



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université El-wancharissi de Tissemsilt



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique en

Filière : **Electronique**

Spécialité : **Instrumentation**

Présentée par : **AKHAM AMEL**

BENSAAD BAKHTA SOULEF

Thème

Modélisation, simulation et commande d'un Système Photovoltaïque

Soutenu le, .../07/2021

Devant le Jury :

DJOUDI Lakhdar	Président	Prof	Univ-Tissemsilt
MEHARRAR Aoued	Encadreur	M.C.A.	Univ-Tissemsilt
NAIL Bachir	Examineur	M.C.B.	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2020-2021

Dédicaces

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire "

Ya Kayoum "

Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à :

Ma mère et mon père

Que dieu les gardes et les protèges.

A mes adorables frère et sœurs

A tous ceux qui me sont chères.

A tous ceux qui m'aiment.

Mon binôme Soulef

A. Amel

Dédicaces

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire "

Ya Kayoum "

Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à :

Ma mère et mon père

Que dieu les gardes et les protèges.

A mes adorables frères et sœur.

A tous ceux qui me sont chères.

A tous ceux qui m'aiment.

Mon binôme Amel

B. Soulef

Remerciements

Nous remercions en premier lieu **الله** le tout puissant de nous avoir accordé la volonté et le courage pour terminer ce modeste travail. Il nous est agréable d'exprimer nos profondes reconnaissances ainsi que nous sincère gratitude à tous ceux qui nous ont encouragé et qui ont contribué directement ou indirectement à l'élaboration de ce modeste travail et particulièrement à : Notre Encadreur, Mr : **MEHARRAR AOUED** pour sa disponibilité et ses précieux conseils répétés, d'être très serviable avec nous, et pour toute l'aide rapporté durant les étapes de réalisation de ce travail. Nous tenons à remercier le président et les membres du jury

Prof : **DJOUDI Lakhdar** et Dr : **NAIL Bachir** de nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail. A tous les enseignants qui nous ont enseigné durant toutes les étapes scolaires de notre vie,

UN GRAND MERCI.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque, dont ce système comporte un module photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC de type élévateur.

Avant d'aborder à cette modélisation une étude bibliographique sur l'énergie solaire et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ont été présentés.

Ensuite un module photovoltaïque a été modélisé et simulé afin de trouver leur caractéristique statique et dynamique.

Enfin nous avons présenté les techniques et les algorithmes utilisées pour le suivre de point de puissance maximum (MPPT), la modélisation et la simulation d'un convertisseur DC-DC et le commande direct de leur rapport cyclique.

Mots clefs : Modélisation, Module photovoltaïque, Convertisseur, Commande.

ملخص

يتعلق العمل المقدم في هذه المذكرة بدراسة نموذج ومحاكاة نظام كهروضوئي ، والذي يشمل بدوره على وحدة كهروضوئية مرتبطة بمحول تيار مستمر من النوع التصاعدي.

قبل التطرق لهذه الدراسة، تم تقديم دراسة ببيولوجرافية عن الطاقة الشمسية ومبدأ تشغيل الخلية الكهروضوئية...

ثم قمنا بدراسة نموذج ومحاكاة وحدة كهروضوئية إيجاد خصائصها الثابتة والديناميكية.

أخيرًا ، قدمنا التقنيات والخوارزميات المستخدمة لتتبع أقصى نقطة للطاقة (MPPT) مع نموذج ومحاكاة المحول المستمر وطريقة التحكم فيه.

الكلمات المفتاحية: نمذجة ، الوحدة الكهروضوئية ، المحول ، التحكم

Abstract

The work introduced in this thesis concerns the demonstrating and reproduction of a photovoltaic framework, of which this framework includes a photovoltaic module related with a DC-DC converter of the progression up type.

Prior to moving toward this displaying, a bibliographical report on solar powered energy and the working rule of a photovoltaic cell were introduced..

Then, at that point a photovoltaic module was demonstrated and recreated to track down their static and dynamic attributes.

Finally we presented the techniques and algorithms used for maximum power point tracking (MPPT), the modeling and simulation of a DC-DC converter and the direct control of their duty cycle.

Keywords: Modeling, Photovoltaic module, Converter, Control.

Sommaire

Introduction générale	2
Chapitre 1: Généralités sur L'énergie solaire	
1.1 Introduction.....	4
1.2 Les énergies renouvelables, ressources et exploitation	4
1.3 L'énergie solaire	4
1.3.1- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques)	4
1.3.2- Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques).....	5
1.4 Rayonnement solaire.....	5
1.4.1 Le rayonnement direct.....	5
1.4.2 Le rayonnement diffus	5
1.4.3 Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol.....	6
1.4.4 Le rayonnement global.....	6
1.5 Gisement solaire en Algérie.....	6
1.6 L'énergie solaire photovoltaïque	7
1.7 La cellule photovoltaïque.....	7
1.8 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	7
1.9 Technologies (types) des cellules photovoltaïques.....	9
1.9.1 Les cellules monocristallines	9
1.9.2 Les cellules poly cristallines	9

1.9.3 Les cellules amorphes	10
1.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïques	10
1.10.1 Avantages	11
1.10.2 Inconvénients	11
1.11 Conclusion	11
1.12 Références.....	12

Chapitre 2 : Modélisation et Simulation D'un PV

2.1 Introduction.....	14
2.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque	14
2.3 Résultats obtenus.....	16
2.4 Caractéristiques de module photovoltaïque	18
2.4.1 Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du module photovoltaïque.....	19
2.4.1.1 Influence de l'irradiation	19
2.4.1.2 Influence de la température	20
2.5 Conclusion	21
2.6 Références.....	22

Chapitre 3 : La Poursuite du Point de Puissance Maximum et le convertisseur DC-DC

3.1 Introduction.....	24
3.2 Convertisseur MPPT.....	24
3.2.1 Principe de la commande MPPT	24
3.3 L'algorithme Perturbe & Observe	25

3.4 Conductance incrémentale (Inc-Cond)	26
3.5 Méthode linéaire	28
3.6 L'intelligence artificielle pour la poursuite du point de puissance maximum	29
3.7 Les convertisseurs DC-DC	29
3.7.1 Modèle mathématique du convertisseur parallèle	30
3.7.2 Commande du convertisseur	31
3.7.3 Contrôle direct du rapport cyclique (Voltage Mode Control).....	31
3.7.4 Contrôle direct du rapport cyclique du convertisseur Boost	32
3.7.5 Résultats de simulation	32
3.8 Conclusion	36
3.9 Références.....	37
Conclusion générale.....	40
Annexe.....	41

Liste Des Figures

Figure 1.1 :Types de rayonnement solaire.....	5
Figure 1.2 :Carte d'éclairement solaire.....	6
Figure.1.3 : Principe de fonctionnement	8
Figure1.4 : La cellule au champ photovoltaïque.....	8
Figure.1.5 : Les cellules monocristallines.....	9
Figure.1.6 :Les cellules poly cristallines.....	10
Figure.1.7 :Les cellules amorphes	10
Figure.2.1 : Schéma équivalent d'une cellule	14
Figure 2.2 : Schéma bloc du module PV	17
Figure 2.3 : Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$	18
Figure 2.4 :Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$	18
Figure 2.5 : Caractéristique courant-tension d'une d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ($G=200, 500, 1000 \text{ W/m}^2$) et $T_c=25^\circ\text{C}$	19
Figure 2.6 : Caractéristique puissance –tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ($G=200, 500, 1000 \text{ W/m}^2$) et $T_c=25^\circ\text{C}$	20
Figure 2.7 : Caractéristique courant –tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=10, 25, 50^\circ\text{C}$) et $G = 1000\text{W/m}^2$	20
Figure 2.8 : Caractéristique puissance – tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=10, 25, 50^\circ\text{C}$) et $G = 1000\text{W/m}^2$	21
Figure 3.1 : Schéma fonctionnel d'une chaine de conversion de l'énergie photovoltaïque	24

Figure 3.2 : Principe de La méthode P&O	25
Figure 3.3 : Organigramme de la méthode P&O	26
Figure 3.4: Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance G et de la puissance P	27
Figure 3.5 : Organigramme de l’algorithme Inc-Cond	28
Figure 3.6 Schéma de principe du hacheur parallèle	30
Figure 3.7. Schéma de la commande par contrôle direct du rapport cyclique.....	31
Figure 3.8. Schéma du convertisseur Boost régulé en VMC	32
Figure 3.9: Courant de sortie de convertisseur DC/DC	33
Figure 3.10 : la variation de l’éclairement.....	33
Figure 3.11 : Tension de sortie de hacheur.....	34
Figure 3.12 : La tension de sortie de PV.....	34
Figure 3.13 : Puissance optimale et maximisée par le contrôleur MPPT (P&O).....	35
Figure 3.14 : L’efficacité du contrôleur MPPT.....	35

Liste des Tableaux

Tableau 2. 1 : Caractéristiques du module PV à 25°C et 1000 W/m ²	17
--	----

Nomenclature

λ : longueur d'onde (mm)

G: ensoleillement dans le plan des panneaux (W/m²)

W_c: Watt crête

P_{max}: puissance au point de fonctionnement (W)

I_{cell} : Courant délivré par la cellule (A)

I_D : Courant diode (A)

I_{load} : Courant à travers la charge (A)

I_s : Courant de saturation (A)

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

V_{oc}: tension de circuit ouvert(V)

K: constante de Boltzmann (1,38.10⁻²³ J/K)

T: température de jonction des cellules (°C)

q: la charge de l'électron (coulomb)

P_{max}: puissance maximale(W)

V_{mmp}: tension au point de fonctionnement(V)

I_{mmp}: courant au point de fonctionnement(A)

R_s : Résistance série du module (ohm).

V_{load} : tension à travers la charge (A)

R_p : Résistances shunt du module (ohm).

T₀ : température des panneaux de référence à 25°C.

n : facteur d'idéalité de la jonction

i_L courant de l'inductance

f.e.m : force électromotrice

D : rapport cyclique

P_{pv} : la puissance du générateur photovoltaïque.

V_{pv} : la tension du générateur photovoltaïque.

Liste des Abréviations

CLF : contrôleur logique floue

DC/DC : Convertisseur Continue/Continue.

f.e.m : force électromotrice

GPV: générateur photovoltaïque.

KW: kilowatt

MPPT: Maximum Power Point Tracking

MW: megawatt

PV: panneau photovoltaïque

P&O (perturbation and observation)

Introduction Générale

Introduction générale

Après la révolution industrielle, les humains ont compris comment utiliser au mieux les diverses sources d'énergie dont la terre est riche. Ces sources d'énergie sont de deux types, les sources d'énergie renouvelables et non renouvelables. Sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'hydroélectricité et le biogaz [1.1],

L'énergie photovoltaïque est une énergie renouvelable propre et inépuisable. Cependant la caractéristique électrique d'un module photovoltaïque est naturellement non linéaire et un contrôleur pour la recherche de point de puissance maximale (MPPT) et donc nécessaire.

Le but de ce travail est d'étudier la modélisation et la simulation (en statique et en dynamique) d'un module photovoltaïque.

Pour la modélisation et la simulation de l'ensemble des éléments du système photovoltaïque, nous avons utilisé le logiciel MATLAB®-SIMULINK®.

Le travail a été structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur les différents types d'énergies solaire et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Le second chapitre concerne, la modélisation et la simulation d'un module photovoltaïque. Dans le troisième chapitre, Les différentes techniques de suivre le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque et la modélisation d'un convertisseur DC-DC de type élévateur sont étudiées.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale et des perspectives pour de futurs travaux.

Chapitre 1

Généralités sur L'énergie solaire

1.1 Introduction

Parmi les différentes sources d'énergies renouvelables, celle l'énergie solaire (thermique et photovoltaïque) connaît actuellement un essor considérable.

Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu général sur cette énergie prometteuse. On focalise notre attention sur l'énergie solaire photovoltaïque l'objet de notre travail.

1.2 Les énergies renouvelables, ressources et exploitation

Par rapport aux énergies fossiles (comme le pétrole et le gaz) les énergies renouvelables sont considérées comme des sources inépuisables, c'est-à-dire sa vitesse de formation est plus grande que sa vitesse d'utilisation [1.2] Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs raisons [1.3] :

- elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ;
- elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux

Les principaux sources d'énergies renouvelables sont : les énergies éolienne, solaire, géothermique, hydraulique, ainsi que l'énergie issue de la biomasse.

1.3 L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables [1.4].

On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du solaire et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

1.3.1- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques)

Dans ce cas l'énergie solaire est captée est transformé en électricité.

1.3.2- Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques)

Dans ce cas, la chaleur des rayons solaire est captée et utilisée, pour chauffer de l'eau ou pour produire de l'électricité [1.5].

1.4 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est une onde électromagnétique émise par la surface de soleil qui résulte des réactions de fusion de l'hydrogène en hélium ayant lieu au cœur du soleil.

Le rayonnement solaire incident sur un capteur solaire est composé de trois parties : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi par la surface de la Terre, comme montre la figure suivante [1.6] :

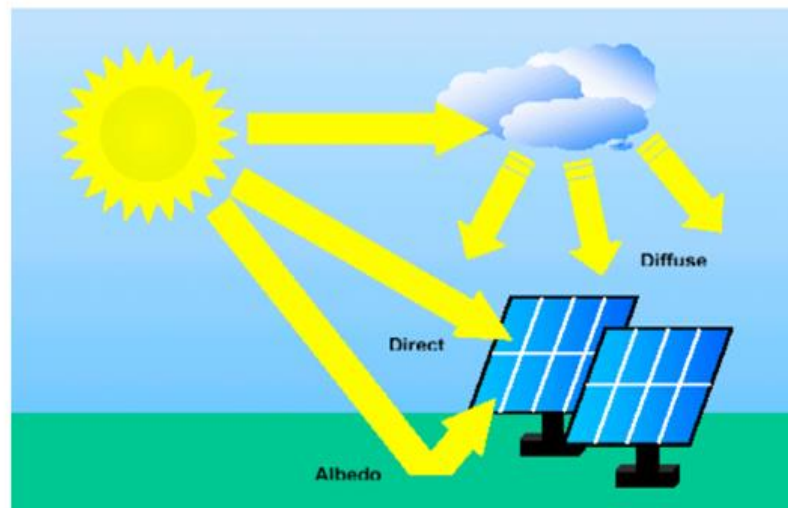


Figure 1.1 : Types de rayonnement solaire reçus au sol [1.7]

1.4.1 Le rayonnement direct

La conversion du rayonnement direct est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

1.4.2 Le rayonnement diffus

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

1.4.3 Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol

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

1.4.4 Le rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol [1.6].

1.5 Gisement solaire en Algérie

Pour saisir la portée des énergies renouvelables en Algérie et les enjeux considérables et inépuisables existant de ces énergies non encore exploitées à savoir le gisement solaire exceptionnel qui couvre une superficie de 2381745 Km². L'Algérie est l'un des pays qui ont une diversité de sites grâce à son grand secteur, où le rayonnement de la région près de la mer est influencé par les saisons. Les zones du nord de l'Algérie sont à ciel - couvert plus que ceux du sud. Les régions Sahariens reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une température de l'air plus élevée. En raison de cette diversité dans le climat, l'ensoleillement moyen global au plan horizontal reçu varie entre 4,5 et 7.5 kWh/m². En tenant compte de cette diversité, l'Algérie peut être divisée en 8 zones climatiques qui ont approximativement un ensoleillement homogène comme indiqué sur la figure [1.6].

Moyenne annuelle de l'irradiation Globale reçue sur une surface horizontale, Période 1992-2002

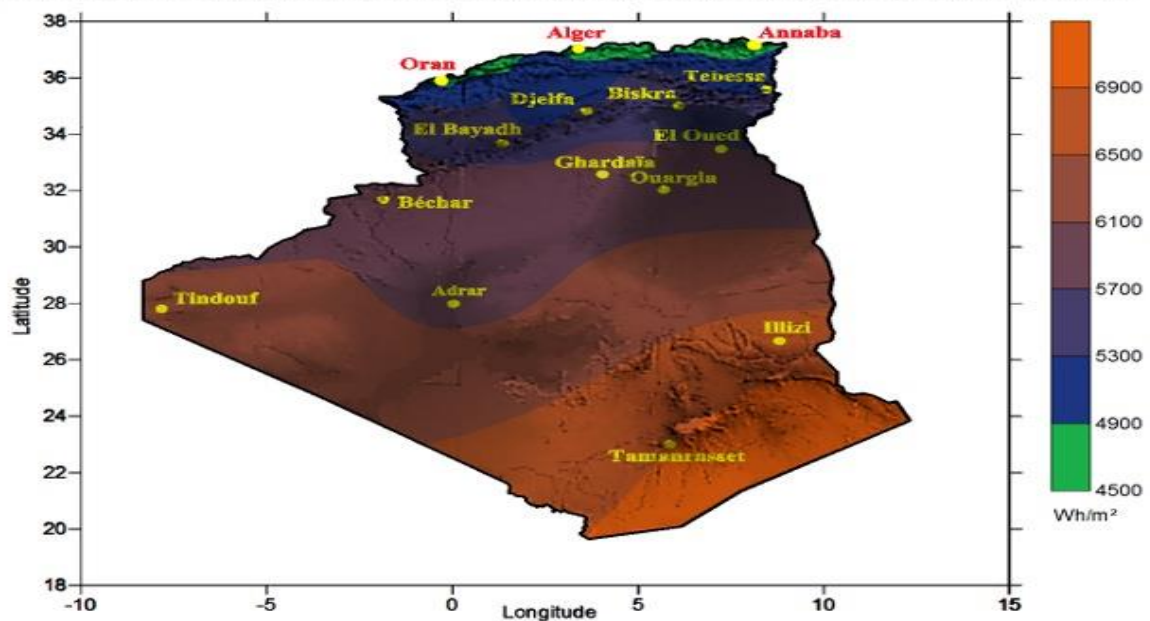


Figure 1.2 : Carte d'éclairement solaire de l'Algérie [1.6]

1.6 L'énergie solaire photovoltaïque

Elle provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé dans la fabrication de la cellule.

L'association de plusieurs cellules en série /parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique photovoltaïque produite est ainsi disponible soit sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau.

1.7 La cellule photovoltaïque

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi- conducteurs généralement à base de silicium (SI), qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Les cellules sont raccordées entre- elles pour former des modules photovoltaïques pouvant convertir en électricité environ 15% de l'énergie solaire reçue [1.6].

1.8 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », à été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800.

En général, une cellule photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur) dopée dans sa partie supérieure au phosphore (coté N), et dans sa partie inférieure au bore (coté P) comme montre la (fig.1.3).

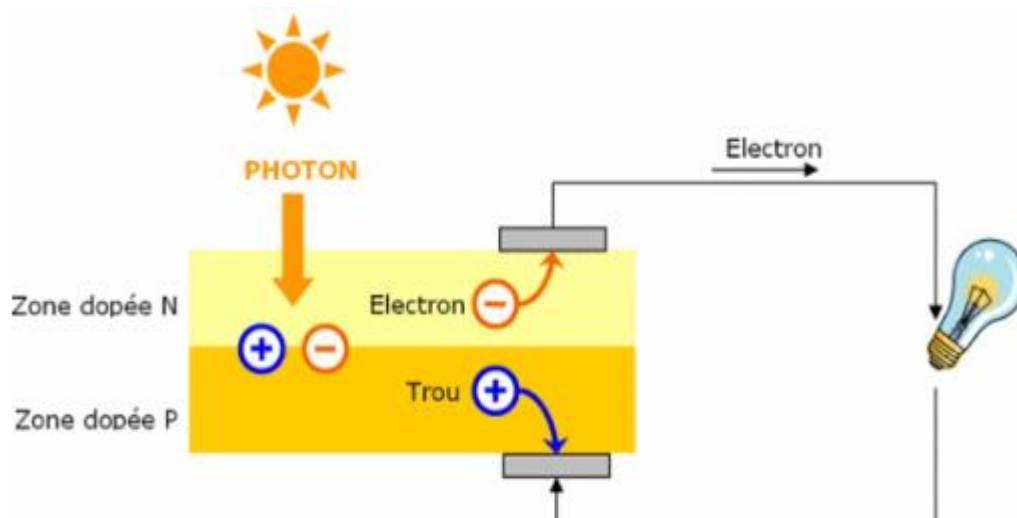


Figure.1.3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [1.9].

Au voisinage de cette jonction P-N, un champ électrique maintient la séparation des charges électriques. Lorsqu'un photon vient frapper la cellule, il arrache des électrons par effet photoélectriques et crée un pair électron - trou.

L'électron a suffisamment d'énergie pour franchir la jonction et il est collecté du côté N. Un courant électrique est donc créé.

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Le panneau photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise (voir fig 1.4).

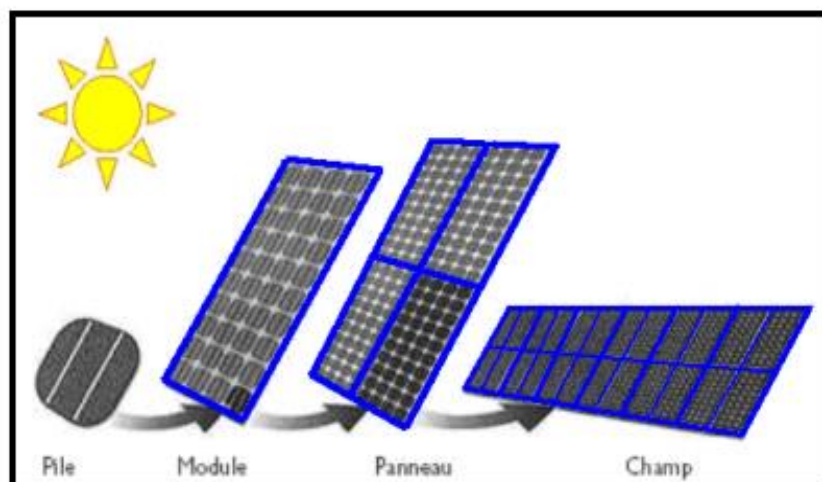


Figure 1.4 : La cellule au champ photovoltaïque [1.10].

Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec une orientation et un angle d'inclinaison spécifique. Le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands [1.6].

1.9 Technologies (types) des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium. Chaque type de cellules a un rendement qui lui est spécifique. Par contre quel que soit leurs types leurs rendement est assez faible de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent.

Il existe trois principaux types de cellules :

1.9.1 Les cellules monocristallines

Ce type de cellules (figure 1.5), sont caractérisées par un meilleur rendement ainsi qu'un coût très élevé, du fait que leurs fabrications est compliquées.

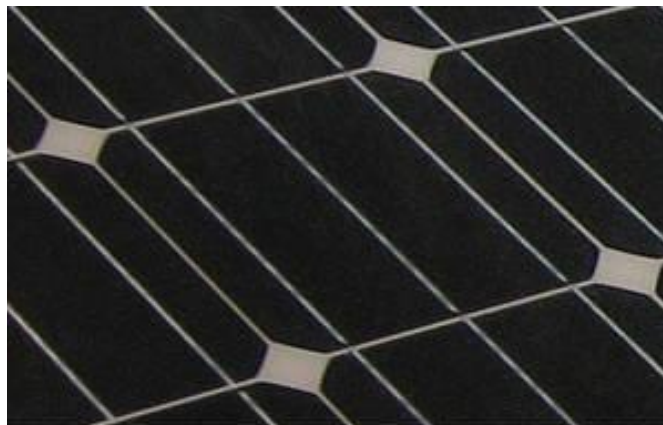


Figure.1.5 : Les cellules monocristallines

1.9.2 Les cellules poly cristallines

Les cellules poly cristallines (fig 1.6), sont caractérisées par un rendement plus faible, et un coût de fabrication moins important ainsi qu'une conception plus au moins facile.

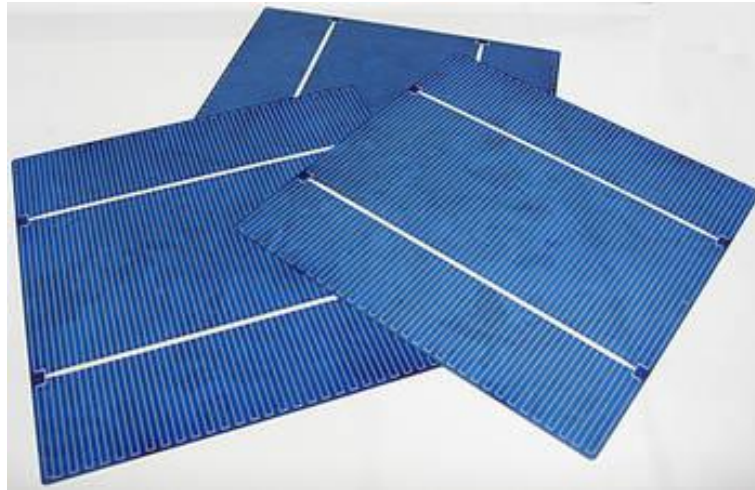


Figure.1.6 : Les cellules poly cristallines

1.9.3 Les cellules amorphes

Les cellules amorphes (fig 1.7), sont utilisées dans de petits produits tel que des calculatrices ou encore des montres elles ont un rendement assez faible, elles nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium donc un cout plus élevé [1.7].

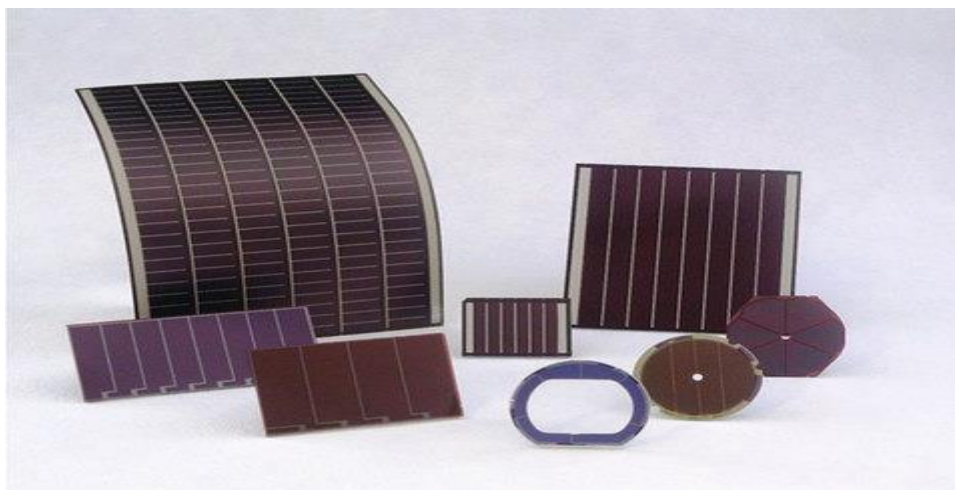


Figure.1.7 : Les cellules amorphe

1.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïques

On peut citer les inconvénients et les avantages suivants

1. 10. 1 Avantages

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [1.6].

1. 10. 2 Inconvénients

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28% ;

Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

1.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les différents types d'énergie solaire, le gisement solaire en Algérie puis nous avons décrit en détail le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et les différentes technologies des cellules photovoltaïques qui ont été développées.

1.12 Références

[1.1] K. Fathy, M. Ismail Salem, M. Mostafa, R. Aldin Yousef, S. Gamal Mohammed, Y. Zakaria El Sayed "ENERGY HARVESTING SYSTEM" Faculty of Engineering, Cairo University Giza Egypt July 2015

[1.2] Atmania Hanane., « La stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie, cas de la photovoltaïque », mémoire de Magister, Université d'Oran -2- Mohamed Ben Ahmed 15 Janvier 2015 ;

[1.3] Zidane Nourredine. « Étude et Dimensionnement des Systèmes de Production d'Énergies Renouvelables », mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Ferhat Abbas -Setif 1 , 02/12 / 2014;

[1.4] Définition | Énergie solaire | Futura Planète (futura-sciences.com)

[1.5] Énergies renouvelables : définition, exemples, avantages et limites (youmatter.world)

[1.6] A. Karkarine « Modélisation et contrôle d'un système Photovoltaïque » Mémoire de master ;

[1.7] K. Ouabdelkader, H. MERSEL « Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau » Mémoire de fin de cycle ;

[1.8] Centre de Développement des Énergies Renouvelables.

<https://www.cder.dz/spip.php?article40>. (09/06/2021)

[1.9] Principe d'une cellule photovoltaïque http://public.iutenligne.net/etudes-et-realizations/sivert/panneaux-photovoltaiques/2_principe_dune_cellule_photovoltaique.html

[1.10] S. Belaid. " Cours énergie solaire photovoltaïque " .2021

Chapitre 2

Modélisation et Simulation D'un PV

2.1 Introduction

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui transforme l'énergie lumineuse en courant électrique. La première photopile a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs de laboratoire Bell (avec un rendement de 6%), qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des quelques années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quittés les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. Actuellement, l'objectif essentiel est devenu la production de l'électricité, sans pollution, pour l'alimentation des réseaux de distribution [2.1].

Dans ce chapitre nous allons modéliser un module photovoltaïque. Cette modélisation permet de trouver la variation instantanée de la puissance de PV en fonction de leur tension. Pour la modélisation et la simulation de PV, nous avons utilisé le logiciel MATLAB®-SIMULINK®.

2.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électronique équivalent ci-dessous (figure 2.1). Nous pouvons considérer le cas d'une cellule idéale comprenant d'une source du courant et une diode en parallèle avec une résistance en série R_s [2.2] :

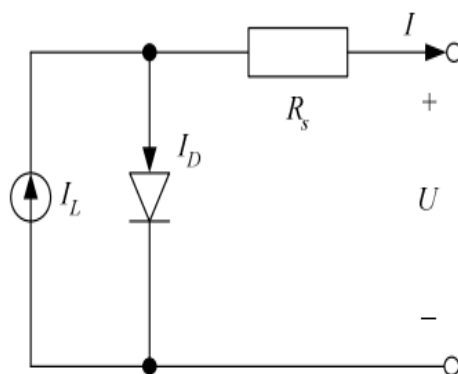


Figure : 2.1 : Schéma équivalent d'une cellule solaire [2.2].

D'après le circuit électrique de la figure (2.1), on a :

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{U + IR_s}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

Avec :

I_L : Photo- courant générée (A)

I_0 : Courant de saturation (A)

I : Courant fourni par la cellule (A)

U : Tension aux bornes de la cellule (V)

R_s : Résistance en série (Ω)

α : Tension thermodynamique (V)

Le photo-courant I_L peut être calculé comme :

$$I_L = \frac{\phi}{\phi_{ref}} [I_{L,ref} + \mu_{I,SC} (T_C - T_{Cref})] \quad (2.2)$$

Avec :

Φ : Eclairement (irradiation solaire) réels (w/m^2)

Φ_{ref} : Eclairement dans la condition de référence ; Φ_{ref} 1000 w/m^2 à 25°C

T_C : Température de la cellule (°C)

$T_{c,ref}$: Température de cellule à la condition de référence (25°C)

$\mu_{I,CS}$: Coefficient de sensibilité de l'intensité a la température ($A/^\circ C$)

Le courant de saturation I_0 est donné par la relation suivante :

$$I_0 = (I_{CC} \cdot \exp(\frac{V_{OC}}{aV_t}) - 1) \cdot (\frac{T_C + 237}{T_{Cref} + 273})^3 \cdot \exp[\frac{q \cdot E_g}{a \cdot K} \cdot (\frac{1}{T_{cref}} - \frac{1}{T_C})] \quad (2.3)$$

Avec :

$V_t = K \cdot T_C / q$: La tension thermique à la température T_C

$q = 1,602 \cdot 10^{-19} C$: La charge de l'électron

$K = 1,381 \cdot 10^{-23} J/K$: La constante de Boltzmann

$E_g = 1,17 eV$: L'énergie de gap pour le silicium.

a: Facteur d'idéalité de la diode

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

V_{OC} : Tension à circuit ouvert (V) [2.2]

$$\alpha = \frac{T_C + 273}{T_{C,ref} + 273} \alpha_{ref}$$

(2.4)

Avec : α_{ref} : la valeur de α dans les conditions référentielles.

2.3 Résultats obtenus

Le schéma bloc du module PV étudié est donné par la figure 2.2, ce module est constitué de 153 cellules en série, dont Les blocs A, B et C sont détaillés en annexe1.

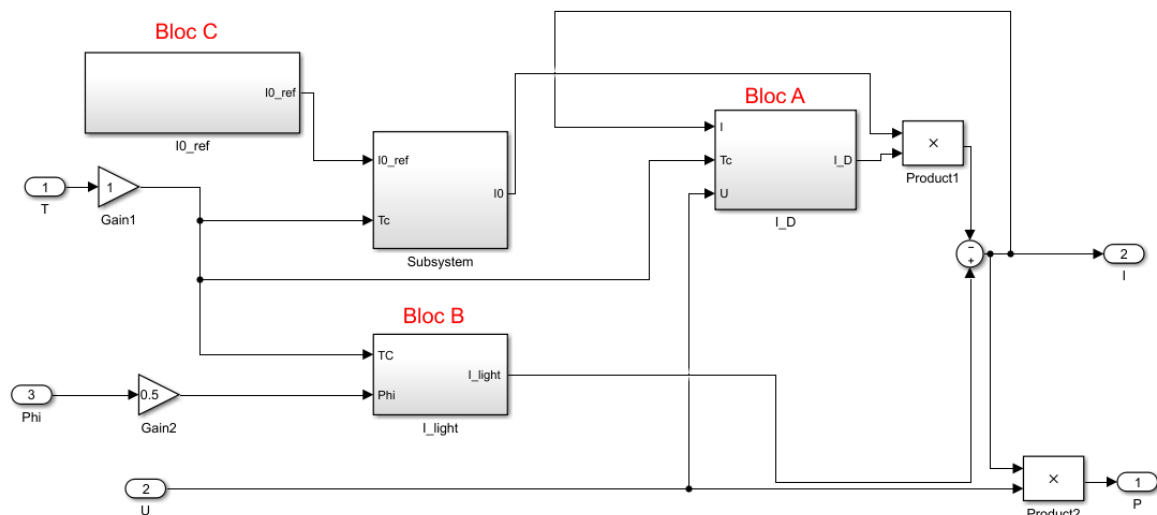


Figure 2.2 : Schéma bloc du module PV

Les valeurs des paramètres de simulation de PV sont données par le Tableau 1 suivant :

Tableau 2.1 : Caractéristiques du module PV à 25°C et 1000 W/m² [2.2]

$I_{L,ref}(I_{SC,ref})$	2.664 A
α_{ref}	5.472 V
Φ_{ref}	1000 W/m ²
$T_{c,ref}$	25 °C
R_s	1.324 Ω
$I_{mp,ref}$	2.448 A
$U_{mp,ref}$	70.731 V
$U_{oc,ref}$	87.72 V

2.3 Caractéristiques de module photovoltaïque

Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du module PV étudié sont présentées dans les figures suivantes :

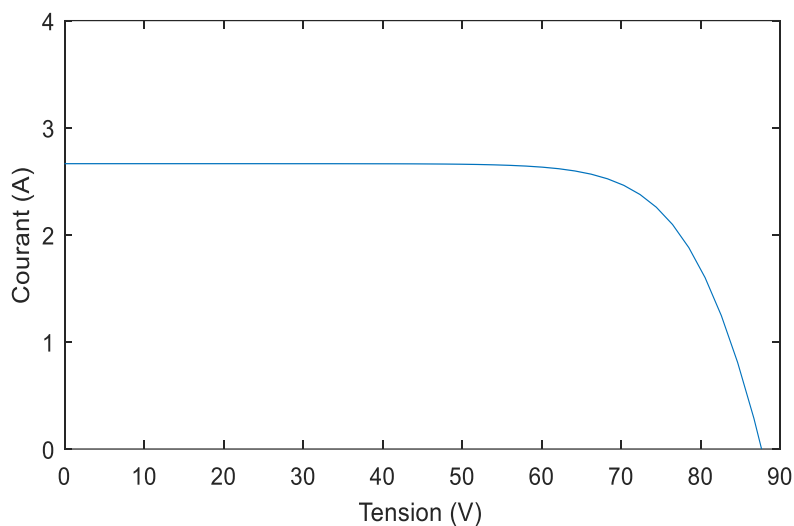


Figure 2.3 : Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque pour $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$.

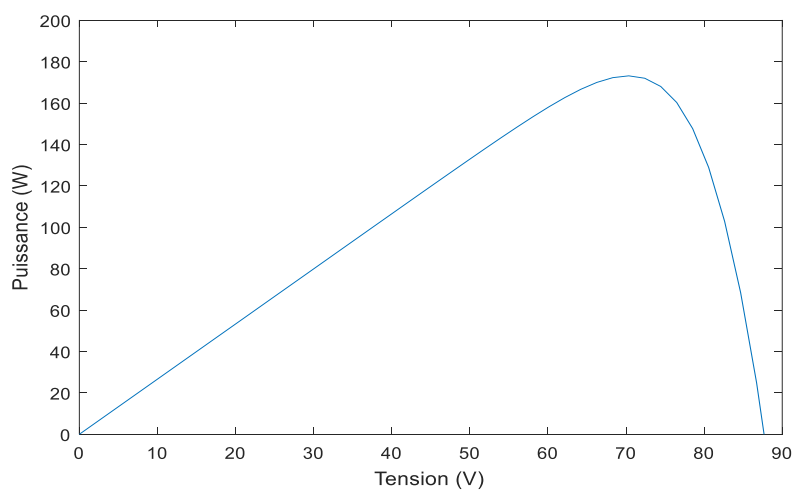


Figure 2.4 : Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque pour $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$.

D'après ces deux figures, on remarque bien que :

L'évolution du courant commence du courant de court-circuit qui correspond à une tension nulle jusqu'au circuit ouvert dont le courant est nul et la tension atteint sa valeur maximale.

La puissance commence de zéro, elle atteint une valeur maximale à une tension V_{mp} (c'est le point de la puissance maximale PPM) puis elle s'annule lorsque la tension atteint sa valeur maximale (tension de circuit ouvert V_{oc}).

2.3.1 Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du module photovoltaïque

2.3.1.1 Influence de l'irradiation

Les Figures 2.5 et 2.6 représentent respectivement l'évolution du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différentes valeurs de l'ensoleillement et une température $T = 25^{\circ}\text{C}$.

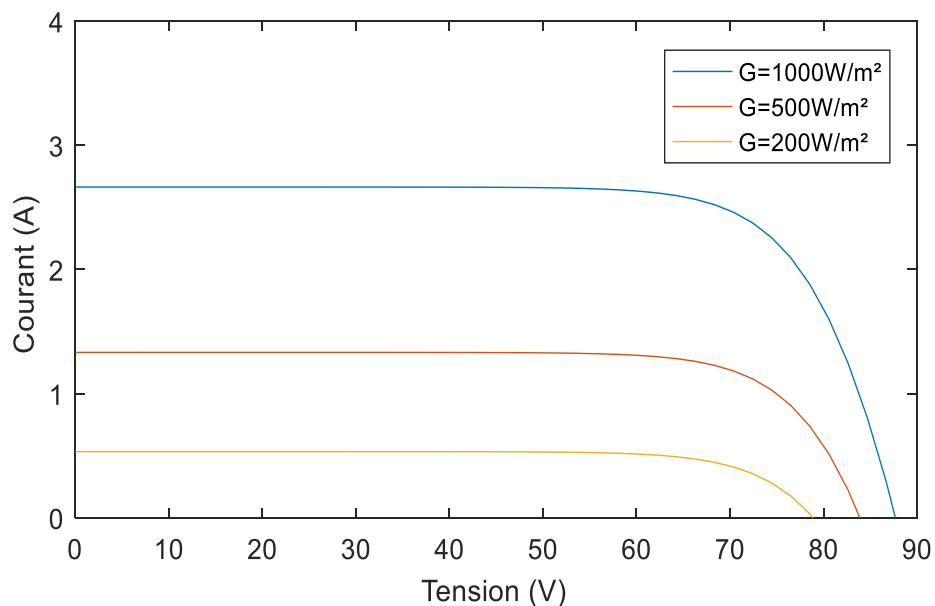


Figure 2.5 : Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ($G=200, 500, 1000 \text{ W/m}^2$) et $T_c=25^{\circ}\text{C}$.

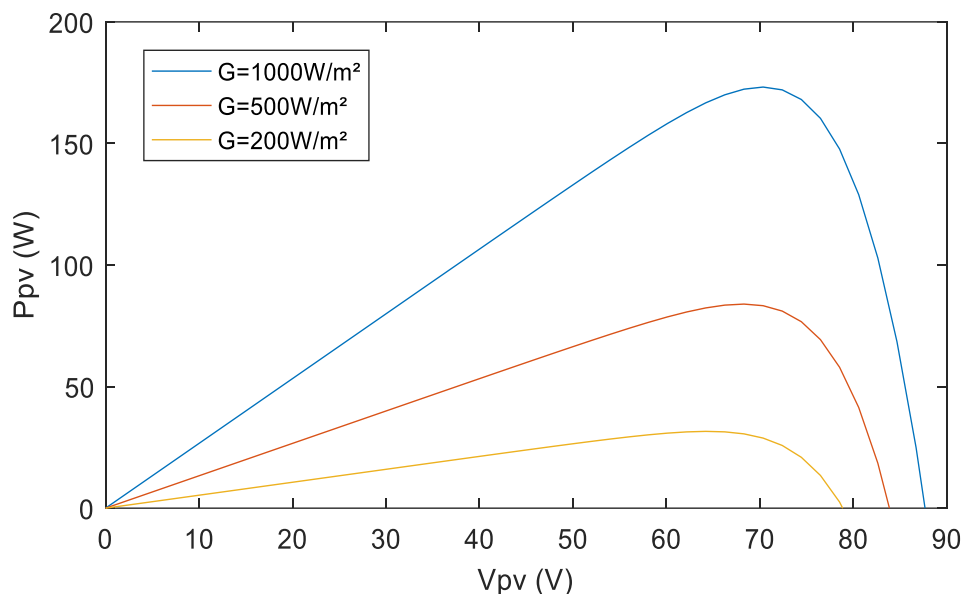


Figure 2.6 : Caractéristique puissance –tension d'un module photovoltaïque pour différent niveau d'irradiation ($G=200, 500, 1000\text{ W/m}^2$) et $T_c=25\text{ }^\circ\text{C}$.

2.3.1.2 Influence de la température

Les figures 2.7 et 2.8 montrent respectivement les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ pour différentes valeurs de la température et un éclairement constant :

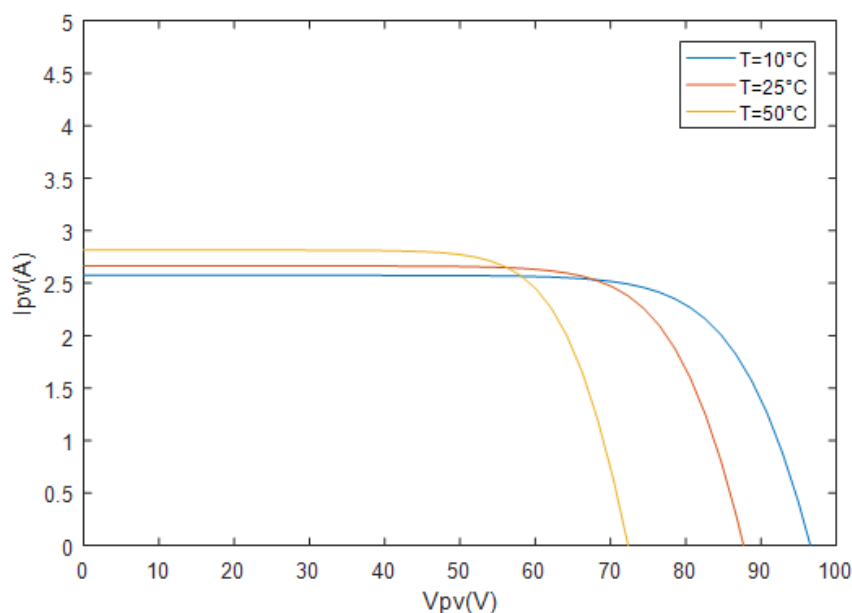


Figure 2.7 : Caractéristique courant –tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=10, 25, 50\text{ }^\circ\text{C}$) et $G = 1000\text{W/m}^2$.

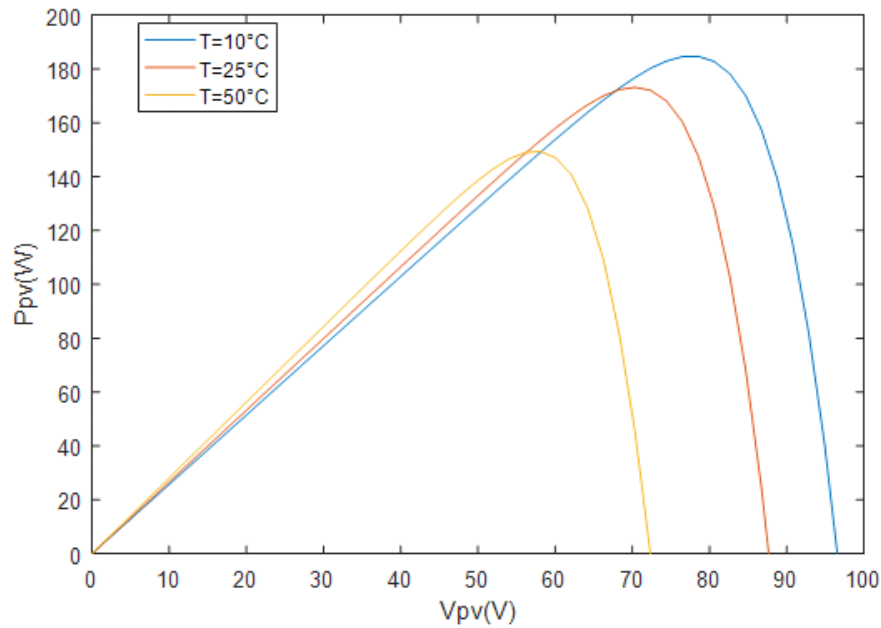


Figure 2.8 : Caractéristique puissance –tension d'un module photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=10, 25, 50$ °C) et $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$.

D'après ces figures on constate bien que lorsque la température augmente la tension de circuit ouvert V_{oc} décroît fortement et le courant de court-circuit I_{sc} augmente légèrement.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque puis sa modélisation et la simulation avec les différentes caractéristiques de celle-ci. Enfin nous avons vu l'influence des conditions climatiques (l'éclairement et la température) sur la caractéristique courant- tension et la caractéristique puissance-tension d'un PV.

2.5 Références

[2.1] A. Karkarine ,''Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque'', Mémoire de master. 2017.

[2.2] Caisheng Wang ,''modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems '' doctoral thesis. montana state university Bozeman, Montana July 2006

Chapitre 3

La Poursuite du Point de Puissance Maximum et le convertisseur DC-DC

3.1 Introduction

L'énergie électrique photovoltaïque est utilisée directement pour alimenter une charge, ou bien elle injectée à un réseau électrique. La chaîne de conversion de l'énergie photovoltaïque fonctionne dans une large gamme de tension de sortie, mais ne peut délivrer qu'une puissance maximale à un point particulier appelé point de puissance maximale (MPPT) [3.1], alors un contrôleur pour la recherche de point de puissance maximale (MPPT) et donc nécessaire.

Ce chapitre décrit en détail les différents techniques de suivre le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque ainsi la modélisation d'un convertisseur DC-DC de type élévateur.

3.2 Le Convertisseur MPPT

3.2.1 Principe de la commande MPPT

La figure 3.1 donne le schéma fonctionnel d'une chaîne de conversion de l'énergie photovoltaïque. Le système se compose d'un panneau PV, d'un convertisseur DC-DC, d'une commande de poursuite du point de puissance maximale et d'une charge. La commande MPPT agit sur le rapport cyclique d'une manière automatique [3.1].

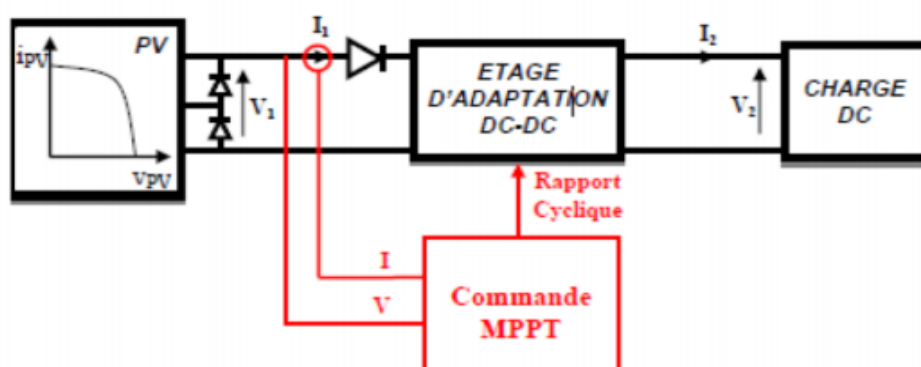


Figure 3.1 : Schéma fonctionnel d'une chaîne de conversion de l'énergie photovoltaïque [3.1].

Actuellement on compte un nombre important de techniques de commande MPPT, commençant par des techniques simple comme les contrôleurs MPPT basée sur le courant de court-circuit et de la tension en circuit-ouvert, aux contrôleurs plus performants utilisant un algorithme pour atteindre le MPP. Parmi ces techniques, on peut citer :

-Perturbation et observation.

- Incrémentation de la Conductance.
- La logique floue [3.1].

3.3 L'algorithme Perturbe & Observe

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV. Sur la figure (3.2), on voit que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente, l'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue, alors l'algorithme inversera la direction de la perturbation suivante.

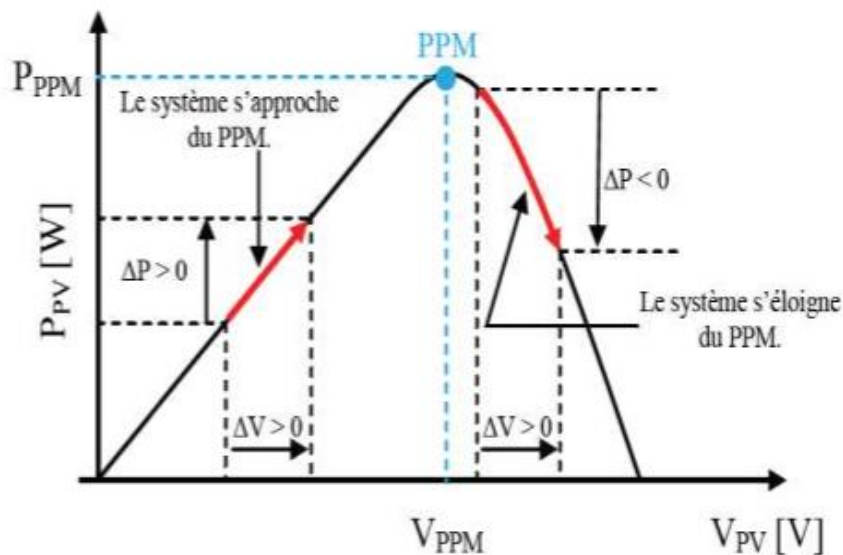


Figure 3.2 : Principe de La méthode P&O [3.1].

Le fonctionnement de l'algorithme P&O peut donc ainsi résumer par l'organigramme suivant :

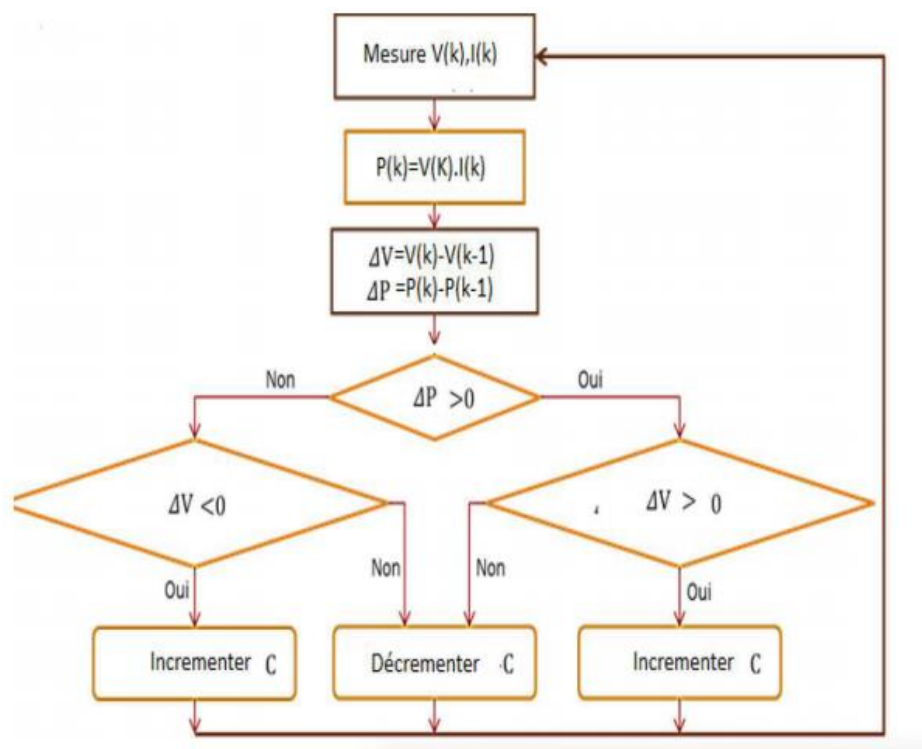


Figure 3.3 : Organigramme de la méthode P&O [3.1]

C : le rapport cyclique qui ramène le système vers le point de puissance maximale [3.1].

3.4 Conductance incrémentale (Inc-Cond)

Cette technique est basée 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 [3.2] :

$$G = \frac{I}{V} \quad (3.4)$$

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

$$dG = \frac{dI}{dV} \quad (3.5)$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du GPV par rapport à la tension 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. La figure (3.4) permet d'écrire les conditions suivantes :

$$\frac{dP}{dV} > 0, \text{ le point de fonctionnement est à gauche du PPM}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0, \text{ le point de fonctionnement est à droite du PPM}$$

$$\frac{dP}{dV} = 0, \text{ le point de fonctionnement est sur le PPM}$$

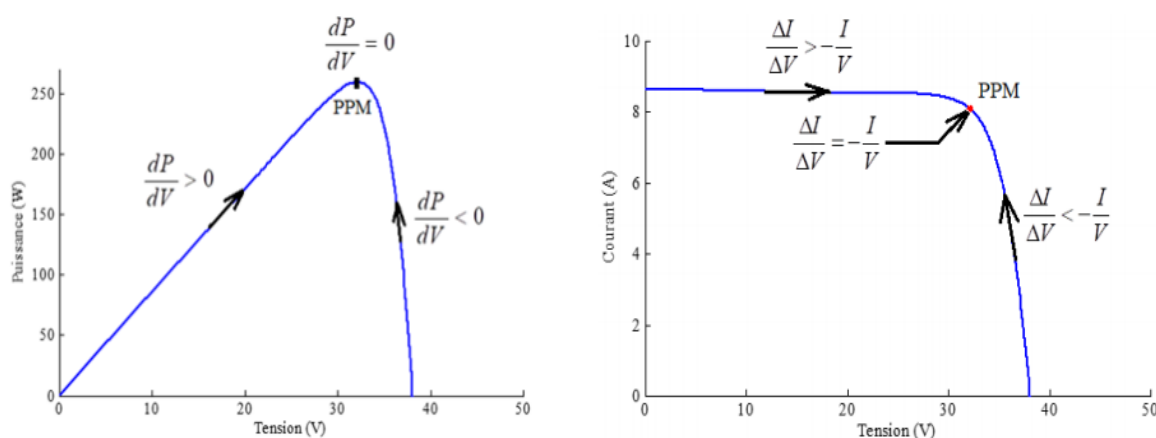


Figure 3.4: Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de la dérivée de la conductance G et de la puissance P [3.2].

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (3.4) et la dérivée de la puissance $\frac{dP}{dV}$ peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \tag{3.6}$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$: Le point de fonctionnement est situé à gauche du PPM, donc on augmente la tension V, jusqu'à atteindre le PPM et cela en diminuant le rapport cyclique α .

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$: Le point de fonctionnement est sur le PPM, donc la tension et le rapport cyclique α restent constants.

Si $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$: Le point de fonctionnement est situé à droite du PPM, donc on diminue la tension V jusqu'à atteindre le PPM et cela en augmentant le rapport cyclique α .

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance ($\frac{I}{V}$) avec celle de l'incrément de conductance ($\frac{\Delta I}{\Delta V}$), comme l'illustre l'algorithme de la figure (3.5).

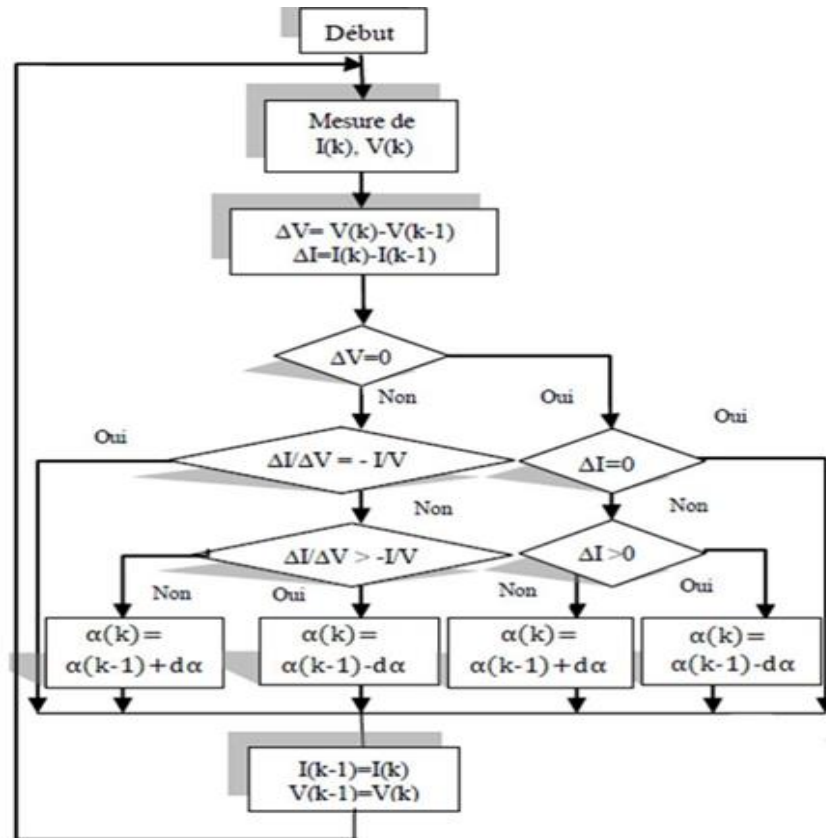


Figure 3.5 : Organigramme de l'algorithme Inc-Cond [3.2].

$d\alpha$: Pas d'incrément de l'algorithme Inc-Cond [3.2].

3.5 Méthode linéaire

C'est une méthode très simple et facile à implémenter et qui donne des résultats acceptables.

En partant de quelques approximations sur le modèle de la cellule PV, on peut admettre une relation linéaire entre le courant optimal I_{mp} (le courant à la puissance maximale) du GPV et le courant de court-circuit I_{sc} , on peut donc écrire :

$$I_{mp} = K_c \cdot I_{sc} \quad (3.7)$$

De même, une relation linéaire entre la tension optimale et la tension de circuit-ouvert ouvert V_{oc} donne :

$$V_{mp} = K_v \cdot V_{oc} \quad (3.8)$$

Avec :

K_c et K_v des constantes (<1) :

K_c : Facteur de courant ;

K_v : Facteur de tension.

Cette méthode nécessite peu de composants à l'implémentation mais en réalité les coefficients K_c et K_v ne sont pas vraiment constants vu la non-linéarité du modèle de la cellule et aussi ils dépendent légèrement de la température et de l'ensoleillement ce qui nécessite parfois la détermination des nouvelles valeurs de ces facteurs périodiquement ce qui s'avère un peu compliqué [3.3].

3.6 L'intelligence artificielle pour la poursuite du point de puissance maximum

Plusieurs algorithmes MPPT à base de l'intelligence artificielle ont été développés, comme celui qui est basé sur la logique floue, réseaux de neurones, Neuro – Floues et les algorithmes génétiques.

3.7 Les convertisseurs DC-DC

Constituent une partie assez importante de la chaîne de conversion. Ils sont utilisés largement dans les connexions à des batteries d'accumulateurs, les systèmes photovoltaïques, les éoliennes, les systèmes hybrides, Ces convertisseurs servent à adapter la tension d'entrée d'un système par rapport à la tension de sortie désirée [3.4].

3.7.1 Modèle mathématique du convertisseur parallèle

Le modèle mathématique du hacheur parallèle (Boost) est obtenu par l'application des lois de Kirchhoff sur le schéma de base du hacheur, représenté en figure (3.6) et par rapport au régime de fonctionnement et la condition de l'interrupteur S.

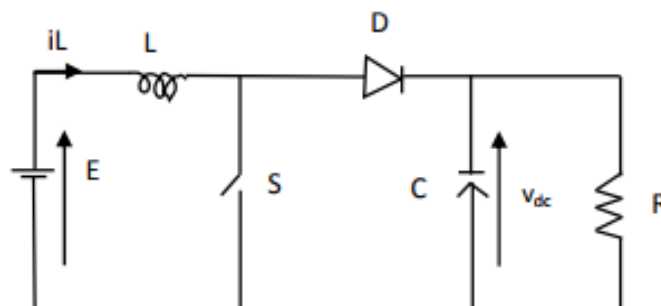


Figure 3.6 Schéma de principe du hacheur parallèle [3.4]

$$L \frac{di_L}{dt} = E - V_{dc}(1 - \alpha) \quad (3.9)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_L(1 - \alpha) - \frac{V_{dc}}{R} \quad (3.10)$$

Les équations dynamiques du hacheur sont dérivées pour le courant dans l'inductance et la tension aux bornes du condensateur en régime de conduction continu exprimé en (3.9) et (3.10)

Où

i_L : courant dans la bobine L,

E : tension d'entrée,

V_{dc} : tension de sortie

α : est la commande.

Les paramètres du système sont :

L : l'inductance de la bobine en [H],

C : la capacité du condensateur en [F]

R : la résistance de la charge R en [Ω].

Le signal de contrôle α est compris dans le domaine discret de $\{0;1\}$ et il indique l'état de l'interrupteur S : ouvert pour 0 et fermé pour 1. Il peut être remplacé par sa valeur moyenne sur une période de découpage α qui représente le rapport cyclique $\alpha=T_{on}/T_s$

où :

T_{on} : le temps de conduction ;

T_s : la période de découpage [3.4].

3.7.2 Commande du convertisseur

La commande du convertisseur doit maintenir la tension de sortie de convertisseur à sa référence malgré les demandes de puissance sur la charge et malgré les variations de la tension de PV

Dans ce travail, la commande de ce convertisseur se fait par un Contrôle direct du rapport cyclique (VMC : Voltage Mode Control)

3.7.3 Contrôle direct du rapport cyclique (Voltage Mode Control)

Le schéma représentatif de la boucle de régulation VMC d'un convertisseur DC-DC avec retour unitaire en utilisant un PI est donné par la figure (3.7).

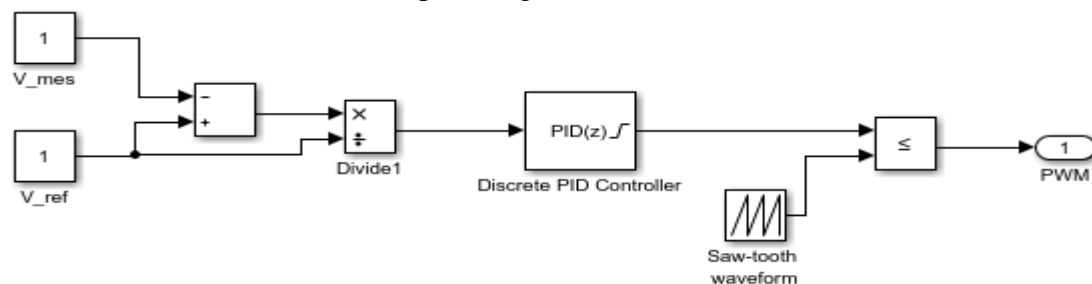


Figure 3.7. Schéma de la commande par contrôle direct du rapport cyclique.

La grandeur à asservir (en général la tension de sortie) est comparée à une valeur de référence. Le signal d'erreur est ensuite corrigé et comparé à un signal en dents de scie afin d'élaborer le signal de commande.

Cette méthode est assez simple à mettre en œuvre et a l'avantage de ne pas nécessiter de modélisation complexe du convertisseur.

Un régulateur PI est conçu pour augmenter le gain à basses fréquences et de réduire l'erreur en régime permanent entre la tension de sortie désirée et réelle tout en gardant une marge de phase (PM) positive à fréquence choisie [3.5].

3.7.4 Contrôle direct du rapport cyclique du convertisseur Boost

Le circuit électrique du convertisseur Boost régulé en VMC est présenté sur la figure (3.8):

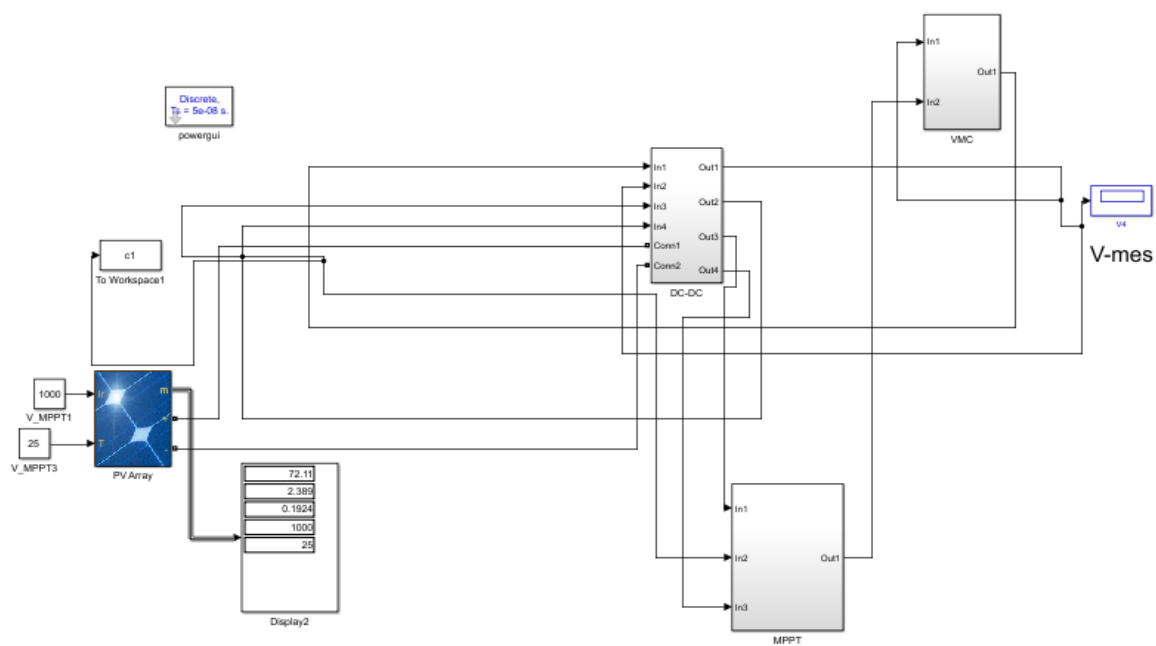


Figure 3.8. Schéma du convertisseur Boost régulé en VMC

3.7.5 Résultats de simulation

Afin de vérifier l'efficacité de la méthode VMC, le convertisseur Boost est simulé lors de la variations brutales de courant du charge (fig 3.9) et de l'éclairement (voir la figure 3.10) avec les paramètres de PID suivantes : $K_p = 100$, $K_i = 2$ et $K_d = 0.2$.

Les figures 3.11 et 3.12 montrent respectivement la variation de la tension de sortie de hacheur et la tension de sortie de PV.

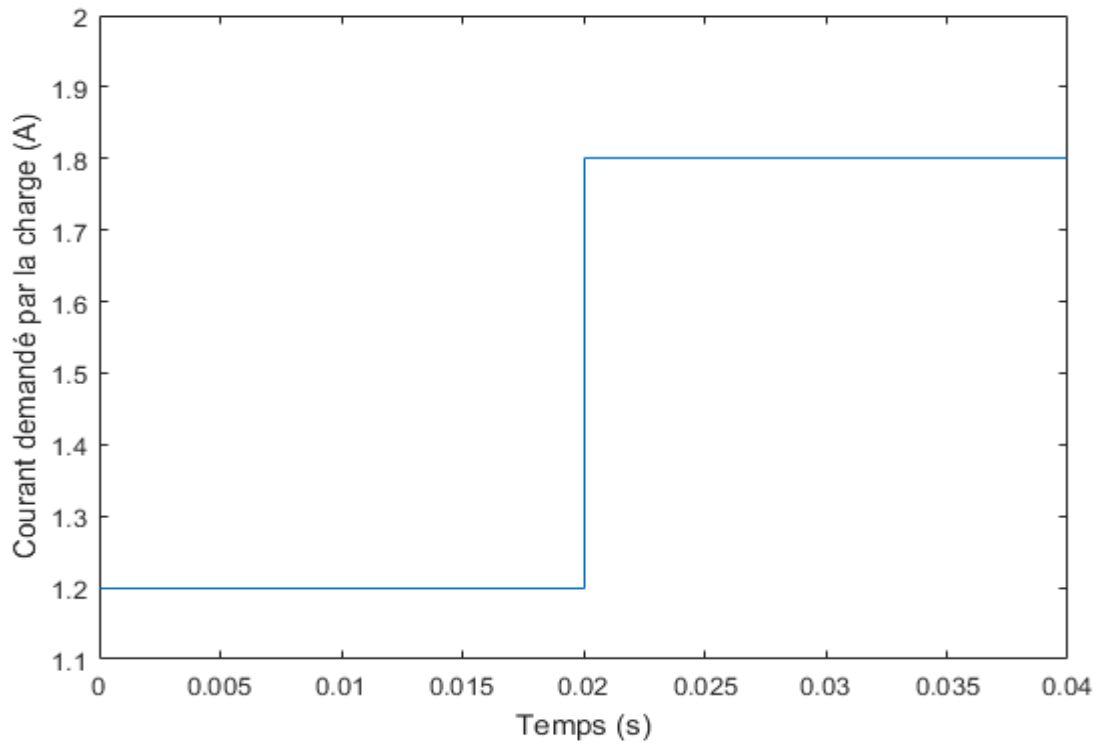


Figure 3.9 : Courant demandé par la charge.

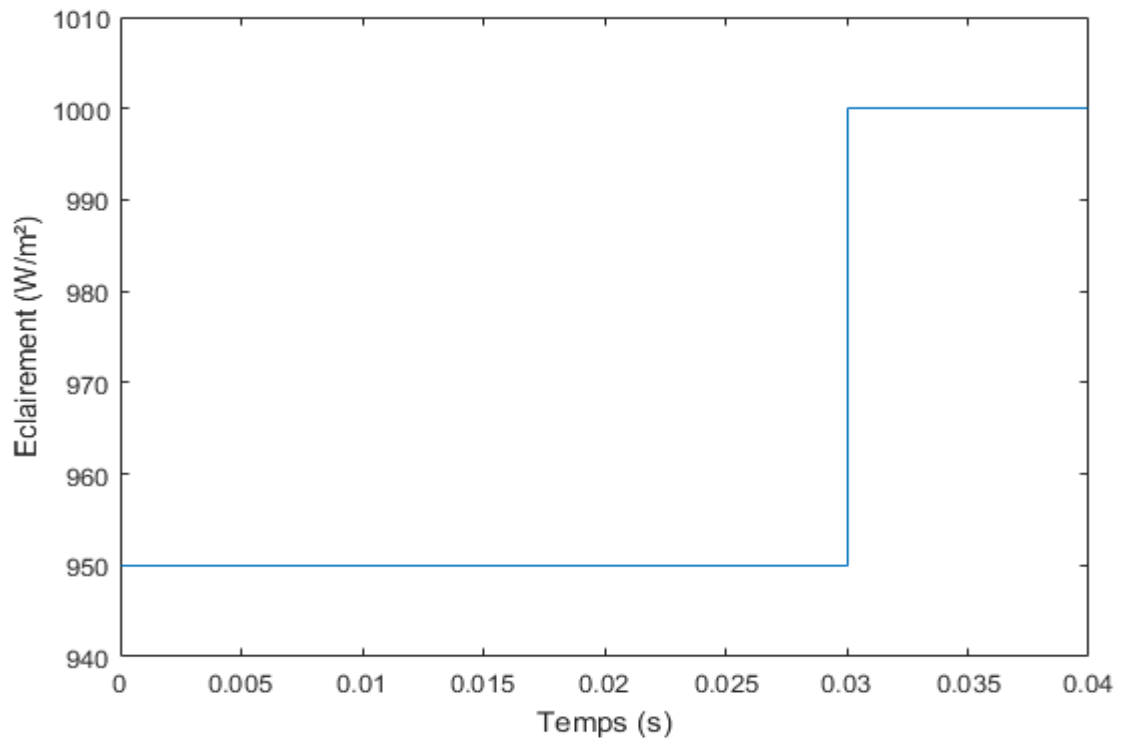


Figure 3.10 : La variation de l'éclairage.

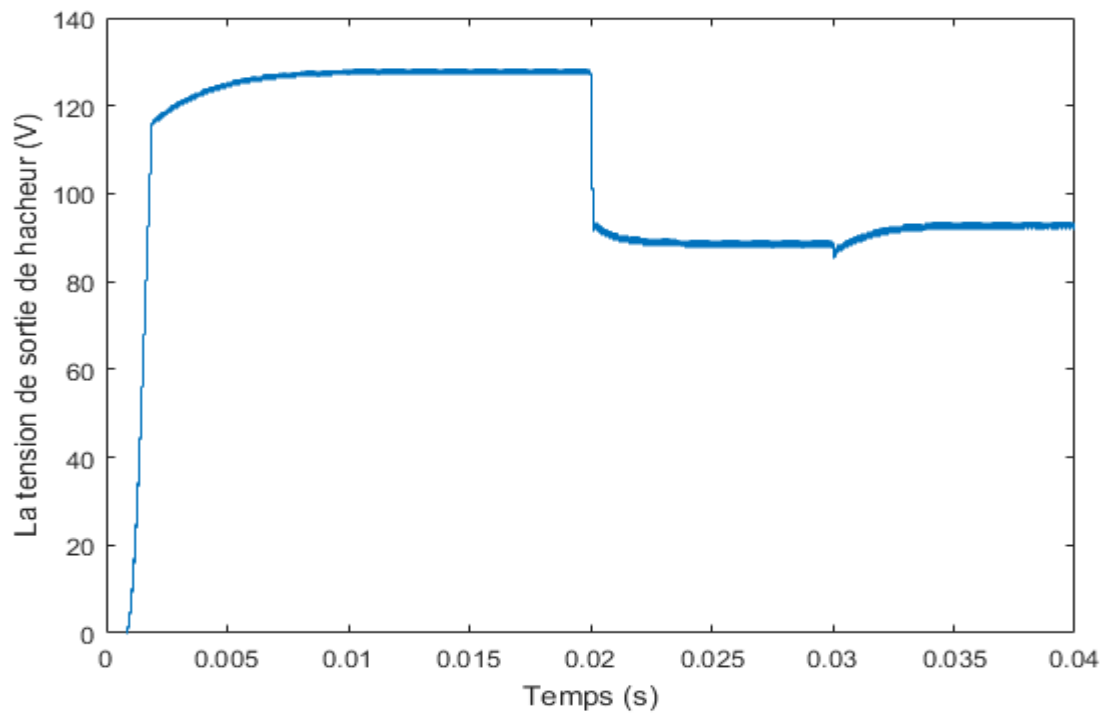


Figure 3.11 : Tension de sortie de hacheur

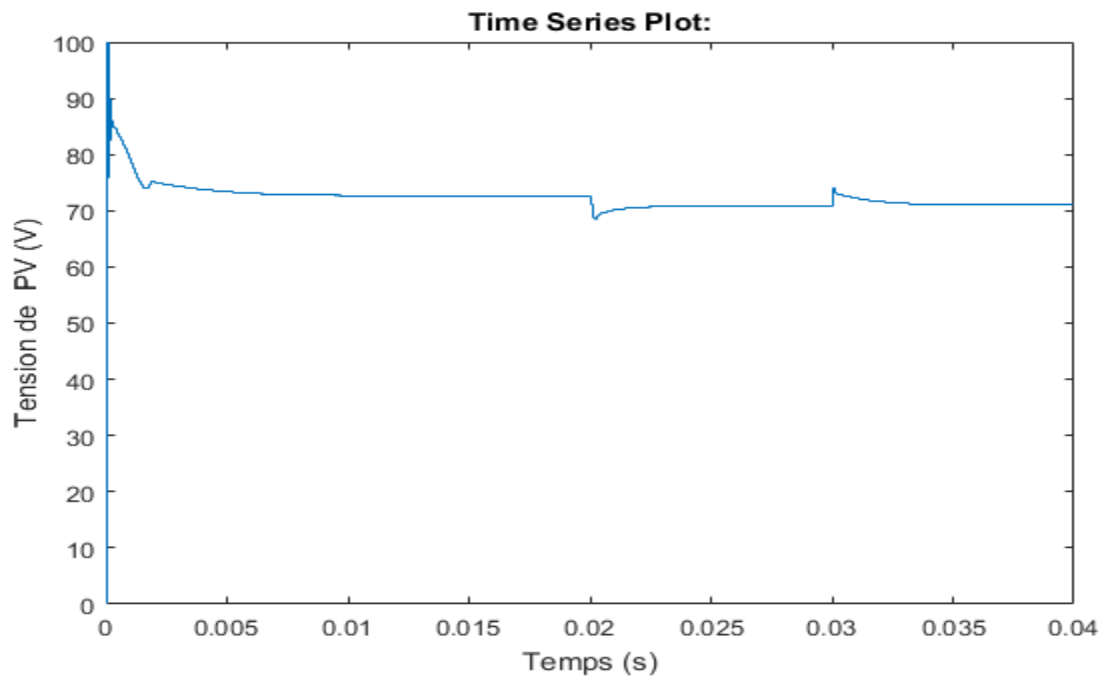


Figure 3.12 : La tension de sortie du PV

La courbe de puissance optimale et la courbe de puissance maximisée par le MPPT sont représentées sur la Figure 3.13.

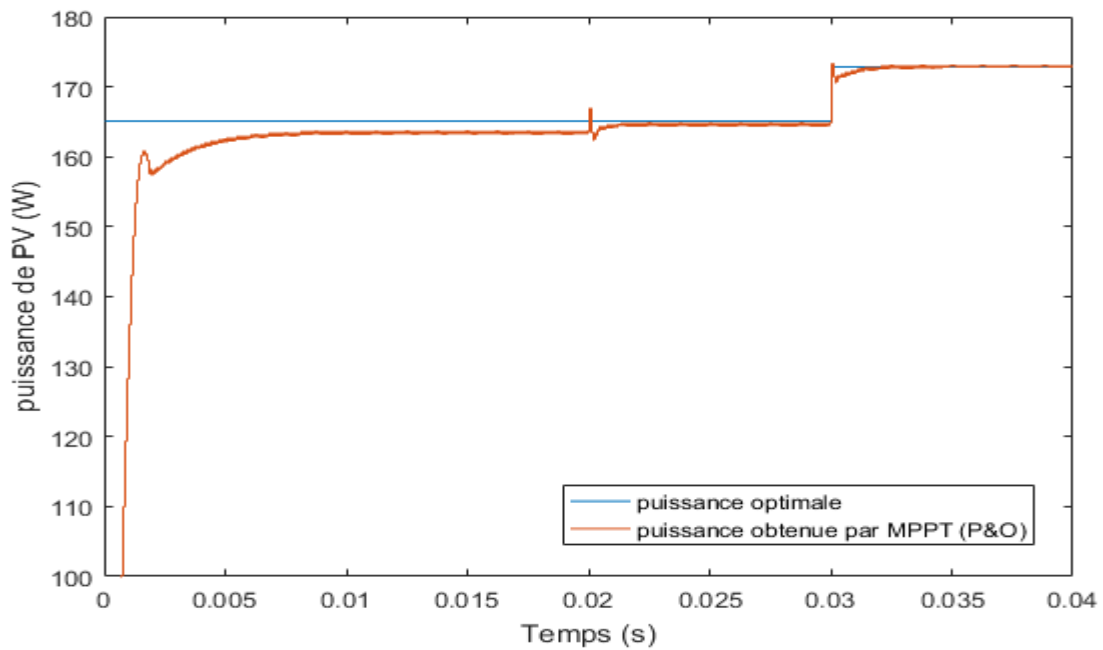


Figure 3.13 : Puissance optimale et maximisée par le contrôleur MPPT (P&O).

La Figure 3.14 donne l'efficacité du contrôleur MPPT par l'utilisation de l'algorithme P&O.

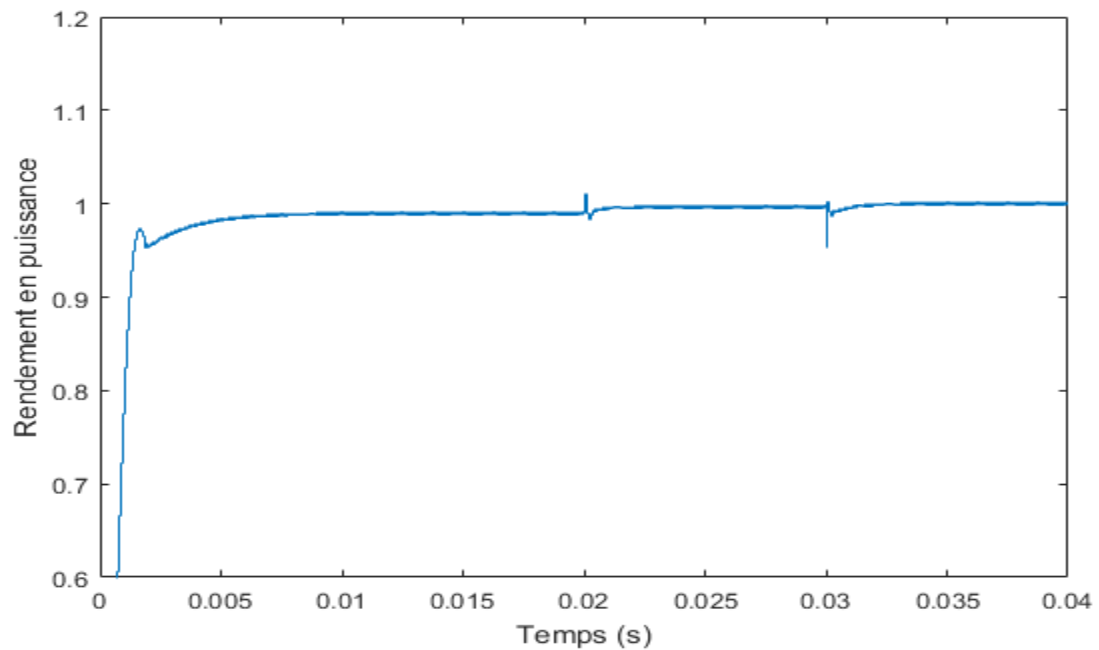


Figure 3.14 : L'efficacité du contrôleur MPPT.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes techniques utilisées pour suivre le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque ainsi la modélisation d'un convertisseur DC-DC de type élévateur.

Les résultats obtenus montrent le bon comportement, l'efficacité et la robustesse du contrôleur MPPT proposé.

3.9 Références

[3.1] I.Zemghassene “Recharge d’une batterie avec un panneau photovoltaïque et poursuite de point de puissance maximale” Master académique en Automatique UMMTO 2018

[3.2] N.Berreziga, S.Babou, « commande directe par la méthode incrémentale conductance (Inc-Cond) d’un panneau photovoltaïque » Master en électrotechnique Université de Tizi-Ouzou septembre 2018

[3.3] Hadji Slimane Thèse de doctorat “Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie photovoltaïque” Université Ferhat Abbas de Sétif octobre 2018

[3.4] S.Arab – D.Toudert “Etude d’un Système Photovoltaïque” Mémoire de fin d’études en vue d’obtention Master académique Université de Tizi-Ouzou 2017

[3.5] M. BERROUBI Abdenoure “Commande par mode de glissement des convertisseurs Buck et Boost intégrés dans un système photovoltaïque” Mémoire Master en génie électrique

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a pour but d'étudier la modélisation et la simulation d'un panneau solaire photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC.

Dans le premier chapitre, et après un exposé sur les différents types d'énergie solaire, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est présenté.

Puis nous avons présenté, dans le deuxième chapitre, la modélisation et la simulation en statique et en dynamique d'un panneau solaire photovoltaïque ainsi une étude paramétrique sur la caractéristique électrique de PV.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les différentes techniques utilisées pour suivre le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque ainsi la modélisation d'un convertisseur DC-DC de type élévateur.

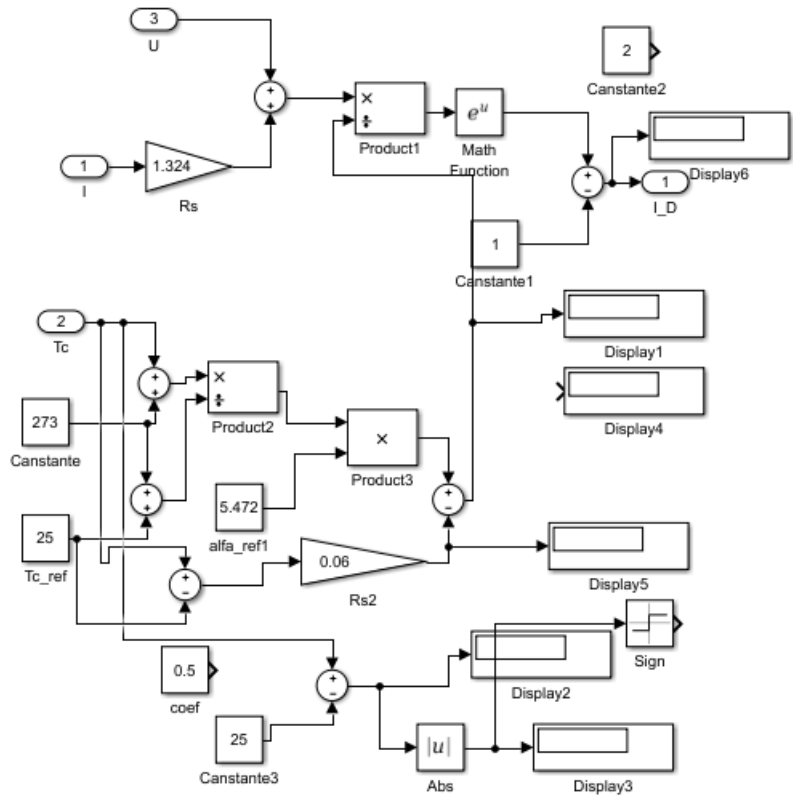
Le convertisseur DC/DC, utilisé a pour but d'adapter la tension de PV à la tension de charge et utilisé aussi pour la commande de bloc MPPT.

Pour cela l'algorithme P&O (Perturbe & Observe) de bloc MPPT est utilisé

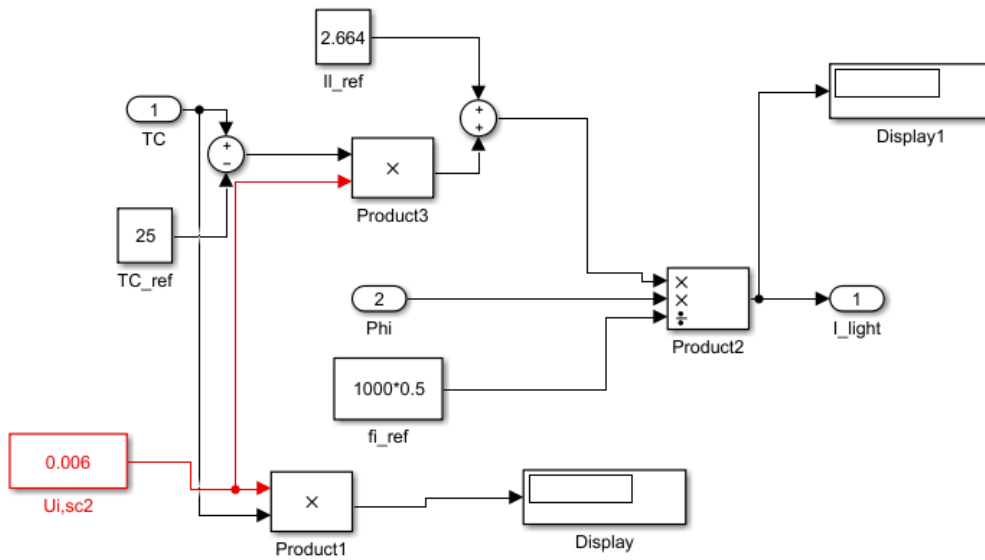
.Les résultats trouvés, montrent l'efficacité et la robustesse du contrôleur MPPT proposé

Annexe

Annexe

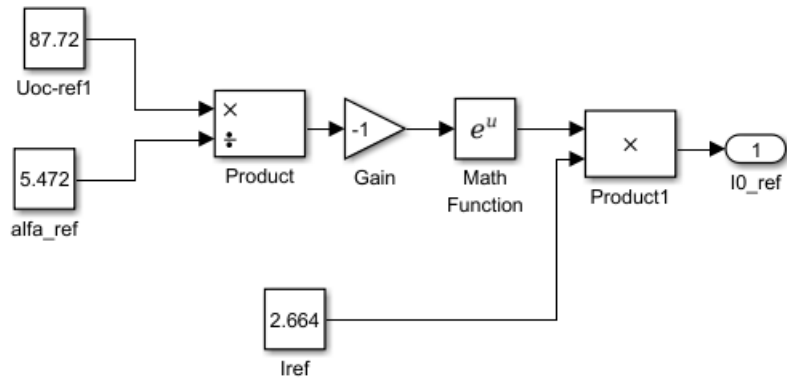


Bloc A : Le courant I_D



Bloc B : Le courant I-light

Annexe



Bloc C : Le courant I_{0_ref}