

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Saâd DAHLAB Blida-1
Faculté de Technologie
Département des Énergies Renouvelables



Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de master académique en énergies renouvelables
Option : conversion photovoltaïque

THEME :

*Etude comparative entre deux algorithmes MPPT basés sur
la méthode P&O et mode glissant pour les systèmes
photovoltaïques.*

Réalisée par :

Melle. **HARBIT ASSIA-SARAH.**

Dirigé par :

Mr **R. BOUKENOUI.**

Soutenu devant les jurys composé de :

NOM	Prénom	université	jury
Mr DOUMAZ	TOUFIK	USDB1	Président
Dr GUENOUNOU	ABDERREZAK	USDB1	Examineur
Dr BOUKENOUI	RACHID	USDB1	Promoteur

ملخص

في عصر التنمية المستدامة ، أظهرت التكنولوجيا الكهروضوئية إمكانات كبيرة كمصدر للطاقة المتجددة. تركز أطروحة الماستر هذه على تحسين أداء النظام الكهروضوئي باستخدام خوارزمية مناسبة للتحكم في واجهة الطاقة. الهدف الرئيسي هو العثور على التحكم الأكثر كفاءة والأفضل لاستخراج الطاقة القصوى التي يوفرها المولد الكهروضوئي في ظل ظروف جوية مختلفة. يسمى تتبع أقصى نقطة للطاقة "MPPT".

في هذا العمل ، تم إجراء دراسة تتبع الطاقة القصوى ، وتنفيذ النظام الكهروضوئي بالإضافة إلى دراسة الخوارزميتين المعروفتين جيدًا (أي الوضع المنزلق و اضطراب ومراقبة) في ظل الظروف الجوية المتغيرة من خلال استخدام برنامج / MATLAB SIMULINK. ثم تم إجراء دراسة مقارنة بين هاتين الخوارزميتين. من الجدير بالذكر أن نظامنا يتكون من لوحة الكهروضوئية ومحول DC-DC وجهاز تحكم MPPT من أجل تحديد التحكم الأكثر موثوقية من حيث الكفاءة ووقت الاستجابة والتذبذبات.

الكلمات الرئيسية محول دفعة ، وضع منزلق ، و اضطراب ومراقبة ، مولد كهروضوئي ، طاقة قصوى ، / MATLAB SIMULINK.

Résumé

À l'ère du développement durable, la technologie photovoltaïque (PV) a montré un potentiel important comme source d'énergie renouvelable. Ce mémoire se concentre sur l'amélioration des performances et de la puissance d'un système PV grâce à l'utilisation d'un algorithme approprié pour contrôler l'interface d'alimentation. L'objectif principal est de trouver un algorithme ou une loi de commande efficace et optimale pour extraire la puissance max délivrée par le générateur PV dans les conditions atmosphériques variables. Cette recherche est appelée recherche du point de puissance maximale « MPPT » du générateur PV.

Dans ce travail, nous présentons pour extraire la puissance maximale du système l'implémentation et l'étude des deux algorithmes MPPT qui sont mode glissant et P&O sous MATLAB /SIMULINK pour conditions météorologiques variables, puis en entame une étude comparative entre ces deux algorithmes. Notre système se compose d'un panneau PV, un convertisseur DC-DC et d'une commande MPPT afin de choisir la commande la plus fiable en terme de rendement, de temps et d'oscillations.

Mot clés : convertisseur BOOST, MPPT mode glissant, MPPT P&O, générateur PV, la puissance maximale, MATLAB/SIMULINK.

Abstract

In the era of sustainable development, photovoltaic (PV) technology has shown great potential as a source of renewable energy. This Master thesis focuses on improving the performance of a PV system by using an appropriate algorithm to control the power interface. The main objective is to find the most efficient and optimal control to extract the maximum power delivered by the PV generator under varying atmospheric conditions. This search is called the maximum power point tracking "MPPT".

In this work, the maximum power tracking study, the PV system implementation as well as the study of the two well know algorithms (i.e., sliding mode and P&O) under variable weather conditions have been carried out through using MATLAB / SIMULINK software. Then, a comparative study between these two algorithms has been performed. It is worth mentioning that our system consists of a PV panel, a DC-DC converter and an MPPT control in order to select the most reliable control in terms of efficiency, response time and oscillations.

Keywords: BOOST converter, sliding mode MPPT, P&O MPPT, PV generator, maximum power, MATLAB / SIMULINK.

Remerciements

Je tiens à remercier les responsables et tout le personnel du département des énergies renouvelables de Blida pour les facilités qu'ils m'ont accordé pour terminer ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements à mon promoteur

Dr R.BOUKENOUI qui a proposé et a dirigé ce travail.

Je remercié monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Mes sincères remerciements vont pour monsieur T. DOUMAZ pour son soutien et encouragement tout au long de mon travail.

Mes sincères remerciements à mes amis Z. YOUNSI et C. AMRANI pour leurs aides et pour l'esprit d'équipe que nous avons et qui m'a permis d'échanger avec eux des idées dans le même axe de recherche.

Le travail de mémoire que j'ai effectué doit beaucoup à certaines personnes que je tiens à les remercier sincèrement.

Enfin, je remercié toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin,

directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien, et leur prières tout au long de
Mes études et pour les conseils fructueux qui m'ont été prodigués, grand merci.

Aux personnes les plus proches de moi, mes frères, leurs femmes et mes petits
neveux.

A mon oncle Mohamed et sa femme dihia.

Et à mes ami(es) MAROUA, ASTAN , ZAHRA, CHANEZ , AHMED, ADNANE et
CHARAF .

À tous mes ami(e)s sans exception.

A BOUBACAR KEITA BOUBA .

Merci d'être toujours là pour moi.

À tous ceux qui me sont chers.

Sommaire :

Introduction générale -----	1
chapitre I : Modélisation du générateur photovoltaïque. -----	3
I.1 Introduction : -----	4
I.2 Energie solaire : -----	4
I.3 Le potentiel solaire en Algérie. -----	4
I.4 Rayonnement solaire :-----	6
I.4.1 Spectre solaire : -----	7
I.5 Les différents types des cellules photovoltaïques : -----	8
I.5.1 Les cellules monocristallines :-----	8
I.5.2 Les cellules polycristallines : -----	9
I.5.3 Les cellules amorphes : -----	9
I.5.4 Nouvelle technologie :-----	10
I.6 Définition d'un générateur photovoltaïque : -----	10
I.7 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) :-----	11
I.7.1 Association des cellules photovoltaïques en parallèle :-----	11
I.7.2 Association des cellules photovoltaïques en série : -----	12
I.8 Protection classique d'un générateur photovoltaïque : -----	12
I.9 Système photovoltaïque : -----	13
I.9.1 Systèmes photovoltaïques avec stockage électrique :-----	13
I.9.2 Systèmes photovoltaïques à couplage direct sans batterie : -----	14
I.10 Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque :-----	15
I.10.1 L'outil MATLAB :-----	15
I.10.2 Circuit équivalent d'une cellule solaire :-----	15
I.10.3 Différents modèles électriques de la cellule photovoltaïque -----	17
I.10.4 Le choix d'un modèle : -----	18
I.10.5 Le schéma de la simulation :-----	21
I.10.6 Les caractéristiques électriques I(V) et P(V). -----	24
I.10.7 Influence de l'éclairement : -----	26
I.10.8 Influence de la température sur les caractéristiques électriques du module PV :	
27	
I.10.9 Les paramètres important du générateur GPV :-----	29

I.11	Conclusion :-----	30
chapitre II Les convertisseurs DC-DC et les commandes MPPT.		
32		
II.1	Introduction : -----	32
II.2	Les hacheurs : -----	33
II.3	Les types des hacheurs : -----	34
II.3.1	Hacheur dévolteur «buck » :-----	34
II.3.2	Hacheur « boost » :-----	35
II.3.3	Convertisseur dévolteur survolteur :-----	36
II.4	Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge : -----	36
II.5	Les onduleurs : -----	37
II.5.1	Principe de fonctionnement de l'onduleur : -----	37
II.6	Définition de l'MPPT d'un système solaire photovoltaïque-----	38
II.7	Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque : -----	38
II.8	Principe du MPPT :-----	38
II.9	Classification des commandes MPPT-----	39
II.9.1	Classification des commandes MPPT selon les paramètres-----	39
II.9.2	Classification des commandes MPPT selon le type de recherche. -----	40
II.10	Les différents algorithmes MPPT.-----	40
II.10.1	Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe) :-----	41
II.10.2	La Commande MPPT Flou-----	43
II.10.3	Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)/-----	44
II.10.4	Algorithme "Escalade de la Colline (Hill Climbing) : -----	45
II.11	Simulation du hacheur boost :-----	45
II.12	Le schéma global de la simulation de la commande MPPT :-----	47
II.12.1	Modèle SIMULINK pour la génération du signal PWM. -----	48
II.12.2	Le schéma de simulation du convertisseur DC-DC type BOOST : -----	49
II.12.3	Le bloc de la commande MPPT (perturb and observe) sous MATLAB :----	50
II.12.4	Le schéma du bloc de mesure de la puissance Ppv, Ipv et Vpv : -----	50
II.13	Résultats et discussion de la simulation : -----	51
II.14	Choix de l'algorithme MPPT :-----	58
II.15	Conclusion :-----	59

chapitre III : Implémentation d'une commande MPPT basée sur le mode glissant .	60
III.1 Introduction :	61
III.2 Présentation de la méthode de mode glissant :	61
III.2.1 Système à structure variable :	62
III.2.2 Objectif de la commande par mode glissant :	62
III.2.3 Mise en œuvre de la commande par mode glissant :	62
III.3 Commande MPPT d'un système PV par mode glissant :	63
III.4 Implémentation du la commande MPPT par le mode glissant :	65
III.5 Les résultats de simulation de l'algorithme mode glissant :	66
III.6 Comparaison des deux algorithmes P&O et mode de glissement :	69
III.7 Conclusion :	73
Conclusion générale :	74
Solution et perspective :	75

Liste des figures :

chapitre I: Modélisation du générateur photovoltaïque.

Figure (I-1) : Le potentiel solaire pour chaque région en Algérie [4].	5
Figure (I-2) : Irradiation spectrale en fonction d'onde [5].	7
Figure (I-3) : Ensemble de rayonnements [7].	8
Figure (I-4) : Structure de la cellule solaire monocristalline [9].	9
Figure (I-5) : structure de la cellule solaire poly cristalline [9].	9
Figure(I-6) : structure de la Cellule solaire amorphe [9].	10
Figure (I-7) : association des cellules PV en parallèle [11].	11
Figure (I-8) : Association des cellules PV en série [11].	12
Figure (I-9) : Protection classique des installations PV [22].	13
Figure (I-10) : système photovoltaïque avec stockage électrique [13].	14
Figure (I-11) : Systèmes photovoltaïques à couplage direct sans batterie [13].	14
Figure (I-12) : schéma électrique de la cellule PV idéale [14].	16
Figure (I-13) : modèle de la cellule PV à une seule diode [15].	17
Figure (I-14) : présentation générale d'une cellule PV [17].	18
Figure (I-15) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [16].	19
Figure (I-16) : fiche technique du module PV étudié.	20
Figure (I-17) : schéma électrique de la modélisation d'un système de balayage PV.	21
Figure (I-18) : Modèle de la cellule PV dans la bibliothèque Simscape.	22
Figure (I-19) : Bloc des cellules photovoltaïques sous MATLAB/SIMULINK.	23
Figure (I-20) : Schéma du bloc de mesure de la puissance Ppv.	23
Figure (I-21) : La caractéristique courant – tension I(V) d'un générateur photovoltaïque sous les conditions STC.	24
Figure (I-22) : La caractéristique puissance– tension P(V) d'un générateur photovoltaïque sous les conditions STC.	25
Figure (I-23) : Caractéristique I(V) du générateur PV à une température constante ($T= 25C^{\circ}$) et irradiation variable.	26
Figure (I-24) : Caractéristique P(V) du générateur PV à une température constante ($T= 25C^{\circ}$) et irradiation variable.	27
Figure (I-25) : Caractéristique I(V) pour différentes températures ($I=1000W/m^2$).	28
Figure (I-26) : Caractéristique P(V) pour différentes températures ($I_r=1000W/m^2$).	28
Figure (II-1) : La structure du système photovoltaïque [14].	33

Figure (II-2) : fonctionnement du convertisseur statique [14].	33
Figure (II-3) : modèle mathématique du convertisseur statique. [20]	35
Figure (II-4) : schéma de simulation du hacheur Boost sous MATLAB/SIMULINK.	35
Figure (II-5) : modèle mathématique du convertisseur BOOST. [22]	36
Figure (II-6) : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge DC [21].	37
Figure (II-7) : le principe de la commande MPPT [18].	39
Figure (II-8) : Caractéristique puissance-tension de la commande MPPT type P&O [16].	42
Figure (II-9) : L’algorithme de la méthode observe and perturb (P&O) [16].	42
Figure (II-10) : la structure de base de la commande floue [10].	43
Figure (II-11) : Caractéristique P(V) du générateur PV par la méthode Inc(Cond) [25].	45
Figure(II-12) : la relation entre la puissance et le rapport cyclique [32].	45
Figure (II-13) : implémentation du convertisseur DC-DC avec charge sous MATLAB/SIMULINK.	46
Figure (II-14) : La tension de sortie du convertisseur DC-DC en fonction du temps.	46
Figure (II-15) : Le courant de sortie du convertisseur DC-DC en fonction du temps.	47
Figure (II-16) : Schéma MATLAB-SIMULINK d’un système photovoltaïque avec une commande MPPT (P&O) et un convertisseur (DC/DC) type Boost.	48
Figure(II-17) : Schéma du bloc de la génération du signal PWM sous MATLAB/SIMULINK.	48
Figure(II-18) : La variation du signal PWM en fonction du temps.	49
Figure (II-19) : Schéma du convertisseur DC-DC type BOOST.	49
Figure (II-20) : Implémentation du bloc MPPT type perturbation and observation P&O sous MATLAB/SIMULINK.	50
Figure (II-21) : Schéma du bloc de mesure de la puissance de sortie sous MATLAB/SIMULINK.	50
Figure (II-22) : la puissance pour un pas de perturbation de 0.01 sous conditions standard (T =25 °C et E =1000W/m ²).	51
Figure (II-23) : La tension pour un pas de perturbation de 0.01	52
Figure (II-24) : Le courant pour un pas de perturbation de 0.01	52
Figure (II-25) : La puissance pour un pas de perturbation de 0.1 sous conditions(T =25 C° et E =800W/m ²).	52
Figure (II-26) : La puissance pour un pas de perturbation de 0.1 sous conditions (T =25 °C et E =600W/m ²).	53

Figure (II-27) : La puissance de sortie en fonction du temps pour un pas de perturbation de 0.1 sous conditions($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $E = 500\text{W/m}^2$).-----	53
Figure (II-28) : La puissance de sortie en fonction du temps pour un pas de perturbation de 0.01 sous conditions($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $E = 500\text{W/m}^2$). -----	54
Figure (II-29) : La variation de la puissance avec l'éclairement en fonction du temps.-----	55
Figure (II-30) : L'influence de la température sur la commande MPPT pour un pas de 0.01.	56
Figure(II-31) : la puissance Pour un pas de perturbation 0.1 avec une température de $T=50\text{C}^{\circ}$ et un éclairement $E=1000\text{W /m}^2$. -----	56
Figure (II-32) : influence de la température sur la commande MPPT. -----	57
Figure (III-1) : La structure du fonctionnement de la commande MPPT [29]. -----	62
Figure (III-2) : L'algorithme de la commande par mode glissant. -----	63
Figure (III-3) : Le principe de ma commande MPPT par le mode glissant [29]. -----	64
Figure (III-4) : La structure de régulation de la loi de commande de la commutation [29]. --	65
Figure (III-5) : implémentation de la commande MPPT par la méthode de mode glissant. --	65
Figure (III-6) : implémentation de l'algorithme de la méthode mode glissant sous MATLAB/SIMULINK. -----	66
Figure (III-7) : La puissance de sortie en fonction du temps sous conditions STC par mode glissant. -----	66
Figure (III-8) : L'influence de l'éclairement sur la puissance de sortie en fonction du temps par le mode glissant. -----	67
Figure (III-9) : L'influence de la température sur la puissance de sortie par le mode glissant.	68
Figure (III-10) : variation de la puissance avec l'éclairement en fonction du temps. -----	69
Figure (III-11) : comparaison des deux algorithmes P&O et mode glissant.-----	70
Figure (III-12) : comparaison des deux courbes de l'algorithme P&O et mode glissant à $E=800\text{W/m}^2$. -----	71
Figure (III-13) : comparaison des deux courbes de l'algorithme P&O et mode glissant à $E=600\text{W/m}^2$. -----	71

Liste des tableaux :

Tableau (I-1) : Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [4]. -----	6
Tableau (I-2) : représente les paramètres électriques du générateur photovoltaïque étudié : -	21
Tableau (I-3) : représente les valeurs des paramètres électriques du générateur PV : -----	29
Table (II-1) : représente les valeurs de la tension de sortie et courant de sortie de le hacheur BOOST.	47
Table (II-2) : représente les valeurs de la puissance avec la variation de l'éclairement-----	57
Table (II-3) : montre la comparaison entre les différentes techniques MPPT. -----	58

Liste des acronymes et abréviations :

GPV :	générateur photovoltaïque.
PV :	photovoltaïque.
STC :	standard test condition.
E :	éclairage.
T :	température.
km :	kilomètre.
kWh :	kilowattheure.
m:	mètre.
gWh :	gigawattheure .
µm:	micromètre.
kW :	kilowatt.
OLED :	Organic Light- Emitting Diode
P :	la puissance du générateur photovoltaïque.
I_{cc} :	courant de court-circuit.
V_{oc} :	tension du circuit-ouvert.
N_p :	nombre de cellule en parallèle
N_s :	nombre de cellule en série.
PPM:	Point de puissance maximum.
I_{ph} :	le photo-courant.
I_{pv} :	le courant du générateur photovoltaïque.
V_{pv} :	la tension du générateur photovoltaïque.
P_{pv} :	la puissance du générateur photovoltaïque.
I_d :	le courant de diode.

$E_{\text{réf}}$	éclairage de référence.
I_0	le courant de saturation.
V_t	tension thermique.
V_d	la tension de diode.
N	facteur de l'idéalité de la photopile.
K	constante de Boltzmann.
Q	charge de l'électron.
R_s	résistance série.
R_p	résistance parallèle.
R_{sh}	résistance shunt.
P_{mpp}	puissance maximale.
V_{mpp}	tension maximale.
I_{mpp}	courant maximale.
η	rendement.
FF	facteur de forme.
P_{inc}	puissance incidente.
S	section de la surface de la cellule.
MPPT	maximum power point tracking.
DC	courant continue.
AC	courant alternative.
CS	convertisseur statique.
P&O	perturbation et observation.
INC	incrémentation de la conductance.
HC	hill climbing.

D :	rapport cyclique.
R :	résistance.
V_{ch} :	la tension aux bornes de la charge.
I_{ch} :	le courant aux bornes de la charge.
SMC :	Sliding mode commande.
SSV :	Système à structure variable.

Introduction générale.

Aujourd'hui, les besoins d'énergie électrique sont en croissance continue. L'électricité s'est imposée comme une énergie incontournable pour l'industrie et nos usages domestiques. Selon l'Agence internationale de l'énergie, la production d'énergie électrique repose principalement sur la combustion des combustibles fossiles. Ces ressources non renouvelables, en diminution constante, menacent le monde et la sécurité énergétique des pays dont elles dépendent. En raison de ces problèmes, et des conséquences que l'on sait maintenant sur le réchauffement climatique dues à l'émission de gaz carbonique et la pollution, la diversification des sources d'énergies électrique telles que l'énergie solaire s'avère absolument nécessaire. La solution alors est de recourir aux ressources renouvelables qui offrent la possibilité de produire de l'énergie satisfaisante aux exigences écologiques. Parmi ces ressources, la conversion de rayonnement solaire en électricité par les cellules photovoltaïque. Ce phénomène de conversion est basé sur le principe de l'effet photovoltaïque, ainsi une cellule exposée à la lumière produit une force électromotrice dont la valeur varie en fonction du matériau utilisé. Une cellule PV ne génère pas suffisamment de tension (entre 0.5 et 1.5V) [1]. L'association série/parallèle des cellules photovoltaïques constitue un générateur photovoltaïque (GPV) qui fournit une puissance utilisable. Le générateur PV possède une caractéristique courant-tension non linéaire, avec un point de fonctionnement optimal (point de puissance maximal) varié en fonction de la température et de l'ensoleillement du générateur. Pour que le point de fonctionnement du GPV soit au voisinage du point optimal, un étage d'adaptation doit être introduit entre le générateur et la charge continue. L'étage d'adaptation est un convertisseur DC/DC commandé par des algorithmes MPPT effectuant la poursuite du PPM. Parmi ces algorithmes, on cite : méthode d'ajustement de courbe, méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, méthode de court-circuit, méthode de perturbation et observation (P&O), l'incrémental de l'inductance (Inc-Cond), Hill Climbing...etc. Cependant, ces algorithmes présentent des problèmes lors une variation brusque des conditions météorologique et des oscillations autour du PPM dans les conditions normale. En plus de ces inconvénients, la mise en œuvre de ces algorithmes est une tâche difficile.

Pour résoudre ces problèmes, l'utilisation des techniques de commande non linéaire comme la commande par mode glissant s'avère envisageable.

Dans ce cadre, l'objectif principal de ce travail est de résoudre le problème de transfert d'énergie dans la chaîne de conversion photovoltaïque, autrement dit, garantir un fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque pour extraire une puissance maximale et la transférer vers la charge.

Dans le premier chapitre, on donnera des rappels sur la conversion photovoltaïque et le principe de fonctionnement de la cellule PV. Ensuite, à partir du modèle de la cellule on élaborera une simulation d'un modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque sous MATLAB-SIMULINK qui permet d'étudier l'influence des conditions météorologiques influence de l'éclairement et température sur son PPM. Et extraire la valeur de la puissance pour chaque valeur de l'éclairement.

Dans le chapitre 2, on traitera le problème de transfert d'énergie du GPV vers la charge. En premier temps, on présentera les types des convertisseurs DC-DC et les deux types de la connexion GPV-charge : directe et indirecte. En second temps, on exposera les algorithmes de la commande de poursuite du point de puissance maximal (en anglais : maximum power point tracking) (MPPT). En fin, on simulera la commande MPPT avec l'algorithme (P&O) sous l'environnement MATLAB et extraire les résultats de puissance de sortie du GPV sous une variation de condition météorologique.

Dans le chapitre 3, on introduira la partie théorie de la commande par mode glissant le mode de fonctionnement et l'algorithme de cette dernière. Ensuite, on présentera l'application de l'approche par mode glissant pour un système PV. Ensuite, on présente les performances des approches présentées à travers les résultats de simulation obtenus, sous l'environnement MATLAB. Enfin on compare les deux algorithmes P&O et mode glissant pour déterminer la commande la plus fiable et robuste pour le système PV.

chapitre I : Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque.

I.1 Introduction :

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, elle pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, L'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but en utilisant plusieurs types de procédés parmi eux le moyen dit module photovoltaïque (GPV).

Un générateur photovoltaïque (GPV) est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert.

Dans ce chapitre nous allons étudier les notions de base du système photovoltaïque, les types des cellules GPV en déduire son modèle mathématique, ainsi que les modes du montage et l'association de ce dernier permet de réaliser un panneau PV. Ensuite nous allons viser la modélisation du générateur photovoltaïque GPV composé de 36 cellules PV en série dans les conditions météorologiques standard ($E=1000\text{W/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$), nous allons traiter l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie d'un générateur PV en utilisant l'outil MATLAB/SIMULINK pour faire la simulation de comportement d'un générateur PV.

I.2 Energie solaire :

L'énergie solaire provient de la fusion nucléaire d'atomes d'hydrogène en hélium qui se produit au cœur du soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers sous forme d'un rayonnement électromagnétique de photons selon la théorie corpusculaire [2].

I.3 Le potentiel 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 Km^2 [3].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde grâce à son grand secteur. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/ m²/an au nord et 2263kwh/ m² /an au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie. [4]

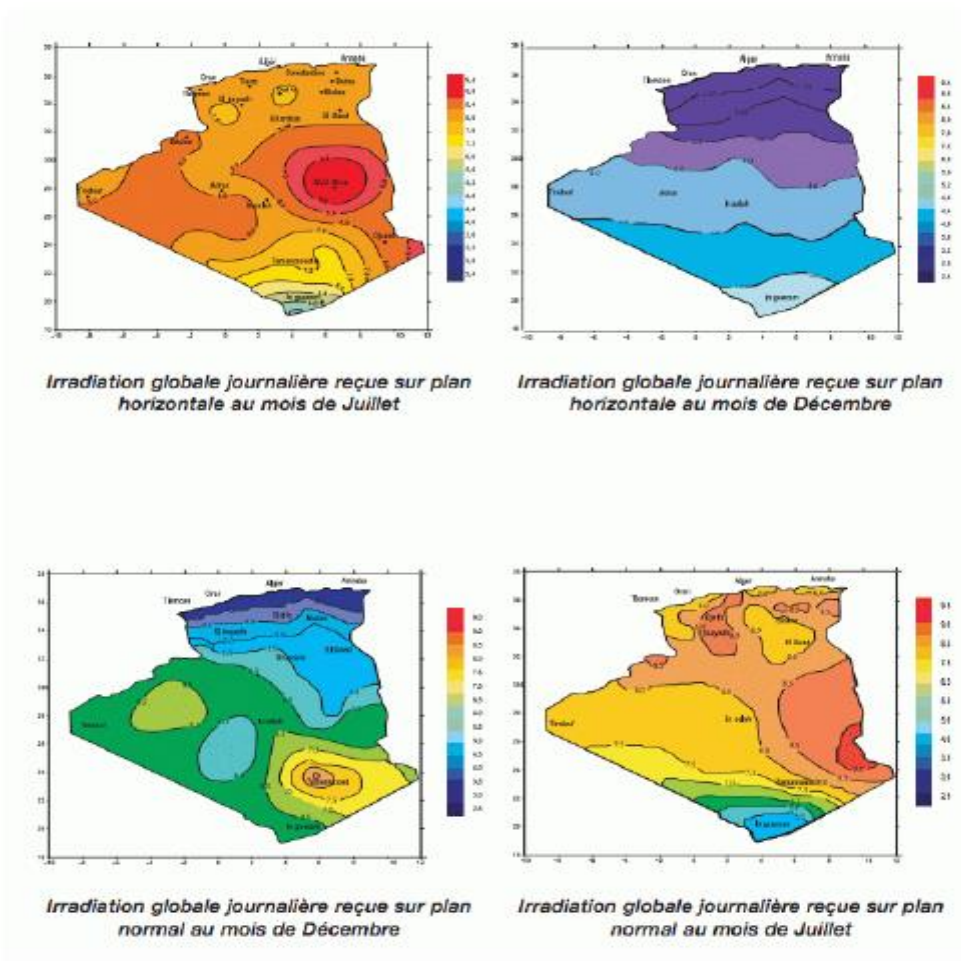


Figure (I-1) : Le potentiel solaire pour chaque région en Algérie [4].

Tableau (I-1) : Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [4].

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (heures /an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçu (Kwh /m/an)	1700	1900	2650

Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh/an.

Le volet de l'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le solaire photovoltaïque, toute fois, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production faibles entraînent des coûts très élevés, ce qui freine son développement [4].

I.4 Rayonnement solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de $0,22 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$. La figure (I-2) représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4 \mu\text{m}$).
- 47% dans la bande visible ($0,4$ à $0,8 \mu\text{m}$).
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré (kW/m^2), à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1200 \text{ W}/\text{m}^2$. La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [5].

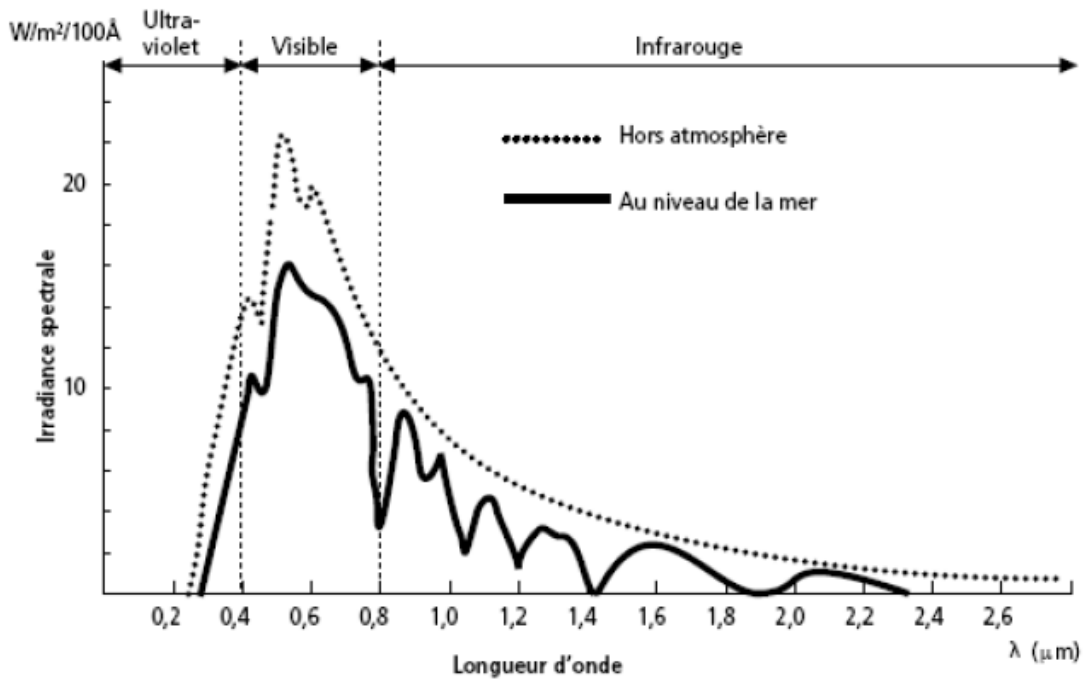


Figure (I-2) : Irradiation spectrale en fonction d'onde [5].

I.4.1 Spectre solaire :

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

- **Rayonnement direct** : Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère [6].
- **Rayonnement diffus** : C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère [6].
- **Rayonnement réfléchi** : Appelé au même titre Albédo, c'est la capacité d'une surface à réfléchir une lumière notamment celle du soleil. Il est exprimé par un chiffre compris entre 0 et 1. Le « 1 » s'affecte à un corps qui réfléchit totalement la lumière reçue [7].
- **Rayonnement global** Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements direct, diffus, et reflété par le sol [7].

Dans la figure (I-3) ci-dessous, schématise l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre :

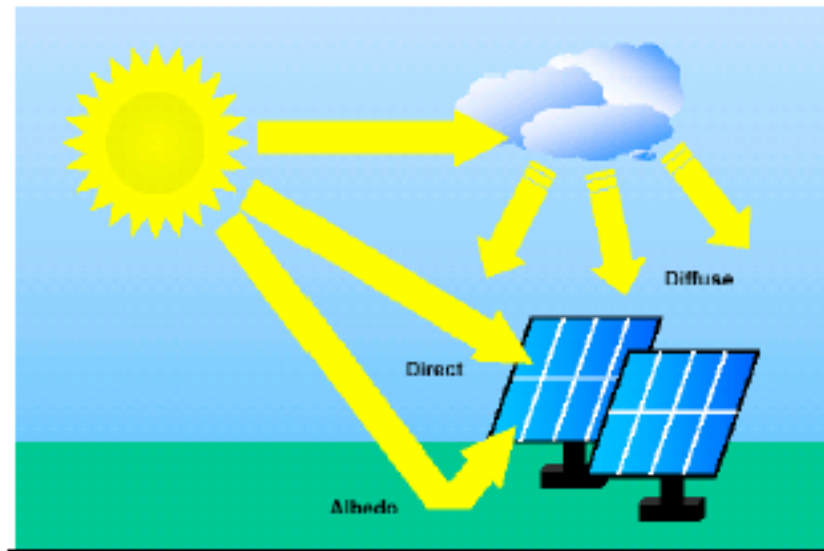


Figure (I-3) : Ensemble de rayonnements [7].

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclaircissement (noté généralement par la lettre E), il s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2).

La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons. [8].

I.5 Les différents types des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules [9] :

I.5.1 Les cellules monocristallines :

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24.7 % en laboratoire). Cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe.



Figure (I-4) : Structure de la cellule solaire monocristalline [9].

I.5.2 Les cellules poly cristallines :

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire).

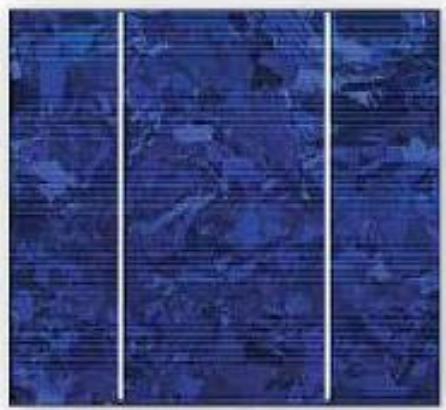


Figure (I-5) : structure de la cellule solaire poly cristalline [9].

I.5.3 Les cellules amorphes :

Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé.

Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (Même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).



Figure(I-6) : structure de la Cellule solaire amorphe [9].

I.5.4 Nouvelle technologie :

On utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques (OLED : Organic Light- Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre [10].

I.6 Définition d'un générateur photovoltaïque :

Un générateur photovoltaïque (GPV) est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance P , le courant de court-circuit I_{sc} ou la tension en circuit ouvert V_{oc} . Les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un champ photovoltaïque. Relié au récepteur sans autres éléments, le panneau solaire fonctionne au fil du soleil, c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et est nulle la nuit.

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation). On équipe alors le système de batteries qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu.

Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie [11].

I.7 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) :

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [11].

I.7.1 Association des cellules photovoltaïques en parallèle :

En additionnant des cellules (module) identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule (module) et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en parallèle dans la branche. La figure ci-dessous montre les caractéristiques résultantes d'un regroupement de N_p cellules en parallèle [11].

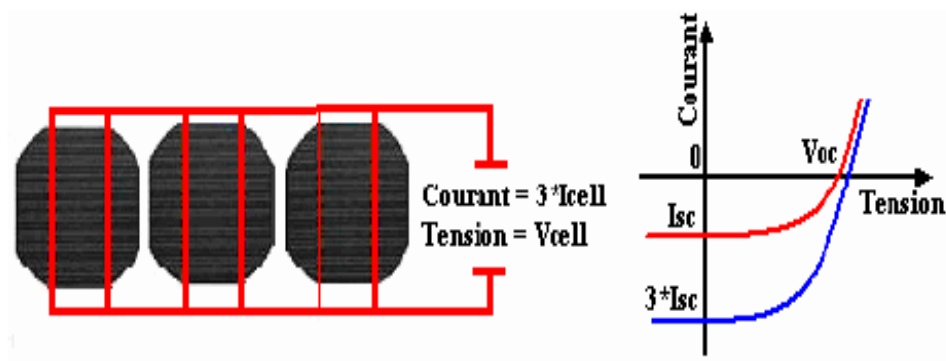


Figure (I-7) : association des cellules PV en parallèle [11].

L'équation suivante résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_p cellules en parallèle :

$$N_p' = N_p * I_{sc} \quad (I.1)$$

Avec I_{sc} : le courant du court-circuit.

I.7.2 Association des cellules photovoltaïques en série :

En additionnant des cellules (modules) identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. La figure ci-dessous montre caractéristiques résultantes d'un regroupement de N_s cellules en Série [11].

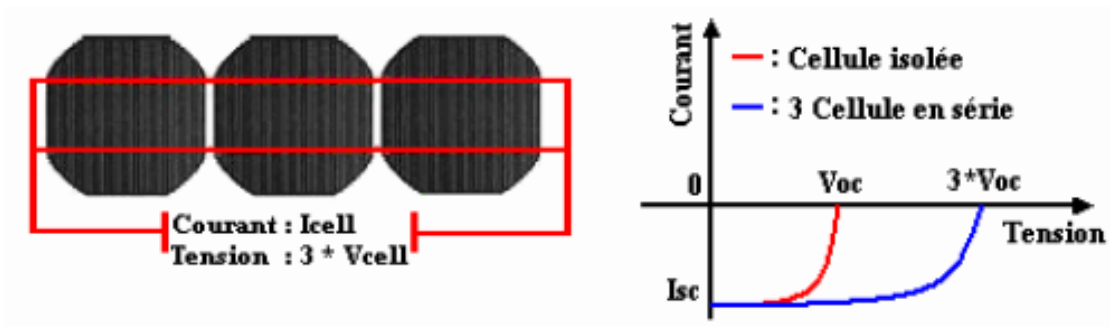


Figure (I-8) : Association des cellules PV en série [11].

L'équation suivante résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules en série :

$$V_{oc}' = V_{oc} * N_s \quad (I.2)$$

Avec :

V_{oc} : la tension du circuit ouvert.

I.8 Protection classique d'un générateur photovoltaïque :

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).

- la protection lors de la mise en série des modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds [9]

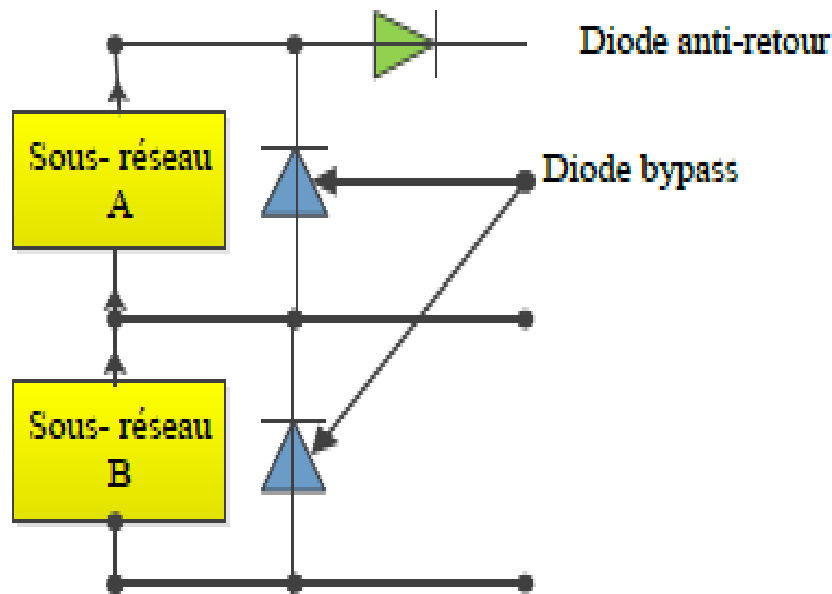


Figure (I-9) : Protection classique des installations PV [22].

I.9 Système photovoltaïque :

On ne peut pas considérer les modules photovoltaïques comme simples générateurs d'énergie électrique en remplacement d'un réseau, mais associer étroitement ces modules à un système complet pour une application bien spécifique correspondant à un besoin bien défini.

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés sont de deux types [13] :

I.9.1 Systèmes photovoltaïques avec stockage électrique :

Batterie d'accumulateurs électrochimiques, ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation :

- soit directement en courant continu.
- soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu- alternatif (onduleur).

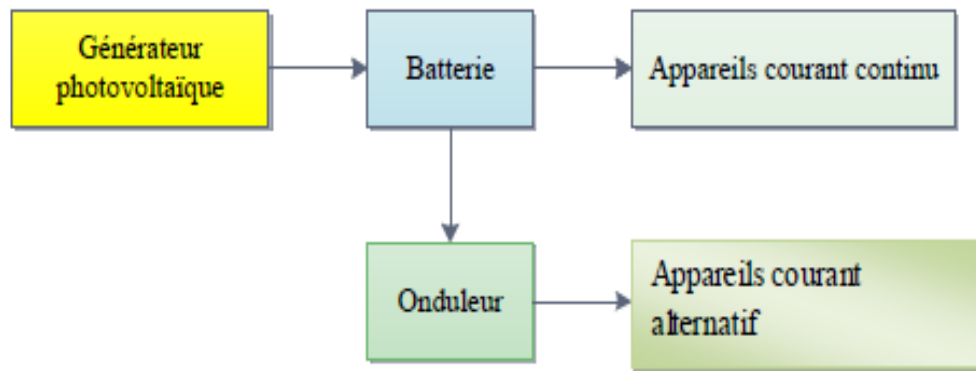


Figure (I-10) : système photovoltaïque avec stockage électrique [13].

I.9.2 Systèmes photovoltaïques à couplage direct sans batterie :

Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit, éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu, adaptateur d'impédance.

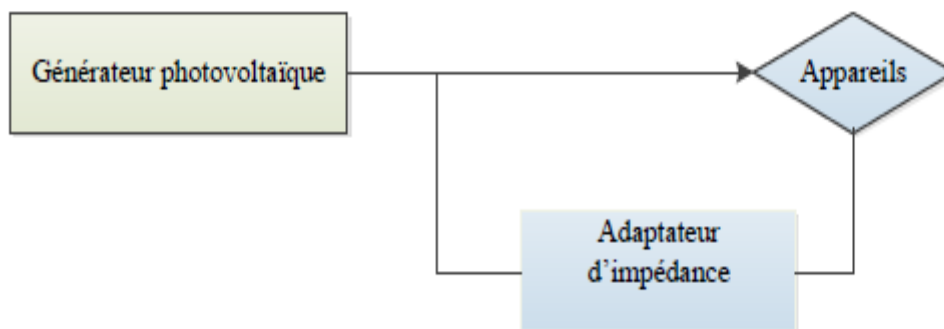


Figure (I-11) : Systèmes photovoltaïques à couplage direct sans batterie [13].

Le choix de tel système se fera en fonction de plusieurs critères on peut trouver : simplicité d'installation, le type d'application, l'environnement...etc.

Toute fois l'étude de systèmes PV se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge constitué, soit d'une batterie, d'une charge quelconque par rapport à l'ensemble des modules PV.

D'après ce qu'on a vu auparavant, on cherchera à optimiser, modéliser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie l'utilisation le générateur fonctionner toujours à son point de puissance maximum PPM. Un système photovoltaïque est constitué donc d'un générateur PV et des charges à alimenter (courant continu ou courant alternatif).

I.10 Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque :

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles mathématiques du panneau photovoltaïque (modèle à une diode, à deux diodes,..), qui ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant- tension $I(V)$ pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques.

I.10.1 L'outil MATLAB :

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du signal. En complément du noyau de calcul MATLAB, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Blocksets) [7].

➤ **SIMULINK :**

Est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [7].

I.10.2 Circuit équivalent d'une cellule solaire :

➤ **Cas d'une cellule idéale :**

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{pv} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure suivante, qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [14].

La figure (I-12) représente le schéma électrique de la cellule photovoltaïque idéale :

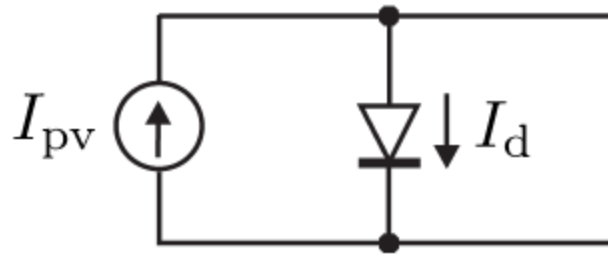


Figure (I-12) : schéma électrique de la cellule PV idéale [14].

✚ Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{ph} = I_{pv} - I_d \quad (I.3)$$

Le courant I_{pv} est assimilé au courant I_{sc} avec $V_{pv} = 0$, le courant de court-circuit obtenu en court-circuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{réf}} \quad (I.4)$$

E : l'éclairement absorbé par la cellule.

$E_{réf}$: l'éclairement de référence (1000 w/m^2).

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (I.5)$$

I_0 : le courant de saturation inverse de la diode.

V_t : la tension thermique.

E_t :

$$V_t = \frac{NkT}{q} \quad (I.6)$$

V_t : la tension thermique.

N : le facteur d'idéalité de la photopile.

K : la constante de Boltzmann ($1,38.10^{-23} \text{J/K}$) ;

Q : la charge de l'électron ($1,6.10^{-19} \text{C}^\circ$).

T : la température $^\circ \text{C}$.

➤ **Cas d'une cellule réelle :**

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure ci-dessous. Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) [15].

La figure (I-13) représente le schéma électrique de la cellule photovoltaïque dans le cas réel :

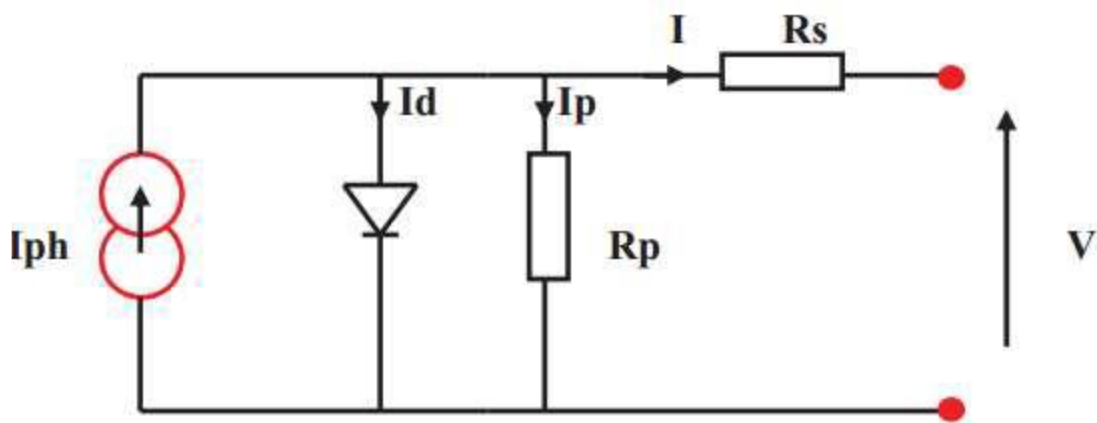


Figure (I-13) : modèle de la cellule PV à une seule diode [15].

I.10.3 Différents modèles électriques de la cellule photovoltaïque

Il existe plusieurs modèles pour modéliser une cellule photovoltaïque, on peut citer :

- Modèle à sept paramètres (7p)
- Modèle à six paramètres (6p)
- Modèle à cinq paramètres (5p)
- Modèle à quatre paramètres (4p)
- Modèle à trois paramètres (3p)

Le modèle le plus utilisé est le modèle à cinq paramètres.

I.10.4 Le choix d'un modèle :

La photopile présentée comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance Shunt ou parallèle (R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I(V)$:

- **La résistance série** : elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [16].

- **La résistance shunt** : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [16].

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes.

Ce modèle est dit à cinq paramètres, ces paramètres sont :

Le photo-courant (I_{ph}), le courant de saturation (I_0), le facteur d'idéalité de la jonction (A), la résistance série (R_s) et la résistance shunt (R_{sh}).

Si on néglige l'effet de la résistance shunt (R_{sh}), en le considérant infini, on retrouve le modèle à quatre paramètres qui est très utilisé. Et si en plus, on néglige la résistance série, on retrouvera alors le modèle à 3 paramètres. Le choix du modèle se fait en fonction des besoins de l'étude. Le modèle à cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision [16].

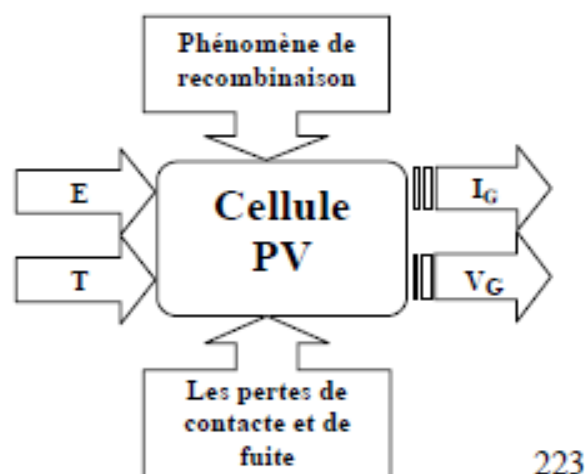


Figure (I-14) : présentation générale d'une cellule PV [17].

Ce modèle traite la cellule PV comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série (R_s), l'effet de la résistance parallèle (R_p) est très petit.

La figure (I-15) représente le schéma équivalent d'une cellule PV :

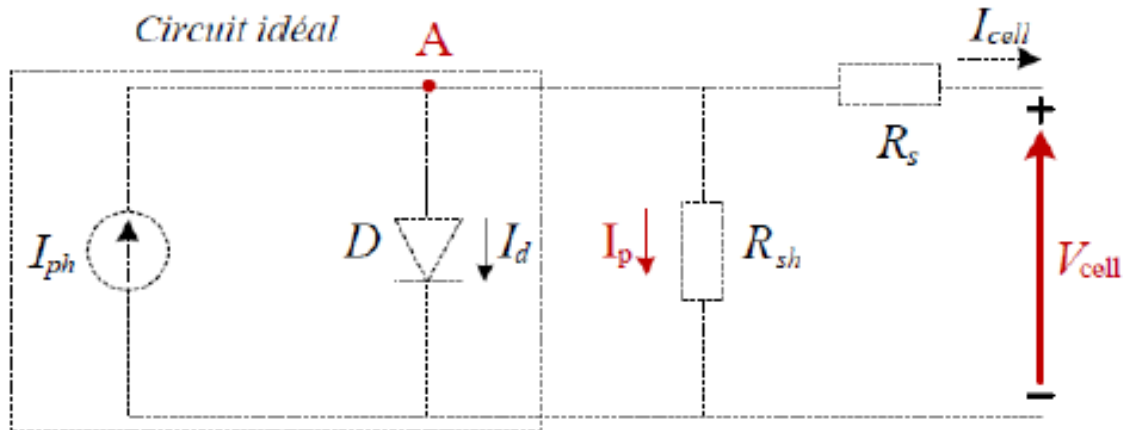


Figure (I-15) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [16].

Le circuit équivalent d'une cellule qui est constitué d'une source de courant en parallèle avec une diode, ainsi que d'une résistance parallèle et une deuxième série. Le modèle mathématique du courant généré par une cellule photovoltaïque est représenté par l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{NKT} \right) - 1 \right) - \frac{(V_{pv} - R_s I_{pv})}{R_p} \quad (I.7)$$

Avec :

- I_{pv} et V_{pv} représentent le courant et la tension de sortie d'une cellule solaire, respectivement.
- R_p : la résistance parallèle, ou la résistance shunt d'une cellule solaire. Elle traduit la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible.
- Pratiquement, la valeur de la résistance (R_p) est élevée donc on peut la négliger.

- R_s : la résistance série, elle est due à la résistivité des différentes couches de la cellule : émetteur, base et contacts métalliques (en particulier leur interface avec le semi-conducteur).

Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule solaire.

- Q : la charge d'un électron (1.602×10^{-19} Colomb).
- I_{ph} et I_s représentent le photo-courant et le courant de saturation d'une diode. , respectivement.
- N : le facteur d'idéalité de la diode.
- K : la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} j/°k).
- T : la température d'une cellule.

Dans notre travail, on a utilisé le modèle à cinq paramètres à une diode et deux résistance R_s et R_p , avec deux entrées (température et éclaircissement) sous les conditions météorologique normal pour obtenir les caractéristiques électriques suivantes : le courant I et la tension V .

Le modèle du panneau utiliser **ET-M53620WW**, contient 36 cellules en série de type monocristallin. La figure suivante montre les spécifications du module :

Les caractéristiques électriques du module sont données dans le tableau suivant :

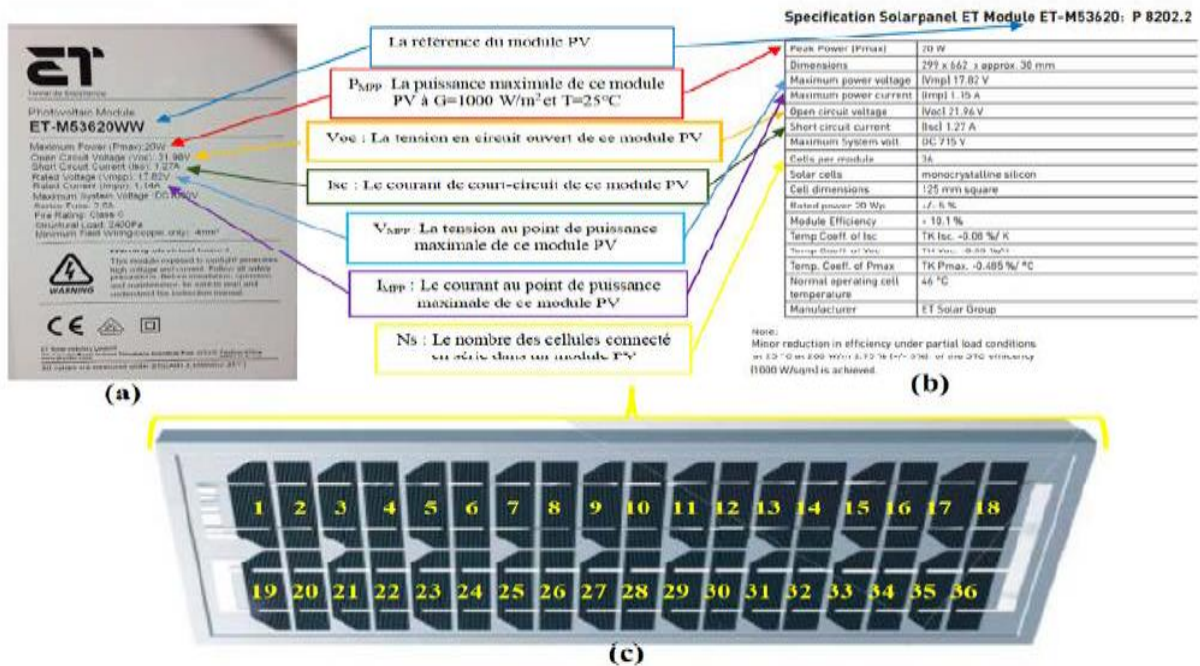


Figure (I-16) : fiche technique du module PV étudié.

Tableau (I-2) : représente les paramètres électriques du générateur photovoltaïque étudié :

Les paramètres électriques :	La valeur de chaque paramètre
Puissance max P_{mpp}	20W
Tension à circuit ouvert V_{oc}	21.96V
Courant à court-circuit I_{sc}	1.27A
La température	25 C °
Type de cellule	Monocristallines
Nombre de cellules	36
Température maximale	+46 C°
Résistance série	0.0319 ohm

I.10.5 Le schéma de la simulation :

La figure (I-17) illustre le modèle schématique sous MATLAB/SIMULINK de la modélisation du système photovoltaïque sous l'environnement :

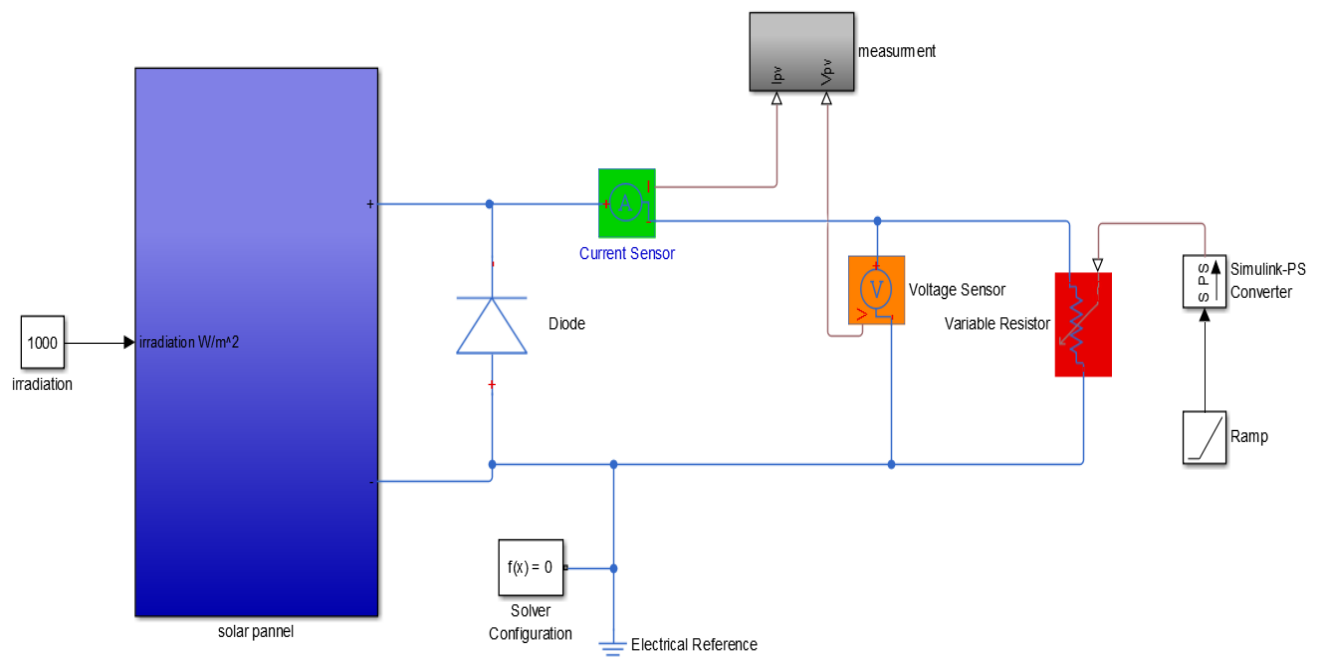


Figure (I-17) : schéma électrique de la modélisation d'un système de balayage PV.

La librairie Simscape dans Simulink nous présente une modélisation complète d'une cellule solaire sous le nom «Solar Cell». Ce bloc admet trois bornes :

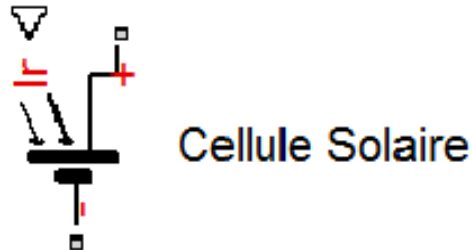


Figure (I-18) : Modèle de la cellule PV dans la bibliothèque Simscape.

∇ représente le rayonnement solaire, + représente le potentiel positif de la cellule PV et - représente le potentiel négatif de cette cellule.

Le générateur photovoltaïque choisi pour notre étude est représenté par un modèle standard à une seule diode, établi par Shockley pour une seule cellule PV à cinq paramètres, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

Il se compose de 36 cellules PV, deux entrées qui sont éclairement et température en condition Standard STC ($E= 1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25\text{C}^\circ$), deux sorties qui sont le + et le - du module PV et un Simulink S-PS convert comme le montre la figure suivante (I-19):

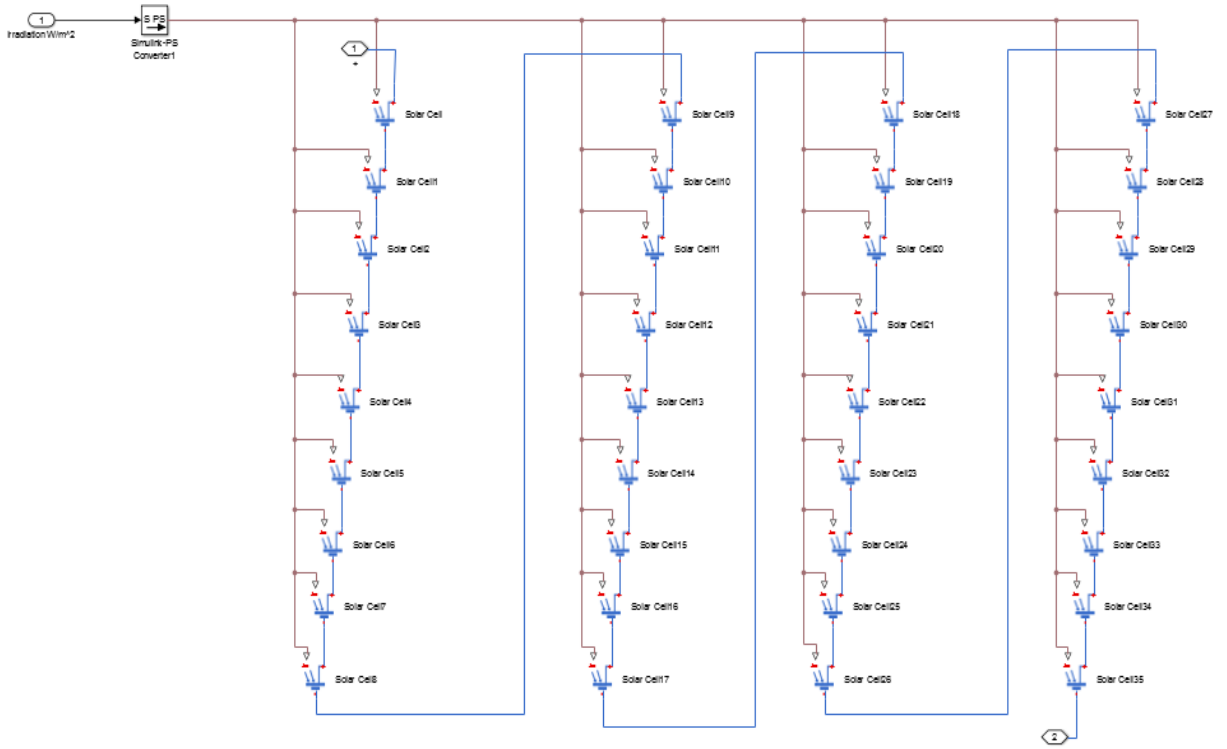


Figure (I-19) : Bloc des cellules photovoltaïques sous MATLAB/SIMULINK.

La figure (I-20) illustre le bloque Simscape de conversion à des signaux Simulink des paramètres électriques du panneau PV qui sont : le courant I, la tension V et la puissance P.

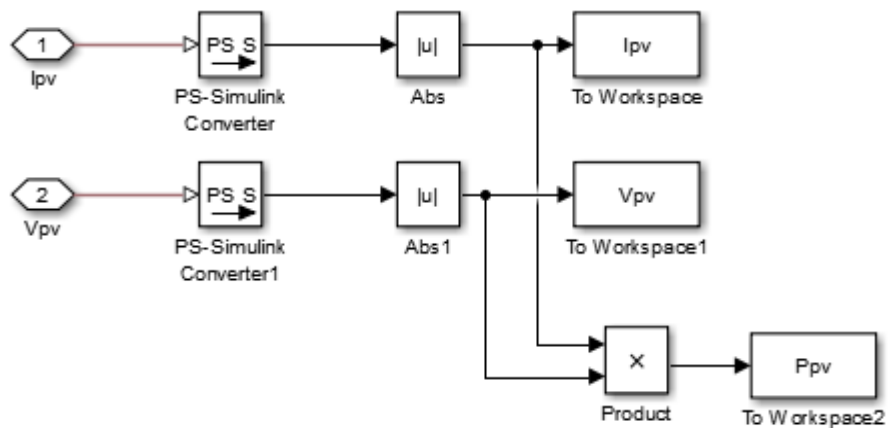


Figure (I-20) : Schéma du bloc de mesure de la puissance Ppv.

I.10.6 Les caractéristiques électriques I(V) et P(V) :

Après avoir simulé le module PV sous un programme MATLAB comme le démontre la figure suivante, on a pu obtenir les résultats qui sont les caractéristiques courant –tension I(V) et puissance -tension P(V) du module photovoltaïque sous l'environnement dans les conditions standards (T=25°C, E=1000 W/m²)

- La figure (I-21) représente le résultat de la simulation d'une caractéristique courant – tension I(V) d'un générateur photovoltaïque dans les conditions standards de E=1000 W/m² et T=25°C.

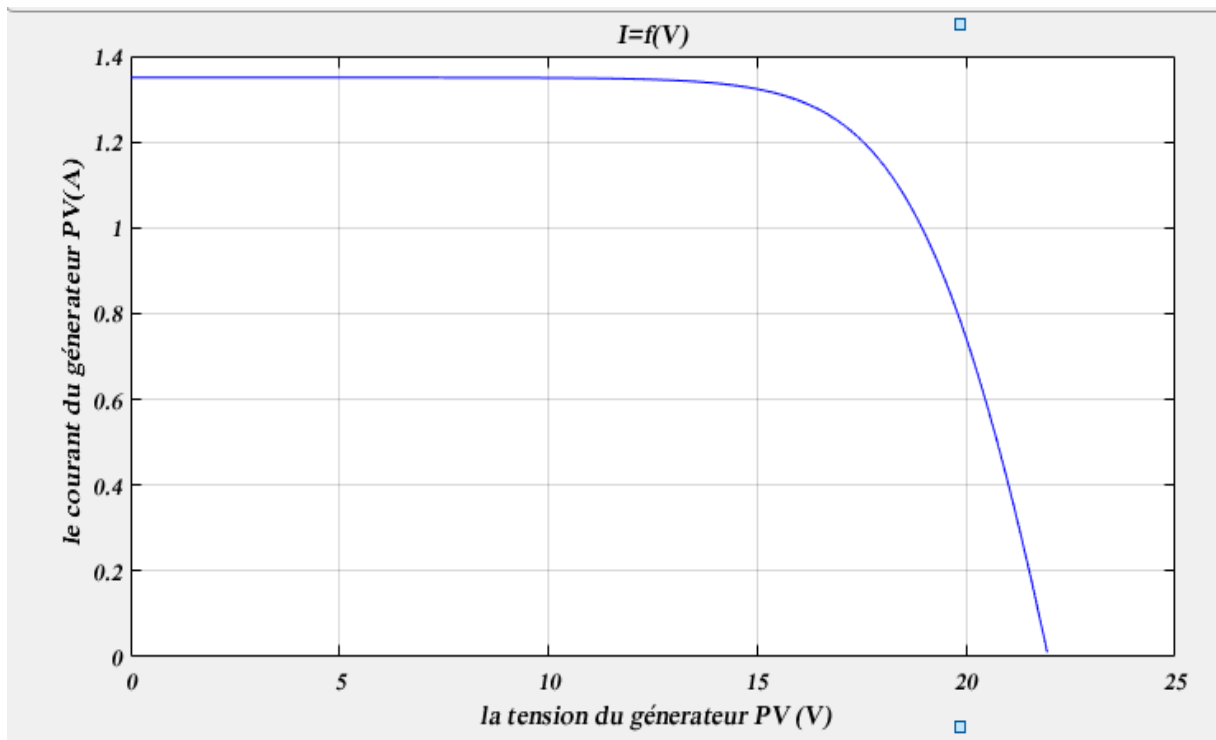


Figure (I-21) : La caractéristique courant – tension I(V) d'un générateur photovoltaïque sous les conditions STC.

D'après le graphe précédent, on observe que lorsque la tension V augmente le courant I du générateur fait une décroissance légère jusqu'à ce que la tension atteigne la valeur maximale le courant se décroît rapidement.

L'évolution du courant commence du courant de court-circuit I_{sc} qui correspond à une tension nulle $V=0$ V jusqu'au circuit ouvert V_{oc} , dont le courant est nul $I=0$ A et la tension atteint sa valeur maximale I_{sc} .

Pour le Niveau d'irradiation= 1000 (W/m²) et température= 25C° :

- ✚ La puissance max (P_{mpp})= 19.996W.
- ✚ La tension maxi(V_{mpp})= 21.936V.
- ✚ Le courant max (I_{mpp})= 1.2700A.

- La figure (I-22) représente les résultats obtenus de la simulation d'une caractéristique puissance – tension P(V) d'un générateur photovoltaïque dans les conditions standards de $E=1000$ W/m² et $T=25$ °c.

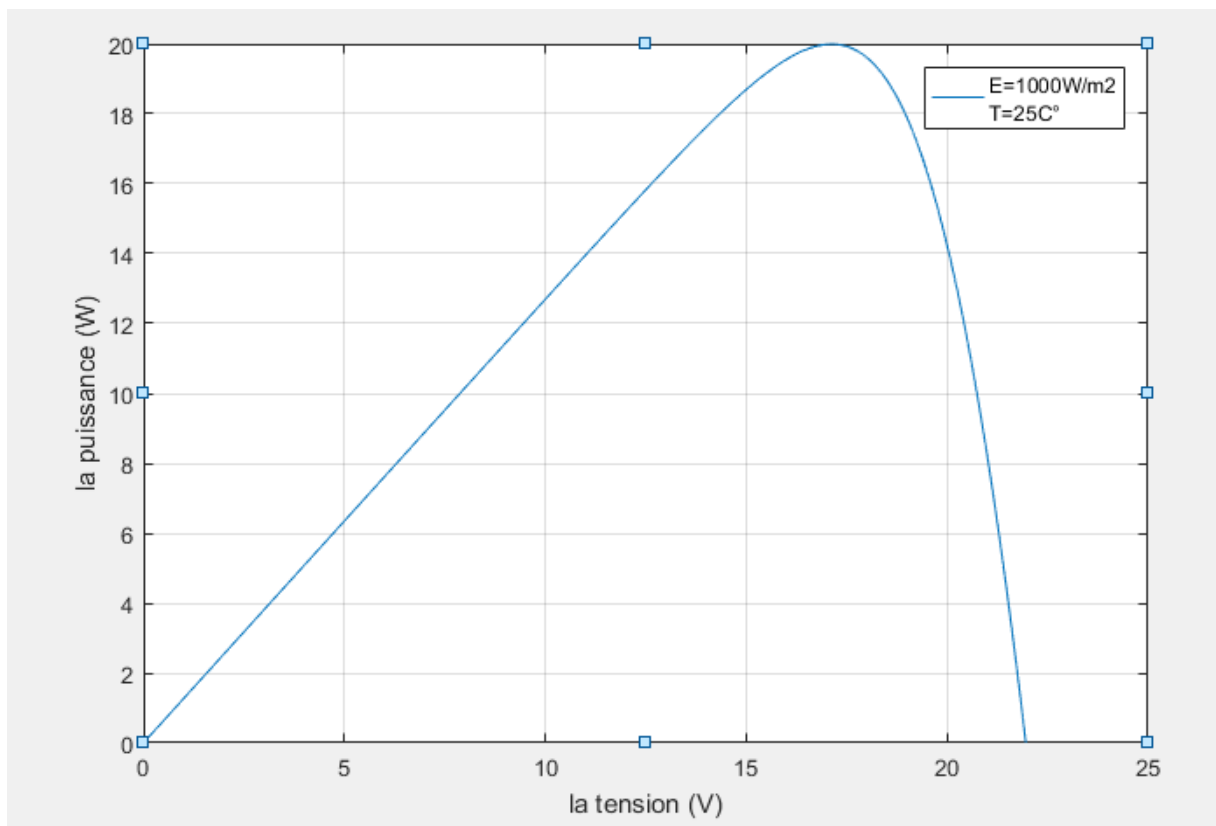


Figure (I-22) : La caractéristique puissance– tension P(V) d'un générateur photovoltaïque sous les conditions STC.

D'après les résultats de la simulation d'une caractéristique P(V), on observe que lorsque la tension augmente, la puissance augmente jusqu'à atteindre la valeur optimale P_{mpp} à une tension V_{mpp} , ensuite elle décroît lorsque la tension atteint sa valeur maximale (tension de circuit-ouvert V_{oc}).

I.10.7 Influence de l'éclairement :

La figure (I-23) suivante démontre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques courant-tension du panneau photovoltaïque, à une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$) et éclairement variable (entre $400\text{W}/\text{m}^2$ et $1000\text{W}/\text{m}^2$), on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement donc le courant varie inversement avec l'éclairement et la tension. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique. Donc la tension à circuit ouvert reste quasiment identique même à faible éclairement.

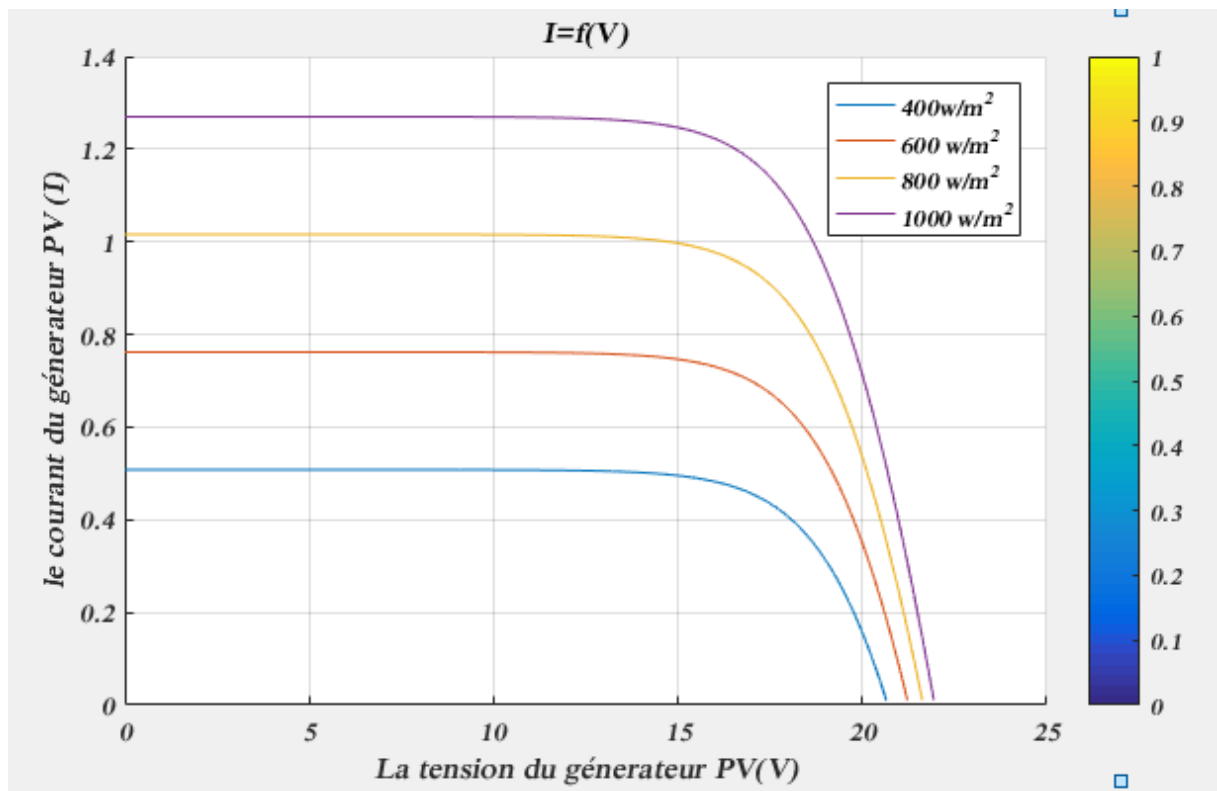


Figure (I-23) : Caractéristique I(V) du générateur PV à une température constante ($T= 25\text{C}^{\circ}$) et irradiation variable.

La figure ci-dessous présente l'évolution de la puissance du module en fonction de la tension à température fixe et éclairement variable, on constate que l'augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation de la puissance. Donc on peut dire que la valeur de la puissance est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement.

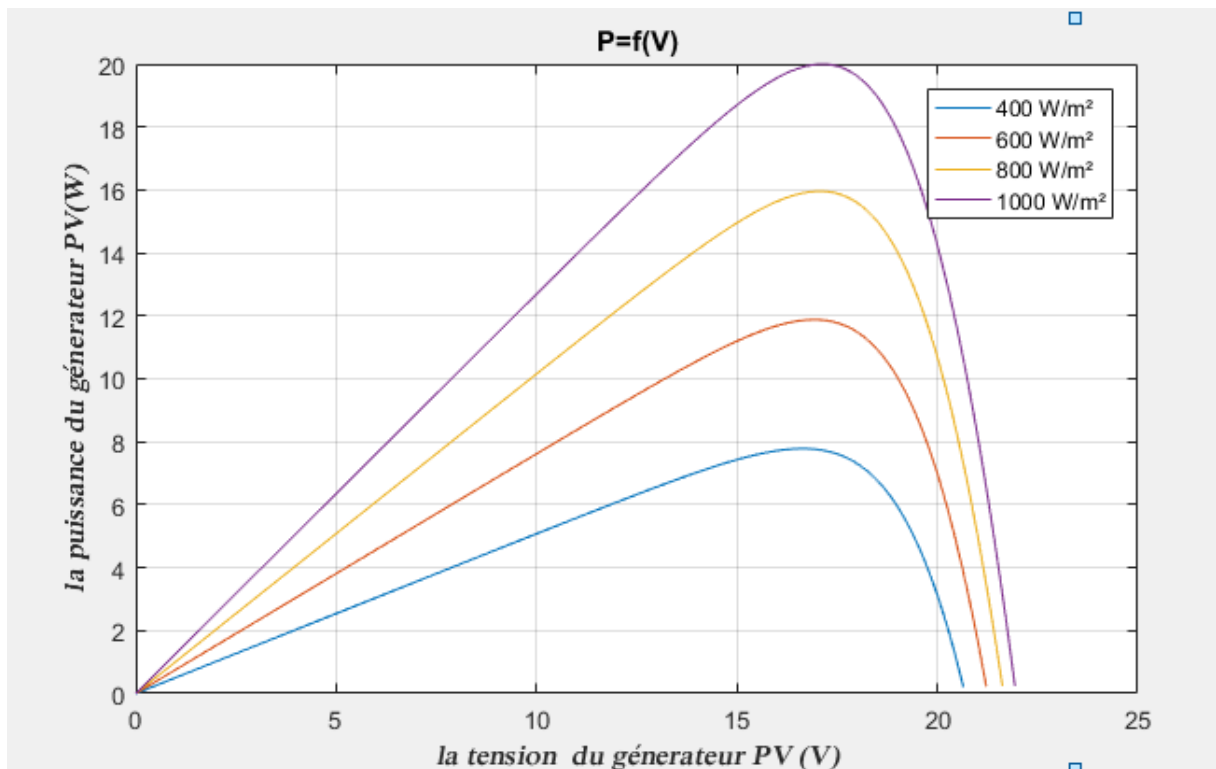


Figure (I-24) : Caractéristique P(V) du générateur PV à une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$) et irradiation variable.

I.10.8 Influence de la température sur les caractéristiques électriques du module PV :

Les graphes suivants représentent les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ respectivement d'un générateur photovoltaïque pour une irradiation constante $I=1000\text{ W/m}^2$ et une température variable (0°C jusqu'à 50°C).

A l'éclairement $I=1000\text{ W/m}^2$, en faisant varier la température de 0°C jusqu'à 50°C , la caractéristique courant-tension $I(V)$ et puissance-courant $P(V)$ sont données par les figures ci-dessous, d'après les résultats obtenus, on remarque que la tension de circuit ouvert V_{oc} est diminuée avec l'augmentation de la température, par contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température et la puissance maximale décroît et donc le décroissement du rendement d'un générateur PV.

On constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Donc lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte pour améliorer sa performance et son rendement.

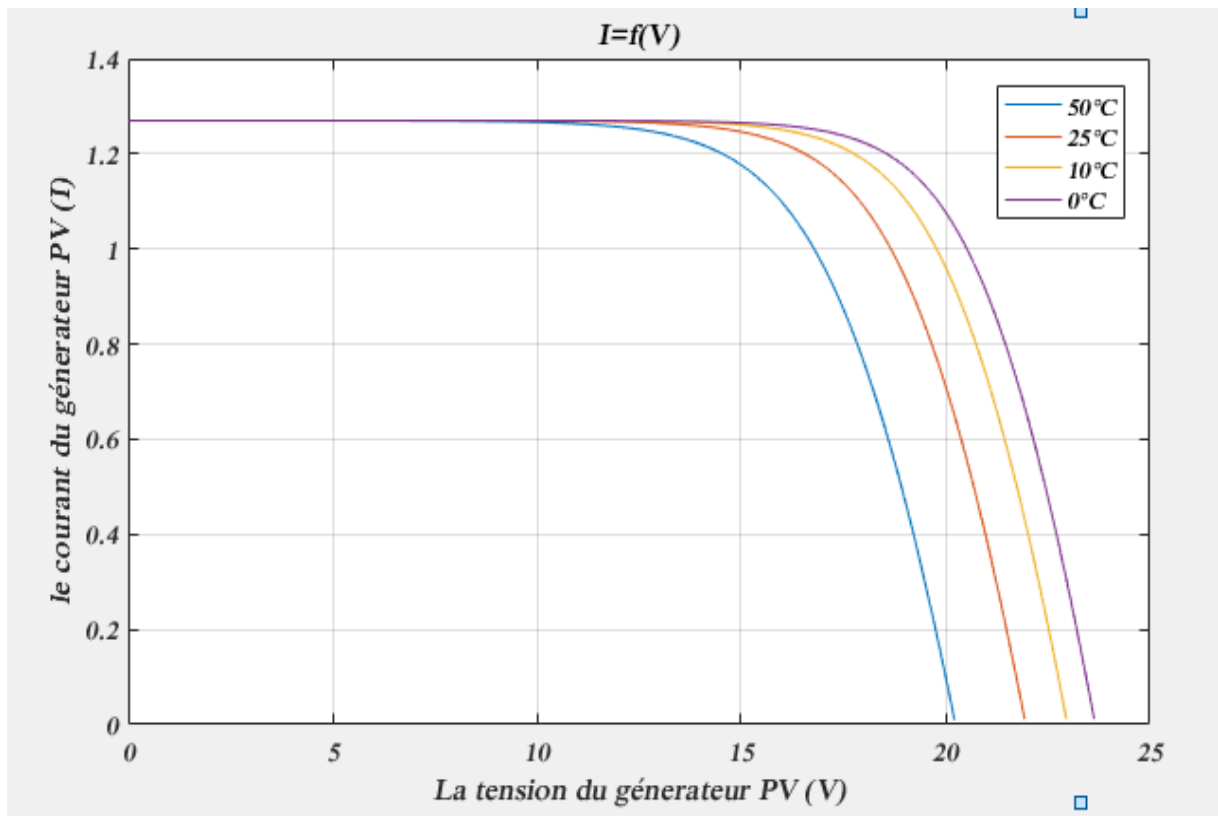


Figure (I-25) : Caractéristique I(V) pour différentes températures ($I=1000W/m^2$).

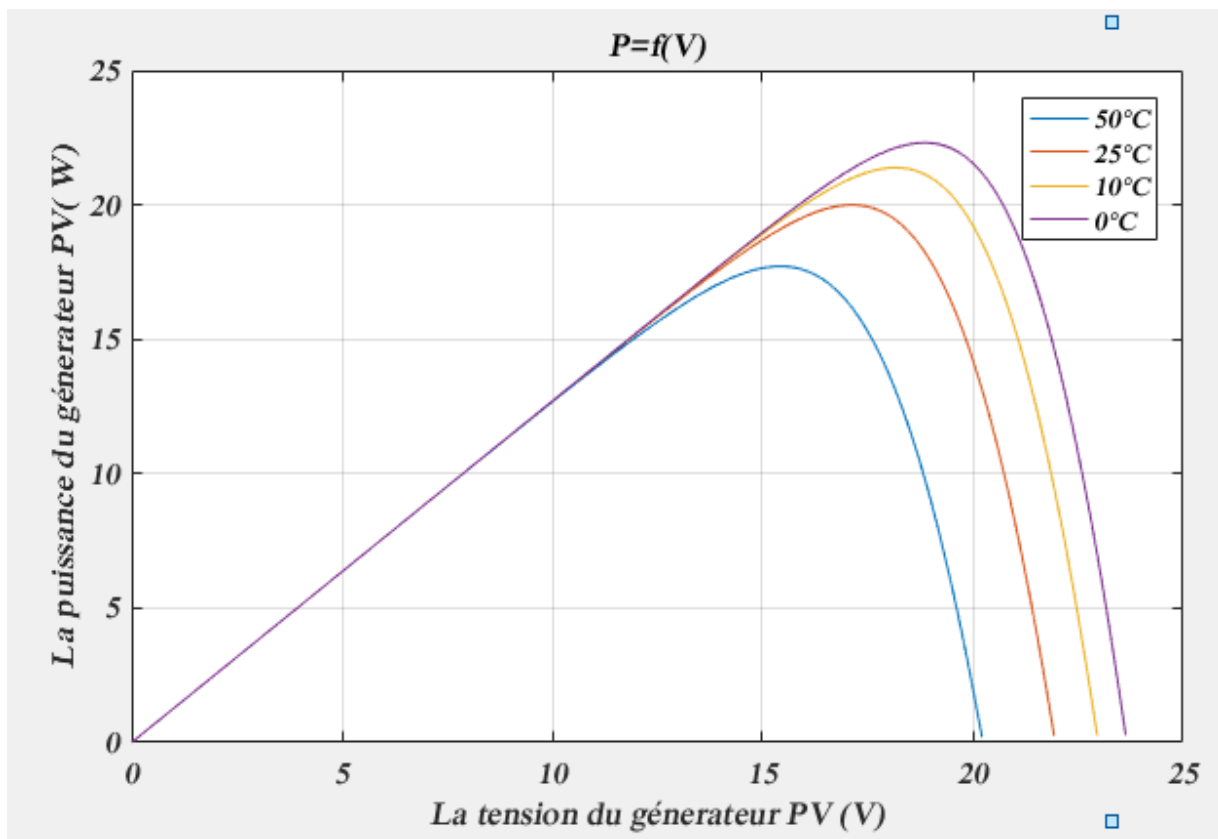


Figure (I-26) : Caractéristique P(V) pour différentes températures ($I_r=1000W/m^2$).

Tableau (I-3) : représente les valeurs des paramètres électriques du générateur PV :

Niveau d'irradiation (W/m ²)	La température (C°)	La puissance P _{mpp} (W)	La tension V _{oc} (V)	Le courant I _{sc} (A)
1000	25	19.9960	21.9354	1.2700
800	25	15.9583	21.6232	1.0160
600	25	11.8771	21.2196	0.7620
400	25	7.7806	20.6484	0.5080

I.10.9 Les paramètres important du générateur GPV :

➤ Efficacité (rendement) maximale de la conversion :

Elle est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance de rayonnement incident sur la surface S de la cellule [1], il est défini par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{mpp} * V_{mpp}}{S * E} = \frac{V_{oc} * I_{cc} * FF}{P_{inc}} \quad (I.8)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule [18].

➤ Facteur de forme FF :

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{sc} * V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [18].

- Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{mpp}}{I_{cc} * V_{co}} = \frac{I_{mpp} * V_{mpp}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (I.9)$$

Le facteur de forme FF diminue quand la température augmente.

I.11 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions sur l'énergie solaire, les types des cellules PV avec leurs associations et les différents systèmes photovoltaïques. Ensuite nous avons entamé la modélisation d'un système photovoltaïque en commençant par le générateur photovoltaïque GPV en observant ces caractéristiques (courant-tension et puissance-tension) ainsi que ses performances sous l' influence de quelques paramètres atmosphériques (température et éclairage) ainsi le rendement du module. Pour un fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge ou un autre système que nous allons étudier dans le chapitre suivant.

chapitre II : Les convertisseurs DC-DC et les commandes MPPT.

II.1 Introduction :

Comme on a vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT) [19].

Le but de ce chapitre est l'étude des quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC.

Les stratégies de gestion de l'énergie photovoltaïque et du système de conversion d'énergie est un élément très important dans l'amélioration de l'efficacité. Parmi les stratégies, la méthode pour suivre la puissance maximale du GPV dite Méthode de suivi du Point de Puissance maximale (MPPT) et amplement utilisée. Elle permet de trouver automatiquement la tension maximale ou le courant maximal du module PV au cours de lesquelles il fonctionnera pour atteindre le maximum de puissance quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation). On distingue de MPPT classiques et intelligents. Dont généralement, la structure du système de conversion photovoltaïque est basée sur des blocs modulaires, comme le montre ci-dessous :

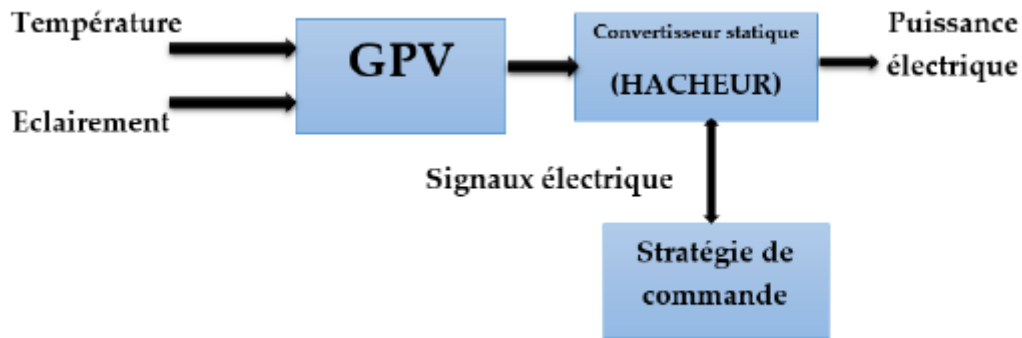


Figure (II-1) : La structure du système photovoltaïque [14].

Alors, nous allons présenter d'abord l'ensemble hacheur système de commande et étudier le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, à savoir rechercher le point de puissance maximale (MPPT).

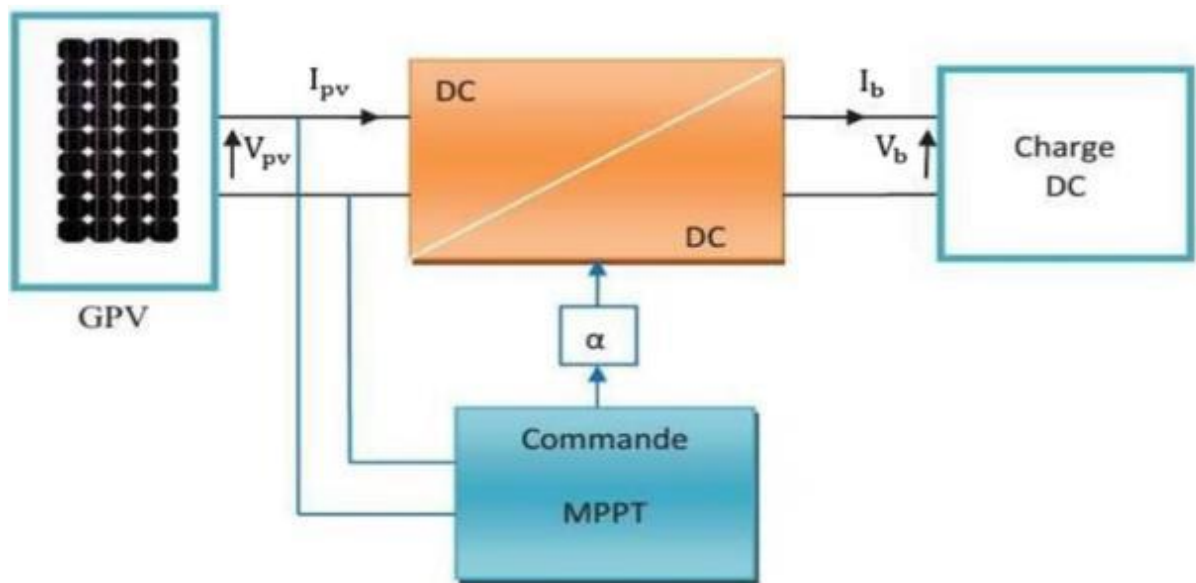


Figure (II-2) : fonctionnement du convertisseur statique [14].

II.2 Les hacheurs :

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans les batteries, ou pour alimenter une charge continue [20].

Ils sont souvent utilisés comme une interface d'adaptation qui assure la poursuite du point de puissance maximale selon les stratégies de contrôle spécifiques.

Les panneaux solaires et la charge peuvent être soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant). La charge peut être de nature résistive aussi.

Les convertisseurs DC-DC sont classés en deux types : les convertisseurs non isolés et les convertisseurs isolés de la source [14].

Le rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quel que soit l'éclairement et la température pour délivrer cette puissance à l'utilisation [21].

II.3 Les types des hacheurs :

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté [11].

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- Abaisseurs (Buck).
- Elévateurs (Boost).
- Elévateurs- abaisseur (Boost-Buck).

II.3.1 Hacheur dévolteur (buck) :

C'est un convertisseur direct DC-DC. Le convertisseur (buck) dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. Convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur [22].

Son modèle mathématique est représenté par la figure suivante (II.3) :

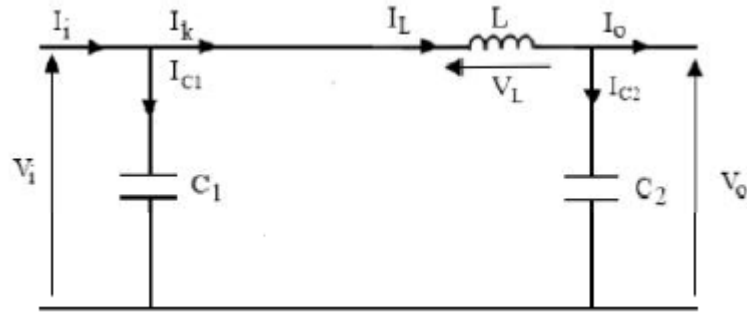


Figure (II-3) : modèle mathématique du convertisseur statique. [20]

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes :

$$I_{c1}(t) = C1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (II.1)$$

$$I_{c2}(t) = C2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (II.2)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (II.3)$$

II.3.2 Hacheur survolteur (boost) :

Connu aussi sous le nom de (boost) ou hacheur parallèle. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [22].

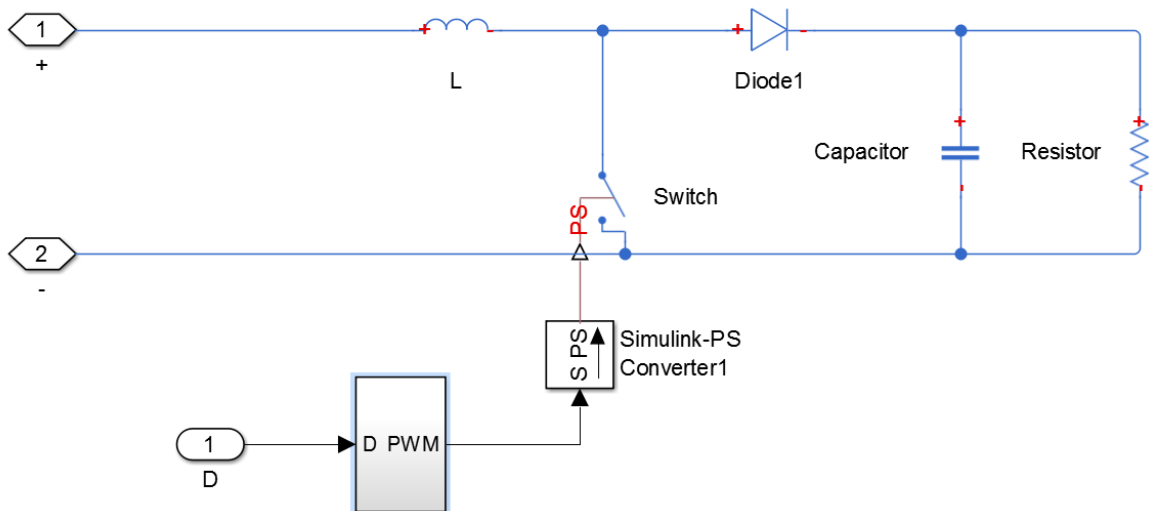


Figure (II-4) : schéma de simulation du hacheur Boost sous MATLAB/SIMULINK.

La figure (II.5) représente le modèle mathématique équivalent de l'hacheur BOOST :

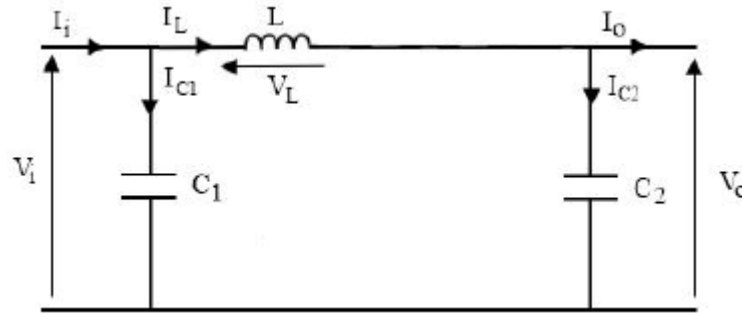


Figure (II-5) : modèle mathématique du convertisseur BOOST. [22]

Lorsqu'on applique la loi de kirchoff sur le circuit, on obtient les équations suivantes :

$$I_{c1}(t) = C1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (II.4)$$

$$I_{c2}(t) = C2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_i(t) - I_0(t) \quad (II.5)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad (II.6)$$

II.3.3 Convertisseur dévolteur survolteur :

Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée [22].

II.4 Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge :

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

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme décrit dans la figure (II-6).

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible.

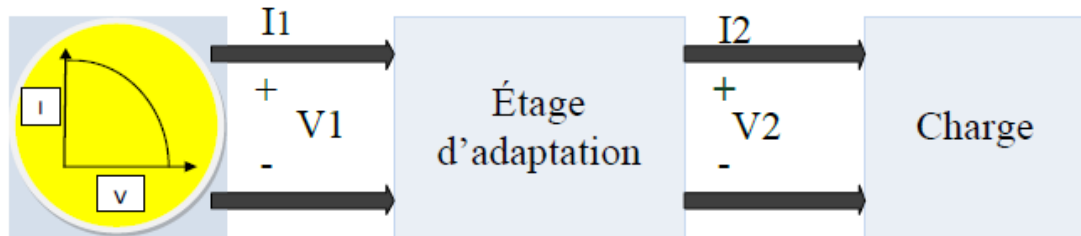


Figure (II-6) : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge DC [21].

Ce dernier par le biais d'une commande spécifique est alors susceptible de permettre au générateur de délivrer sa puissance maximale, pour une courbe $I(V)$ donnée, tout en assurant que la tension ou bien le courant de la charge correspond bien aux caractéristiques de cette dernière.

Pour que le générateur PV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge [21].

II.5 Les onduleurs :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [23].

II.5.1 Principe de fonctionnement de l'onduleur :

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde. Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion :

- **Onduleur monophasé** : Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours [23].
- **Onduleur triphasé** : Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre [23].

II.6 Définition de l'MPPT d'un système solaire photovoltaïque

La technique MPPT est une commande associée à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec le générateur photovoltaïque ou encore avec les générateurs éoliens. Un contrôleur MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque, de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge [24].

II.7 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque :

La poursuite du point maximum de la puissance MPPT est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïque. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 dates de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [21].

II.8 Principe du MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et éclairage), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}).

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (II-7) :

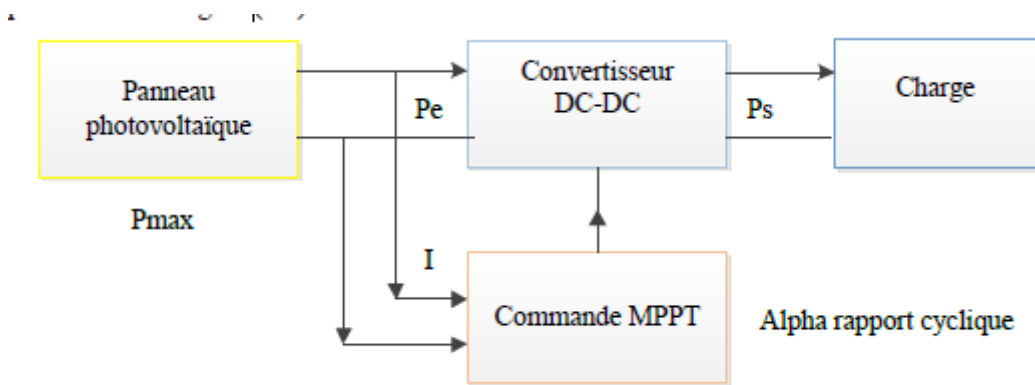


Figure (II-7) : le principe de la commande MPPT [18].

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique CS, à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le PPM [18].

II.9 Classification des commandes MPPT :

Nous avons fait une classification des différentes techniques MPPT existantes, en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme : la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative [24].

II.9.1 Classification des commandes MPPT selon les paramètres :

➤ Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS :

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb & Observe, l'algorithme d'incrément de conductance qui utilise la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{mpp} et I_{mpp}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{oc} et I_{sc}) [25].

➤ **Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur :**

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{\max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable [25].

II.9.2 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche :

➤ **MPPT Indirect :**

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur [16].

➤ **MPPT direct :**

Ces méthodes utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des GPV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode « Perturb & Observe », l'incrément de conductance... [16]

II.10 Les différents algorithmes MPPT :

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux concernant les simulations dans ce qui suit [25].

II.10.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe) :

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau V_{PV} , avec une faible amplitude autour de sa valeur initiale (ΔV), et on observe la variation de la puissance P_{PV} qui en résulte.

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 repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{pv} , ou du courant I_{pv} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$).

Cependant, la variable idéale qui caractérise le PPM est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{PV} , ce qui engendre une variation de la puissance, la figure montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le MPP. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [10].

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversé pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP[26].

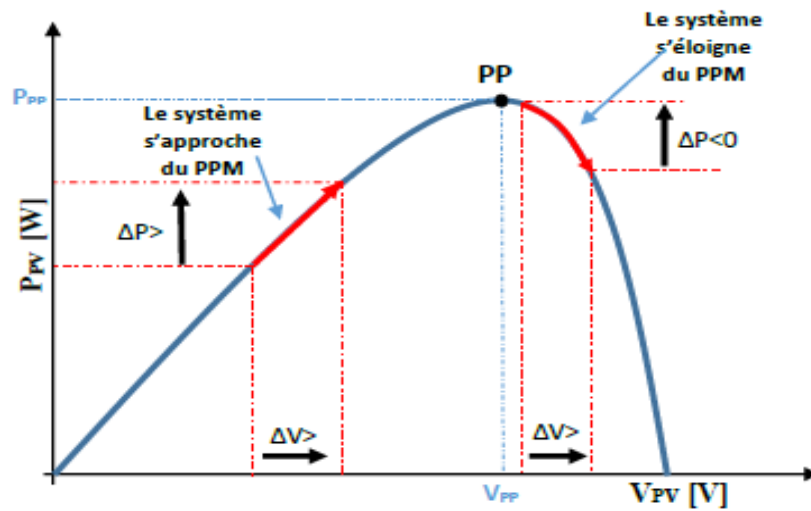


Figure (II-8) : Caractéristique puissance-tension de la commande MPPT type P&O [16].

La figure ci-dessous représente l’algorithme MPPT de type perturb and observe (P&O) [16].

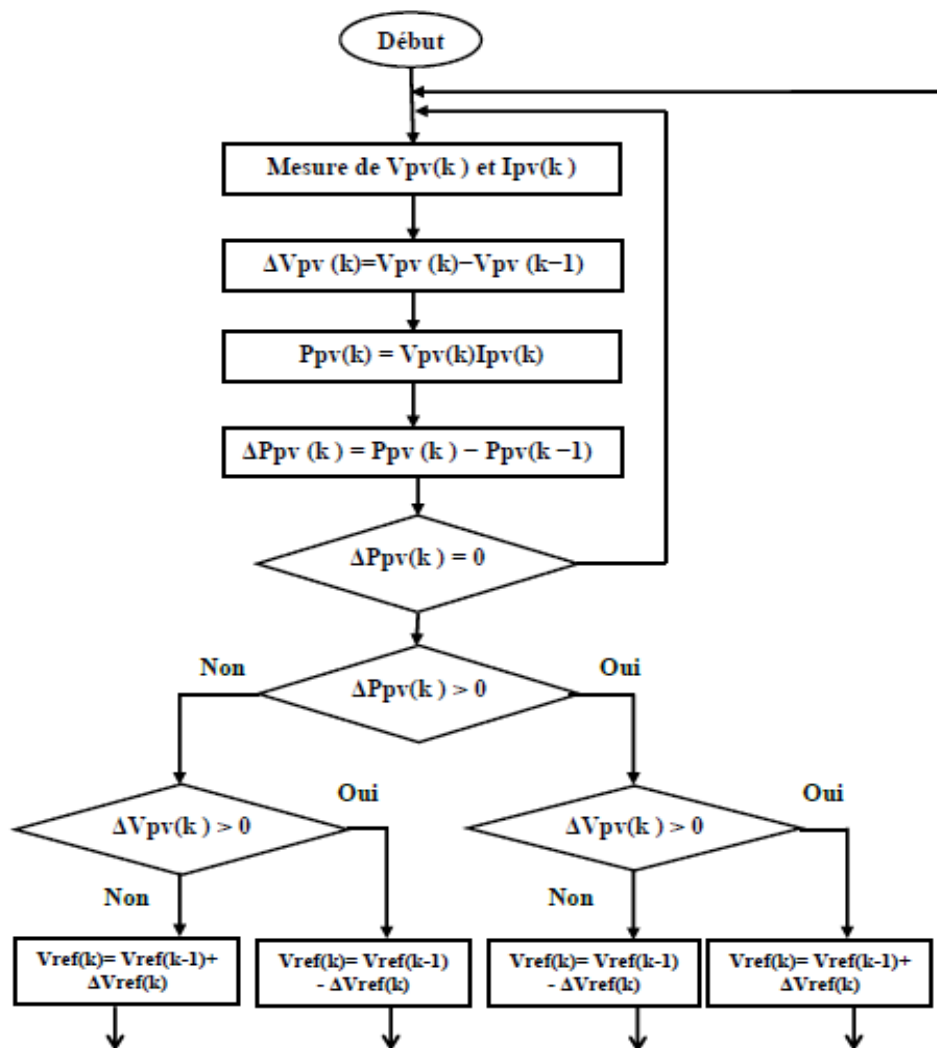


Figure (II-9) : L’algorithme de la méthode observe and perturb (P&O) [16].

II.10.2 La Commande MPPT Flou :

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs. L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non linéarités.

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie $\Delta\alpha$ (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée comme le démontre la figure suivant :

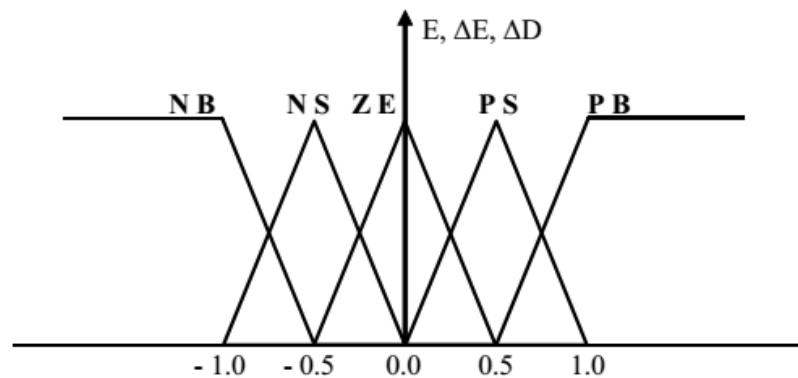


Figure 2.22 : Structure de base de la commande floue.

Figure (II-10) : la structure de base de la commande floue [10].

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité. De la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau [10].

Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM. Mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût.

II.10.3 Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance):

Pour rechercher les PPM, cette autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM [25].

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

$$\mathbf{G} = \frac{\mathbf{I}_{pv}}{\mathbf{V}_{pv}} \quad (\text{II.7})$$

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

$$\Delta \mathbf{G} = \frac{\Delta \mathbf{I}_{pv}}{\Delta \mathbf{V}_{pv}} \quad (\text{II.8})$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du module P_{PV} par rapport à la tension V_{PV} 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.

Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite.

La figure suivante permet d'écrire les conditions suivantes :

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

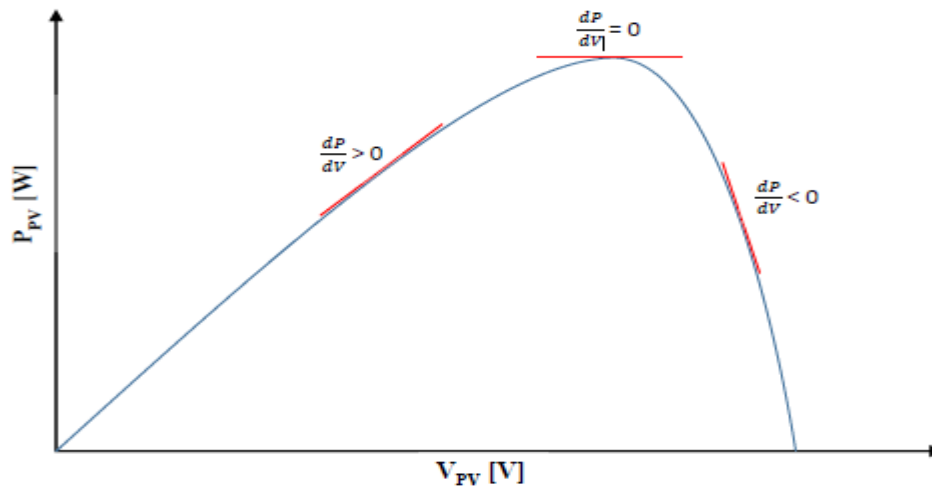
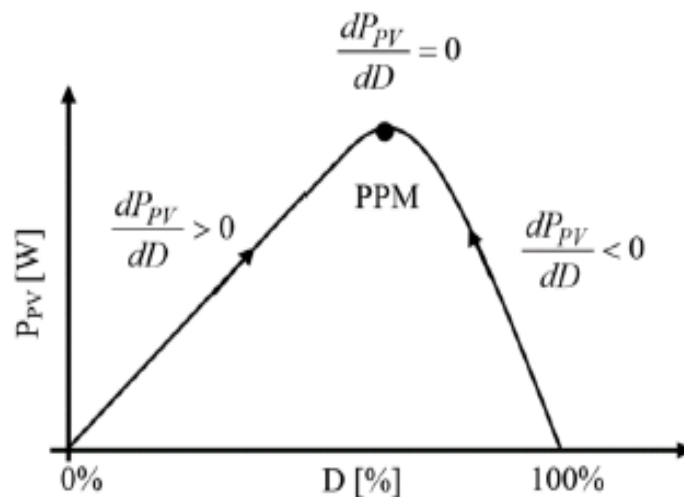


Figure (II-11) : Caractéristique P(V) du générateur PV par la méthode Inc(Cond) [25].

II.10.4 Algorithme “Escalade de la Colline (Hill Climbing) :

La technique de la commande ‘Hill Climbing’ H.C, consiste à perturber le rapport cyclique tout en perturbant la tension. Cette perturbation se traduit par un déplacement du point de fonctionnement le long de la caractéristique puissance-rapport cyclique du générateur photovoltaïque [32], comme le montre la figure (II-12) :



Figure(II-12) : la relation entre la puissance et le rapport cyclique [32].

II.11 Simulation du hacheur Boost :

Il permet d’adapter la tension de GPV aux besoins de la charge par la variation de rapport cyclique D . L’entrée du hacheur est une source de courant DC et la sortie du hacheur est un

récepteur (absorbant de l'énergie de tension DC) [24], la figure suivante représente le schéma du bloc du hacheur Boost avec charge sous MATLAB/SIMULINK.

L'objectif du convertisseur MPPT est de ramener le point de fonctionnement au PPM et faire une adaptation entre la source et la charge. La charge résistive permet une première étude du comportement du système.

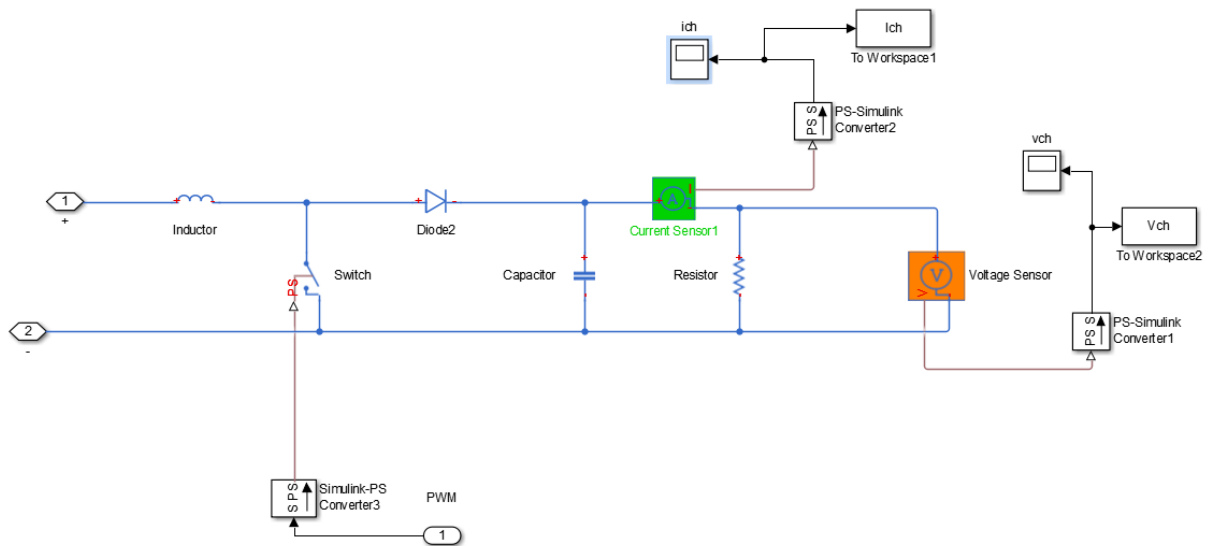


Figure (II-13) : implémentation du convertisseur DC-DC avec charge sous MATLAB/SIMULINK.

Après avoir simulé le convertisseur Boost, on a obtenu les graphes suivants : la tension aux bornes de la charge en fonction de temps et le courant aux bornes de la charge en fonction du temps respectivement comme le démontre les figures ci-dessous :

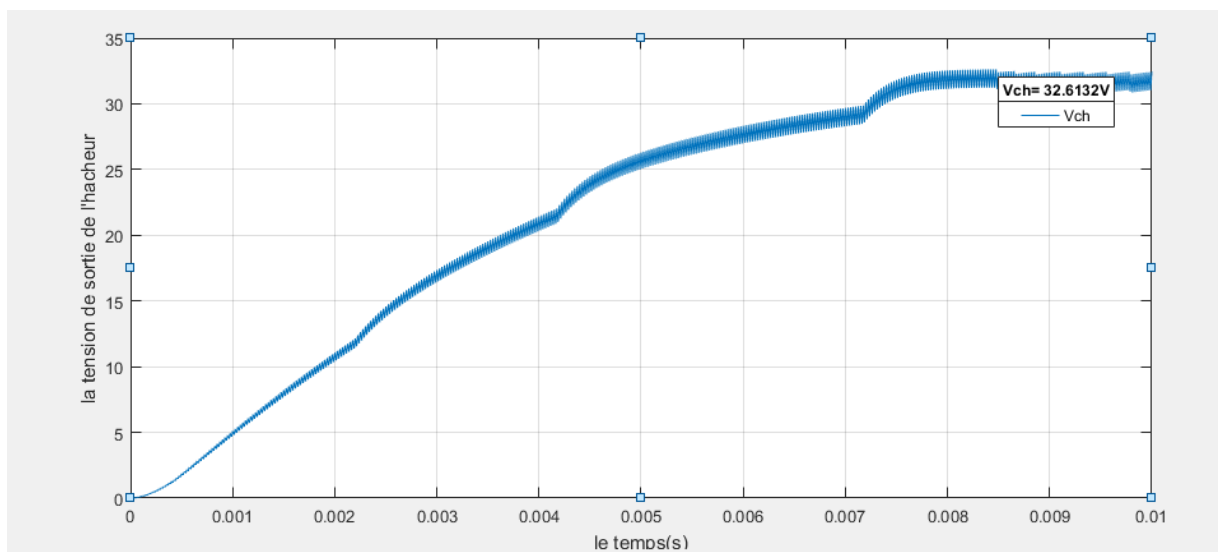


Figure (II-14) : La tension de sortie du convertisseur DC-DC en fonction du temps.

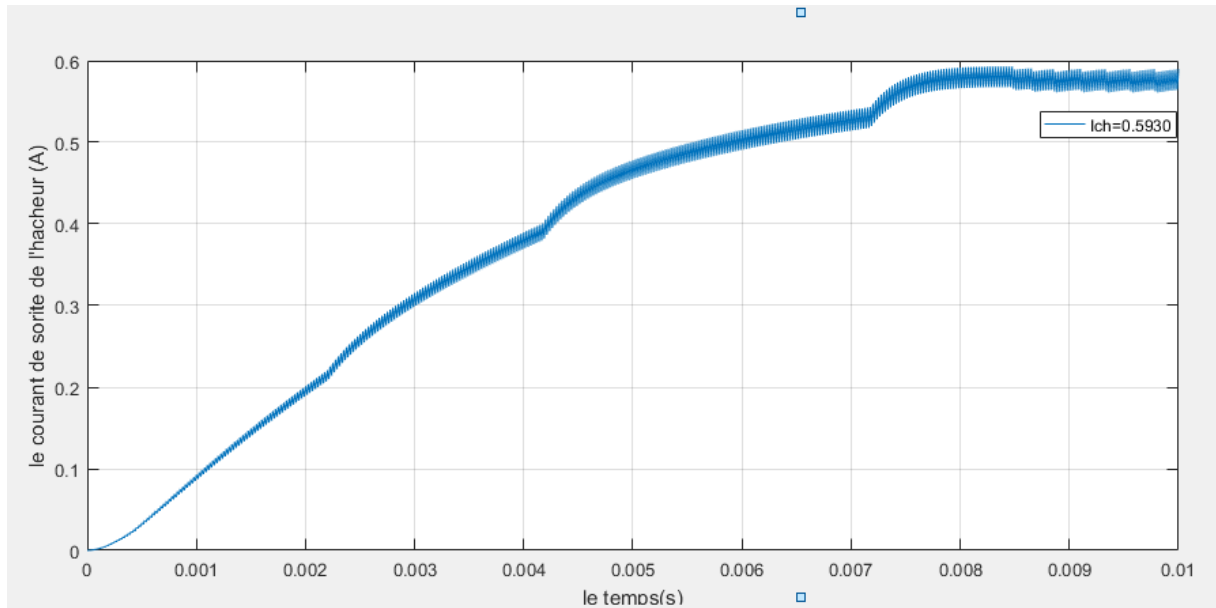


Figure (II-15) : Le courant de sortie du convertisseur DC-DC en fonction du temps.

Table (II-1) : représente les valeurs de la tension de sortie et courant de sortie du hacheur Boost :

Les valeurs de :	De Référence	De la sortie du hacheur
tension	$V_{mpp}=17.82V$	$V_{ch}=32.61V$
courant	$I_{mpp}=1.14A$	$I_{ch}=0.5930A$

D'après les résultats qu'on a obtenu, on constate que la tension à la sortie de le hacheur V_{ch} est supérieure à celle de référence V_{mpp} et que le courant de sortie I_{ch} inférieur à celui de référence. Il fournit une tension à sa sortie supérieur celle fournie par le générateur photovoltaïque et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge. Donc on peut dire que le hacheur Boost fonctionne correctement dans notre simulation.

II.12 Le schéma global de la simulation de la commande MPPT :

La figure ci-dessous représente le schéma global d'un système photovoltaïque composé d'un module PV avec un hacheur commandé en MPPT.

Dans cette simulation on a utilisé un GPV et un hacheur Boost avec charge et résistance caractérisé comme nous avons cité précédemment, un signal PWM et une commande MPPT de type P&O.

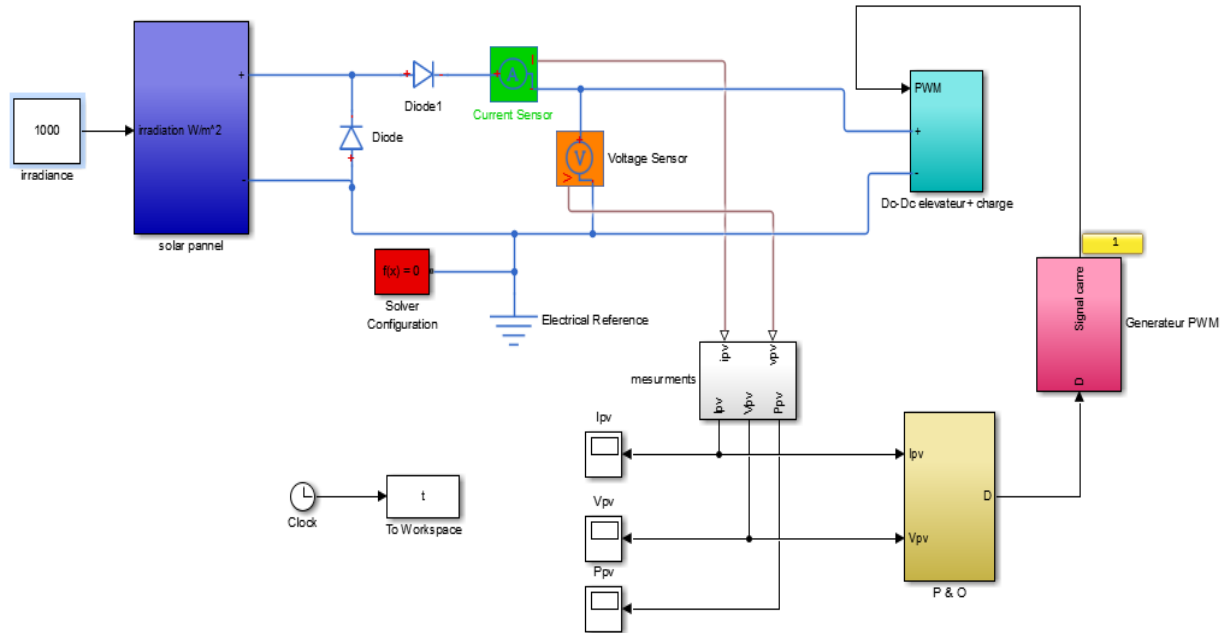
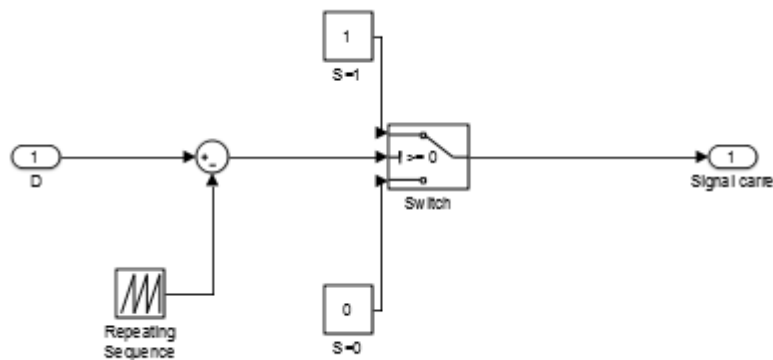


Figure (II-16) : Schéma MATLAB-SIMULINK d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT (P&O) et un convertisseur (DC/DC) type Boost.

II.12.1 Modèle SIMULINK pour la génération du signal PWM :

La figure ci-dessous représente le schéma du bloc de la génération du signal PWM :

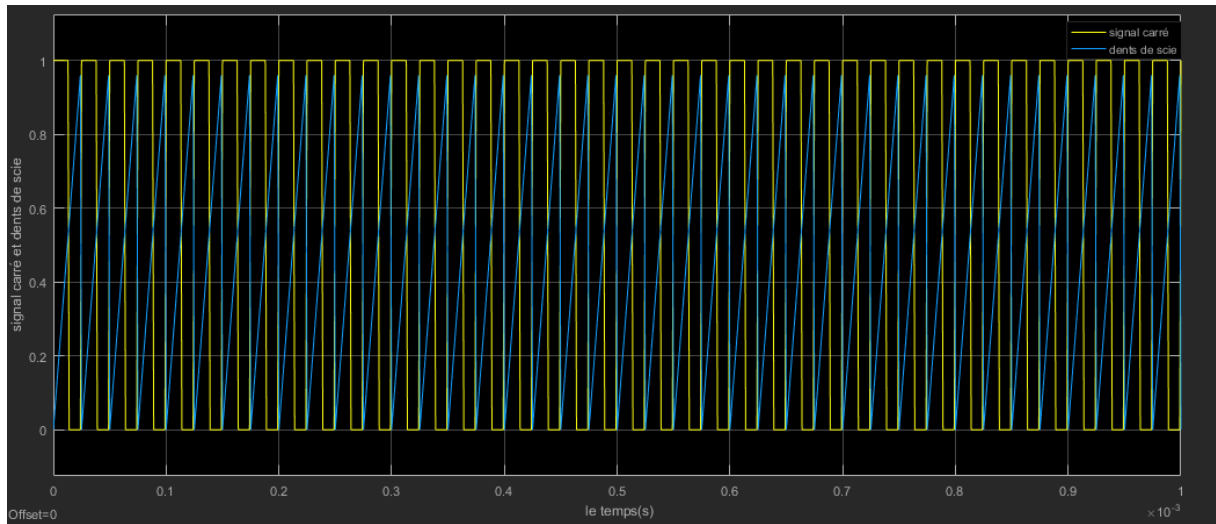


Figure(II-17) : Schéma du bloc de la génération du signal PWM sous MATLAB/SIMULINK.

Le bloc « PWM » génère le signal PWM nécessaire à la commande du commutateur.

Le générateur du signal PWM permet de contrôler le convertisseur DC-DC type Boost, l'entrée du générateur PWM est le signal de référence D rapport cyclique et sa sortie est un PWM utilisé pour contrôler le commutateur électronique des convertisseurs.

La figure suivante (II-18) représente le signal dents de scie et signal carré du générateur signal PWM :



Figure(II-18) : La variation du signal PWM en fonction du temps.

II.12.2 Le schéma de simulation du convertisseur DC-DC type Boost :

La figure ci-dessous représente le schéma de convertisseur Boost avec charge et résistance sous MATLAB/SIMULINK, ce convertisseur est généré par le générateur PWM plus exactement par son rapport cyclique D, il permet de contrôler le hacheur type élévateur,

L'entrée est générée par le signal de référence D et la sortie est un signal carré.

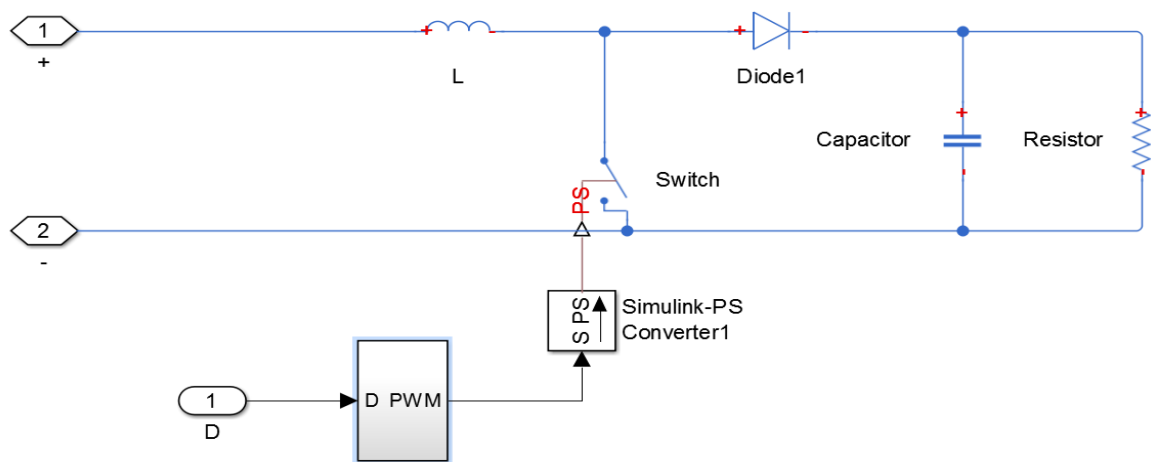


Figure (II-19) : Schéma du convertisseur DC-DC type BOOST.

II.12.3 Le bloc de la commande MPPT (perturb and observe) sous MATLAB :

La figure(II-20) illustre le schéma de la simulation du bloc MPPT type perturbation and observation P&O sous MATLAB/SIMULINK :

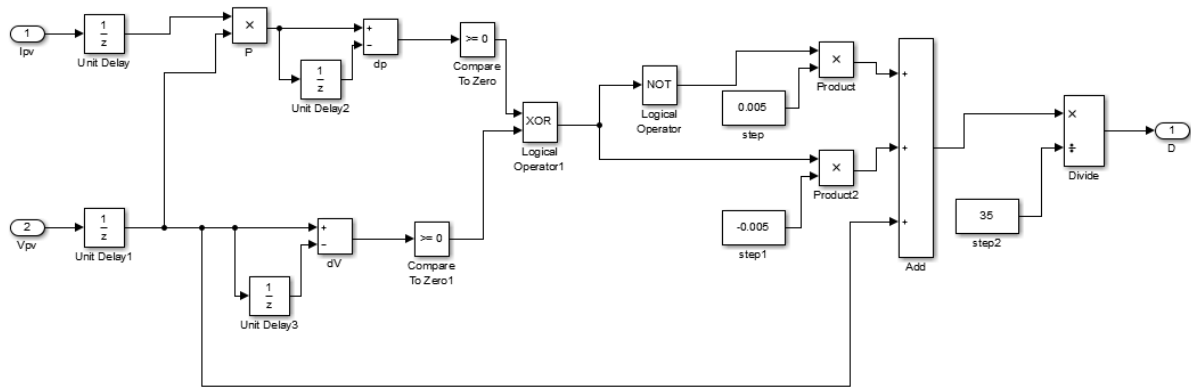


Figure (II-20) : Implémentation du bloc MPPT type perturbation and observation P&O sous MATLAB/SIMULINK.

II.12.4 Le schéma du bloc de mesure de la puissance P_{pv} , I_{pv} et V_{pv} :

La figure suivante représente le schéma du bloc de mesure de la puissance de sortie :

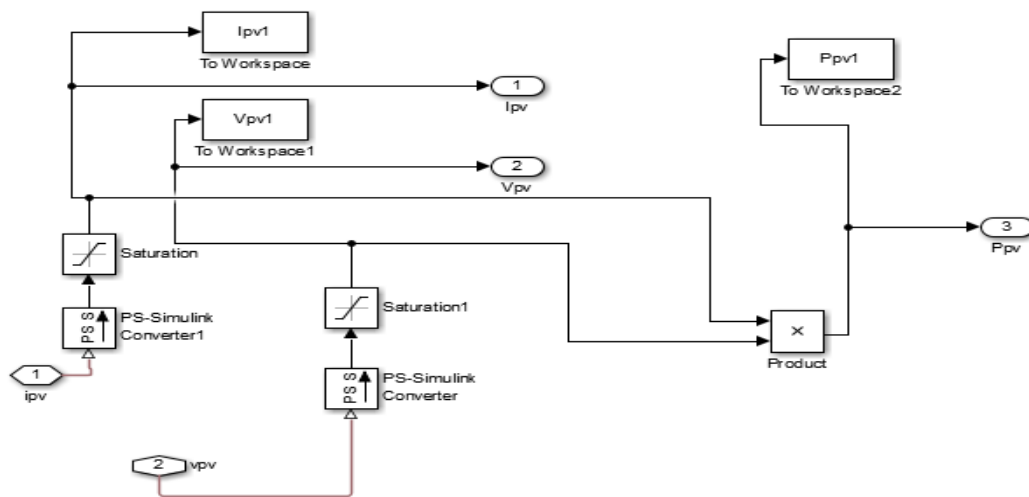


Figure (II-21) : Schéma du bloc de mesure de la puissance de sortie sous MATLAB/SIMULINK.

II.13 Résultats et discussion de la simulation :

Les graphes suivants représentent les résultats du Schéma MATLAB-SIMULINK d'un système photovoltaïque modélisé par une commande MPPT (P&O) et un convertisseur (DC/DC) type Boost :

- Pour un pas de perturbation 0.01 avec une température de $T=25C^{\circ}$ et un éclairement $E=1000W/m^2$, on a obtenu le graphe suivant (t, P_{pv}) :

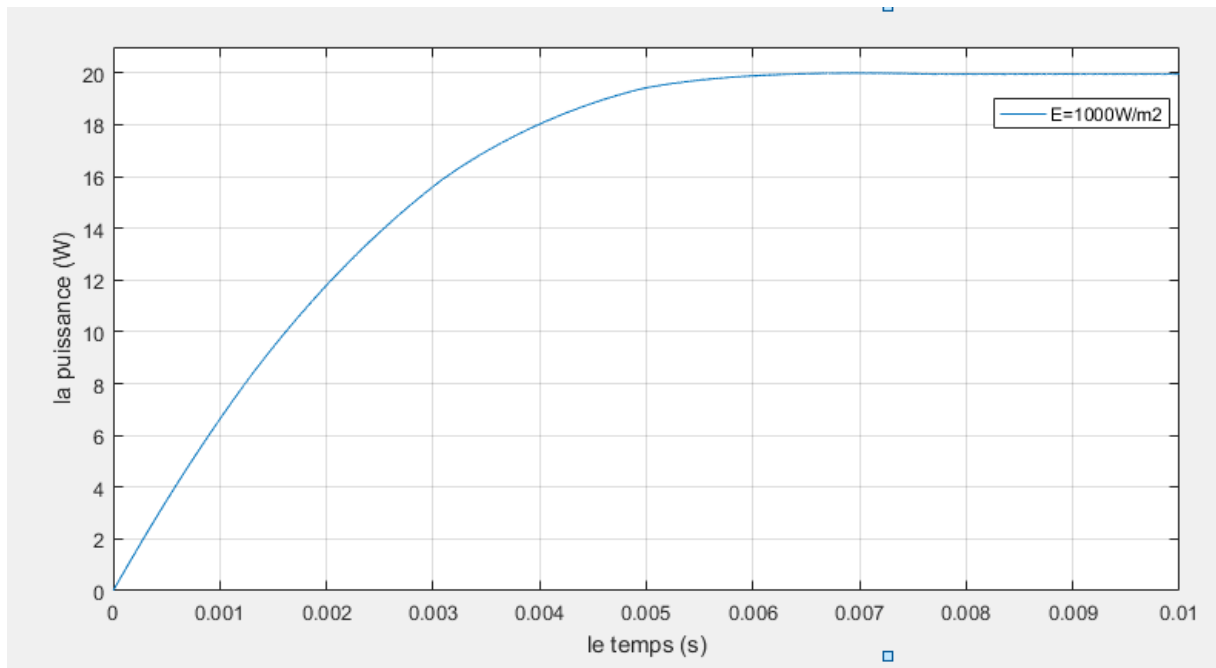


Figure (II-22) : la puissance pour un pas de perturbation de 0.01 sous conditions standard ($T=25^{\circ}C$ et $E=1000W/m^2$).

D'après le graphe précédent et pour un éclairement $E=1000W/m^2$ et $T=25C^{\circ}$ (conditions standard STC), on remarque que la puissance de sortie croit jusqu'à l'atteinte du point max PPM et il se stabilise jusqu'à la fin de simulation, on remarque aussi, qu'il y'a pas de perte de puissance du générateur et d'oscillation autour du PPM, alors on dit que la commande MPPT fonctionne parfaitement aux conditions standards.

- Pour un pas de perturbation 0.01 avec une température de $T=25C^{\circ}$ et un éclairement $E=1000W/m^2$, on a obtenu le graphe suivant (t, I_{pv}).

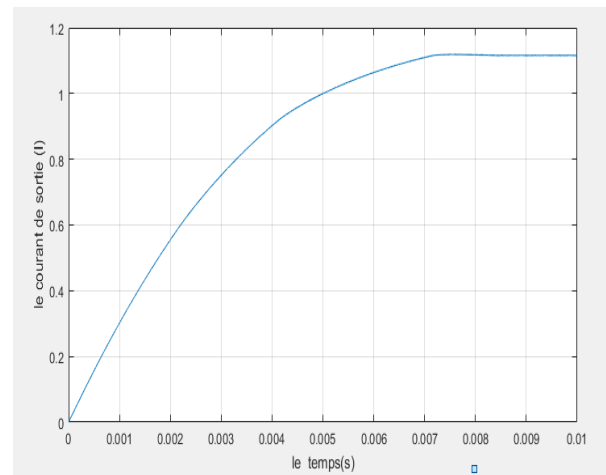
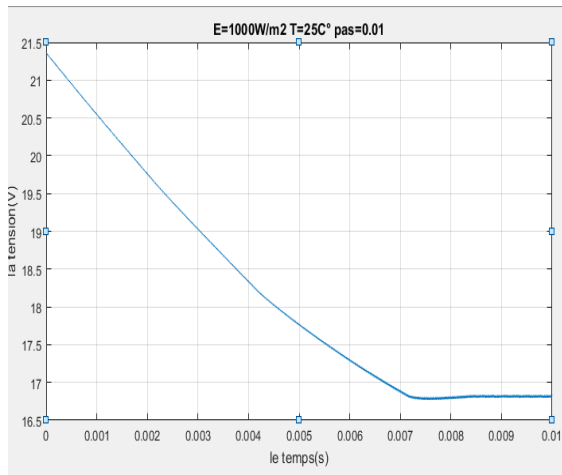


Figure (II-23) : La tension pour un pas de perturbation de 0.01

Figure (II-24) : Le courant pour un pas de perturbation de 0.01

Maintenant si on fait varier l'éclairement entre 500W/m^2 jusqu'à 1000W/m^2 et une température fixe, on obtient les résultats ci-dessous :

- Pour un pas de perturbation de 0.1 température constante $T=25\text{C}^\circ$ et un éclairement $E=800\text{W/m}^2$, on a obtenu le graphe suivant (t,Ppv) :

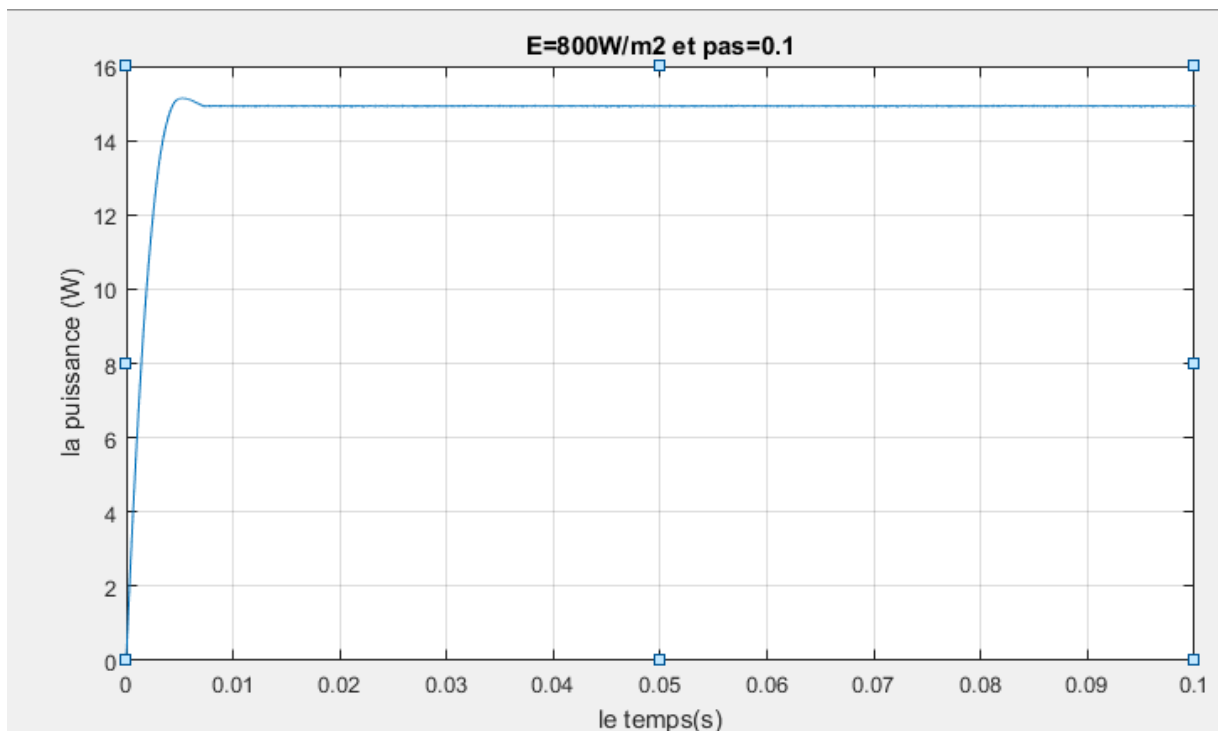


Figure (II-25) : La puissance pour un pas de perturbation de 0.1 sous conditions($T =25\text{C}^\circ$ et $E =800\text{W/m}^2$).

- pour un éclairement $E=600\text{W/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$ et un pas de 0.1 :

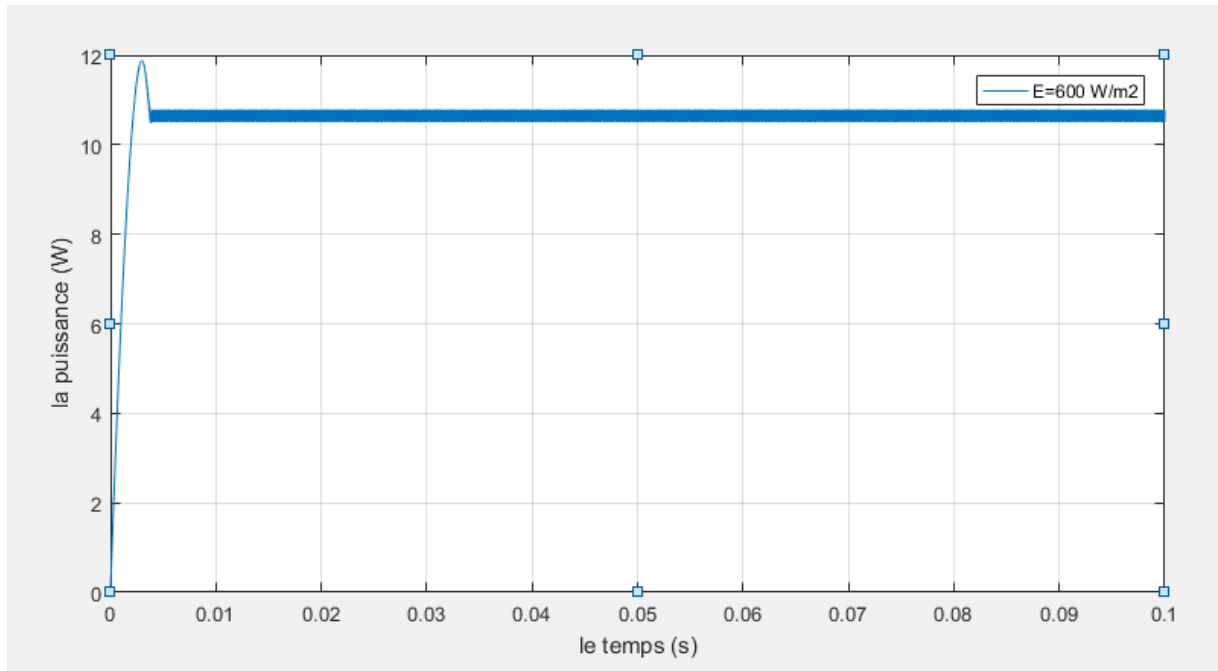


Figure (II-26) : La puissance pour un pas de perturbation de 0.1 sous conditions ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $E = 600\text{ W/m}^2$).

- Pour un éclairement $E=500\text{ W/m}^2$, $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et un pas de 0.1 et 0.01 :

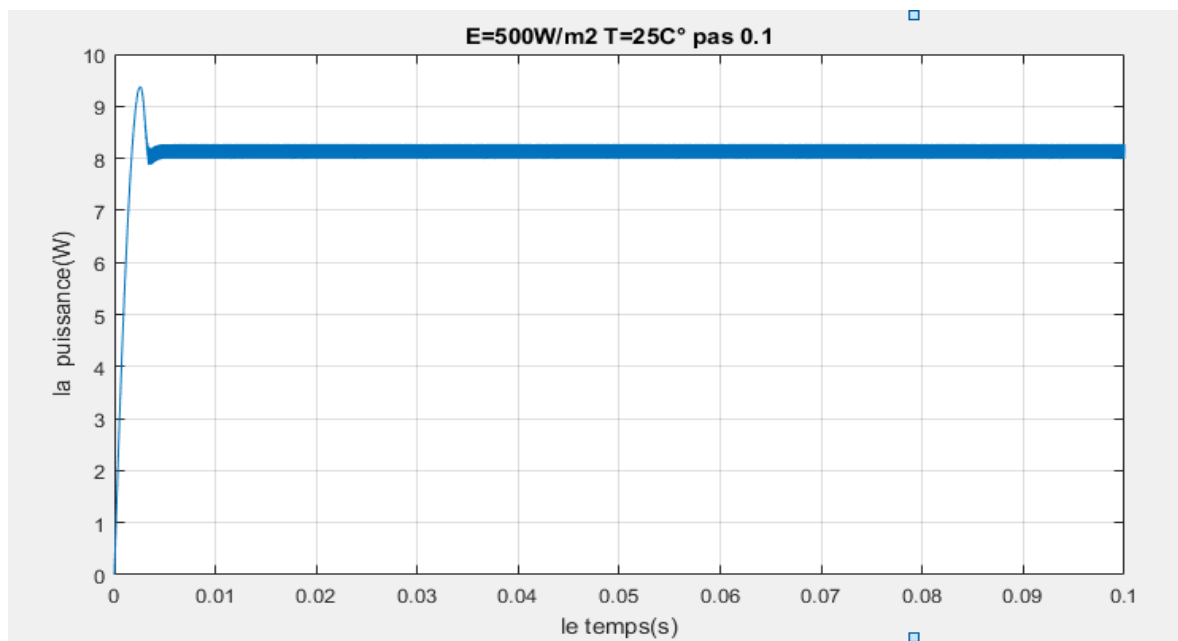


Figure (II-27) : La puissance de sortie en fonction du temps pour un pas de perturbation de 0.1 sous conditions($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $E = 500\text{ W/m}^2$).

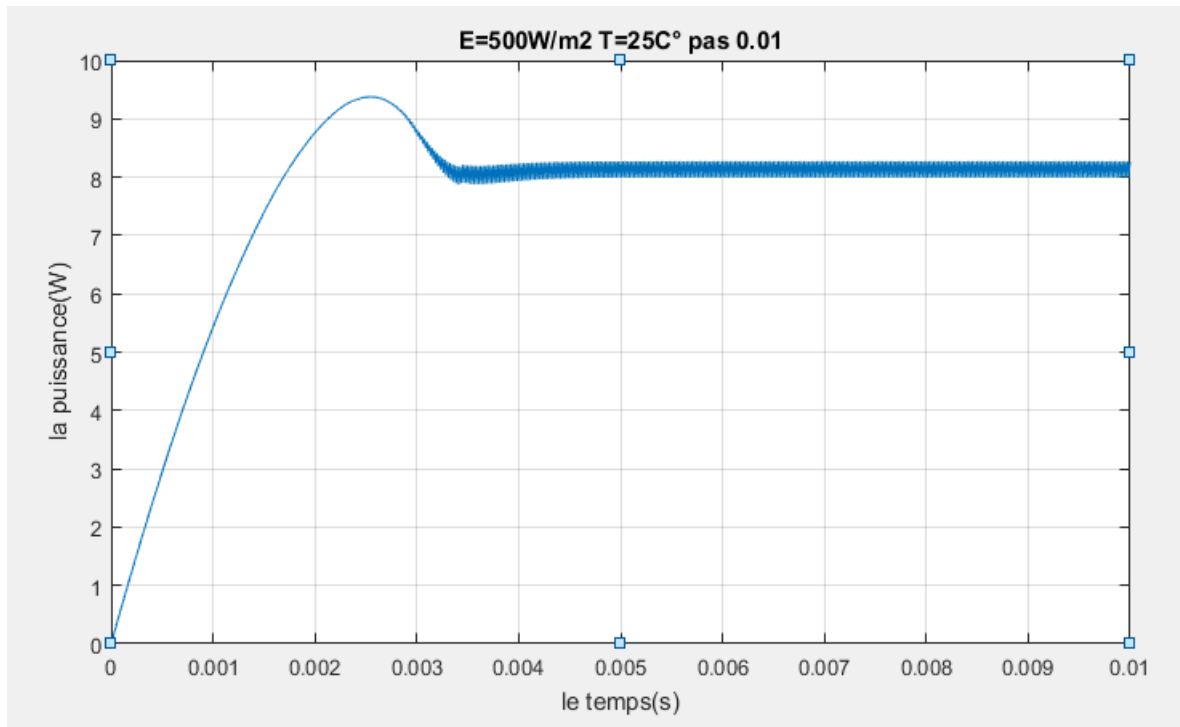


Figure (II-28) : La puissance de sortie en fonction du temps pour un pas de perturbation de 0.01 sous conditions($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $E = 500\text{W/m}^2$).

Les figures 25,26,27 et 28 représentent l'influence de l'éclairement de 500W/m^2 à 1000W/m^2 sur la puissance de sortie du générateur PV. D'après ces graphes, on remarque que la puissance diminue avec la diminution de l'éclairement et vice-versa, on constate aussi que les pertes varient inversement avec l'éclairement, ça veut dire lorsque l'éclairement diminue, les pertes du générateur PV augmentent, ces pertes dues aux oscillations autour du point max PPM. Donc l'amplitude des oscillations autour du point PPM devient plus grande et le temps de convergence vers la puissance max est assez rapide ce qui influe sur la fiabilité et la rapidité de la commande MPPT.

Parlant sur le pas de la réponse, on remarque que la réponse est plus précise pour le pas de (0.01) que le pas de (0.1) comme indiqué sur la figure (II-27) et (II-28).

La figure ci-dessous représente la variation de la puissance de sortie du générateur PV avec l'éclairement en fonction du temps (s) :

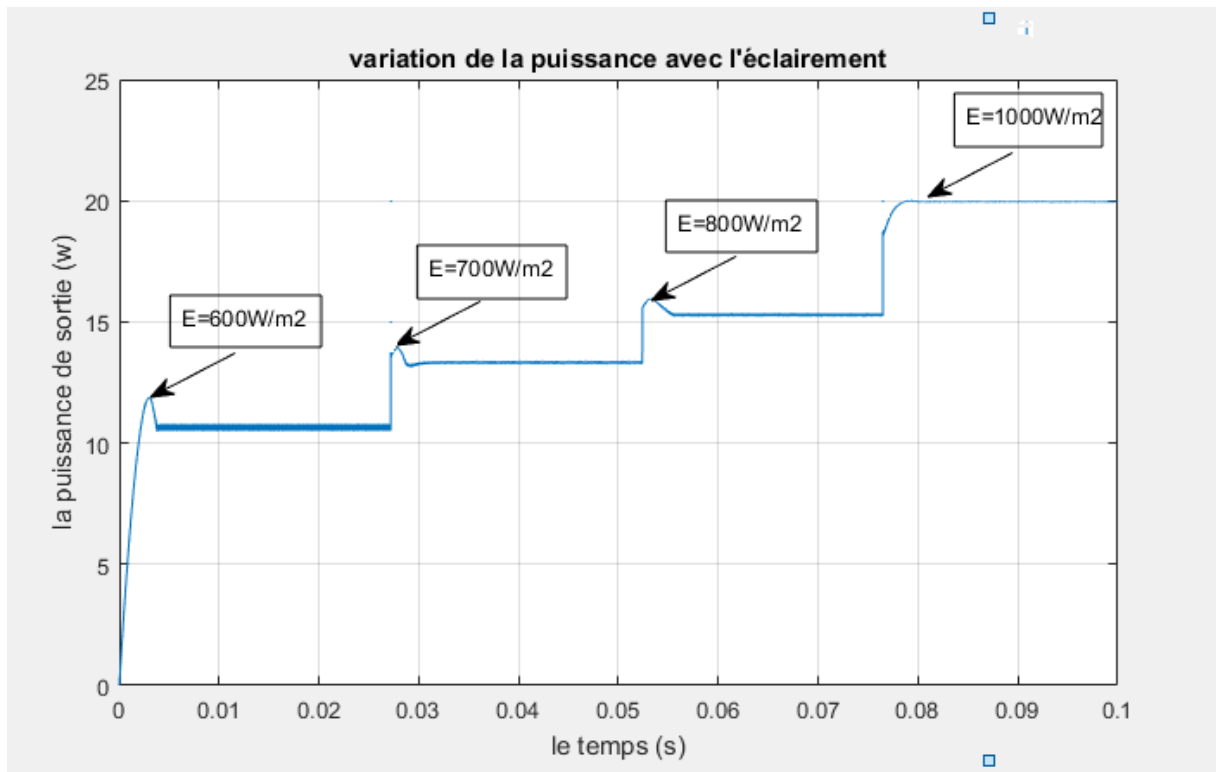


Figure (II-29) : La variation de la puissance avec l'éclairement en fonction du temps.

La figure (II.29) : représente la variation de la puissance de sortie avec l'éclairement en fonction du temps, on constate que la puissance de sortie du convertisseur DC-DC varie proportionnellement avec l'éclairement, lorsque l'éclairement augmente la puissance croit, on remarque aussi les pertes diminuent avec l'augmentation de l'éclairement.

Maintenant si on fixe l'éclairement à $E=1000\text{W/m}^2$ et on fait varier la température, on aura les graphes suivants qui se sont illustrés dans la figure (II-30), figure (II-31) et figure (II-32):

- La figure suivante représente l'influence de la température sur la puissance de la commande MPPT :

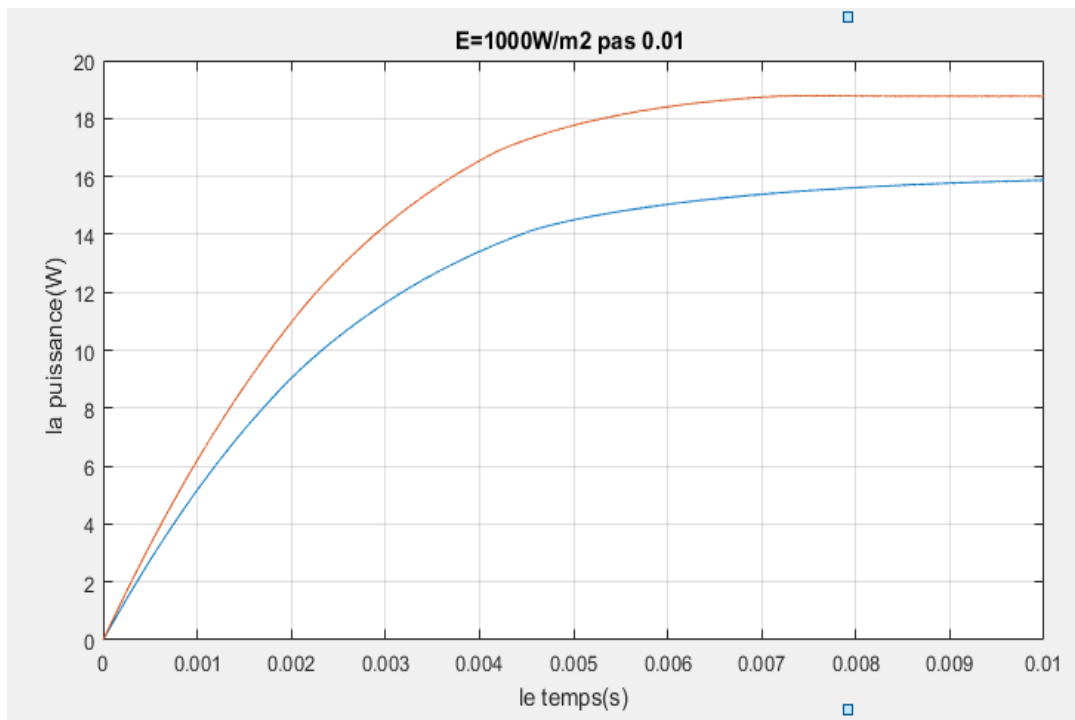
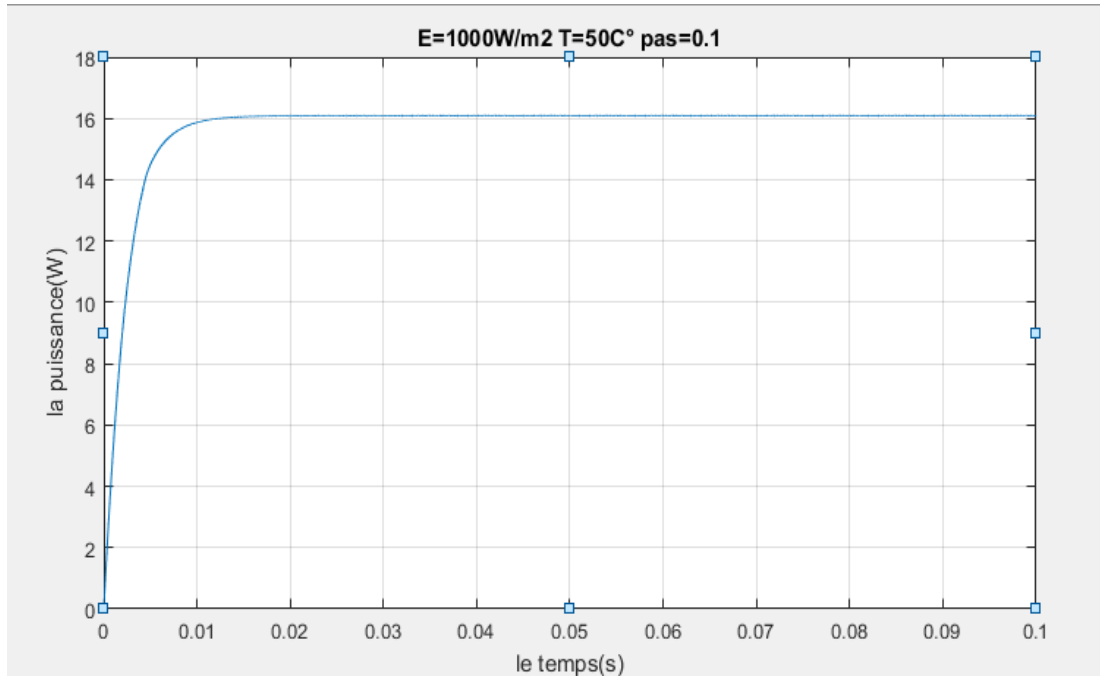


Figure (II-30) : L'influence de la température sur la commande MPPT pour un pas de 0.01.

- Si on fait varier la température $T=50C^{\circ}$ et un éclairement constant $E=1000W/m^2$ et un pas de perturbation de 0.1, on a obtenu les graphes suivants :



Figure(II-31) : la puissance Pour un pas de perturbation 0.1 avec une température de $T=50C^{\circ}$ et un éclairement $E=1000W/m^2$.

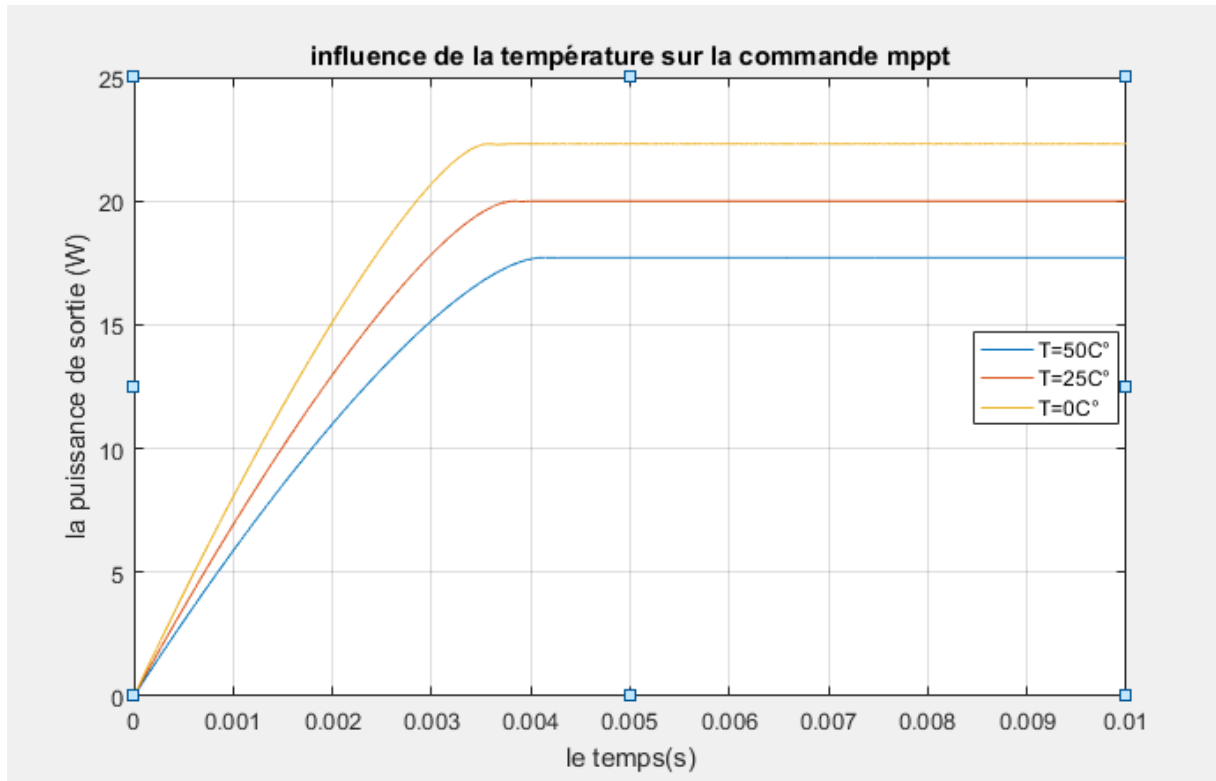


Figure II-32) : influence de la température sur la commande MPPT.

Pour les figures (II-30), (II-31) et (II-32) on remarque que la puissance varie inversement avec la température, on constate que à $T=25^{\circ}\text{C}$ la valeur de la puissance est supérieure à celle de $T=50^{\circ}\text{C}$, on peut déduire que la température influence négativement sur la puissance du générateur et du hacheur Boost. On constate aussi que lorsque la puissance atteint son point maximum, y'a pas de perte ou oscillations autour du point PPM.

Le tableau ci-dessous représente les valeurs de la puissance de sortie du GPV avec la commande MPPT basé sur l'algorithme P&O :

Table (II-2) : représente les valeurs de la puissance avec la variation de l'éclairement

Eclairement (W/m^2)	600	700	800	900	1000
Puissance (W)	11.8742	13.9900	15.9554	17.9809	19.9930

II.14 Choix de l'algorithme MPPT :

Le Tableau suivant montre la comparaison entre les différentes techniques MPPT dont nous avons rappelé les principes ci-dessus.

L'analyse de ces différentes méthodes de recherche montre que les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à un seul paramètre η_{MPPT} qui est défini comme le rendement du MPPT.

Table (II-3) : montre la comparaison entre les différentes techniques MPPT.

MPPT	Rendement	Avantages	Inconvénients
Perturb and Observ	81.5%- 96.5%	-Une structure simple. -Implémentation facile. -Peu paramètres de mesure	-Présente des oscillations autour MPP -Perte occasionnelle de la recherche du MPP lors du changement rapide des conditions climatiques
IncCond	89.5%- 98.2%	-Il n ya de pertes par rapport au MPP - Ne présente pas de risques de divergences par rapport au MPP.	-Le temps d'exécution de l'algorithme est long car il est plus complexe.
Hill Climbing	95%- 99.1%	-Facile à mettre en oeuvre	-Oscillations autour de MPP en régime établi. -Perte occasionnelle du MPP lors du changement climatique

D'autres critères tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance, sont importants pour évaluer les qualités de ce type de commande.

Les divers essais extraits de la littérature selon montrent que ce type de commande peut être performant dans certaines conditions mais ne permettent pas de dire que tel mode de recherche

est plus performant qu'un autre, en revanche, ils donnent une estimation d'un rendement qui peut être élevé [24].

II.15 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a exposé brièvement quelques topologies de base des alimentations à découpage, qui ne sont rien d'autres que des convertisseurs DC-DC. Comme le convertisseur dévolteur, convertisseur survolteur et convertisseur dévolteur-survolteur.

On a présenté aussi la commande MPPT des convertisseurs DC-DC pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement. On a étudié quelques méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme d'incrément de l'inductance, méthode de perturbation et observation, la méthode de la logique floue et la hill climbing.

Nous avons aussi présenté le fonctionnement du hacheur survolteur DC-DC type Boost et la commande MPPT, Le convertisseur BOOST et l'algorithme (Perturb & Observe) sont simulés en utilisant MATLAB/SIMULINK.

Dans le chapitre suivant, on entame l'algorithme de mode glissant pour extraire la puissance maximale du générateur photovoltaïque due à sa simplicité et à sa fiabilité par rapport aux autres méthodes et la faire comparer avec celle de l'algorithme P&O.

chapitre III: Implémentation d'une commande MPPT basée sur le mode glissant.

III.1 Introduction :

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées. La méthode de mode glissant est une méthode qui permet de poursuivre le point de la puissance maximale dans une commande MPPT associée à un générateur PV à l'aide d'un convertisseur élévateur (hacheur Boost). Cette technique permet de produire la puissance maximale en permanence pour améliorer le rendement du générateur photovoltaïque.

Ce chapitre est consacré aux rappels théoriques sur la commande par mode glissant, ainsi qu'à l'application de ce type de commande dans le domaine d'extraction de la puissance PV maximale pour une structure basée sur un convertisseur Boost. Pour valider cette nouvelle méthode, des simulations sont faites sous environnement MATLAB/SIMULINK en tenant compte des variations des conditions atmosphériques comme l'éclairement et la température et une étude comparative entre la méthode de P&O et le mode glissant, afin d'évaluer les comportements des deux algorithmes sur la fiabilité et l'extraction du point maximum de la puissance PPM. Les résultats de cette simulation d'optimisation seront présentés et analysés à la fin de ce chapitre.

III.2 Présentation de la méthode de mode glissant :

La Commande par Mode Glissant, (Sliding Mode Control, SMC) apparue en union soviétique pendant les années 60, qui provient de la théorie des systèmes à structure variable (SSV), permet d'accomplir cette tâche. Cette commande aboutit à la stabilité même en présence de grandes variations de l'alimentation ou de la charge, à une bonne réponse dynamique et à une implémentation simple. Elle est caractérisée par la discontinuité de la commande aux passages par une surface de commutation appelée : surface de glissement [28].

L'avantage principal de la commande à structure variable avec le mode glissant est la robustesse vis-à-vis du changement des paramètres ou des perturbations. De plus, la commande par mode glissant est relativement facile à mettre en œuvre par rapport à d'autres types de commandes non linéaires.

Cette commande est caractérisée par la discontinuité au passage par une surface de commutation appelé surface de glissement [29].

La figure (III.1) : représente le principe de fonctionnement de la commande MPPT :

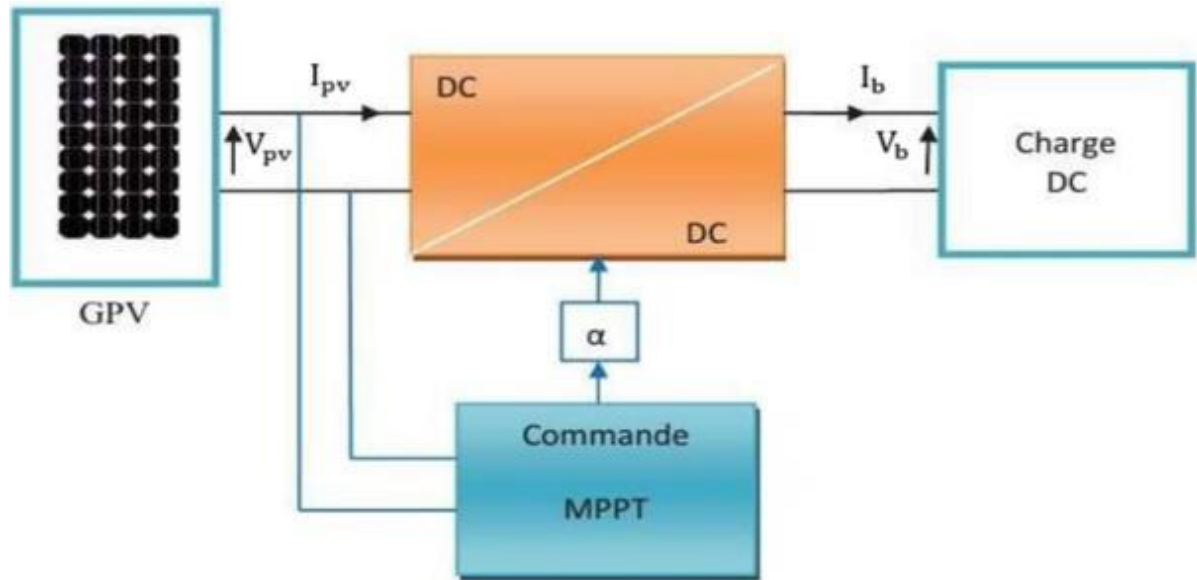


Figure (III-1) : La structure du fonctionnement de la commande MPPT [29].

III.2.1 Système à structure variable :

Un SSV est le système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant [28].

III.2.2 Objectif de la commande par mode glissant :

L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels [30].

- Synthétiser une surface $S(x,t)$ telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité ;
- Déterminer une loi de commande $u(x,t)$ qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.

III.2.3 Mise en œuvre de la commande par mode glissant :

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes principales très dépendantes l'une de l'autre :

- L'établissement des conditions d'existence.
- Choix de la surface de glissement.

- Détermination de la loi de commande.

III.3 Commande MPPT d'un système PV par mode glissant :

La condition du point de puissance maximale PPM est donnée par [30] :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (III.1)$$

Avec : P_{pv} , V_{pv} , I_{pv} représente la puissance, la tension et le courant du GPV.

La première étape dans la conception de la commande est le choix de la surface de commutation, qui peut être choisie de la façon suivante :

$$S(x) = \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} * \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (III.2)$$

La figure (III.2) montre l'algorithme de la commande MPPT par le mode de glissement :

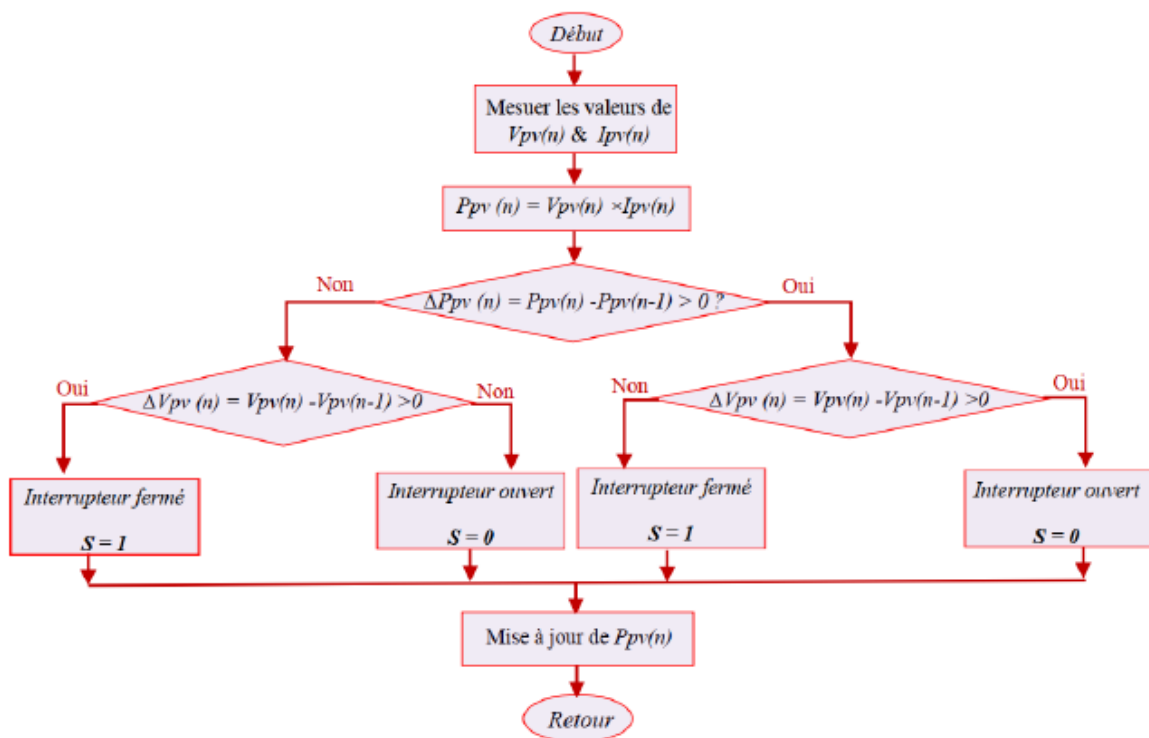


Figure (III-2) : L'algorithme de la commande par mode glissant.

La figure ci-dessous montre le fonctionnement de la commande par mode glissant :

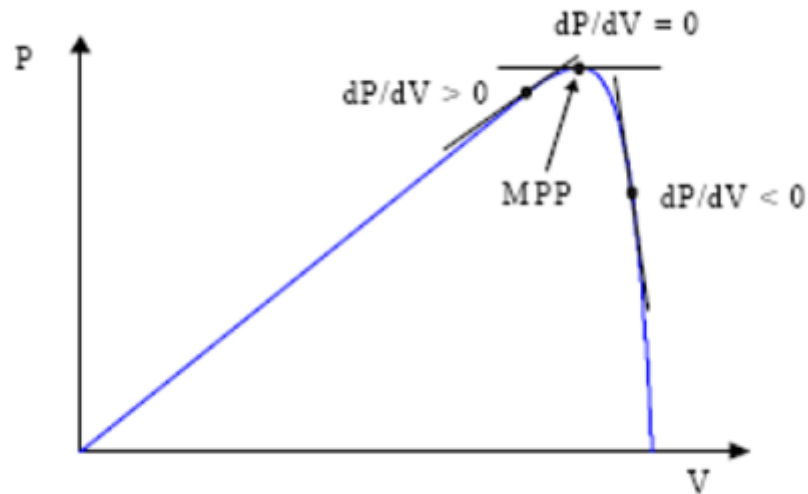


Figure (III-3) : Le principe de ma commande MPPT par le mode glissant [29].

Si le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM, la commande doit le déplacer vers la surface de glissement en incrémentant la tension V_{pv} , ceci n'est possible que si $U=0$, (interrupteur fermé), En revanche, si le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM, la commande doit le déplacer vers la surface de glissement en décrémentant la tension V_{pv} , et ceci n'est possible que si $U=1$ (interrupteur ouvert) comme le démontre l'algorithme précédent.

Pour cela, la loi de commande de commutation adoptée est celle présentée par l'équation :

$$U=0 \quad \text{pour} \quad S(x)>0.$$

$$U=1 \quad \text{pour} \quad S(x)<0.$$

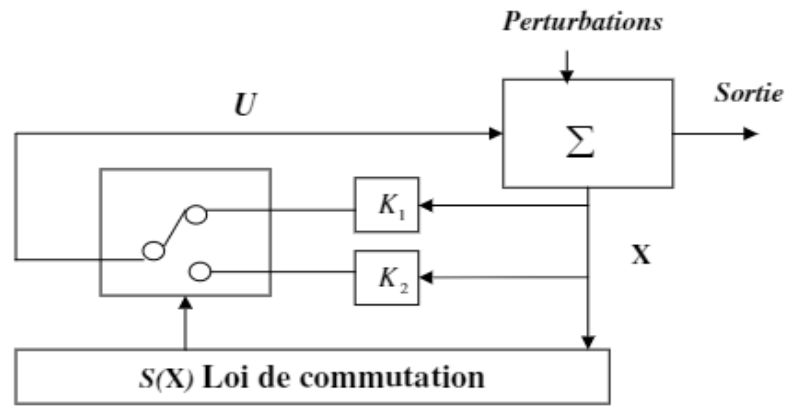


Figure (III-4) : La structure de régulation de la loi de commande de la commutation [29].

III.4 Implémentation de la commande MPPT par le mode glissant :

Notre étude de simulation de la commande MPPT par le mode glissant se compose d'un générateur photovoltaïque, un étage d'adaptation qui est le convertisseur DC-DC type boost avec charge, un générateur PWM qui est génère un signal PWM qui est important pour le commutateur du hacheur et la commande MPPT par mode glissant :

La figure ci-dessous représente le système complet de notre simulation :

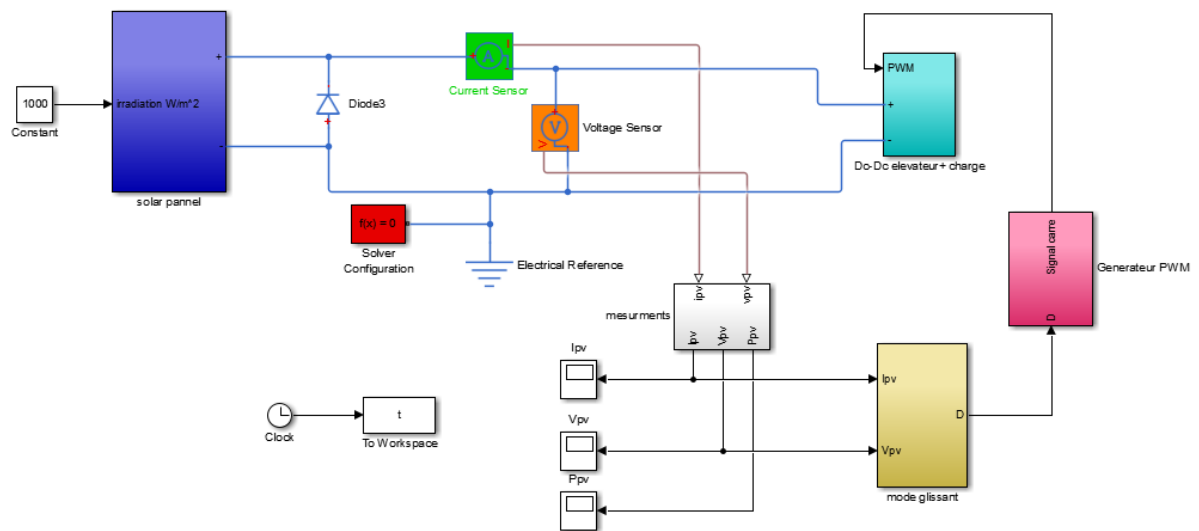


Figure (III-5) : implémentation de la commande MPPT par la méthode de mode glissant.

La figure ci-dessous représente le bloc de la commande MPPT par la méthode de mode glissant, cette commande basée sur l'extraction de la puissance maximale délivrée du

générateur PV, les entrées de la commande sont le courant I_{pv} et la tension V_{pv} , la sortie c'est le rapport cyclique D qui génère un signal PWM pour l'adaptation du convertisseur DC-DC.

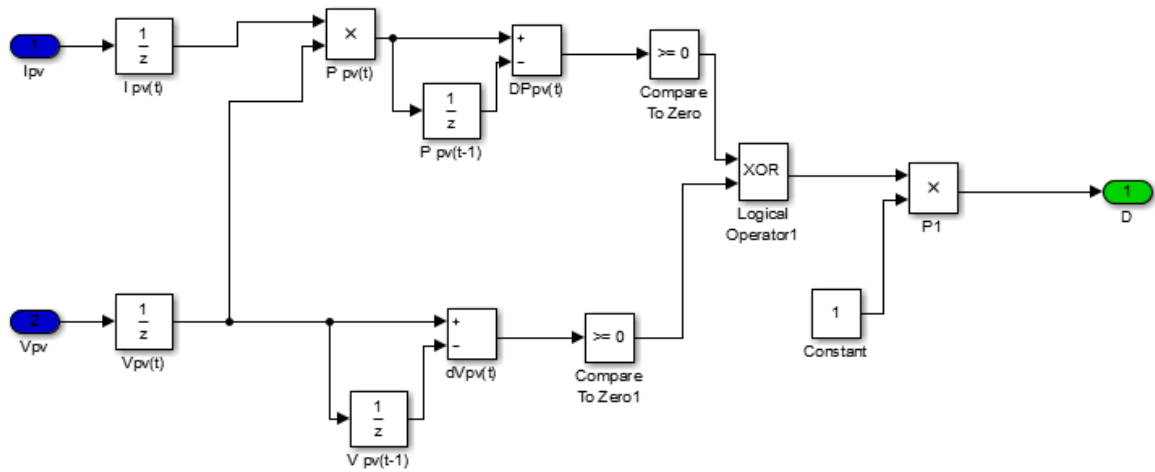


Figure (III-6) : implémentation de l'algorithme de la méthode mode glissant sous MATLAB/SIMULINK.

III.5 Les résultats de simulation de l'algorithme mode glissant :

La figure ci-dessous illustre la puissance de sortie du générateur PV en fonction du temps dans les conditions météorologiques normales $E=1000W/m^2$ et $T=25C^{\circ}$:

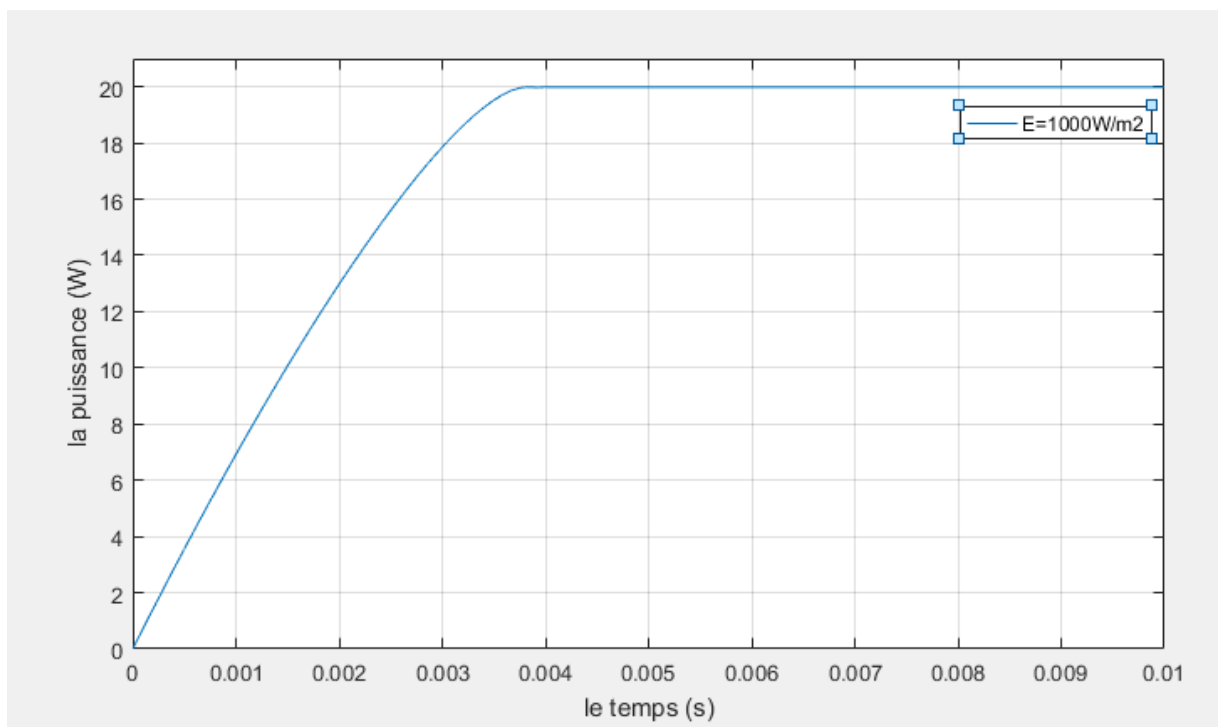


Figure (III-7) : La puissance de sortie en fonction du temps sous conditions STC par mode glissant.

On remarque dans le graphe que la puissance de sortie croît jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale qui est PPM dans une période réduite et se stabilise jusqu'à la fin de la simulation. Et on constate que la puissance de sortie P_{pv} simulé converge vers le point maximum PPM à l'instant très réduit 0.0037s, donc par conséquent, on peut dire que la poursuite du point maximum est atteint.

Maintenant si on fait varier l'éclairement entre $E=700W/m^2$ jusqu'à $E=1000W/m^2$ et à une constante $T=25C^\circ$ on obtient les graphes suivants :

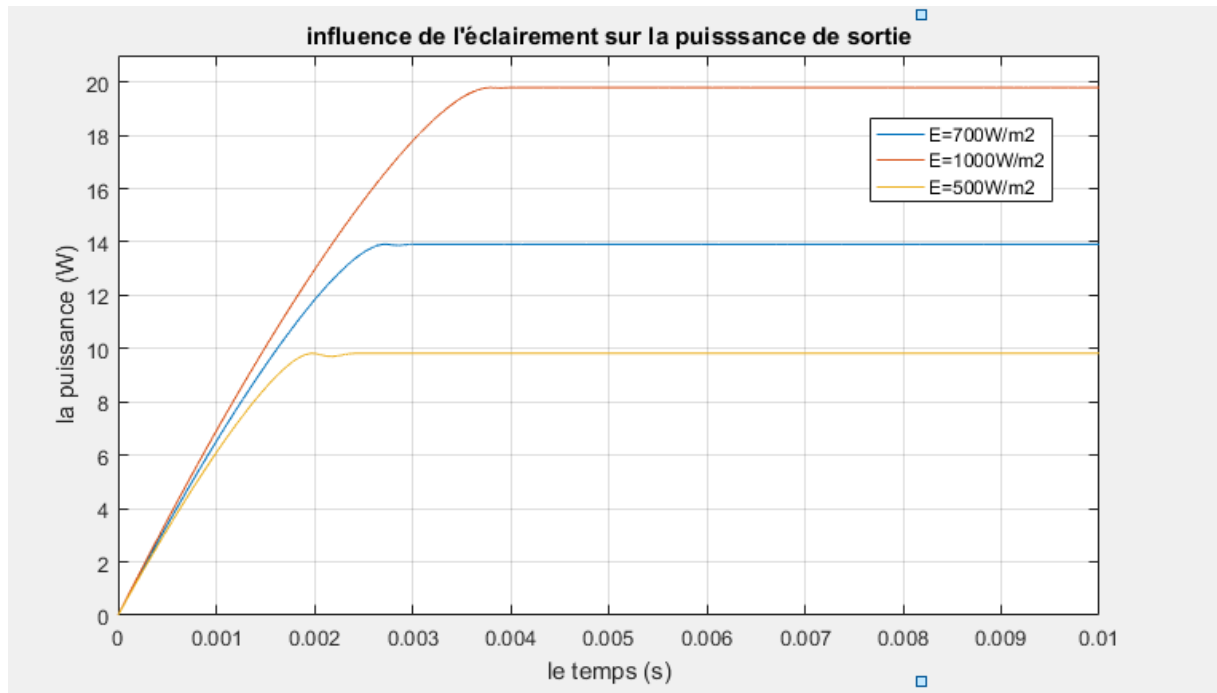


Figure (III-8) : L'influence de l'éclairement sur la puissance de sortie en fonction du temps par le mode glissant.

D'après les résultats de la simulation avec différents éclairements, on constate que la puissance décroît avec la diminution de l'éclairement, on voit que les pertes de la puissance autour du point PPM sont presque nulles et le temps de réponse diminue avec l'éclairement. Pour $E=1000W/m^2$, le temps de réponse = 0.036s, pour $E=700W/m^2$, le temps de réponse = 0.027s et pour $E=500W/m^2$, le temps de réponse = 0.002s. Par conséquent, on dit que l'éclairement influence sur l'extraction du point maximum de la commande MPPT.

Maintenant, si on fixe l'éclairement à $E=1000W/m^2$ et on fait varier la température ($T=0C^\circ$, $T=25C^\circ$ et $T=50C^\circ$), on obtient les graphes suivants :

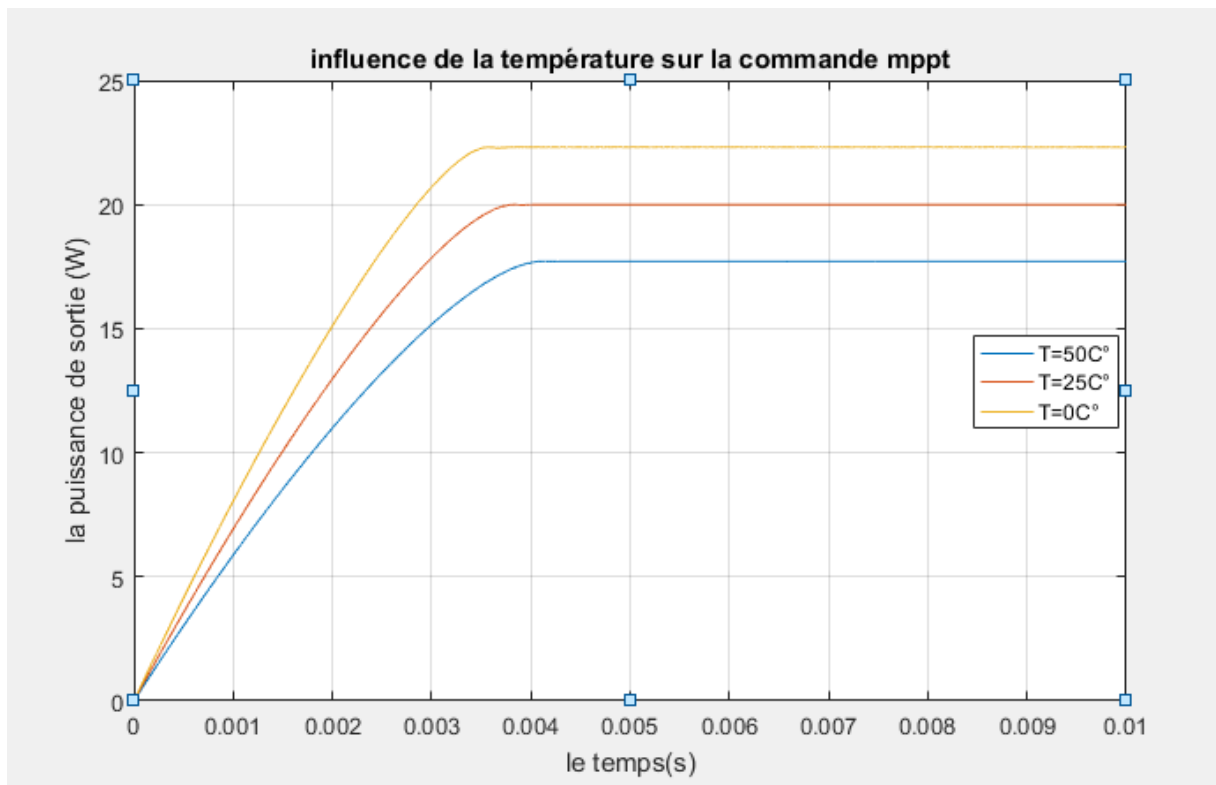


Figure (III-9) : L'influence de la température sur la puissance de sortie par le mode glissant.

D'après la figure (III-9), on constate que la température joue un rôle très important sur la puissance de sortie du convertisseur DC-DC, en effet, la température influe inversement sur la puissance et sur l'extraction du point maximum PPM de la commande MPPT, on remarque la puissance de sortie du convertisseur diminue avec l'augmentation de la température.

On constate pour $T=25^{\circ}\text{C}$ que la puissance se converge vers son point maximum dans un temps très court et se stabilise jusqu'à la fin de la simulation, on remarque aussi qu'à $T=50^{\circ}\text{C}$, les pertes autour du PPM sont légèrement petites et le temps de réponse diminue avec l'augmentation de T , donc pour $T=0^{\circ}\text{C}$, le temps de réponse= 0.004s, pour $T=25^{\circ}\text{C}$, le temps de réponse= 0.0036s et pour $T=50^{\circ}\text{C}$, le temps de réponse= 0.0035s.

Par conséquent, on peut dire que la température influe inversement sur la commande MPPT, donc sur les caractéristiques du générateur GPV. Alors, on prend toujours l'effet de température en considération.

Maintenant si on utilise le bloc signal builder pour tracer la variation de la puissance avec la variation de l'éclairement, on obtient le graphe :

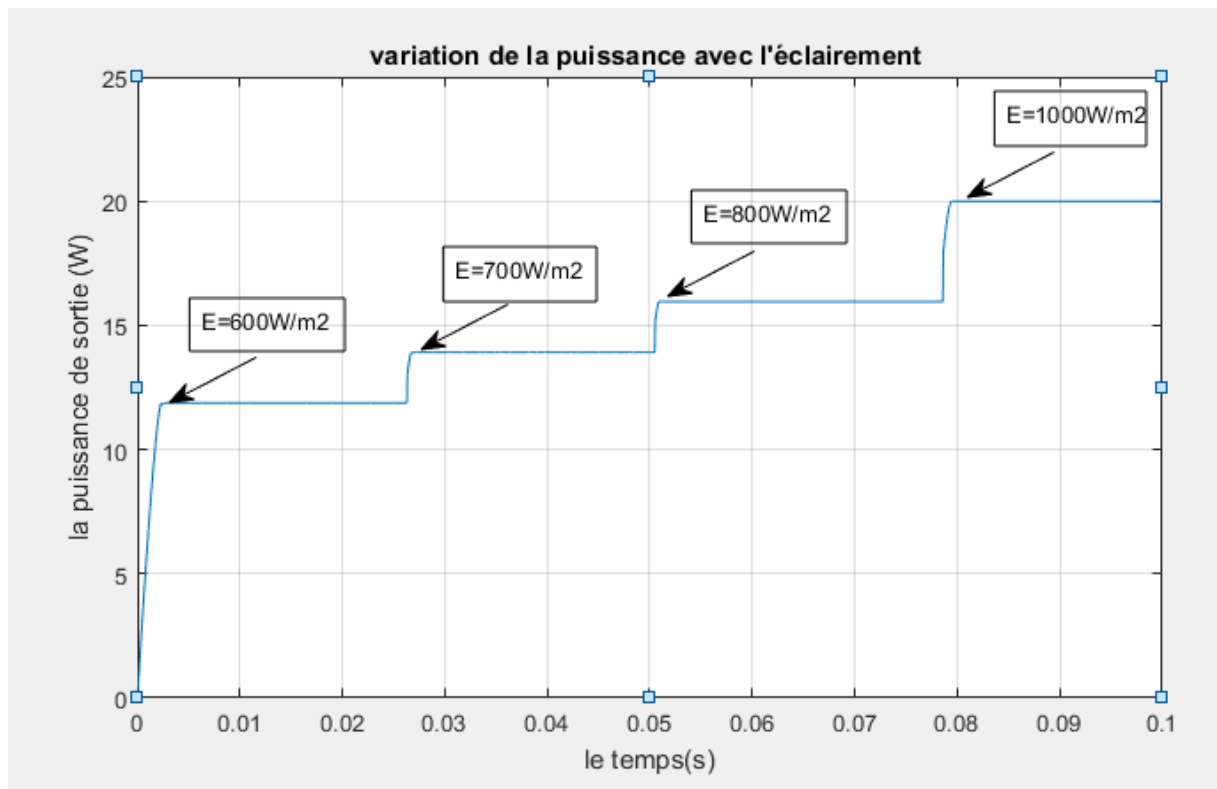


Figure (III-10) : variation de la puissance avec l'éclairement en fonction du temps.

On remarque que la puissance augmente avec l'augmentation de l'ensoleillement et les pertes et oscillations autour du point PPM sont nulles, donc on peut dire que la commande par mode glissant est rapide fiable et robuste.

III.6 Comparaison des deux algorithmes P&O et mode de glissement :

Afin d'évaluer les performances et de comparer deux algorithmes proposés P&O et mode glissant, des études par simulation et expérimentales ont été réalisées.

Dans cette partie, une analyse comparative par simulation est effectuée pour montrer la performance des deux algorithmes MPPT type P&O et mode glissant. L'étude comparative prend en compte la rapidité du suivi de point de puissance maximale et l'oscillation autour de point de fonctionnement.

La figure suivante représente la puissance de sortie du générateur PV en fonction du temps avec les deux algorithmes P&O et mode glissant aux conditions standards STC :

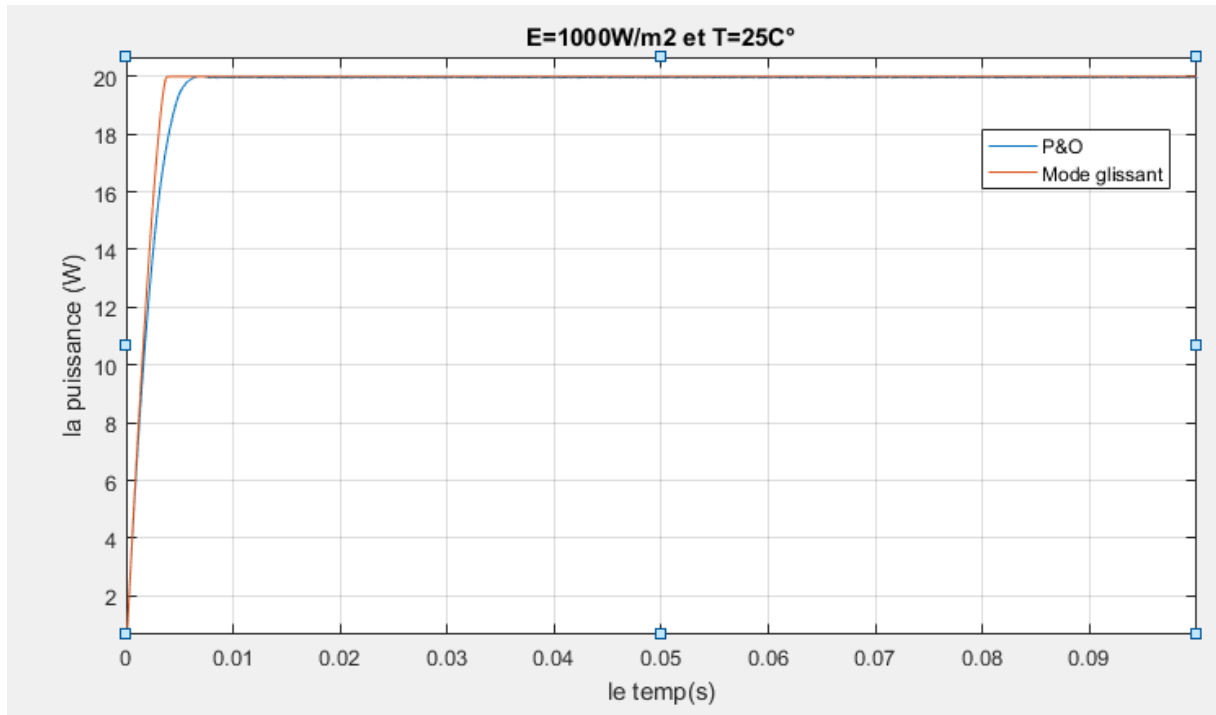
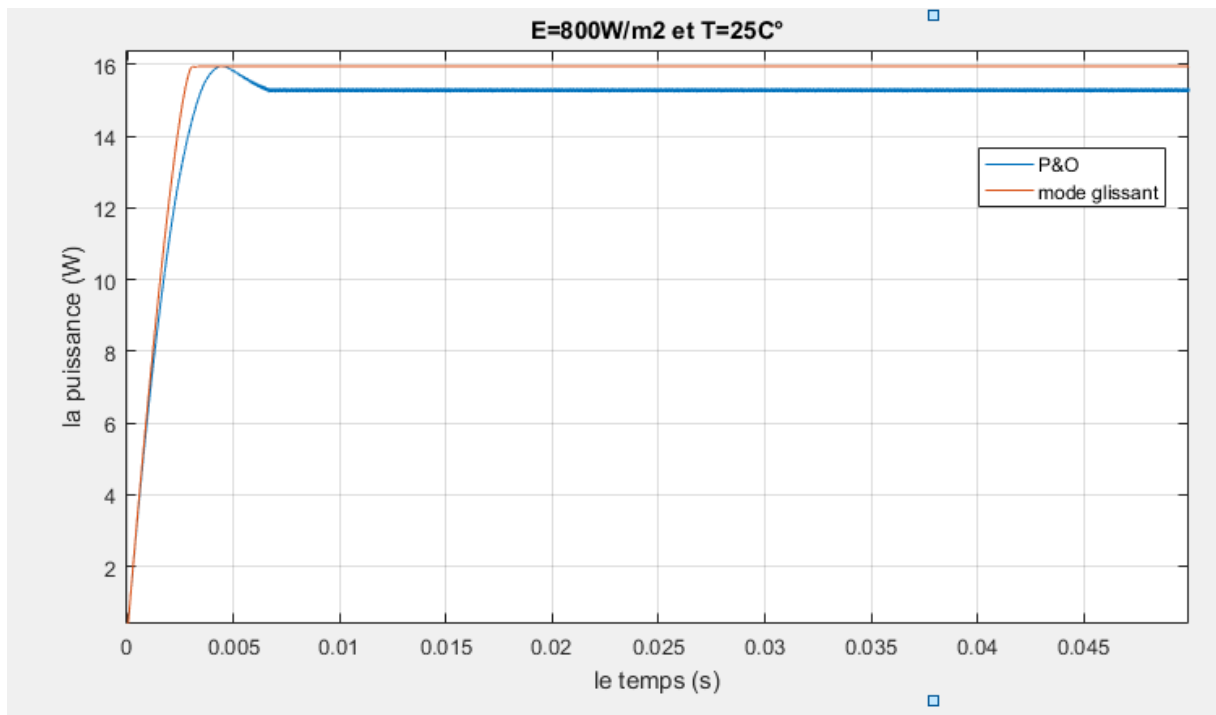
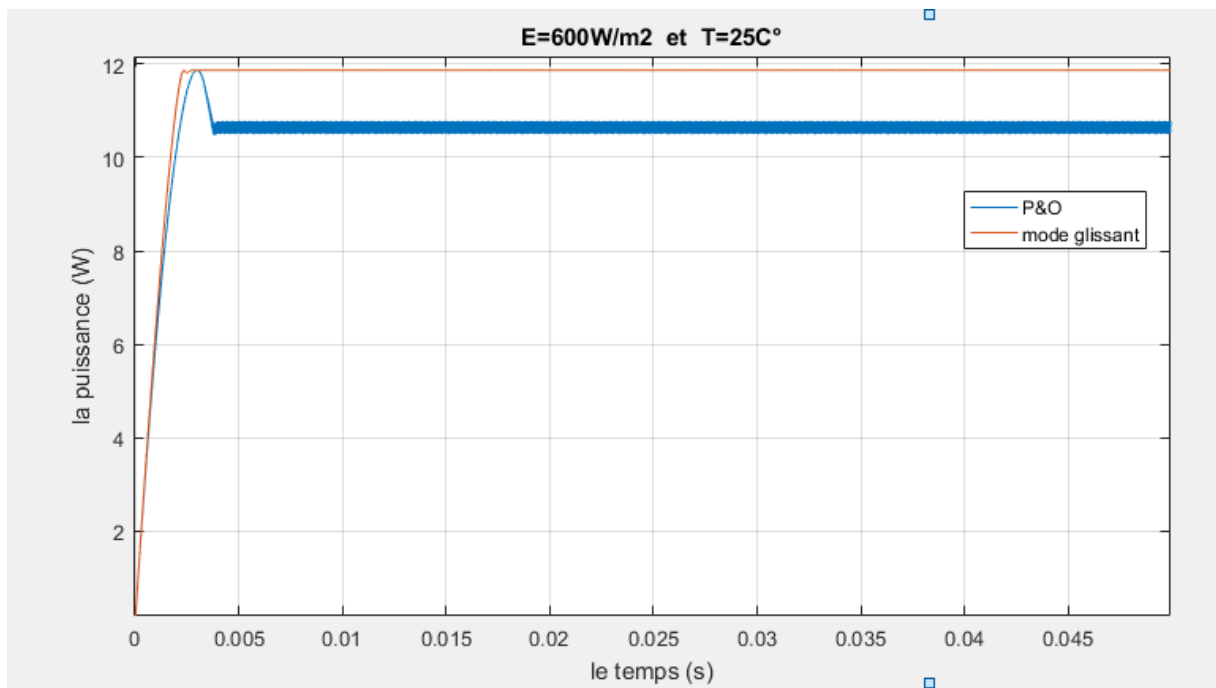


Figure (III-11) : comparaison des deux algorithmes P&O et mode glissant.

D'après la figure (III-10), on remarque que la puissance de sortie d'un générateur PV au condition standards ($E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25\text{C}^\circ$) par mode glissant augmente et se converge rapidement au point maximum PPM à un temps très réduit, tandis que la convergence au point maximum de la puissance de sortie avec l'algorithme P&O conventionnel est assez rapide à celui du mode glissant.

Le temps de réponse pour le mode glissant est de l'ordre de 0.003s par contre le temps de réponse pour P&O est de l'ordre de 0.006s, à partir de ces deux courbes de puissance mesurées sont presque confondues l'un et l'autre. Par conséquent, le test de rapidité et fiabilité de la commande MPPT basé sur le mode glissant est vérifié.

Maintenant si on veut comparer entre les deux algorithmes en faisant varier l'éclairement à $E=800\text{W/m}^2$ et $E=800\text{W/m}^2$ en gardant la température fixe $T=25\text{C}^\circ$, on obtient les deux figures suivantes qui sont illustrées dans les figures (III-11) et (III-12) respectivement suivantes :

Figure (III-12) : comparaison des deux courbes de l'algorithme P&O et mode glissant à $E=800\text{W/m}^2$.Figure (III-13) : comparaison des deux courbes de l'algorithme P&O et mode glissant à $E=600\text{W/m}^2$.

D'après les deux courbes illustrées dans les figures ci-dessus, on constate que la puissance de sortie du générateur PV diminue proportionnellement avec l'éclairement.

Pour la courbe de la puissance de sortie par le mode glissant se diminue avec la diminution de l'éclairement, et on constate que les pertes et les oscillations autour du PPM sont nulles, ce

qui permet au point de fonctionnement de la commande par mode glissant se stabilise au point max du PPM jusqu'à la fin de la simulation.

Par contre pour l'algorithme P&O, lorsque la puissance atteinte son point maximum PPM, elle décroît avec un écart qui représente les pertes de puissance autour du point PPM comme indique dans les deux figure précédentes, malheureusement, il continu à perturber le système dans cette direction, ce qui éloigne encore une fois le PPM. Ce phénomène se reproduit tant que le niveau de rayonnement diminue et ne s'arrête qu'une fois que ce dernier devient stable (ce qui est peu probable en pratique). La perte de puissance engendrée par cette mauvaise interprétation n'est pas très grande, car le MPPT est assez rapide. Les oscillations sont causées par la recherche du PPM, on constate aussi que l'algorithme P&O n'a pas de point d'arrêt. Donc les pertes et les oscillations autour de ce point augmentent avec la diminution d'ensoleillement.

Si on parle de temps de réponse pour les deux algorithmes même en variant l'éclairement, on voit que toujours le temps de réponse pour l'algorithme par mode glissant est plus petit que celui de P&O.

Le maximum de puissance est toujours atteint presque instantanément dans le système à MPPT utilisant la méthode SMC. Ce qui démontre une fiabilité, robustesse et une bonne performance malgré les variations des prédits paramètres.

D'après les comparaisons qu'on a effectué, on dit que la commande SMC ou mode glissant a beaucoup d'avantages qui sont importantes et multiples : la haute précision, simplicité d'implémentation, l'invariance, l'algorithme de SMC est plus robuste, fiable et rapide que celui de P&O, pas de perte de puissance ou oscillations autour du point PPM, ce qui permet d'obtenir une puissance stable et max donc un rendement important.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté la théorie de la commande par mode glissant en premier temps. Cette commande non linéaire possède l'avantage de robustesse vis-à-vis les incertitudes. Son principe consiste à ramener le système vers une surface de glissement choisie par un terme discontinu puis le maintien le long sur celle-ci par un terme continu, En second temps, on a appliqué ce principe pour traiter le problème de la commande MPPT pour un système PV qui un générateur PV avec un convertisseur Boost. Ensuite, on a simulé l'approche par mode glissant présentées dans ce chapitre sous MATLAB/SIMULINK, enfin on a comparé les résultats obtenus avec ceux de la commande P&O conventionnelle pour constater la différence entre les deux algorithmes et définir la commande la plus fiable et robuste pour l'extraction du point PPM donc pour l'amélioration du rendement GPV.

Les résultats de simulation montrent que le GPV converge vers son point de puissance maximale rapidement pour la première commande. Cependant, la rapidité de convergence diminue pour la deuxième commande à cause des pertes et oscillation autour de PPM.

Conclusion générale :

Les travaux de recherche présentés consistent en l'étude et l'optimisation du transfert d'énergie électrique d'un système solaire PV autonome. Ces systèmes connaissent un grand essor, bien qu'ils ne soient pas encore compétitifs du point de vue économique. Pour que ces systèmes de production soient rentables, c'est-à-dire : simple, fiable et à moindre coût, il faut optimiser toute la chaîne de production pour obtenir de bons rendements. Le travail mené dans ce mémoire a été porté sur l'optimisation de fonctionnement d'un générateur PV dans la chaîne de conversion photovoltaïque. Un générateur PV possède une caractéristique I-V non-linéaire et un seul point de fonctionnement optimal (puissance maximale) varié en fonction de l'éclairement et de la température. Pour maintenir le fonctionnement du générateur à ce point, et obtenir un bon rendement, un contrôle en permanence du GPV via un étage d'adaptation est indispensable.

Dans ce cadre, on a commencé dans le premier chapitre par présenter le principe de la conversion photovoltaïque. Puis on a élaboré le modèle mathématique du GPV afin d'analyser caractéristique I(V) et étudier l'influence des variations climatiques sur son PPM.

Le chapitre 2, s'est concentré sur l'analyse des différentes topologies des convertisseurs continu-continu non isolés. Après comparaison entre ces structures, un convertisseur Boost a été retenu. Les critères de sélection sont la simplicité de structure et le gain en tension. Puis, on a présenté le problème de transfert d'énergie entre le GPV et la charge. Ensuite, on a exposé le problème de maximisation de l'énergie fournie par le GPV. Après, on a cité les différents types des algorithmes MPPT (P&O, logique floue, hill climbing et IncCond), ensuite, on a étudié et simulé l'algorithme de la commande MPPT type P&O sous le logiciel MATLAB/SIMULINK, Les résultats de simulation montrent la mise en œuvre de cette algorithme dans la localisation du PPM. Cependant, il rencontre des problèmes dans le cas d'une variation brutale d'ensoleillement, et présentent des oscillations et pertes de puissance autour du PPM.

Dans le chapitre 3, on a introduit les notions de base de la commande par mode glissant. Ensuite, on a appliqué cette commande pour deux systèmes PV dont le but est de forcer le GPV à générer sa puissance maximale. Les résultats de simulation montrent que cette commande

garantie une convergence très rapide du GPV vers son PPM pour le cas du convertisseur Boost, puis on a simulé cette commande sous MATLAB, les résultats ont été obtenus sous des conditions standards et variable, puis les faire comparer avec les résultats du chapitre deux Les résultats de simulation ont montré clairement que la méthode mode glissant proposée est efficace pour la recherche du PPM car elle ne contient pas de perte de puissance et oscillations autour du PPM et le temps de convergence à un point de fonctionnement de la commande MPPT est plus rapide que celui de la commande P&O quelles que soient les conditions climatiques de l'ensoleillement et de la température. En plus, elle est capable de faire positionner le point de fonctionnement au PPM dès le début de la marche du système contrairement aux autres méthodes qui nécessitent plus de temps.

Donc, Les résultats confirment ceux obtenues par simulation. Par conséquent, l'objectif de cette étude est réalisé et on peut dire que la stratégie de contrôle proposée peut être considérée comme une solution intéressante dans le domaine de la maîtrise des systèmes photovoltaïques.

Solution et perspective :

Les travaux abordés dans ce mémoire sont très encourageants et nous motivent de plus en plus à continuer dans ce même axe de recherche. En perspectives, on propose quelques tâches à traiter ultérieurement, comme :

- Effectuer des essais expérimentaux avec des panneaux solaires réels et non avec une source programmable ;
- Etendre le principe de la technique MPPT proposée sur d'autres topologies de convertisseurs plus efficaces ;
- Tester le système MPPT développé pour un éclairage non homogène en tenant compte du phénomène d'ombrage.
- L'estimation des pertes dans les différents composants peut être faite.
- Une fonction de poursuite de la trajectoire du soleil peut être intégrée au système de commande.
- Développer l'étude pour les systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux de distribution électrique ou comportant un onduleur.
- L'amélioration de l'algorithme Perturbation et Observation peut intégrer une autre approche comme la logique floue.

Références bibliographiques

- [1] N.BOUBEKRI, « la commande non linéaire des systèmes photovoltaïques », mémoire de master, université de MOHAMMED SEDDIK de jijel, 2019.
- [2] B.BENMAHREZ F.OUDIAT, « étude et dimensionnement d'une alimentation solaire pour les locaux administratifs de la société IFRI », mémoire d'ingénieur, université de Béjaia, 2010.
- [3] Oleksiy, "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigués," Ecole doctorale.Thèse de doctorat, 2005.
- [4] H.BOUKLI, « conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique », thèse de magister, université de ABOU BAKR BELKAID-TLEMEN, 2011.
- [5] T.BOUGUERRA, « optimisation d'un système photovoltaïque application en continue et alternatif », thèse de magister, université MENTOURI DE CONSTANTINE 1, 2014.
- [6] A.ZENAKHI, "étude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque menu d'une comande MPPT", mémoire de master académique, université de ABOU BAKR BELKAID-Tlemcen, 2016.
- [7] N.BERREZIGA S.BABOU, « commande directe par la méthode incremental conductance(Inc-Cond) d'un panneau photovoltaïque », mémoire de master académique, université de Mouloud MAMMERI tizi-ouzou,2018.
- [8] N.Saadaoui, "Modélisation et extraction automatique des paramètres d'un générateur photovoltaïque", mémoire de Magister , département d'Electrotechnique, Université Ferhat Abbes-Sétif 2010.
- [9] O.BENSEDDIK et F.DJALOUJ '' Etude et optimisation du fonctionnement d'un Système photovoltaïque ''Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 27/06/2012.

- [10] H.BOUKLI, « conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique », thèse de magister, université de ABOU BAKR BELKAID-TLEMCEM, 2011.
- [11] S.DJERIOU, " modélisation et simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone", mémoire de magister, université de FERHAT ABBAS DE SETIF, 2011.
- [12] Y.LASMI , " Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale MPPT d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes" mémoire de magister, université de FARHAT ABBAS- SETIF, 2013.
- [13] Borne,« Modélisation et identification des processus », livre, édition technique, 1992.
- [14] A.KARKARINE, " modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque", mémoire de master académique, université de BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2017.
- [15] A. Saadi, "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque," Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.
- [16] S.ZAHAR, C.MAKHLOUF, " étude et simulation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique", mémoire de master académique, université de MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2017.
- [17] R. Merahi1, R. Chenni, M. Houbes, « Modélisation et Simulation d'un Module PV par MatLab », *10ème Séminaire International sur la Physique Energétique*, Département Electrotechnique, Université de Badji Mokhtar Annaba Université Mentouri de Constantine(UMC), Route d'Ain El Bey Constantine, Algérie, 2018.
- [18] T.TOUAMA et N.HAFIDI, " commande d'un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque, " mémoire de master académique, université de MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2019.
- [19] W.BENSACI, " modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT" , mémoire de master, université de KASDI MERBAH-OUARGLA, 2012.

- [20] F.HANANOU, A.ROUABAH , " modélisation et simulation d'un système photovoltaïque", mémoire de master académique, université de KASDI MERBAH – OUARGLA, 2014.
- [21] M.SALAMA Fateh, " modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique", mémoire de magister, université de ABBAS FERHAT-SETIF, 2012.
- [22] M.N.Mchalikh et CH.Hmada''Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau '' Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.
- [23] O.BENSEDDIK et F.DJALOUH '' Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque ''Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 27/06/2012.
- [24] M. BENTOUMI, " Poursuite du point maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes intelligentes", mémoire de master académique, université de MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016.
- [25] F.BENADEL, " étude et simulation d'une commande MPPT pour un système PV ", mémoire de master académique, université de MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016.
- [26] W.BENSMAIL, F.ABDALLAH, « étude et simulation de la commande MPPT basée sur l'approche de hill climbing flou », mémoire de master académique université de SAAD Dahleb BLIDA-1, 2016.
- [27] L.DEBIT, « modélisation et commande pour la poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque en tenant compte de la variation de la température », mémoire de master académique, université de Mouloud Mammeri TIZI-OUZOU, 2018.

[28] A.BELKAID, « conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », thèse de doctorat, université de FERHAT ABBAS, sétif, 2015.

[29] D.KAHIL K.KADIR, « commande par mode glissant d'un hacheur parallèle application à l'extraction de la puissance maximale d'un panneau photovoltaïque », master académique, université de MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, 2014.

[30] F.CHEDDADI, I.BOUMHIDI , S.SEFRITI « comparaison entre la commande MPPT par le mode glissant et la perturbation et observation P&O pour les systèmes photovoltaïques », article, international meeting on advanced technologies in energy and electrical engineering, 2018.