

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique



Mémoire  
MASTER ACADEMIQUE  
Domaine : Sciences et technologies  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Machines électriques

Présenté par :

ZEGHIDI Abir

HABBI Messaoud

Thème :

**Commande R -S -T numérique d'un système  
photovoltaïque dans des conditions  
d'ombrage partiel**

Soutenu publiquement le 14/06/2023

Devant le jury composé de :

M <sup>me</sup> BOUALI Khadija	MCA	Présidente	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> BOUREK Yacine	MCA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> TAIBI Djamel	MAA	Co-encadreur	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> SAHRAOUI Lazhar	MAA	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2022 /2023







## Remerciement


Tout d'abord, nous remercions Dieu tout puissant pour la santé, la volonté et la patience qu'il nous a donnés tout le long de nos années d'études. Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreur Mr. Yacine BOUREK pour ses conseils et ses orientations prudentes. Nous remercions notre co-encadreur Mr. Djamel TAIBI pour son aide essentiel et important pour accomplir ce travail. Nos vifs remerciements s'adressent aux membres de jury de notre travail pour l'évaluation de notre travail à travers le manuscrit de notre mémoire de fin d'étude.

Nous présentons aussi nos plus sincères remerciements à tous les enseignants du département de génie électrique pour la formation qu'ils nous a donnés durant les années d'études. Nous adressons nos remerciements particuliers aux étudiants de la deuxième année master en génie électrique en particulier ceux de la spécialité machines électriques. Je remercie chaleureusement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour finir ce travail.





## الإهداء


أنا مدين لك بكل شيء    
بالنسبة لأمي الغالية  فإن نهر الحب الذي يمر عبر روحي علمني حب الله وحب الناس أشكرك على إرهابك يا صديقتي وسندي  
وإلى والدي العزيز  ، نسيم الحكيم، علمتني حياتي كلها أن أعيش هدفاً نبيلاً وأن أعمل بجد من أجله وأعطيه كيف أشكرك بسخاء  
على دعمك في حياتي في مرضي في دراستي التي أقاتل من أجلك

جدي  الذي في مقام والدي شكر خاص لك على دعمك ليا ومحبتك

شكر عائلتي بأكملها جداتي أم أبي وأم أمي وجدي و أعمامي  خالاتي وعماتي وأخواتي وانيساتي جهينة وخديجة و رجاء وصال  
وهداية هبة ) على كل الدعم الذي جعلني مختلقة

وصديقاتي  أخواتي اللواتي لم يولدن لأمي التي أجدها في كل الصغيرة وكبيرة (ناريمان وخضرة ونسرين ريم وماريا وسارة  
وعيشة وصديقي محمد  الذي ساندني في كل مشاوري الدراسي ) وكل من ساعدني عن قريب أو بعيد أشكركم

شكرا لجميع الأساتذة والشكر الخاص الأستاذ الفاضل بورك ياسينولأستاذ الفاضل طيبي جمال والأستاذة ناصر صونياوالأستاذ خليفة  
موسى والأستاذ الفاضل لوازن لخضر

 من الطالبة زغيدي عبير

## الإهداء

التفاني من الصعب علي التعبير عن كل ما أدين به لعائلتي أُمي الغالية والإخوة والأخوات للدعم المعنوي الذي لا يقدر بثمن الكثير من التشجيع لطالما تلقيتُه منه

إلى أصدقائي، إلى كل عائلتي العظيمة، أتمنى أن يكون هذا العمل إنجازًا

وثمره دعمكم، ورحمة الله على والدي الغالي

شكرا لجميع الأساتذة

بإخلاص حبي مسعود

## Résumé

Dans ce mémoire, nous avons été intéressés par certains problèmes que le panneau solaire rencontre souvent qui causent la diminution de son rendement comme l'ombre ou le sable où nous avons utilisé les techniques classiques MPPT et les méthodes P&O pour suivre le point de puissance maximale (MPP) dans des conditions normales ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $E = 1000$ ). L'objectif de notre travail est d'utiliser un correcteur numérique RST pour améliorer le suivi du point de puissance maximale en cas d'exposition à l'ombre. Nous avons utilisé l'environnement Matlab/Simulink pour réaliser notre étude. Tous les résultats sont obtenus par simulation numérique de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Ces résultats ont montré l'efficacité du correcteur RST dans le suivi du MPP.

### Mots clés:

Système photovoltaïque, commande R-S-T, techniques MPPT perturbé observe (P&O), convertisseur DC/DC.

### ملخص

في هذا المذكرة، نحن مهتمون ببعض المشكلات التي تواجهها اللوحة الشمسية غالباً والتي تتسبب في انخفاض أدائها، مثل الظل أو الرمال، حيث استخدمنا تقنيات MPPT التقليدية وطرق P&O لتتبع نقطة الطاقة القصوى (MPP) في الظروف العادية ( $T = 25$  درجة مئوية،  $E = 1000$ ). الغرض من عملنا هو استخدام مصحح رقمي RST لتحسين تتبع أقصى نقطة طاقة في حالة التعرض للظل. استخدمنا بيئة Matlab/Simulink لإجراء دراستنا. يتم الحصول على جميع

النتائج عن طريق المحاكاة العددية لتشغيل الخلية الكهروضوئية. أكدت هذه النتائج فعالية مصحح RST في رصد MPP

الكلمات المفتاحية :

النظام الكهروضوئي، التحكم R-S-T، تقنيات رصد اضطراب (MPPT و P&O)، محول DC/DC

### Abstract

In this thesis, we have been interested in some problems that the solar panel often encounters which cause its performance to decrease, such as shadow or sand where we have used classic MPPT techniques and P&O methods to track the maximum power point (MPP) in normal conditions ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $E = 1000$ ). The objective of our work is to use a digital RST corrector to improve tracking of the maximum power point in the event of exposure to shade. We used the Matlab/Simulink environment to carry out our study. All the results are obtained by digital simulation of the operation of a photovoltaic cell. These results proved the effectiveness of the RST corrector in the follow-up of the MPP.

### Key words:

Photovoltaic system, R-S-T control, MPPT techniques disturb observe (P&O), DC/DC converter.

## Sommaire

Liste des tableau

Liste des Figures

Liste des Abréviations

Introduction Generale..... 1

### Chapitre I Modélisation et simulation de système photovoltaïque

1. Introduction.....	4
2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque.....	4
3. Modélisation du système photovoltaïque.....	5
3.1 Architecture et Description d'un système.....	5
3.2 Schéma équivalent générateur d'une cellule solaire.....	6
3.2.1 Modèle à une diode.....	6
4. Paramètres électriques du module photovoltaïque.....	8
4.1 Courant de court-circuit <b>I<sub>cc</sub></b> .....	9
4.2 Tension de circuit ouvert <b>V<sub>co</sub></b> .....	9
4.3 Facteur de forme FF.....	9
4.4 Rendement de conversion $\eta$ .....	9
4.5 Point de puissance maximale <b>P<sub>max</sub></b> .....	10
5. Caractéristiques du module photovoltaïque.....	10
5.1 Caractéristique courant – tension.....	11
5.2 Caractéristique puissance – tension.....	12
6. Simulation du module PV.....	13
6.1 Modèle de référence.....	13
6.2 Modèle de simulation.....	14
7. Influence de l'éclairement et de la température.....	14
7.2 Influence de la température.....	15
8. Modélisation des Convertisseurs DC-DC dans les systèmes PV.....	17
8.1 Types des convertisseurs DC-DC.....	17
9. Convertisseur Boost.....	17

9.1 Principe de fonctionnement.....	17
10. Modèle mathématique équivalent.....	18
10.1 Dimensionnement des composantes du hacheur (L et C).....	20
10.1.1 Application numérique pour le calcul L.....	21
10.1.2 Application numérique pour le calcul C1 et C2.....	21
10.2 Modélisation dans l'espace d'état.....	22
11. Simulation du schéma global.....	24
11.1 Fonctionnement dans des conditions normales et stables.....	25
11.2 Fonctionnement sous des conditions climatiques variables.....	26
11.2.1 Eclairage variable.....	26
11.2.2 Température variable.....	28
12. Analyse des résultats de simulation.....	29
13. Conclusion.....	30

## Chapitre II

## La Commande MPPT

1. Introduction.....	32
2. Technique de commande de MPPT de GPV.....	32
2.1 Principe de la technique d'extraction du maximum de la puissance.....	32
2.2 Classification des commandes MPPT.....	33
2.3 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche.....	33
3. Algorithme de Poursuite du point de puissance maximale d'un système MPPT.....	34
3.1 Méthode dite « Perturbation et Observation » ou P&O.....	34
3.2 Fonctionnement de l'algorithme P&O.....	35
3.3 Méthode d'incrément de la conductance.....	36
4. Description de l'ombrage.....	37
5. Phénomène d'ombrage sur les modules photovoltaïques.....	38
5.1 Maximisation de la production des systèmes solaires photovoltaïques en présence d'ombrages partiels.....	40
6. Simulation d'ombrage:.....	40
7. Schéma de simulation global.....	43
7.1 Résultats de simulation.....	43
8. Conclusion.....	46



1. Introduction.....	48
2. Présentation de la commande RST.....	48
3. Principe de la commande RST.....	49
3.1 Détermination des polynômes R ,S et T.....	49
4. Résolution de l'équation diophantienne.....	50
5. Application de la commande R-S-T sur un système PV.....	51
6. Simulation globale du système.....	54
7. Robustesse du système via l'introduisant un bruit.....	56
8. Conclusion.....	58
Conclusion Générale.....	60
Bibliographie.....	62
Annexes.....	67

## Liste des tableaux

<b>tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau du Chapitre I</b>		
<b>Tableau I. 1</b>	Caractéristiques électriques du module photovoltaïque	13
<b>Tableau I. 2</b>	les valeurs finales des composants le convertisseur Boost	22

## Liste des Figures

Figure	Titre	Page
<b>Figures du Chapitre I</b>		
<b>Figure.I.1</b>	Principe de la conversion photovoltaïque	4
<b>Figure.I.2</b>	Association de l'étage d'adaptation entre le générateur et la charge	5
<b>Figure.I.3</b>	Circuit de cellule PV équivalent a un diode	6
<b>Figure.I.4</b>	Caractéristique courant -tension sous obscurité et sous éclairage d'une cellule solaire	8
<b>Figure.I.5</b>	Point de puissance maximale $P_{max}$ d'un module PV	10
<b>Figure.I.6</b>	La caractéristique courant – tension d'une cellule solaire	11
<b>Figure.I.7</b>	les différentes zones de caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque	11
<b>Figure.I.8</b>	La caractéristique puissance – tension d'une cellule solaire	12
<b>Figure.I.9</b>	Modèle de simulation d'un générateur PV	14
<b>Figure.I.10</b>	Evolution de la caractéristique (P-V) du module en fonction de l'irradiation	15
<b>Figure.I.11</b>	Evolution de la caractéristique (I-V) du module en fonction de l'irradiation	15
<b>Figure.I.12</b>	Evolution de la caractéristique (P-V) du module en fonction de la température	16
<b>Figure.I.13</b>	Evolution de la caractéristique (I-V) du module en fonction de la température	16
<b>Figure.I.14</b>	Schéma de principe du convertisseur Boost	18
<b>Figure.I.15</b>	Schéma électrique d'un hacheur boost fermé	18
<b>Figure.I.16</b>	Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert	19
<b>Figure.I.17</b>	Schéma du convertisseur Boost	22
<b>Figure.I.18</b>	Circuit équivalent de convertisseur Boost (a)K fermé,(b)K ouvert	23

<b>Figure.I.19</b>	Schéma de simulation du GPV et Boost	25
<b>Figure.I.20</b>	Allure de la puissance en entrée et sortie du système.	26
<b>Figure.I.21</b>	Allure de P(t),V(t),et I(t) en entrée et sortie du système.	26
<b>Figure.I.22</b>	Schéma de Simulation de GPV et Boost pour un éclairnement variable	27
<b>Figure.I.23</b>	Allure de la puissance en entrée et sortie du système.	28
<b>Figure.I.24</b>	Allures de V(t),et I(t) en entrée et sortie du système	28
<b>Figure.I.25</b>	Schéma de simulation de GPV et Boost dans un état Température variable	29
<b>Figure.I.26</b>	Allure de la puissance en entrée et sortie du système	29
<b>Figure.I.27</b>	Allures de V(t) et I(t) en entrée et sortie du système	30
<b>Figures du Chapter II</b>		
<b>Figure.II.1</b>	Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau	33
<b>Figure.II.2</b>	Organigramme de classification des commandes MPPT	35
<b>Figure.II.3</b>	Caractéristique P-V et fonctionnement de la technique P&O	36
<b>Figure.II.4</b>	Algorithme MPPT dite « perturbation et observation (P&O) »	36
<b>Figure.II.5</b>	Organigramme de la technique de la conductance incrémentale	38
<b>Figure.II.6</b>	GPV dans des conditions partiellement ombragés causés par le passage de nuages	39
<b>Figure.II.7</b>	Caractéristique I –V d'une cellule PV	40

<b>Figure.II.8</b>	Caractéristiques des cellules PV pour un courant donné $I_m$ en présence d'ombrage	40
<b>Figure.II.9</b>	Schéma bloc de trois modules en série	42
<b>Figure.II.10</b>	Caractéristiques P-V d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage.	43
<b>Figure.II.11</b>	Caractéristiques (I-V) d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage	43
<b>Figure.II.12</b>	Schéma de simulation du système photovoltaïque étudié.	44
<b>Figure.II.13</b>	Allure de la puissance PV d'un générateur photovoltaïque dans des conditions normales de température et de l'éclairement.	45
<b>Figure.II.14</b>	Courbes Puissance à l'entrée/sortie d'un générateur photovoltaïque dans des conditions normales	46
<b>Figure.II.15</b>	Allure de la puissance photovoltaïque PV d'un générateur photovoltaïque en considérant l'effet d'ombrage.	46
<b>Figure.II.16</b>	Allure de la puissance PV pour deux rapports cycliques	46
<b>Figures du Chapitre III</b>		
<b>Figure.III.1</b>	structure générale du régulateur RST	49
<b>Figure.III.2</b>	Bloc de simulation régulateur RST	55
<b>Figure.III.3</b>	Modélisation d'un système PV avec régulateur RST sous MATLAB\SIMULINK	55
<b>Figure.III.4</b>	Allure de puissance en cas d'ombrage en utilisant un correcteur RST	56
<b>Figure.III.5</b>	Allure de la tension sortie	57
<b>Figure.III.6</b>	Bloc de simulation régulateur RST en introduisant un bruit.	58

<b>Figure.III.7</b>	Courbe de tension RST en présence d'un bruit	58
<b>Figure.III.8</b>	Allure de la tension à la sortie système en cas de bruit à son entrée.	59

## Liste des Abreviations

- I<sub>ph</sub>: Photo-courant [A]
- I<sub>d</sub> : Courant à travers la diode [A]
- I<sub>cell</sub>: Courant fourni par la cellule [A]
- I<sub>ch</sub> : Courant à travers la charge [A]
- R<sub>p</sub> : Résistance parallèle de la cellule [ $\Omega$ ]
- R<sub>s</sub> : Résistance série de la cellule [ $\Omega$ ]
- R<sub>ch</sub> : Résistance de la charge [ $\Omega$ ]
- V<sub>ch</sub>: Tension aux bornes de la charge [V]
- V<sub>cell</sub>: Tension aux bornes de la cellule [V ]
- q: Charge électrique élémentaire [q=6021764e-19C]
- k: Constante de Boltzmann [K = 1,3806503e-23 J/K]
- T : Température absolue de la cellule [K]
- I<sub>s</sub>: Courant de saturation de la jonction non éclairée [A]
- V<sub>oc</sub>: Tension du circuit ouvert [V]
- I<sub>sc</sub> : Courant de court-circuit [A]
- $\eta$  : Facteur d'idéalité de la jonction
- I : Courant de cellule [A]
- V : Tension de cellule [V]
- T : Température de la cellule [ $^{\circ}$ K]
- I<sub>0</sub>: Courant de saturation [A]
- I<sub>pv</sub> : Courant du module photovoltaïque [A]

## Liste des Abreviations

$V_{pv}$  : Courant du module photovoltaïque [A]

$N_p$  : Nombre de modules en parallèles

$N_s$  : Nombre de modules en séries

$E$  : Irradiation [ $w/m^2$  ]

$E_m$  : Eclaircementmoyen[ $W/m^2$ ]

$E_g$  : L energie de bande gap [J]

$F_s$  : Fréquence de switch [Hz]

$I_{om}$  : Courant de sortie pour la puissance maximale [A]

$V_{pv-mpp}$  : Tension du panneau pour la puissance maximale [V]

$I_L$  : Courant d'inductance [A]

$V_c$  : Tension de la capacité C [V]

$D$  : le rapport cyclique du convertisseur

$V_{mpp}$  : tension de la puissance maximale [V]

PPM : Point de puissance maximal

P&O : MéthodedePerturbationetobservation

MPPT :MaximumPowerPointTracking

$I_{mpp}$  : Courant dans le point PPM

A et B et C :Matriced'état

RST :Régulateurpolynômiales





**Introduction Générale**

## Introduction Generale

L'énergie présente une difficulté pour l'homme dans le monde actuel. Avec la diminution du réserve mondial d'hydrocarbures d'origine (pétrole, gaz et charbon) et lapollution due aux ces énergies fossiles qui menace l'environnemen mondial, tous les pays cherchent et orientent leurs besoins énergétiques aux énergies renouvelable (propre, durable, etc. ...)[1]. L'énergie solaire provient du soleil arrive à la surface de la terre après filtrage par l'atmosphère terrestre.Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui égale à  $1367\text{W/m}^2$ [2].

L'énergie lumineuse est convertie en énergie électrique par cellule photovoltaïque (PV), grâce à l'effet photovoltaïque. Lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière, elle produit une force électrique. L'efficacité des systèmes photovoltaïques dépend des propriétés électriques des cellules photovoltaïques et de leur composition en série ou parallèle.

Différente techniques ont été utilisés dans l'étude des systèmes photovoltaïques, parmi lesquelles des techniques du suivi et de régulation quison largement utilisées. Dans notre travail nous utilisons le correcteur polynomiale RST pour améliorer le suivi du point de puissance maximale MPP en cas d'exposition à l'ombre d'une cellule photovoltaïque. Le travail présenté dans ce mémoire est organisé en trois chapitres structurés comme suit :

- Dans le premier chapitre nous allons présenter le modèle du système photovoltaïque à étudier et sont modèle mathématiques, puis nous allons simuler ce modèle et analyser les résultats obtenus . Une étude théorique des différents convertisseurs statiques qui peuvent être utilisés dans un système photovoltaïque sera détaillée durant ce chapitre. Nous s'intéressons à l'adaptateur BOOST, qui permettra de contrôler le changement du courant et de tension ce qui permet de vérifier la puissance dans des conditions d'éclairage et température constantes, naturelles ou variables. Nous allons simuler le modèle de notre système phtovoltaïque sous MATLAB/Simulink pour un changement des conditions d'éclairage et de température et de démontrer le bon fonctionnent duconvertisseur Boost.
- Dans le deuxième chapitre nous allons étudier des divers techniques de MPPT et l'application de P&O pour observer le point de puissance maximumpossible dans le

cas normal du fonctionnement du panneau photovoltaïque et dans le cas où le panneau solaire est exposé à l'ombre.

- Dans le dernier chapitre nous allons introduire un contrôleur numérique R S T dans notre système photovoltaïque pour contourner le problème de présence de l'ombre et d'arriver vers la fin de ce chapitre à comparer les résultats obtenus sous MATLAB/Simulink par la technique MPPT et celle du contrôleur R-S-T.

Et enfin, nous terminons notre manuscrite par une conclusion générale et quelques travaux futurs qui peuvent être ajoutés



# **Chapitre I**

## **Modélisation et simulation du système photovoltaïque**

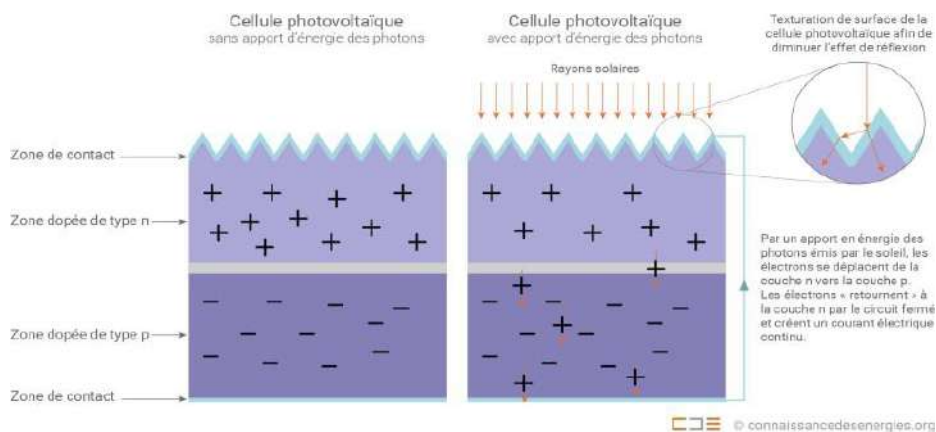
## 1. Introduction

Un système photovoltaïque(PV) est un ensemble d'éléments (constituants) rassemblés dans le but de produire d'électricité, en utilisant une source solaire. Ces éléments sont essentiellement le champ PV, le conditionnement de puissance, le système de stockage (dans un certain cas), et la charge. Le conditionnement de puissance peut comprendre: un régulateur seul, un régulateur avec un convertisseur (DC /DC ou/et DC/ AC) ou un convertisseur seul [3] .

Dans ce chapitre nous étudierons le fonctionnement d'un système photovoltaïque et de simuler son fonctionnement sous Matlab/Simulink.

## 2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présente un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement [4].



**Figure .I.1.** Principe de la conversion photovoltaïque [5].

### 3. Modélisation du système photovoltaïque

#### 3.1 Architecture et Description d'un système

Un GPV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. 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 l'introduction d'un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme il est présenté la figure (.I.2). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle [6]. Afin de stocker de l'énergie électrique dans une batterie pour en cas de production d'énergie surchargée ou déchargée en cas de pénurie pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens [6].

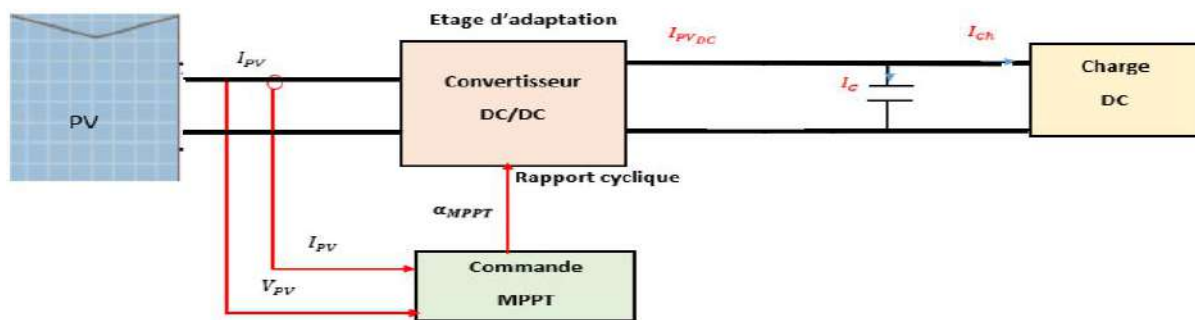


Figure . I.2. Association de l'étage d'adaptation entre le générateur et la charge [6].

L'étage d'adaptation utilisé entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter soit survolteur ou dévolteur commandé en faisant varier le rapport cyclique du convertisseur selon un algorithme afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance [6].

### 3.2 Schéma équivalent générateur d'une cellule solaire

La cellule solaire est généralement modélisée par un schéma équivalent à une deux diodes il s'agit de modéliser le courant de court-circuit affecte par l'éclairement comme source et l'effet photovoltaïque par une diode alors que une résistance un série et une autre en parrèle représentent les pertes du modèle [7].

#### 3.2.1 Modèle à une diode

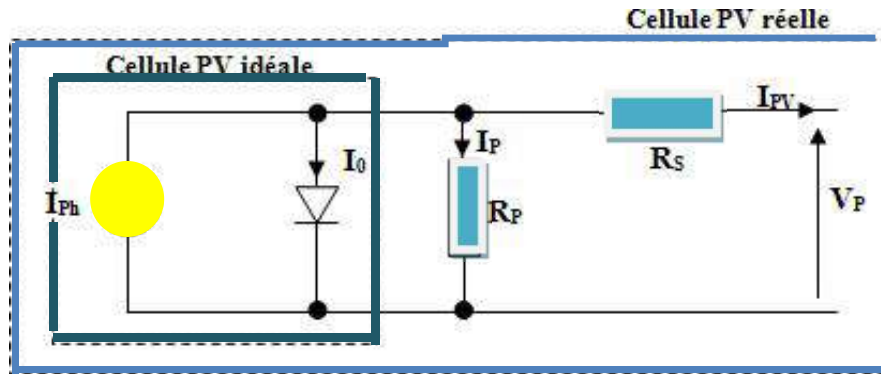


Figure. I.3. Circuit de cellule PV équivalent a un diode

L'équation caractéristique d'une cellule solaire est donnée par:

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

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.1)$$

Où:

$I_{ph}$ : est un courant photonique généré par la lumière

$I_d$ : Courant de diode

Le courant photonique est le courant dans la cellule résultant du rayonnement solaire. Cela dépend à la fois de la température et de l'éclairement énergétique. Par conséquent, sa valeur reste constante quelle que soit la tension externe. Il est donné par l'équation suivante [7] :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} * (I_{phn} + K_i *(T - T_n)) \quad (I.2)$$

Où :

$I_{phn}$  : Courant photonique nominal en STC

T: Température de la cellule en Kelvin

$T_n$ : Température nominale en Kelvin au STC, 25 ° C

$K_i$ : Coefficient de température du courant de court-circuit

G: Éclairement solaire en  $1 \text{ kW} / \text{m}^2$

$G_n$ : Rayonnement solaire en  $\text{kW} / \text{cm}^2$

Le courant dans la diode est donné par :

$$I_d = I_s \left( e^{(v+I*Rs) \frac{1}{\alpha * v_t}} - 1 \right) \quad (\text{I.3})$$

Avec

$I_s$ : courant de saturation de la diode donné par :

$$I_s = k_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{k T}} \quad (\text{I.4})$$

Où :

$$v_t = \frac{kT}{q} : \text{tension thermique à la température T} \quad (\text{I.5})$$

$\alpha$ : Facteur d'idéalité [1.6 pour le silicium]

q : charge de l'électron ( $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ )

n : facteur de non idéalité de la jonction

T: température effective de la cellule en degré Kelvin

k: constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/k}$ )

$k_1$ : constante ( $1.2 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^3$ )

$E_g$ : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)



Donc l'expression de la caractéristique est :

$$I = (I_{ph} - I_0 * (e^{(v+I*Rs) * \frac{1}{\alpha * V_t}} - 1) - \frac{V - I * Rs}{R_p}) \quad (I.6)$$

Le courant de saturation cellulaire est le courant de saturation inverse de la diode. Il dépend uniquement de la température et peut être calculé à l'aide de :

$$I_0 = \frac{I_{scn} + k_i * (T + T_n)}{e^{\frac{V_{ocn} + k_v * (T + T_n)}{\alpha * V_t}} - 1} \quad (I.7)$$

Ou:

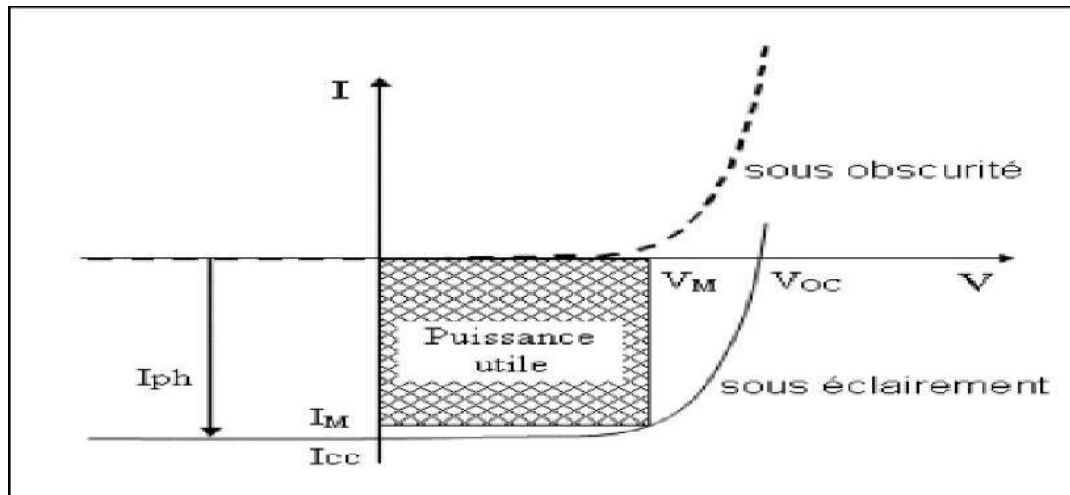
$I_{scn}$ : Est le courant de court-circuit nominal au STC

$V_{ocn}$ : est la tension nominale à vide du STC

$k_v$ : Coefficient de température de la tension de circuit ouvert à  $I_{sc}$ .

#### 4. Paramètres électriques du module photovoltaïque

Le panneau solaire présente une diversité de caractéristiques, telles que la tension à circuit ouvert, le courant de court-circuit, la puissance maximale, le facteur de forme et le rendement..



**Figure. I.4 .** Caractéristique courant -tension sous obscurité et sous éclairement d'une cellule solaire [8].

#### 4.1 Courant de court-circuit $I_{cc}$

Lorsque le panneau solaire est en mode court-circuit, il fournit son courant maximal lorsqu'il n'y a pas de tension, et on dit qu'il s'agit d'un court-circuit, et sa valeur est obtenue en connectant l'ampèremètre aux bornes de l'unité. Dans les modules PV au silicium, le courant  $I_{cc}$  est de l'ordre de 12 mA/cm<sup>2</sup> [9].

#### 4.2 Tension de circuit ouvert $V_{co}$

Dans le cas où l'on place une unité sous une référence lumineuse fixe en tenant compte du fait que le courant ne tourne pas on obtient alors la tension continue maximale appelée tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .

$$V_{co} = N_s \cdot 0.6 \text{ V} \quad (\text{I-8})$$

Où

0.6 V : la tension pour une cellule PV élémentaire

$N_s$ : le nombre de cellules

On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes du module PV [9].

#### 4.3 Facteur de forme FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} * V_{co}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [10]. Il est défini par la relation suivante :

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

#### 4.4 Rendement de conversion $\eta$

Le rendement de conversion d'une cellule solaire est la source d'énergie maximale que l'on peut déduire de la puissance incidente.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF * I_{cc} * V_{co}}{P_{in}} \quad (I.10)$$

Où :

$P_{in}$  : la puissance incidente du rayonnement solaire au sol

$P_{max}$  : dans cette formule correspondante au maximum de la puissance dans la diode solaire

#### 4.5 Point de puissance maximale $P_{max}$

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à faire fonctionner une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule  $P=V \cdot I$ , pour que  $P$  soit maximal : il faut être dans les conditions où le produit  $V \cdot I$  est maximale, c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale  $P_{max}$  [11], La figure suivante montre un point d'intersection avec une explication de l'équation requise.

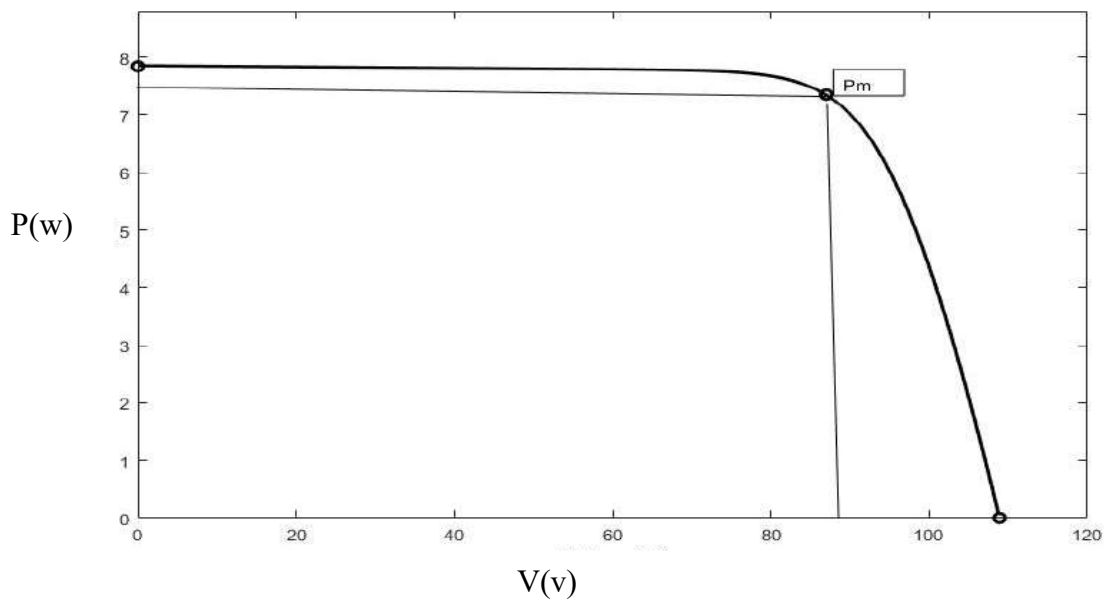
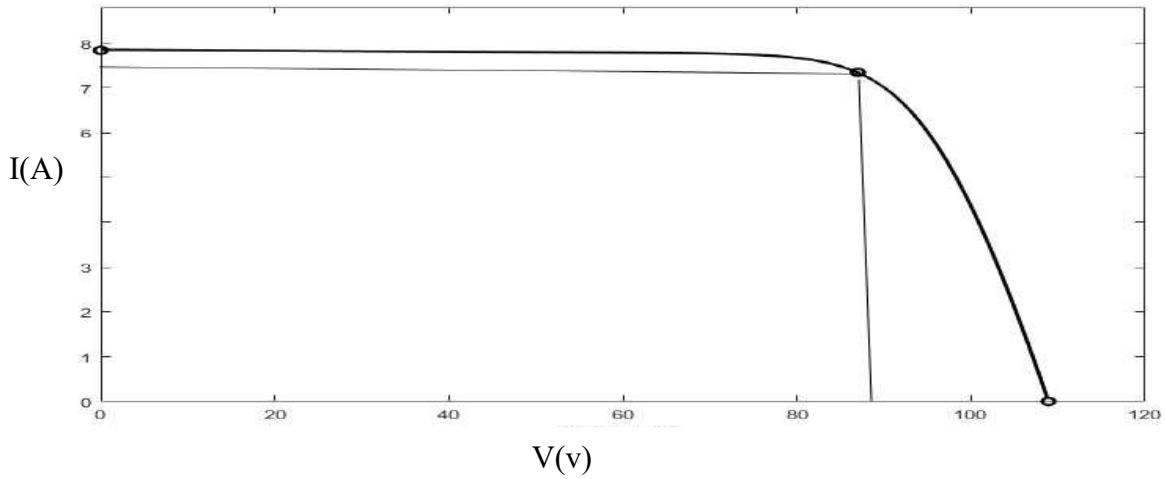


Figure .I.5 .Point de puissance maximale  $P_{max}$  d'un module PV

## 5. Caractéristiques du module photovoltaïque

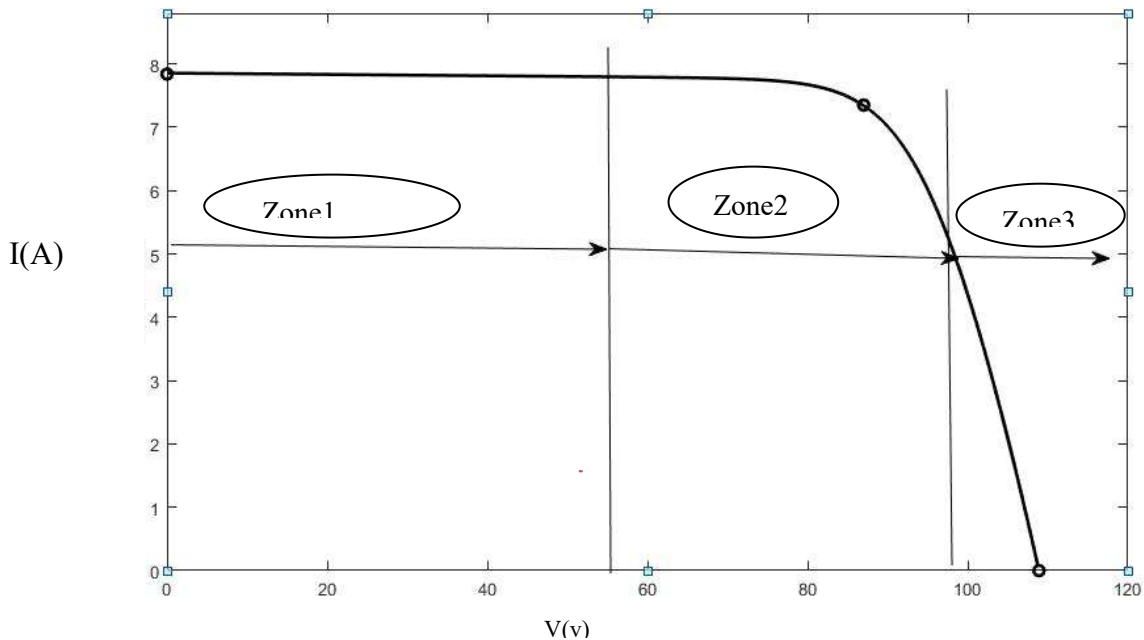
### 5.1 Caractéristique courant – tension

A ce stade, le courant produit par les parties de la cellule solaire varie considérablement  $I=f(V)$ .



**Figure . I.6 .** Caractéristique courant – tension d’une cellule solaire

Cette caractéristique est décalée vers le bas d’un courant  $I_{cc}$  (courant de court-circuit). De même, elle coupe l’axe des abscisses en  $V_{co}$  (tension maximale de circuit ouvert). On peut regrouper trois zones essentielles [11] :



**Figure .I.7.** Différentes zones de caractéristique  $I=f(V)$  d’une cellule photovoltaïque

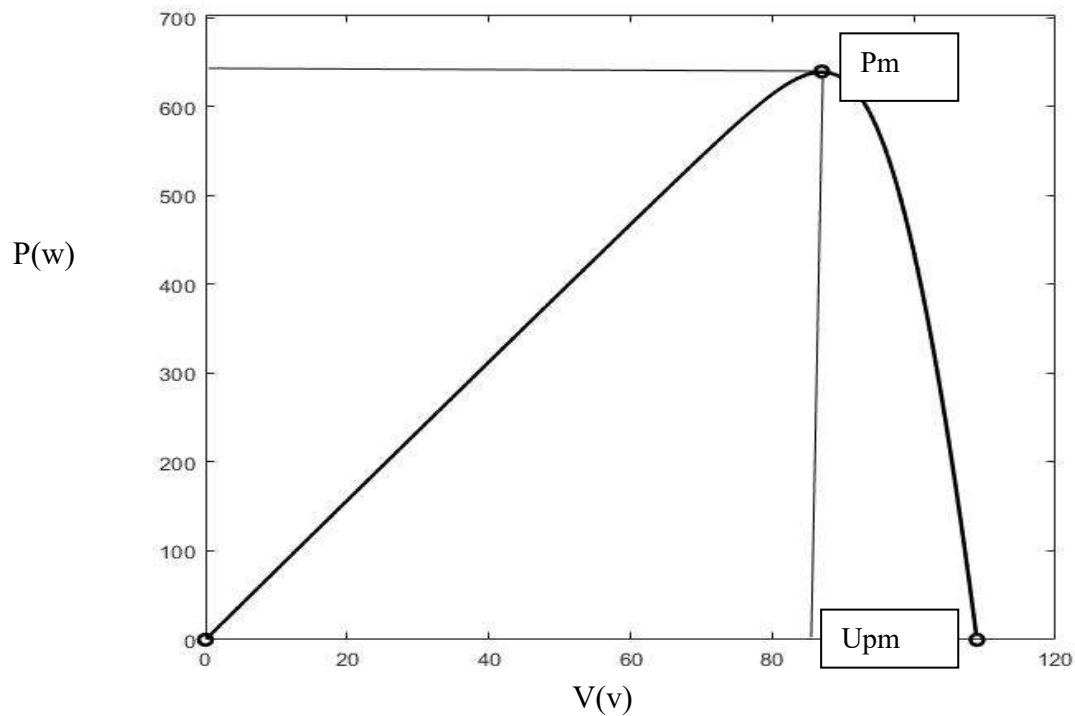
La zone 1 : où le courant reste constant quelle que soit la tension. Pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant[11].

La zone 2 : correspondant au coude de la caractéristique. La région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé[11].

La zone 3 : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante. Dans ce cas, le générateur est assimilable à un générateur de tension [11].

## 5.2 Caractéristique puissance – tension

- 6 La caractéristique  $P=f(V)$  d'une cellule solaire représente le produit de courant par la tension délivrée par une cellule solaire  $P=V.I$ .



**Figure .I.8.**Caractéristique puissance – tension d'une cellule solaire .

## 6. Simulation du module PV

Dans le but de disposer d'un modèle permettant de simuler le fonctionnement de nos cellules associées, nous avons développé un modèle dans l'environnement Matlab associé à l'outil Simulink [12], En utilisant les équations données et le module 1Soltech 1sth -215-P .comme module de référence, et nous avons obtenu les courbes caractéristiques suivantes.

### 6.1 Modèle de référence

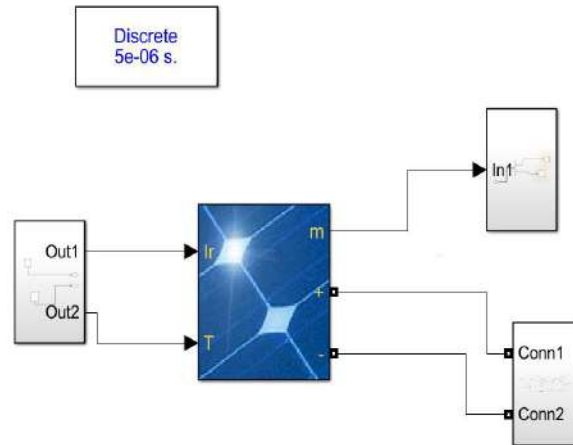
Le module 1Soltech 1sth -215-P de solarex est pris comme module de référence pour la simulation et les détails de la fiche technique sont indiqués dans le tableau 1 .

**Tableau .I.1 .** Caractéristiques électriques du module photovoltaïque

Puissance maximale ( $P_{mpp}$ )	213.15 W
Tension maximale ( $V_{mpp}$ )	29V
Courant maximale ( $I_{mpp}$ )	7.35 A
Tension à circuit ouvert ( $V_{CO}$ )	36.6 V
Nombre de cellules en série	60
Coefficient de température de $V_{CO}$	-0.36099% / °C
Coefficient de température de $I_{CC}(a)$	0.102% / °C
Courant à court-circuit	7.84 A

## 6.2 Modèle desimulation

La figure suivante présente un modèle de simulation d'un générateur PV réalisé sous Matlab/Simulink



**Figure .I.9.**Modèle de simulation d'un générateur PV

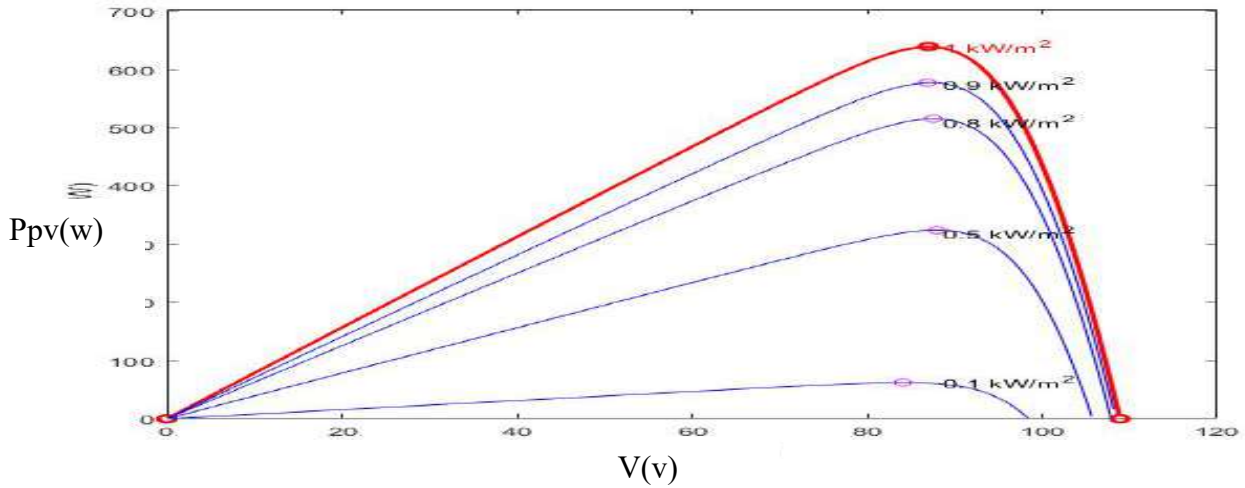
## 7. Influence de l'éclairement et de la température

Les caractéristiques d'un panneau dépendent de l'éclairement et de la température. Selon la technologie du générateur photovoltaïque, les variations des paramètres seront différentes [13].

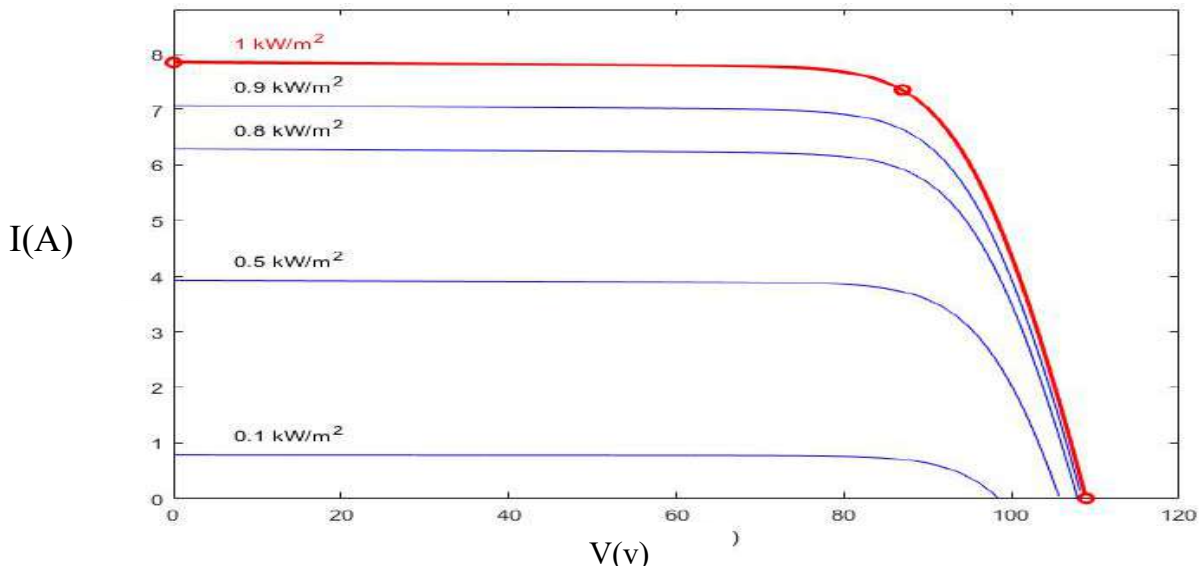
La simulation du modèle présente nous a permis d'obtenir les caractéristiques qui montrent l'effet de ces deux paramètres.

### 7.1 Influence de l'irradiation

L'influence de l'irradiation sur la caractéristique I-V et P-V de la cellule solaire est représentée sur la figure suivant.



**Figure I.10.** Evolution de la caractéristique (P-V) du module en fonction de l'irradiation



**Figure I.11.** Evolution de la caractéristique (I-V) du module en fonction de l'irradiation

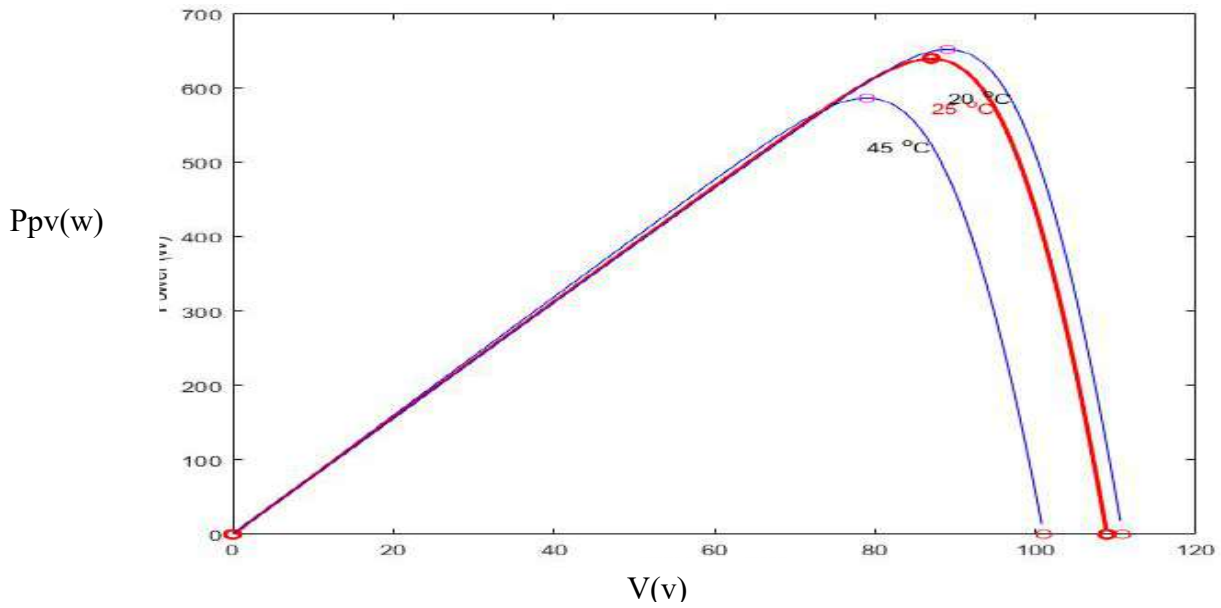
Le courant  $ISC$  varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est proportionnelle), la tension restant relativement constante. On remarque dans la figure que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimal varie très peu avec l'éclairement [13].

## 7.2 Influence de la température

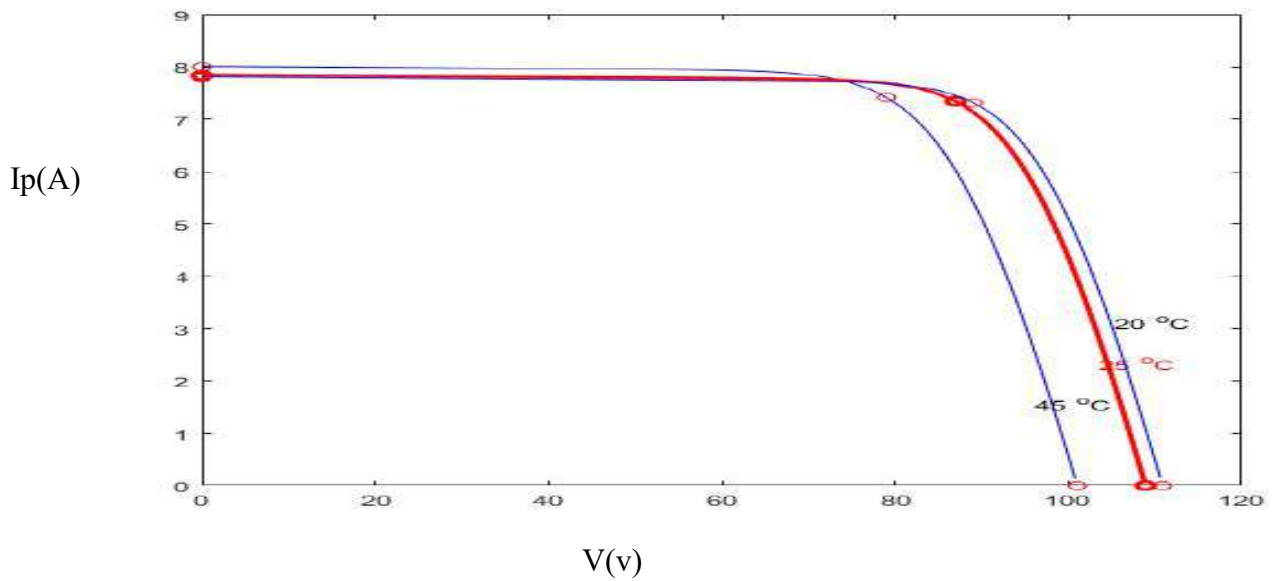
L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un semi-conducteur. Pour une température qui change, on peut voir que la variation de la tension change beaucoup plus que le courant. Ce dernier varie très légèrement [14].



L'influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V de la cellule solaire est représentée sur la figure 12, pour un éclairement fixe  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ .



**Figure .I.12.** Evolution de la caractéristique (P-V) du module en fonction de la température



**Figure .I.13.** Evolution de la caractéristique (I-V) du module en fonction de la température

## 8. Modélisation du Convertisseurs DC-DC dans les systèmes PV

Le convertisseur DC-DC est un convertisseur parallèle qui est inséré entre le générateur photovoltaïque, où la série de conversion est caractérisée par son rapport cyclique  $0 < D < 1$ , par lequel les valeurs moyennes des grandeurs de sortie peuvent être exprimées avec celles de les entrées, et où son rôle réside dans le contrôle de l'énergie électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec souplesse et meilleur rendement et aide pour suivre le point de fonctionnement optimal.

### 8.1 Types des convertisseurs DC-DC

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Flyback, en demi-pont et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté [15].

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu [15]. Ces topologies sont encore classées en trois catégories:

- Abaisseurs (Buck)
- Elévateurs (Boost)
- Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost)

## 9. Convertisseur Boost

Un convertisseur boost ou hacheur parallèle permet de varier la tension la tension continue de son entrée fournie par les batteries à une tension continue à sa sortie supérieur à celle de l'entrée pour atteindre le niveau de tension requis .

### 9.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur K Figure I.14 [16]:

- Une phase d'accumulation d'énergie: lorsque l'interrupteur K Figure.I.14 est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation[16].
- Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, les condensateurs C et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité[16].

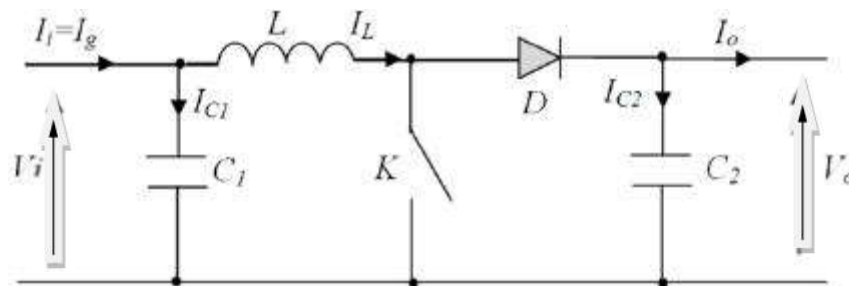


Figure .I .14 .Schéma de principe du convertisseur Boost

### 10. Modèle mathématique équivalent

Nous étudions les schémas électriques équivalents à chaque position de l'interrupteur afin de collecter toutes les fonctions assurées par l'hacheur élévateur à l'état stationnaire. Cette figure représente le circuit équivalent pour la poussée lorsque K est fermé, c'est-à-dire entre  $[0, D.T_e]$ .

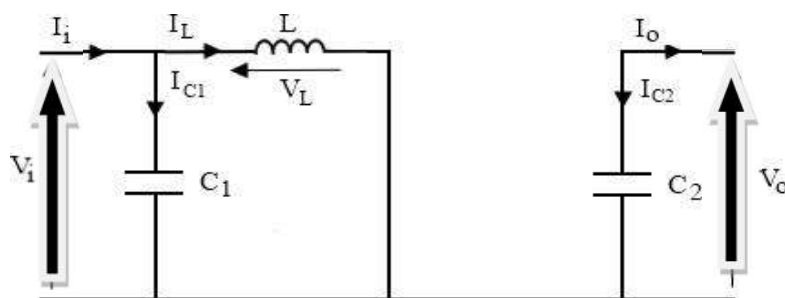


Figure.I.15. Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

On applique la loi de Kirchhoff en deux étapes successives, l'étape de fermeture et l'étape d'ouverture :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{I.11})$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -I_0(t) \quad (\text{I.12})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (\text{I.13})$$

De l'équation (I-13), nous extrayons une nouvelle expression qui est :

$$\frac{dI_L(t)}{dt} = \frac{V_i(t)}{L} \rightarrow I_L = \frac{V_i}{L} t + I_m \quad (\text{I.14})$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuité quivalent au fonctionnement du Boost est le suivant :

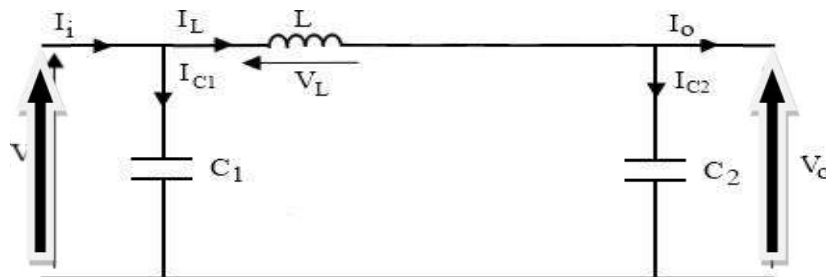


Figure.I.16.Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{I.15})$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad (\text{I.16})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad (\text{I.17})$$

De l'équation (I.18), nous extrayons une nouvelle expression qui est :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_i(t) - V_0(t)}{L} \rightarrow I_L = \left( \frac{V_i(t) - V_0(t)}{L} \right) t + I_m \quad (\text{I.18})$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (\text{I.19})$$

$$\frac{I_{in}}{I_{out}} = 1 - D \quad (\text{I.20})$$

### 10.1 Dimensionnement des composantes du hacheur (L et C)

Pour le dimensionnement des différents composants du circuit du convertisseur afin de diminuer les ondulations des courants et des tensions sans faire un surdimensionnement ce qui accroîtrait le poids et le prix des circuits, un calcul de ces composants en fonction des ondulations voulues est nécessaire. Cette remarque est très importante pour le dimensionnement de l'inductance L afin de respecter le courant admissible par l'interrupteur où dans le cas pratique les ondulations du courant ils sont plus importants par rapport aux autres ondulations [17].

En appliquant la relation  $V_L = L \frac{dI_L(t)}{dt}$  est on obtient :

$$\frac{dI_L(t)}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{in}}{L} \quad (\text{I.21})$$

A partir de l'équation, la valeur crête à crête du courant  $I_L$  est :

$$I_{Lcc} = 4\Delta I_L = \frac{V_{in}}{L} DT_S \quad (\text{I.22})$$

La valeur de l'inductance L à choisir pour certaine ondulation  $\Delta I_L$  est :

$$L = \frac{V_{in}}{4\Delta I_L} \alpha T_S \quad (\text{I.23})$$

Pour le calcul de la capacité C du condensateur on a :

$$\frac{dV_{in}}{dt} = \frac{I_C - I_{in}}{C} \quad (\text{I.24})$$

La valeur d'ondulation crête à crête de tension de sortie est :

$$V_{cc} = 8\Delta V_C = \frac{I_{in}}{C} DT_S \quad (\text{I.25})$$

La valeur de la capacité C est données par :

$$C = \frac{I_{in}}{8\Delta V_C} DT_S \quad (\text{I.26})$$

### 10.1.1 Application numérique pour le calcul L

La taille de l'inductance dépend de l'ondulation du courant de l'inductance fixée généralement à 5% du courant moyen de l'inductance [ 18].

Sur la base de l'équation (I.23) , nous calculons la valeur de l'inductance :

$$L = \frac{V_{in} \alpha}{4 \Delta I_L f} \quad (\text{I.27})$$

Où

$\alpha$  est le rapport cyclique,  $V_{in}$  la tension maximale d'entrée,  $f$  la fréquence de hachage. Supposons que la plus ondulation de courant se produit dans la condition de maximum de puissance. Sous cette condition, l'ondulation de courant est 5% [19] :

$$\Delta I_L = 0.05 \quad (\text{I.28})$$

Ainsi à partir à l'équation

$$L = \frac{V_{in}}{4 \Delta I_L f} \quad (\text{I.29})$$

On choisit l'ondulation du courant  $\Delta I_L = 0.05 \text{ A}$

### 10.1.2 Application numérique pour le calcul $C_1$ et $C_2$

Nous plaçons en entrée comme en sortie des condensateurs chimiques pour filtrer les variations des tensions d'entrée et de sortie. Les valeurs des capacités sont calculées en fonction de l'ondulation voulues ainsi que des grandeurs moyennes désirées pour respecter la condition sur l'ondulation de la tension de sortie, la capacité du condensateur  $C_2$  doit vérifier l'expression [20 ].

$$\Delta V_{c2} = 0.05 \times V_{out} \quad (\text{I.30})$$

Ainsi à partir à l'équation :

$$C_2 = C_1 = \frac{\Delta I_L}{8 \Delta V_{c2} f} \quad (\text{I.31})$$

Le tableau présente les valeurs finales des composants le convertisseur Boost

**Tableau .I.2.** Valeurs finales des composants le convertisseur Boost

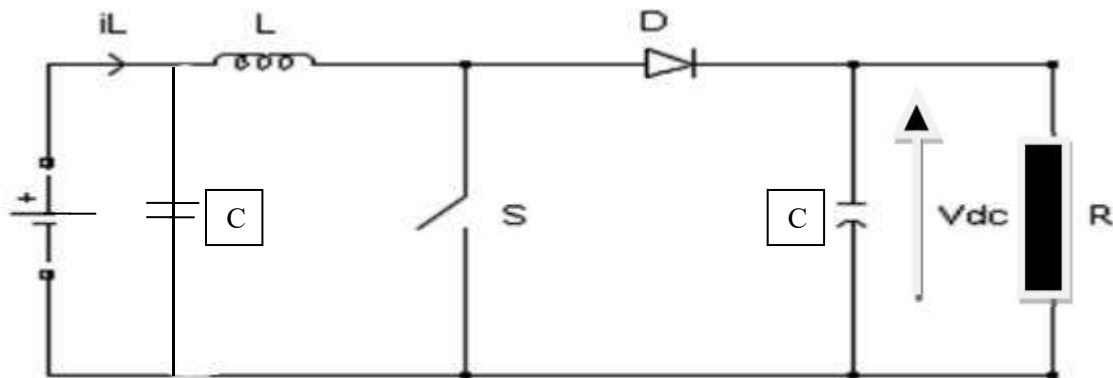
C1	L	C2	R
100e-6F	5e-3H	100e-6F	20ohms

## 10.2 Modélisation dans l'espace d'état

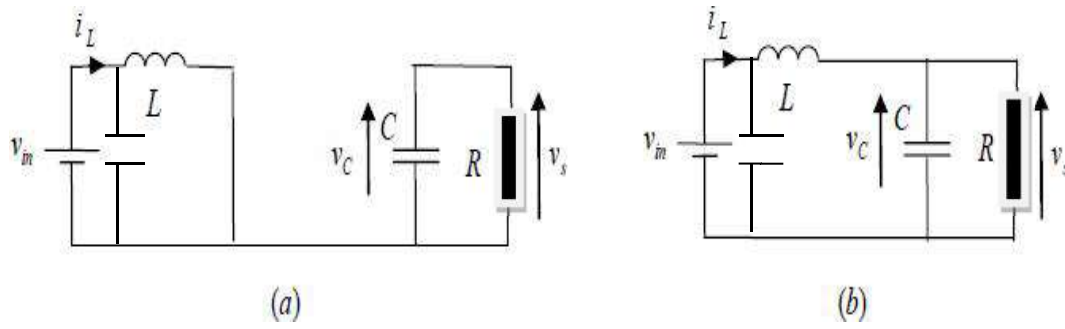
Pour obtenir une équation dynamique appropriée pour le convertisseur Boost, nous définissons les deux phases des commutateurs (ON et OFF). Le circuit électrique comprend deux éléments de stockage d'énergie : un condensateur C et une inductance L. L'ensemble de ce processus n'est possible qu'après le calcul des matrices d'espace d'états A, B, C et D, dont les dérivations sont expliquées dans la section suivante[21].

$$\dot{X} = A.X + B.U \quad (I.32)$$

$$Y = C.X + D.U \quad (I.33)$$



**Figure.I.17.**Schéma du convertisseur Boost



**Figure I. 18.** Circuit équivalent de convertisseur Boost (a)K fermé,(b)K ouvert

Sur l'intervalle :  $t_0 \leq t \leq t_0 + dT$ , **K** est fermé et **D** est bloquée on obtient :

$$\begin{aligned} V_{in} &= V_{c1} \\ V_{in} - L \frac{di_L}{dt} &= 0 \end{aligned} \tag{I.34}$$

$$\frac{V_{c2}}{R} - C \frac{dv_{c2}}{dt} \tag{I.35}$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_{c2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \times V_{in} \tag{I.36}$$

$$Y = [0 \quad 1] \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_{c2} \end{bmatrix} \tag{I.37}$$

Sur l'intervalle :  $t_0 \leq t \leq t_0 + dT$ , **K** est ouvert et **D** est passant on obtient :

$$V_{in} - L \frac{di_L}{dt} - V_{c2} = 0 \tag{I.38}$$

$$i_L - \frac{V_{c2}}{R} - C \frac{dv_{c2}}{dt} = 0 \tag{I.39}$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_{c2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \times V_{in} \tag{I.40}$$

$$Y = [0 \quad 1] \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_{c2} \end{bmatrix} \tag{I.41}$$



En utilisant le calcul de la moyenne aux équations (I.36), (I.37) , (I.40) et (I.41), le modèle d'espace d'état est obtenu comme suit :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_{c2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-d)}{L} \\ \frac{(1-d)}{c} & -\frac{1}{RC2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \times V_{in} \tag{I.42}$$

$$Y = [0 \quad 1] \times \begin{bmatrix} i_L \\ V_{c2} \end{bmatrix} \tag{I.43}$$

### 11. Simulation du schéma global

La figure suivante présente le schéma de simulation de notre système photovoltaïque réalisé sous MATLAB/Simulink. Le système est formé d'une cellule photovoltaïque, hacheur Boost et une charge résistive

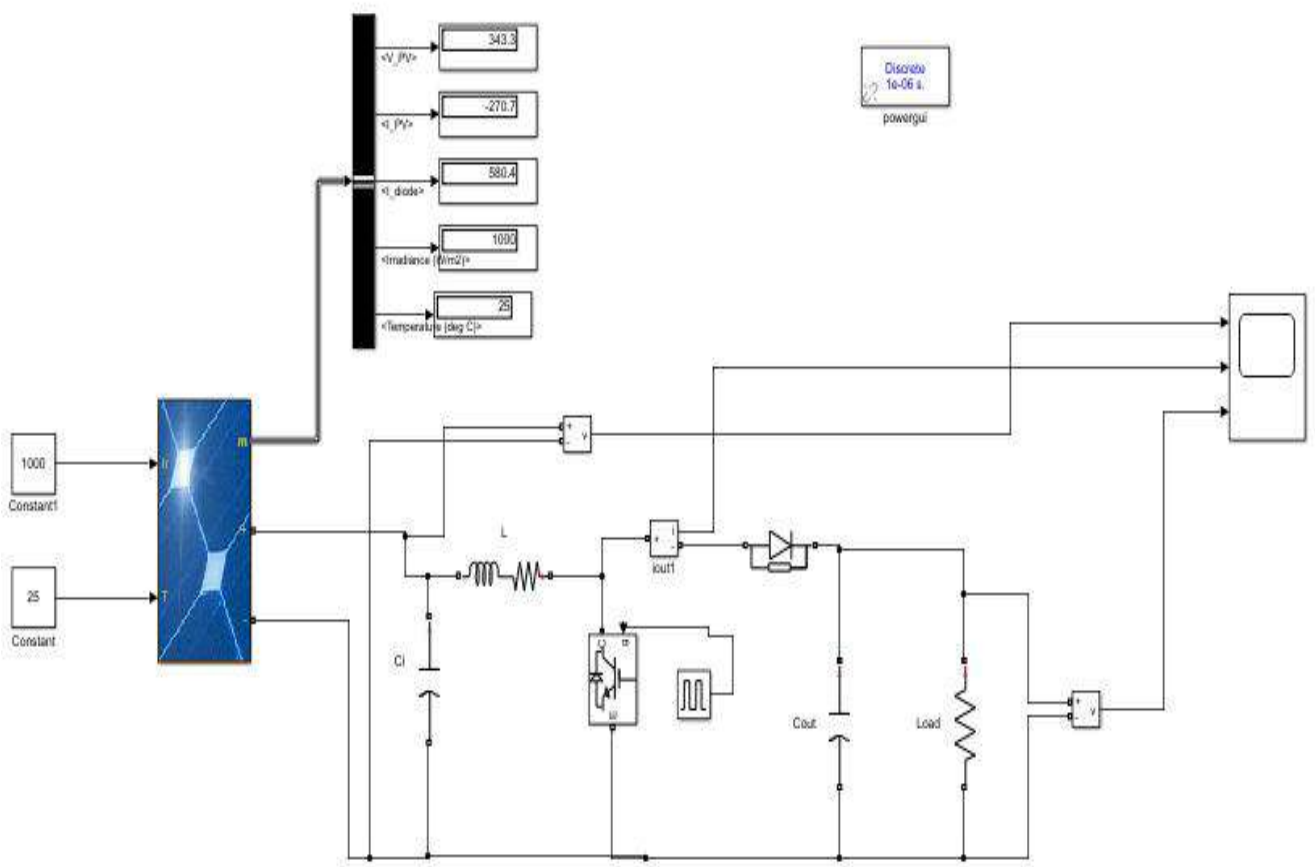


Figure.I.19.Schéma de simulation du GPV et Boost

### 11.1 Fonctionnement dans des conditions normales et stables

Nous étudions dans cette partie de travail les simulations de GPV et BOOST dans les conditions normales et constante (éclairage 1000W m<sup>2</sup> et température 25 ° C). Les figures suivantes présentent les résultats de simulation obtenus pour la puissance, le courant et la tension dans l'alimentation et la sortie du système.

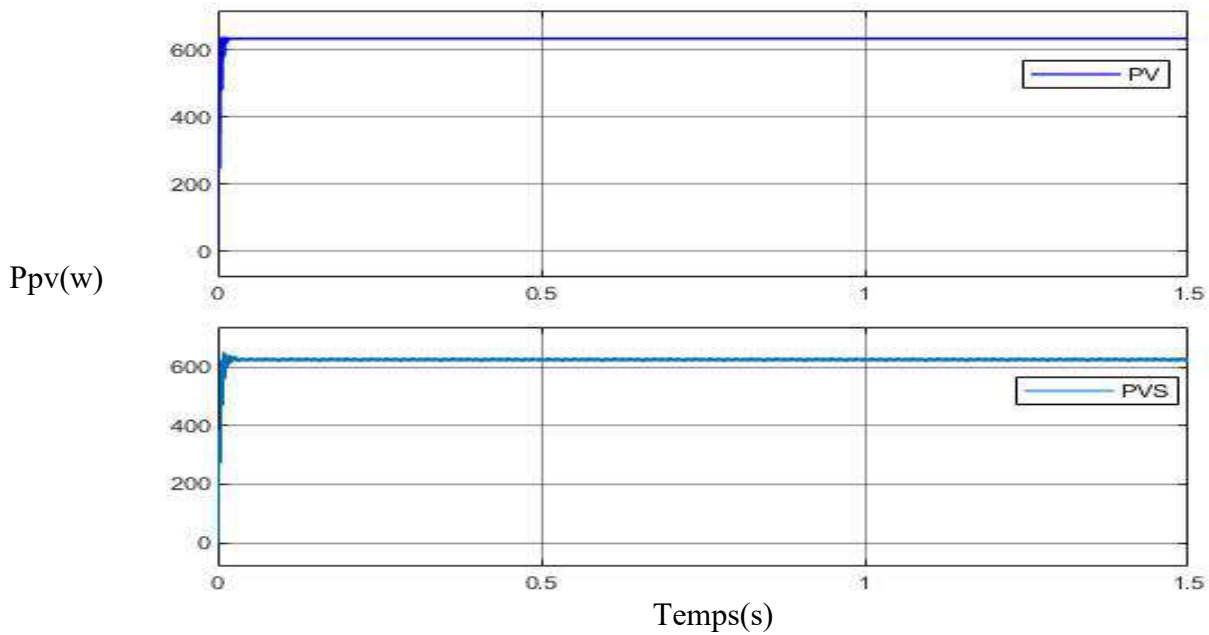


Figure .I.20.Allurede la puissance en entrée et sortie du système.

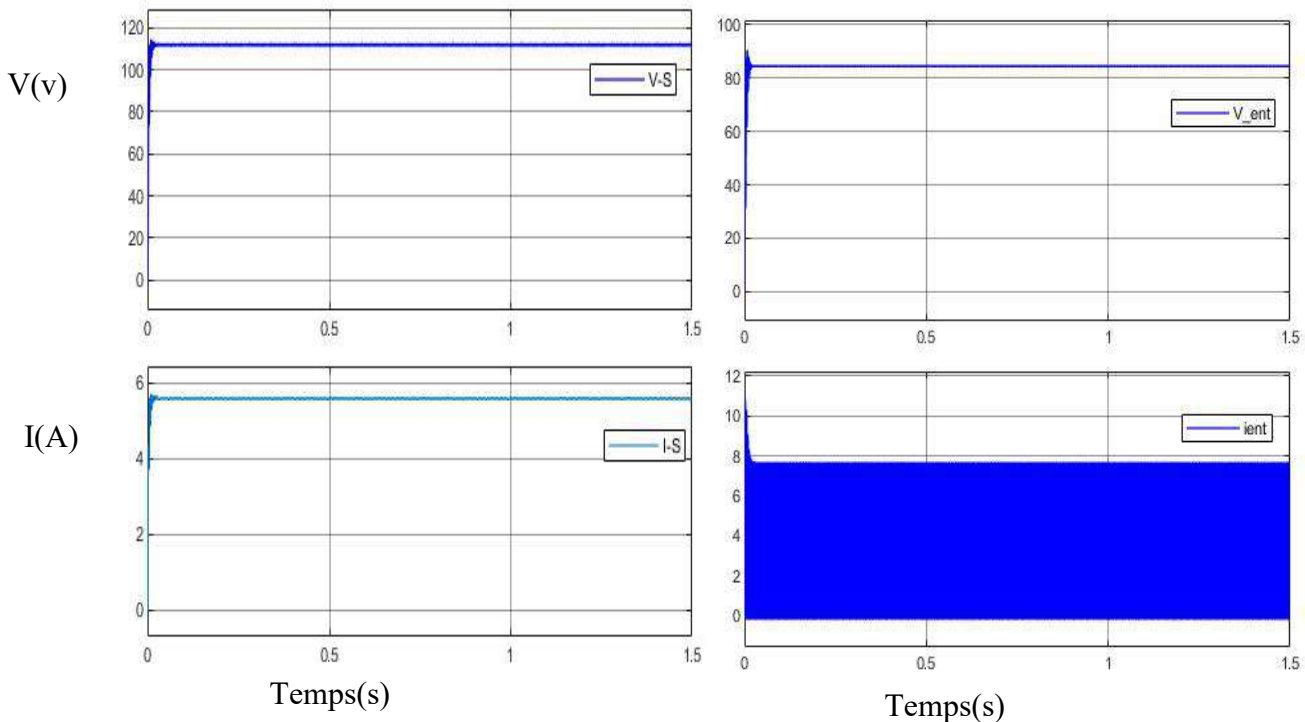
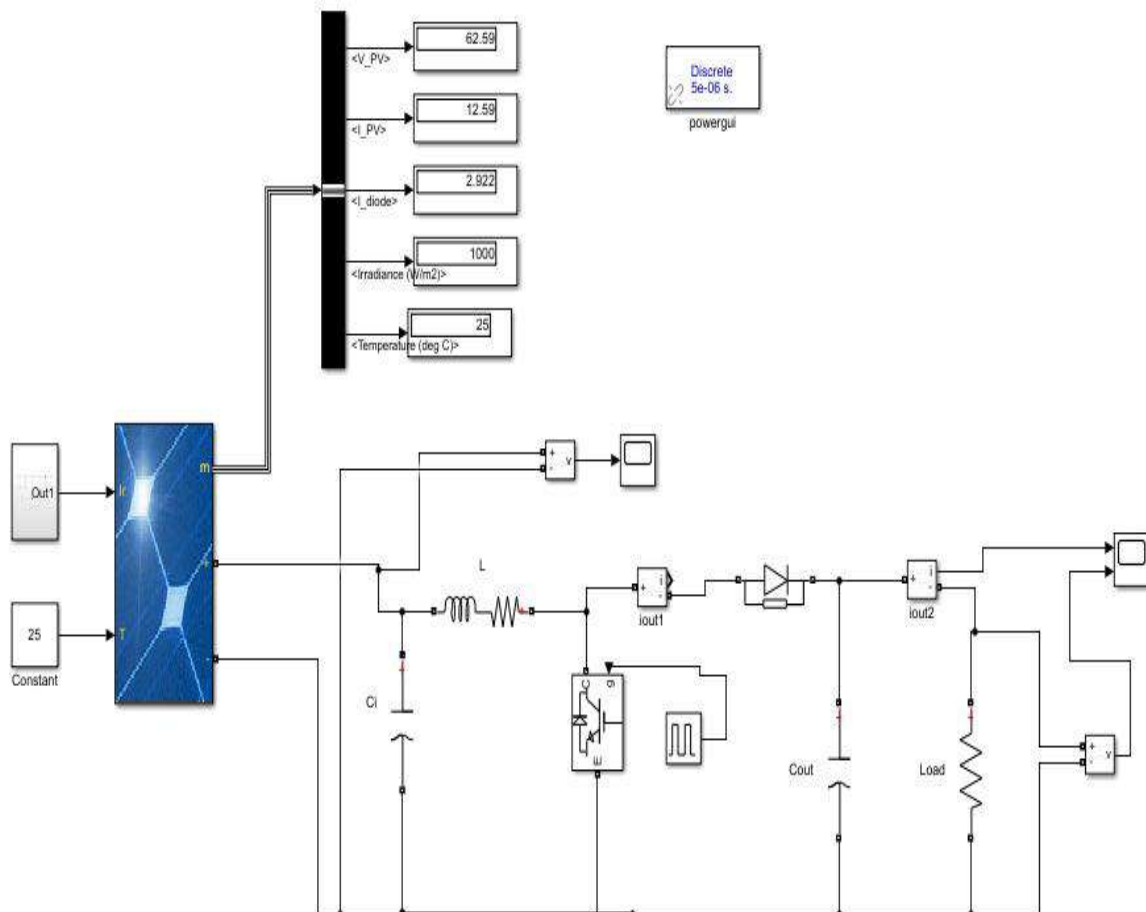


Figure .I.21.Allure de P(t),V(t),et I(t) en entrée et sortie du système

## 11.2 Fonctionnement sous des conditions climatiques variables

### 11.2.1 Eclairage variable

Nous étudions dans cette seconde partie du travail, le cas où la température est constante 25°C et l'éclairage variable (1000 W/m<sup>2</sup>, 900W/m<sup>2</sup>, 800W/m<sup>2</sup>, 500W/m<sup>2</sup>, 1000W/m<sup>2</sup>). Les résultats obtenus sont donnés dans les courbes qui suit :



**Figure.I.22.**Schéma de Simulation de GPV et Boost pour un éclairage variable

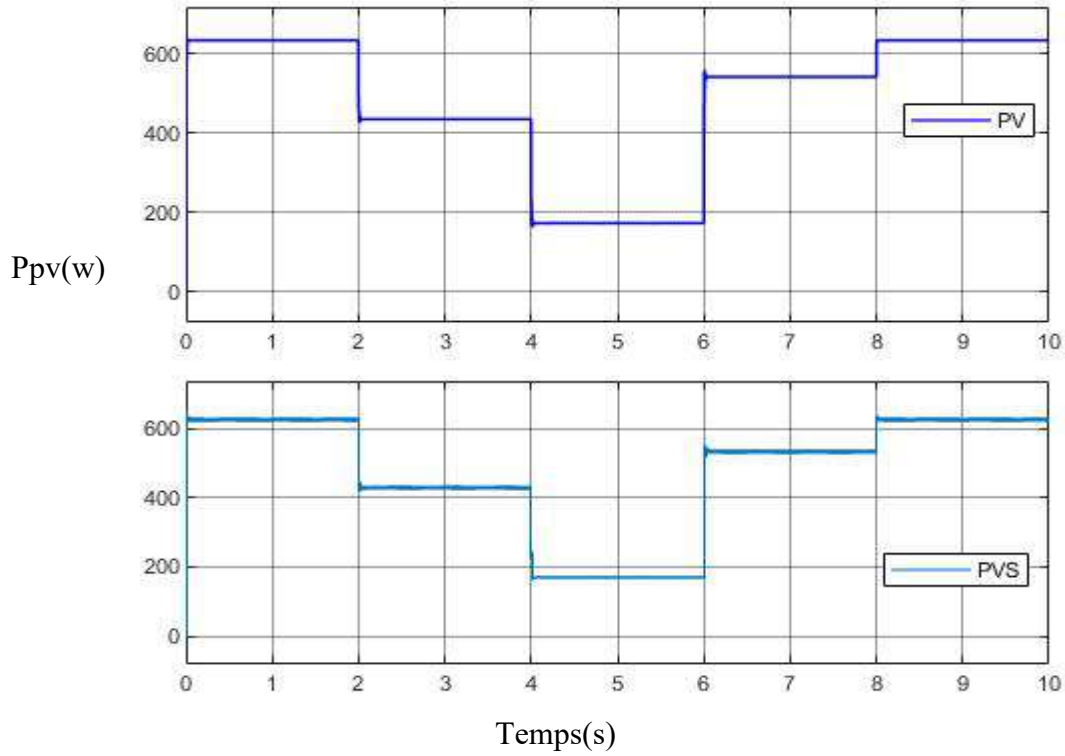


Figure .I.23.Allure de la puissance en entrée et sortie du système.

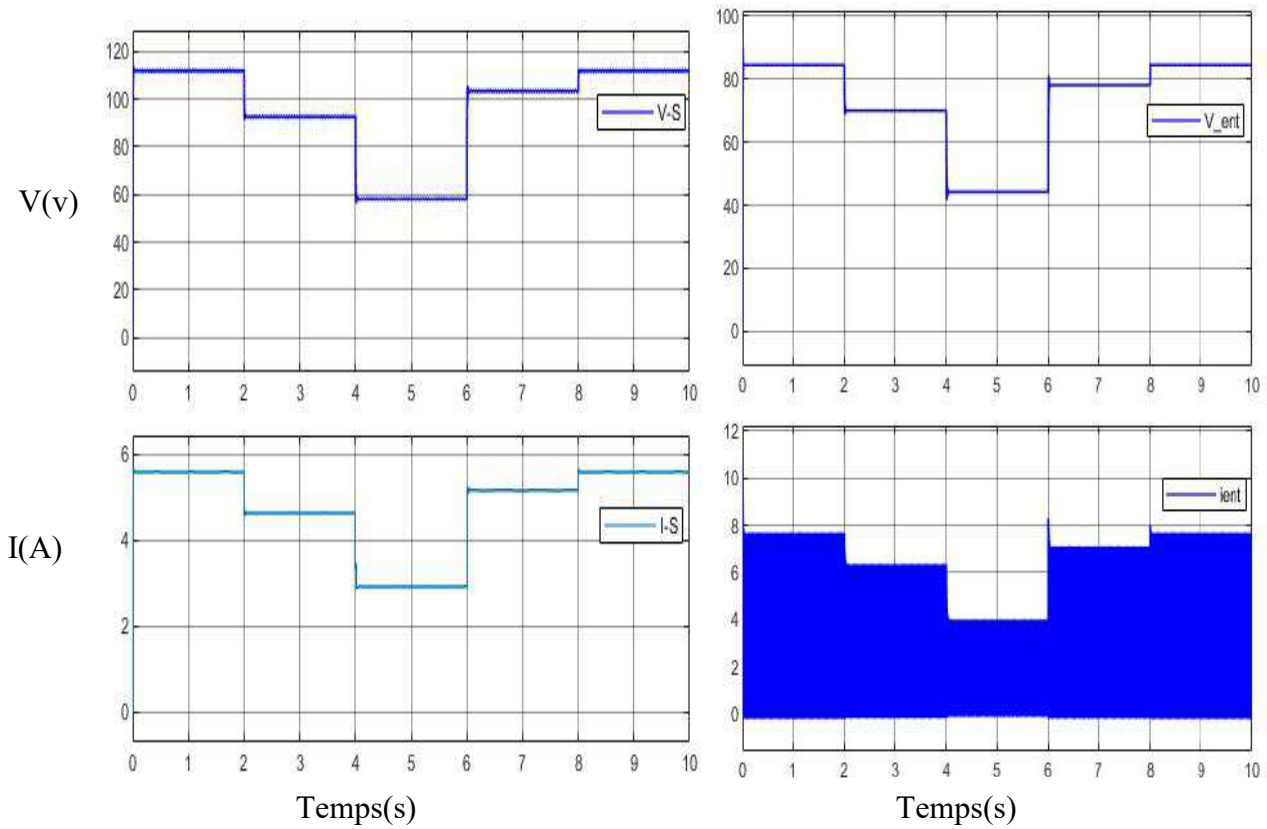


Figure .I.24.Allures de  $V(t)$ , et  $I(t)$  en entrée et sortie du système

### 11.2.2 Température variable

Dans cette troisième étape nous étudions le processus inverse où on varie la température (25°C, 20°C, 35°C, 45°C, 25°C), on fixe l'éclairement fixe à 1000W/m<sup>2</sup>, alors les résultats obtenus sont présentés dans les courbes suivantes :

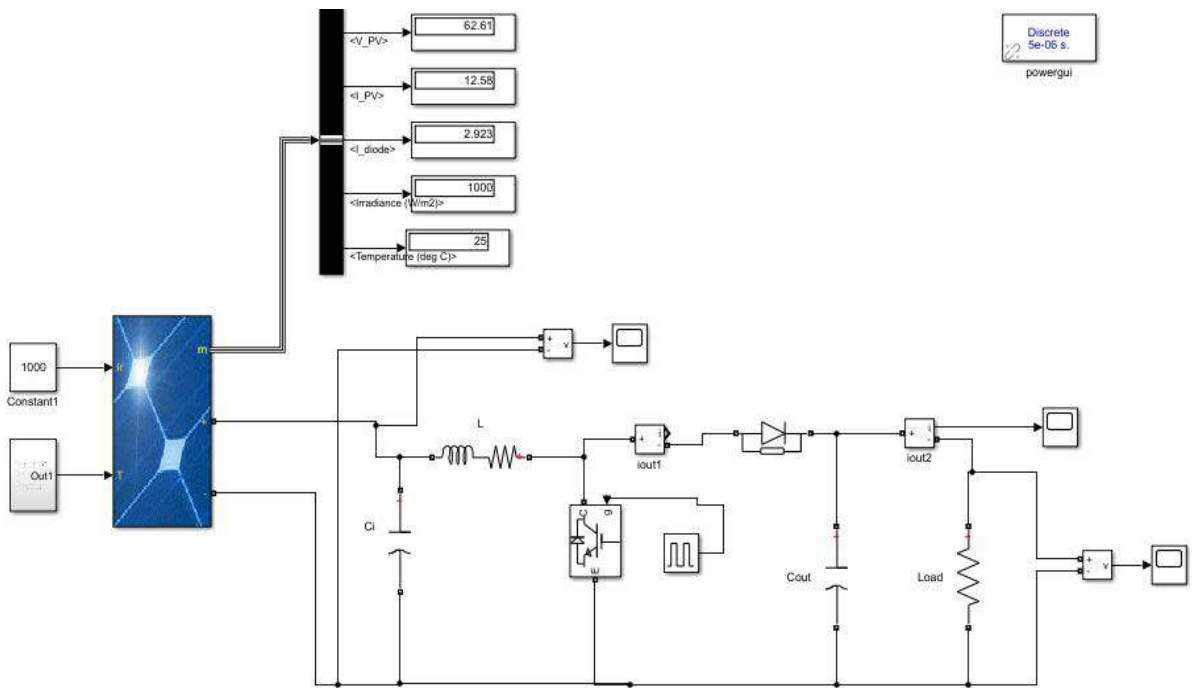


Figure.I.25. Schéma de simulation de GPV et Boost dans un état Température variable

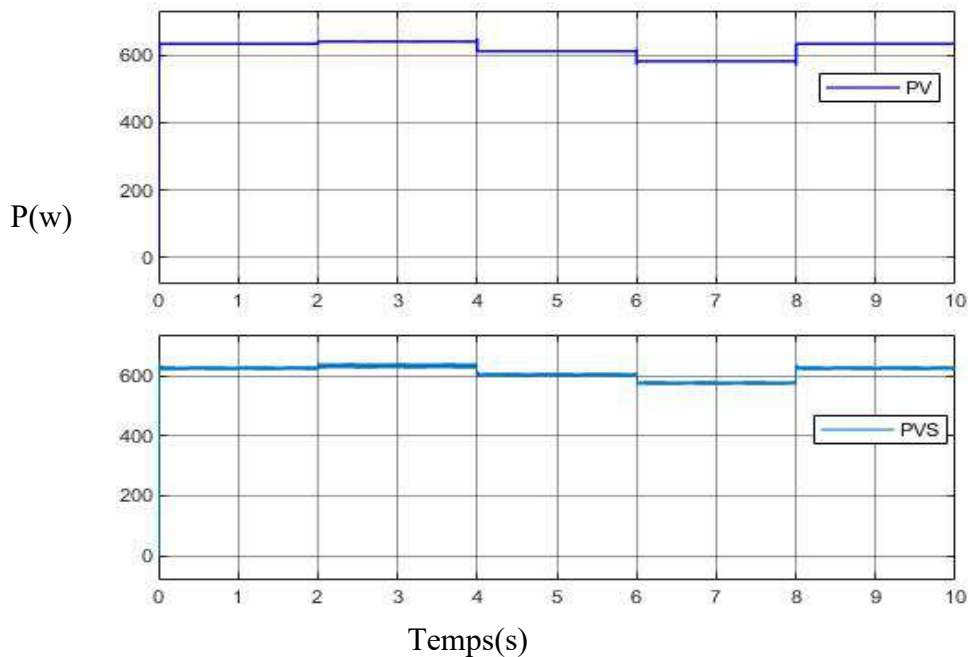


Figure .I.26. Allure de la puissance en entrée et sortie du système

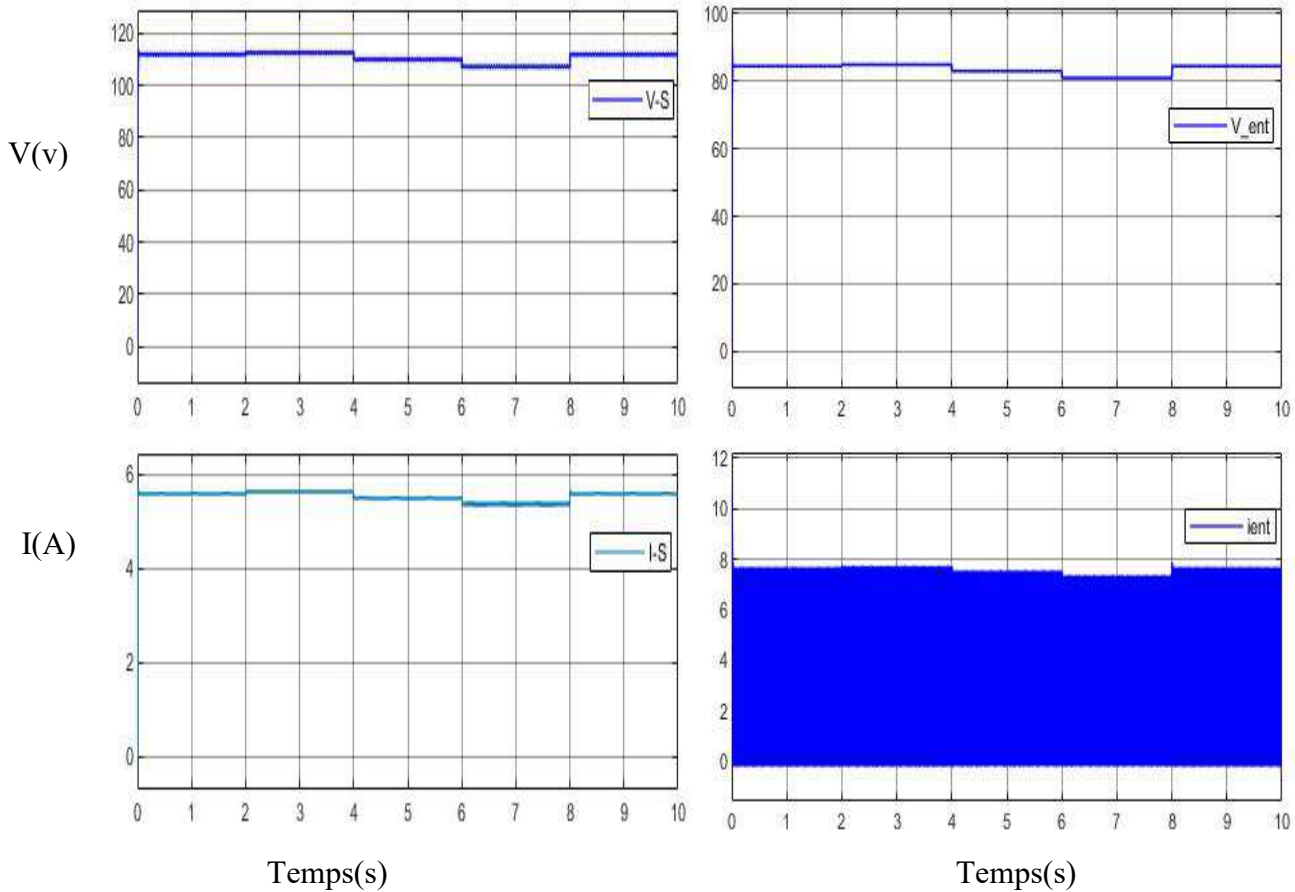


Figure .I.27. Allures de  $V(t)$  et  $I(t)$  en entrée et sortie du système

## 12. Analyse des résultats de simulation

D'après les caractéristiques obtenues pour différentes simulations précédentes, on peut dire que l'hacheur Boost fournit une tension de sortie plus élevée que la tension du générateur photoélectrique. Donc l'hacheur Boost a accompli correctement son rôle.

Notez que plus la température est élevée, plus la puissance des panneaux solaires diminue, comme l'illustre la figure 27 et figure 26 où elle montre l'impact de la température sur la puissance.

Pour l'éclairage, nous remarquons une augmentation de la puissance de panneau en fonction de l'augmentation de l'éclairage.

### **13. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons traité différents cas de fonctionnement du panneau solaire pour le changement de température et l'éclairage et l'impact de la variation de ces deux paramètres sur la puissance du panneau même en présence d'un hacheur Boost.

Dans le chapitre suivant nous allons entamer la commande MPPT pour améliorer les performances de notre système photovoltaïque



**Chapitre II**  
**Commande MPPT**



## 1. Introduction

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{ppm}$  et  $I_{ppm}$ ). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [22]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure ci-dessous .

Dans ce chapitre, nous étudions la MPPT et son algorithme ainsi que l'effet de l'ombre sur le MPP. Nous intéressons à l'utilisation de l'algorithme P&O pour la détermination de MPPT. Nous utiliserons le logiciel MATLAB/Simulink pour effectuer l'analyse de cet algorithme.

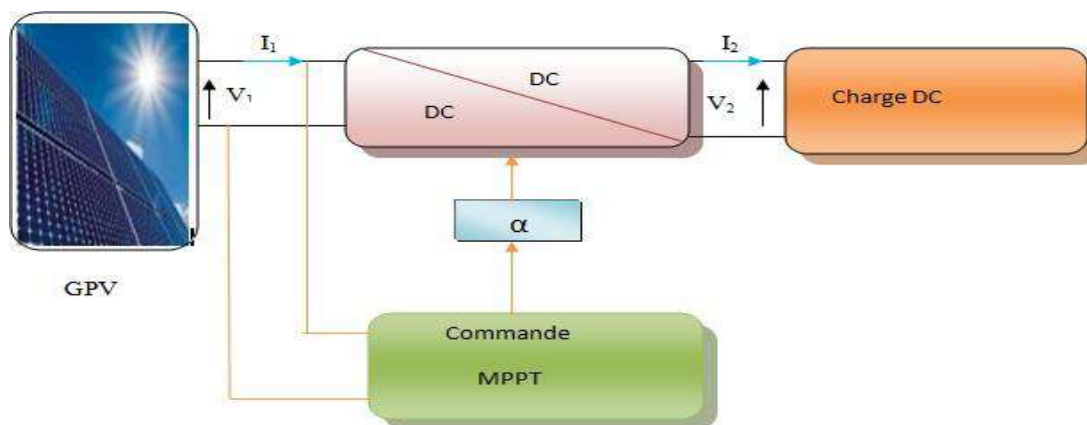


Figure .II .1. Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau [23].

## 2. Technique de commande de MPPT de GPV

### 2.1 Principe de la technique d'extraction du maximum de la puissance

La technique MPPT est en principe permet de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant [24].

## 2.2 Classification des commandes MPPT

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [25].

## 2.3 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

### ➤ MPPT indirecte :

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{SC}$  ou  $V_{oc}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc... [26]

### ➤ MPPT Directe:

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV est indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance (Inc) ... [26].

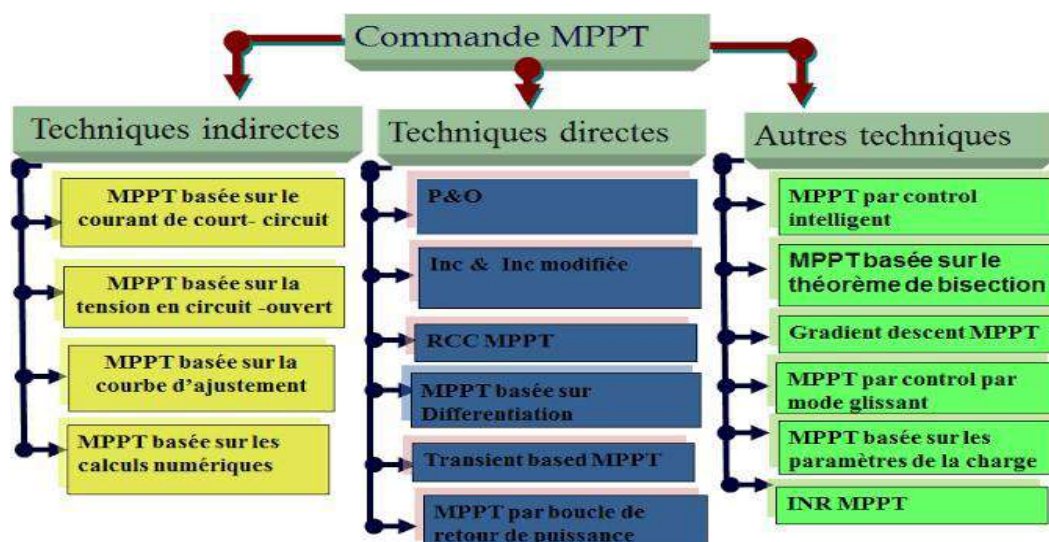


Figure.II.2.Organigramme de classification des commandes MPPT [26].

### 3. Algorithme de Poursuite du point de puissance maximale d'un système MPPT

Les paramètres environnementaux, telles que; l'ensoleillement, la température, la couverture nuageuse affectent la puissance maximale délivrée par un générateur photovoltaïque (GPV). La valeur de cette puissance n'est pas constante et fixe, mais varie en fonction des conditions météorologiques[27].

Afin d'optimiser l'extraction de la puissance maximale, il est indispensable de mettre en place un algorithme de poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking - MPPT) qui ajuste de manière dynamique l'extraction de la puissance. La rapidité de convergence est l'une des caractéristiques primordiales parmi les divers algorithmes MPPT disponibles[27].

#### 3.1 Méthode dite « Perturbation et Observation » ou P&O

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle  $P(k)$  du Panneau est supérieure à la valeur précédente  $P(k-1)$ , alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent [27].

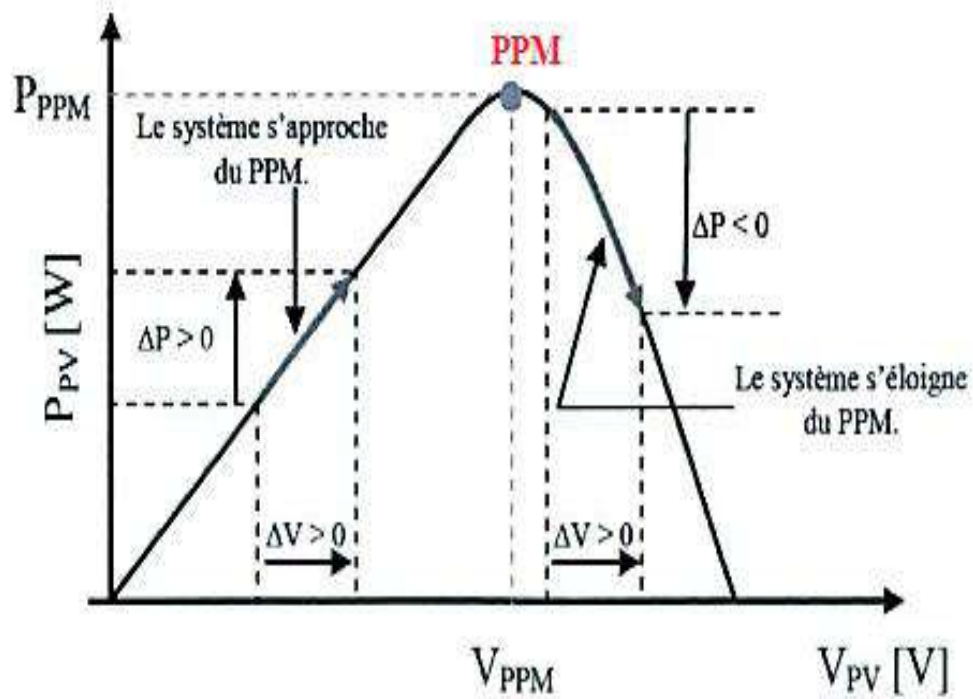


Figure II.3. Caractéristique P-V et fonctionnement de la technique P&O [28].

### 3.2 Fonctionnement de l'algorithme P&O

La figure suivante montre d'algorithme P&O

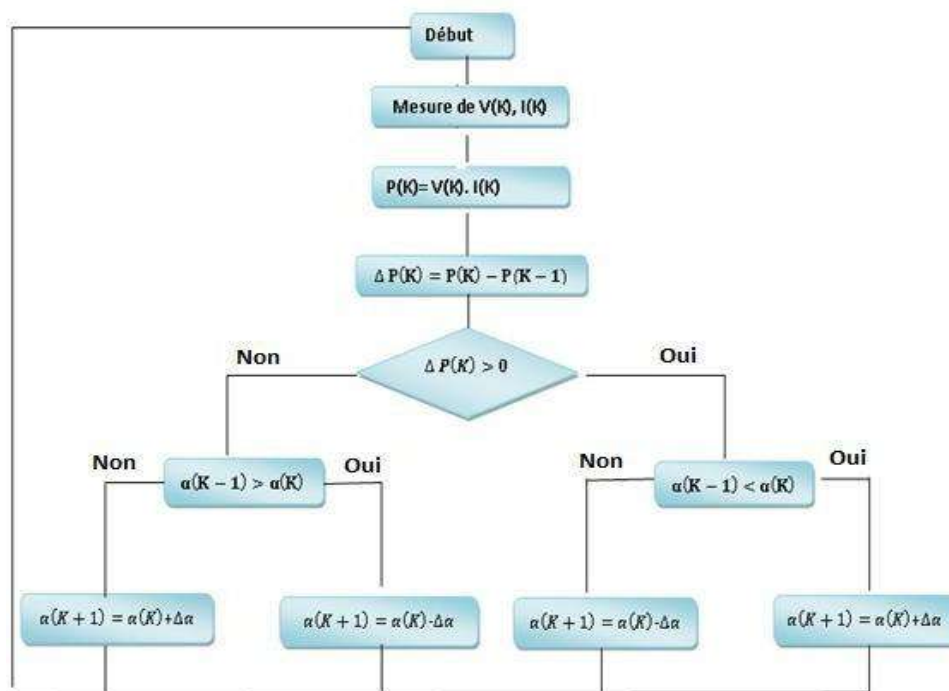


Figure II.4. Algorithme MPPT dite « perturbation et observation (P&O) » [27].

### 3.3 Méthode d'incrémentation de la conductance

L'algorithme d'incrémentation de la conductance est basé sur le fait que le point de puissance maximale (MPP) n'est atteint que si  $\frac{dP}{dV} = 0$ . D'après la caractéristique P-V on peut montrer les trois cas suivants :

Si  $\frac{dP}{dV} > 0$  : le point de fonctionnement est à gauche du PPM ( $V < V_{mpp}$ )

Si  $\frac{dP}{dV} < 0$  : le point de fonctionnement est à droite du PPM ( $V > V_{mpp}$ )

Si  $\frac{dP}{dV} = 0$  : le point de fonctionnement est sur le PPM ( $V = V_{mpp}$ )

Pour le MPP on a:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (\text{II.1})$$

$$I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = 0 \Rightarrow V \frac{dI}{dV} = -I \Rightarrow \frac{I}{V} = - \frac{dI}{dV} \quad (\text{II.2})$$

On note

$$\frac{I}{V} = G : \text{c'est la conductance}$$

$$\frac{dI}{dV} = \Delta G : \text{c'est l'incrément de la conductance}$$

Le principe de cette technique revient à la comparaison entre la conductance et l'incrément de la conductance. La figure et l'organigramme présentés ci-dessous résument la cette technique

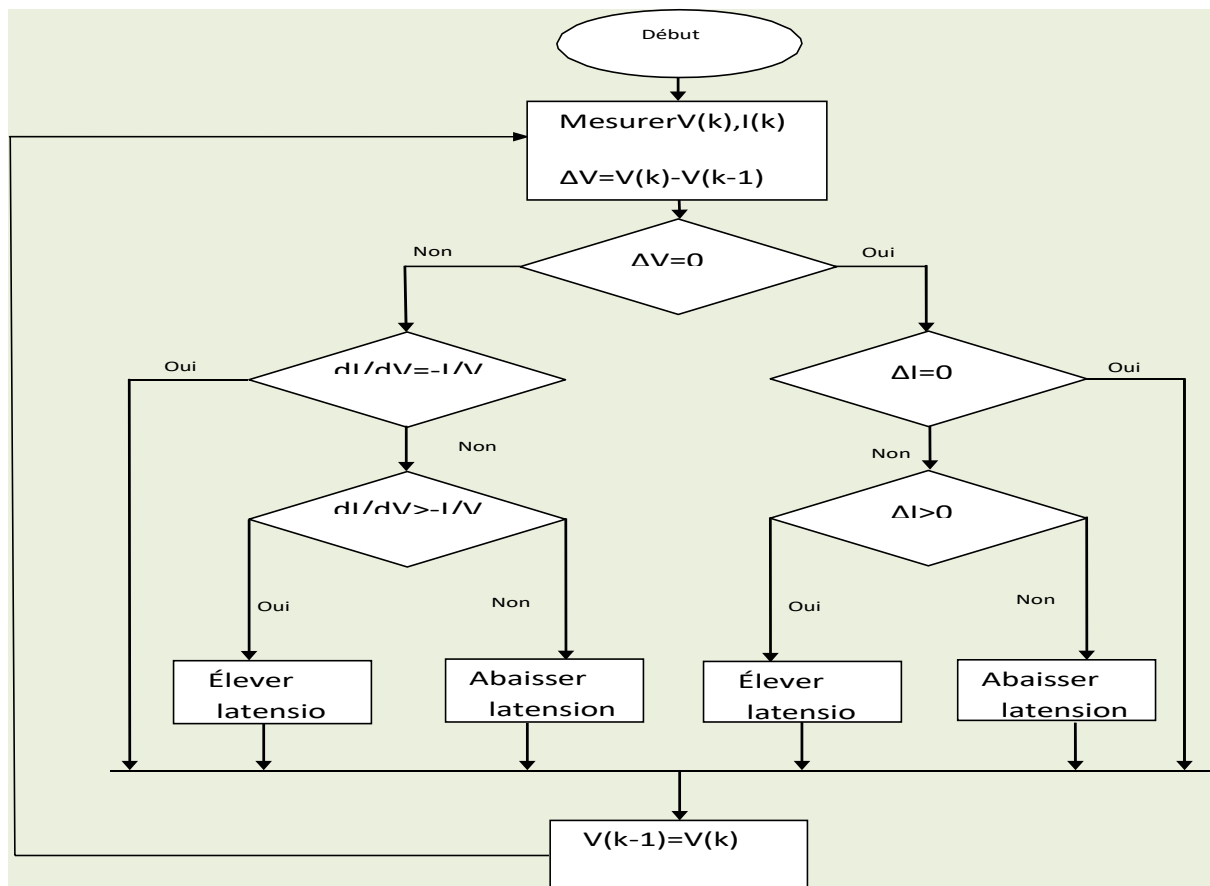
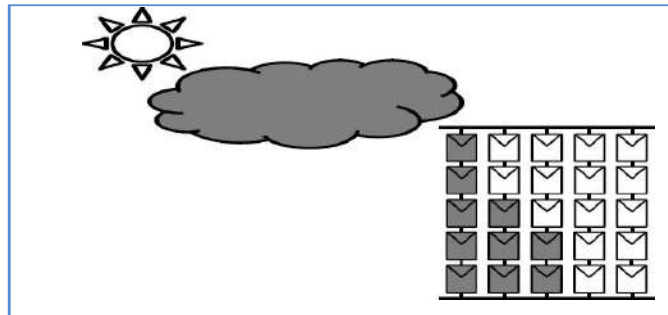


Figure.II.5.Organigramme de la technique de la conductance incrémentale [29] .

#### 4. Description de l'ombrage

Il se peut qu'un obstacle, de quelque nature qu'il soit (bâtiment, arbre, etc.) fasse de l'ombre aux panneaux solaires. Un ombrage sur les capteurs photovoltaïques entraîne une perte de production d'énergie. Cette perte de production varie en fonction de la taille et de la densité de l'obstacle. Mieux vaut quantifier l'importance de la perte avant d'entreprendre de poser ses panneaux photovoltaïques . On peut distinguer deux types d'ombrages: l'ombrage partiel et l'ombrage total.

On appelle ombrage total ou complet ce qui vient couvrir le panneau (couverture, branche cassée, saleté de toute nature, etc.). L'ombrage partiel laisse passer en partie les rayons du soleil. Il faut savoir que les cellules photovoltaïques sont montées en série. La cellule la plus faible va donc avoir un impact sur le rendement des autres cellules. Ainsi, l'ombrage total d'une rangée de cellules peut rendre l'ensemble du module photovoltaïque inefficace. Toutefois, les panneaux photovoltaïques sont aujourd'hui équipés de diodes by-pass, ce qui permet de limiter l'impact d'une ombre sur une partie du panneau . Par exemple pour un panneau équipé d'un jeu de 3 diodes by-pass, si une ombre affecte une cellule alors la série de cellules branchée sur la même diode by-pass est court-circuitée et le reste du panneau continue de produire [30].

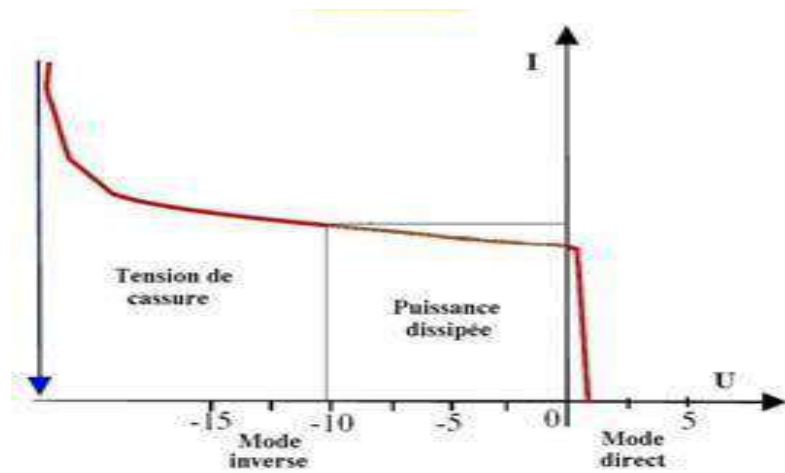


**Figure .II.6.**GPV dans des conditions partiellement ombragés causés par le passage de nuages[30].

### 5. Phénomène d'ombrage sur les modules photovoltaïques

Additionner les tensions dans le cas d'un assemblage série de cellules PV est aisé, si toutes les cellules sont identiques et qu'elles travaillent sous les mêmes conditions d'ensoleillement et de température. Mais, comme nous l'avons précisé précédemment, dans les conditions réelles de fonctionnement, si les cellules sont légèrement différentes ou ne sont pas uniformément éclairées, le comportement électrique n'est pas facilement prévisible et dépend des caractéristiques de chaque cellule et des conditions d'éclairement. Plusieurs études ont présenté des modèles mathématiques afin de calculer les effets de cellules non-identiques dans un module[31].

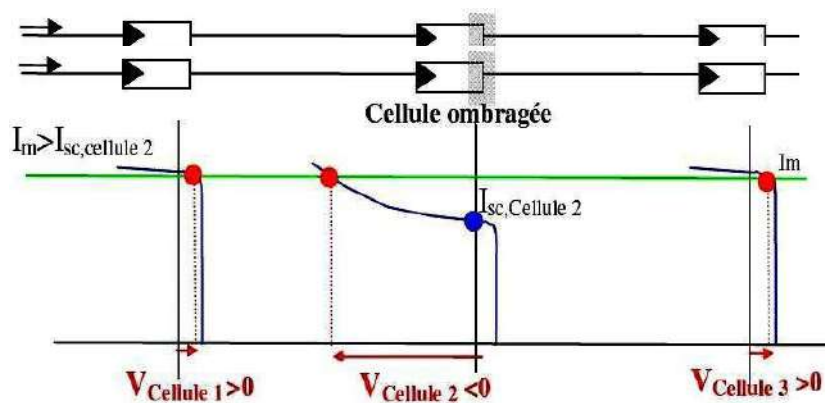
La Figure 6 montre la caractéristique I–V d'une cellule PV dans toute sa gamme de tension. On constate que si, pour un éclairement solaire et une température ambiante donnés, le courant traversant une cellule est supérieur à son courant de court-circuit, alors la cellule fonctionnera en mode inverse (reverse- bias conditions) avec une tension négative. Dans ce cas, la puissance excessive sera dissipée, sous forme de chaleur dans la cellule ombragée et la cellule ou l'encapsulation de la cellule peuvent être irrémédiablement endommagée. Cet effet est appelé 'hot spot' ou « point chaud »[31].



**Figure .II.7.**Caractéristique I –V d’une cellule PV[31].

Dans le domaine en sens direct (mode normal de fonctionnement), la tension de circuit ouvert de la cellule est de l’ordre de 0,6 V pour les cellules cristallines alors que dans le sens inversé (polarisation inversée), les tensions peuvent atteindre plus de – 20 V pour le cas du silicium[31].

Dans un assemblage série, le courant est le même dans toutes les cellules. Si le courant de la rangée est plus grand que le photo-courant de la cellule ombragée (courant de court-circuit), ce qui se produit dans la plupart des cas, cette cellule ombragée se met à fonctionner en mode inversé et dissipe de la puissance. Une telle situation est illustrée sur la Figure II.2 dans le cas de trois cellules connectées en série[31].



**Figure .II.8.** Caractéristiques des cellules PV pour un courant donné  $I_m$  en présence d’ombrage[31].



Si la rangée de cellules travaille à un point de fonctionnement correspondant à un courant  $I_m$  au-delà du courant de court-circuit de la cellule ombragée (cellule 2), le point de fonctionnement du module correspond à une tension négative aux bornes de la cellule ombragée (cellule 2), ce qui permet de dissiper de l'énergie[31].

Pour résoudre ce problème, on utilise une diode de dérivation (by-pass diode) connectée en parallèle sur chaque connexion série des multiples cellules PV. Si une telle diode by-pass était connectée dans chaque cellule alors le problème induit par l'ombrage serait fortement réduit. Cependant, Ce n'est pas une solution envisageable d'un point de vue commercial [31].

### **5.1 Maximisation de la production des systèmes solaires photovoltaïques en présence d'ombrages partiels**

Nous désignons par système photovoltaïque l'ensemble des éléments constituant une application industrielle ou domestique tirant tout ou partie de son énergie électrique d'un générateur photovoltaïque. Plusieurs approches ont été développées dans le but de minimiser l'impact des ombrages partiels sur la production des systèmes photovoltaïques. Les algorithmes de maximisation intelligents constituent la solution la moins chère par rapport aux autres approches. Les autres méthodes concernent : les différentes configurations optimales des champs solaires, les stratégies de commande des convertisseurs DC-AC et leurs topologies lorsqu'ils sont connectés au réseau électrique. Ainsi le choix d'une solution par rapport à une autre ou la combinaison de ces solutions doit s'effectuer par analyse du système photovoltaïque concerné. La facilité de mise en œuvre et le coût sont aussi des impératifs à prendre en compte [32].

### **6. Simulation d'ombrage:**

Nous connectons trois panneaux solaires à une séquence d'ombrage où la valeur de puissance potentielle de chaque panneau est 213,15 W, donc la valeur de puissance potentielle totale est 639,45 W. Lorsque deux panneaux solaires sont exposés à l'ombre, il y aura une diminution de la puissance en raison de l'ombrage. Pour confirmer ce phénomène, nous utilisons le schéma de simulation réalisé sous Matlab/simulink suivant :

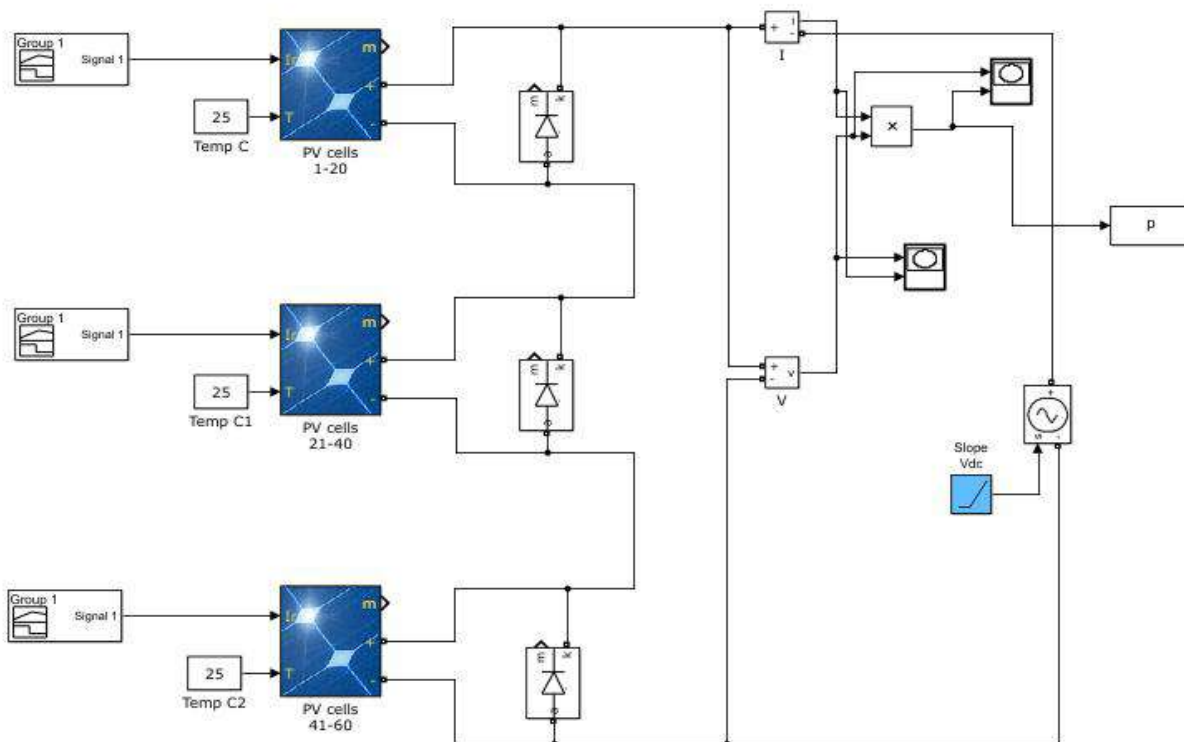
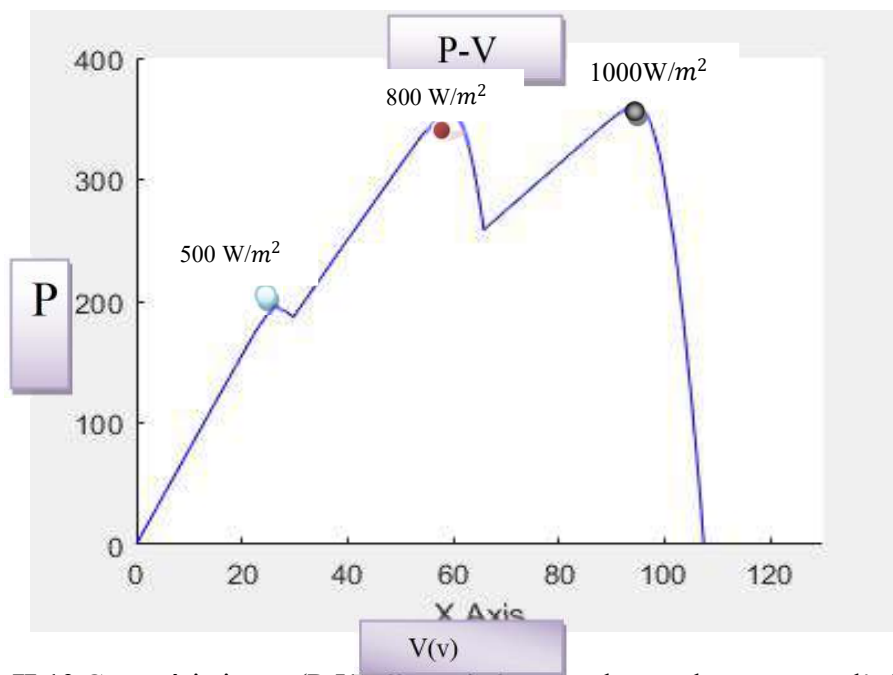


Figure II.9. Schéma bloc de trois modules en série

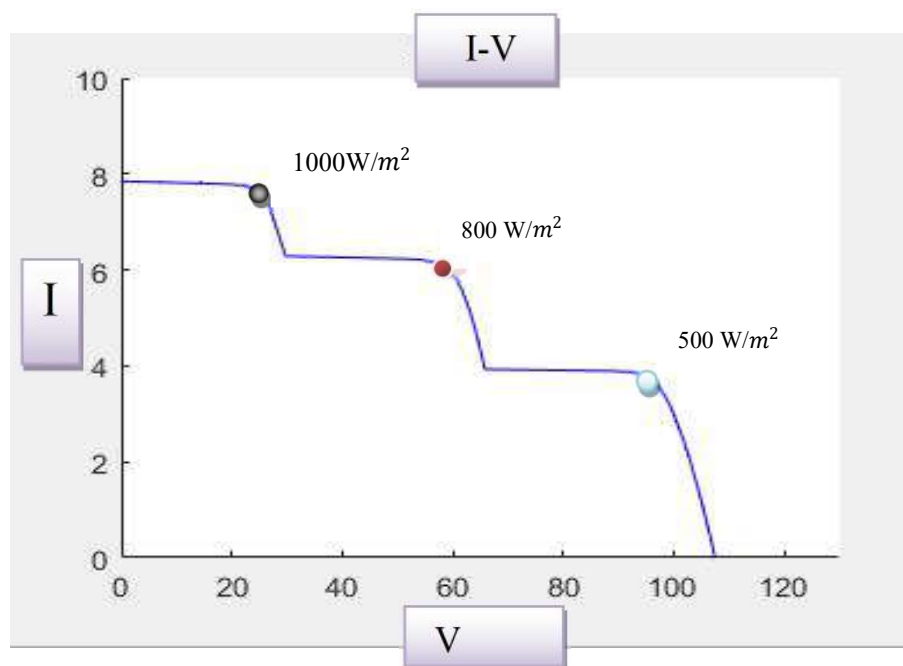
### 6.1 Résultats

Durant ce test, deux panneaux solaires sont ombrés en même temps. La caractéristique P-V obtenue, est donnée par la figure suivante. Nous remarquons l'apparition de trois points d'énergie maximum dont ces valeurs sont  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ,  $800\text{W}/\text{m}^2$  et  $500\text{W}/\text{m}^2$ . On constate une diminution de la valeur du potentiel de puissance à chacun des points représentés sur la figure en raison de l'exposition du panneau à l'ombre, où pour l'éclairement idéal de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , la valeur de puissance égale à  $350\text{W}$ , pour l'éclairement  $800\text{W}/\text{m}^2$ , la valeur de puissance est égale à  $300\text{W}$ , et pour l'éclairement  $500\text{W}/\text{m}^2$ , la valeur de puissance est devenue égale à  $200\text{W}$ , en raison de l'exposition de deux panneaux solaires à l'ombre.



**Figure.II.10.**Caractéristiques (P-V) d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage.

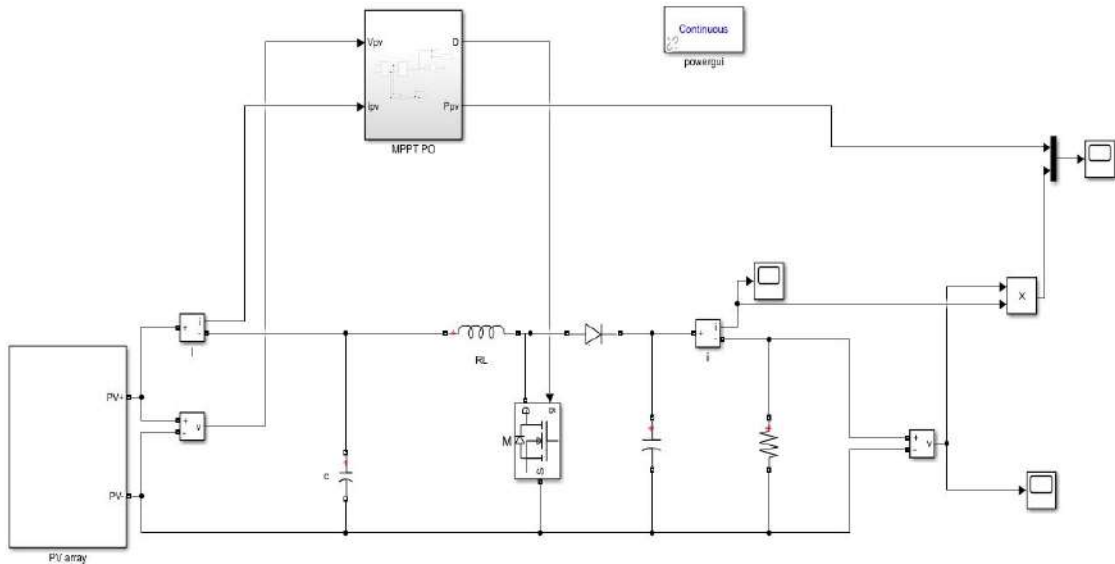
La figure suivante montre la variation de courant en fonction de variation de l'éclairement. Il est clair de remarquer que, plus l'éclairement augmente plus le courant augmente aussi.



**Figure .II.11.**Caractéristiques(I-V)d'un générateur photovoltaïque sous l'effet d'ombrage

### 7. Schéma de simulation global

La figure suivante représente le schéma de simulation du système photovoltaïque qu'on étudié réalisé sous MATLAB/Simulink. Le système photovoltaïque est composé d'une cellule PV, convertisseur BOOST et une charge (résistance). La commande MPPT qu'on a utilisé est de type PO. Le bloc PPT est utilisé dans la simulation pour générer la technique MPPT.

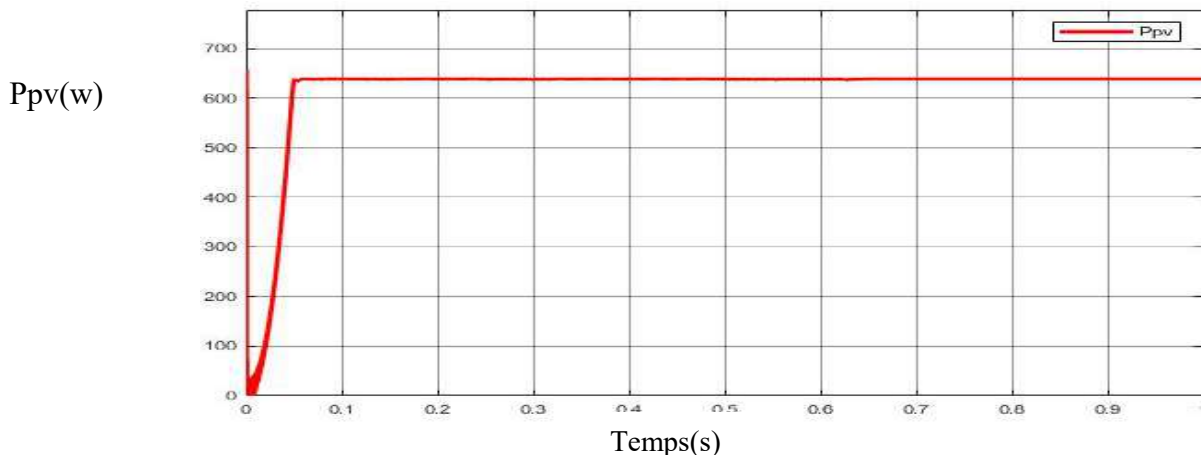


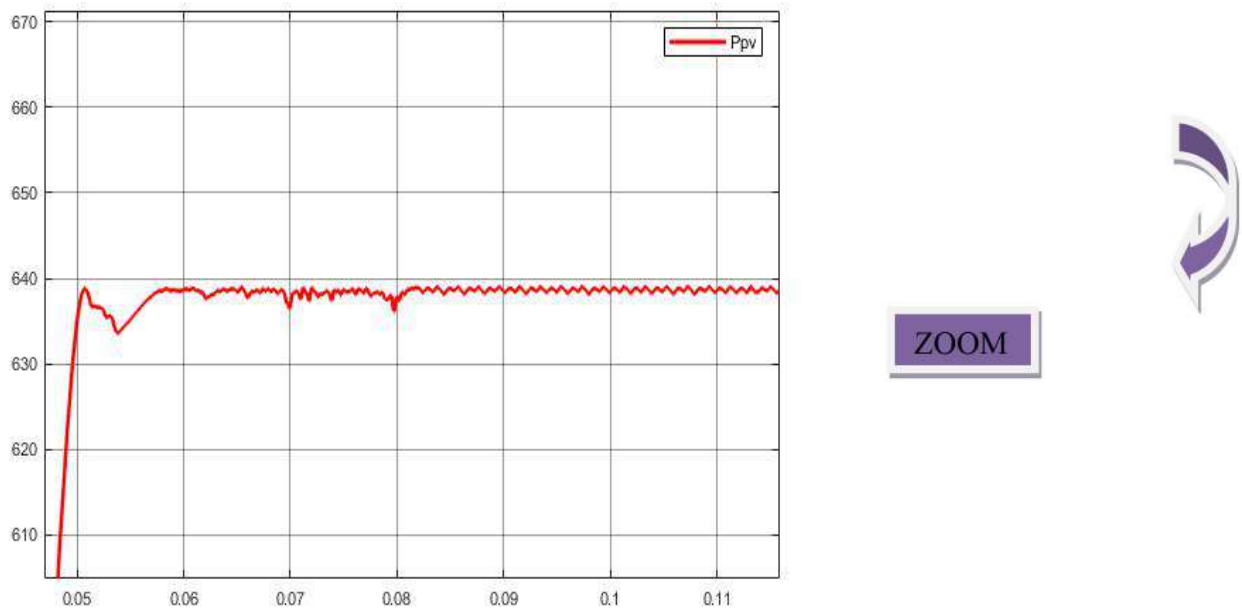
**Figure.II.12.**Schéma de simulation du système photovoltaïque étudié.

#### 7.1 Résultats de simulation

Dans une première étape, nous avons simulé notre système dans des conditions normales de température 25 ° C et de l'éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>.

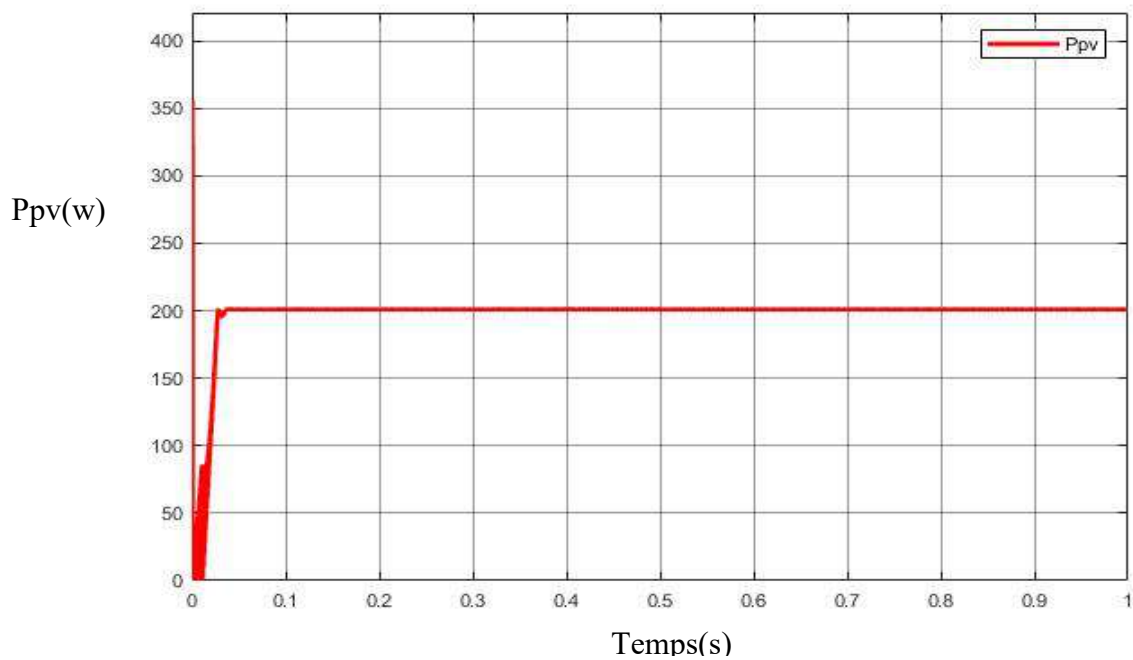
La figure suivante représente la puissance photovoltaïque en fonction du temps.

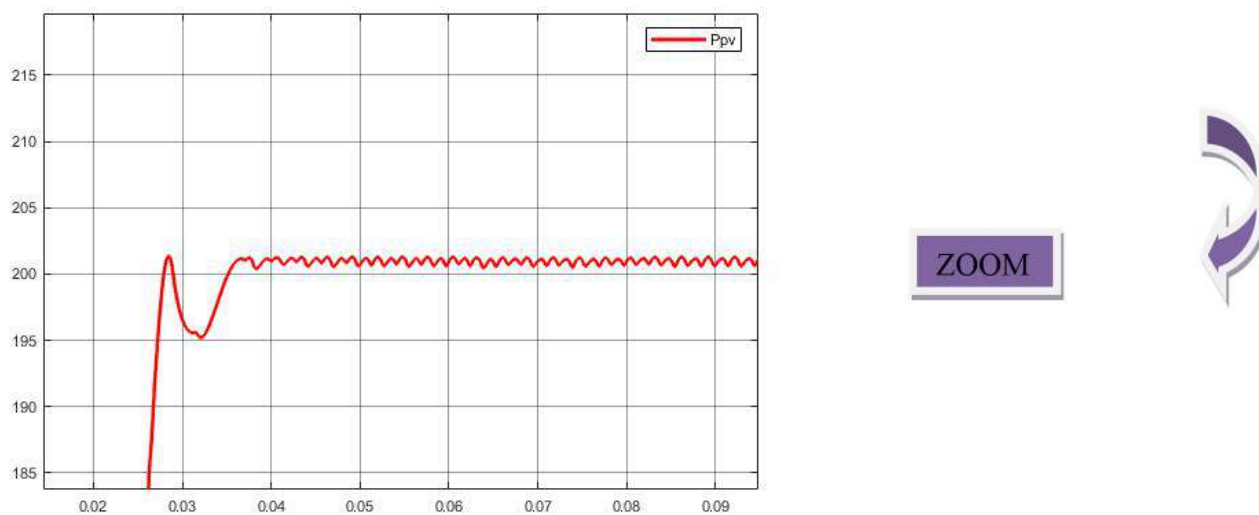




**Figure .II.13.** Allure de la puissance PVd'un générateur photovoltaïque dans des conditions normales de température et de l'éclairément.

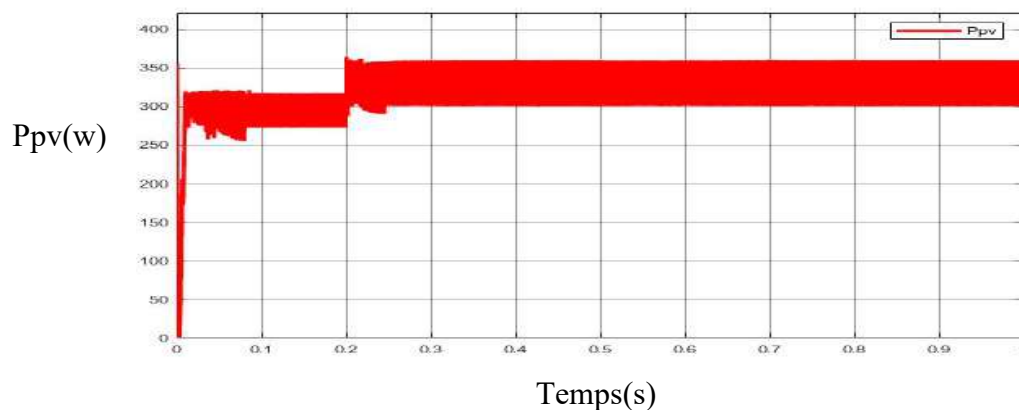
Dans une deuxième étape, nous avons testé l'effet de l'ombrage des panneaux solaires sur notre système. La figure suivante représente l'effet de l'ombrage du panneau solaire.



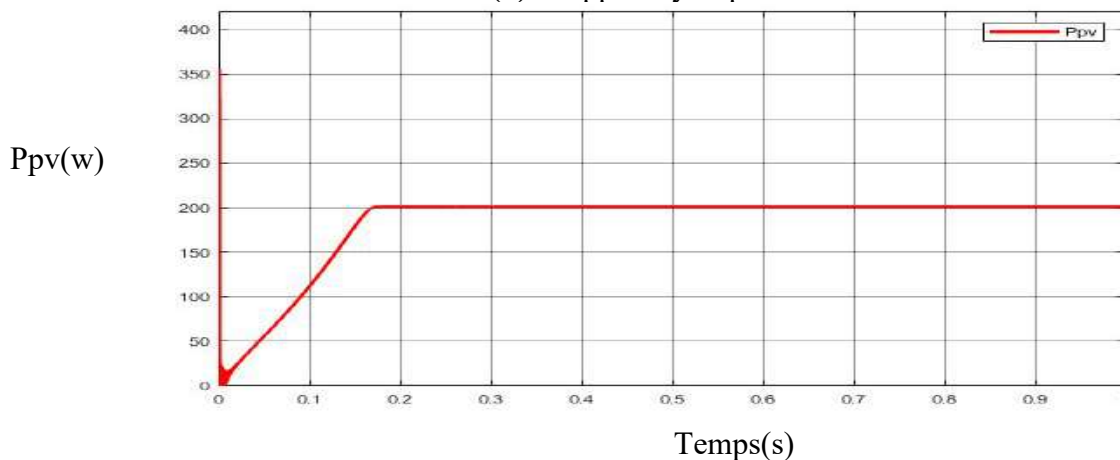


**Figure .II.14.** Allure de la puissance photovoltaïque PV d’un générateur photovoltaïque en considérant l’effctd’ombrage.

Dans une troisième étape, nous avons appliqué l’ombre pour des rapport cycliques de  $10^{-2}$ s et de  $10^{-4}$  s. La puissance photovoltaïque obtenue est représentée par les deux figures suivantes :



**(a)** Rapport cyclique de  $10^{-2}$  s



**(b)** Rapport cyclique de  $10^{-4}$  s

**Figure. II.15.** Allure de la puissance PV pour deux rapports cycliques

### a. Analyse des résultats de simulation

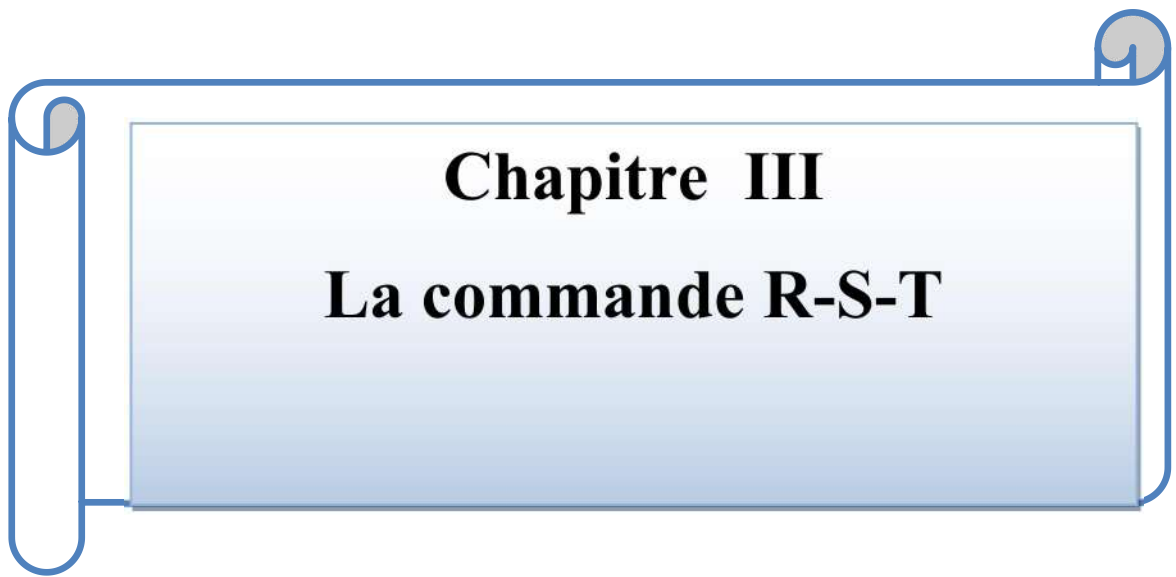
La figure (II.13) montre la puissance de la SGPV obtenue avec l'algorithme P&O. Cette figure montre la puissance de l'algorithme développé à extraire la puissance maximale possible de la SGPV. Dans ce cas, la puissance d'entrée posée du PV est d'environ 640W à 1 kW/m<sup>2</sup> a été suivi par l'algorithme durant un court temps. L'algorithme ensuite continu de faire fonctionner le panneau pour ce point (MPP) jusqu'au changement de l'éclairement.

La figure (II.14) montre un manque de puissance dû à l'ombre malgré l'algorithme P&O a déterminé un meilleur point de fonctionnement pour générer un maximum de puissance. Ce qui démontre que le point choisi n'est pas le meilleur et que l'algorithme P&O n'a pas considéré d'autres points qui peuvent donner un meilleur rendement de SGPV ainsi qu'une meilleure puissance dans la présence de l'ombre. Ceci peut être considéré comme un défaut de l'algorithme. Ainsi que la figure (II. 15) un deuxième défaut de l'algorithme. Et si D est inférieur à 1e-3, la vitesse de la courbe est rapide et les erreurs sont presque inexistantes..

## 8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé notre système photovoltaïque dans le cas fonctionnement des panneaux dans la présence de l'ombre. On a utilisé l'algorithme P&O pour déterminer le point de fonctionnement maximum des cellules photovoltaïques.

On a remarqué que l'utilisation de cette algorithme d'optimisation ne donne pas toujours le meilleur point de fonctionnement des panneaux en terme de puissance, ce qui nous a conduit de proposer un régulateur RST pour contourner ce problème. La commande RST sera l'objectif du deuxième chapitre de ce mémoire.



## **Chapitre III**

### **La commande R-S-T**



### 1. Introduction

Un correcteur RST est synthétisé par une méthode de placement de pôles algébrique. L'objectif est de donner à la boucle fermée le comportement d'un système décrit par une fonction de transfert modèle, exprimée comme une fraction rationnelle en  $Z^{-1}$ . Généralement cette fonction est du deuxième ordre, définie à partir de critères du type : amortissement, gain statique, pulsation propre, dépassement .... etc.[33].

Dans ce chapitre, nous allons étudier le contrôle numérique de R-S-T et les méthodes de calcul des paramètres R, S et T. Nous allons aussi vérifier les performances de ce type de contrôle pour la régulation de la tension de l'hacheur Boost dans le cas de l'ombrage des cellules photovoltaïque de notre système.

### 2. Présentation de la commande RST

Le schéma de régulation utilisé correspond à la figure.1 et permet une meilleure exploitation des possibilités de la commande numérique que l'utilisation d'un simple PID, avec une approche permettant une mise en œuvre aisée sur calculateur numérique (automates, microcontrôleurs etc.....)[34].

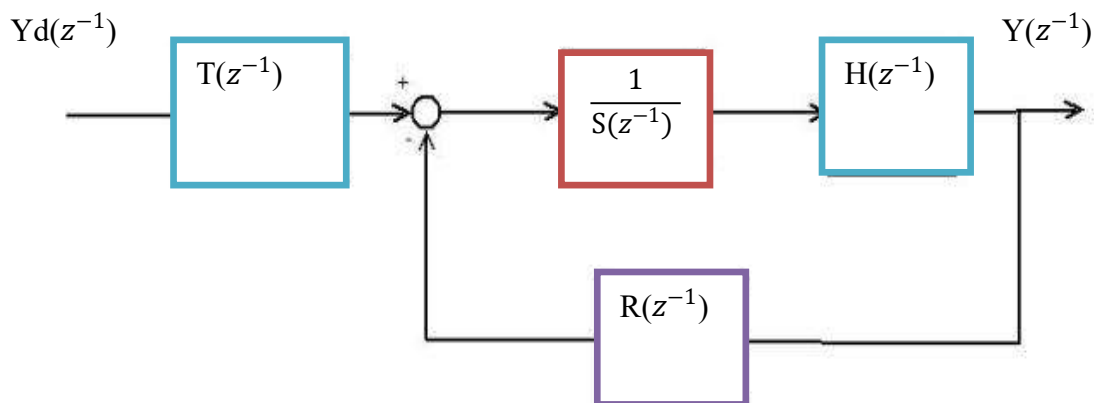


Figure.III.1.Structure générale du régulateur RST

### 3. Principe de la commande RST

La commande RST correspond au schéma-bloc de la figure 2 où  $R(z)$ ,  $S(z)$  et  $T(z)$  sont des polynômes et  $H(z)$  est une fonction de transfert fixant la dynamique en asservissement[35].

Les différentes parties du correcteur ont pour forme :

$$R(z) = r_0 + r_1 Z^{-1} + r_2 Z^{-2} + \dots + r_{nr} Z^{-nr} \quad (III.1)$$

$$S(z) = s_0 + s_1 Z^{-1} + s_2 Z^{-2} + \dots + s_{ns} Z^{-ns} \quad (III.2)$$

$$T(z) = t_0 + t_1 Z^{-1} + t_2 Z^{-2} + \dots + t_{nt} Z^{-nt} \quad (III.3)$$

$$H(z) = \frac{B_m(z)}{A_m(z)} = \frac{b_{m0} + b_{m1}(z^{-1}) + b_{m2}(z^{-2}) + \dots + b_{m_{nb}}(z^{-nb})}{1 + a_{m1}z^{-1} + a_{m2}z^{-2} + \dots + a_{m_{na}}z^{-a}} \quad (III.4)$$

#### 3.1 Détermination des polynômes R, S et T

Le calcul des polynômes R, S et T se fait en identifiant la fonction de transfert modèle avec la fonction de transfert du système bouclé corrigé. Donc pour un suivi de consigne on doit avoir [33] :

$$\frac{B-T}{A^+(A^-S'+z^{-d}B^-R')} = \frac{B+B_m'}{A_m} \quad (III.5)$$

Soit :

$$\frac{T}{A^-S'+z^{-d}B^-R'} = \frac{A+B_m'}{A_m} \quad (III.6)$$

A partir de cette équation déduit que

$$T_0(z^{-1}) = B_m'(z^{-1})A_0(z^{-1}) \quad (III.7)$$

Après simplification et en égalisant le numérateur et dénominateur, on obtient :

$$A^-S' + z^{-d}B^-R' = A_m A_0 \quad (III.8)$$

$$T = A_0 A^+ B_m' \quad (III.9)$$

L'équation (III.8) est une équation diophantienne où  $S'$  et  $R'$  sont les inconnues. Le polynôme est généralement choisi égal à 1, sauf si le cahier des charges impose de filtrer (filtrer pas rejeter) des perturbations au-delà d'une certaine fréquence [33].

#### 4. Résolution de l'équation diophantienne

Pour résoudre cette équation on adopte une méthode matricielle permettant de trouver les paramètres des polynômes R et S [36]:

On pose :

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= a_0 + a_1 A(z^{-1}) + \dots + a_n A(z^{-n}) \\ B(z^{-1}) &= b_1 + b_2(z^{-1}) + \dots + b_m(z^{-m}) \\ S(z^{-1}) &= S_0 + S_1(z^{-1}) + S_2(z^{-2}) + \dots + S_l(z^{-l}) \\ R(z^{-1}) &= r_0 + r_1(z^{-1}) + r_2(z^{-2}) + \dots + r_q(z^{-q}) \end{aligned} \tag{III.10}$$

$$P(z^{-1}) = A_m(z^{-1}) A_0(z^{-1}) p_0 + p_1(z^{-1}) + \dots + p_p(z^{-p})$$

Soit

$$n = \deg\{(1 - z^{-1})^p A^-(z^{-1})\} \tag{III.11}$$

$$m = \deg\{z^{-d} B^-(z^{-1})\} \tag{III.12}$$

$$p = \deg\{P(Z^{-1})\} \tag{III.13}$$

Si  $q < n+m$  alors il existe une solution unique d'ordre minimal tel que :

$$\triangleright l = \deg\{S_2(Z^{-1})\} = m - 1 \text{ et } q = \deg\{R_0(Z^{-1})\} = n - 1$$

Si  $q \geq n+m$  alors il existe une solution unique d'ordre minimal tel que :

$$\triangleright l = \deg\{S_2(Z^{-1})\} = m - 1 \text{ et } q = \deg\{R_0(Z^{-1})\} = q - m$$

$$\triangleright l = \deg\{S_2(Z^{-1})\} = q - n \text{ et } q = \deg\{R_0(Z^{-1})\} = n - 1$$

Le choix des degrés étant fait, l'équation (III.7) peut être transformée suivant une formulation matricielle ce qui nous permet d'obtenir en utilisant les notations de l'équation (III.9) la forme matricielle suivante :

$$\begin{matrix}
 \begin{bmatrix}
 a_0 & 0 & \dots & 0 & b_0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\
 a_1 & a_0 & \ddots & \vdots & b_1 & b_0 & \ddots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\
 a_2 & a_1 & \ddots & \vdots & b_2 & b_1 & \ddots & \ddots & \dots & \dots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \ddots & 0 & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \dots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \ddots & a_0 & b_n & b_2 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 a_n & \vdots & \ddots & a_1 & 0 & b_n & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\
 0 & a_n & \ddots & a_2 & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & b_0 \\
 \vdots & 0 & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & b_1 \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & b_2 \\
 0 & \vdots & \dots & a_n & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & b_n
 \end{bmatrix}
 &
 \begin{bmatrix}
 s_0 \\
 \vdots \\
 s_l \\
 r_0 \\
 \vdots \\
 r_q
 \end{bmatrix}
 &
 = &
 \begin{bmatrix}
 p_0 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 p_p \\
 0 \\
 \vdots \\
 0
 \end{bmatrix}
 \end{matrix}
 \tag{III.14}$$

$l + 1$ 
 $q + 1$

Il suffit que  $\max\{n + l, m + q\} = l + q + 1$  et  $A$  et  $B$  soient premiers entre eux pour que cette matrice soit inversible [36].

**5. Application de la commande R-S-T sur un système PV**

Pour optimiser l'efficacité du système photovoltaïque, il est essentiel de maintenir le point de puissance maximale (MPP) de la source d'entrée. Dans cette optique, nous avons choisi d'utiliser un correcteur RST. Ce chapitre se concentrera sur la détermination des paramètres du régulateur RST. Enfin, nous vérifions la robustesse de la technique dans le détermination du point de puissance maximale du système photovoltaïque.

La fonction de transfert doit être extraite dans le système discrete (z) où nous extrayons d'abord la fonction de transport dans le système continu (s) :

$$H(s) = \frac{0.055 s^2 + 9269 s + 7.518e08}{s^2 + 481.2 s + 2.005e06}$$

La fonction de transfert dans le système discrete (z) :

$$H(Z^{-1}) = \frac{0.055 + 0.02 z^{-1}}{1 - 1.995 z^{-1} + 0.9952 z^{-2}}$$

Où nous comptons sur un programme dans Matlab pour extraire les paramètres régulateur RST où le programme est exécuté sous MATLAB suivant :

```
clc
clear all
Ts = 1e-5;
N = [0.055 0.02];
D=[1 -1.995 0.9952];
H =tf(N,D,Ts);
b1=N(1);
b0=N(2);
a1=D(2);
a0=D(3);
Z0=5;
```

```
% polynômes T(z)
t2=(1-Z0)/(b1+b0);
% polynômes R(z) et S(z)
% x=[s2;s1;s0;r0]
fi=[ b1 0 0 1;
b0 b1 0 a1-1;
0 b0 b1 a0-a1;
0 0 b0 -a0 ];
b = [1-a1-Z0; a1-a0; a0; 0];
x = fi \ b;
s2 = x(1);
s1 = x(2);
s0 = x(3);
r0 = x(4);
```

```

T2=-53.33
b1=0.0550
b0= 0.0200
a1= -1.9950
a0= 0.9952
Z0=5;
fi =
0.0550    0    0  1.0000
0.0200  0.0550    0 -2.9950
0  0.0200  0.0550  2.9902
0    0  0.0200 -0.9952
b =
-2.0050
-2.9902
0.9952
0
s2 =-41.2102 ;s1 = -25.1385 ;s0 =13.0154 ;r0 =0.2616
R(z)=1+0.2616z-1- 1.2616
S(z)= 13.0154 - 41.2102 z-1-25.1385 z-2
T(z) =-53.33
    
```

En fonction de ces paramètres, nous nous créons un Bloc de simulation du régulateur RST donné dans la figure suivante :

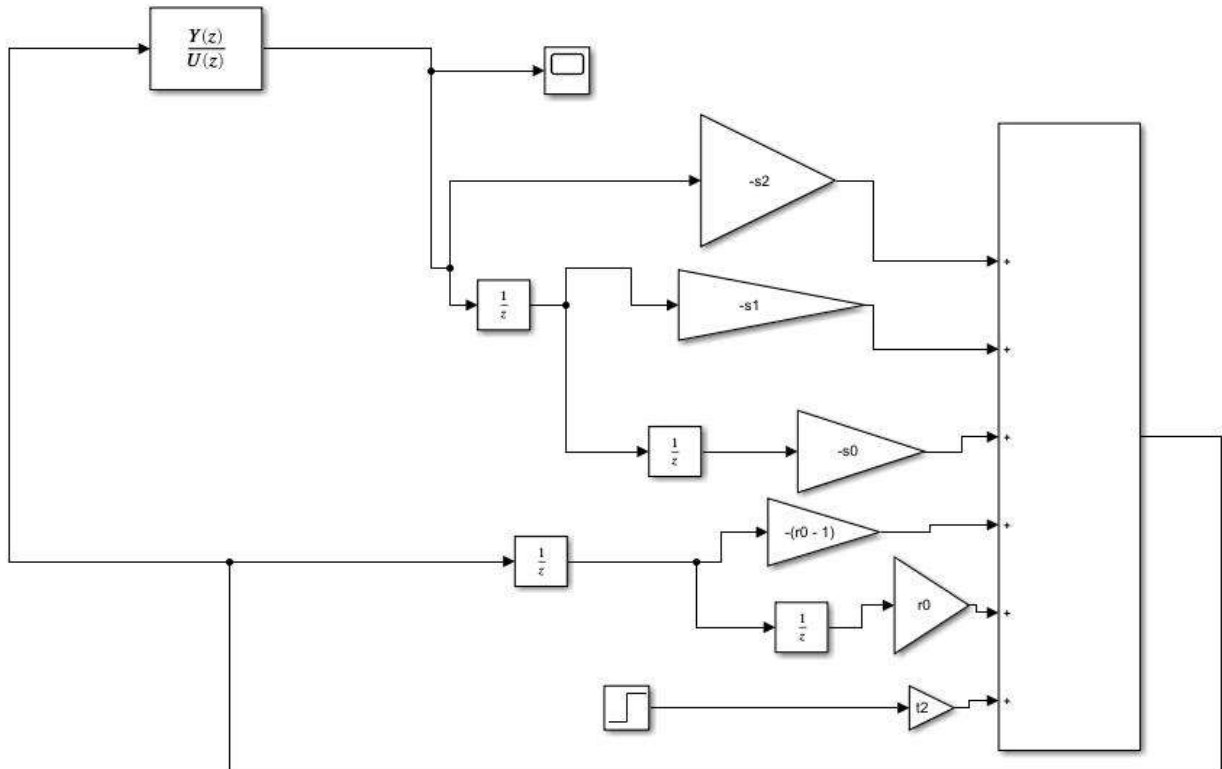


Figure.III.2. Bloc de simulation régulateur RST

### 6. Simulation globale du système

La simulation montre un assemblage de panneau solaire, convertisseur Boost, algorithme P&O et régulateur RST.

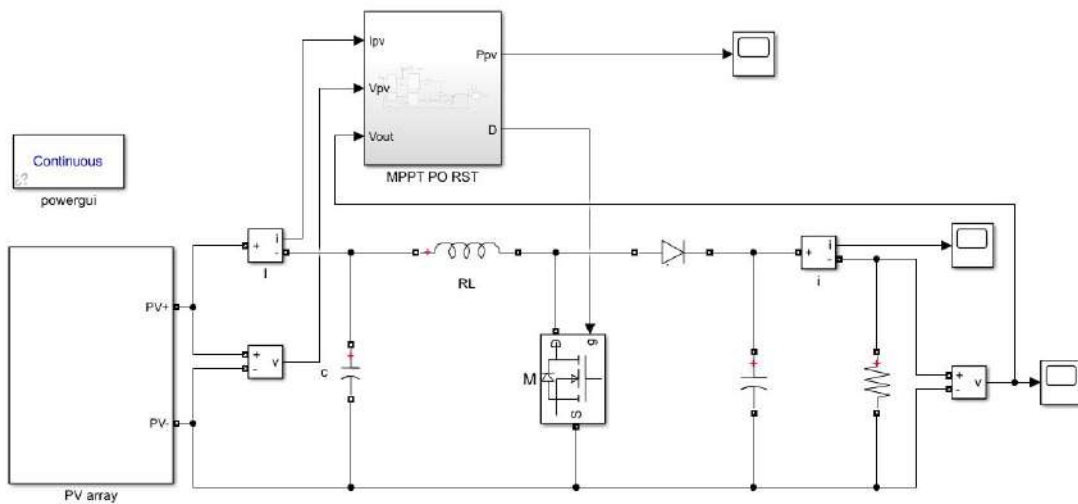
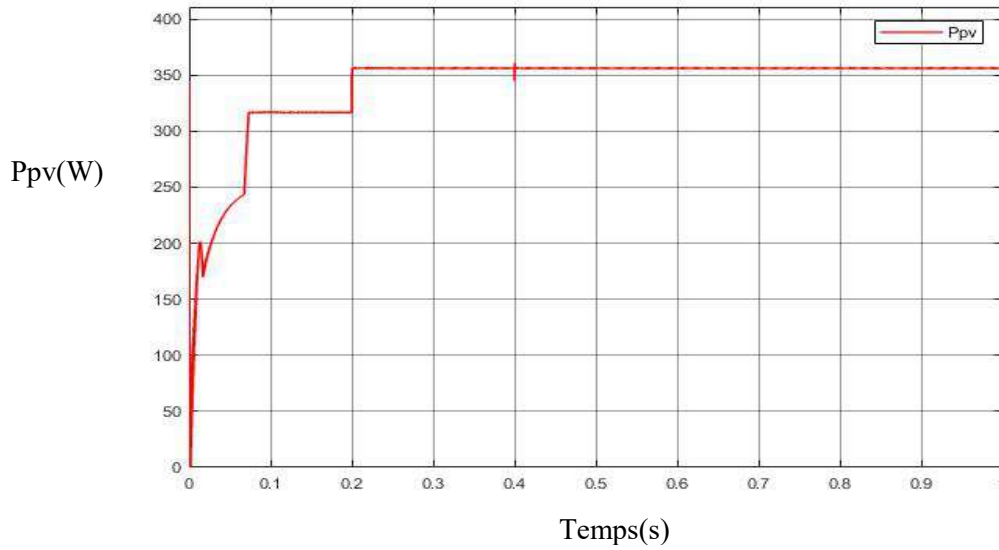


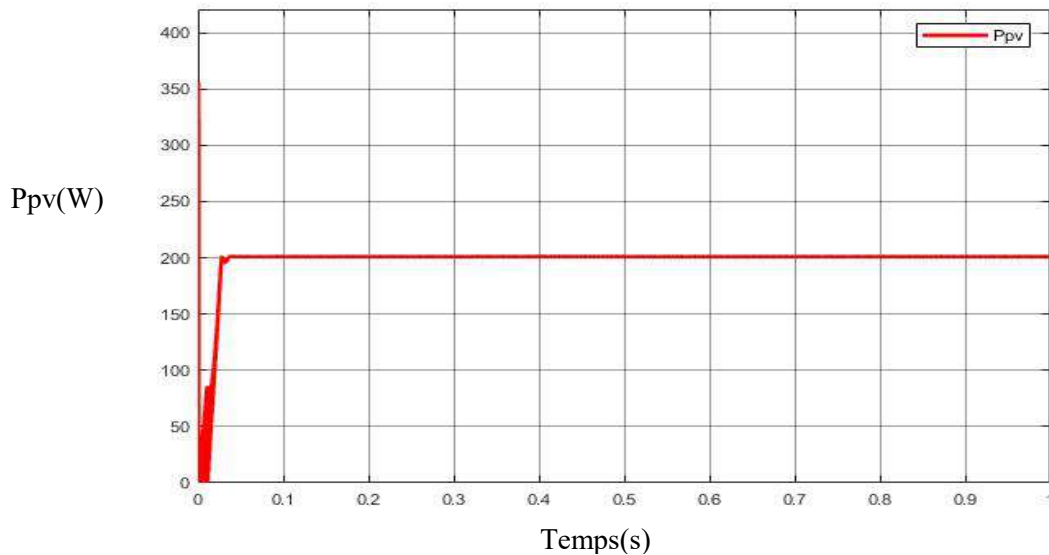
Figure.III.3. Modélisation d'un système PV avec régulateur RST sous MATLAB\SIMULINK

La figure suivante montre la courbe de puissance en cas d'ombre et en présence du régulateur RST :



**Figure.III.4.** Allure de puissance en cas d'ombrage en utilisant un correcteur RST

La figure suivante est déjà présentée dans le chapitre précédent, elle montre la puissance en cas d'ombrage sans utilisation du correcteur RST on la ajoutée dans cette session pour faire comparaison entre le cas d'absence du correcteur RST et dans le cas d'utilisation d'un correcteur RST pour l'extraction du point de puissance maximale.

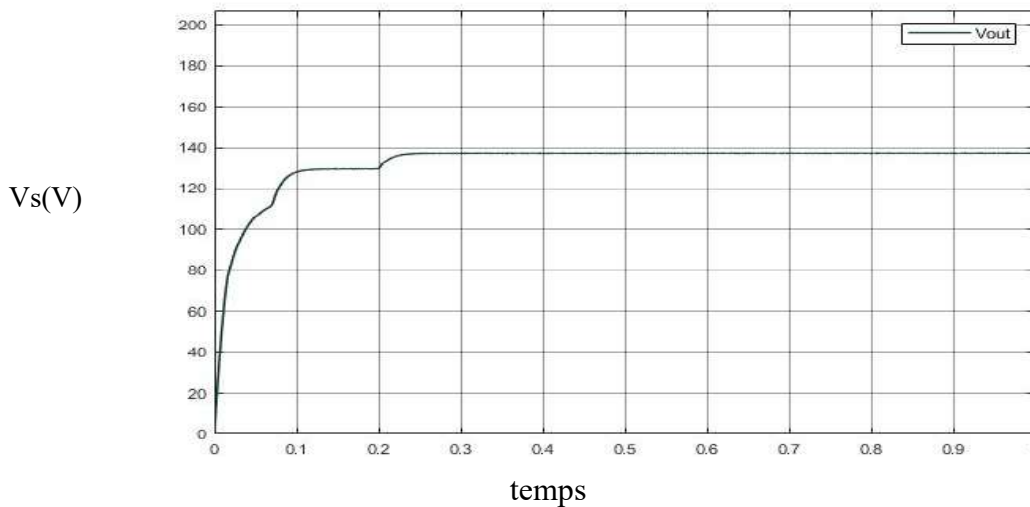


**Figure.II.14.** Allure de la puissance photovoltaïque PV d'un générateur photovoltaïque en considérant l'effet d'ombrage.



On remarque une grande différence entre les deux courbes, d'après la figure 4, la valeur de puissance maximale est de 350 W, et à la figure 13, la valeur de puissance est de 200 W. Cela implique que le régulateur RST optimisé suit parfaitement le point de puissance maximale, et il corrige les lacunes de l'algorithme P&O surtout dans le cas d'ombrage des cellules photovoltaïques du système. Ce qui permet à minimiser les pertes en puissance et d'augmenter le rendement du système.

La figure suivante présente la tension à la sortie de l'hacheur

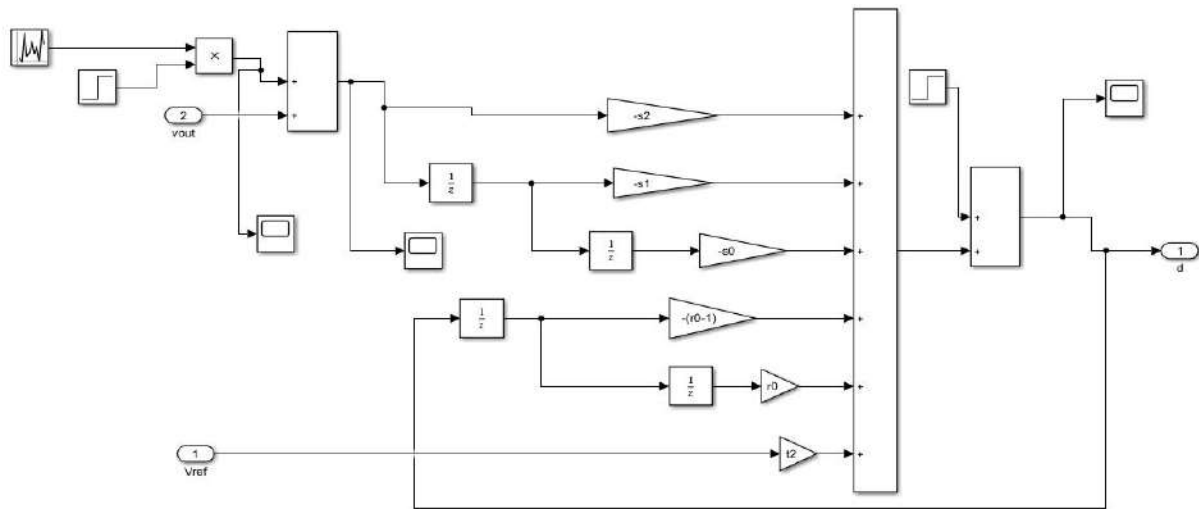


**Figure.III.5.**Allure de la tension sortie

On remarque que la tension à la sortie de l'hacheur tend vers la valeur de la tension posée à l'entrée du système. Ce qui confirme la capacité du régulateur RST dans le suivi du point de puissance maximale du système photovoltaïque.

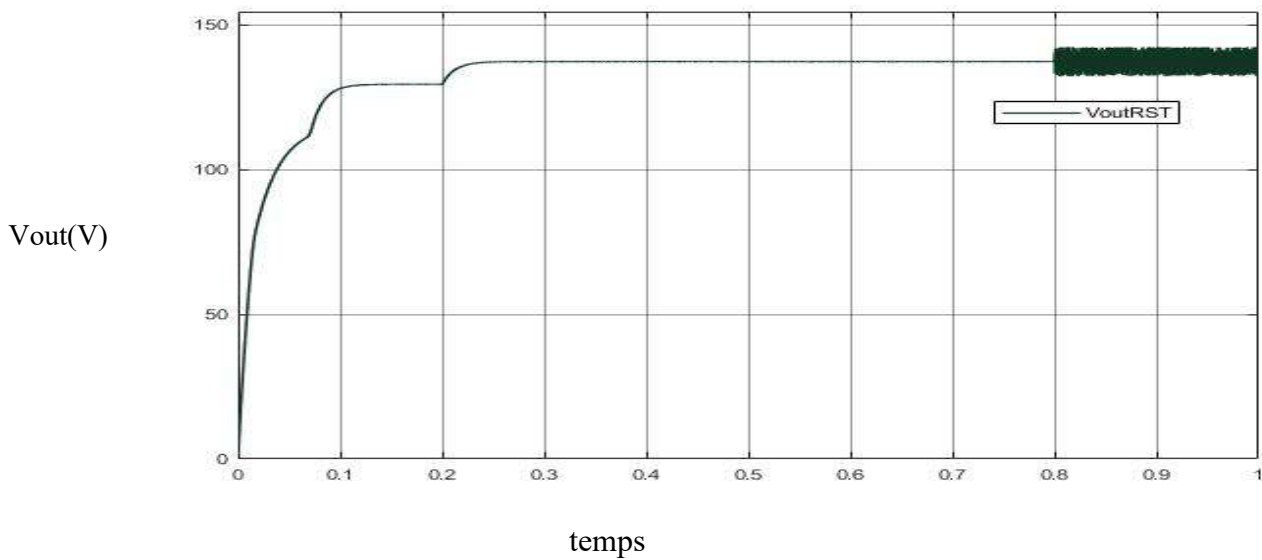
### 7. Robustesse du système via l'introduction d'un bruit

Pour se garantir que le système fonctionne bien même si un problème est survenu. Nous avons introduit un bruit « blanc » à l'instant  $t=0.8$  s dans la tension d'entrée en utilisant le bloc suivant :



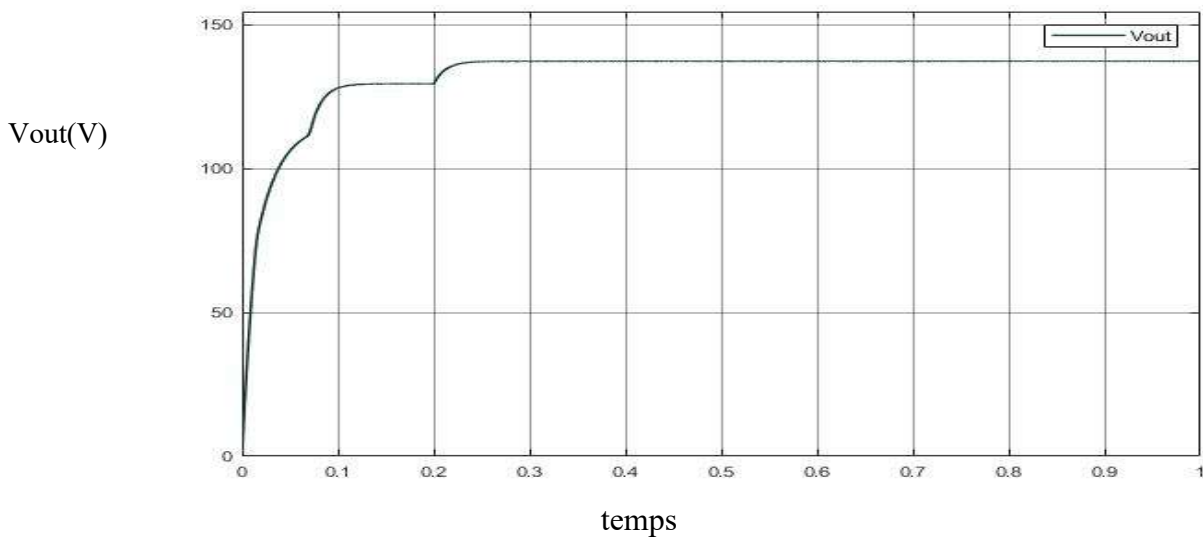
**Figure.III.6.** Bloc de simulation régulateur RST en introduisant un bruit.

La tension de l'entrée est donnée par la figure suivante dans le cas de présence d'un bruit.



**Figure.III.7.** Courbe de tension RST en présence d'un bruit

La figure suivante montre la tension à la sortie du système en brésence du bruit et l’ombre. La tension attein sa valeur de référence en élimément le bruit, ce qui témoigne la robusresse du régulateur RST que se soit pour le filtrage de la sortie ou pour le suivi du point de puissance maximale. Donc on remarque que la présence du bruit n’a pas affecté la stabilité de la valeur de tension, ce qui assure le fonctionnement normal du système.



**Figure.III.8.**Allure de la tension à la sortie système en cas de bruit à son entrée.

## 8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une technique de suiv de point de puissance maximale de notre système formé de trois cellule photovoltaïque, hacheur boost et une charge résitive. La technique utilise un correcteur RST qui a permet de garder la puissance et la tension constante même dans le cas de l’ombrage des cellule et ainsi que dans la présence un bruit (parasite) à l’entrée du système. Ce correcteur a montré sa capacité de corriger les erreurs rencontrées dans l’application de la MPPT pour le suivi du point de la puissance maximale.



**Conclusion Générale**

## **Conclusion Générale**

### **1. Travail accompli**

D'après le travail réalisé durant ce manuscrit on a montré que l'ombre affecte le système photovoltaïque. Notre travail a été réalisé selon les étapes suivantes :

Dans la première étape, on a simulé trois panneaux solaires avec un convertisseur boost pour alimenter une charge résistive. On a conclu que le convertisseur a un rôle majeur dans l'augmentation du rendement du système photovoltaïque, mais la diminution de l'éclairement et l'augmentation de la température affecte l'efficacité du système.

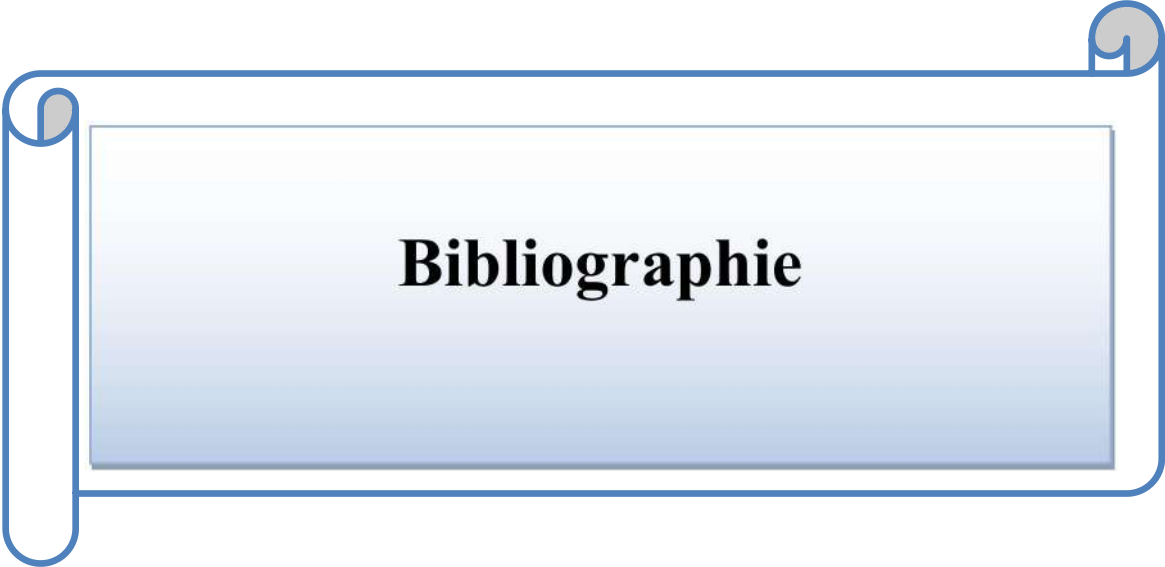
Dans une deuxième étape, on a utilisé l'algorithme P&O pour le suivi du point de puissance maximale dans l'état naturel. Si le système est exposé à l'ombre, l'algorithme perd ces performances.

Dans une troisième étape de notre travail, on a proposé d'utiliser un régulateur RST pour contourner le problème de l'algorithme P&O. Ce régulateur nous a permis de suivre le point de puissance maximale en présence de l'ombre sur les cellules photovoltaïques et même en présence d'un défaut (bruit) à l'entrée de notre système.

### **2. Perspective**

Nos suggestions et perspectives résident dans l'implémentation pratique du système étudié. L'étude pratique peut mieux confirmer la robustesse de notre régulateur RST et même la technique P et O dans le suivi du point de puissance maximale. D'autres effets des conditions climatiques sur les panneaux peuvent être étudiés dans d'autres travaux .

En fin nous souhaitons que notre travail ajoute un pas précieux dans ce domaine de recherche.



**Bibliographie**

- [1] IMANE, ABBAD; FAIZA, B. « Simulation de l'effet des parametres climatiques (temperature, poussiere et eclairement) sur le rendement d'une cellule solaire ». memoire de master . universite larbi ben m'hidi/oum el bouaghi, 2019.
- [2] ABDELGHANI, M. BESSEM. « Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque. mémoire de master .université badji mokhtar-Annaba, 2018.
- [3] Gohmes, Abdennour, Nasreddine Gherara. « Etude du Stockage de l'Energie Solaire photovoltaïque sous forme d'air comprimé » . Mémoire en master. Université Kasdi merbah ouargla.2022.
- [4] Sofia, BELAID LALOUNI , « Cours Energie Solaire Photovoltaïque. Université A. mira de bejaia », 2014- 2015.
- [5] NEKBIL, Houdhifa, Islam BENZERROUK. Etude et conception d'un mini caracteriseur pour modules photovoltaïque. Mémoire de master. Université M'sila, 2020.
- [6] Hmouda Taha, Maamri Chouaib, Abadli Hamza. « Modélisation et commande MPPT à base de logique floue d'un système photovoltaïque autonome ». Mémoire de master. Diss. Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued .2020.
- [7] KHAIR Oussama , « Etude et commande d'un système photovoltaïque soumis à un ombrage partiel » . Mémoire de master. Université Mohamed Khider de Biskra ,2018 - 2019 .
- [8] DJEDID, Meriem; HEBBIR, Nacer. « Etude expérimentale de l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement d'une cellule PV » . Mémoire de master. Diss universite larbi ben m'hidi .2019.
- [9] LATRECHE Soufiane , BOUZID Kheir eddine. « Etude et Réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduino Uno » . Mémoire de master professionnelle. Diss .Université Kasdi Merbah Ouargla,2015 /2016 .
- [10] Helali, Kamelia. « Modelisation d'une cellule photovoltaïque: etude comparative » . memoire de magister. universite mouloud mammeri de tizi-ouzou, 2012.
- [11] FILALI Ammar, « étude et identification des paramètres électriques des module photovoltaïques ». mémoire de master. université ahmed draia-adrar, 2017.
- [12] Yatimi, H., E. Aroudam, and M. Louzazni. matlab/simulink." matec web of conferences .article. Vol. 2014110.
- [13] DRIHEM Abdelfattah ,HAMMAD Mohammed Taher,TOUAHRIA Abdelatif. « modelisation et simulation d'un generateur photovoltaïque » . Mémoire de master

academique, universite echahid hamma lakhdar d'el-oued,2021.

[14] Hadjab Moufidi, « développement des performances d'un système photovoltaïque ». mémoire de magiste.universite djillali liabes sidibel abbes.2011.

[15] DJERIOU SALIM. « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone ». mémoire de magiste . universite ferhat abbas de setif.2011.

[16] MEDDAH M; BOURAHLA M.; BOUCHETATA N. « Synthèse des convertisseurs statiques DC/AC pour les systèmes photovoltaïques ».article .Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 Adrar, 2011, 101-112.

[17] GOAR Nouredine : MAHMOUDI, Abdelkader. « Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque »Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi .2017.

[18] DJERIOU SALIM. « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone ». memoire de magister. universite ferhat abbas de setif.2011.

[19] LADOUALI Khalil . « Système De Pompage Photovoltaïque Domestique: Etude Et Simulation ». mémoire de master . Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi. 2021.

[20] Tati, Fethallah, BEN Oussamama LAMOUDI. « Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue ». memoire master academiqu. universite kasdi merbah ouargla. 2018.

[21] Benkassis Fatima zohra , Sellaoui Assis. « Modélisation dynamique et analyse des convertisseurs DC - DC pour applications en énergies renouvelables ». memoire master academique. Université 8 Mai 1945 – Guelma.2020.

[22] HAKOUMI Ahmed, Abdeldjalil BENAMAR . « Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue ». mémoires de master. Université Ahmed Draïa -Adrar, 2019.

[23] Zahar soria ,Makhlouf cheymaa. « Etude et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Energétique ». Mémoire de Master Académique . universite mohamed boudiaf - m'sila,2016.

[24] HADJI Djamel, CHABI Amar Abdelmoumi. « Application d'une nouvelle technique



MPPT sur un GPV en vue de l'alimentation d'une MADA ». memoire de master academique. Univ M'sila, 2020.

[25] Faiza, Benadel. « Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Systeme PV ». . memoire de master. universite de mohamed boudiaf m'sila , 2016.

[26] ZIAT Soheir Ibtissem, MEDJAHED nour el houda. « Modélisation et simulation d'un Systeme photovoltaïque commandé par la commande MPPT (P&O) ». memoires de master. Belhadj ouchaib d'Ain-Temouchent, 2020 .

[27] HANIA, Aboub. « Commande d'un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV », Mémoire de Magister, Université de Hadj Lakhdar-Batna, 2014. HANIA, Aboub.

[28] TAHIRI, F. E.; CHIKH, K.; KHAFALLAH, M. « Commande MPPT utilisant un contrôleur PI-Flou appliqué à un système photovoltaïque autonome ». article. Revue De L'entrepreneuriat Et De L'innovation, 2019, 2.

[29] BELAKHDAR, Mohammed. « Etude et caractérisation d'un panneau photovoltaïque en utilisant une carte Arduino ». Mémoire de Master académique. universite kasdi merbah ouargla,2021.

[30] BENBLIDIA HOUSSAM,KERKAR AMAR . « Etude de l'effet de l'ombrage sur un système photovoltaïque ».memoire de maste. Université saad dahlab de blida.2015 .

[31] MOURAD, ATEK. « Effets du taux d'ombrage sur les performances des cellules aires a base de cigs ». universite ferhat abbas-setif, 2013.

[32] Tapsoba Gildas Ragnagnéwendé. « Maximisation du transfert de l'énergie d'un chan photovoltaïque tenant compte du phénomène d'ombrage partiel: connexion réseau électrique : . École de technologie supérieure, 2019

[33]Lamia Haddoufi, Meriem Mecherouh. « application de la commande adaptative

indirecte sur un systeme photovoltaïque ». Mémoire de Master. universite a/mira-bejaia, 2019.

[34] Samir AIT ABDELLAH, « Implémentation de la commande RST sous un API S7-300 sur le contrôle de la station de température PUT-1 d'Electronica Veneta ». Mémoire de Master académique. universite mouloud mammeri de tizi-ouzou . 2015 .

[35] Boufedeché Yassine, and Djamel Bentobache« Synthèse Des Correcteurs Numériques Par La Méthode Polynomiale RST ». Mémoire de Master. Université abderrahmane ra béjaia, 2014.

[36] Aissat, Abderrahim, Hocine Lehouche. «Commande Numérique RST Appliqué sur un module Inversé ». Mémoire de Master. Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2017.





**Annexe**

Annexe A

- Simulation d'un GPV et l'hacheur Boost pour un éclairage variable

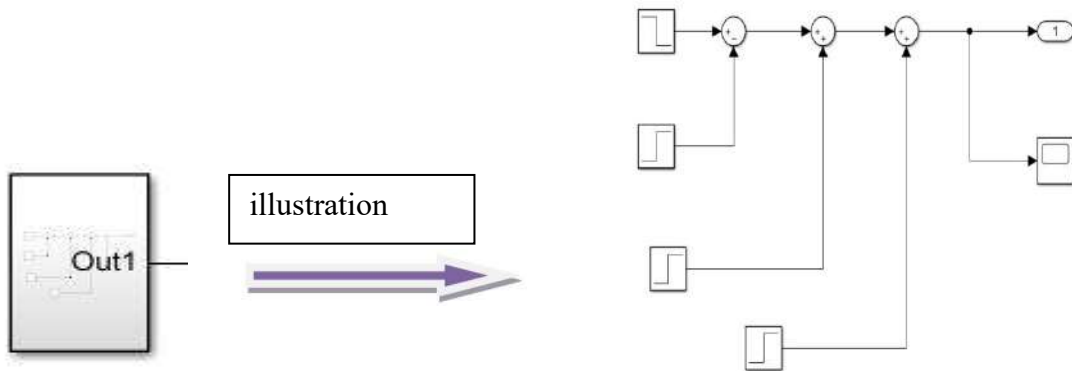
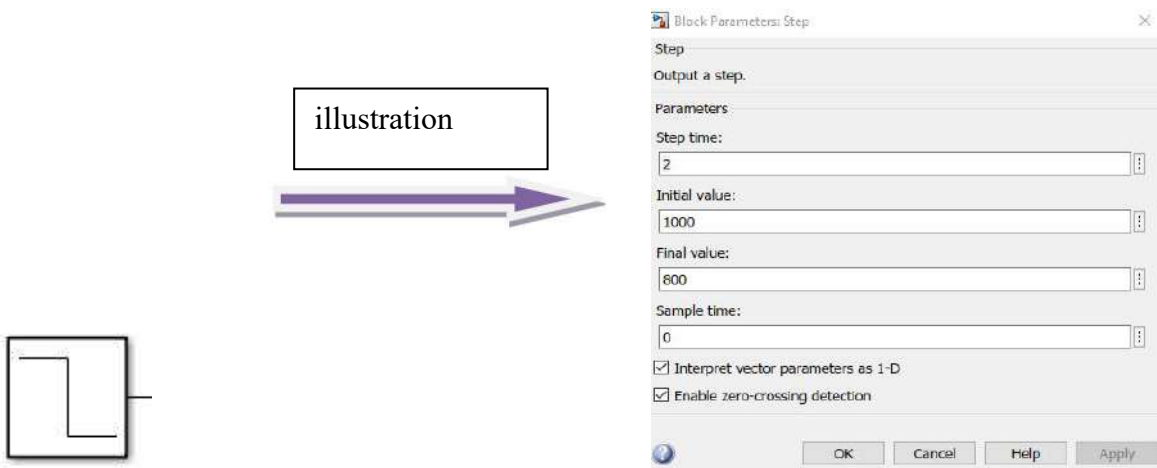


Schéma bloc de variation de l'éclairage



Bloc des parameters Step 1

- Schémade GPV et l'hacheur Boost pour température variable

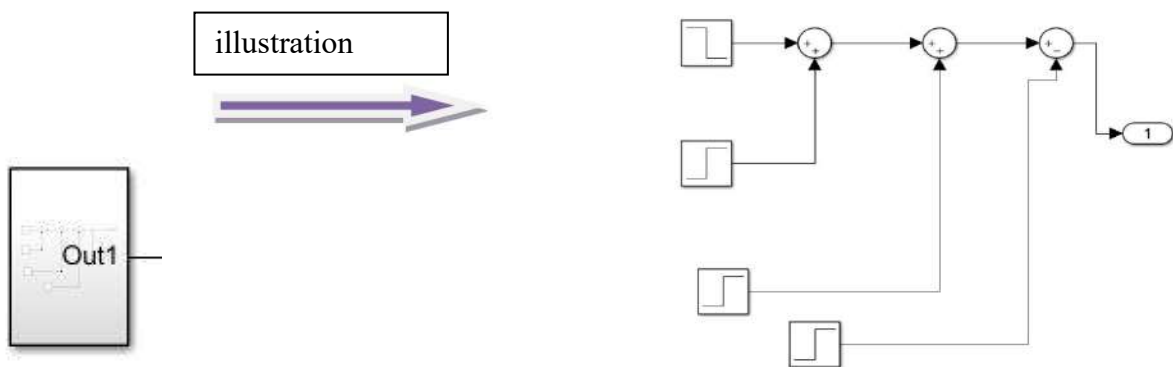
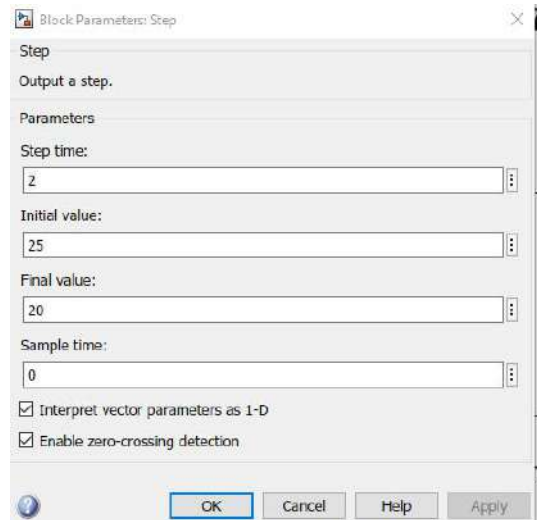
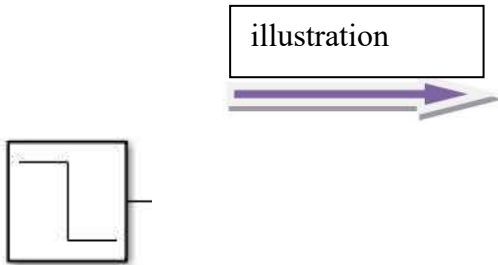
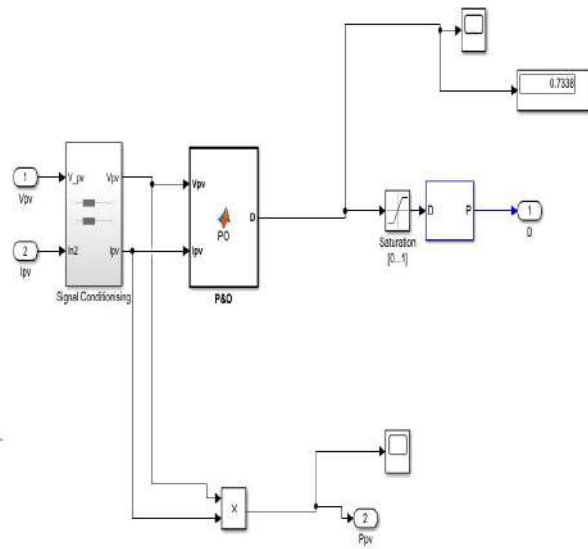
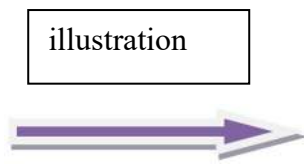
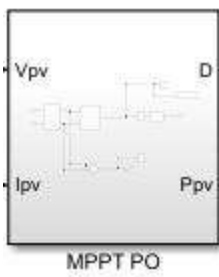


Schéma bloc de variation de la température



Bloc des parameters Step 2

➤ Bloc de MPPT (P&O)



## Annexe B

## ➤ Fonction de l'algorithme P&amp;O

```

function D = PO(Vpv,Ipv)
Dmax=0.9;
Dmin=0.1;
Dinit=0.9;
deltaD=1e-2;
persistent Dpre Ppre Vpre;

%first run
if isempty(Dpre)
    Dpre=Dinit;
    Vpre=0;
    Ppre=0;
end
Ppv=Vpv*Ipv;
dp=Ppv-Ppre;
dv=Vpv-Vpre;

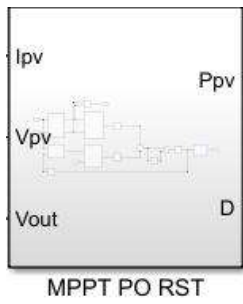
if dp~=0
if(dp>0)
if(dv<0)
            D=Dpre+deltaD;
else
            D=Dpre-deltaD;
end
else
if(dv<0)
            D=Dpre-deltaD;
else
            D=Dpre+deltaD;
end
end
else
    D=Dpre;
end

if D>=Dmax || D <= Dmin
    D=Dpre;
end

    Ppre=Ppv;
    Vpre=Vpv;
    Dpre=D;
end

```

➤ Bloc MPPT (P&O) et RST



illustration

