

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



## **Mémoire de Fin d'Études**

Présenté à

**L'Université d'Echahid Mohamed Lakhdar Ammara d'El Oued**

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

## **MASTER ACADEMIQUE**

En réseaux Electrique

Présenté par

**Bahi Imed**

**Laib Hamza**

## **Thème**

**Etude et simulation de la commande  
MPPT d'un système photovoltaïque basée  
sur l'algorithme P&O-PS**

Soutenu le ../09/2020. Devant le jury composé de :

Dr. Mammeri Oussama	MAA	Président
Dr. Labbi Yacine	MCA	Rapporteur
Mr. Barka Noureddine		Examineur

**Année Universitaire 2019/2020**

## ***Remerciements***

C'est à notre Dieu que nous adressons en premier lieu notre Remerciements.

Premièrement, merci notre famille à nous encourager et à nous motiver à atteindre ce rang.

Et nous tenons à remercier notre encadreur Dr. Labbi Yacine d'avoir accepté de nous encadrer, et pour son aide, et ses conseils précieux, et ses encouragements incessants durant la réalisation de ce travail, Nous remercions également Mr. Barka Noureddine pour sa contribution au développement du programme..

Nous n'oublions pas de remercier les membres du jury.

Nous exprimons notre vifs remerciements à tous les professeurs de l'Université de El oued,

Et toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail.

# **S**OMMAIRE

Table des matières	
Liste des symboles et abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale .....	1

## **Chapitre I**

### **Généralités sur le système Photovoltaïque**

1.	Introduction.....	3
2.	Les énergies renouvelables.....	3
2.1.	Le potentiel solaire dans le monde et en Algérie .....	5
2.2.	L’histoire industrielle de la cellule photovoltaïque et la date d’utilisation de la cellule photovoltaïque au niveau mondial.....	7
3.	La cellule photovoltaïque et son principe de fonctionnement.....	7
4.	Modèles du module photovoltaïque.....	9
4.1.	Modèle électrique idéal.....	9
4.2.	Modèle électrique réel.....	11
4.3.	Paramètres électriques du module photovoltaïque.....	12
4.3.1.	Courant de court-circuit.....	12
4.3.2.	Tension de circuit ouvert.....	13
4.3.3.	Puissance maximale.....	13
4.3.4.	Facteur de forme.....	13
4.3.5.	Rendement.....	13
5.	Association des cellules.....	14
5.1.	Montage en série.....	14
5.2.	Montage en parallèle.....	15
6.	Modélisation et simulation de Générateur PV (GPV).....	16
7.	Caractéristiques électriques du module PV.....	17
7.1.	Caractéristique courant-tension.....	17
7.2.	Caractéristique puissance-tension.....	18
7.3.	Influence de l’éclairement.....	19

7.4.	Influence de la température.....	20
8.	Avantages et Inconvénients d'un Module photovoltaïque.....	20
8.1.	Avantages.....	20
8.2.	Inconvénients.....	21
9.	Conclusion.....	22

## **Chapitre II**

### **la commande du système photovoltaïque et poursuit point de puissance maximale**

#### **MPPT**

1.	Introduction.....	23
2.	Le système photovoltaïque PV.....	23
3.	Types d'installations photovoltaïques .....	24
3.1.	Installations autonomes.....	24
3.2.	Installations raccordées au réseau.....	25
4.	Étage d'adaptation entre le module (GPV) photovoltaïque et la charge.....	26
5.	Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	26
5.1.	Les types des convertisseurs statiques DC-DC.....	27
5.1.1.	convertisseur dévolteur.....	27
5.1.2.	convertisseur survolteur.....	29
5.1.3.	Convertisseur Buck-Boost.....	31
6.	Principe de recherche du point de puissance maximale (PPM).....	32
6.1.	Méthodes classique de poursuite du PPM.....	33
6.1.1.	Méthode d'incrémentement de l'inductance (IncCond).....	33
6.1.2.	Méthode perturbation et observation (P&O).....	35
7.	Simulation de l'MPPT par MATLAB/SIMULINK.....	37
7.1.	Schéma de simulation de l'MPPT par P&O.....	37
7.2.	Résultats de simulation MPPT P&O.....	40
8.	Conclusion.....	41

## **Chapitre III**

### **La méthode de Pattern Search**

1.	Introduction.....	42
2.	Recherche de modèle généralisée (GPS).....	42
3.	Méthode de recherche de modèle améliorée proposée (IPSM) basée sur PSM.....	42
3.1.	Méthode de recherche de modèle (PSM).....	42
3.2.	Méthode proposée .....	44
4.	Algorithme PS pour problème MPPT.....	46
5.	Conclusion.....	48

## **Chapitre IV**

### **Résultats de simulation de la commande MPPT par P&O-PS**

1.	Introduction.....	49
2.	Algorithme P&O-PS.....	49
3.	Résultats de simulation et discussions.....	52
3.1.	Configuration de la Simulation.....	52
3.2.	Résultats et Discussion.....	53
4.	Conclusion.....	58
	Conclusion générale.....	59
	Liste des références.....	60

## Liste des symboles et abréviation

### Chapitre I

E	L'énergie d'un photon
h	la constante de Planck
C	la vitesse de la lumière
PV	Photovoltaïque
PN	Jonction d'une diode
MPV	Module photovoltaïque
Pmax	La puissance maximale (W)
Vopt	Tension optimal (V)
Iopt	Courant optimal (A)
FF	Facteur de Forme
Ns	le nombre de cellules
$\eta$	Le rendement
Pin	Puissance incidente
A	section de la cellule
Vco	La tension de circuit ouvert
Ipv	Courant générer par la cellule
Iph	Photo courant créé par la cellule
Id	Le courant circulant dans la diode
Ior	le courant de court- circuit de la cellule à la température de référence
Tn	Température de référence des cellules PV [°K]
T	Température de la jonction des cellules PV [°K]
B	facteur d'idéalité de la jonction
Eg	Énergie de gap [ev]
Vpv	La tension de sortie
Ip	Le courant circulant dans la résistance $R_p$

Rp	Résistances parallèle shunt ( $\Omega$ )
Rs	Résistance série ( $\Omega$ )
IO	Courant de saturation inverse de la diode
Vt	Tension thermique
N	Facteur d'idéalité de la photopile
K	Constant de Boltzmann ( $1,38.10^{-23}J/K$ )
q	Charge de l'électron ( $1,6.10^{-19}C$ )
Eref	L'éclairement de référence ( $1000 w/m^2$ )

## **Chapitre II**

P&O	Perturbation et Observation
PPM	Point de Puissance Maximale
MPPT	Maximum Power Point Tracking
DC	Courant Continu
AC	Courant Alternatif
GPV	Générateur Photovoltaïque.
Ts	la période
$\alpha$	le rapport cyclique
IncCond	incrémentation de l'inductance
G	la conductance du module photovoltaïque
D	le rapport cyclique
PWM	La modulation de largeur d'impulsion

### **Chapitre III**

GPS	La recherche de modèle généralisée
PS	La recherche de modèle ( Pattern Search )
PSM	Méthode de recherche de modèle
IPSM	Méthode de recherche de modèle améliorée
D	le rapport cyclique
PWM	La modulation de largeur d'impulsion

### **Chapitre IV**

P&O-PS	La recherche de modèle ( PS ) hybride avec le perturber et observer l'algorithme ( P&O-PS ).
--------	---

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Figure I.1</b>	carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel	5
<b>Figure I.2</b>	Présentation des ratios du potentiel solaire de l'Algérie par rapport aux Pays de l'Afrique du Nord, des Pays du Moyen Orient et des les Pays Méridionaux de l'Europe	5
<b>Figure I.3</b>	Carte de l'irradiation solaire en Algérie ( mois de juillet )	6
<b>Figure I.4</b>	Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium ( présence d'une jonction PN)	8
<b>Figure I.5</b>	module photovoltaïques	9
<b>Figure I.6</b>	Circuit électrique idéal d'une cellule PV	10
<b>Figure I.7</b>	Circuit électrique réel d'une cellule PV	11
<b>Figure I.8</b>	Branchement deux modules en séries	14
<b>Figure I.9</b>	Caractéristique de nombre deux modules en série	15
<b>Figure I.10</b>	Branchement deux modules en parallèles	15
<b>Figure I.11</b>	Caractéristique de nombre deux modules en parallèles	16
<b>Figure I.12</b>	Modèle de générateur PV dans MATLAB/Simulink	17
<b>Figure I.13</b>	Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque réelle	17
<b>Figure I.14</b>	Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque réelle	18
<b>Figure I.15</b>	Caractéristiques Courant-Tension (I-V) et Puissance-Tension (P-V) à une température de 25 C <sup>0</sup> et différents niveaux d'éclairément	19
<b>Figure I.16</b>	Caractéristiques Courant-Tension (I-V) et Puissance-Tension (P-V) à un éclairément 1000w/m <sup>2</sup> et différentes températures	20

### Chapitre II

<b>Figure II.1</b>	structure synoptique d'un système de production d'énergie photovoltaïque	24
<b>Figure II.2</b>	Abris et éclairage public photovoltaïques	25

<b>Figure II.3</b>	schéma de principe d'une installation PV autonome	26
<b>Figure II.4</b>	schéma de principe d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau	26
<b>Figure II.5</b>	Étage d'adaptation entre un GPV et une charge	27
<b>Figure II.6</b>	convertisseur DC/DC	28
<b>Figure II.7</b>	schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck	29
<b>Figure II.8</b>	convertisseur Buck durant l'état 'on' et 'off'	29
<b>Figure II.9</b>	schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost	30
<b>Figure II.10</b>	Branchement deux modules en parallèles	31
<b>Figure II.11</b>	convertisseur Boost durant l'état 'on' et 'off'	32
<b>Figure II.12</b>	schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost	32
<b>Figure II.13</b>	convertisseur buck- Boost durant l'état 'on' et 'off'	34
<b>Figure II.14</b>	Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT	35
<b>Figure II.15</b>	Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de $dP_{pv}/dV_{pv}$	36
<b>Figure II.16</b>	Organigramme de la méthode incrémentation de conductance	37
<b>Figure II.17</b>	Recherche du PPM par la méthode P&O	38
<b>Figure II.18</b>	Organigramme de la méthode P&O	39
<b>Figure II.19</b>	Schéma MATLAB SIMULINK d'un système PV avec MPPT P&O	40
<b>Figure II.20</b>	Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et l'observation P&O	41
<b>Figure II.21</b>	MPPT basé sur P&O. Profil de l'extraction de tension du panneau PV	41

### **Chapitre III**

<b>Figure III.1</b>	coordination PSM (méthode de recherche de modèle)	45
---------------------	---	----

<b>Figure III.2</b>	algorithme PSM appliqué à l'ombrage partiel	46
<b>Figure III.3</b>	coordination IPSM (méthode de recherche de modèle améliorée)	47
<b>Figure III.4</b>	organigramme IPSM	48

## Chapitre IV

<b>Figure IV.1</b>	Organigramme de l'algorithme P&O-PS	54
<b>Figure IV.2</b>	Schéma typique de MPPT utilisant P&O-PS	54
<b>Figure IV.3</b>	Schéma fonctionnel détaillé du système PV avec MPPT P&O-PS dans environnement MATLAB – Simulink	55
<b>Figure IV.4</b>	Variation de l'ensoleillement en fonction du temps	56
<b>Figure IV.5</b>	Variation de la puissance avec changement de l'ensoleillement en fonction du temps	57
<b>Figure IV.6</b>	Courant correspondant au MPPT P&O-PS algorithme	57
<b>Figure IV.7</b>	Tension correspondante au MPPT P&O-PS algorithme	57
<b>Figure IV.8</b>	Rapport cyclique correspondant au MPPT P&O-PS algorithme	58
<b>Figure IV.9</b>	Mesh cyclique correspondant au MPPT P&O-PS algorithme	58
<b>Figure IV.10</b>	Variation de l'ensoleillement en fonction du temps	58
<b>Figure IV.11</b>	Puissance délivrée par la source PV et l'algorithme MPPT (P&O et P&O-PS)	59
<b>Figure IV.12</b>	Courant correspondant au MPPT P&O-PS avec changement de l'ensoleillement	59
<b>Figure IV.13</b>	Tension correspondant au MPPT P&O-PS avec changement de l'ensoleillement	59
<b>Figure IV.14</b>	Puissance de la charge au MPPT P&O-PS	60
<b>Figure IV.15</b>	Rapport cyclique correspondant au MPPT P&O-PS avec changement de l'ensoleillement	60
<b>Figure IV.16</b>	Evolution le pas mesh de l'algorithme P&O-PS pendant le test MPPT	61

## **Liste des tableaux**

### **CHAPITRE I**

<b>Tableau I.1</b>	Potentiel solaire en Algérie	6
--------------------	------------------------------	---

### **CHAPITRE II**

<b>Tableau II.1</b>	caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau PWX 500 dans les conditions standards	40
---------------------	---	----

### **CHAPITRE III**

<b>Tableau III.1</b>	pseudocode de la technique PS	50
----------------------	-------------------------------	----

### **CHAPITRE IV**

<b>Tableau IV.1</b>	Pseudocode de l'algorithme MPPT P&O-PS	52
---------------------	--	----

## ملخص

تعتبر الطاقة الشمسية مصدرا هاما من المصادر الطاقة المتجددة. تمثل الالواح الكهروضوئية مصدرا للطاقة الغير مستقرة حيث نجد ان نقطة الاستطاعة تتعلق بدرجة الحرارة و مستوى الاشعاع الضوئي. لذلك فإنه من الضروري تتبع نقطة الاستطاعة لتحقيق اقصى فعالية، في هذا العمل لأجل تحسين و مثالية التشغيل اقترحنا طريقة التحكم (MPPT) لتعقب نقطة الطاقة القصوى للوح الضوئي، حيث اثبتت الدراسات في مختلف التطبيقات مدى فعاليتها في ايجاد الحلول الشاملة بالأخص في الحالات التي يتعذر فيها تحليل المشكل خطيا. لبيان مدى فعالية هذه المنهجية قمنا بتطبيق هذا البرنامج لتعقب نقطة الاستطاعة العظمى والتي يتم استعمالها لاستغلال احسن للطاقة الناتجة من اللوح الكهروضوئي و تحت شروط متغيرة تتمثل في كل من ( درجة الحرارة و الاشعاع الضوئي )، في دراستنا نقوم بإجراء مقارنة بين تقنيتين تحكم المبنية على الخوارزمية (P&O) و الخوارزمية الهجينة PS-(P&O). حيث يتم تصميم نظام كهروضوئي من وحدة شمسية مزودة بمنظم للطاقة الشمسية MPPT ومحاكاته , حيث نجد ان النتائج المحصل عليها تبين فعالية هذه التقنيتين لإيجاد الحل الامثل (استطاعة قصوى ) تحت مختلف الشروط المذكورة اعلاه بأسرع وقت ممكن.

**الكلمات المفتاحية** النظام الكهروضوئي , لوح ضوئي ( PV ) , تعقب نقطة الطاقة القصوى (MPPT) , البحث عن النمط (PS) , الاضطراب و المراقبة (P&O).

# Résumé

L'électricité photovoltaïque est perçue comme une importante source d'énergie renouvelable. Le champ photovoltaïque est une source de puissance instable, dont le point de puissance crête dépend de la température et de l'irradiation. Le suivi de point de puissance maximale est alors nécessaire pour une efficacité optimale.

A cet effet, dans le présent travail l'optimisation du fonctionnement par l'utilisation de la méthode de contrôle (MPPT) est proposée pour détecter le point de puissance maximale pour un panneau photovoltaïque, ils sont utilisés pour générer la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. Dans notre étude, nous faisons une comparaison de deux technologies de contrôle (P&O) et (P&O-PS). Un système photovoltaïque est composé d'un module solaire avec régulateur solaire MPPT il est modélisé et simulé. Les résultats de simulation montrent que l'efficacité de ces techniques est de tirer le maximum d'énergie avec un temps de réponse rapide lors des variations dans les conditions de travail.

**Mots clés :** Système photovoltaïque, PV, Optimisation, MPPT, Pattern search (PS), Perturbation et Observation (P&O)

# Abstract

Photovoltaic electricity is seen as an important source of renewable energy. The photovoltaic array is an unstable power since the peak power point of which depends on the temperature and irradiation level. A maximum peak power point tracking is then necessary for maximum efficiency.

In this work, a method of control (MPPT) to optimize the operation is proposed to detect the point of maximum power for photovoltaic panel, they are used to generate the optimal MPP, such that solar panel maximum power is generated under different operating conditions. In our study we make a comparison of two control technologies (P&O) and (P&O-PS), where the photovoltaic system including a solar panel with MPPT technique is modeled and simulated. The simulation results show the effectiveness of this techniques is to get the maximum energy with a fast response time when changes in working conditions.

**Key words:** Photovoltaic, PV, Optimization, MPPT, Pattern search (PS), Perturb and Observation (P&O)

# **I**NTRODUCTION

GÉNÉRALE

### **Introduction générale :**

L'énergie électrique est l'une des formes d'énergie la plus consommée partout dans le monde. C'est l'un des facteurs le plus important pour le développement d'un pays. Pour disposer de cette énergie qui est si importante, elle doit nécessairement être produite dans des centrales. Pour cela, on dispose des différents types de centrales de production de l'énergie électrique, parmi lesquelles nous pouvons citer : les centrales hydrauliques, les centrales thermiques, les centrales éoliennes et les centrales nucléaires.

Presque toutes les énergies renouvelables sont des dérivées de l'énergie solaire : le vent, le rayonnement solaire, la force de l'eau sont des produits directs ou indirects de l'activité solaire. Seule la géothermie échappe à cet inventaire. Le Soleil envoie chaque année à la surface de la Terre à peu près 10 000 fois plus d'énergie que la planète en consomme. Il est donc légitime d'essayer d'en tirer profit.

Les énergies renouvelables ont tout pour s'imposer, tant aux niveaux environnemental, social, qu'économique. Les énergies renouvelables devraient être le fer de lance de toute politique de lutte contre le réchauffement climatique.

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

Dans ce mémoire, on a analysé la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par une commande numérique (commande MPPT: 'perturbation et observation' et 'pattern search') assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque sous éclairage uniforme et non uniforme.

L'objectif de ce travail est de présenter une meilleure compréhension des performances du convertisseur DC-DC adapté par la commande numérique lorsqu'il est couplé à un générateur photovoltaïque et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peut utiliser comme un générateur d'électricité.

Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en quatre chapitres:

## **Introduction générale**

---

Dans le premier chapitre, des généralités sur les générateurs photovoltaïques sont décrites.

Dans le deuxième chapitre, on a étudié théoriquement quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques, ainsi que les commandes MPPT à savoir la méthode 'perturbation et observation' et ' la conductance de l'incrémentation'.

Dans le troisième chapitre, on a étudié la méthode de recherche de modèle « Pattern Search » et son principe de fonctionnement .

Dans le quatrième chapitre, nous simulons la méthode de pattern search sur Matlab Simulink et mettrons en évidence et en discutera.

Enfin, nous allons finaliser notre travail par une conclusion générale.

## 1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons une introduction sur les énergies renouvelables et nous mettons en évidence le potentiel solaire dans le monde et en Algérie et l'histoire industrielle de la cellule photovoltaïque.

Aussi , nous expliquerons le principe du travail de la cellule photovoltaïque, son circuit équivalent, les équations mathématiques, les caractéristiques, et comment les relier en série et en parallèle.

Enfin , nous allons modéliserons et simulerons le générateur photovoltaïque sur le MATLAB/SIMILINK , en mettant en évidence les avantages et les inconvénients du système PV.

## 2. Les énergies renouvelables :

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par l'homme. Leur impact relativement faible sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de 2 milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité [1].

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Ces énergies satisfont quant à elles 13 % de la demande, dont 10 % pour hydraulique. Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas être source d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et de présenter des gisements renouvelables donc inépuisables. Ce sont des énergies de flux, par opposition aux énergies dites de stock (gaz, fioul, charbon, uranium, ...). La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [2].

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation

énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [3].

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h, les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m<sup>2</sup>. Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/ m<sup>2</sup> à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation:

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

h : la constante de Planck, C : la vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Une façon commode d'exprimer cette énergie est:

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (\text{I.2})$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns ( $\mu\text{m}$ ). 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 ( $0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$ ).
- %44 dans la bande des infrarouges ( $>0,8\mu\text{m}$ ) [2].

## 2.1. Le potentiel solaire dans le monde et en Algérie :

Les régions désertiques du globe (Grand Sahara, Sud-Ouest des Etats-Unis d'Amérique, Australie, Afrique du Sud) recevant jusqu'à 2900 kWh/m<sup>2</sup>/an de rayonnement direct fournissent largement la surface nécessaire à une production massive d'énergie par les technologies à concentration [4.5], Les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé.

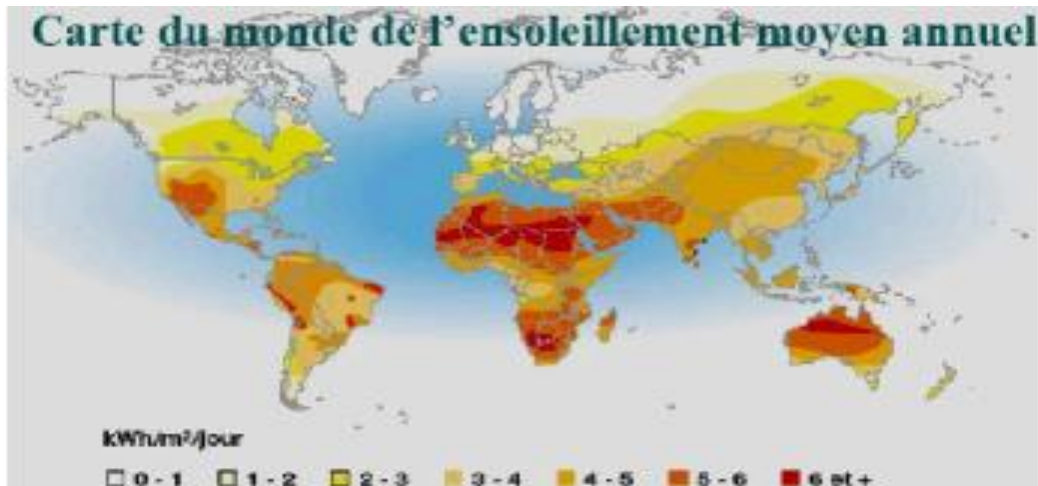


Figure I.1. carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [4.5.6]

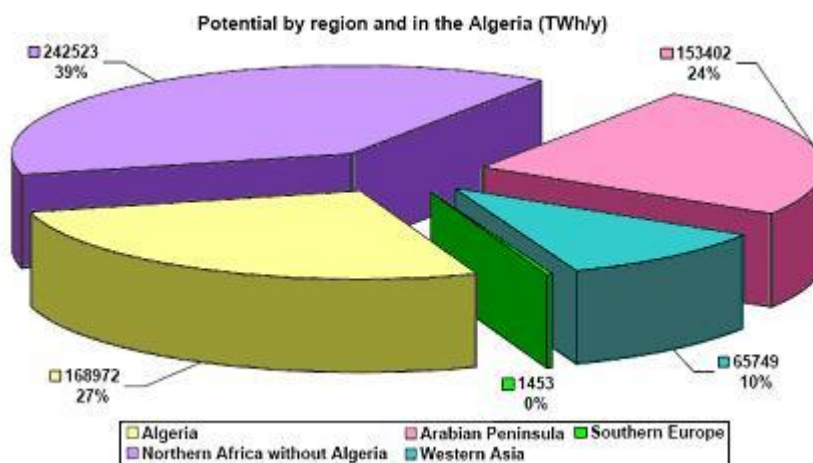


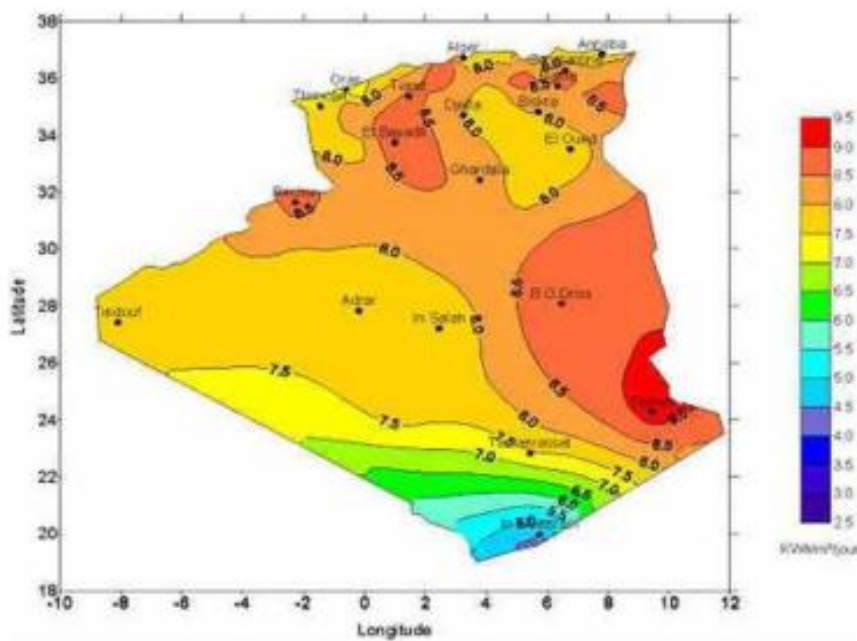
Figure I.2. Présentation des ratios du potentiel solaire de l'Algérie par rapport aux Pays del'Afrique du Nord, des Pays du Moyen Orient et les Pays Méridionaux de l'Europe [4].

Une évaluation par satellite, effectuée par l'agence spatiale allemande, a montré que l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen . Il est de 169,440 Tera-Watts.heure /an (TWh/an) pour le solaire thermique et de 713,9 TWh/an pour le photovoltaïque [7].

l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. 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 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m<sup>2</sup>/an au nord et 2263 kwh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays [8]. Le tableau suivant indique Potentiel solaire en Algérie.

**Tableau I.1.** Potentiel solaire en Algérie [3.4.5]

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures=an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650



**Figure I.3.** Carte de l'irradiation solaire en Algérie ( mois de juillet ) [7].

Cette énergie est une source d'énergie non polluante qui répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux. Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture. La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030 [9].

## **2.2. L'histoire industrielle de la cellule photovoltaïque et la date d'utilisation de la cellule photovoltaïque au niveau mondial :**

L'histoire des cellules solaires débute en 1839 avec le chercheur français Alexandre Edmond Becquerel qui découvre l'effet photovoltaïque alors expérimenté avec des électrodes de platine et de cuivre plongées dans une solution électrolytique acide . en 1883, l'Américain Charles Fritts a fait cette découverte pour la première fois pour fabriquer une cellule photovoltaïque en sélénium .

La première interprétation de l'effet photovoltaïque est proposée par le physicien allemand Albert Einstein en 1905 ce qui lui vaudra le prix Nobel en 1921 . En 1939, l'ingénieur américain Russel Ohl met au point la première cellule solaire en silicium. en 1954 , les chercheurs américains Gerald Pearson, Darryl Chapin et Calvin Fuller ont développé la première cellule solaire des laboratoires Bell, qui sont parvenus à afficher un rendement de 6% . La filière photovoltaïque se développe à partir de ce moment grâce à la recherche spatiale et aux explorations menées pour améliorer l'approvisionnement en énergie des satellites. En 1958, les premières cellules solaires sont envoyées dans l'espace. Composées de silicium, elles affichaient un rendement de 9 % et fonctionneront durant huit ans. à partir des années 1970 , l'utilisation des cellules photovoltaïques et des panneaux solaires associés a progressivement augmenté, grâce à une baisse progressive des coûts [10].

## **3. La cellule photovoltaïque et son principe de fonctionnement :**

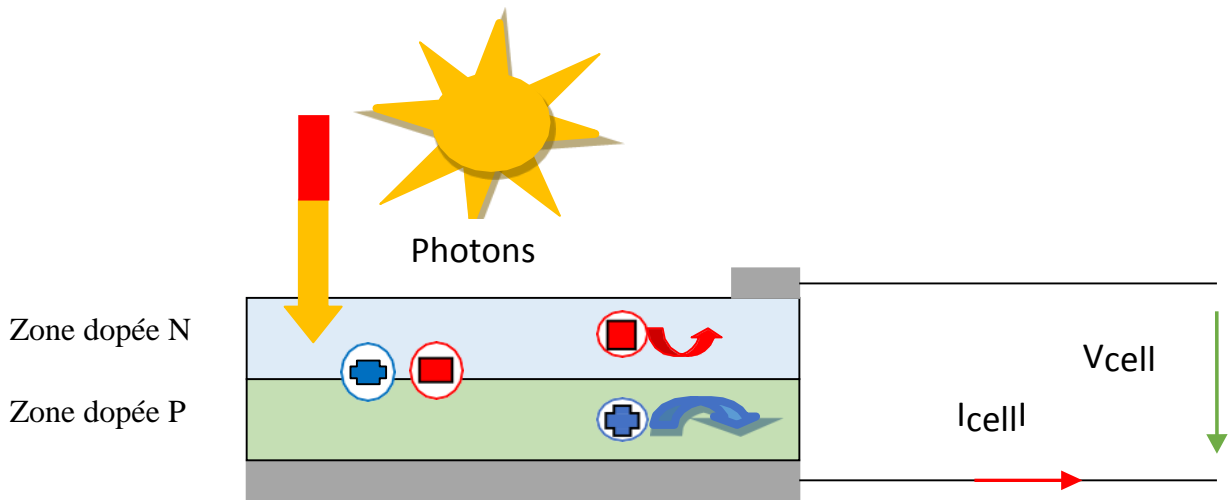
L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base des semi-conducteur. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire. [11]

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi- conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches.

Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [12].

La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure I.4. ci-dessous



**Figure I.4.** Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium ( présence d'une jonction PN) [13].

Les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, donc par définition le module photovoltaïque est un groupement de cellules, connecté entre elle en série, pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière, ce module est protégé en face avant par une plaque de verre et en face arrière par un autre matériau (verre ou résine) et installé sur un cadre en aluminium anodisé [14].

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation [15].

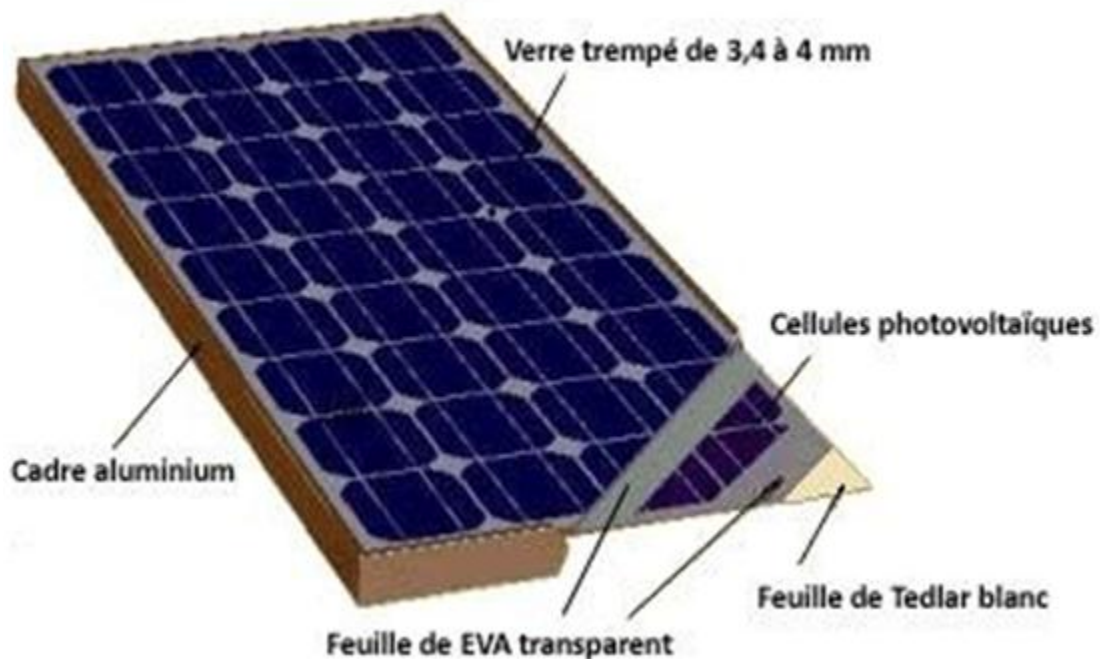


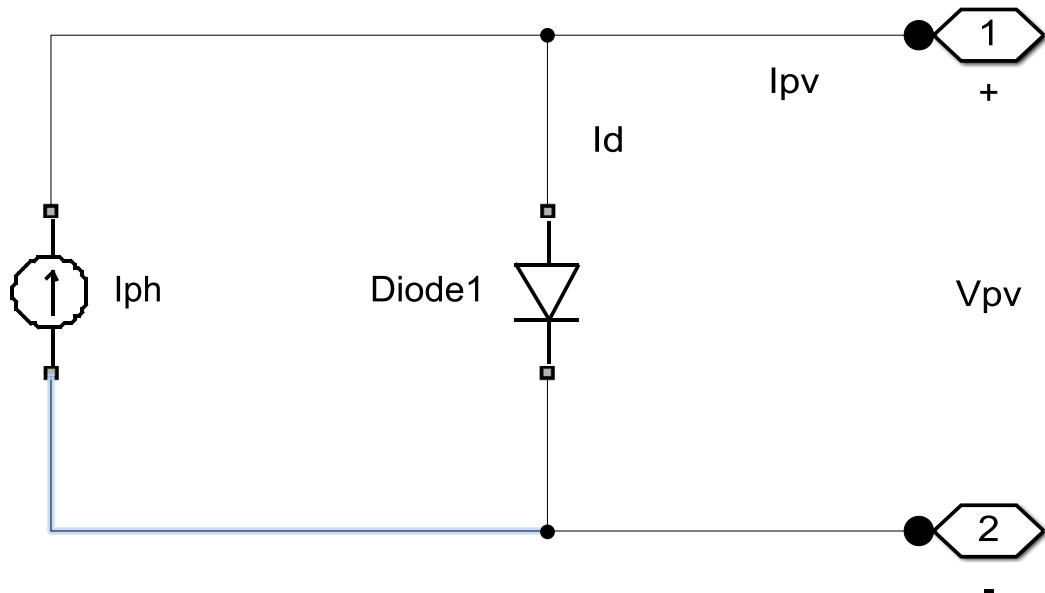
Figure I.5. module photovoltaïques [16].

#### 4. Modèles du module photovoltaïque :

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

##### 4.1. Modèle électrique idéal :

La cellule photovoltaïque peut être représenté par le circuit électrique équivalent donné par la figure I.6., composé d'un générateur de courant, qui produit un courant proportionnel , à la puissance lumineuse d'incidence et d'une diode parallèle, qui correspond à l'aire de transition P- N de la cellule PV le courant généré par la cellule PV s'écrit [14].



**Figure I.6.** Circuit électrique idéal d'une cellule PV [2] .

♦ Les équations retenues de ce modèle sont:

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

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

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

E: L'éclairement absorbé par la cellule

$E_{ref}$  : L'éclairement de référence (1000 w/m<sup>2</sup>)

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

$I_0$ : Courant de saturation inverse de la diode

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

$V_t$  : Tension thermique

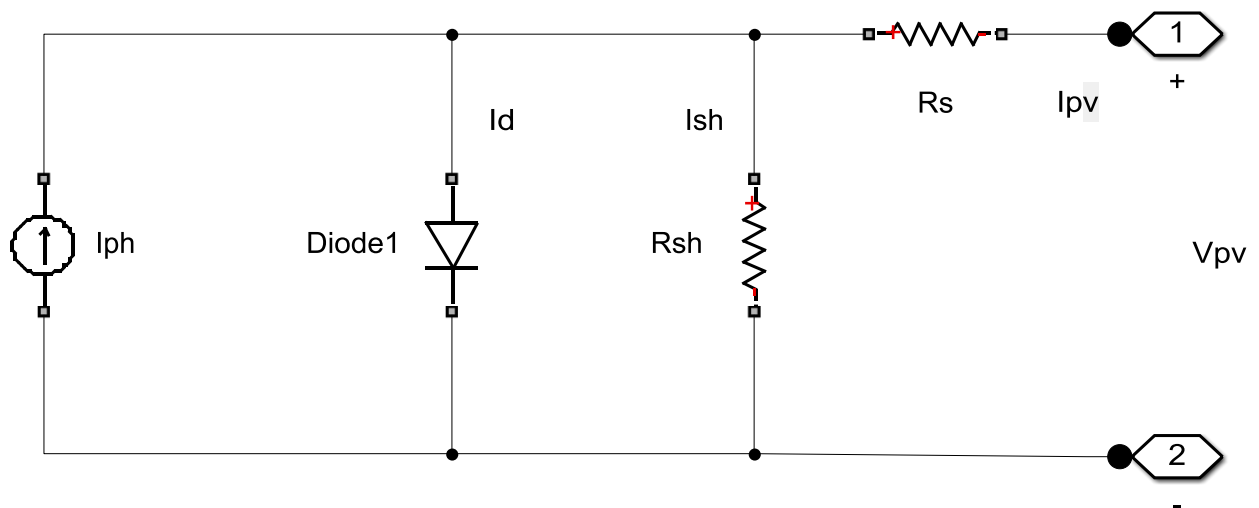
N : Facteur d'idéalité de la photopile

K : Constant de Boltzmann (1,38.10<sup>-23</sup>J/K)

$q$  : Charge de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ) [2].

#### 4.2. Modèle électrique réel :

Dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie, ainsi que des courants de fuite, alors le modèle photovoltaïque précédent, ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse, on modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_{sh}$  [4].



**Figure I.7.** Circuit électrique réel d'une cellule PV [2] .

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple.

♦ Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{pv} \quad (\text{I.7})$$

$I_{pv}$  : Courant généré par la cellule photovoltaïque

$I_{ph}$  : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

$I_d$  : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (\text{I.8})$$

$$I_0 = I_{or} \left( \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[ \frac{E_g}{k} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} - 1 \right) \quad (\text{I.9})$$

$I_{or}$  : est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence  $T_n$  et l'éclairement de référence

$T$ : Température de la jonction des cellules PV [ $^{\circ}\text{K}$ ]

$T_n$  : Température de référence des cellules PV [ $^{\circ}\text{K}$ ]

$B$ : facteur d'idéalité de la jonction

$E_g$  : Énergie de gap [eV]

$R_s$ : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules

$V_{pv}$ : La tension de sortie

$I_p$ : Le courant circulant dans la résistance  $R_p$

$R_p$ : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

Les résistances  $R_s$  et  $R_p$  sont calculées par une boucle de programmation.

En substituant les équations (I.6; I.7) dans l'équation (I.5) le courant IPV devient , Donc: [2].

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (\text{I.10})$$

### 4.3. Paramètres électriques du module photovoltaïque :

Les paramètres des cellules photovoltaïques ( $I_{CC}$ ,  $V_{C0}$ ,  $P_{max}$ ,  $A$ ,  $ff$  et  $\eta$  ), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

#### 4.3.1. Courant de court-circuit :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ( $V=0$ ) Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

On peut écrire :  $I_{cc} (V = 0) = I_{ph}$  [16]. (I.11)

#### 4.3.2. Tension de circuit ouvert :

La tension de circuit ouvert  $V_{co}$  ; est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule est nul, c'est la tension maximale de la cellule dans le cas idéal,

$$V_{oc} = N_s 0.6V \quad (I.12)$$

Où 0,6V est la tension pour une cellule photovoltaïque élémentaire et  $N_s$  est le nombre de cellules, on l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes du module PV, dans notre cas le module PV utilisé est le module PV [4].

#### 4.3.3. Puissance maximale :

La puissance fournie au circuit extérieur par un module photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes du module). Cette puissance est maximale (notée  $P_{max}$ ) pour un point de fonctionnement  $P_{max}$  ( $I_{opt}$ ,  $V_{opt}$ ) de la courbe Courant-Tension [13].

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} \quad (I.13)$$

#### 4.4.4. Facteur de forme :

C'est un facteur de performance des cellules solaires ; plus il s'approche de l'unité, plus les cellules sont meilleures. Il compare la puissance maximale délivrée ( $P_{op}$ ) au produit de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et de la tension à circuit-ouvert ( $V_{oc}$ ).

$$ff = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{oc}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (I.14)$$

Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7, Il diminue avec l'augmentation de la température [17].

#### 4.5.5. Rendement :

Le rendement  $\eta$ , (efficacité) des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$ . 
$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff \cdot V_{oc} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (I.15)$$

$P_{in}$  : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm<sup>2</sup>.

La densité de puissance incidente égale à :  $\frac{P_{in}}{A}$

A : section de la cellule.

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

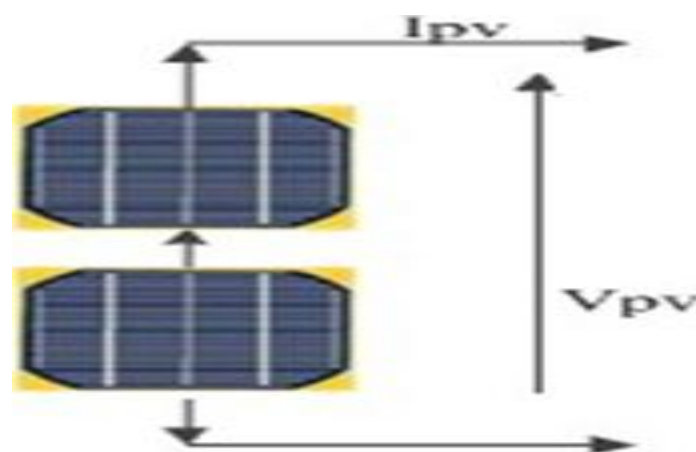
Le rendement varie généralement entre 8 à 13% pour le silicium mono-cristallin, entre 7 à 11% pour le poly-cristallin et entre 4 et 9% pour la cellule au silicium amorphe [15].

## 5. Association des cellules:

Dans la pratique les cellules solaires ne sont pas utilisées seules mais elles sont regroupées entre elles pour former un module photovoltaïque. Les modules sont regroupés leur tour pour former un panneau solaire. Généralement, dans le module les cellules sont groupées en série ou en parallèle.

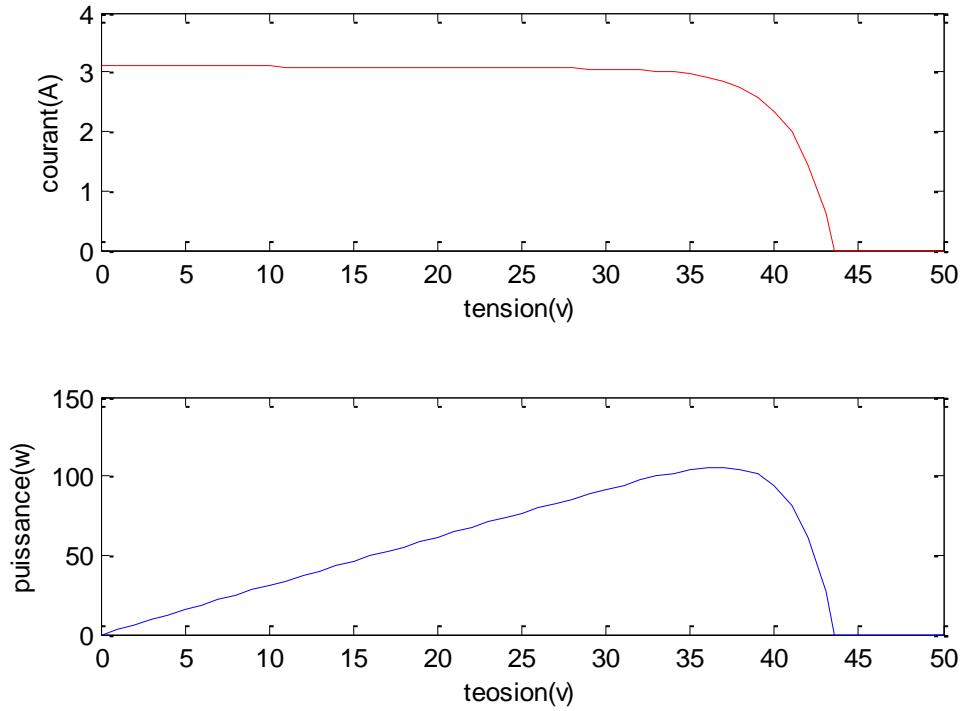
### 5.1. Montage en série :

Les tensions s'additionnent et le courant traversant les modules reste identique, lorsque les panneaux sont montés en série l'intensité traversant les panneaux sera celle du panneau le moins performant de la série. Ainsi, si l'ombre apparaît sur un des panneaux, toute la série aura pour rendement celui du panneau le plus faible. L'intensité restant faible, les sections de câbles sont moins importantes, la figure I.8 [15].



**Figure I.8.** Branchement deux modules en séries [12].

La caractéristique d'un groupement deux modules solaires en série est représentée par la figure suivant :

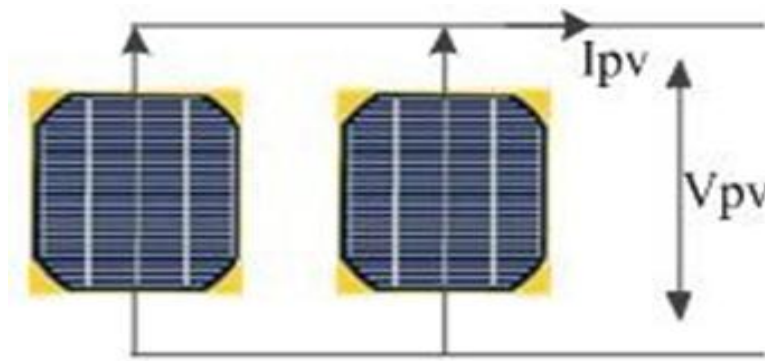


**Figure I.9.** Caractéristique de nombre deux modules en série.

**5.2. Montage en parallèle:**

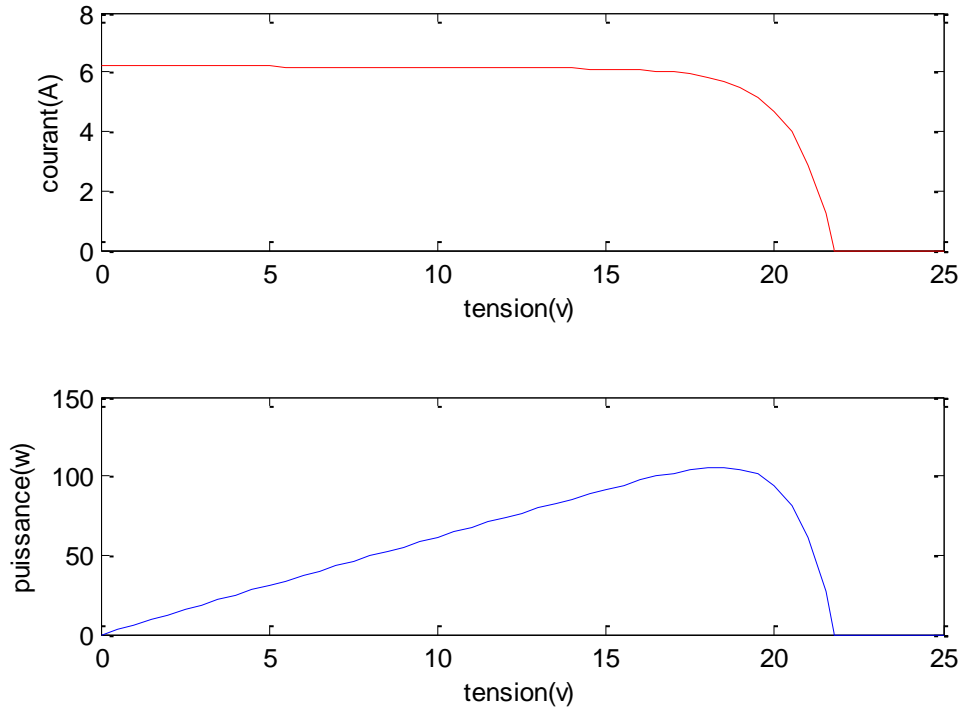
Les courants des différents modules s'additionnent et la tension reste identique.

Un tel montage peut demander une section de câble plus importante due à la forte intensité. la figure I.10 [15].



**Figure I.10.** Branchement deux modules en parallèles [12].

La caractéristique d'un groupement deux modules solaires en parallèle est représentée par la figure suivante :



**Figure I.11.** Caractéristique de nombre deux modules en parallèles.

## 6. Modélisation et simulation de Générateur PV (GPV) :

Le générateur PV est l'élément fondamental d'un système photovoltaïque composé de plusieurs cellules PV connectés en série et en parallèle pour fournir le tension et courant de sortie.

La cellule PV est l'élément de base du générateur PV qui convertit l'irradiation solaire en énergie électrique.

Dans la Figure I.12, le modèle de panneau PV comme source de courant continu constant créé à l'aide du bloc de sous-système de la bibliothèque Simulink navigateur, qui comprenait toutes les fonctions du panneau PV. Le modèle a trois entrées : l'éclairement , la température et la tension d'entrée. Cette le modèle génère du courant.

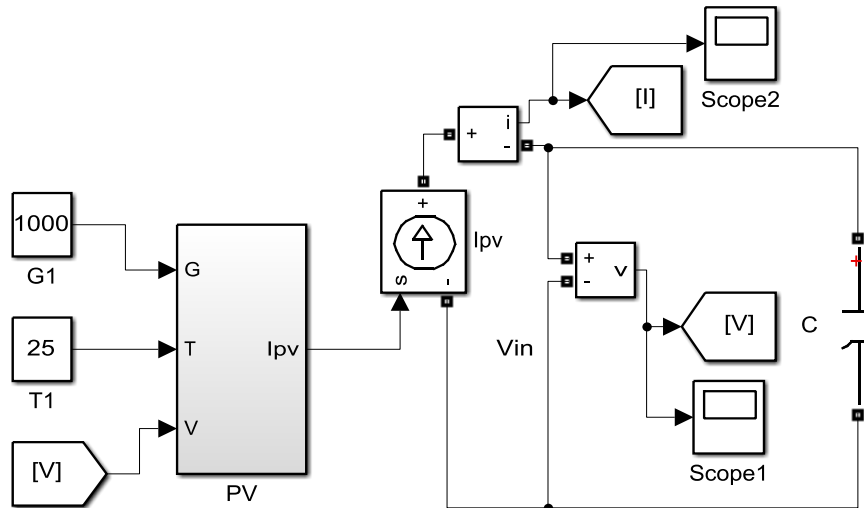


Figure I.12. Modèle de générateur PV dans MATLAB/Simulink.

## 7. Caractéristiques électriques du module PV :

### 7.1. Caractéristique courant-tension :

Le panneau photovoltaïque peut être considéré comme une source de puissance à cause de la difficulté de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. à température et éclairement fixés, la caractéristique courant-tension d'une cellule a l'allure suivante la figure I.13 : [18].

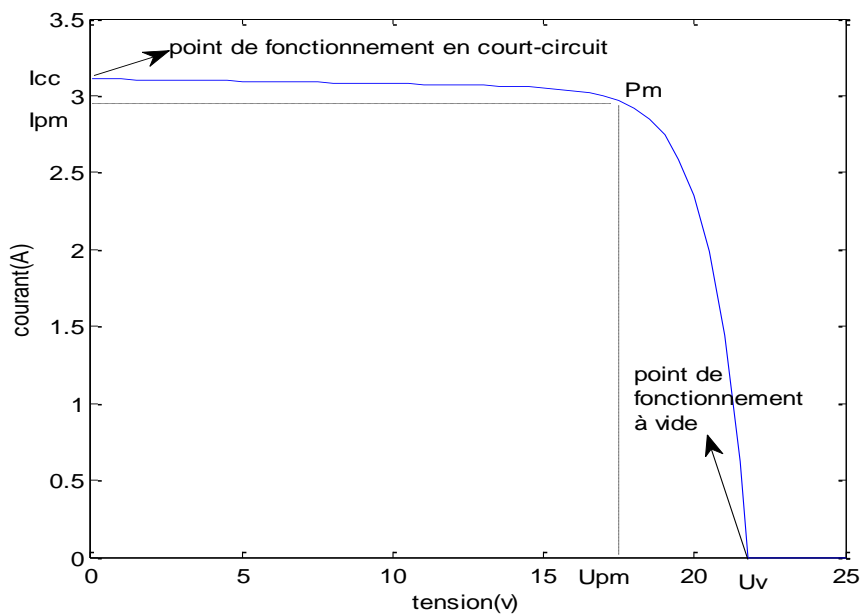


Figure I.13. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque réelle

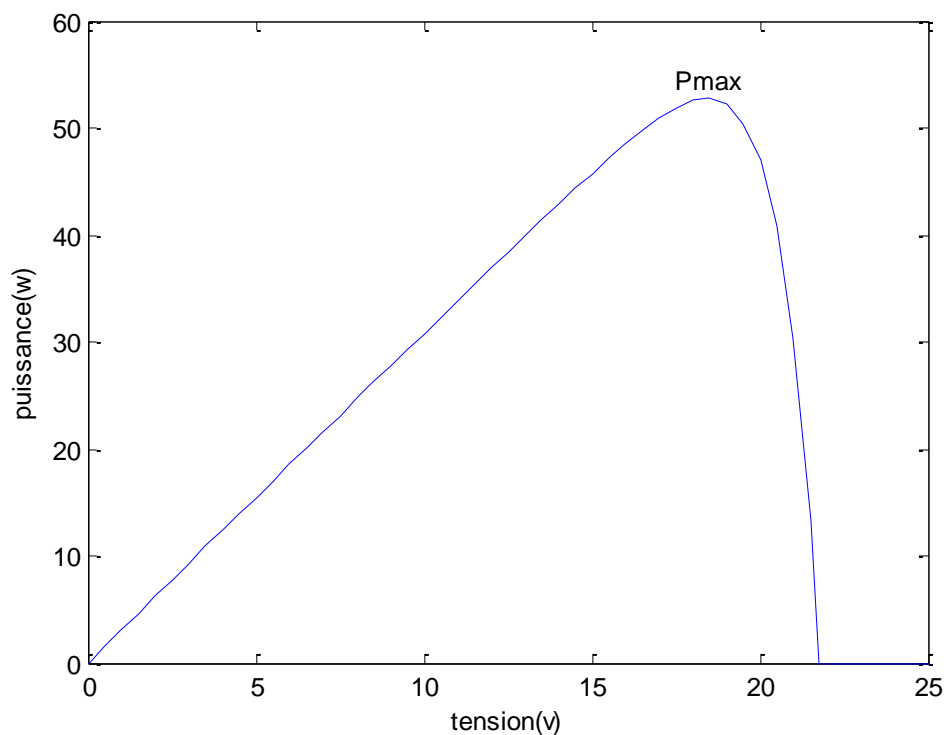
De cette courbe, on peut marquer l'existence du :

- Point de fonctionnement en court-circuit :  $I_{cc}$  pour  $U = 0V$
- Point de fonctionnement à vide :  $U_v$  pour  $I = 0A$
- Point  $P_m$  où la puissance est maximale, et qui correspond à l'intersection du point  $U_{pm}$  et  $I_{pm}$ , ce point représente une très grande importance pour tirer le maximum d'énergie et exploiter au mieux la puissance installée. C'est pourquoi on utilise des régulateurs solaires pour se placer à côté de ce point [18].

## 7.2. Caractéristique puissance-tension :

la puissance est le produit de la tension par l'intensité, on peut tracer la caractéristique puissance-tension de la cellule pour mieux localiser le point  $P_m$ .

Ce module possède les caractéristique suivantes fournies par le constructeur à  $1000 (w/m^2)$  et  $25^\circ C$

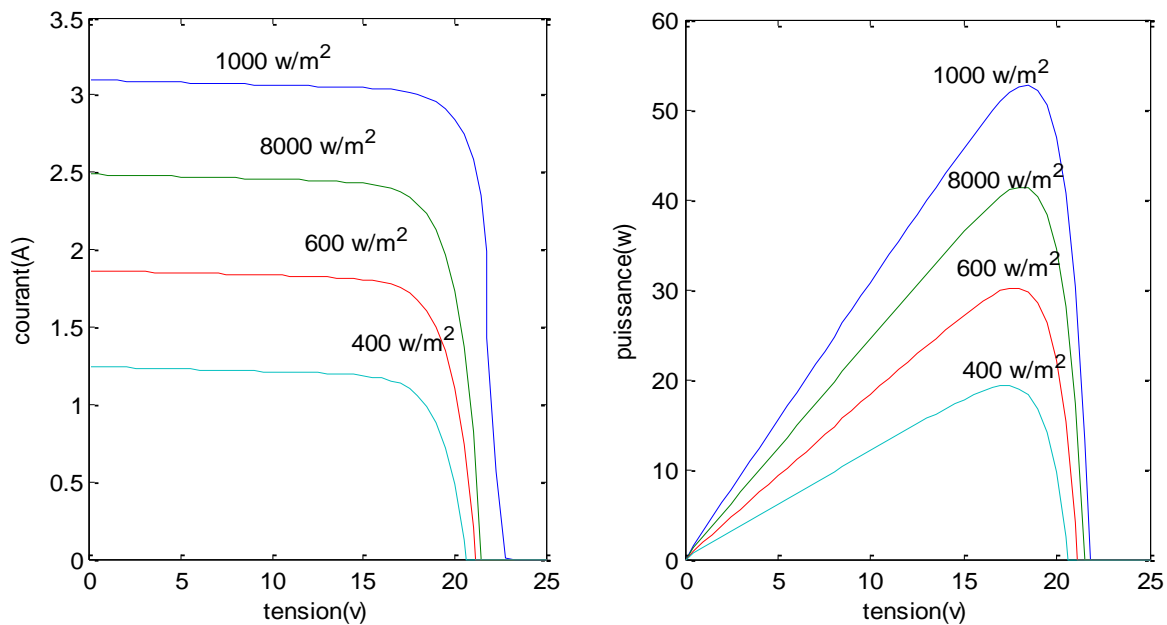


**Figure I.14.** Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque réelle

On remarque que la courbe présente deux parties séparées par le point  $P_m$ , après ce point la puissance chute rapidement. Il est donc très important de travailler au plus près de  $P_m$  pour avoir un rendement optimal [18].

### 7.3. Influence de l'éclairement :

Les figures précédant montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du module photovoltaïque, à une température constante.

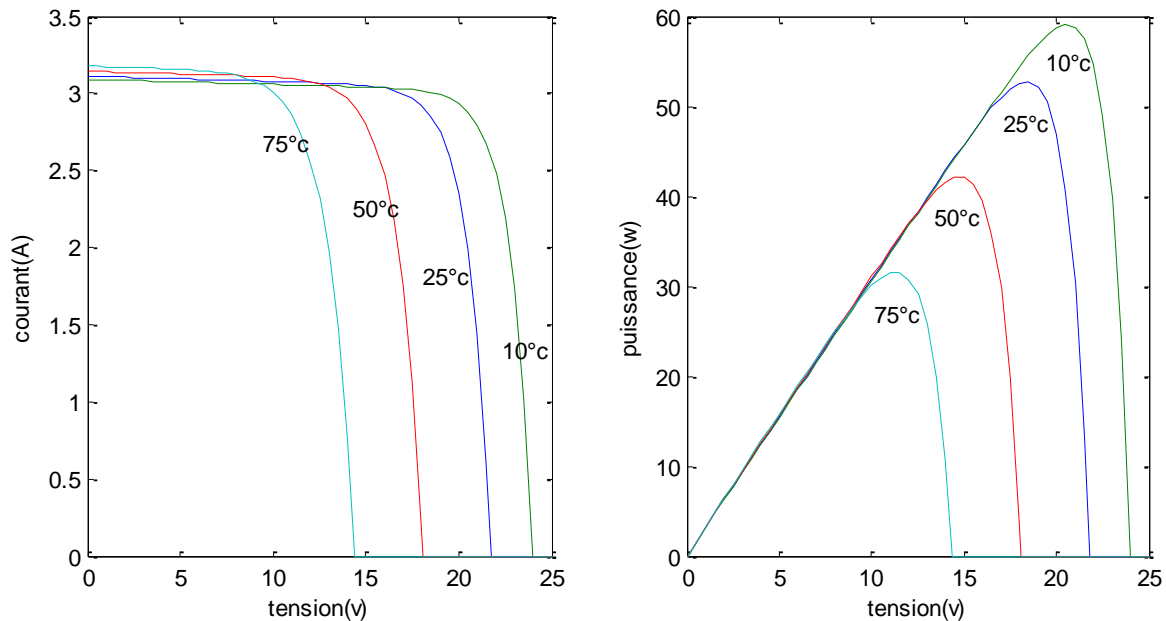


**Figure I.15.** Caractéristiques Courant-Tension (I-V) et Puissance-Tension (P-V) à une température de  $25\text{ C}^\circ$  et différents niveaux d'éclairement.

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique que La puissance optimale de la cellule  $P_{max}$  est pratiquement proportionnelle à l'éclairement. Ainsi Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension

#### 7.4. Influence de la température :

Les figures précédant montrent l'influence de températures de sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du module photovoltaïque , à un éclairement constante .



**Figure I.16.** Caractéristiques Courant-Tension (I-V) et Puissance-Tension (P-V) à un éclairement  $1000\text{w/m}^2$  et différentes températures .

On remarque que la tension à vide d'un module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température du module PV . Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV .

Nous pouvons remarquer aussi que l'augmentation de la température se traduit par une diminution de la puissance maximale disponible .

### 8. Avantages et Inconvénients d'un Module photovoltaïque :

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients [19].

#### 8.1. Avantages :

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

- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [2].

### **8.2. Inconvénients :**

- La fabrication des panneaux solaires photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux. Cela se traduit dans le prix de l'installation qui, aujourd'hui, reste chère.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20% (pour les meilleurs). L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an [19].

## 9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons commencé par introduction des énergies renouvelables, la structure physique des cellules PV, et les principes de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La modélisation du circuit électrique équivalent de la cellule PV présentée et discutée. Le modèle est mis en œuvre en utilisant le logiciel MATLAB pour étudier les caractéristique PV, l'effet de température et l'éclairement solaire sur les caractéristiques I-V et P-V.

## **Chapitre II**

# **L**a commande du système photovoltaïque et poursuite point de puissance maximale MPPT

## 1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons le système photovoltaïque PV avec les types d'installations et l'étage d'adaptation entre PV et charge.

Aussi , nous expliquerons les types et les principes de convertisseur DC/DC et technologies MPPT.

Enfin, nous utiliserons le programme MATLAB / SIMULINK pour modéliser et simuler la technologies P&O avec le système photovoltaïque PV.

## 2. Le système photovoltaïque PV :

Le système PV est un ensemble d'équipements régulièrement installés pour l'exploitation de l'énergie solaire sous change l'atmosphère conditions (température, ensoleillement). Il se compose d'un Générateur PV connecté à une charge via un Boost DC-DC convertisseur médiateur contrôlé par le contrôleur MPPT, qui suit directement le point de puissance maximale (MPP) conformable à l'efficacité maximale [20].

Figure II.1. représente le structure synoptique d'un système de production d'énergie photovoltaïque.

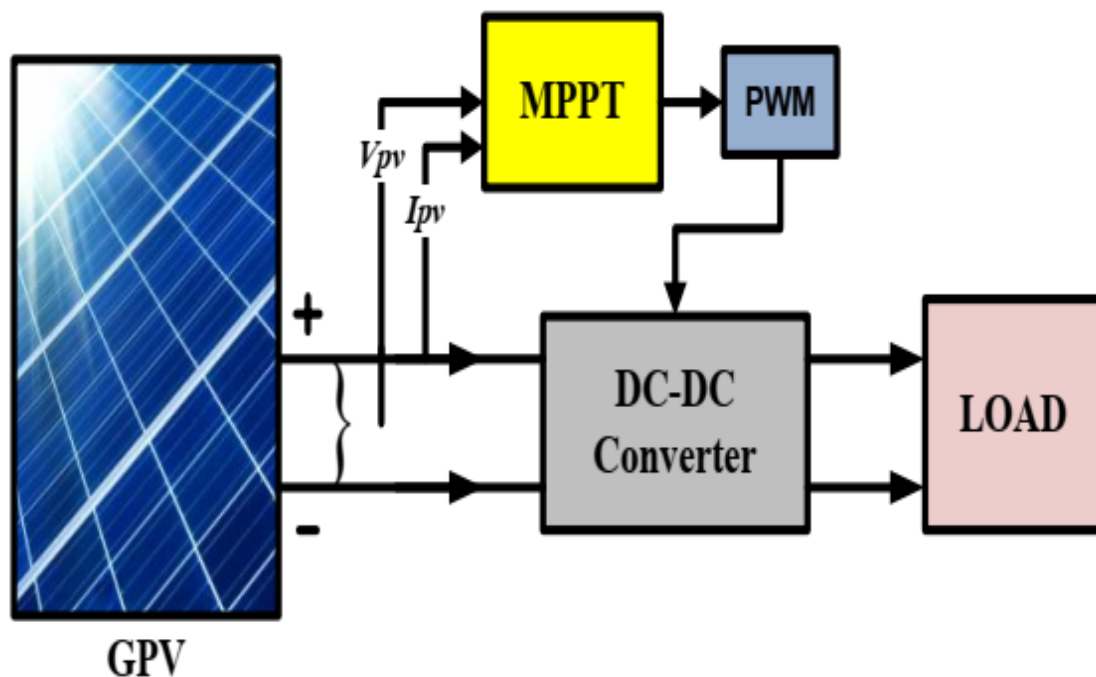


Figure II.1. structure synoptique d'un système de production d'énergie photovoltaïque [20] .

### 3. Types d'installations photovoltaïques :

#### 3.1. Installations autonomes :

Les installations autonomes sont des installations non raccordées au réseau, composées de panneaux PV et dont le système de stockage garantit une énergie électrique même en cas de faible éclairage. Étant donné que le courant fourni par le générateur PV est du courant DC, nous utilisons l'onduleur si l'installation de l'utilisateur requiert du courant AC.

Ces installations sont avantageuses d'un point de vue technique et financier si le réseau électrique n'est pas facile d'accès, car elles peuvent remplacer des ensembles moteur générateur. Par ailleurs, dans une configuration autonome, le champ PV est surdimensionné de sorte que, pendant les heures d'ensoleillement, l'alimentation de charge ainsi que la recharge des batteries de stockage puissent être garanties [21].



**Figure II.2.** Abris et éclairage public photovoltaïques [21].

les applications les plus communes sont utilisées pour alimenter ce qui suit Figure II.2.

- systèmes de protection contre la foudre .
- systèmes de signalisation routière, portuaire ou aéroportuaire .
- équipement de pompe à eau .
- services de caravanes et camping-cars .
- installations publicitaires .

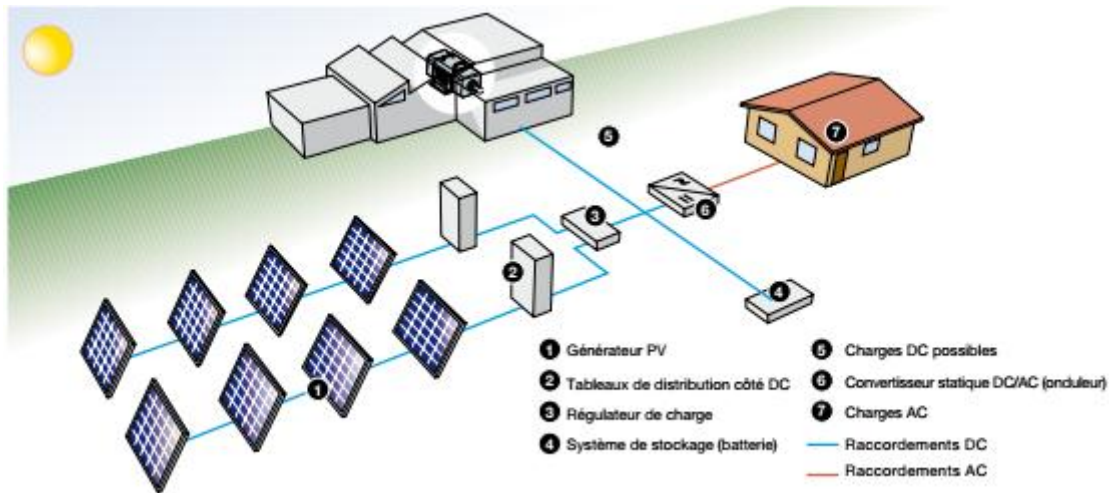


Figure II.3. schéma de principe d'une installation PV autonome.

### 3.2. Installations raccordées au réseau :

Les installations raccordées en permanence au réseau utilisent l'énergie du réseau lorsque le générateur PV n'est pas en mesure de produire l'énergie nécessaire pour satisfaire les besoins du consommateur, si le système PV produit un excédent d'énergie électrique, celui-ci est mis sur le réseau, qui agit par conséquent comme un grand accumulateur.

Ces installations offrent l'avantage de fournir une génération répartie et non centralisée : en effet, la valeur de l'énergie produite près de la zone de consommation est supérieure à celle de l'énergie produite dans les grandes centrales traditionnelles, car les pertes par transmission sont limitées et les dépenses liées au transport et aux systèmes électriques de répartition sont réduites [21].

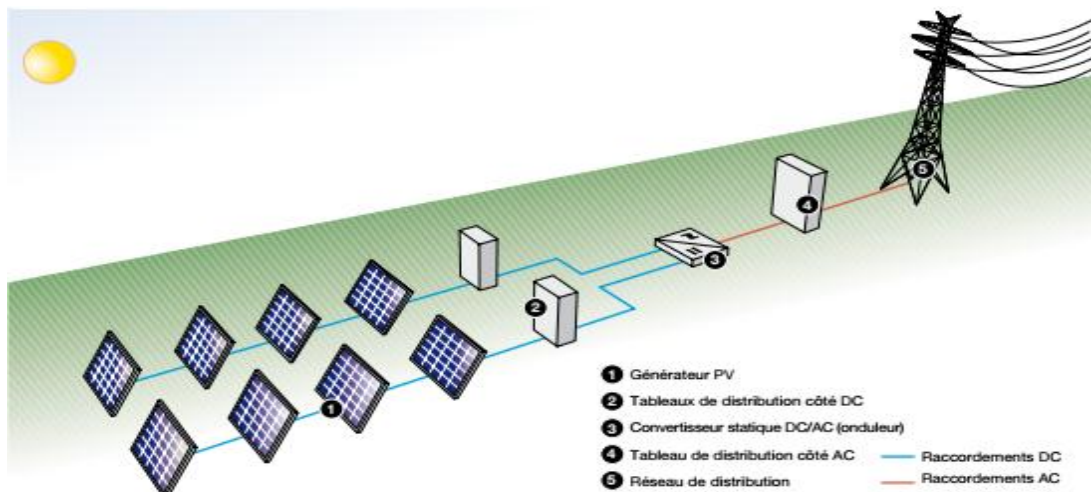


Figure II.4. schéma de principe d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau[21].

#### 4. Étage d'adaptation entre le module (GPV) photovoltaïque et la charge :

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure II.5. 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 P<sub>MAX</sub> disponible [1.11.19].

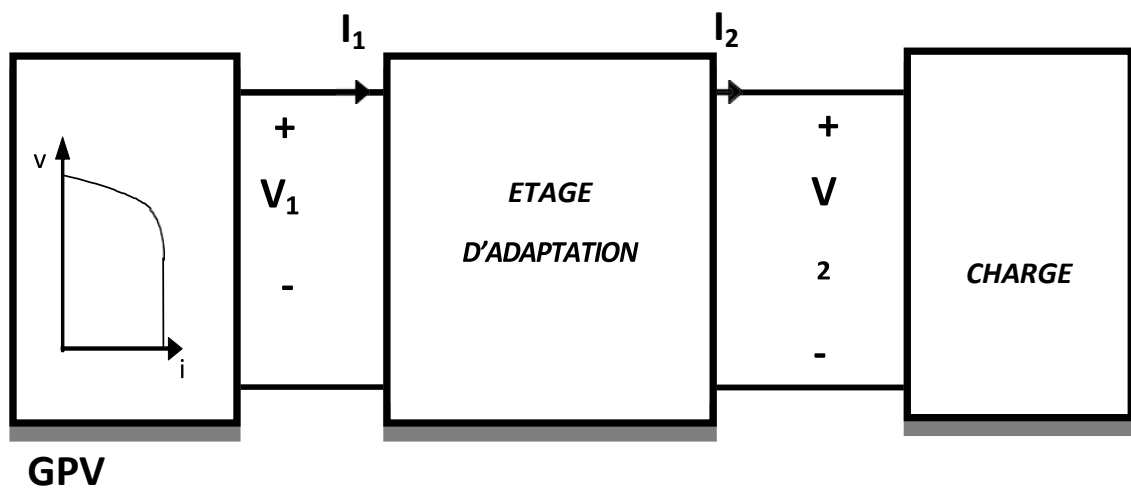


Figure II.5. Étage d'adaptation entre un GPV et une charge [22].

Ce dernier par le biais d'une commande spécifique est alors susceptible de permettre au générateur de délivrer sa puissance maximale notée : P<sub>max</sub> (V<sub>opt</sub> × I<sub>opt</sub>) où V<sub>opt</sub> et I<sub>opt</sub> représentent respectivement les tensions et les courants optimaux du générateur photovoltaïque, pour une courbe I-V donnée. Le rôle du convertisseur DC-DC est de faire fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quel que soit l'éclairement et la température pour délivrer cette puissance à l'utilisation. [11].

#### 5. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

Les convertisseurs sont des appareils qui servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative [15].

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...).

La figure II.6 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.

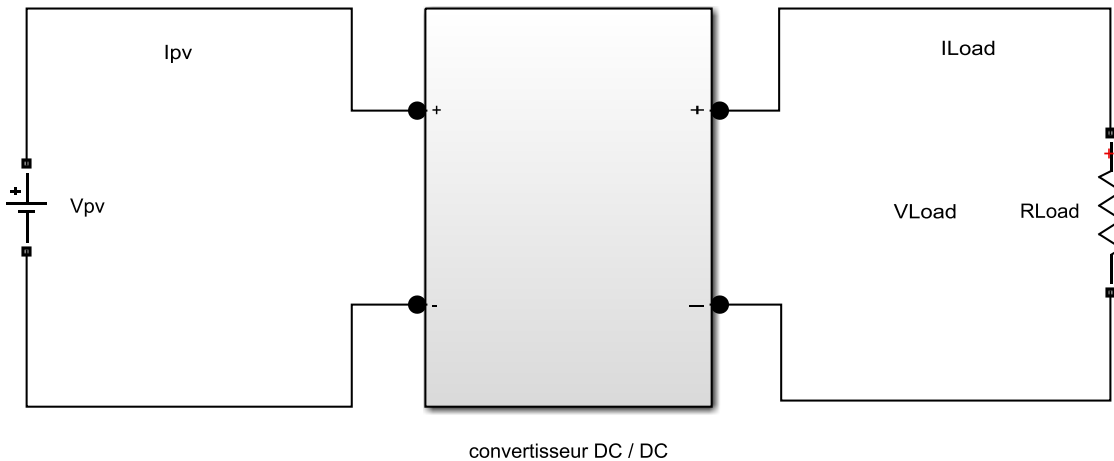


Figure II.6. convertisseur DC/DC.

### 5.1. Les types des convertisseurs statiques DC-DC :

Il existe plusieurs types de convertisseurs statiques (DC/DC) dont les plus connus sont :

Le convertisseur statique dévolteur (Buck) , le convertisseur statique survolteur (Boost) et le convertisseur statique dévolteur- survolteur (Buck-Boost). Ces convertisseurs sont utilisés fréquemment dans les systèmes PV pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux PV avec les différentes charges.

#### 5.1.1. convertisseur dévolteur :

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du MPP. La figure II.7 représente le schéma de circuit électrique d'un convertisseur Buck [15].

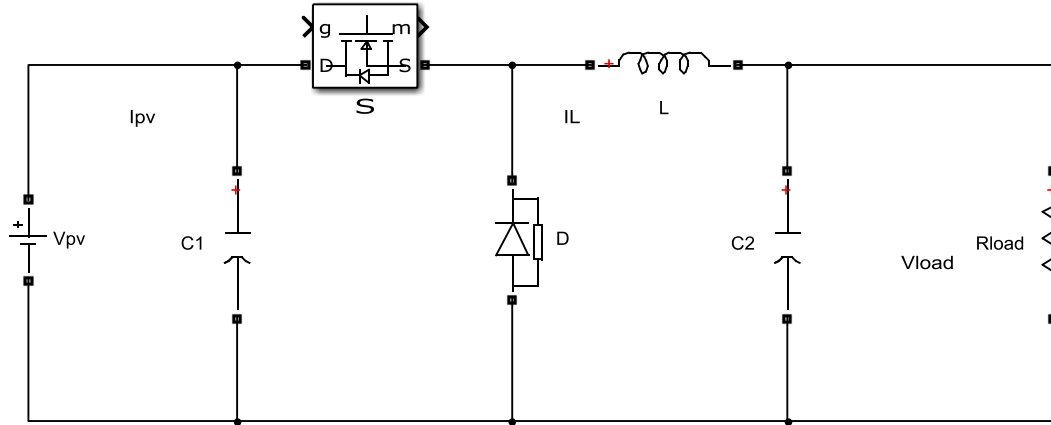


Figure II.7. schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck.

La figure II.8 représente le schéma de circuit électrique d'un convertisseur Buck durant l'état 'on' et 'off'.

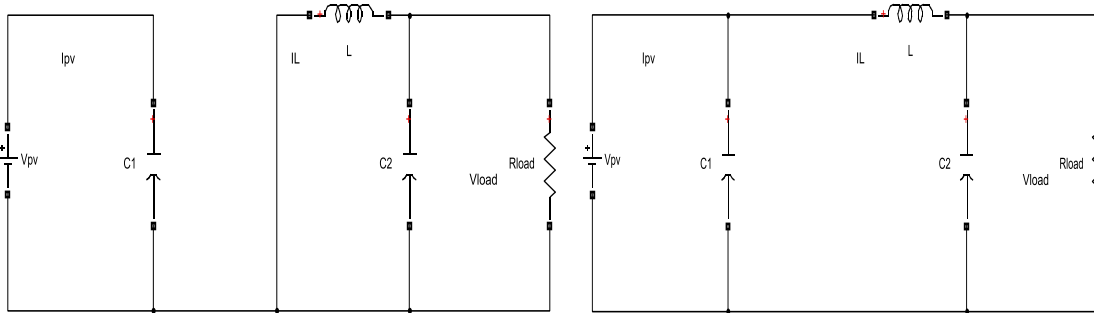


Figure II.8. convertisseur Buck durant l'état 'on' et 'off'.

on applique la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur des deux phases de fonctionnement, on aura les deux systèmes d'équations suivantes :

Pour la première période  $\alpha T_s$  : [2].

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c1 \frac{dv_{in}(t)}{dt} = i_{in}(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c2 \frac{dv_{in}(t)}{dt} = i_{in}(t) - i_{out}(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_l(t) - v_{in}(t) \end{cases} \quad (II.1)$$

Pour la dixième période  $(1-\alpha)T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c1 \frac{dv_{in}(t)}{dt} = i_{in}(t) \\ i_{c2}(t) = l \frac{di_l(t)}{dt} = i_l(t) - i_{out}(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = -v_{out}(t) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour toute la période  $T_s$ , on utilise généralement l'expression suivante : [2].

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt} \alpha T_s + \frac{dx}{dt(1-\alpha)T_s} (1 - \alpha) T_s \quad (\text{II.3})$$

En appliquant la relation (II.4) sur les systèmes d'équations (II.1) et (II.2), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur :

$$\begin{cases} i_l(t) = \frac{1}{\alpha} (i_{in}(t) - c1 \frac{dv_{in}(t)}{dt}) \\ i_{out}(t) = i_l(t) - c2 \frac{dv_{out}(t)}{dt} \\ v_{in}(t) = \frac{1}{\alpha} (l \frac{di_l(t)}{dt} + v_{out}(t)) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

$\alpha$  : le rapport cyclique ;  $T_s$  : la période ;  $V_i = V_{in} = V_{pv}$  ;  $V_o = V_{out} = V_{charge}$

### 5.1.2. convertisseur survolteur :

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du MPP. La figure II.9 montre le schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.[15].

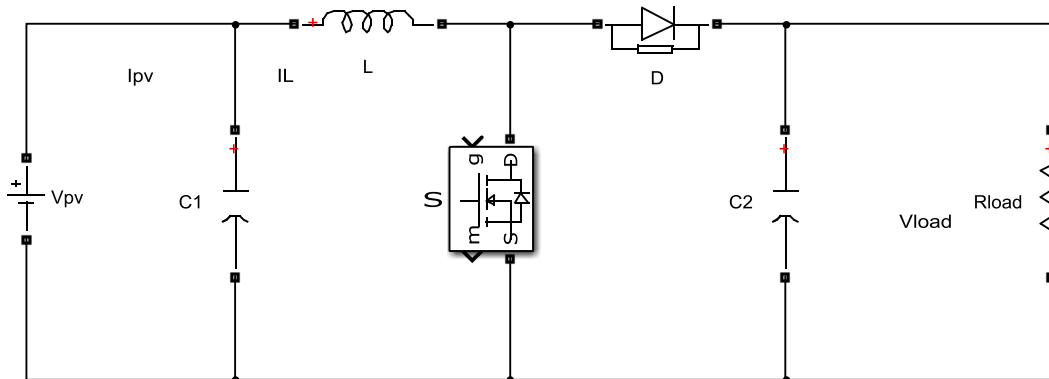


Figure II.9. schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.

La figure II.10 représente le schéma de circuit électrique d'un convertisseur Boost durant l'état 'on' et 'off'.

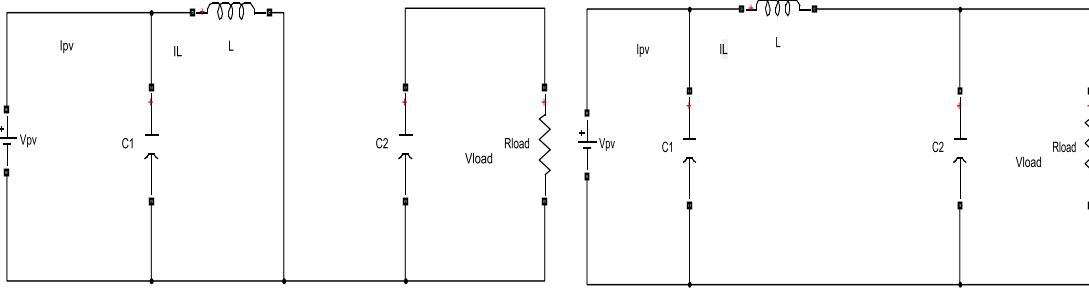


Figure II.10. convertisseur Boost durant l'état 'on' et 'off'.

on applique la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement, on aura les deux systèmes d'équations suivantes :

Pour la première période  $\alpha T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c1 \frac{dv_{in}(t)}{dt} = i_{in}(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c2 \frac{dv_{out}(t)}{dt} = -i_{out}(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = -v_{in}(t) \end{cases} \quad (II.5)$$

Pour la deuxième période  $(1-\alpha)T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c1 \frac{dv_{in}(t)}{dt} = i_{in}(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c2 \frac{dv_{out}(t)}{dt} = i_l(t) - i_{in}(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_{in}(t) - v_{out}(t) \end{cases} \quad (II.6)$$

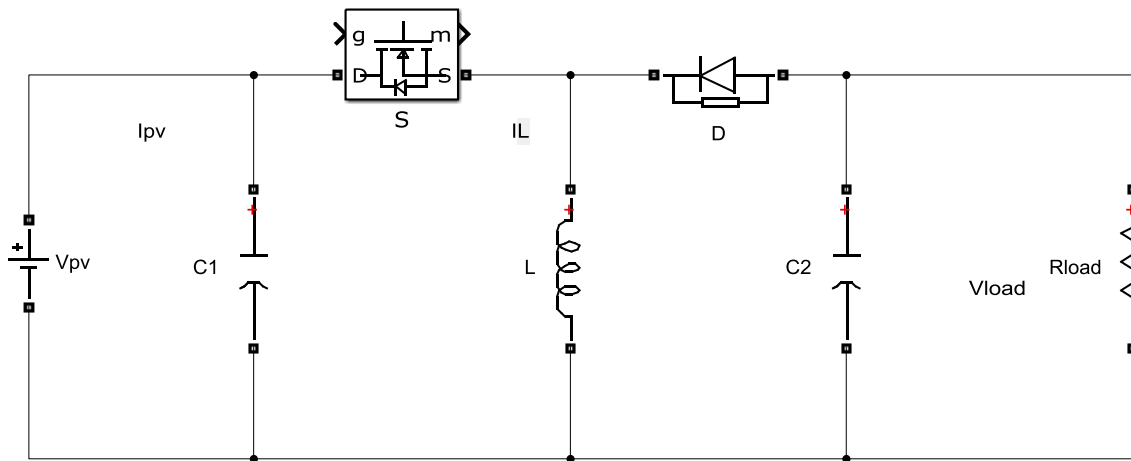
En appliquant la relation (II.7) sur les systèmes d'équations (II.5) et (II.6) , on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [17].

$$\begin{cases} i_l(t) = i_{in}(t) - c1 \frac{dv_{in}(t)}{dt} \\ i_{out}(t) = (1 - \alpha)i_l - c2 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ v_{in}(t) = l \frac{di_l(t)}{dt} + (1 - \alpha)v_{out} \end{cases} \quad (II.7)$$

### 5.1.3. Convertisseur Buck-Boost :

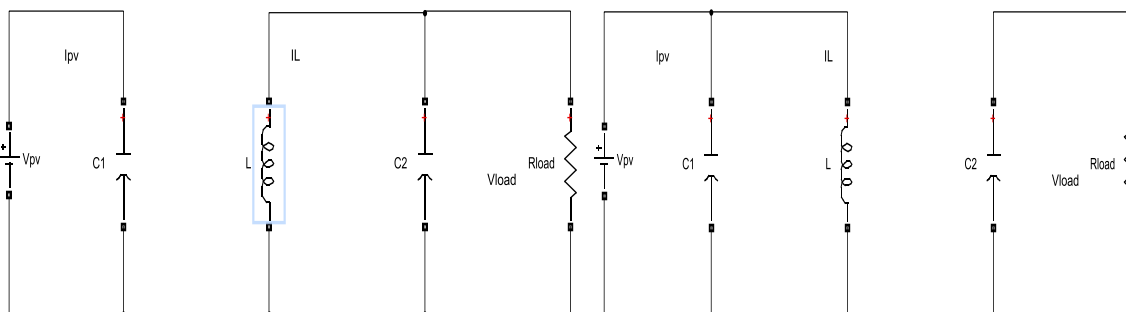
Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse [15].

La figure II.11 représente le schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost.



**Figure II.11.** schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost.

La figure II.12 représente le schéma de circuit électrique d'un convertisseur Boost durant l'état 'on' et 'off'.



**Figure II.12.** convertisseur buck- Boost durant l'état 'on' et 'off'.

on applique la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement, on aura les deux systèmes d'équations suivantes :

Pour la primaire période  $\alpha Ts$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c1 \frac{dv_{in}(t)}{dt} = i_{in}(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c2 \frac{dv_{out}(t)}{dt} = -i_{out}(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_{in}(t) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Pour la dixième période  $(1-\alpha)Ts$  :

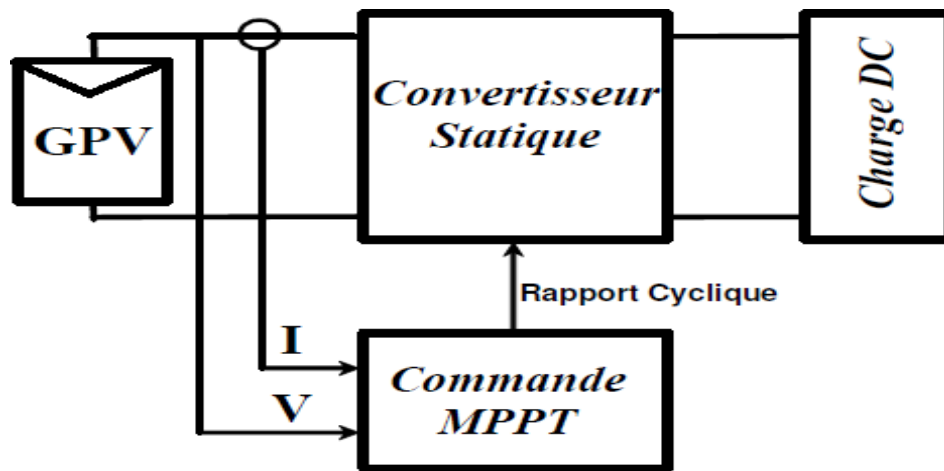
$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c1 \frac{dv_{in}(t)}{dt} = i_{in}(t) \\ i_{c2}(t) = c2 \frac{dv_{out}(t)}{dt} = i_l(t) - i_{out}(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_{out}(t) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

En appliquant la relation (II.10) sur les systèmes d'équations (II.8) et (II.9) , on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [2].

$$\begin{cases} i_l(t) = \frac{1}{\alpha} (i_{in}(t) - c1 \frac{dv_{in}(t)}{dt}) \\ i_{out}(t) = -(1 - \alpha)i_l(t) - c2 \frac{dv_{out}(t)}{dt} \\ v_{in}(t) = \frac{1}{\alpha} (l \frac{di_l(t)}{dt} - (1 - \alpha)v_{out}(t)) \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

## 6. Principe de recherche du point de puissance maximale (PPM) :

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin. Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale. La figure II.13 représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. La commande MPPT est associée à un convertisseur statique permettant de faire une adaptation entre le GPV et la charge de telle sorte que la puissance générée correspond à sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement à La charge [22].



**Figure II.13.** Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT [22].

### 6.1. Méthodes classique de poursuite du PPM :

Dans le but d'avoir un meilleur rendement dans le fonctionnement des modules photovoltaïques, existent des techniques qui effectuent la poursuite du PPM à la sortie du module et la transférer vers la charge à alimenter.

Parmi Les techniques les plus utilisées de contrôle classiques employées pour la poursuite du point de puissance sont :

- Méthode d'incrémentation de l'inductance (IncCond)
- Méthode de perturbation et observation (P&O)

#### 6.1.1. Méthode d'incrémentation de l'inductance (IncCond) :

Pour rechercher les PPM, cette autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM Ainsi, la conductance(G) du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous : [11]

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{II.7})$$

Les relations suivantes montrent la position de la pente sur la caractéristique  $P(v)$  et  $I(v)$  Par rapport au PPM :

Si  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > 0$  le point de fonctionnement est à gauche du PPM,

Si  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0$  le point de fonctionnement est sur le PPM,

Si  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < 0$  le point de fonctionnement est à droite du PPM.

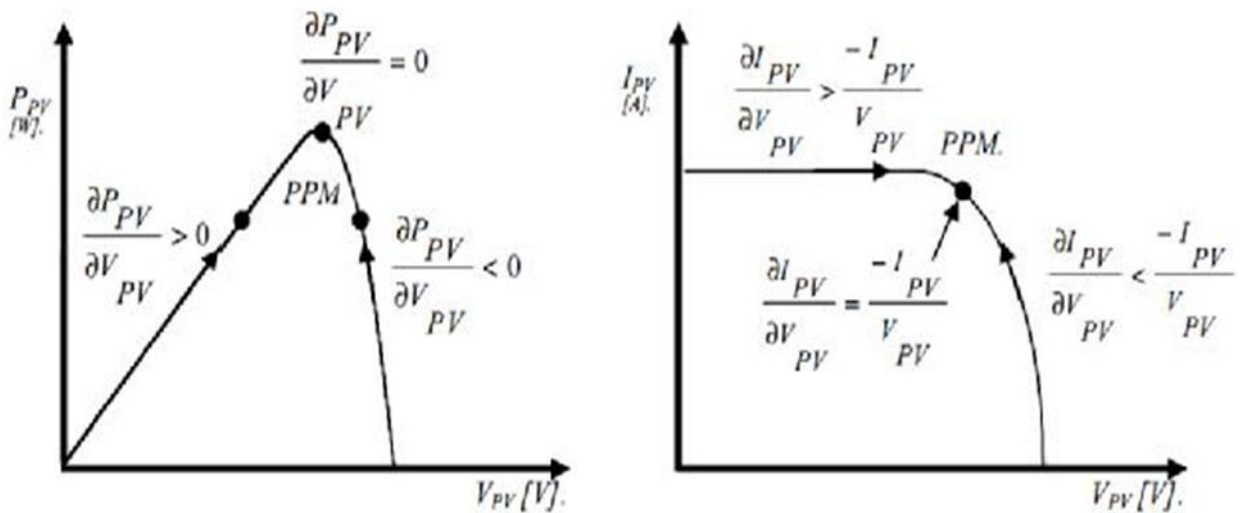


Figure II.14. Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de  $dP_{pv}/dV_{pv}$ [11].

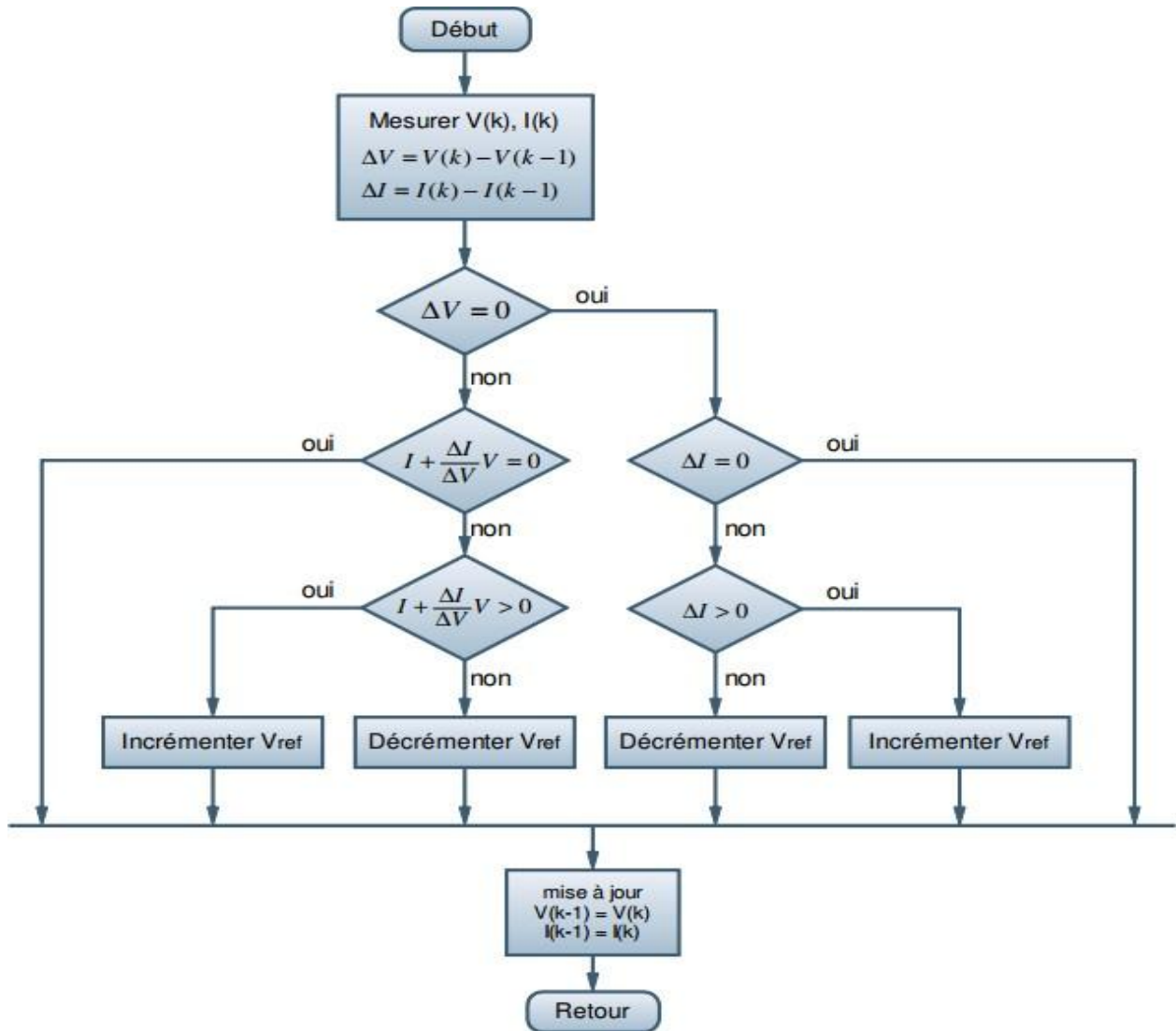


Figure II.15. Organigramme de la méthode incrémentation de conductance [15.13].

### 6.1.2. Méthode perturbation et observation (P&O) :

Le principe de la commande MPPT de type P&O consiste à perturber la tension VPV d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de la puissance PPV qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure II.16, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la puissance PPV, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de la tension sur la caractéristique PPV (VPV), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande [14].

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant .

P<sub>pv</sub>(t-1): puissance dans le temps (t-1).

V<sub>pv</sub>(t-1) :Tension dans le temps (t-1).

$$\Delta v = V_{pv}(t) - V_{pv}(t-1) \quad (\text{II.8})$$

$$\Delta p = P_{pv}(t) - P_{pv}(t-1) \quad (\text{II.9})$$

La méthode P&O est aujourd’hui largement utilisée de par sa facilité d’implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu’elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d’incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [15].

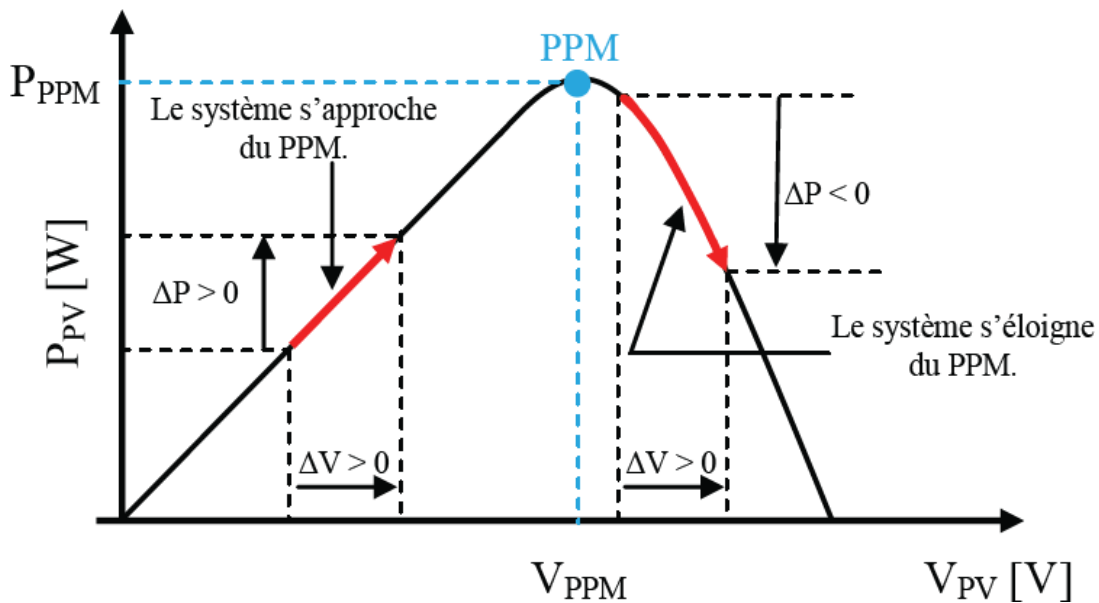


Figure II.16. Recherche du PPM par la méthode P&O [13.18.2.22].

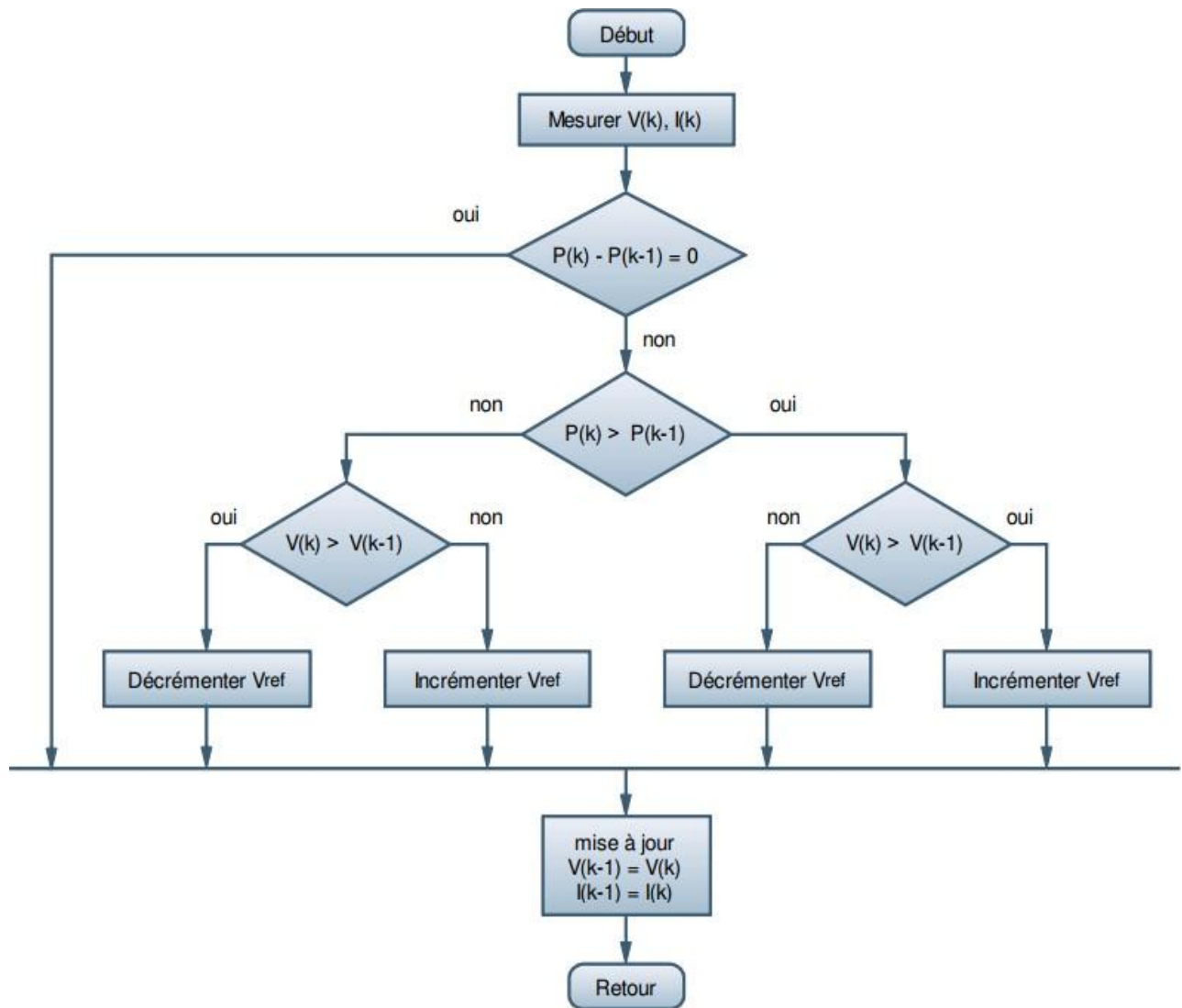


Figure II.17. Organigramme de la méthode P&O [13].

## 7. Simulation de l'MPPT par MATLAB/SIMULINK :

### 7.1. Schéma de simulation de l'MPPT par P&O :

Pour authentifier la mise en œuvre de l'algorithme recommandé, un modèle MATLAB / Simulink a été développé comme illustré sur la figure II.18. le modèle est constitué de module de générateur PV , la commande de DC-DC convertisseur Boost avec commande MPPT (contrôleur MPPT et générateur PWM) connectée à la charge est implémentée dans l'environnement Matlab / Simulink .

Le générateur photovoltaïque a été simulé dans Matlab , sous l'irradiation 1000W/m2 et températures 25° C . L'algorithme MPPT a été mis en œuvre en utilisant le codage de l'organigramme qui a facilité la compréhension et la mise en œuvre des modifications dans l'algorithme conventionnel.

Le convertisseur élévateur DC-DC basé sur Mosfet était contrôlé par le signal de grille qui a été décidé par l'algorithme P&O proposé. le convertisseur élévateur se composait de 200  $\mu$ H de l'inductance et de 2200  $\mu$ F du condensateur. la charge est résistance d'une valeur de 22 omhs.

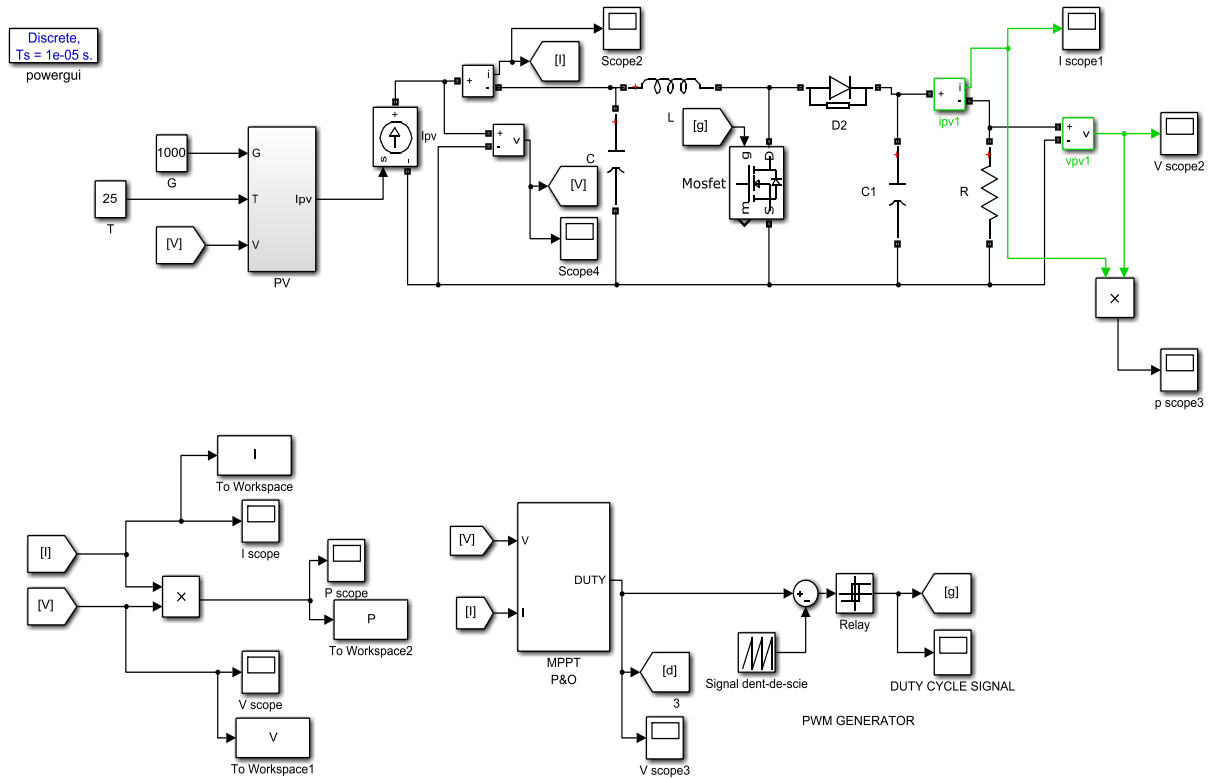


Figure II.18. Schéma Matlab / Simulink d'un système PV avec MPPT P&O.

Cette figure II.19 montre le schéma MATLAB SIMULINK assurant la commande MPPT du type P&O .

Alors , on peut présenter le schéma de simulation comportant trois paramètres, deux variable d'entrées : la tension , le courant et un variable de sortie : Duty `` le rapport cyclique D est la sortie souhaitée à utiliser en impulsion avec Modulation "PWM" pour contrôler le Boost ``.

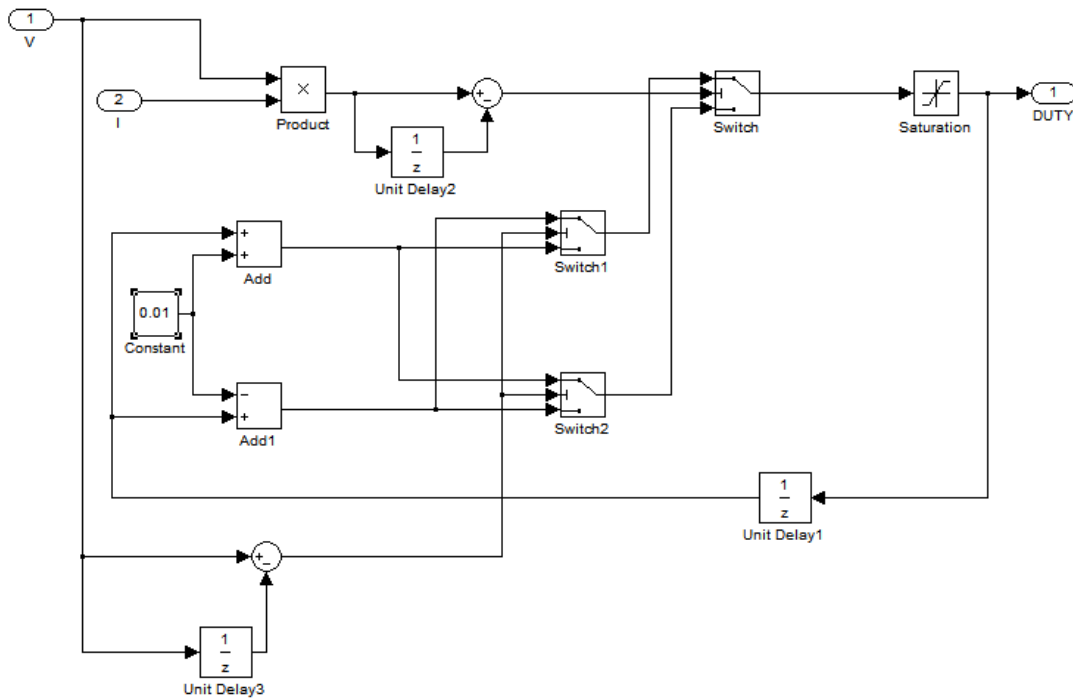


Figure II.19. Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et l'observation P&O.

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableaux suivant :

Éclairement standard G	1000 W/m <sup>2</sup>
Température standard T	25 C°
Puissance maximale P <sub>m</sub>	60 W
Tension optimale V <sub>opt</sub>	17.1 V
Courant optimale I <sub>opt</sub>	3.5 A
Tension à circuit ouvert V <sub>co</sub>	21.1 V
Courant de court-circuit I <sub>sc</sub>	3.8 A

Tableaux II.1. caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau MSX 60 dans les conditions standards .

7.2.Résultats de simulation MPPT P&O :

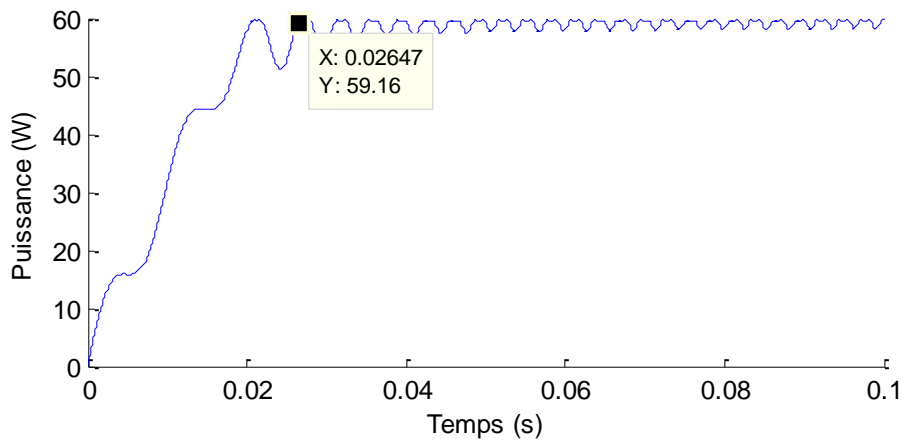


Figure II.20. MPPT basé sur P&O. Profil de l'extraction de puissance du panneau PV

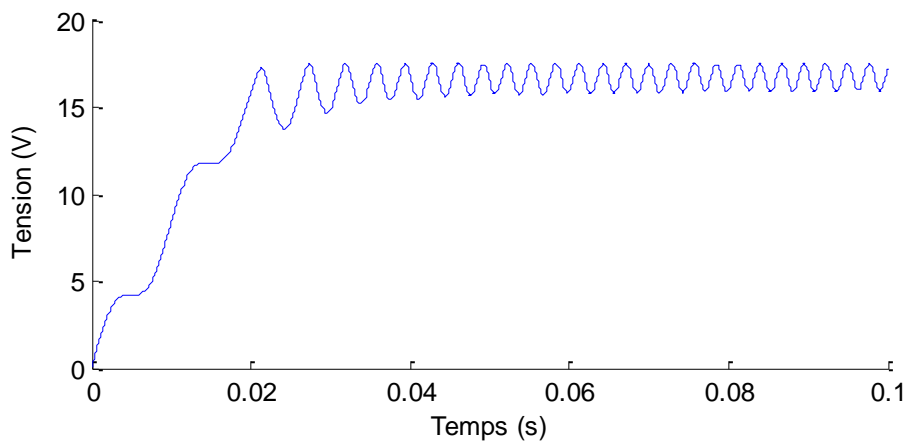


Figure II.21. MPPT basé sur P&O. Profil de l'extraction de tension du panneau PV

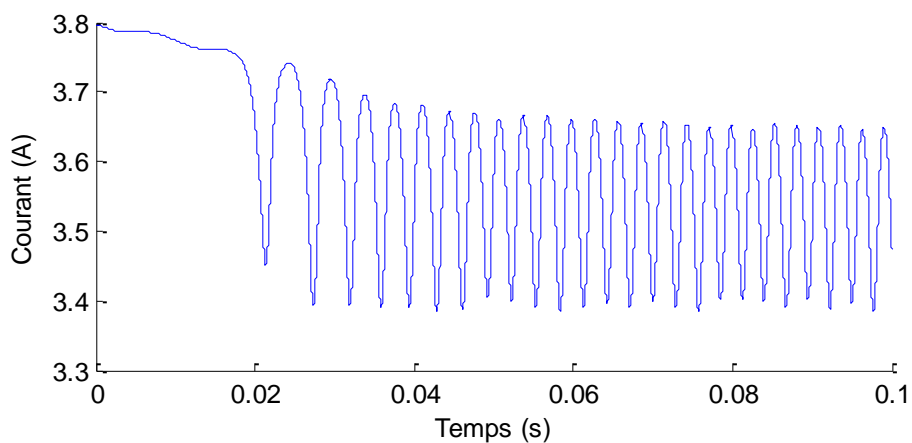
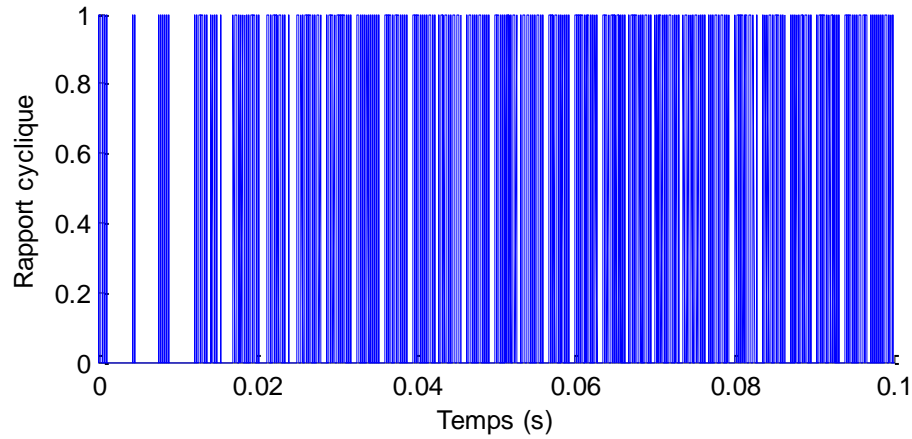


Figure II.22. Courant correspondant au contrôleur MPPT basé sur P&O



**Figure II.22.** Rapport cyclique correspondant au contrôleur MPPT basé sur P&O

Ces deux courbes montrent les valeurs de puissance et la tension maximale ( $P_{max}=60 \text{ w}$ ,  $V_{max}=17.5 \text{ v}$ ) produites par le panneau PV sous l'irradiation  $1000\text{W/m}^2$  et température  $25^\circ \text{ C}$ .

## 8. Conclusion :

Dans cette partie , nous avons appris à contrôler le système photovoltaïque PV et à suivre la valeur de puissance maximale de MPPT en utilisant la technologie P&O.

Dans partie suivant , nous allons découvrir la méthode Pattern Search .

## **Chapitre III**

# **L**a méthode de **Pattern Search**

## 1. Introduction

Dans ce chapitre, nous expliquerons la méthode de recherche de modèle et son principe de fonctionnement. Aussi, nous utiliserons également cette méthode comme technique PS.

## 2. Recherche de modèle généralisée (GPS) :

La recherche de modèle généralisée est une méthode de recherche directe qui optimise la fonction objectif sans en utilisant n'importe quel dérivé. Il a été introduit pour la première fois sous le nom de Pattern Search par Hooke et Jeeves en 1961 pour fonctions objectives discontinues et non différentiables. Plus tard, il a été développé par Torczon pour résoudre des problèmes non linéaires sans contrainte. Actuellement, cette technique est largement utilisée pour résoudre problèmes non linéaires en raison de sa précision, de sa convergence rapide et de sa nature libre de dérivées. Le principe de fonctionnement de base du GPS est divisé en deux phases, à savoir la phase de recherche et la phase d'interrogation. Dans la phase de recherche, il évalue la fonction objectif à un ensemble fini de points de maillage et trouve l'optimum Solution. Si la solution optimale est obtenue, l'une des meilleures valeurs de point actuelles est remplacée par la nouvelle meilleure valeur et le processus est répété jusqu'à ce que la solution optimale soit obtenue. Sinon, il se déplace pour interroger phase, où les points de maillage sont mis à jour avec de nouvelles valeurs, puis basés sur de nouveaux points de maillage, la fonction objective est évaluée [23].

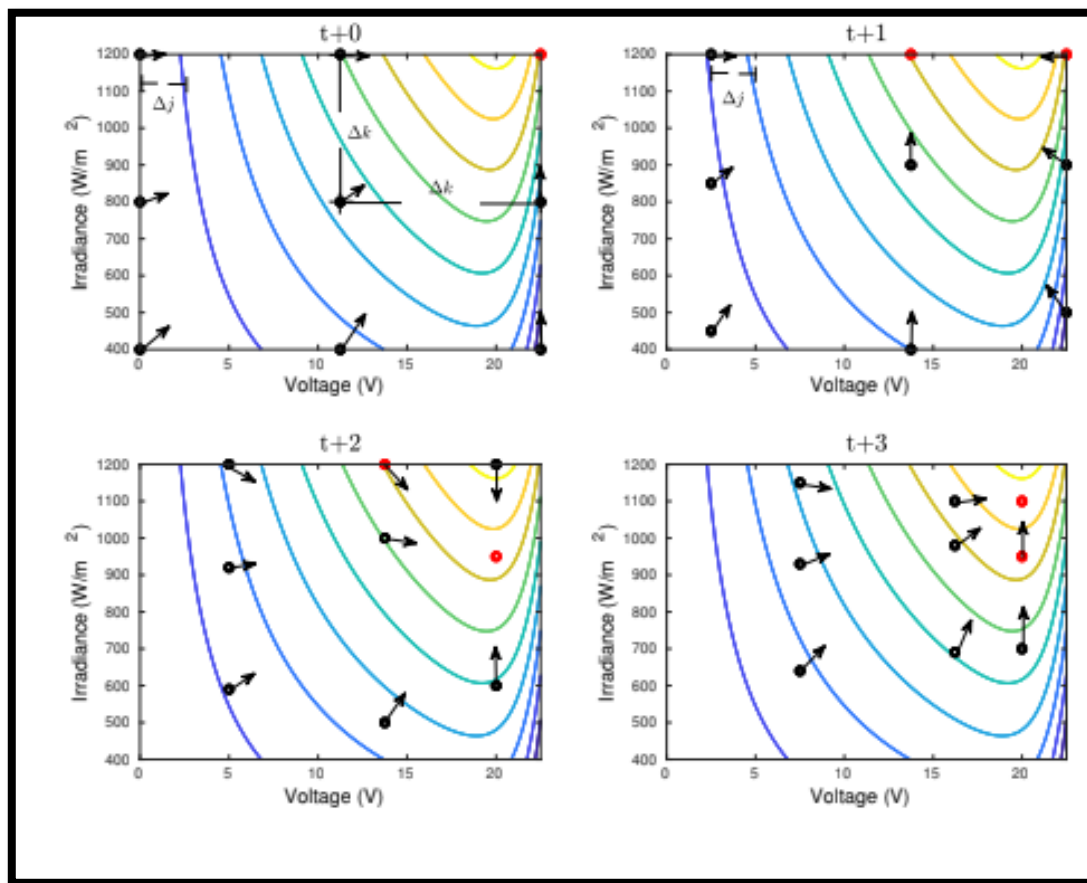
## 3. Méthode de recherche de modèle améliorée proposée (IPSM) basée sur PSM :

### 3.1. Méthode de recherche de modèle (PSM) :

Les algorithmes méta heuristiques sont utilisés dans l'optimisation des fonctions non linéaires grâce à la garantie de convergence vers l'optimum global quel que soit le nombre de maximums locaux que la fonction pourrait avoir. il est expliqué comment le . L'algorithme effectue une recherche exhaustive pour trouver l'extrême global, en assurant toujours la convergence Il sélectionne une zone de travail et projette des particules équidistantes  $\Delta_k$ , comme le montre la figure III.1. L'exploration des mouvements sont effectués en déterminant quel est le minimum ou le maximum local en fonction d'exigences de la fonction objective, laissant ce dernier comme un modèle. Une fois le motif déterminé toutes les autres particules doivent effectuer des sauts d'amplitude  $\Delta_j$  préalablement définis. Par conséquent, les particules se déplaceront vers la particule standard. Une fois ce mouvement effectué, un

mouvement exploratoire être menée à nouveau. Si l'une des particules de l'itération a un nouveau minimum ou maximum global mieux que le modèle précédent, cela deviendra le nouveau modèle, déterminant de nouvelles directions de d'autres particules.

Les applications PSM ont été appliquées à un système contraint Sur la figure III.2 , PSM a travaillé sur MPPT dans les panneaux photovoltaïques avec des conditions d'ombrage partiel, dans lequel un la recherche de modèle conduit à des résultats dans Matlab en la comparant avec d'autres algorithmes d'optimisation [24].



**Figure III.1.** coordination PSM (méthode de recherche de modèle) [24].

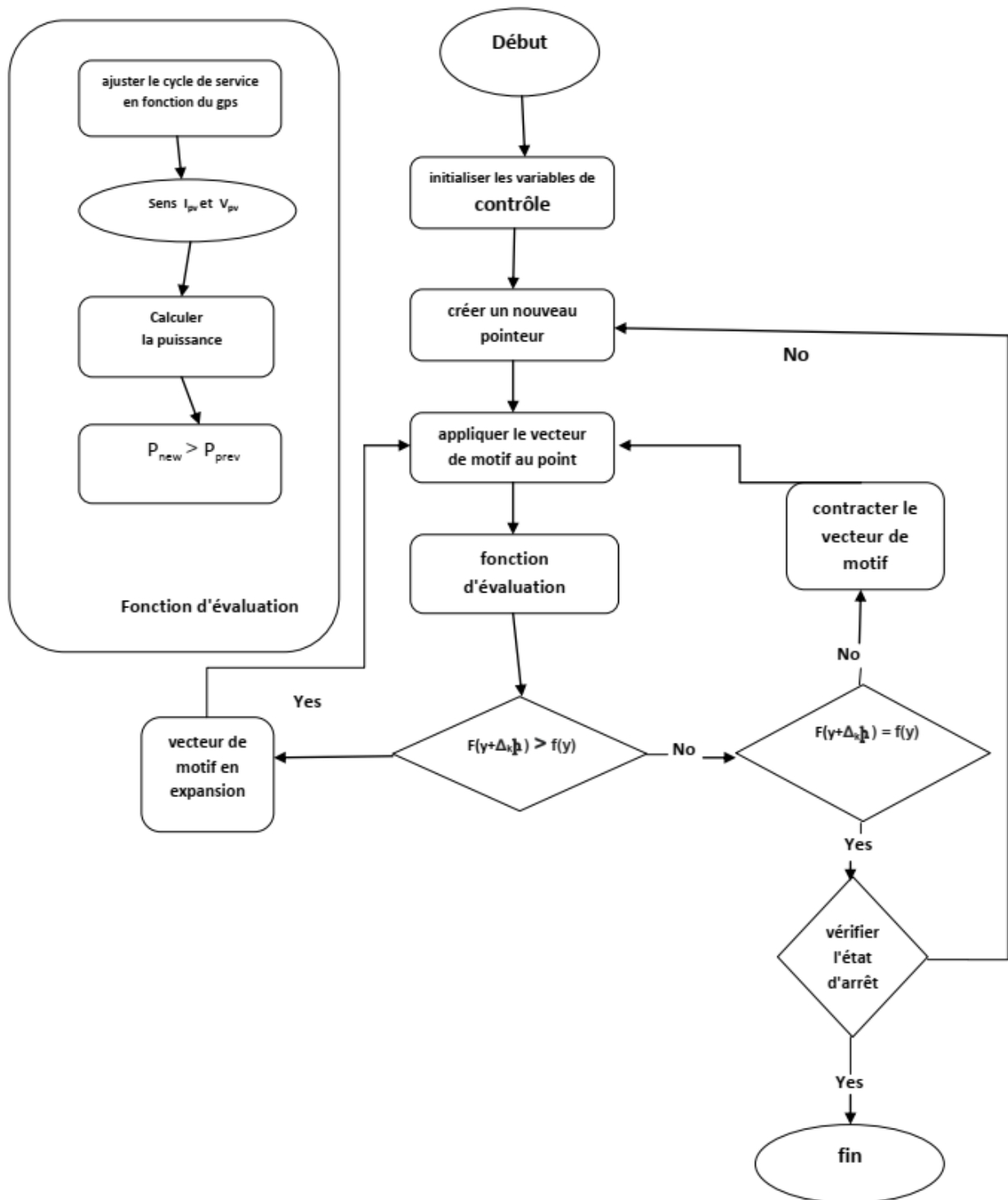
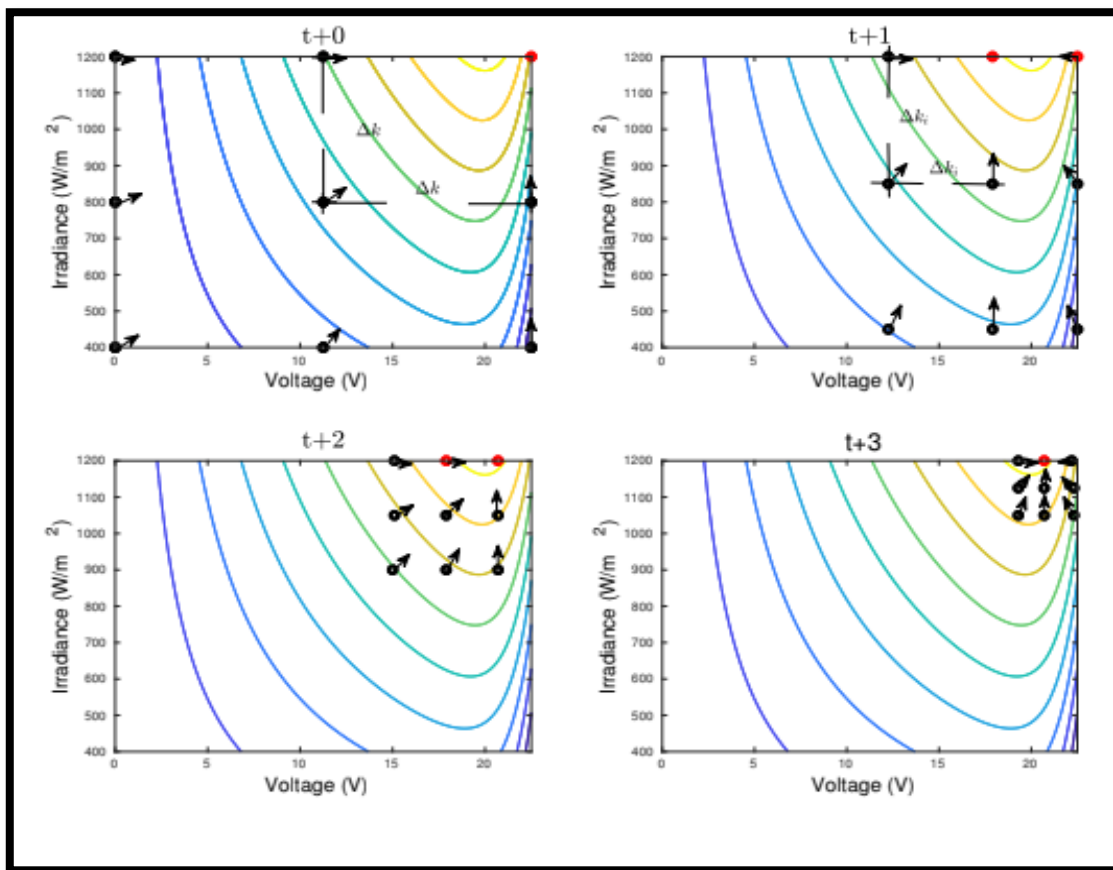


Figure III.2. algorithme PSM appliqué à l'ombrage partiel [23, 24].

### 3.2. Méthode proposée

L'algorithme IPSM est présenté dans cette sous-section. Il s'agit d'une variante du PSM présenté dans Section il hérite donc des propriétés du PSM. L'IPSM a la même philosophie que le PS où des particules équidistantes sont générées au début dans la zone de travail sélectionnée  $\delta k$ , comme illustré sur la figure III.3. Dans le  $(t + 0)$ , les mouvements

exploratoires sont conduits en déterminant le minimum ou maximum selon le besoin et ceci est marqué comme un modèle. A partir de ce motif, un nouveau maillage équidistant est généré, en prenant comme limites les particules les plus proches déjà évaluées. Un exemple est donné à la figure dans  $(t + 1)$ . À ce stade, le mouvement exploratoire est à nouveau exécuté et le processus est répété jusqu'à ce qu'il atteigne un critère d'arrêt préalablement déterminé lors d'une erreur ou d'un certain nombre d'itérations. Il est important de noter que pour le nombre de particules initiales, il est nécessaire de connaître au préalable le nombre de pics pouvant être générés pour établir la quantité minimale de particules à démarrer [23].



**Figure III.3.** coordination IPSM (méthode de recherche de modèle améliorée) [24].

Dans la figure III.4, il est possible d'observer comment cette restriction peut affecter certaines applications mais pour certaines approches, comme le MPPT d'un générateur photovoltaïque dans lequel le nombre de pics peut être connu car il est égal à la quantité de panneaux PV en série, l'amélioration de l'algorithme est idéale, en développant une réponse plus rapide et obtenant moins de pertes d'énergie comme indiqué plus loin [24].

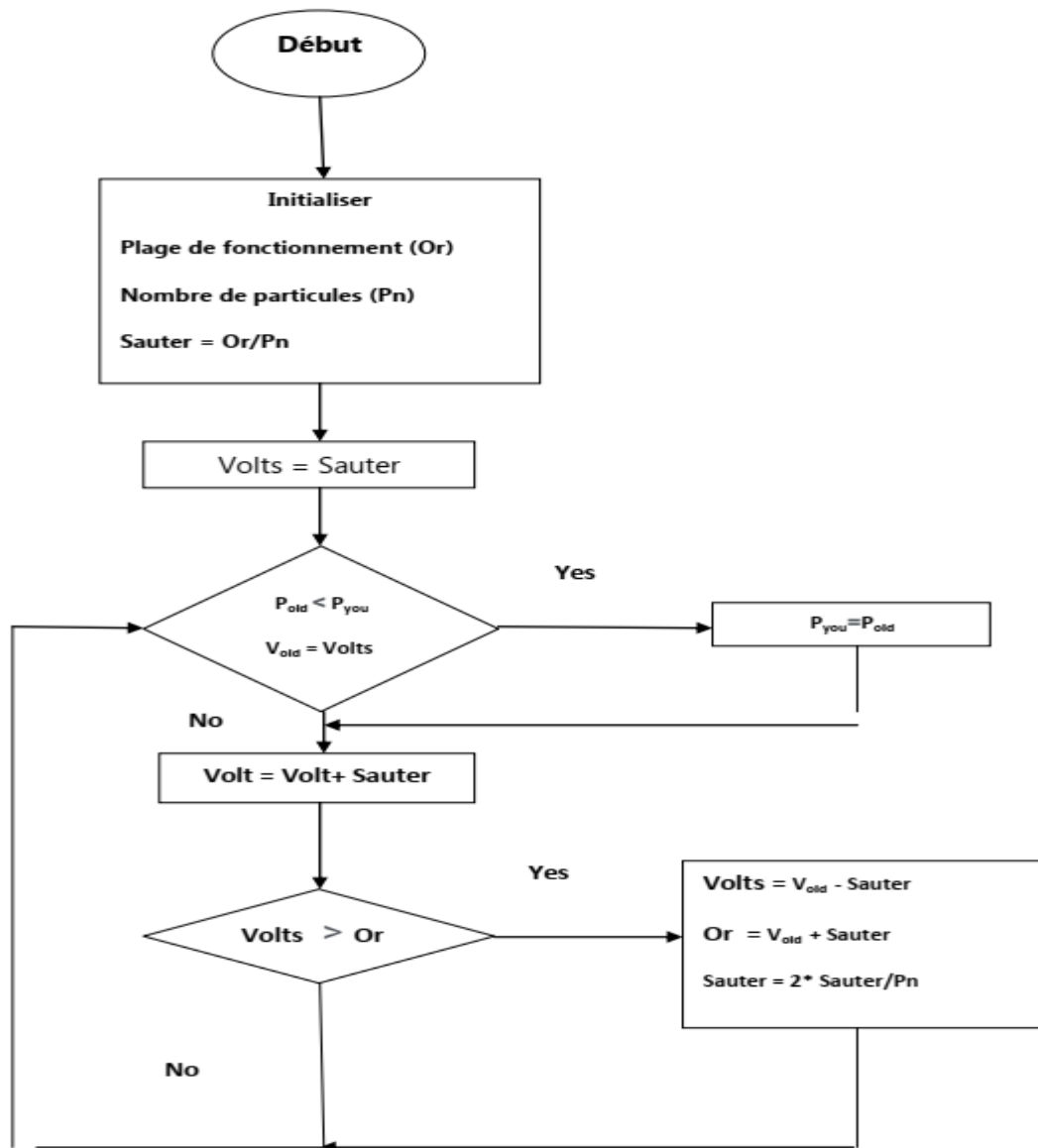


Figure III.4. Organigramme IPSM [24].

#### 4. Algorithme PS pour problème MPPT :

Les principales variables de contrôle de l'algorithme sont le courant ( $I_{pv}$ ) et la tension ( $V_{pv}$ ), qui sont mesurées par à l'aide de capteurs. Les valeurs instantanées de  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  sont utilisées comme entrées du microcontrôleur. le microcontrôleur est le principal bloc intégré dans tout le système utilisé pour implémenter le PS algorithme. La sortie contrôlée de l'algorithme est le rapport cyclique du convertisseur DC-DC qui est manipulé par l'algorithme pour forcer le convertisseur à fonctionner à GM. Eq. (III.1) décrit les équations de base pour les cycles de service nouveaux et précédents. Le pseudocode utilisé dans la mise en œuvre de cette technique est indiqué dans Tableau III.1 [23].

$$d_k^{i+1} = d_k^i - \Delta T \quad (\text{III.1})$$

$$T \geq \frac{(V_{sc} - V_{oc})}{m} \quad (\text{III.2})$$

$$Ev = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N ((f(d_k^i) - \text{avg}(f(d_k^i)))^2)}{N-1}} \quad (\text{III.3})$$

Représentent les valeurs de cycle de service actuelles et futures de  $d_k^i$  et  $d_{k+1}^i$  où l'itération  $i$ . La valeur du rapport cyclique est modulée entre 0 et 1. et sa valeur dépend de trois coefficients:  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  Est la taille de pas  $\Delta_k^i > 0$

$\alpha$  est le coefficient de réflexion et sa valeur est normalement égale à 1,  $\gamma$  est la variable de contraction et sa valeur varie de 0 à 1 et  $\beta$  est le coefficient de dilatation dont la valeur est supérieure à 1. est le taux de convergence et il est constant. La valeur de peut être calculée à l'aide de l'éq (III.2), où  $m$  est ajusté en fonction du taux de convergence. Dans ce cas, la valeur de  $m$  est choisie égale à 64. Cependant, lorsque  $m$  est grand la précision du système est augmentée et vice versa. Mais cela augmente la complexité et réduit vitesse de traitement. C'est donc un compromis entre complexité et précision. La convergence est atteinte lorsque la valeur de fitness globale est inférieure au seuil comme indiqué par éq.(III.3) [23].

En premier lieu, l'algorithme PS sélectionne au hasard un ensemble de points de maillage finis pour le cycle de service. Le générateur PV est fonctionnant à ces valeurs de rapport cyclique et les valeurs de  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  sont mesurées. Enfin, la forme physique de chacun L'élément est évalué en calculant la puissance. Initialement, le système échantillonne le courant et la tension pour une nombre de cycles de service. Après cela, il ne change que la pire solution avec la nouvelle solution. Pour ça but, il calcule les meilleures et les pires valeurs de puissance et remplace la pire puissance par une nouvelle puissance en appliquant un nouveau cycle de service. Le nouveau cycle de service est calculé à l'aide de l'éq (III.1). Le processus se répète jusqu'à ce que la valeur d'écart type global de la fonction devienne inférieure à la valeur seuil. Normalement, le la valeur de seuil est sélectionnée proche de zéro. Cependant, dans des conditions d'ombrage partiel, la courbe P-V présente plusieurs maxima locaux et un seul maximum global. Par conséquent, lorsque l'algorithme PS trouve le local maxima, il le comparera aux meilleures valeurs globales obtenues. En conséquence, il y a une chance mineure que cela algorithme coincé dans LM.

la technique PS MPPT basée proposée pour le système PV. Premièrement, il initialise les variables de contrôle telles que le taux de convergence ( $\Gamma$ ), la contraction ( $\gamma$ ), l'expansion ( $\beta$ ) et la réflexion ( $\alpha$ ). Ensuite, détectez le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert de l'ensemble du générateur PV et calculez taux de convergence. Ensuite, il générera un ensemble aléatoire de points dans l'espace de recherche. Après cela, le cycle de service est ajusté en fonction du point de maillage. Ensuite, il détecte les courants, les tensions pour chaque cycle de service point pour calculer la puissance. Enfin, la valeur de fitness de chaque point de maillage est évaluée. Basé sur évaluation, la contraction ou l'expansion du vecteur de motif est effectuée. Cependant, si le système diverge, le nouveau des points de maillage seront générés sinon le système converge (lorsque le GM est détecté). Ce processus redémarre quand il y a un changement rapide dans l'environnement se produit [23] .

```

Initialization
1:  $\beta=2, \gamma=0.5, th=0.2$ 
2: Sense voltage and current and calculate  $\Gamma>0$ : initial step size
3:  $E_{f_{tol}}>0$  tolerance
4: While  $E_v > E_{f_{tol}}$  do
5:    $d =$  initial guess
6:   While  $k=0,1,\dots,n$  do
7:     evaluate  $f(d)$ 
8:     find  $d_{worst}$  and calculate  $f(d_{worst})$ 
9:      $j =$  index of  $y_{worst}$ 
10:    if  $(f(d + \Delta_k \Gamma) > f(d_{worst}))$ 
11:       $d_j = d_j + \Delta_k \Gamma$ 
12:       $\Delta_{k+1} = \gamma \Delta_k$ 
13:    elseif  $(f(d_j) - \Delta_k \Gamma) > f(d_{worst})$ 
14:       $d_j = d_j - \Delta_k \Gamma$ 
15:       $\Delta_{k+1} = \beta \Delta_k$ 
16:    else
17:       $\Delta_{k+1} = \Delta_k$ 
18:       $d_{j+1} = d_j + \Delta_k \Gamma$ 
19:    end if
20:     $k = k + 1$ ;
21:    if  $(\Delta_k < Th)$ 
22:      break
23:    end if
24:  end while
25:  Calculate  $E_v$  by using equation (16)
26: end while

```

**Tableau III.1.** Pseudocode de la technique PS [23].

## 5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons appris la méthode de recherche de modèle et nous avons mis en évidence comment l'utiliser, dans le chapitre suivant , nous appliquerons cette méthode à l'environnement Matlab Simulink.

## **Chapitre IV**

# **O**ptimisation de la commande MPPT par **P&O-PS**

## 1. Introduction :

Afin d'extraire la puissance maximale du système PV, la technologie de suivi du point de puissance maximale (MPPT) a toujours été appliquée dans le système PV. À l'heure actuelle, diverses méthodes de contrôle MPPT ont été présentées. Les méthodes de perturbation et d'observation (P&O) et d'incrément de la conductance sont les plus populaires et les plus largement utilisées sous l'irradiance constante. Cependant, ces méthodes présentent des fluctuations entre le point de puissance maximale (MPP). De plus, les changements des paramètres environnementaux, tels que la couverture nuageuse, l'abri végétal et le bloc de construction, entraîneront le changement de rayonnement et auront alors un effet direct sur l'emplacement du MPP. Dans cet article, une méthode MPPT réalisable est proposée pour s'adapter à la variation de l'irradiance. Ce chapitre applique la recherche de modèle hybride (PS) et l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O-PS) pour déterminer la valeur optimale d'une tension de référence dans le système PV. Les performances de l'algorithme P&O-PS proposé sont évaluées en le comparant à la méthode P&O conventionnelle en termes de vitesse de suivi et de précision en utilisant MATLAB / SIMULINK. Les résultats de la simulation démontrent que la capacité de suivi de l'algorithme P&O-PS est supérieure à celle de l'algorithme P&O traditionnel, en particulier dans des conditions de faible rayonnement et de mutation soudaine.

## 2. Algorithme P&O-PS :

Les principales variables de contrôle de l'algorithme sont le courant ( $I_{pv}$ ) et la tension ( $V_{pv}$ ), qui sont mesurées à l'aide de capteurs. Les valeurs instantanées de  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  sont utilisées comme entrées du microcontrôleur. Le microcontrôleur est le principal bloc intégré dans tout le système qui est utilisé pour implémenter l'algorithme P&O-PS. La sortie commandée de l'algorithme est le cycle de service du convertisseur DC-DC qui est manipulé par l'algorithme pour forcer le convertisseur à fonctionner représente les équations de base pour les nouveaux et précédents cycles de fonctionnement. Le pseudo code utilisé dans la mise en œuvre de cette technique est indiqué dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1.** Pseudo code de l'algorithme MPPT P&O-PS

```

Initialize duty cycle,  $D=D(k-1)$ 
Initialize voltage and current,  $V(k-1)$  and  $I(k-1)$ 
Calculate initial power,  $P(k-1)$ 
while (true)
    if ( time  $\geq$  the sampling period)
        Measure voltage and current,  $V(k)$  and  $I(k)$ 

```

```

Calculate power, P(k)
if (P(k) > P(k-1))
    if (V(k) > V(k-1))
        Decrease Duty by mesh(k)
        Decrease mesh (k+1)
    else
        Increase Duty by mesh(k)
        Increase mesh (k+1)
    end if
else
    if (V(k) > V(k-1))
        Increase Duty by mesh(k)
        Increase mesh (k+1)
    else
        Decrease Duty by mesh(k)
        Decrease mesh (k+1)
    end if
end if
Update the previous voltage and power,
V(k-1) = V(k) and P(k-1)=P(k)
if (mesh (k+1)> meshmax)
    mesh (k+1)= rand× meshmax
end if
if (mesh (k+1)< meshmin)
    mesh (k+1)= rand× meshmin
end if
end if
end while

```

La figure IV.1. illustre l'organigramme de la technique P&O-PS proposée pour le système PV. Premièrement, il initialise les variables de contrôle telles que le maillage de convergence. Ensuite, détectez le courant  $I(k)$  et la tension  $V(k)$  du générateur photovoltaïque et calculez la puissance,  $P(k)$ . Ensuite, il générera un ensemble aléatoire de points dans l'espace de recherche. Après cela, le cycle de service est ajusté en fonction du point de maillage. Ensuite, il détecte les courants, les tensions pour chaque point de cycle de service pour calculer la puissance. Enfin, la valeur de fitness de chaque point de maillage est évaluée. Sur la base de l'évaluation de la technique P&O, la contraction ou l'expansion du vecteur de motif est effectuée. Cependant, si le système diverge, de nouveaux points de

maillage seront générés autrement le système. Ce processus redémarre lorsqu'un changement rapide de l'environnement se produit.

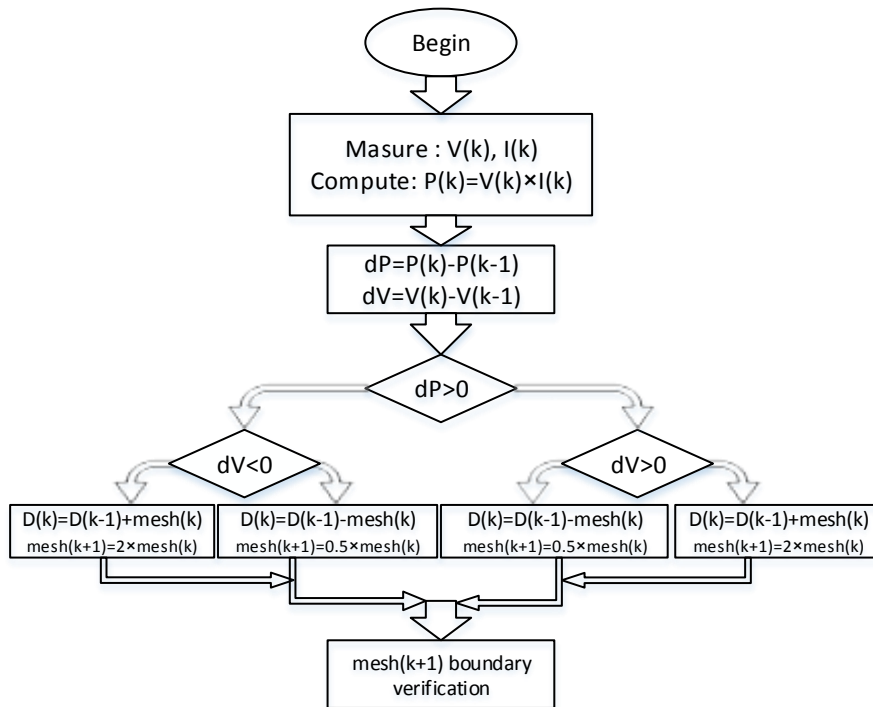


Figure IV.1. Organigramme de l’algorithme P&O-PS

Dans ce chapitre, l'algorithme P&O-PS est adopté pour optimiser la tension de référence du système PV (Cycle de service de référence) sous des radiances invariantes et variantes. Le convertisseur élévateur ajuste le cycle de service du commutateur en fonction de la tension de référence. Enfin, la puissance de sortie du système PV est contrôlée. Le résultat de la simulation de l'algorithme P & O-PS est comparé à celui de l'algorithme P&O traditionnel sous l'irradiance constante. Le schéma de structure du système est présenté à la figure IV.2.

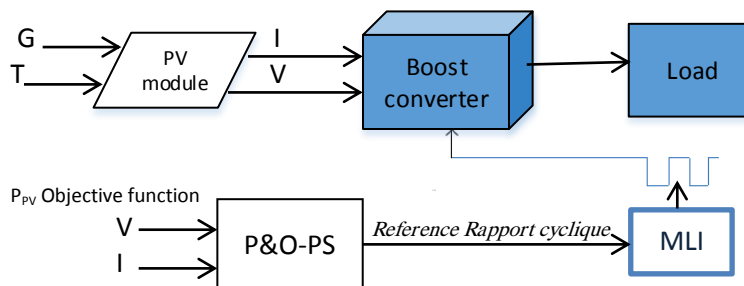


Figure IV.2. Schéma typique de MPPT utilisant P&O-PS

3. Résultats de simulation et discussions :

3.1. Configuration de la Simulation :

La figure IV.3. présente l'architecture de système PV largement utilisée dans laquelle les techniques MPPT sont mises en œuvre. L'ensemble de l'installation est conçu en utilisant le modèle PV proposé par [\*\*]. Le générateur photovoltaïque se compose de quatre modules, qui sont connectés en série. Les spécifications du module PV sont:  $P_{mpp} = 853.14W$ ,  $V_{mp} = 15.1V$ ,  $V_{oc} = 18.17V$ ,  $I_{mp} = 56.5A$ ,  $I_{sc} = 62.2 A$ . Le générateur photovoltaïque est soumis à de nombreuses conditions de motifs d'ombrage partiel et aux performances du P&O proposé - PS basés sur MPPT, PS et P&O sont évalués. Le convertisseur Boost est utilisé entre le générateur photovoltaïque et la charge de la batterie. Les valeurs des composants du convertisseur DC-DC sont calculées en utilisant le travail présenté dans [\*\*], qui sont:  $C_{in} = 0,0022F$ ,  $L = 0,018H$ ,  $C_{out} = 0,0022F$  et  $F_{sw} = 20 kHz$ . Les algorithmes MPPT sont implémentés dans un bloc intégré comme illustré sur la figure IV-3. Ce bloc prend  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  comme entrées, tandis qu'il calcule le cycle de service du convertisseur élévateur en tant que sortie.

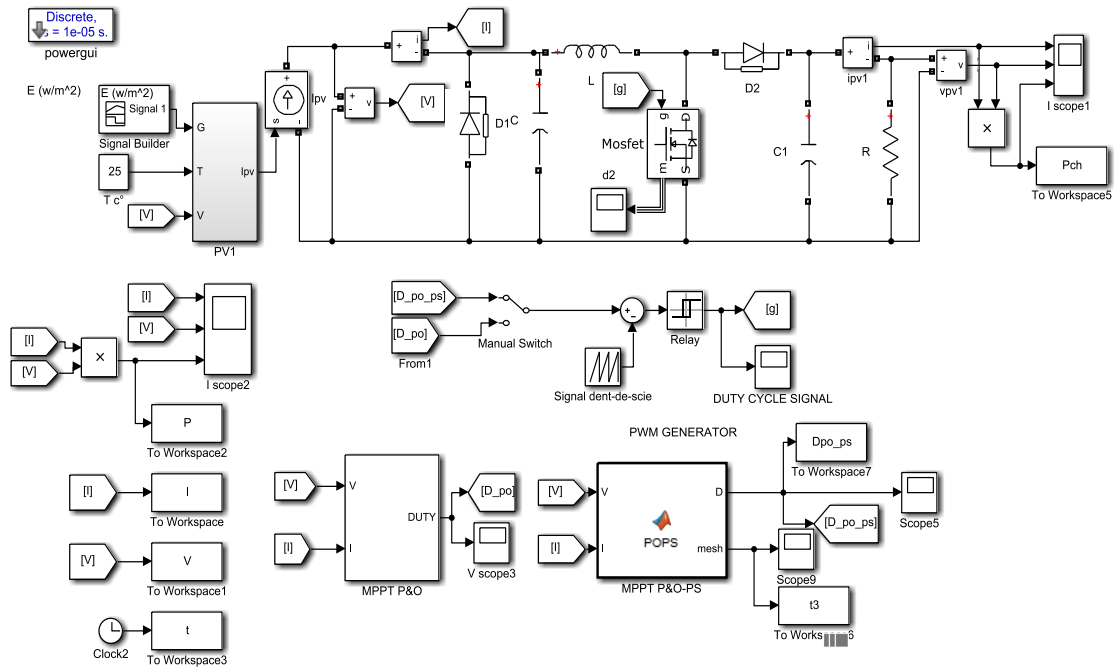


Figure IV.3. Schéma fonctionnel détaillé du système PV avec MPPT P&O-PS dans environnement MATLAB – Simulink

### 3.2. Résultats et Discussion :

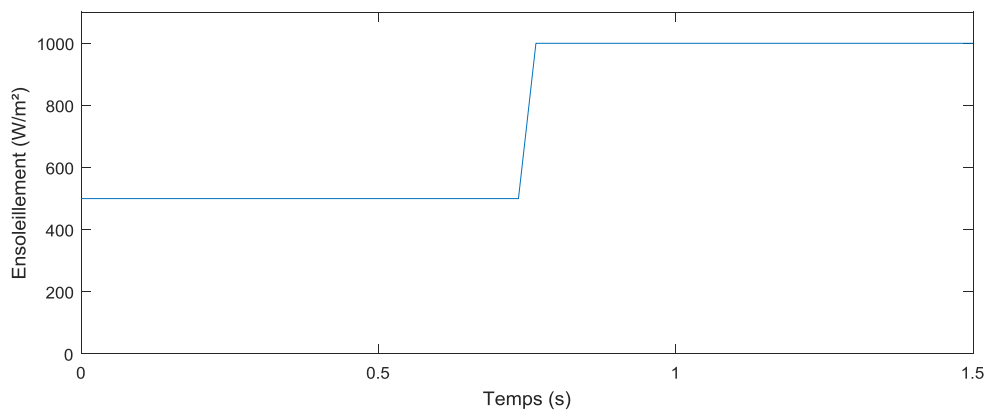
L'algorithme P & O-PS proposé et la méthode P&O conventionnelle sont simulés à l'aide de MATLAB / SIMULINK. La température du module PV est considérée comme inchangée à 25 ° C pendant la simulation. La figure IV.11 présente la simulation de l'approche P&O-PS pour le système PV considéré. La modulation de largeur d'impulsion (PWM) est une technique permettant de créer des impulsions de commande pour les commutateurs. PWM est exécuté dans SIMULINK, comme indiqué dans le chapitre précédent.

Le schéma proposé est simulé sous deux conditions:

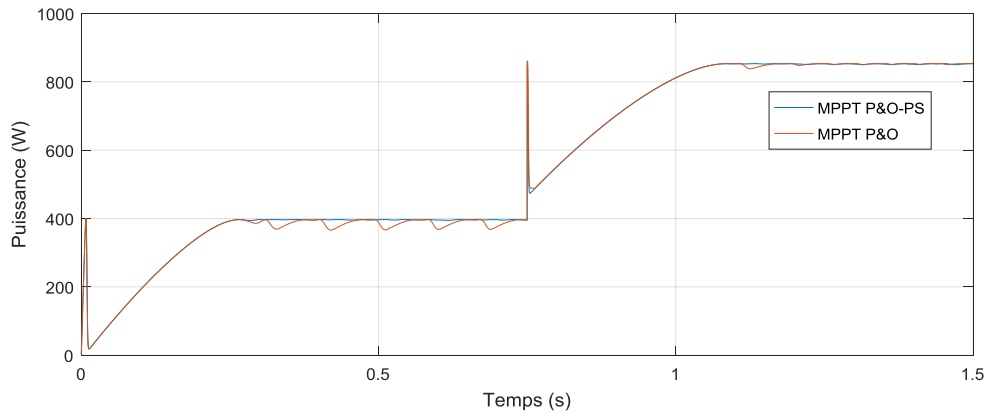
rayonnement constant (y compris un rayonnement élevé et faible) et un rayonnement variable (mutation de l'irradiance).

#### ➤ Etude comparative :

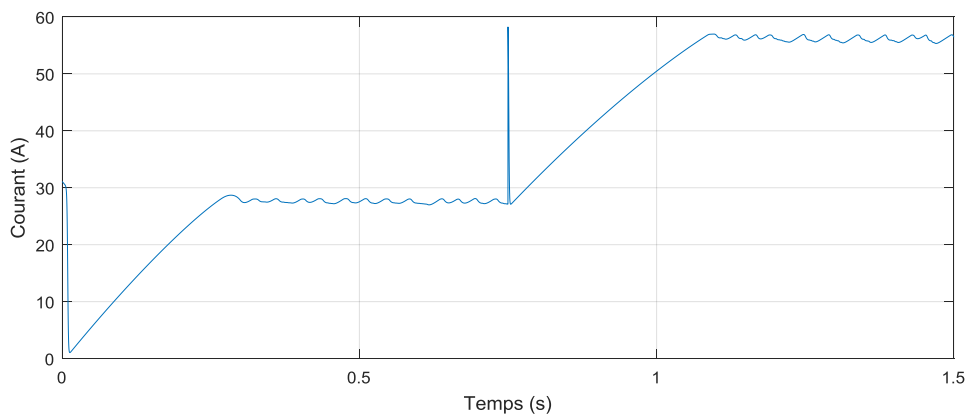
La figure IV.5. compare les performances du contrôleur proposée avec celles d'un contrôleur conventionnel. On constate que le contrôleur P&O-PS atteint le point de puissance maximale avec un temps minimal, ce qui permet en pratique d'obtenir un gain en puissance considérable.



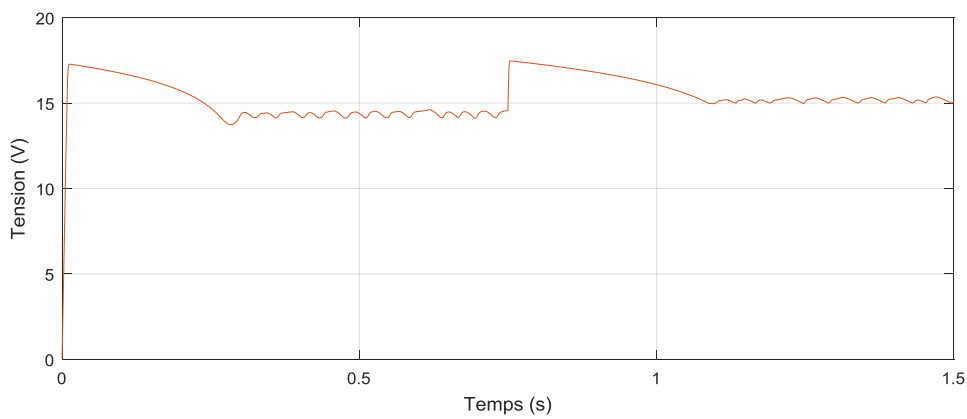
**Figure IV.4.** Variation de l'ensoleillement en fonction du temps



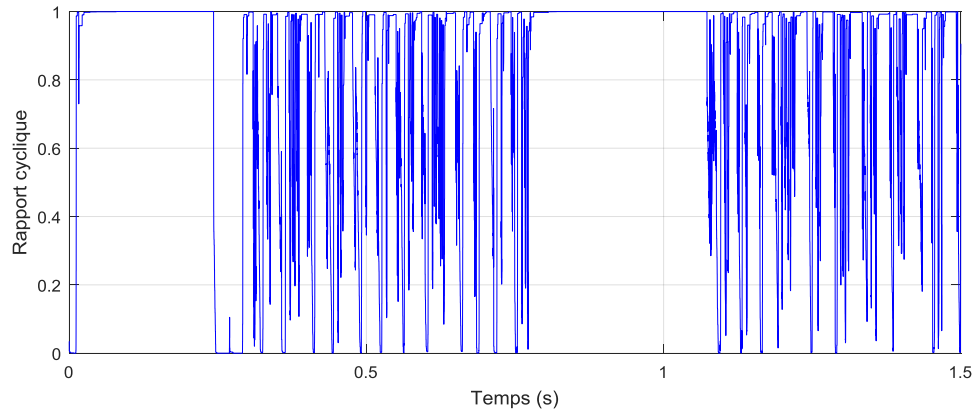
**Figure IV.5.** Variation de la puissance avec changement de l'ensoleillement en fonction du temps



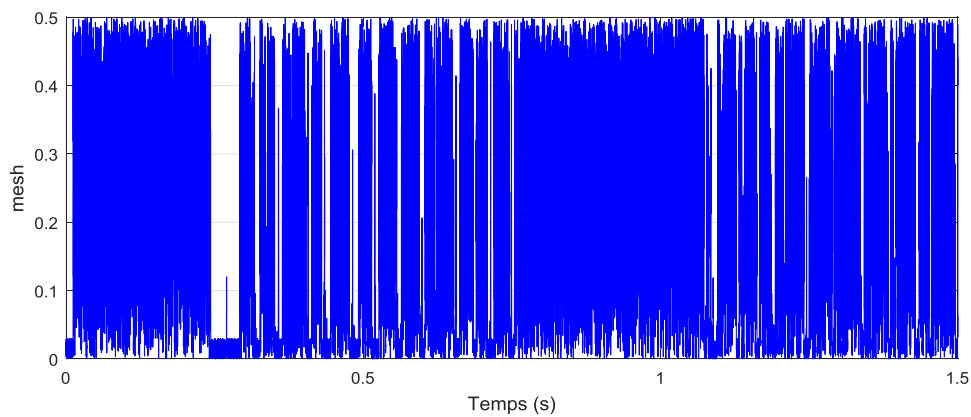
**Figure IV.6.** Courant correspondant au MPPT P&O-PS algorithme



**Figure IV.7.** Tension correspondante au MPPT P&O-PS algorithme



**Figure IV.8.** Rapport cyclique correspondant au MPPT P&O-PS algorithm

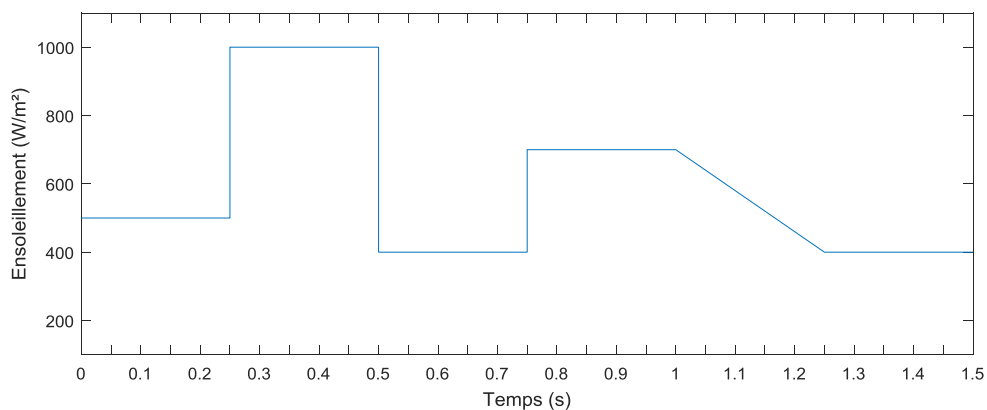


**Figure IV.9.** Mesh cyclique correspondant au MPPT P&O-PS algorithm

#### ➤ Test de robustesses

Pour faire une étude de robustesse des deux contrôleurs vis-à-vis des différentes conditions environnementales, nous avons effectué les tests suivants :

- D'abord on maintient une température constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) et on varie l'éclairement comme indiqué par la figure IV.10.



**Figure IV.10.** Variation de l'ensoleillement en fonction du temps

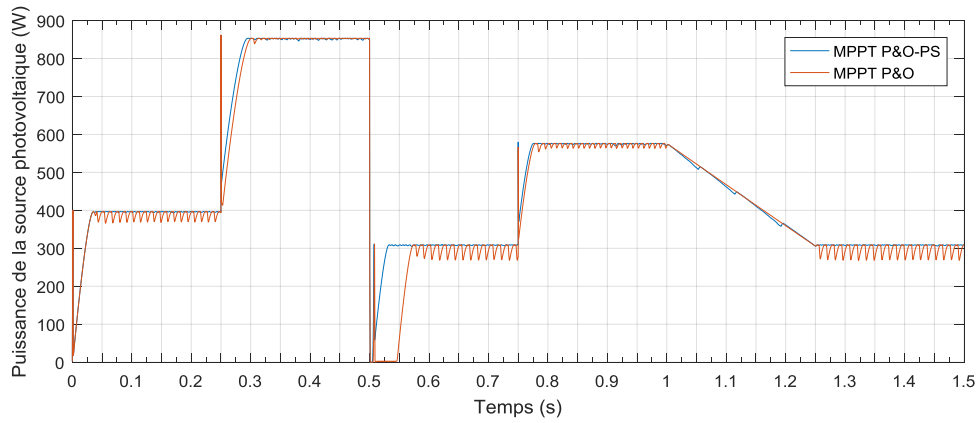


Figure IV.11. Puissance délivrée par la source PV et l'algorithme MPPT (P&O et P&O-PS)

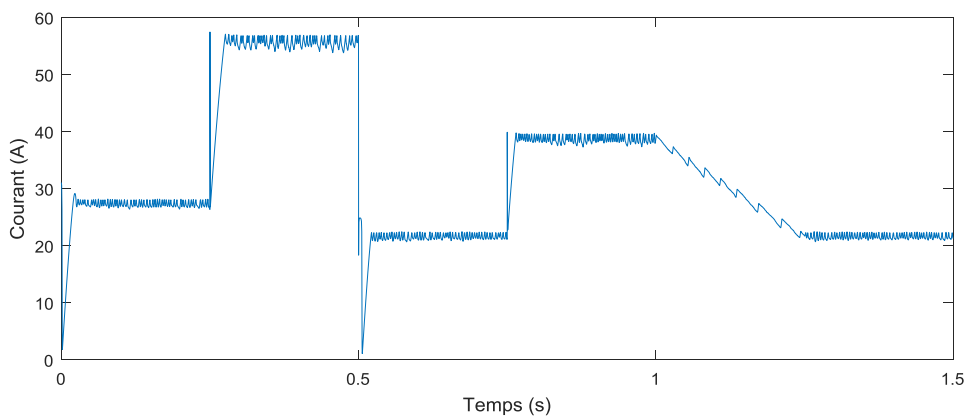


Figure IV.12. Courant correspondant au MPPT P&O-PS avec changement de l'ensoleillement

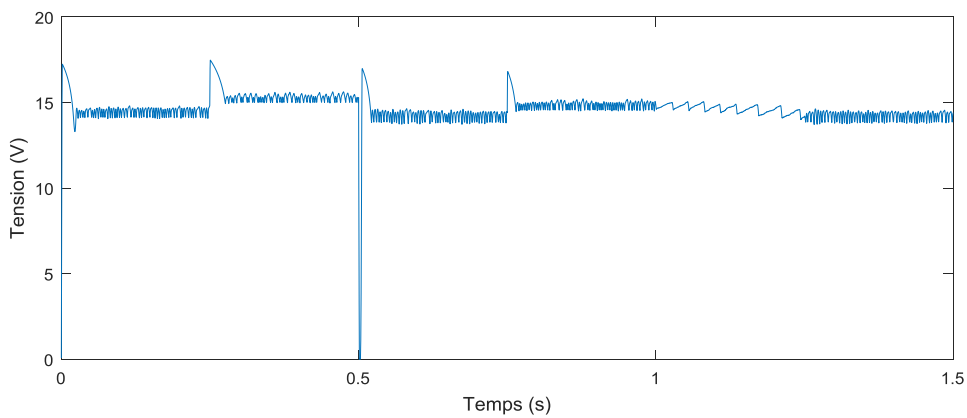


Figure IV.13. Tension correspondante au MPPT P&O-PS avec changement de l'ensoleillement

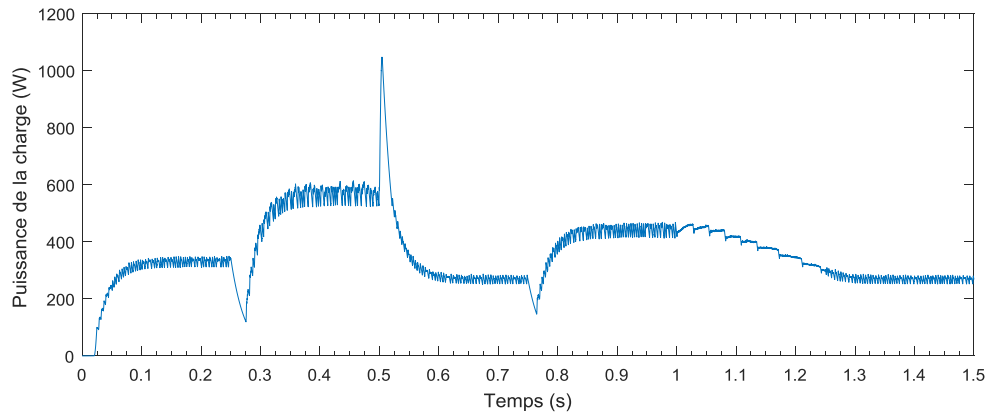


Figure IV.14. Puissance de la charge au MPPT P&O-PS

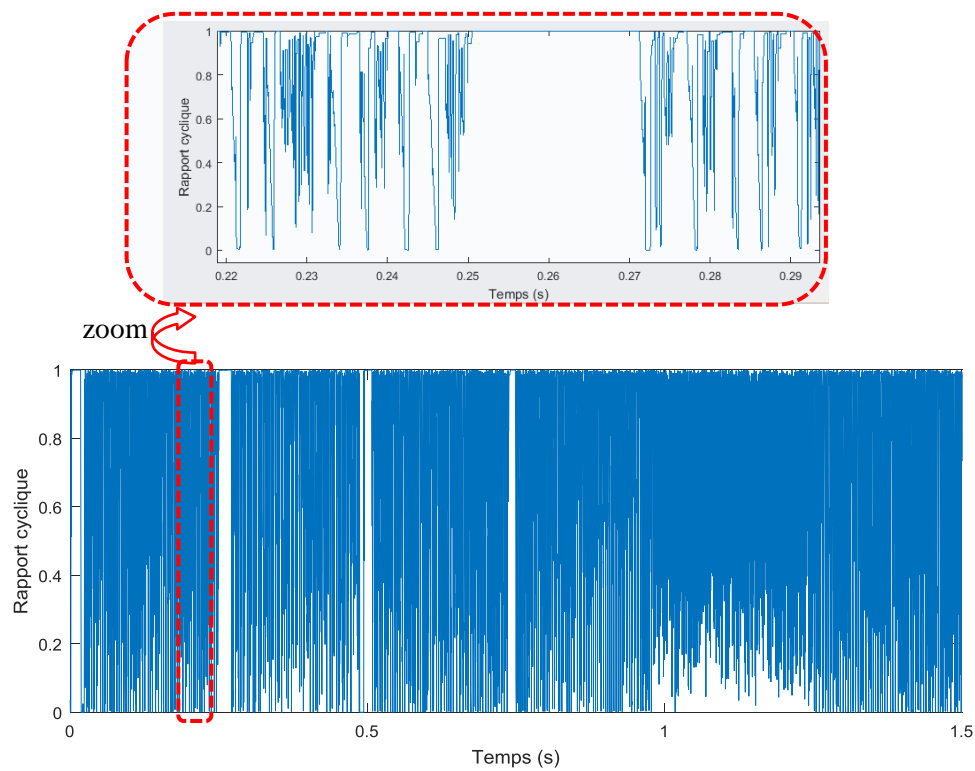
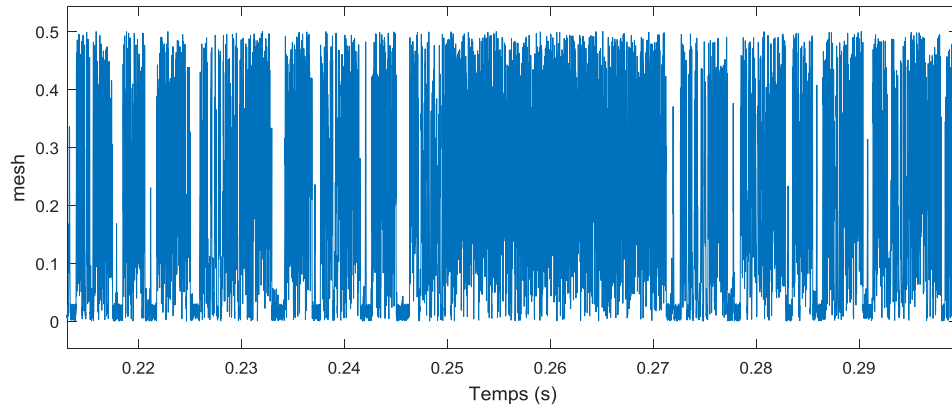


Figure IV.15. Rapport cyclique correspondant au MPPT P&O-PS avec changement de l'ensoleillement



**Figure IV.16 .** Evolution le pas mesh de l'algorithme P&O-PS pendant le test MPPT

Les résultats obtenus lors de ces tests montrent que le contrôleur flou optimisé suit la consigne avec de très faibles fluctuations tandis que le contrôleur flou perd un peu de temps avant d'atteindre le point de puissance maximale.

#### 4. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté la méthode d'optimisation d'une commande MPPT P&O-PS pour maximiser la puissance du générateur photovoltaïque. Les résultats de simulations obtenus ont permis de vérifier l'efficacité de P&O-PS dans la recherche et l'optimisation des puissance extrait du générateur photovoltaïque.

Les tests de robustesse vis-à-vis les variations climatique de l'ensoleillement ont montré que l'algorithme P&O-PS présente des performances plus intéressantes que celles d'un basé sur P&O

## CONCLUSION GENERAL

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi le générateur photovoltaïque et leurs performances.

On a étudié, dans un deuxième temps, 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 a décrit le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. On a présenté la méthode MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme la méthode de perturbation et observation. Cette dernière est utilisée dans ce travail à cause de sa simplicité, et son exigence seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque.

On a étudié, dans un troisième temps, la méthode de recherche de modèle Pattern Search (PS) et comment l'utiliser.

Finalement, dans un quatrième temps, on a étudié la modélisation du système photovoltaïque en utilisant la méthode de recherche de modèle hybride P&O-PS extrait les résultats améliorés et les avons discutés.

# Liste des références

[1] : HAFIAN Hicham , " Etude et conception d'un émulateur d'énergie solaire piloté par dSPACE1103 " , Mémoire de MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, Université de Batna, 14 /12 /2013.

[2] : Hanine Mounir et Kebir Allel , " Etude et simulation d'un étage MPPT pour un générateur photovoltaïque à base d'un kit Arduino " , Mémoire de MASTER EN ELECTROTECHNIQUE, UNIVERSITE d'ADRAR, 25 Mai 2017.

[3] : KHELIFI ABD ERRAHMANE, " CONVERSION THERMIQUE DE L'ENERGIE SOLAIRE ET APPLICATION POUR LA PRODUCTION D'EAU CHAUDE SANITAIRE (ECS) " , Mémoire de MASTER , UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2014/2015.

[4] : F. Harouadi , B. Mahmah , M. Belhamel , S. Chader , A. M'Raoui et C. Etievant , " Les potentialités d'exploitation d'hydrogène solaire en Algérie dans un cadre euro – maghrébin Partie I: Phase d'étude d'opportunité et de faisabilité " , Revue des Energies Renouvelables , Vol. 10 , no.N°2 , p.181 – 190 , 2007.

[5] : Claude ETIEVANT, Stève LECHEVALIER, Maïouf BELHAMEL, Bouziane MAHMAH, Samira CHADER, Abdelhamid M'RAOUI et Farid HAROUADI, " PROJET MAGHREB – EUROPE : PRODUCTION D'HYDROGENE SOLAIRE PHASE I : ETUDE D'OPPORTUNITE ET DE FAISABILITE DU PROJET", 2IWH 2007 , Ghardaïa – Algeria, 27-29 October 2007.

[6] : Mounir BENAHCENE, " Stratégies d'influence et réception d'une politique publique d'équipement solaire en Algérie " , THÈSE DE DOCTORAT , ÉCOLE DOCTORALE ABBE-GREGOIRE ,17 décembre 2018.

[7] : BOUGUERRA NOUR ELHOUDA, " Etude estimative de la production d'électricité solaire en utilisant des cellules photovoltaïques à base des semi-conducteurs " , Mémoire de MASTER, Université de M'sila, 24/06/2013

[8] : SALMI MOHAMED, " Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques " , THÈSE de DOCTORAT EN SCIENCES, Université Ferhat Abbas de SÉTIF, 27/06/2012.

[9] : BENADEL Faiza, " Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV " , Mémoire DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2015 – 2016.

**[10]** : David RÉAUX , " Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-Si :H/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface ", THÈSE DE DOCTORAT, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY, 30 juin 2017.

**[11]** : YAAKOUB BENYAHIA, " Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT ", Mémoire de master en Génie Electrique , UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI, 22/06/2013.

**[12]** : Yassine LASMI, " Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes ", Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Sétif -1 (ALGERIE), 09 /12 /2013.

**[13]** : BEN CHEIKH Othman et BITEUR Youcef, " Étude et réalisation d'un système de poursuite du point de puissance maximale en utilisant les réseaux de neurones artificiels - Application au système photovoltaïque -", Mémoire de MASTER , UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 24/06/2018.

**[14]** : BRAKNI Abdelmalek Et BOUGUERRA Lazhar, " Etude expérimentale d'un convertisseur DC/DC (Boost) utilisé dans les systèmes photovoltaïques à base d'une carte Arduino ", Mémoire de MASTER EN AUTOMATIQUE ET SYSTEMES, UNIVERSITE LARBI TEBESSI – TEBESSA, 2017 / 2018.

**[15]** : [https://www.univ-saida.dz/butec/doc\\_num.php?explnum\\_id=661](https://www.univ-saida.dz/butec/doc_num.php?explnum_id=661).

**[16]** : Bendjamâa Ibrahim, " Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque ", Mémoire de Magister, UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID – TLEMCEN-, 2011-2012.

**[17]** : BOUCHAKER Amir Abderaouf et BENBRINIS Mouad, " Structure et Commande d'une installation photovoltaïque en site isolé ", MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA, Juin 2018.

**[18]** : Mr ANAS EL ATMI, " Conception et réalisation d'un régulateur solaire sous Labview à base de microcontrôleur " , Mémoire de Master ,Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, 17 Juin 2014.

**[19]** : BENTAYEB MERYEM, " Etude de la commande MPPT à incrémentation de la conductance appliquée aux panneaux solaire", Mémoire de Master ,Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2015 / 2016.

[20]: Ressa.Noureddine , Merabet Leila et OmeiriAmar , " Perturb and Observation MPPT algorithm for the performance of Solar Photovoltaic System ", Electrotechnical Engineering Department, Electrotechnical Laboratory, Badji Mokhtar University 23000 Annaba, P.O , Box 12, Algeria.

[21]: [http://www.plaisance-pratique.com/IMG/pdf/Panneaux\\_solaires.pdf](http://www.plaisance-pratique.com/IMG/pdf/Panneaux_solaires.pdf)

[22] : Salim ABOUDA, " CONTRIBUTION A LA COMMANDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES: APPLICATION AUX SYSTEMES DE POMPAGE", THESE présentée à L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax ,Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, 14 avril 2015.

[23] : M.Yaqoob Javed ,Ali Faisal Murtaza ,Qiang Ling, Shahid Qamar et M.Majid Gulzar, " A Novel MPPT design using Generalized Pattern Search for Partial Shading ", Energy and Buildings, ENB 7043, 2016.

[24] : Andrés Tobón , Julián Peláez-Restrepo , Jhon Montano , Mariana Durango , Jorge Herrera and Asier Ibeas , " MPPT of a Photovoltaic Panels Array with Partial Shading Using the IPSM with Implementation Both in Simulation as in Hardware ", energies 2020,13,815.