelaziz elghziza, Saad Motahhir, «Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM.» Congrès International de Génie Industriel et Management des Systèmes, Maroc, 2015.
- [11] Matan, «electricity-magnetism,» ««Convertisseurs DC-DC,» , 6 2 2024. [En ligne]. Available: <https://www.electricity-magnetism.org/fr/convertisseurs-dc-dc/>.
- [12] Ned Mohan, «Power Electronics: Converters, Applications, and Design 3rd», Wiley, 2002.

- [13] Salmony, «Convertisseur Buck : dimensionnement des composants», 4/10/2022. [En ligne]. Available: <https://resources.altium.com/fr/p/buck-converter-component-sizing>.
- [14] Matan, «electricity-magnetism.org,» «Convertisseur Buck-Boost | Formule & Usage,», 29/3/2024. [En ligne]. Available: <https://www.electricity-magnetism.org/fr/convertisseur-buck-boost-formule-usage>.
- [15] CONVERTISSEUR ELEVATEUR (BOOST), 2024. [En ligne]. Available: <http://f6csx.free.fr/PROJETS/BOOST/Boost.pdf>.
- [16] M. Matan, «electricity-magnetism,» 6/2/2024. [En ligne]. Available: <https://www.electricity-magnetism.org/fr/convertisseur-cuk>.
- [17] M. Matan, «electricity-magnetism,» Convertisseur SEPIC | Comment ça marche, application et avantages, 6/2/2024. [En ligne]. Available: <https://www.electricity-magnetism.org/fr/convertisseur-sepic>.
- [18] H. Abbes, A. Abid, K. Loukil, A. Toumi et M. Abid , «Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque,» Renewable Energies center, Algérie, 2014.
- [19] William, «GEYA,» «Le principe de fonctionnement du MPPT photovoltaïque,», 9/1/2024. [En ligne]. Available: <https://geya.net/fr/the-working-principle-of-photovoltaic-mppt>.

Annexe

Panneau Solaire KC200GT

■ Specifications

■ Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)	
Maximum Power (P _{max})	200W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	26.3V
Maximum Power Current (I _{mpp})	7.61A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	32.9V
Short Circuit Current (I _{sc})	8.21A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of V _{oc}	−1.23×10 ⁻¹ V/°C
Temperature Coefficient of I _{sc}	3.18×10 ⁻³ A/°C

*STC : Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, module temperature 25°C

■ Electrical Performance at 800W/m ² , NOCT, AM1.5	
Maximum Power (P _{max})	142W
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	23.2V
Maximum Power Current (I _{mpp})	6.13A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	29.9V
Short Circuit Current (I _{sc})	6.62A

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47°C

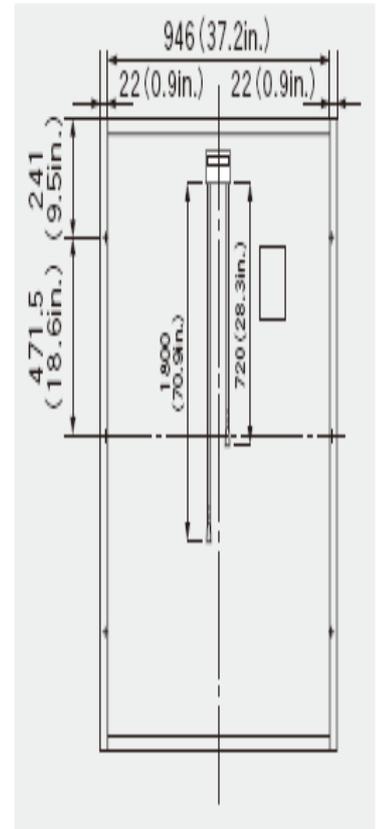
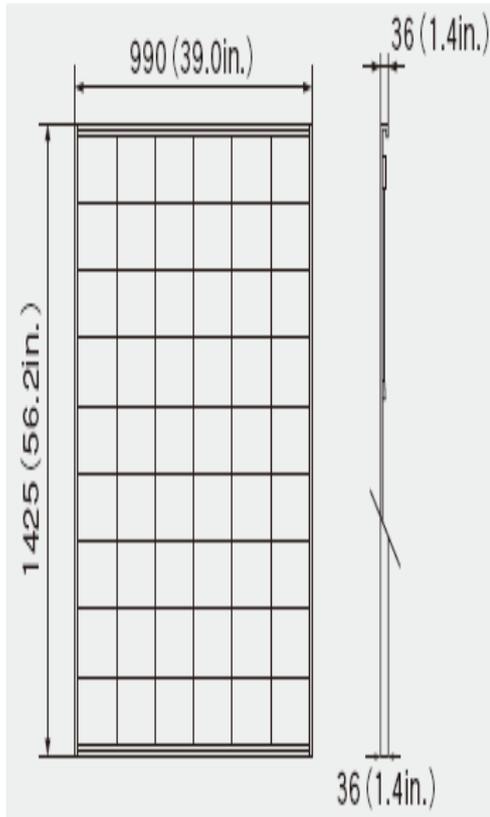
■ Cells	
Number per Module	54

■ Module Characteristics	
Length × Width × Depth	1425mm(56.2in)×990mm(39.0in)×36mm(1.4in)
Weight	18.5kg(40.7lbs.)
Cable	(+)720mm(28.3in), (-)1800mm(70.9in)

■ Junction Box Characteristics	
Length × Width × Depth	113.6mm(4.5in)×76mm(3.0in)×9mm(0.4in)
IP Code	IP65

■ Reduction of Efficiency under Low Irradiance	
Reduction	7.8%

Reduction of efficiency from an irradiance of 1000W/m² to 200W/m² (module temperature 25°C)



Kyocera KC200GT