

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

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

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département électromécanique

## MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : **Electrotechnique**

Spécialité : **Energies renouvelables**

Par : - AMRAOUI Abdelaaziz

- AZZOUZ Bachir

### Sujet

**Commande robuste des systèmes photovoltaïques**

Soutenu publiquement, le 02 / 07 / 2023 , devant le jury composé de :

Mr. KHATIR	Abdelfatah	MAA	Univ-BBA	Président
Mr. SAAD SAOUD	Marouane	MCB	Univ-BBA	Examineur
Mr. BOUCHAMA	Ziyad	MCA	Univ-BBA	Encadrant

# Remerciements

Avant tout, nous remercions notre  
Dieu de nous avoir donné la force et le courage.

À la suite nous tenons à remercier vivement  
Dr. Ziyad, pour ses Informations, ses conseils et  
Ses encouragements.

Nous voudrais également remercier les messieurs  
Les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont  
donnés

Et tous les professeurs du département  
électromécanique

Mes remerciements chaleureux à tous

Contribution proche et lointaine

Accès à cette mémoire.

# Dédicace

Avant tous, je remercie mon Dieu le tout puissant de  
M'avoir donné le courage, la volonté et la patience pour réaliser  
Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, Dieu les sauve

Protège de leur soutien moral et financier

Encouragement et sacrifices.

À ma mère et mes frères Mouslim , Moussa ,Haroun et Khawla

Pour toutes les familles Amraoui ,Tebbi

Pour mes chers amis

Pour tout ce que j'aime et qui m'aime

À tous mes camarades de classe surtout mes collègues en  
électromécanique.

# Dédicace

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, je dédie ce travail à mes très chers, respectueux et magnifiques parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

À mes sœurs pour leurs appuis et leur encouragement.

À tous mes amis et toute ma promotion, et en particulier mon binôme Abdelaazziz.

## Listes Des Acronymes

---

---

Acronymes	
<b>AC</b>	Courant Alternatif (Alternative Current)
<b>DC</b>	Courant Continu (Direct Current)
<b>DC/DC</b>	Conversion Continu/Continu
<b>GPV</b>	Générateur Photovoltaïque
<b>IC</b>	Conductance Incrémentale (Incremental Conductance)
<b>MPPT</b>	Recherche De Point De Puissance Maximale (Maximum Power Point Tracking)
<b>PPM</b>	Point De Puissance Maximal
<b>PV</b>	Panneau Photovoltaïque
<b>P&amp;O</b>	Perturber Et Observer
<b>I-V</b>	Courant-Tension
<b>P-V</b>	Puissance Tension
<b>SC</b>	commande synergétique

Titre	Page
<b>Introduction générale</b>	
Introduction générale	12
<b>Chapitre I : Énergies renouvelables et leurs systèmes</b>	
<b>I.1. Introduction</b>	16
<b>I.2. Energies renouvelables</b>	16
<b>I.2.1. Energie hydraulique (L'hydroélectricité)</b>	17
<b>I.2.2. Energie éolienne</b>	18
<b>I.2.3. L'énergie solaire</b>	18
<b>I.2.3.1. Energie solaire thermique</b>	18
<b>I.2.3.2. Energie solaire photovoltaïque</b>	18
<b>I.2.3.3. Rayonnement solaire</b>	19
<b>I.3. Potentiel solaire dans le monde</b>	19
<b>I.4. Système photovoltaïque</b>	20
<b>I.4.1. Qu'est un système Photovoltaïque</b>	20
<b>I.4.2. Générateur PV</b>	21
<b>I.4.3. Effet photovoltaïque</b>	21
<b>I.4.4. Cellule PV</b>	21
<b>I.4.4.1. Structure physique :</b>	21
<b>I.4.4.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque</b>	22
<b>I.4.4.3. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque</b>	22
<b>I.5. Module photovoltaïque</b>	23
<b>I.5.1. Modèle mathématique d'un module PV</b>	23
<b>I.5.2. Influence de l'éclairement et température sur le comportement du module PV</b>	23
<b>I.5.2.1. Influence de la température</b>	23
<b>I.5.2.2. Influence de l'éclairement</b>	24
<b>I.5.3. Effet de l'ombrage partiel sur le fonctionnement du module PV</b>	25
<b>I.6. Association des cellules photovoltaïques</b>	26
<b>I.6.1. Association en parallèle</b>	26
<b>I.6.2. Association en série</b>	27
<b>I.6.3. Association mixte (série parallèle)</b>	27
<b>I.7. Avantages et les inconvénients des énergies d'un système photovoltaïque</b>	28
<b>I.7.1. Avantages</b>	28
<b>I.7.2. Inconvénients</b>	28

<b>I.8. Conclusion</b>	28
<b>Chapitre II : Modélisation et commande conventionnelle des systèmes photovoltaïques</b>	
<b>II.1. Introduction</b>	30
<b>II.2. Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge</b>	30
<b>II.3. Convertisseurs DC-DC (hacheurs)</b>	31
<b>II.3.1. Convertisseur abaisseur</b>	31
<b>II.3.2. Convertisseur abaisseur-élevateur</b>	32
<b>II.3.3. Convertisseur élevateur</b>	33
<b>II.4. Commandes classiques des systèmes photovoltaïques</b>	35
<b>II.5. Commande MPPT</b>	35
<b>II.5.1. Méthodes indirectes (Méthodes Offline)</b>	36
<b>II.5.2. La méthode de la tension de circuit ouvert</b>	36
<b>II.5.3. La méthode de court-circuit</b>	37
<b>II.5.4. Méthodes directes (méthodes Online)</b>	38
<b>II.6. Les Algorithmes MPPT</b>	38
<b>II.6.1. La technique Perturbation &amp; Observation (P&amp;O)</b>	38
<b>II.6.1.1. Inconvénients de la méthode P&amp;O</b>	39
<b>II.7. Méthode d'incrément de conductance (IC)</b>	40
<b>II.7.1. Inconvénients de la méthode IC</b>	42
<b>II.8. Résultats de simulation</b>	42
<b>Cas 1 : conditions climatique standard</b>	43
<b>Cas 2 : conditions climatique variables</b>	45
<b>II.9 Conclusion</b>	48
<b>Chapitre III : Commande synergétique d'un système photovoltaïque</b>	
<b>III.1. Introduction</b>	50
<b>III.2. Synthèse de la commande synergétique</b>	50
<b>III.3. Modèle mathématique</b>	52
<b>III.4. Résultats de simulation</b>	54
<b>Cas 1. Conditions climatiques standards</b>	56
<b>Cas 2. Eclairage variable</b>	58
<b>Cas 3. Température variable</b>	63
<b>Cas 4. Eclairage et température variable</b>	66
<b>III.5. Conclusion</b>	70
<b>Conclusion générale</b>	
<b>Conclusion générale</b>	72
<b>Références</b>	74

## Liste des Figures Et Tableaux

Titre	Page
Figure. I.1 : Production mondiale d'électricité en 2012	17
Figure. I.2 : Énergie hydraulique	17
Figure. I.3 : Eoliennes	18
Figure. I.4 : Composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné	19
Figure. I.5 : Part de l'énergie primaire provenant du solaire, 2019	20
Figure.I.6 : Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau	21
Figure. I.7 : Structure d'une cellule PV	22
Figure. I.8 : Influence de la température sur la caractéristique	24
Figure. I.9 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I- -V et P-V d'une cellule solaire	24
Figure. I.10 : Courbe de I(V) et P(V) d'un générateur PV de 100 KW	25
Figure.I.11 : Association des modules en parallèle	26
Figure.I.12 : Caractéristiques I (V) pour l'association en parallèle	26
Figure. I.13 : Association des modules en série	27
Figure. I.14 : Caractéristique I(V) pour l'association série	27
Figure.I.15 : Association mixte des modules	27
Figure .II.16: Etage d'adaptation entre un GPV et une charge	30
Figure .II.17 : Signal de commande du commutateur	31
Figure .II.18 : Schéma du convertisseur abaisseur	32
Figure .II.19 : Schéma d'un convertisseur abaisseur-élévateur	32
Figure .II.20 : Schéma de l'hacheur survolteur	33
Figure .II.21 : Schéma équivalent à la phase d'accumulation d'énergie	33
Figure .II.22 : Schéma équivalent à la phase de roue libre	34
Figure .II.23 : Schéma synoptique d'un système PV utilisant la commande MPPT	36
Figure .II.24 : Schéma de la convergence par la méthode P&O	39
Figure .II.25 : Algorithme du MPPT à base de la méthode P&O	40
Figure .II.26 : Principe de fonctionnement de l'algorithme IC	41
Figure .II.27 : Organigramme de l'algorithme IC	42
Figure .II.28 : Evolution de la puissance photovoltaïque(1er cas)	43
Figure .II.29 : Evolution de la puissance de charge(1er cas)	43
Figure .II.30 : Evolution de la tension photovoltaïque (1er cas)	44
Figure .II.31 : Evolution de tension de charge (1er cas)	44
Figure .II. 32 : Evolution du courant photovoltaïque(1er cas)	45
Figure .II.33 : Evolution de la puissance photovoltaïque (2ème cas)	45
Figure .II.34 : Evolution de la puissance de charge	46
Figure .II.35 : Evolution de la tension photovoltaïque (2ème cas)	46



## Liste des Figures Et Tableaux

Figure .II.36 : Evolution de la tension de charge (2ème cas)	47
Figure.II.37 : Evolution du courant photovoltaïque (2ème cas)	47
Figure.III.38 : Représentation graphique de la Solution de l'équation fonctionnelle pour de différentes conditions initiales.	51
Figure .III.39 : Schéma sous Simulink du système global	55
Figure.III.40 : Puissance photovoltaïque (1er cas)	56
Figure .III.41 : Puissance de charge (1er cas)	56
Figure .III.42 : Tension photovoltaïque (1er cas)	57
Figure.III.43 : Tension de charge (1er cas)	57
Figure .III. 44 : Courant photovoltaïque (1er cas)	58
Figure .III.45 : Variation de l'éclairement en fonction du temps	59
Figure .III.46 : Caractéristique du panneau PV	59
Figure .III.47 : Puissance photovoltaïque (2ème cas)	60
Figure.III.48 : Puissance de charge (2ème cas)	61
Figure .III.49 : Tension photovoltaïque (2ème cas)	61
Figure .III.50 : Tension de charge (2ème cas)	62
Figure.III.51 : Courant photovoltaïque (2ème cas)	62
Figure .III.52 : Variation de la température en fonction du temps	63
Figure .III.53 : Caractéristique du panneau PV	63
Figure .III.54 : Puissance photovoltaïque (3ème cas)	64
Figure. III.55 : Puissance de charge (3ème cas)	64
Figure.III.56 : Tension photovoltaïque (3ème cas)	65
Figure .III.57 : Tension de charge (3ème cas)	65
Figure.III.58 : Courant photovoltaïque (3ème cas)	66
Figure .III.59 : Variation de la température et de l'éclairement en fonction du temps	67
Figure .III.60 : Caractéristique du panneau PV	67
Figure .III.61 : Puissance photovoltaïque (4ème cas)	68
Figure .III.62 : Puissance de charge (4ème cas)	68
Figure .III.63 : Tension photovoltaïque (4ème cas)	69
Figure .III.64 : Tension de charge (4ème cas)	69
Figure. III.65 : Courant photovoltaïque (4ème cas)	70
<b>Titre</b>	<b>Page</b>
TableauIII.1. Spécifications du système	55

## Résumé

### Résumé :

Ce mémoire présente l'étude et la modélisation d'un contrôleur synergétique (SC) pour optimiser le fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV). Ce dernier est principalement composé d'un ensemble de panneaux solaires, d'un convertisseur élévateur DC/DC, d'un contrôleur de suivi de la puissance maximale (MPPT) et d'une charge. Étant donné les caractéristiques non linéaires du système PV, il est essentiel d'obtenir le point de fonctionnement optimal. Par conséquent, le contrôleur proposé comprend deux boucles principales à savoir la boucle de recherche du point maximal (MPP) et la boucle de suivi de la puissance maximale. L'algorithme Perturbé and Observe (P&O) est conçu pour la recherche du point de puissance maximale (MPP), c'est-à-dire pour suivre la tension de référence de sortie des panneaux solaires. Cette tension est utilisée pour ajuster le point de consigne du contrôleur synergétique, qui a ensuite généré le signal de commande au convertisseur élévateur DC-DC pour obtenir une puissance de sortie maximale. Cette nouvelle stratégie de commande MPPT offre une bonne réponse transitoire, une faible erreur de suivi et une réaction très rapide aux variations environnementales.

**Mots clés :** système photovoltaïque ; convertisseur élévateur DC/DC ; commande synergétique (SC) ; perturbe and Observe (P&O) ; suivi du point de puissance maximale, contrôleur MPPT.

### Abstract:

This work presents the study and modeling of a synergistic controller (SC) to optimize the operation of a photovoltaic (PV) system. The PV system is composed of a set of solar panels, a DC/DC boost converter, a maximum power point tracking (MPPT) controller, and a load. Given the nonlinear characteristics of the PV system, obtaining the optimal operating point is crucial. Therefore, the proposed controller consists of two main loops: the maximum power point (MPP) loop and the maximum power-tracking loop. The Perturb and Observe (P&O) algorithm is designed for maximum power point tracking, specifically to track the reference output voltage of the solar panels. This voltage is used to adjust the set point of the synergistic controller, which then generates the control signal to the DC/DC boost converter to achieve maximum power output. This novel MPPT control strategy provides a good transient response, low tracking error, and rapid response to environmental variations.

**Keywords:** photovoltaic system, DC/DC boost converter, synergistic control (SC), Perturb and Observe (P&O), maximum power point tracking (MPPT) controller.

### الملخص:

يعرض هذا الموجز دراسة ونمذجة وحدة تحكم تآزري لتحسين تشغيل النظام الكهروضوئي. يتكون بشكل أساسي من مجموعة من الألواح الشمسية ومحول (مستمر/مستمر)، ووحدة تحكم لمراقبة الطاقة القصوى وحمولة. بالنظر إلى الخصائص الغير الخطية للنظام الكهروضوئي، من الضروري الحصول على نقطة التشغيل المثلى. لذلك، تتكون وحدة التحكم المقترحة من حلقتين رئيسيتين هما: البحث عن النقطة القصوى وحلقة تتبع الطاقة القصوى. تم تصميم خوارزمية (الإضطراب والملاحظة) للبحث عن أقصى نقطة طاقة، أي اتباع الجهد المرجعي لإخراج للألواح الشمسية. يستخدم هذا الجهد لضبط نقطة وحدة التحكم التآزري، والتي تولد بعد ذلك إشارة التحكم إلى المحول (مستمر/مستمر). للحصول على أقصى طاقة إخراج. توفر استراتيجية التحكم الجديدة استجابة عابرة جيدة وخطأ تتبع منخفض واستجابة سريعة للغاية للتغيرات البيئية.

**الكلمات الرئيسية:** النظام الكهروضوئي؛ محول مستمر/مستمر رافع للجهد؛ والمراقبة التآزرية؛ الإضطراب والملاحظة؛ الحد الأقصى لتتبع نقاط الطاقة.



**Introduction  
Générale**

### Introduction Générale :

Les demandes croissantes en énergie, l'épuisement des combustibles fossiles et le réchauffement climatique accru dû aux émissions de gaz à effet serre ont fait naître le besoin d'un système énergétique alternatif, globalement efficace et respectueux de l'environnement. L'énergie solaire est considérée comme l'une des formes d'énergies les plus inépuisables de l'univers, mais elle présente le problème d'une faible efficacité en raison des conditions environnementales variables [1]. Le comportement du panneau solaire présente une dynamique non linéaire dans des conditions climatiques réelles et la puissance de sortie fluctue en fonction des variations de l'irradiation solaire et de la température [2-3]. Les changements des conditions météorologiques et le comportement dynamique non linéaire des systèmes photovoltaïques posent un défi pour le suivi du point de puissance maximale (MPP) [4].

Par conséquent, pour extraire et fournir en continu la puissance maximale possible du système photovoltaïque, dans des conditions environnementales données, il est nécessaire de formuler une stratégie de contrôle du suivi du point de puissance maximale (MPPT) qui opère en continu le système photovoltaïque à son MPP. Un contrôleur non linéaire robuste est requis pour assurer le MPPT en gérant les non-linéarités d'un système et en le rendant robuste face aux changements des conditions environnementales. Un certain nombre de techniques MPPT sont disponibles dans la littérature. De nombreux algorithmes de MPPT ont été développés et étudiés, qui diffèrent les uns des autres selon diverses caractéristiques telles que la vitesse de convergence, le niveau de complexité, les capteurs requis, la plage d'efficacité, le coût, la méthode de mise en œuvre, les exigences matérielles et d'autres aspects [5]. Généralement, les algorithmes conventionnels, Perturbe and Observe (P&O) [6] et Incrémentale Conductance (INC) [7] sont les principaux algorithmes de base.

Ces techniques conventionnelles sont simples, faciles à mettre en œuvre et ont la capacité de suivre efficacement le MPP dans les conditions écologiques actuelles. Cependant, l'inconvénient de ces techniques conventionnelles est les fluctuations autour du MPP qui influencent la précision et la rapidité du système, entraînant une perte de puissance utile [8]. Les techniques basées sur le Soft-informatique (Soft-computing) se sont révélées être un outil puissant pour l'optimisation du MPPT par rapport aux techniques conventionnelles [9]. Ces techniques comprennent les techniques d'intelligence artificielle (IA) [10] à savoir la logique floue [11], les réseaux de neurones artificiels [12] et les algorithmes génétiques [13].

Les méthodes de l'intelligence artificielle nécessitent un calcul intensif lorsqu'il s'agit des caractéristiques non linéaires des courbes I-V, bien que les méthodes basées sur l'IA soient généralement efficaces. De plus, les conditions de fonctionnement du système photovoltaïque changent en permanence avec le temps, donc le MPPT doit répondre en temps réel aux variations des conditions environnementales (irradiations et température). Par conséquent, une grande capacité de mémoire et des exigences de calcul sont généralement nécessaires.

Les caractéristiques non linéaires du système photovoltaïque rendent nécessaire l'obtention du fonctionnement au point de puissance maximale (MPP). Dans ce mémoire, nous présentons le développement et la modélisation du contrôleur synergétique. La théorie de la commande synergétique (SC) est utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour obtenir le MPP en raison des caractéristiques non linéaires des panneaux solaires et du convertisseur statique DC-DC. Il s'agit d'un contrôleur non linéaire qui a suscité beaucoup d'intérêt dans la conception de systèmes de contrôle non linéaires en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de son bon comportement dynamique [14]. Une approche MPPT à deux boucles est utilisée, dans laquelle le contrôleur suit le signal de référence généré par les schémas MPPT dans des conditions atmosphériques changeantes.

Le contrôleur proposé comprend deux boucles, à savoir la boucle de recherche et la boucle de suivi. Le P&O est utilisé dans la boucle de recherche pour générer le signal de référence et un contrôleur SC de suivi est utilisé dans l'autre boucle pour extraire la puissance photovoltaïque maximale. Le système photovoltaïque est connecté à une charge via le convertisseur statique DC-DC élévateur. Un modèle mathématique du convertisseur élévateur est d'abord dérivé, et sur la base du modèle dérivé, un contrôleur SC est formulé pour contrôler le commutateur du convertisseur élévateur. L'approche proposée est testée sous des niveaux d'irradiation et de températures variables. Les performances des architectures de contrôle proposées sont validées et comparées au régulateur P&O bien connu et largement utilisé. Les résultats de simulation valident l'efficacité du contrôleur proposé pour améliorer le suivi de tension et la puissance du système.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Après avoir donné des généralités sur les énergies renouvelables et leurs systèmes, le chapitre 1 présente les différents types de cellules PV, leur structure de fonctionnement ainsi que leur modélisation. L'influence des conditions météorologiques (la température et l'éclairement) sur le système PV est également étudiée. Le chapitre 2 présente les algorithmes classiques de recherche du MPPT les plus utilisés à savoir la conductance incrémentale (IC) et la perturbation

## **Introduction Générale**

---

et observation (P&O). L'approche synergétique est introduite dans le troisième chapitre. L'analyse de la commande SC pour assurer la stabilité du système PV dans la plage de fonctionnement est présentée. La procédure de conception et de mise en œuvre du contrôleur SC, basée sur les exigences d'un algorithme P&O, pour suivre le MPP en présence de perturbations est également étudiée.

Les résultats de simulation font l'objet d'une étude comparative avec le contrôleur P&O développé auparavant faisant ressortir la prévalence des techniques suggérées. Les travaux de ce mémoire sont parachevés dans la conclusion générale.

# **Chapitre I**

**Énergies renouvelables et leurs systèmes**

**Chapitre I : Énergies renouvelables et leurs systèmes :****I.1. Introduction :**

Les systèmes des énergies renouvelables à savoir les systèmes photovoltaïques (PV) sont des outils appropriés pour produire de ; énergie électrique propre. Ces systèmes assurent une large gamme de puissance électrique qui est utilisée dans des applications autonomes/ou transmise au réseau électrique [15-16].

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'origine des énergies renouvelables et ses sources, en suite celui du système photovoltaïque et son fonctionnement.

**I.2. Energies renouvelables :**

Les énergies renouvelables, sont des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici vingt à trente ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.[15]

La production d'électricité renouvelable (incluant la production des centrales de pompage turbinage) a atteint 4 699,2 TWh en 2012 dans le monde, franchissant nettement le seuil des 20 % de la production d'électricité mondiale (20,8 %). Les combustibles fossiles demeurent le noyau dur de la production d'électricité mondiale avec plus des deux tiers du total (68,1 % en 2012). La Fig. I.1.a présente la production mondiale d'électricité en 2012 et la Fig. I.1.b fait un zoom sur la production d'électricité mondiale d'origines renouvelables.





a. Production mondiale globale

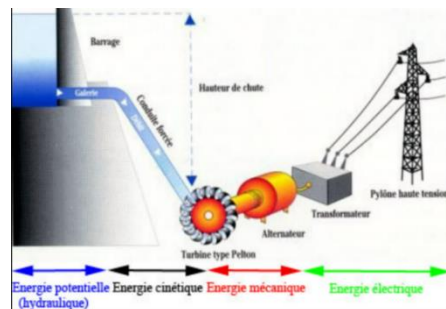
b. Production mondiale d'origines  
Renouvelables

**Figure. I.1 :** Production mondiale d'électricité en 2012

L'électricité renouvelable provient de six sources distinctes. L'hydroélectricité (incluant les centrales de pompage-turbinage) est la première d'entre elles avec une contribution en 2012 de 78 %. L'énergie éolienne, qui depuis 2009 est devenue la deuxième source d'énergie renouvelable, représente désormais 11,4 % du total renouvelable. Elle devance la filière biomasse, qui rassemble la biomasse solide, la biomasse liquide, le biogaz et les déchets ménagers renouvelables (6,9 %). Suivent le solaire (2,2 %) qui rassemble les centrales photovoltaïques et les centrales solaires thermiques (hélio thermodynamiques), la géothermie (1,5 %) et les énergies marines (0,01 %) qui restent une filière en phase de démonstration. [16]

**I.2.1. Energie hydraulique (L'hydroélectricité) :**

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chutes d'eau, cours d'eau, courants marin, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique. L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages.[17]



**Figure. I.2 :** Énergie hydraulique

### I.2.2.Énergie éolienne :

Une éolienne (Fig.I.3) est un dispositif qui permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette énergie est ensuite transformée dans la plupart des cas en électricité. Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent généralement comprises entre 14 et 90 km / h, par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesses. Le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, directement injectée dans le réseau électrique. La quantité d'énergie produite par une éolienne dépend principalement de la vitesse du vent mais aussi de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air. Selon Global Wind Energy Council (GWEC), la capacité mondiale installée à la fin de l'année 2011 est d'environ 238 gigawatts [18].



**Figure. I.3 :** Eoliennes

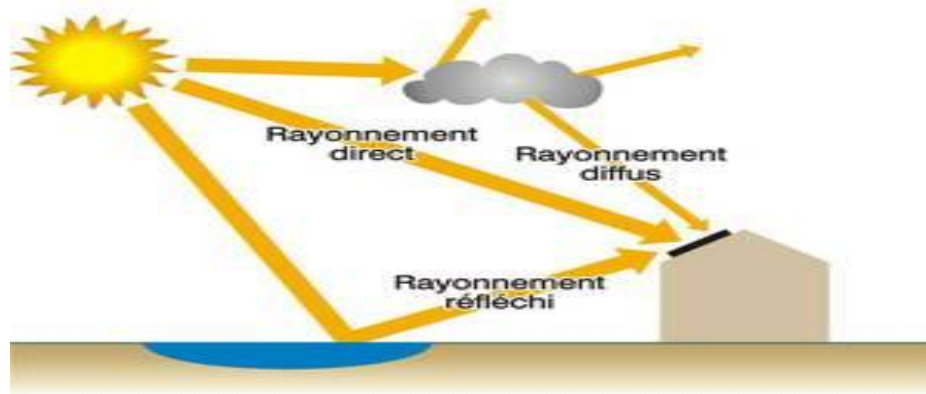
### I.2.3. L'énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre. Un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ( $KWC/m^2$ ) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

**I.2.3.1. Énergie solaire thermique :** qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

**I.2.3.2.Énergie solaire photovoltaïque :** qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.[19]

**I.2.3.3. Rayonnement solaire :** La rotation et l'inclinaison de la terre provoquent une variation de l'énergie disponible en fonction de la latitude en un point donné. De plus, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et les phénomènes météorologiques entraînent des variations quotidiennes qui augmentent, ou diminuent, le rayonnement solaire reçu par un système photovoltaïque. On distingue pour cela : Rayonnement direct, Rayonnement diffus et Rayonnement réfléchi [20]

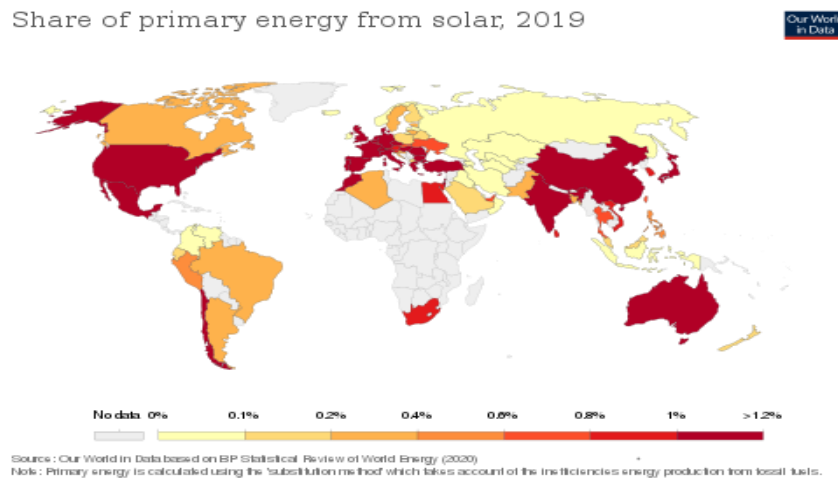


**Figure. I.4 :** Composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné

### I.3. Potentiel solaire dans le monde :

La croissance mondiale photovoltaïques extrêmement dynamique et varie fortement selon les pays. À la fin de 2019, un montant cumulé de 629 GW d'énergie solaire était installé dans le monde.[21] Au début de 2020, le principal pays pour l'énergie solaire était la Chine avec 208 GW,[22] représentant un tiers de la capacité solaire installée mondiale. En 2020, il y a au moins 37 pays dans le monde avec une capacité PV cumulée de plus d'un gigawatt.

Les principaux installateurs de 2016 à 2019 étaient la Chine, les États-Unis et l'Inde.[23] La capacité solaire PV disponible au Honduras est maintenant suffisante pour fournir 12,5% de l'énergie électrique du pays tandis que l'Italie, l'Allemagne et la Grèce peuvent produire entre 7% et 8% de leur consommation électrique domestique respective.[24]

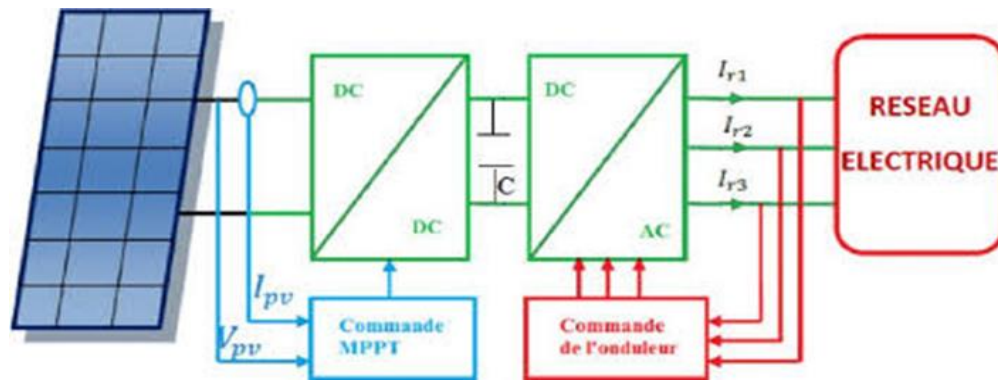


**Figure. I.5 :** Part de l'énergie primaire provenant du solaire, 2019

#### **I.4. Système photovoltaïque :**

##### **I.4.1. Qu'est un système Photovoltaïque :**

Le générateur PV est un ensemble d'équipements connectés pour exploiter l'énergie PV afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les panneaux peuvent être assemblés pour constituer un "champ PV". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement mais à d'autres moments qui nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On dote alors le système de batteries qui permettent de stocker l'électricité et de la rétablir en cas de nécessité. Un régulateur est alors essentiel pour parer aux problèmes de surcharges ou les décharges profondes de la batterie. Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur PV, est converti à l'aide d'un onduleur PV en courant alternatif.[25]



**Figure.I.6 :** Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau.

#### I.4.2. Générateur PV :

C'est un dispositif qui transforme l'énergie PV en électricité. Selon la puissance crête désirée, ce générateur PV est constitué d'un certain nombre de modules assemblés entre eux en série ou en parallèle.

#### I.4.3. Effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie.[26].

#### I.4.4. Cellule PV :

##### I.4.4.1. Structure physique :

La cellule est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

La cellule la plus commune d'aujourd'hui est une cellule simple au silicium de jonction PN avec un rendement qui arrive jusqu'à environ 17% [27]. Ce matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites

respectivement dopée de type n et dopée de type p (Fig. I.7). Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%). La face arrière peut être entièrement métallisée.[28]

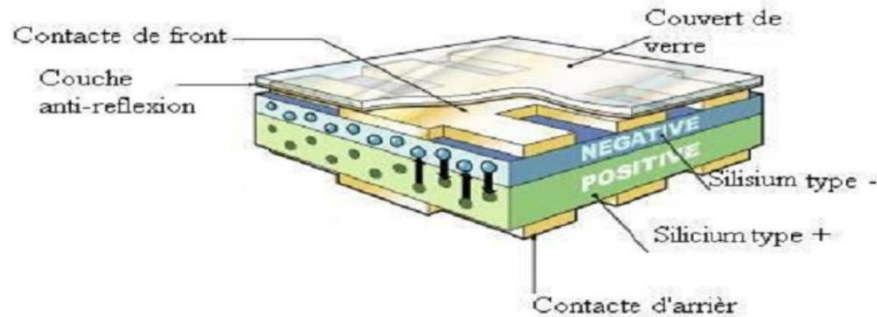


Figure. I.7 : Structure d'une cellule PV

**I.4.4.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :**

Lorsque cette cellule sera exposée au rayonnement, les photons créent des paires d'électron trou avec une énergie plus grande que la bande d'énergie du semi-conducteur. Ceci s'appelle l'effet photovoltaïque, a été découvert par Edmond Becquerel en 1889[29]. Les porteurs de charge nouvellement créés dans la région d'épuisement sont séparés par le champ électrique existant. Ceci mène à une accumulation d'un potentiel de tension appelé photo-voltage. Dès qu'une charge sera reliée à la cellule, cette tension causera un courant (appelé le photo-courant) qui circulera dans le circuit.[30]

**I.4.4.3. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :**

$$I(V) = I_{ph}(V) - I_{obsc}(V) \tag{1.1}$$

$I_{ph}$  : Densité de courant photo-généré

$I_{obsc}$  : Densité de courant d'obscurité.

$V$  : la tension de cellule PV.

Dans le cas d'obscurité,  $I(V)$  obéit à l'équation du courant de la diode Schottky suivante [31,32]:

$$I_D(V) = I_S \times \left( \text{Exp} \left( \frac{q \times V}{n \times k \times T} \right) - 1 \right) \tag{1.2}$$

- $I_D$  : courant de la diode Schottky.

$$I(V) = I_{ph} - I_s \times \left( \text{Exp} \left( \frac{q \times V}{n \times k \times T} \right) - 1 \right) \quad (1.3)$$

- $I_s$  : Le courant de saturation de la diode.
- $q$  : La charge élémentaire.
- $k$  : Constante de Boltzmann.
- $T$  : La température.
- $n$  : Le paramètre intrinsèque de l'idéalité de la diode.

### I.5. Module photovoltaïque :

La cellule solaire de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système photovoltaïque.

Un ensemble de cellules forme un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées contre les agents extérieurs. Plusieurs modules forment un string PV et plusieurs string PV forment un champ ou générateur PV 1, auxquels viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie), des appareils de contrôle et de mesure, un onduleur, etc. [33]

#### I.5.1. Modèle mathématique d'un module PV :

Le modèle mathématique, qui caractérise le panneau PV, est donné par l'équation suivante [34] :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \times \left[ e \left[ \frac{q \times (V + N_s \times I \times R_s)}{\alpha_1 \times N_s \times k \times T} \right] - 1 \right] - I_{s2} \times \left[ e \left[ \frac{q \times (V + N_s \times I \times R_s)}{\alpha_2 \times N_s \times k \times T} \right] - 1 \right] - \frac{V + N_s \times I \times R_s}{N_s \times R_p} \quad (1.4)$$

$N_s$  : Nombres de cellules  $PV_s$  raccordées en série

### I.5.2. Influence de l'éclairement et température sur le comportement du module PV :

#### I.5.2.1. Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. La Fig. I (8) montre l'influence de la température, sur la caractéristique  $I(V)$  de la cellule solaire lorsque la température varie. On observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation du courant du court-circuit ( $I_{CC}$ ), on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert.

Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente [35]

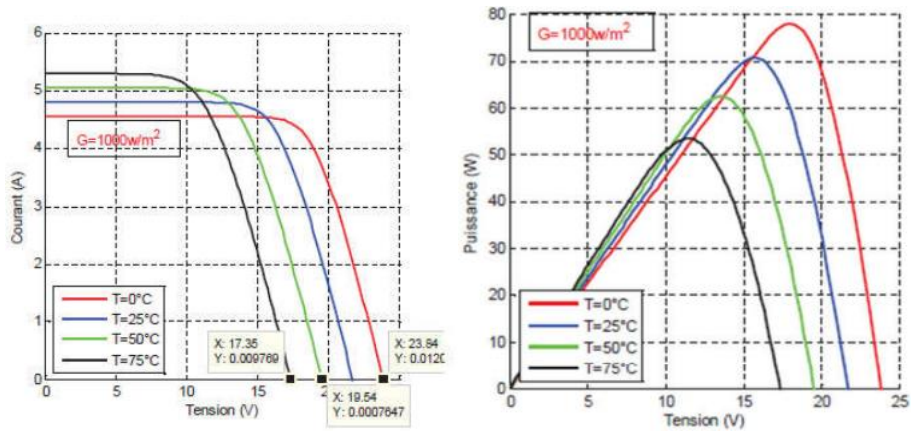


Figure. I.8 : Influence de la température sur la caractéristique

I.5.2.2. Influence de l'éclairement :

L'éclairement est un paramètre très important parce qu'il a un effet spécial sur le rendement électrique. D'après la Fig. I.9 ; la caractéristique courant - tension d'une cellule photovoltaïque change avec l'éclairement pour une température donnée : quand l'éclairement augmente, la courbe se translate vers le haut et vers la droite. Le courant de court-circuit  $I_{SC}$  (ou  $I_{CC}$ ) varie proportionnellement à l'éclairement. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert  $V_{OC}$  ne varie que très peu, [36] comme le montre la Fig. I.9 :

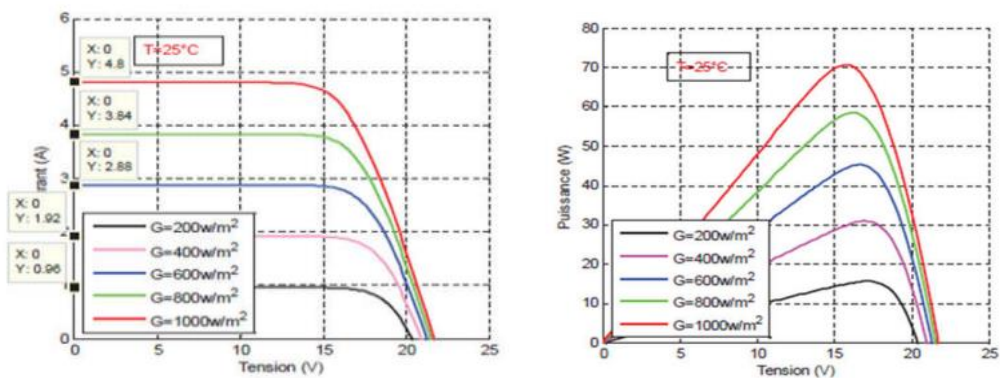


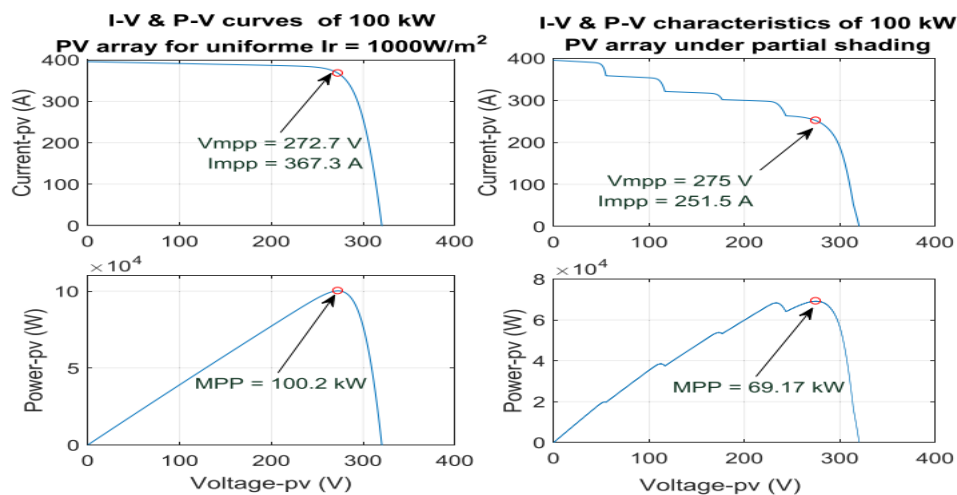
Figure. I.9 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I- -V et P-V d'une cellule solaire



### I.5.3. Effet de l'ombrage partiel sur le fonctionnement du module PV :

L'efficacité de la production l'énergie PV dépend essentiellement des conditions auxquelles est soumis le champ PV à savoir le rayonnement, la température et l'état de la surface de champ PV (salissure, détérioration). Ces facteurs influent directement sur son absorption photonique et affectent par conséquent la productivité des panneaux PV. Le phénomène d'ombrage partiel est un des problèmes qui nuisent au bon fonctionnement d'une centrale PV. L'ombrage partiel est une répartition non uniforme de l'éclairement qui est dû à plusieurs raisons (Fig. I .10). A cet effet, on distingue deux types d'ombrage [36]:

- Ombrage lointain qui correspond à la disparition du soleil derrière la ligne d'horizon.
- Ombrage proche qui est souvent dû à des obstacles inévitables tels que : les lignes électriques, les arbres, les bâtiments voisins, la saleté.



**Figure. I.10 :** Courbe de I(V) et P(V) d'un générateur PV de 100 KW.

Ce phénomène indésirable affecte l'efficacité de la conversion et l'habilité à extraire le maximum de puissance disponible du champ PV en engendrant de multiple maxima local. L'ombrage perturbe aussi le fonctionnement des cellules PV causant ainsi deux problèmes :

- Le premier problème c'est celui de mis match qui est dû au fait que le courant total d'un champ PV est limité par le courant du module ombragé (de faible puissance) dans le cas où le courant  $I_{CC}$  du module ombragé est supérieur au  $I_{CC}$  des modules uniformément éclairés.
- Le second problème est celui du point chaud (hot pot). Ce problème se produit quand le courant  $I_{CC}$  du module ombragé est inférieur au  $I_{CC}$  des modules uniformément éclairés

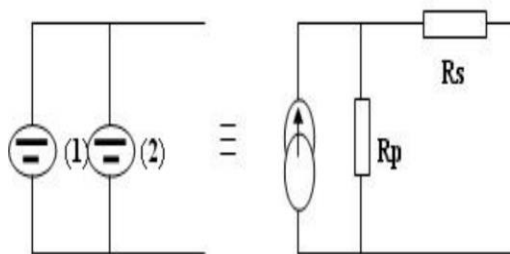
donc le module ombragé se conduit comme un récepteur d'énergie reçu par les autres modules PV.

Ceci engendre, en plus de la déformation de la courbe I-V (Fig.I.9), l'échauffement de ce module par dissipation de cette énergie et si le point de fonctionnement du module ombragé atteint la tension de claquage, ce module sera détruit à cause de l'effet de l'avalanche. Afin de concevoir un système PV performant, il est important de trouver une tension de fonctionnement optimale pour extraire le maximum de puissance PV, ce qui permet d'augmenter l'efficacité du générateur PV. Cependant, le générateur PV peut être partiellement ombragé comme le montre la Fig. I.9, ce qui force les modules PV à fonctionner avec plusieurs courants. D'où l'apparition de plusieurs points de puissances maximales (MPP) locaux. Ce problème affecte la production de l'énergie PV et donc l'efficacité du système PV [37].

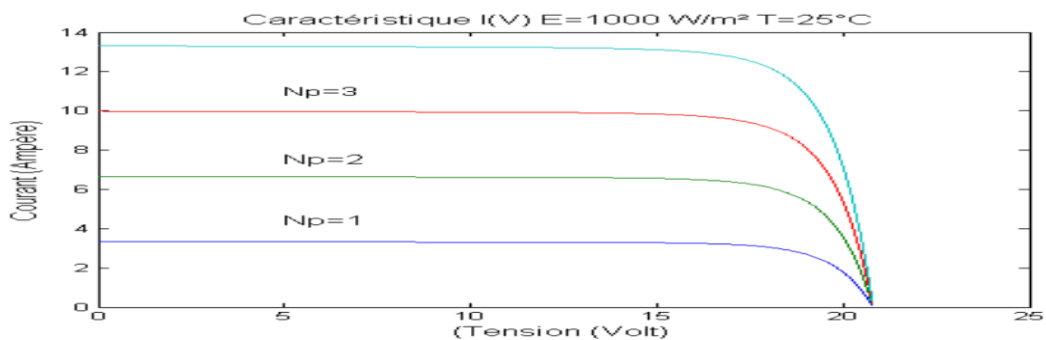
**I.6. Association des cellules photovoltaïques :**

**I.6.1. Association en parallèle :**

Un module de 36 cellules en série est suffisant pour augmenter le courant, on peut assembler "n" modules en parallèle comme il est montré au Fig.I.11 et I.12.[38]



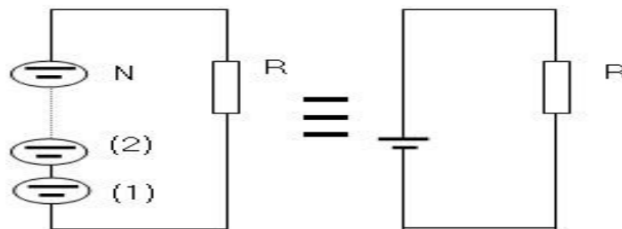
**Figure.I.11 :** Association des modules en parallèle [38].



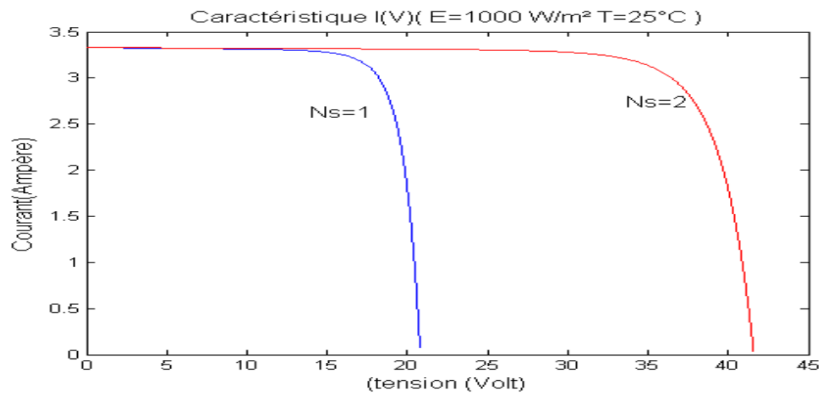
**Figure.I.12 :** Caractéristiques I (V) pour l'association en parallèle [38]

**I.6.2. Association en série :**

Un module de 36 cellules en série est suffisant, pour obtenir une augmentation de la tension.  
(Voir Fig.I.13 et I.14).



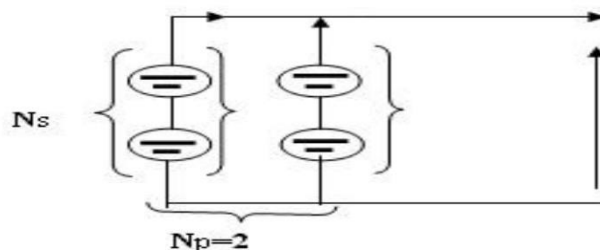
**Figure. I.13 :** Association des modules en série.



**Figure. I.14 :** Caractéristique I(V) pour l'association série [38]

**I.6.3. Association mixte (série parallèle) :**

Afin d’obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d’associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l’on appelle un générateur photovoltaïque. Fig.I.11 et I.13



**Figure. I.15 :** Association mixte des modules [24]

**I.7. Avantages et les inconvénients des énergies d'un système photovoltaïque :****I.7.1. Avantages :**

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [38].

**I.7.2. Inconvénients :**

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est (la limite théorique pour une cellule) théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.
- La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pourtant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [38]

**I.8. Conclusion:**

Au cours de ce chapitre nous avons pu définir le système photovoltaïque en donnant un profil sur les différents critères de ce dernier. Nous avons cité les caractéristiques d'une cellule photovoltaïques, ainsi les effets qui influencent le comportement de la cellule, qui varient selon les besoins énergétiques ; les avantages et inconvénients du système photovoltaïque conçues jusqu'à présent et les techniques utilisées.

# **Chapitre II**

**Modélisation et commande  
conventionnelle des systèmes  
photovoltaïques**

### Chapitre II : Modélisation et commande conventionnelle des systèmes photovoltaïques :

#### II.1. Introduction :

L'énergie solaire est une alternative intéressante à l'énergie des combustibles fossiles. Elle est durable, propre et sans pollution de l'environnement. La conversion directe du rayonnement solaire en électricité est connue sous le nom d'effet photovoltaïque (PV). Les systèmes PV ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible ; de plus, le générateur lui-même ne contient aucune pièce mobile et ne requiert donc pratiquement pas d'entretien. Par conséquent, les coûts récurrents d'opération et de maintenance sont relativement faibles. Pour ces raisons, cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural où les populations sont réparties dans de petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible [39].

#### II.2. Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge :

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques I-V non linéaires, qui dépendent entre autres du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon 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 générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est l'emploi d'un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme le montre la Fig.II.16.

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur [40].

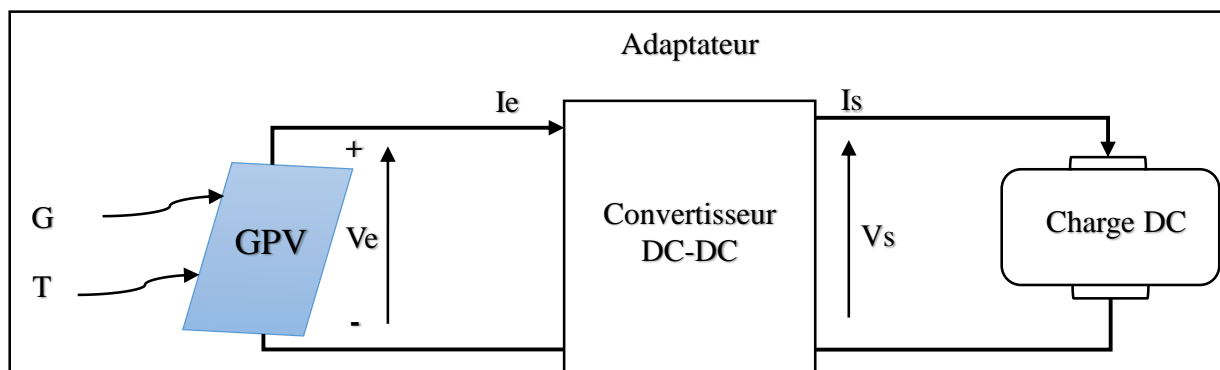


Figure II.16 : Etage d'adaptation entre un GPV et une charge

Ce dernier par le biais d'une commande spécifique est alors susceptible de permettre au générateur de délivrer sa puissance maximale notée  $P_{\max}$  ( $P_{\max} = V_{opt} * I_{opt}$ ) où  $V_{opt}$  et  $I_{opt}$  représentent respectivement les tensions et les courants optimaux du générateur photovoltaïque, pour une courbe I-V donnée, tout en assurant que la tension ou bien le courant de la charge corresponde bien aux caractéristiques de cette dernière. Pour que le générateur PV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge. Le convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quelques soient l'éclairement et la charge.

### II.3. Convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

Un hacheur est un convertisseur continu-continu qui permet de générer une source de tension continue variable à partir d'une autre source de tension continue. Selon la position du commutateur et de le hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés : [41]

- Élévateur de tension « boost » ou notamment appelé hacheur survolteur.
- Abaisseur de tension « Buck » ou hacheur dévolteur.
- Abaisseur/élévateur de tension « Buck-boost »

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou IGBT, qui peut commuter entre deux positions.

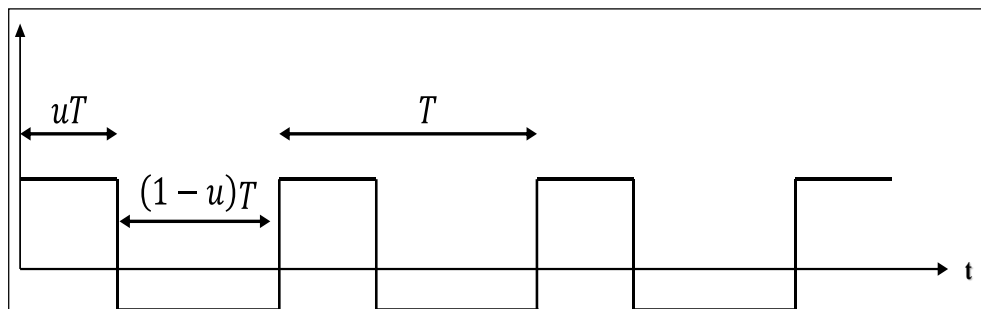
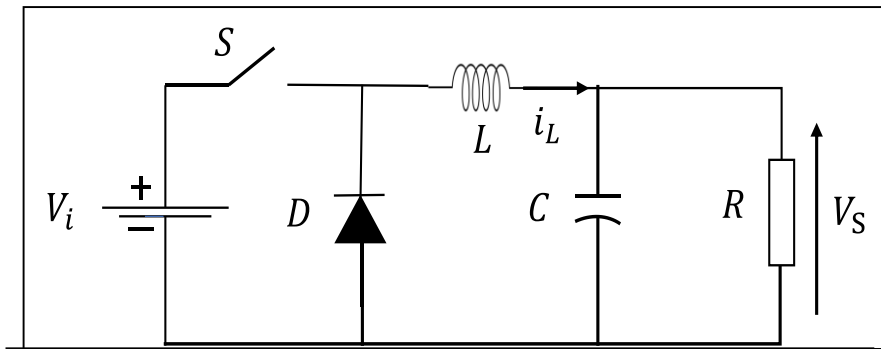


Figure II.17 : Signal de commande du commutateur

#### II.3.1. Convertisseur abaisseur :

Un convertisseur abaisseur, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur [41].



**Figure II.18 :** Schéma du convertisseur abaisseur

L'équation caractéristique du courant de l'inductance est donnée par :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_i - V_s}{L} \quad (\text{II.12})$$

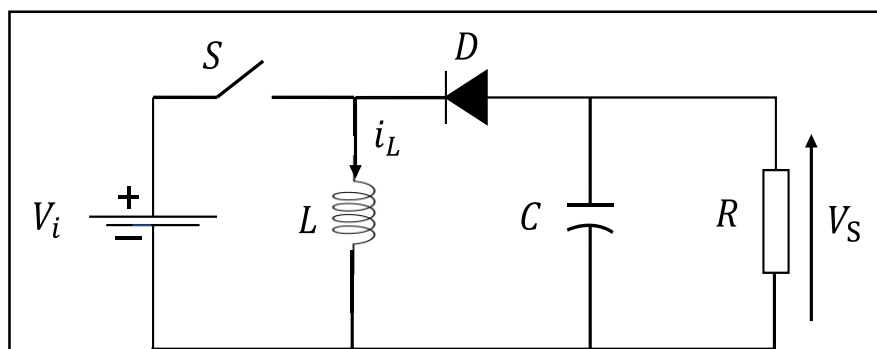
$L$  : Représente l'inductance [H]

Le processus de commutation est décrit par la position de l'interrupteur. Dans le premier laps de temps ( $uT$ ), l'inductance se charge. Dans le deuxième laps de temps  $(1-u)T$ , l'inductance libère l'énergie emmagasinée et la transfère vers la charge.

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{V_s}{L} \quad (\text{II.13})$$

### II.3.2. Convertisseur abaisseur-élevateur :

Un convertisseur abaisseur-élevateur est une alimentation à découpage qui est connue pour son aptitude à fournir une tension plus faible, ou plus élevée que celle appliquée à son entrée. Ceci dépend de la valeur du rapport cyclique.



**Figure II.19 :** Schéma d'un convertisseur abaisseur-élevateur

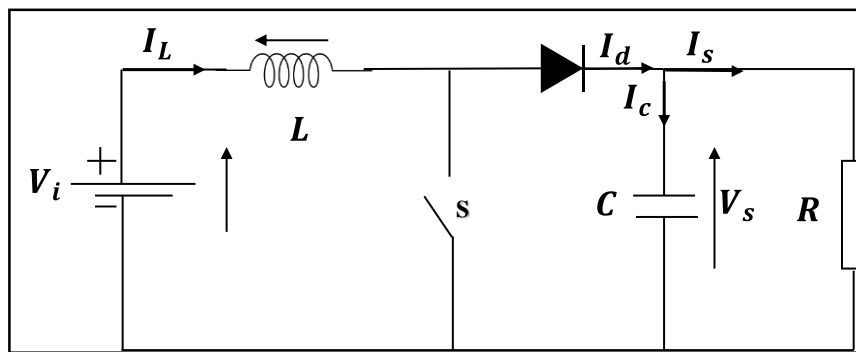
Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit :



$$V_s = \frac{u}{1-u} V_i \tag{II.13}$$

**II.3.3. Convertisseur élévateur :**

Lorsqu'on souhaite augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser le hacheur parallèle de type élévateur, appelé également hacheur survolteur. Ce dispositif de l'électronique de puissance est un convertisseur continu-continu mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs. Le découpage se fait à une fréquence très élevée ce qui a pour conséquence de créer une tension moyenne. La figure ci-dessous donne la forme la plus simple d'un hacheur élévateur.

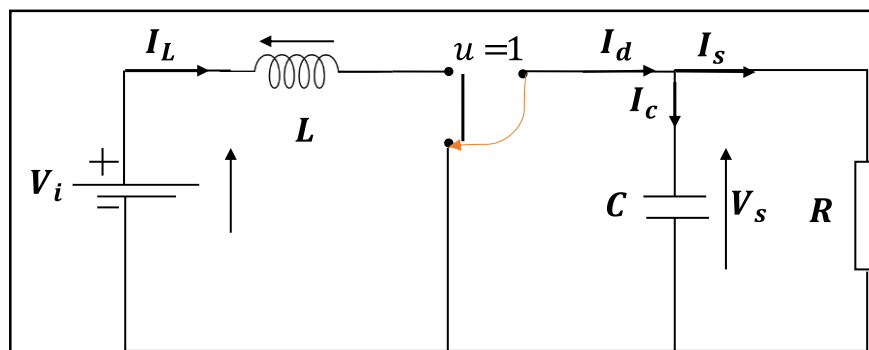


**Figure II.20 :** Schéma du hacheur survolteur

Le fonctionnement du hacheur survolteur peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur sur une période T du signal de commande.

**• De 0 à  $uT$  : phase d'accumulation d'énergie**

L'interrupteur 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.



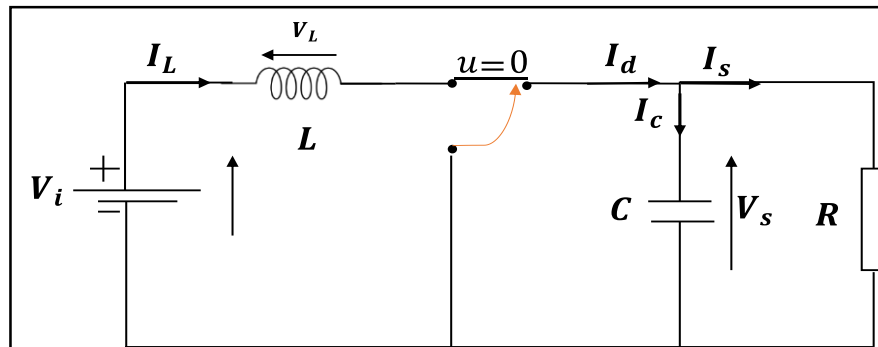
**Figure II.21 :** Schéma équivalent à la phase d'accumulation d'énergie

Les deux équations qui régissent le fonctionnement du hacheur sur l'intervalle  $[0 \ u T ]$  sont données par le système d'équations (II-12) :

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_i \\ C \frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_s}{R} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

• **De  $u T$  à  $T$  : phase de roue libre.**

L'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur. Sa f.e.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la charge, qui va fixer la tension de sortie.



**Figure II.22 : Schéma équivalent à la phase de roue libre**

Dans ce cas, le fonctionnement peut être décrit par le système d'équation (II.15)

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_i - V_s \\ C \frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_s}{R} + I_L \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Ainsi, il est possible de caractériser le fonctionnement du hacheur sur une période  $[0 \ T ]$  en combinant les deux systèmes d'équations (II.14) et (II.15) sous forme condensé :

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_i - (1-u)V_s \\ C \frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_s}{R} + (1-u)I_L \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Les techniques MPPT (Maximum Power Point Tracking) sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre. En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. C'est pourquoi nous allons présenter les méthodes conventionnelles de recherche du MPPT dans la section suivante.

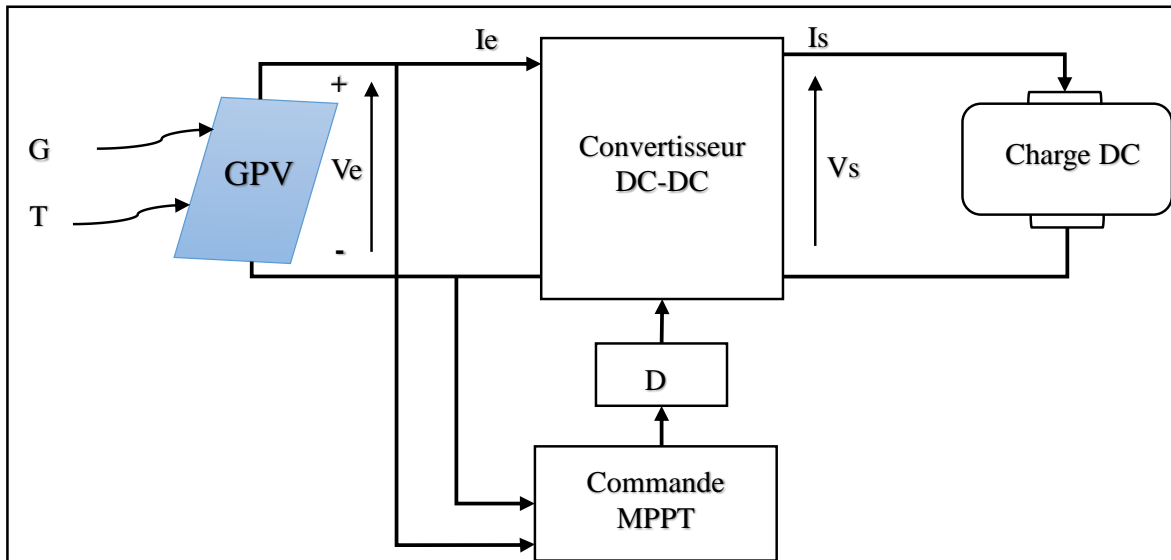
### **II.4. Commandes classiques des systèmes photovoltaïques :**

Les systèmes solaires photovoltaïques (PV) suscitent un grand intérêt dans le domaine de l'énergie et dans le but d'atteindre la valeur optimale du système PV, l'étage d'adaptation doit être muni d'une commande MPPT, qui va agir sur son rapport cyclique en fonction des variations des conditions météorologiques ou de la charge pouvant survenir. Dans ce sens, nous présenterons dans ce chapitre le fonctionnement à puissance maximale et les diverses méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont utilisées dans les systèmes solaires photovoltaïques afin d'obtenir une puissance maximale. Dans ce chapitre, une analyse claire des techniques MPPT conventionnelles telles que la perturbation et l'observation (P&O), la conductance incrémentale (IC), la tension de circuit ouvert (OCV).

### **III.5. Commande MPPT :**

La commande MPPT permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque suite à des variations climatiques et de charge. Son principe est basé sur la variation automatique du rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour maximiser continuellement la puissance du générateur photovoltaïque (GPV). Cette action de contrôle correspond à une variation de la tension de sortie du GPV pour l'amener vers sa valeur optimale [42].

La Fig.II.23 représente le schéma synoptique d'une charge continue alimentée par un GPV à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une commande MPPT.



**Figure II.23 :** Schéma synoptique d'un système PV utilisant la commande MPPT

Plusieurs méthodes ont été développées ces dernières années pour réaliser la commande MPPT. Ces méthodes sont classées en deux variantes : directes et indirectes.

### II.5.1. Méthodes indirectes (Méthodes Offline) :

Les méthodes indirectes sont basées sur la connaissance préalable de la caractéristique non linéaire du générateur photovoltaïque, qui n'est pas disponible avec précision. Ces méthodes nécessitent aussi de mesurer l'éclairement et la température du générateur photovoltaïque, puis consulter la courbe de puissance pour avoir le courant (ou la tension) de fonctionnement optimal(e) correspondant(e). Le courant (ou la tension) mesuré(e) du générateur, est ensuite comparé(e) aux valeurs optimales stockées dans le système de commande selon des conditions atmosphériques mesurées. La commande est alors appliquée pour atteindre la valeur optimale de la puissance [43]. Parmi ces méthodes, on peut citer :

- La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.
- La méthode de court-circuit.

### II.5.2. La méthode de la tension de circuit ouvert :

La relation quasi linéaire entre la tension du point de puissance maximale  $V_{mpp}$  et la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  du générateur PV, sous différents niveaux d'éclairement et de température, a donné lieu à la méthode  $V_{co}$  fractionnaire [44].

$$V_{MPP} \approx k_1 V_{oc} \tag{II.1}$$

Où  $k_1$  est une constante de proportionnalité. Comme  $k$  est en fonction des caractéristiques du générateur PV utilisé, elle doit généralement être calculée à l'avance en déterminant empiriquement  $V_{mpp}$  et  $V_{co}$  pour un générateur photovoltaïque spécifique à différents niveaux d'éclairement et de température. Le facteur  $V_1$  est généralement compris entre 0,71 et 0,78.

Une fois que  $k$  est connue,  $V_{mpp}$  peut être calculée à l'aide de l'équation (II.1) avec la mesure périodique de  $V_{co}$  pour chaque arrêt instantané du convertisseur de puissance. Toutefois, cela entraîne des inconvénients, notamment la perte temporaire de puissance. Pour éviter cela, l'utilisation des cellules pilotes est envisageable, à partir desquelles la tension  $V_{co}$  peut être obtenue. Ces cellules pilotes doivent être soigneusement choisies pour représenter exactement les caractéristiques du générateur PV. [45].

Une fois que  $V_{mpp}$  a été approximé, un contrôle en boucle fermée sur le convertisseur de puissance du réseau peut être utilisé pour atteindre asymptotiquement cette tension désirée. Le générateur PV ne fonctionne jamais techniquement au MPP. Selon l'application du système PV, cela peut parfois être adéquat. Même si le  $V_{co}$  fractionnel n'est pas une véritable MPPT technique, elle est très facile et peu coûteuse et bon marché à mettre en œuvre car elle ne nécessite pas nécessairement contrôle par DSP ou microcontrôleur. Cependant,  $k_1$  n'est pas plus valable en présence d'un ombrage partiel

(Qui provoque des maxima locaux multiples) de la matrice PV et propose de balayer la tension du générateur PV pour mettre à jour  $k_1$

### **II.5.3. La méthode de court-circuit :**

Cette méthode est similaire à la méthode précédente ; mais elle fonctionne avec le courant au lieu de la tension. Dans ce cas, le courant optimal  $I_{MPP}$  du générateur PV est un pourcentage fixe du courant de court-circuit  $I_{sc}$  [46].

$I_{MPP} = k_2 I_{sc}$  (II.2) où  $k_2$  est une constante de proportionnalité qui varie entre 0,78 et 0,92 [47].

La mesure du courant  $I_{sc}$  pendant le fonctionnement pose des problèmes. Un commutateur supplémentaire doit généralement être ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter périodiquement le générateur PV de telle sorte que  $I_{sc}$  puisse être mesuré en utilisant un capteur de courant [47]. Cela augmente le nombre de composants et le coût [48].

### **II.5.4. Méthodes directes (méthodes Online) :**

Les méthodes directes sont des algorithmes itératifs effectuant la recherche de la valeur optimale de la tension  $V_{pv}$  du GPV pour que ce dernier puisse fournir sa puissance maximale. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas la connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV [49]. Dans la littérature, Il existe beaucoup d'algorithmes MPPT tels que : la méthode de perturbation et observation (P&O), l'incrémentation de l'inductance (IC), ...etc.

### **II.6. Les Algorithmes MPPT :**

Dans cette partie, on présentera l'aspect théorique de quelques méthodes (classiques et modernes) du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque et qui sont :

- Méthode de perturbation et observation (P&O).
- Méthode de conductance Incrémentale (IC).

#### **II.6.1. La technique Perturbation & Observation (P&O) :**

L'algorithme de perturbation et observation (P&O) est l'algorithme le plus utilisé dans la littérature et surtout dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Le principe de cette technique consiste à perturber (diminuer ou augmenter) la tension  $V_{pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{pv}$  qui en résulte. La Fig.II.2 montre que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente ( $dP/dV > 0$ ), alors il est clair que la perturbation a déplacé le point de fonctionnement vers le MPP. L'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue ( $dP/dV < 0$ ), alors la perturbation a éloigné le point de fonctionnement du MPP. L'algorithme inversera la direction de la perturbation suivante [42,50].

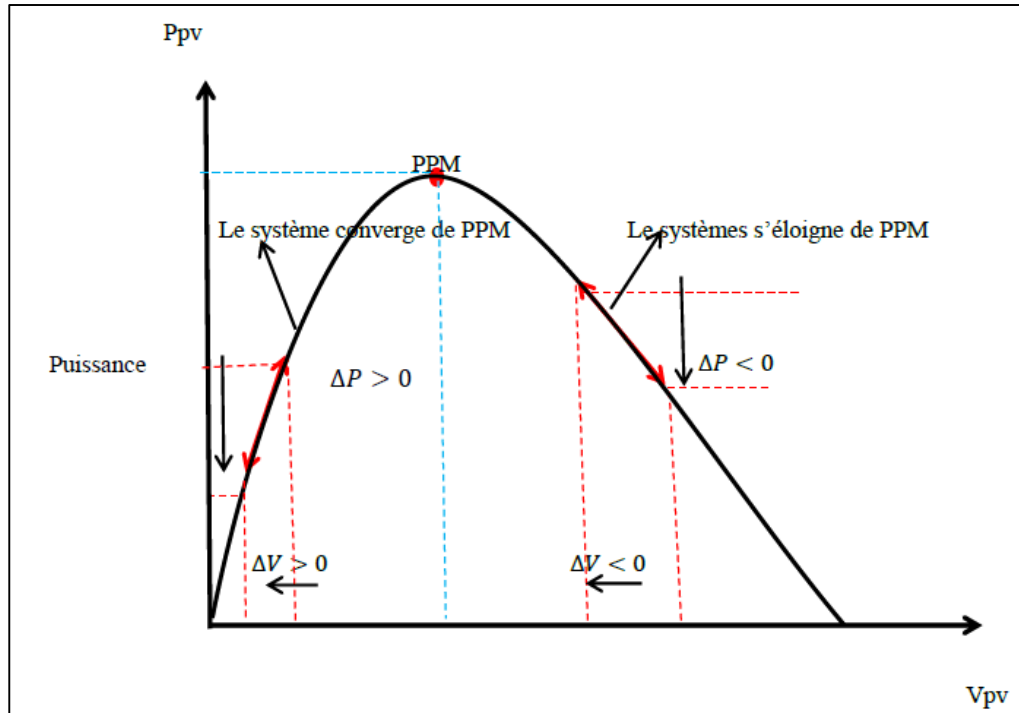


Figure II.24 : Schéma de la convergence par la méthode P&O

### II.6.1.1. Inconvénients de la méthode P&O :

L'algorithme P&O possède les deux inconvénients suivants :

- Lors d'un changement brusque d'irradiation, L'algorithme s'éloigne momentanément du PPM et peut perdre le contrôle de façon permanente.
- Les oscillations autour du PPM représentent un autre inconvénient de l'algorithme P&O. La minimisation du pas d'incrémentatation ( $\Delta V$ ) peut être prise comme une solution pour diminuer ces oscillations. Mais cette solution ralentit la poursuite du PPM. Alors, un compromis doit être fait entre la précision et la rapidité.

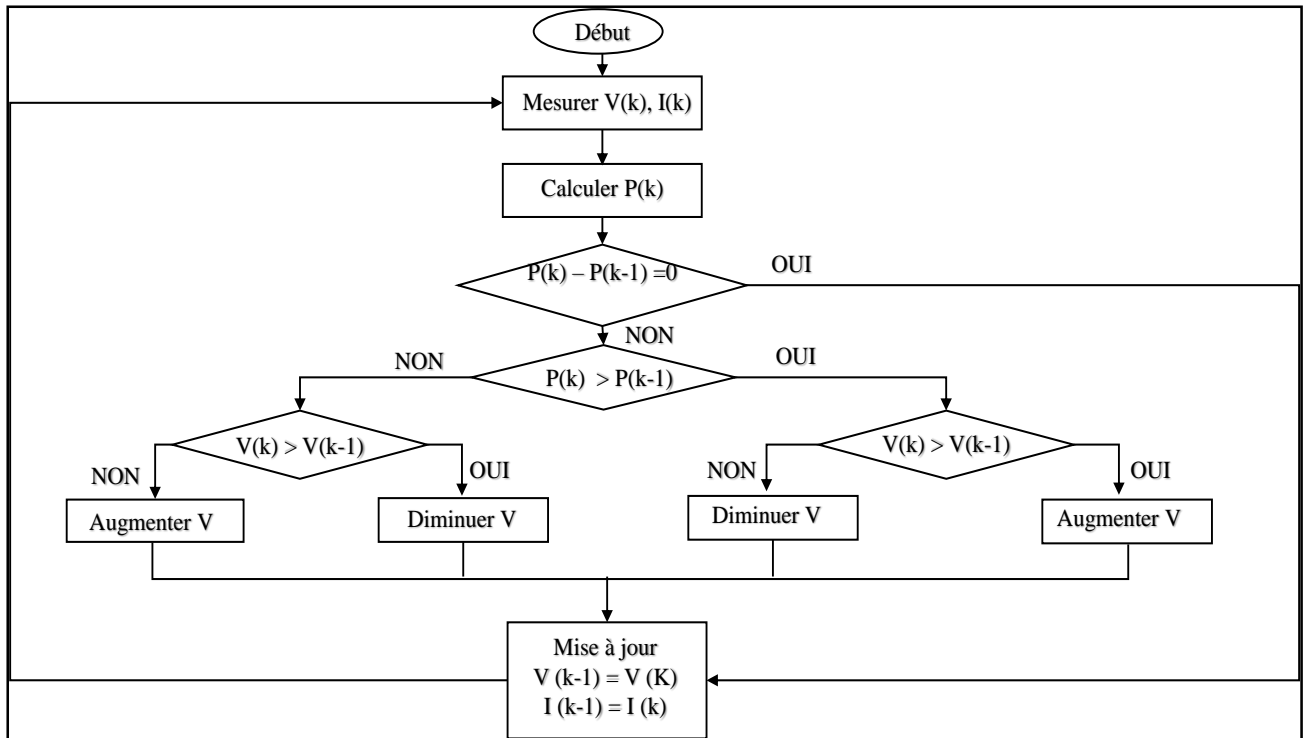


Figure II.25 : Algorithme du MPPT à base de la méthode P&O

### II.7. Méthode d'incrémentation de conductance (IC) :

Pour suivre la MPP, la méthode INC (Incrémental Conductance) utilise le rapport entre la conductance incrémentale et la valeur de conductance instantanée du module PV. En fonction de cette valeur, la pente des caractéristiques P-V est modifiée. En fonction de la modification de la pente, le cycle de service du convertisseur est généré [51, 46]. Pour le suivi MPP, l'application de l'algorithme INC suit trois étapes communes :

La puissance du GPV est donnée par :

$$P = V \times I \quad (II.3)$$

Et sa dérivée partielle est donnée par :

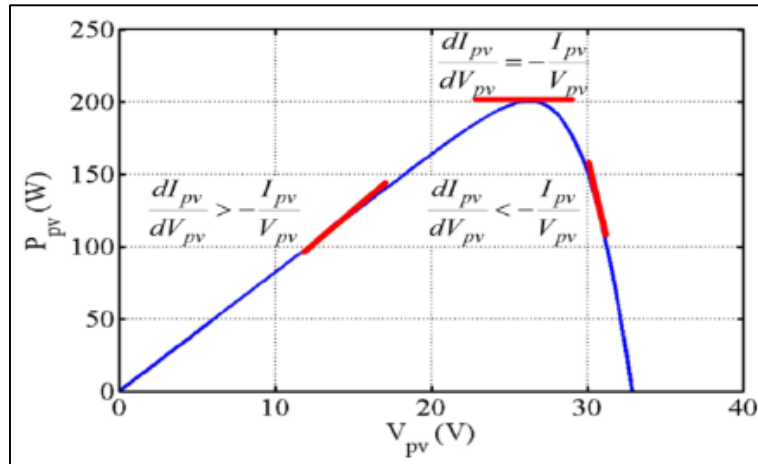
$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (II.4)$$

$$P_{pv} = P_{\max} \Rightarrow I + V \frac{dI}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (II.5)$$

1. Lorsque le  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ , l'erreur est nulle et  $V_{mpp}$  peut être atteint.
2. Lorsque  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ , (c'est-à-dire que)  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > \frac{-I}{V}$  le MPP est tirée vers la gauche de la courbe (l'erreur est positive)



3. Lorsque  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ , (c'est-à-dire que)  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}$  le MPP est tiré vers la droite de la courbe (l'erreur est négative)



**Figure II.26 : Principe de fonctionnement de l'algorithme IC**

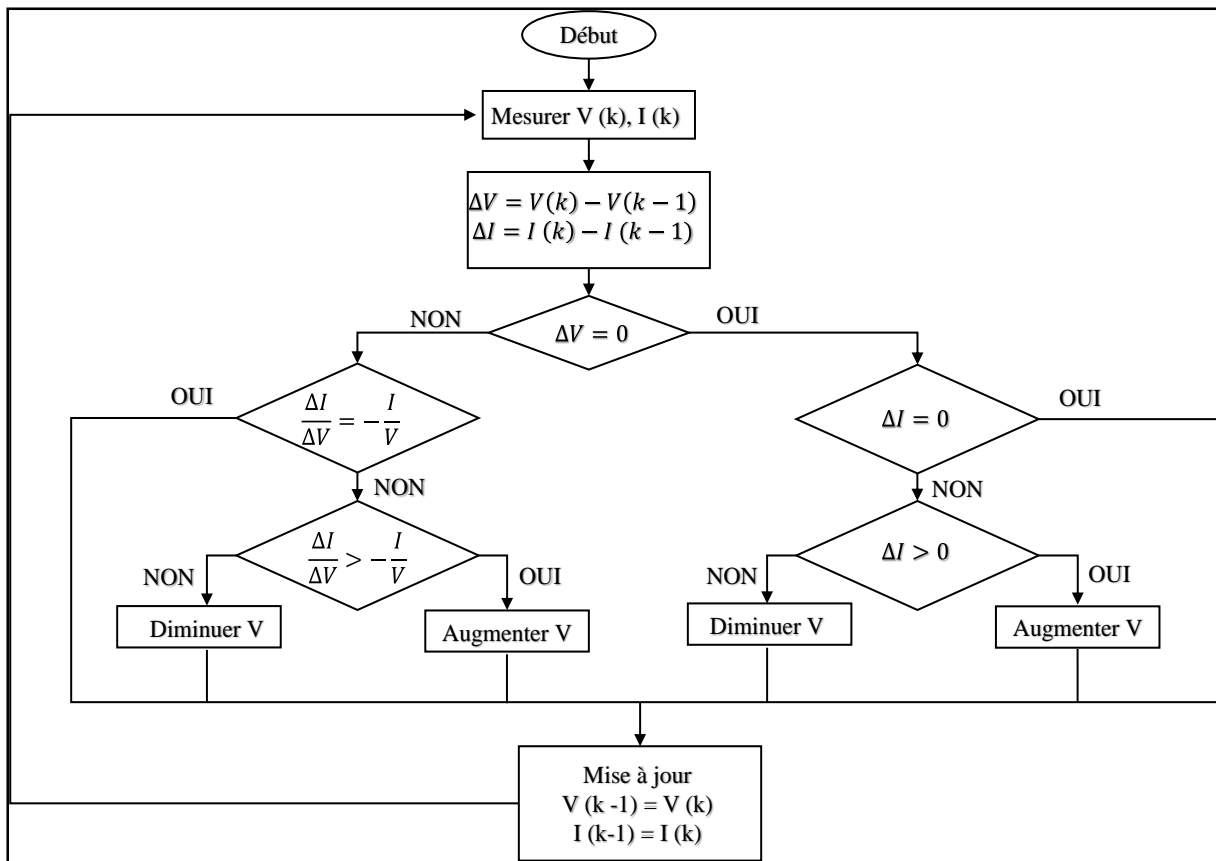
La conductance et l'incrément de la conductance sont notées respectivement  $G$  et  $\Delta G$  et sont données par :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{II.6})$$

$$\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{II.7})$$

Le PPM peut être atteint en comparant à chaque instant la valeur de  $G$  avec celle de  $\Delta G$ . Si  $\Delta G > -G$ , on diminue le rapport cyclique. Par contre, si  $\Delta G < -G$ , on augmente le rapport cyclique [52]. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le PPM.

L'organigramme de la méthode INC simple est présenté à la Fig.II.26. Les chercheurs ont utilisé nombreuses techniques pour réduire l'erreur de suivi dans la méthode INC



**Figure II.27 :** Organigramme de l’algorithme IC

**II.7.1. Inconvénients de la méthode IC :**

Cet algorithme trouve des difficultés de mise en œuvre dues à la complexité du circuit de commande. En outre, le calcul en temps réel de la dérivée nécessite un processeur de calcul rapide.

Comme la méthode P&O, cette technique présente pratiquement des oscillations autour du PPM car il est difficile de remplir la condition,  $dP_{PV} / dV_{PV} = 0$ , ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L’algorithme (IC) est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d’exécution plus long.

**II.8. Résultats de simulation :**

Afin d’évaluer et comparer les performances de la technique MPPT classique (P&O), des simulations ont été réalisées sous l’environnement Matlab/Simulink en tenant compte de la variation des conditions climatiques comme l’éclairement et la température.

**Cas 1 : conditions climatique standard :**

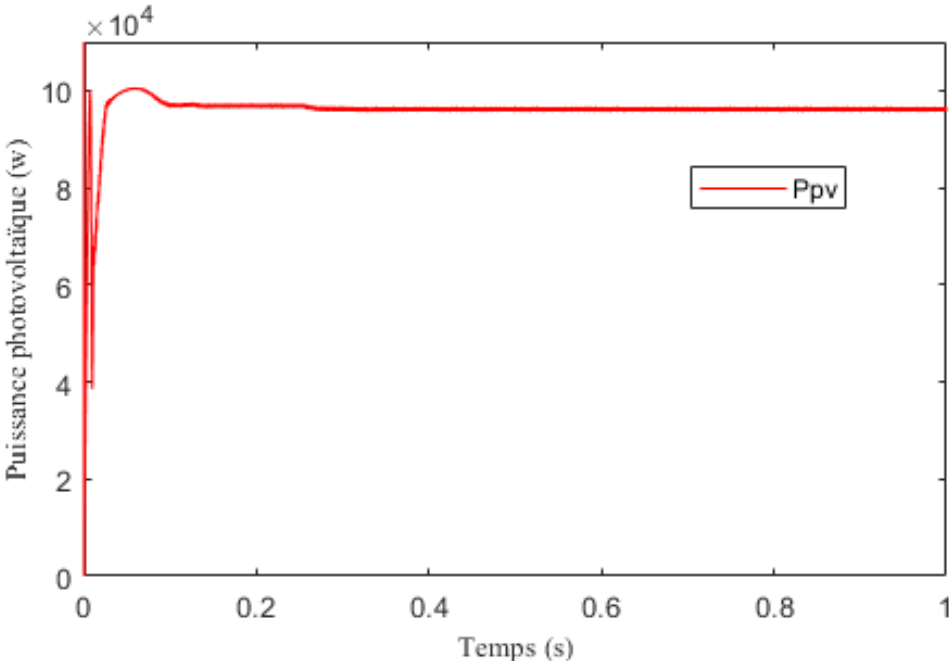


Figure II.28 :Evolution de la puissance photovoltaïque(1er cas)

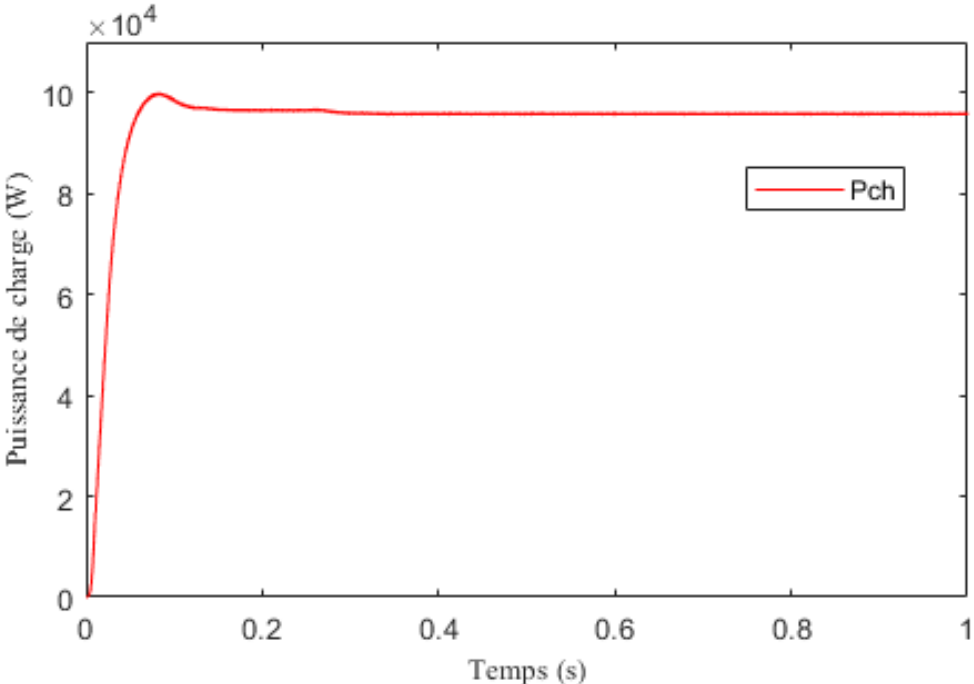


Figure II.29 : Evolution de la puissance de charge(1er cas)

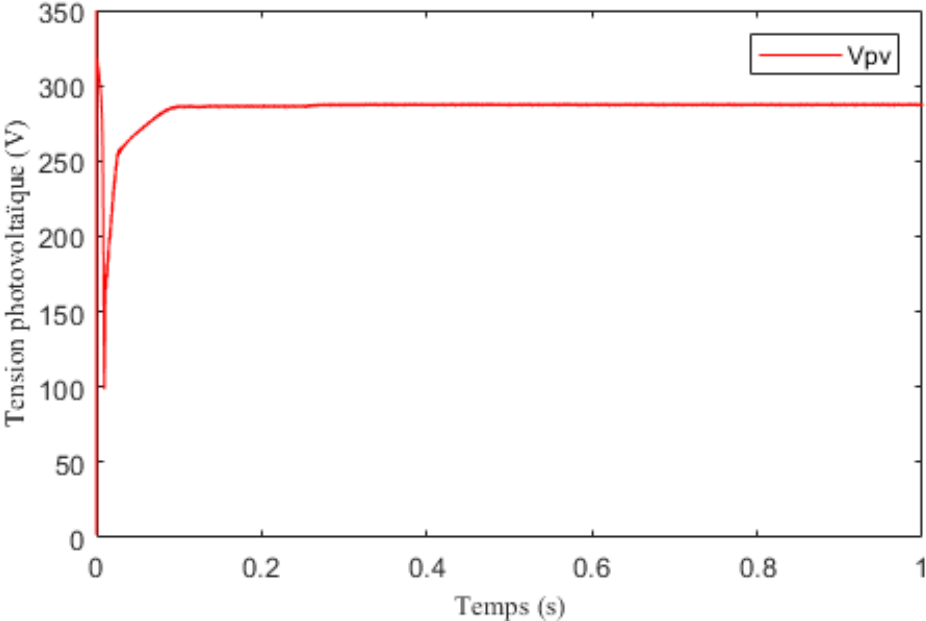


Figure II.30 : Evolution de la tension photovoltaïque (1er cas)

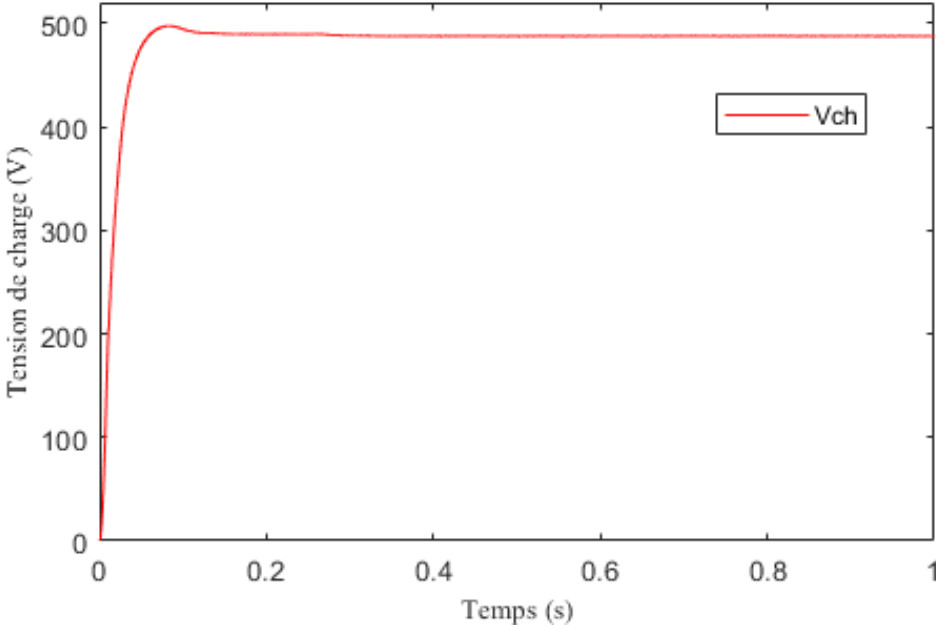
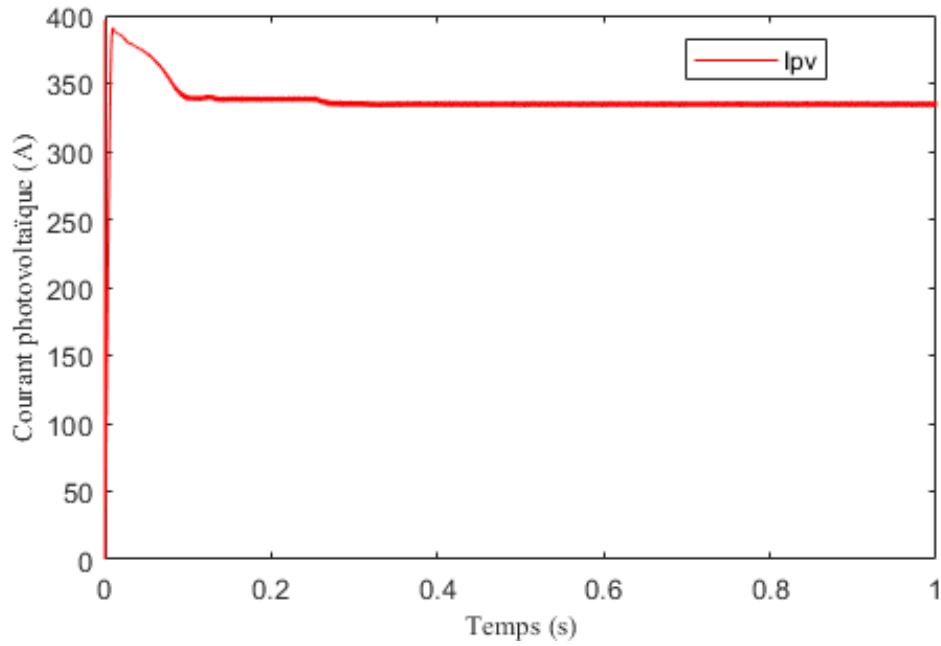


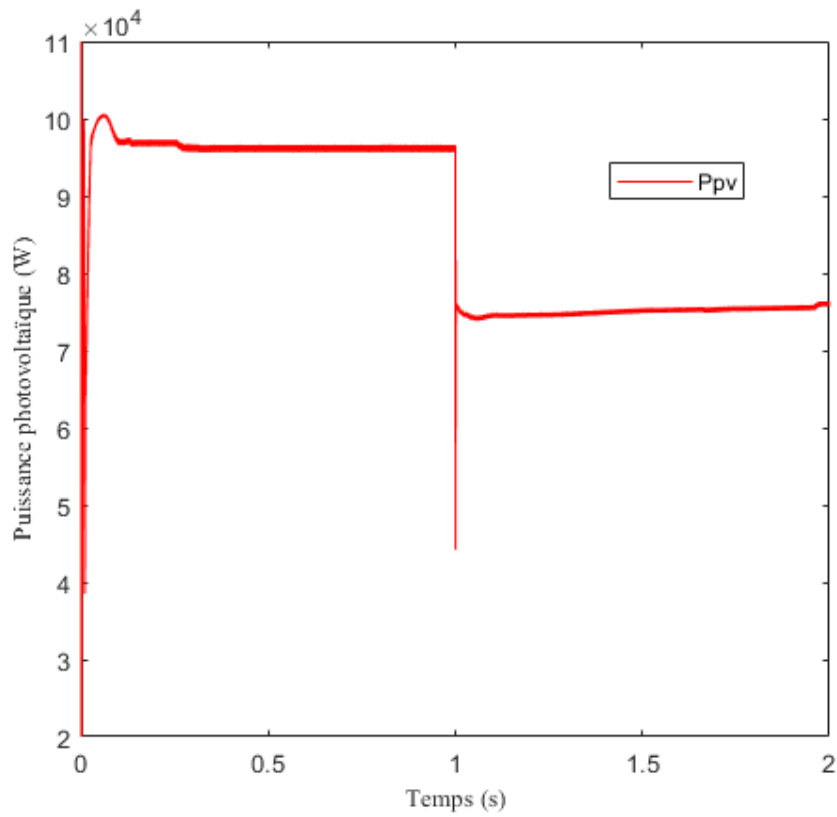
Figure II.31 : Evolution de tension de charge (1er cas)



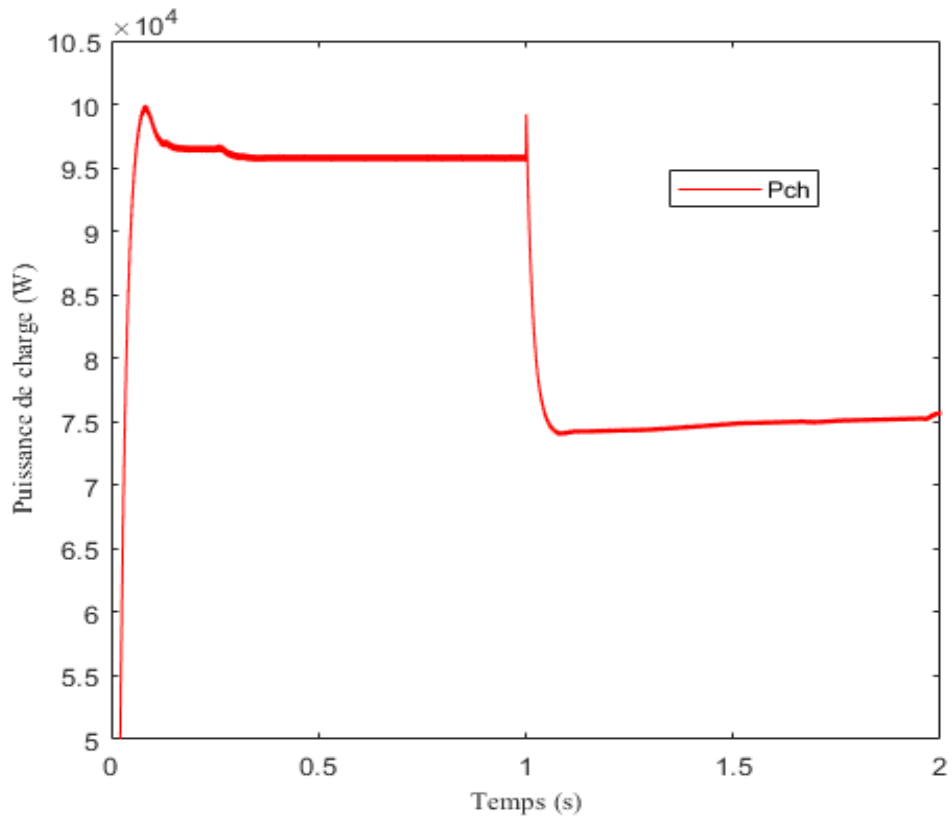
**Figure II. 32** :Evolution du courant photovoltaïque(1er cas)

**Cas 2 : conditions climatique variables :**

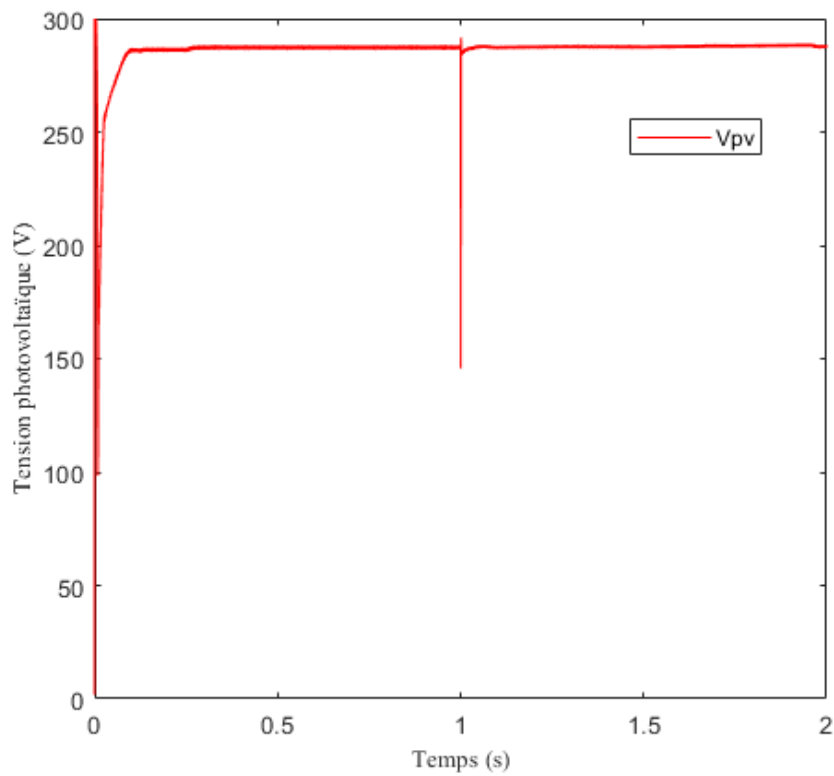
Dans ce test , on considère un éclairement variable et une température fixe.



**Figure II.33** : Evolution de la puissance photovoltaïque (2ème cas)



**Figure II.34** : Evolution de la puissance de charge (2ème cas)



**Figure II.35** : Evolution de la tension photovoltaïque (2ème cas)

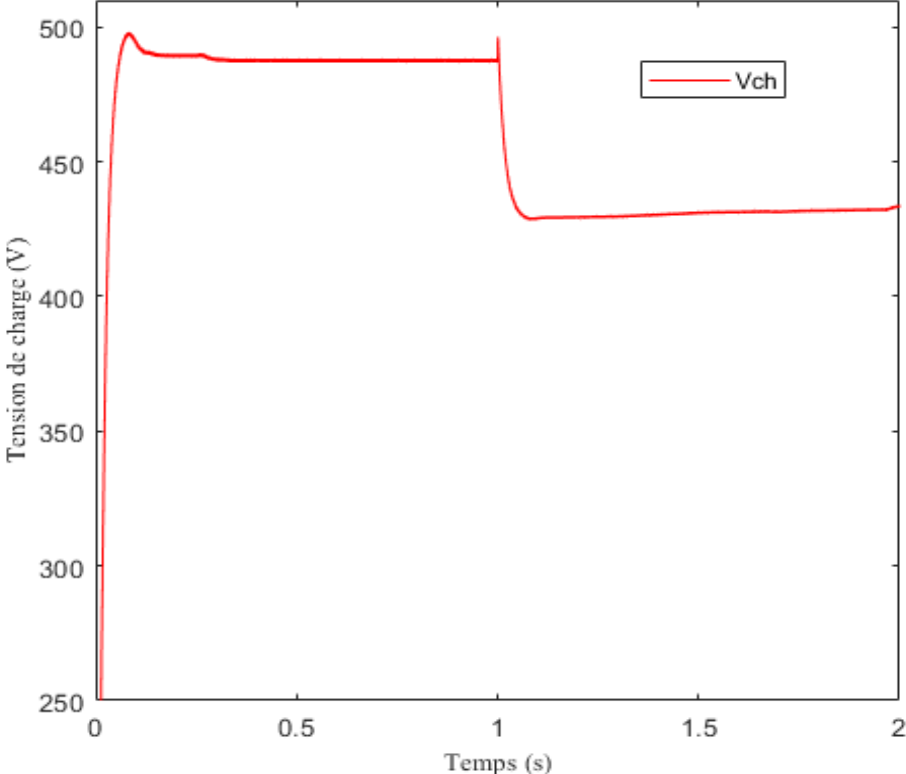


Figure II.36 : Evolution de la tension de charge (2ème cas)

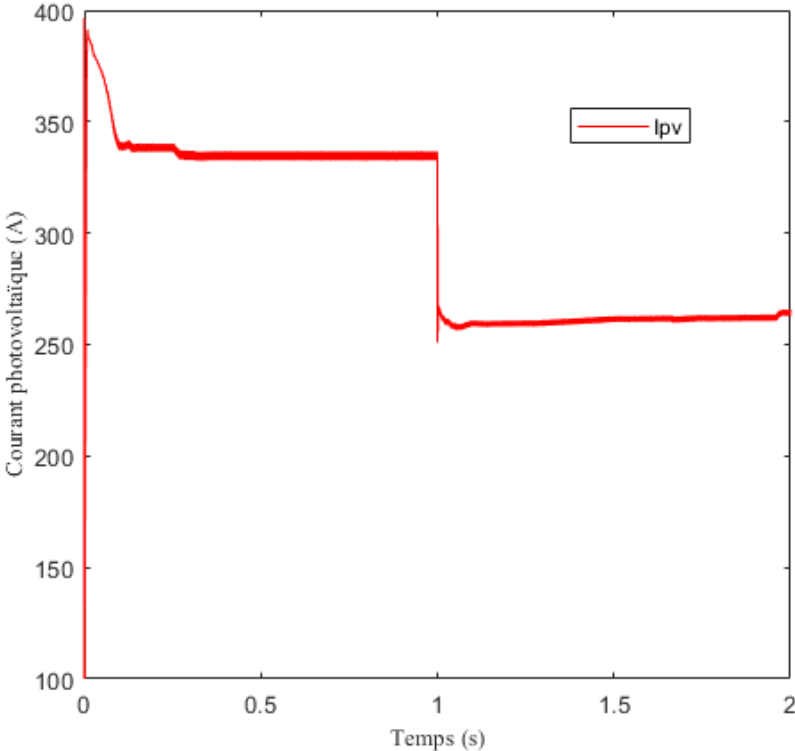


Figure.II.37 :Evolution du courant photovoltaïque (2ème cas)

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que :

- La variation de l'éclairement provoque une variation de la tension d'entrée du convertisseur et/ou la tension photovoltaïque. Cette variation est justifiée par le point de fonctionnement imposé par la commande MPPT (autour du PPM).
- L'algorithme P&O a permis de déterminer le point de puissance maximal pour différentes valeurs d'éclairement.

### **II.9. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les techniques de commandes MPPT les plus utilisées. Deux méthodes ont été présentées : la méthode « Perturbe and Observe » (P&O) et la méthode « Incrément de Conductance » (IC). Dans le but d'étudier le comportement du système photovoltaïque par rapport aux variations climatiques, plus précisément l'éclairement, nous avons simulé ce dernier pour différentes valeurs de l'ensoleillement. Les résultats de simulation montrent que la méthode P&O a permis au système de fonctionner au MPP même face aux changements de l'éclairement.



# **Chapitre III**

**Commande synergétique d'un système  
photovoltaïque**

### Chapitre III : Commande synergétique d'un système photovoltaïque :

#### III.1. Introduction :

La théorie de la commande synergétique est développée par le Prof. Anatoly Klesnikov [53]. Celle-ci est une nouvelle tendance dans le domaine du contrôle, basée sur l'utilisation des propriétés dynamiques des systèmes non-linéaires. La commande synergétique est une technique de contrôle assez proche de la commande par mode glissant dans le sens où l'on force le système considéré à évoluer avec une dynamique pré-choisie par le concepteur. Elle en diffère dans le fait que la commande  $y$  est toujours continue et utilise une macro-variable qui peut être fonction de deux ou plusieurs variables d'état du système. Récemment cette théorie a été appliquée avec succès dans le domaine des commandes de l'électronique de puissance. Son application à un convertisseur élévateur a été présentée [54], et quelques aspects pratiques concernant la simulation et le hardware ont été discutés [55,56] et parmi les applications pratiques réussies figure le chargeur de batteries [57]. Cette nouvelle approche ne requiert pas la linéarisation du modèle et emploie explicitement un modèle non linéaire pour la synthèse de la commande. La synthèse de la commande synergétique dans le cas général est passée en revue dans la section suivante.

#### III.2. Synthèse de la commande synergétique :

Considérons le système dynamique non-linéaire SISO de dimension  $n$  qui peut être décrit par l'équation non linéaire suivante :

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x, u, t) \quad (\text{III.1})$$

Où  $x$  représente le vecteur d'état du système et  $u$  représente le vecteur de commande.

Dans le cas simple la première étape dans la conception d'une commande synergétique réside dans la formation d'une macro-variable définie en fonction des variables d'état du système sous forme de relations algébriques entre ces variables qui reflètent les caractéristiques des exigences de la conception. Cette macro-variable peut être définie sous forme d'une combinaison linéaire de ces variables d'état. Elle détermine les propriétés du mouvement du système (II.1) à partir d'un état initial quelconque à un état d'équilibre désiré. Le nombre de macro-variables n'excède pas le nombre de variables à contrôler [54,56].

$$\Psi = \psi(x, t) \quad (\text{III.2})$$

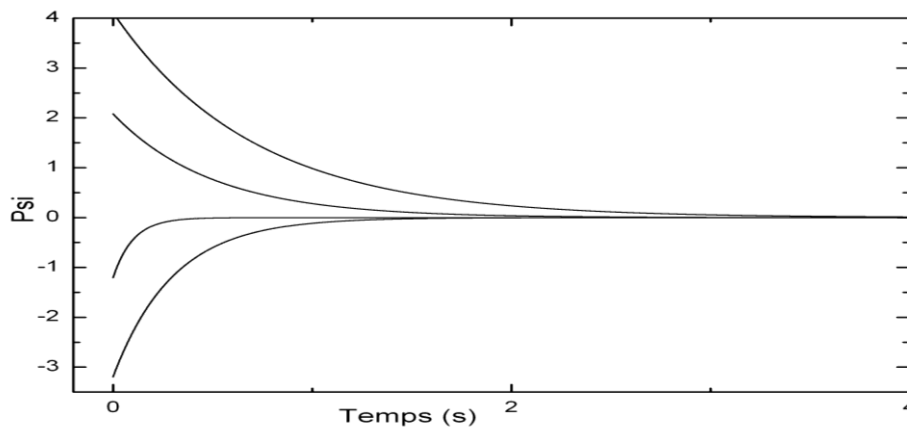
Où  $\Psi$  est la macro-variable et  $\psi(x, t)$  est une fonction définie par l'utilisateur. Chaque fonction  $\Psi$  appelée manifold, présente une nouvelle contrainte sur le système dans son espace d'état en réduisant son ordre d'une unité, et en le forçant à se déplacer vers une stabilité globale à l'état désiré :  $\Psi = 0$ .

L'objectif de la commande synergétique est de forcer le système à évoluer sur le domaine choisi au préalable par le concepteur :

$$\psi = 0 \tag{III.3}$$

Les caractéristiques de la macro-variable peuvent être choisies par le concepteur, selon les paramètres tels que l'objectif de commande, le temps de réponse, limitations de la commande, etc.... La macro-variable peut être une combinaison linéaire simple des variables d'état, et elle est forcée d'évoluer d'une façon désirée exprimée par une équation, appelée dans la littérature de la théorie de la commande synergétique, l'équation fonctionnelle [58,56 ,59], qui a la forme générale suivante :

$$T \dot{\psi} + \psi = 0 \quad T > 0 \tag{III.4}$$



**Figure.III.38** : Représentation graphique de la Solution de l'équation fonctionnelle pour de différentes conditions initiales.

La solution de l'équation (II.4) donne la fonction suivante :

$$\psi(t) = \psi_0 e^{-\frac{t}{T}} \tag{III.5}$$

Comme le montre la figure.II.1, la macro-variable  $\psi(t)$  converge vers la manifold  $\psi = 0$  pour des conditions initiales différentes de  $\psi_0$ , où  $t$  représente le temps et  $T$  un paramètre de contrôle qui indique la vitesse de convergence du système en boucle fermée vers le domaine indiqué. La vitesse de la convergence se régule par la valeur de ce paramètre [60-61].

En tenant compte de la chaîne de la différentiation qui est donnée par :

$$\frac{d\psi(x,t)}{dt} = \frac{d\psi(x,t)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \tag{III.6}$$

La substitution de (III.1) et de (III.2) dans (III.4) permet d'écrire :

$$T \frac{d\psi(x,t)}{dx} f(x,u,t) + \psi(x,t) = 0 \tag{III.7}$$

En résolvant l'équation (III.7) pour  $u$ , la loi de commande est alors exprimée comme suit :

$$u = g(x, \psi(x, t), T, t) \quad (\text{III.8})$$

A partir de l'équation (II.8), on s'aperçoit que la commande dépend non seulement des variables d'état du système, mais également de la macro-variable et du paramètre de contrôle  $T$ . En d'autres termes, le concepteur peut choisir les caractéristiques du contrôleur en choisissant une macro-variable appropriée et un paramètre de contrôle spécifique  $T$ . En synthétisant le contrôleur, chaque domaine présente une nouvelle contrainte sur le domaine de l'espace d'état et réduit l'ordre du système d'un degré, tout en allant dans la direction de la stabilité globale. Dans la synthèse du contrôleur synergétique montré ci-dessus, il est clair que celui-ci agit sur le système non-linéaire et une linéarisation ou une simplification du modèle n'est pas nécessaire comme observé lors de l'application de la théorie de commande traditionnelle.

Par le choix approprié des macro-variables, le concepteur peut obtenir les caractéristiques intéressantes suivantes pour le système final [62,60] :

- Stabilité globale
- Insensibilité vis-à-vis les paramètres
- Suppression de bruit.

L'application de cette approche est donnée dans la section suivante afin d'illustrer la simulation de la mise en œuvre d'un contrôleur synergétique MPPT.

### III.3. Model mathématique :

Notre objectif est d'obtenir une loi de commande en fonction des variables, qui satisfait une puissance photovoltaïque maximale pour différents modes d'opération. Nous employons le procédé décrit ci-dessus pour trouver la loi de commande.

Dans cette application, la dynamique du système PV est donnée l'ensemble des équations différentielles suivantes :

$$\begin{aligned} \dot{V}_{pv} &= \frac{-1}{C_1} i_L + \frac{i_{pv}}{C_1} \\ i_L &= \frac{1}{L} V_{pv} - \frac{R_C(1-d)}{L(1+\frac{R_C}{R})} i_L + \frac{1-d}{L} \left( \frac{R_C}{R+R_C} - 1 \right) V_{C2} - \frac{V_D(1-d)}{L} \\ \dot{V}_{C2} &= \frac{1-d}{C_2 \left( 1 + \frac{R_C}{R} \right)} i_L - \frac{1}{C_2(R+R_C)} V_{C2} \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

Ou encore :

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{C_1}(-x_2 + i_{pv})$$

$$\dot{x}_2 = f_1(x) + g_1(x)d(t) \quad (III.10)$$

$$\dot{x}_3 = f_2(x) + g_2(x)d(t)$$

$$f_1(x) = \frac{x_1}{L} - \frac{R_C}{L(1+\frac{R_C}{R})}x_2 + \frac{1}{L}\left(\frac{R_C}{R+R_C} - 1\right)x_3 - \frac{V_D}{L} \quad (III.11)$$

$$g_1(x) = -\frac{R_C}{L(1+\frac{R_C}{R})}x_2 - \frac{1}{L}\left(\frac{R_C}{R+R_C} - 1\right)x_3 + \frac{V_D}{L} \quad (III.12)$$

Avec  $x_1(t) = V_{PV}(t)$ ,  $x_2(t) = I_L(t)$ ,  $x_3(t) = V_0(t)$  :

Tous d'abord, nous définissons l'erreur de suivi de la tension  $\hat{e}_1$  dérivée temporelle ci-dessous :

$$e_1 = x_1 - x_{1d} \quad (III.13)$$

$$\dot{e}_2 = \frac{1}{C_1}(-x_2 + i_{pv}) - \dot{x}_{1d} \quad (III.14)$$

En prenant  $x_2$  comme une entrée de commande virtuelle et nous définissons une erreur de poursuite auxiliaire comme suit :

$$x_{2d} = i_{pv} - C_1 \dot{x}_{1d}, \text{ Avec } e_2 = x_2 - x_{2d}.$$

Ensuite, la nouvelle dynamique du système est obtenue comme suit :

$$\dot{e}_1 = \frac{-e_2}{C_1} \quad (III.15)$$

$$\dot{e}_2 = f_1(x) - \dot{x}_{2d} + g_1(x)d(t) \quad (III.16)$$

Où  $\dot{x}_{2d} = i_{pv} - C_1 \ddot{x}_{1d}$ . La synthèse synergétique stabilisant le système PV commence par définir une macro-variable donnée par l'équation suivante ;

$$\Psi = e_2 - e_1 \quad (III.17)$$

Où  $\lambda$  est un constant permettant la combinaison linéaire entre les entrées de contrôleur et la macro-variable  $\Psi$  doit satisfaire l'équation différentielle homogène suivante :

$$\dot{\Psi} + \tau\Psi = 0 \quad \tau > 0 \quad (III.18)$$

$\tau$  est un paramètre de contrôle spécifique qui indique la vitesse de convergence de la macro-variable (III.18) vers le manifold  $\Psi=0$ . On peut avoir :

$$\dot{e}_2 - \lambda \dot{e}_1 = \tau \Psi \quad (\text{III.19})$$

La dérivation de  $\dot{e}_2$  est donnée par (III.13). En substituant l'équation (III.14.15) dans l'équation (III.20), nous obtenons :

$$f_1 - \dot{x}_{2d} + g_1 d - \lambda \frac{e_2}{c_1} = -\tau \Psi \quad (\text{III.20})$$

On obtient la loi de commande synergétique donnée par l'équation (III.21) :

$$d = g_1^{-1} \left[ \lambda \frac{e_2}{c_1} - f_1 + \dot{x}_{2d} - \tau \Psi \right] \quad (\text{III.21})$$

L'expression de  $d$  est l'action de commande nécessaire pour le stabilisateur synergétique de système PV. La loi de commande (III.21) force la trajectoire de la variable d'état à satisfaire l'équation (III.18). Selon cette équation, la trajectoire converge vers le manifold  $\Psi=0$  avec une constante de temps.

#### III.4. Résultats de simulation :

Dans la simulation, le système PV est constitué d'un générateur PV, d'un convertisseur élévateur DC-DC, d'une charge et du bloc de contrôle MPPT. Les paramètres du module PV sont présentés dans le tableau (III.1). La valeur de l'inductance est égale à 0.005H, le condensateur d'entrée à 110 F $\mu$ , le condensateur de sortie à 12000 F $\mu$ . Plusieurs simulations ont été réalisées en tenant compte des variations des conditions climatiques à savoir l'éclairement et la température. Les résultats obtenus sont présentés pour une durée de 2 sec. Chaque figure présente une comparaison des caractéristiques du système PV régit par les approches SC et P&O.

Paramètres	Valeurs numérique
Puissance maximale $P_{MAX}$ (W)	305.226
Tension à la puissance maximale $V_{MPP}$ (V)	54.7
Courant à la puissance maximale $I_{MPP}$ (A)	5.58
Tension du circuit ouvert $V_{CO}$ (V)	64.2
Courant de court-circuit $I_{SC}$ (A)	5.96
Coefficient de température de $V_{CO}$ (% / deg.C)	-0.27269
Coefficient de température de $I_{CC}$ (% / deg.C)	0.061745

Tableau III.1. Spécifications du système

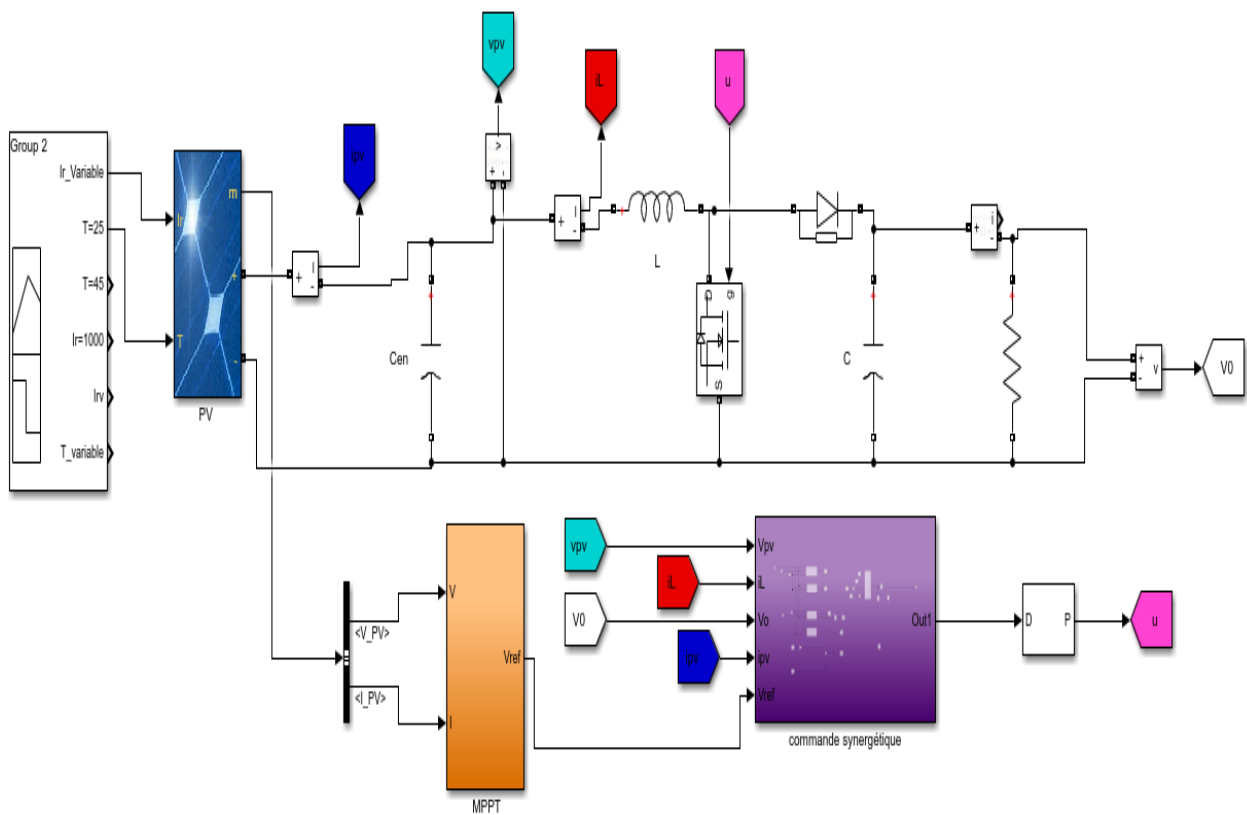
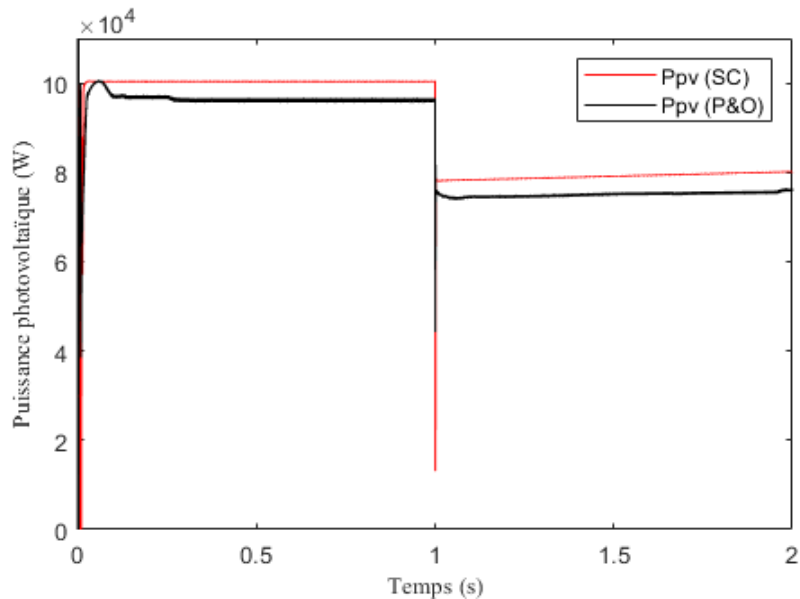


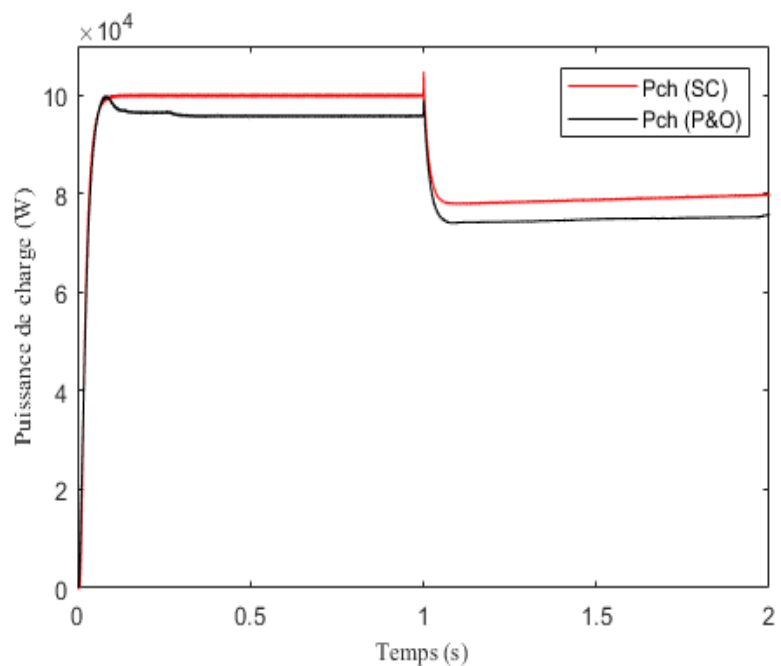
Figure III.39 : Schéma sous Simulink du système global

**Cas 1 : Conditions climatiques standards :**

Dans ce cas, les paramètres de simulation (la température  $T$  et l'éclairement  $S$ ) sont maintenus constants  $T_C = 25^\circ$  et  $S = 1000 \text{ W/m}^2$ . Les Figures.1-III.40 montrent les résultats de simulation de la puissance PPV, du courant PV  $I$ , de la tension VPV, de la tension de sortie  $V_0$  du convertisseur, du rapport cyclique (signal de commande) de la commande P&O ainsi que de la synergétique de la commande.



**FigureIII.40 : Puissance photovoltaïque (1<sup>er</sup> cas)**



**Figure III.41 : Puissance de charge (1<sup>er</sup> cas)**



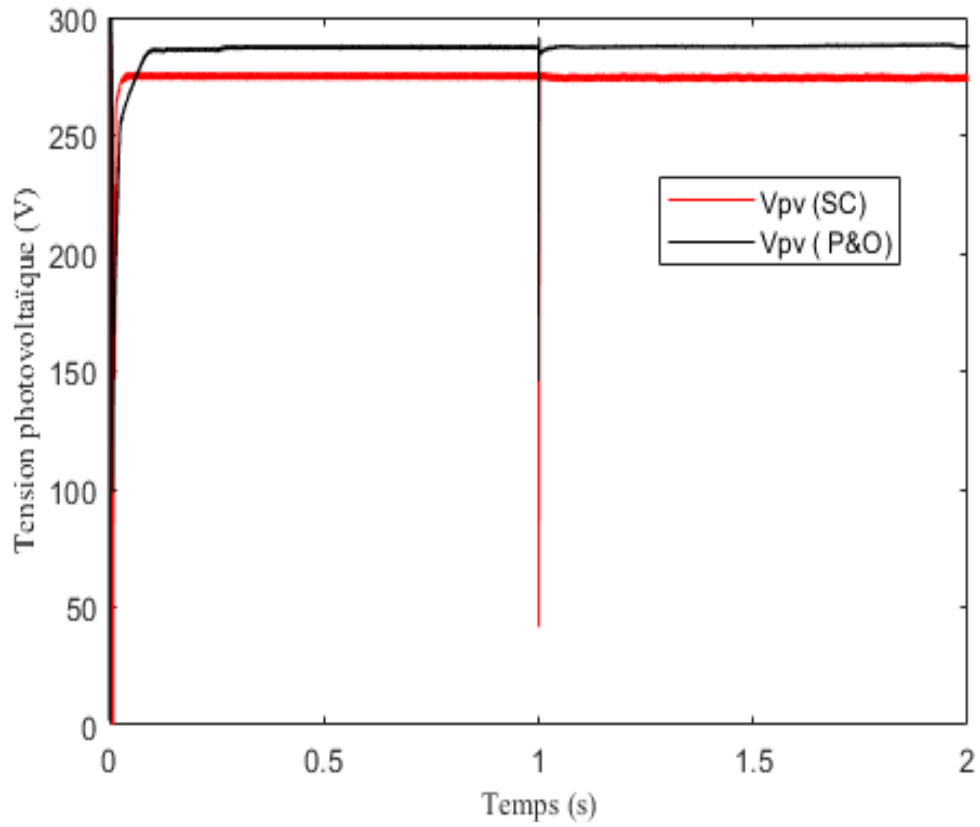


Figure III.42 : Tension photovoltaïque (1<sup>er</sup> cas)

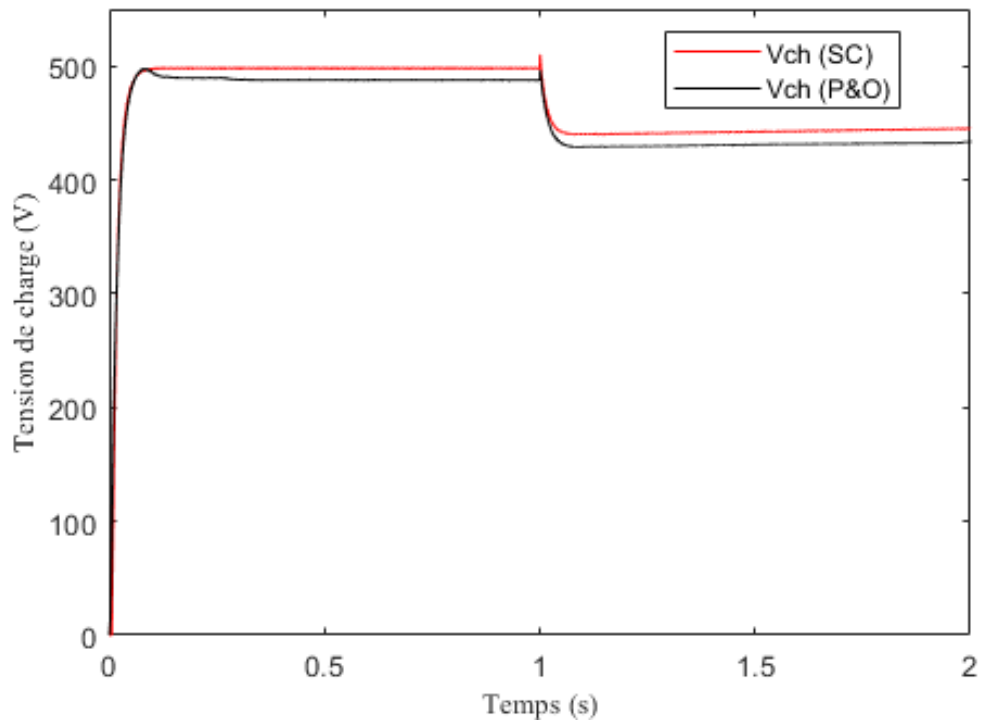
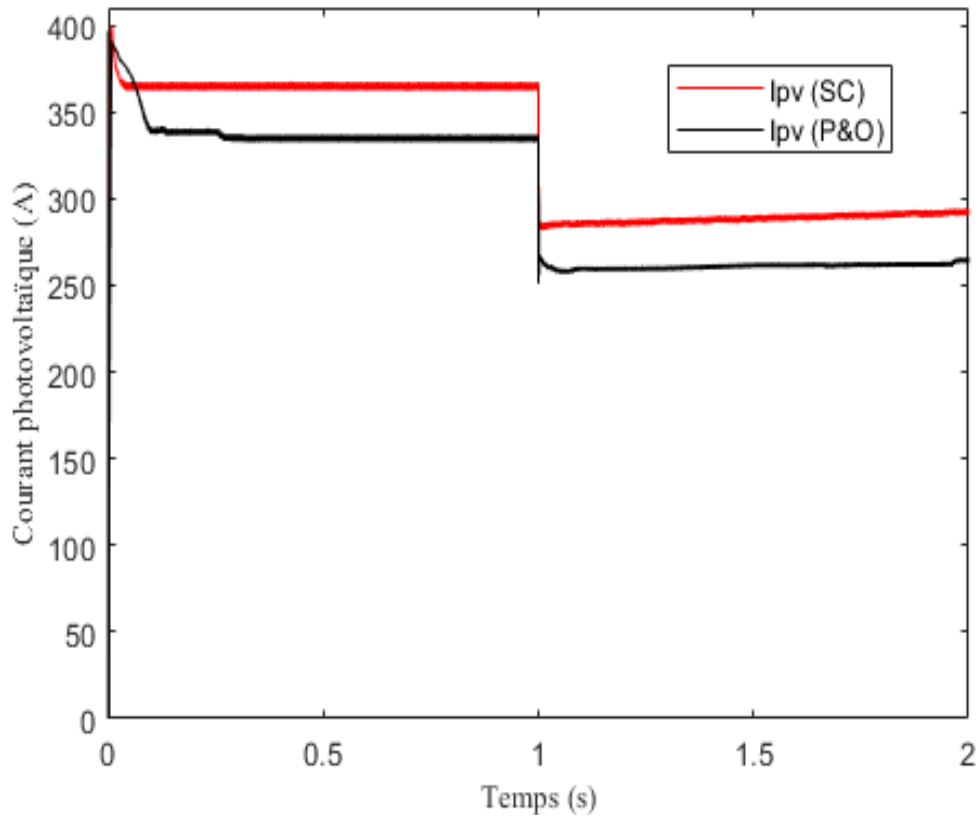


Figure III.43 : Tension de charge (1<sup>er</sup> cas)



**Figure III. 44 :** Courant photovoltaïque (1<sup>er</sup> cas)

D'après ces résultats , on constate que les deux approches utilisées (P&O et SC) sont en mesure de suivre correctement le MPP. En plus, le SC fournit le temps de réponse le plus court. La technique P&O présente cependant un comportement dynamique caractérisé par d'importantes oscillations qui ont un effet négatif sur le fonctionnement du système PV (qui se traduit physiquement par une perte de puissance). Ces oscillations dépendent fortement du pas de perturbation. En effet lorsque ce dernier diminue (augmente), le système PV devient lent (rapide) et l'amplitude des oscillations diminue (augmente).

### Cas 2 : Eclairage variable :

Afin de voir l'effet d'une variation de l'éclairage, un profil de référence est appliqué tout en fixant la température à 25°C. Ce profil est illustré sur la figure suivante:

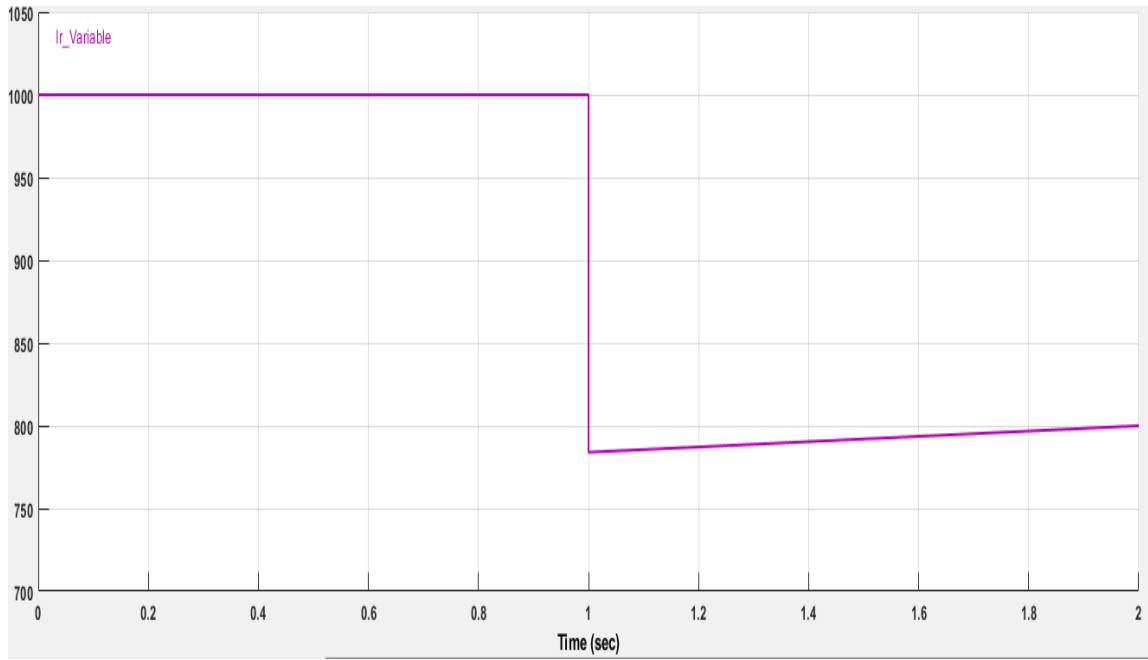


Figure III.45 : Variation de l'éclairement en fonction du temps

Dans ces conditions, les caractéristiques du système PV sont montrées sur la figure suivante :

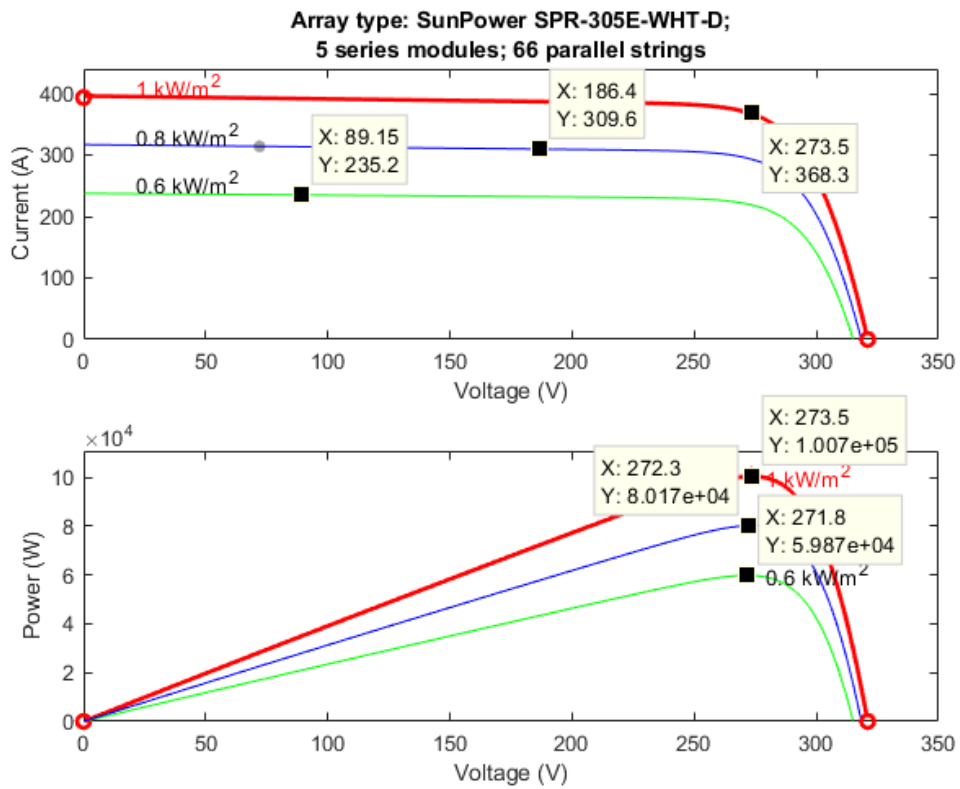


Figure III.46 : Caractéristique du panneau PV

Les résultats de simulation correspondants sont illustrés sur les figures III.47-III.51. On constate

Qu'au démarrage du profil, le SC traque le PPM avant le P&O.

De plus, à chaque variation, l'approche P&O présente une perte d'énergie par rapport au SC

Et en régime établi.

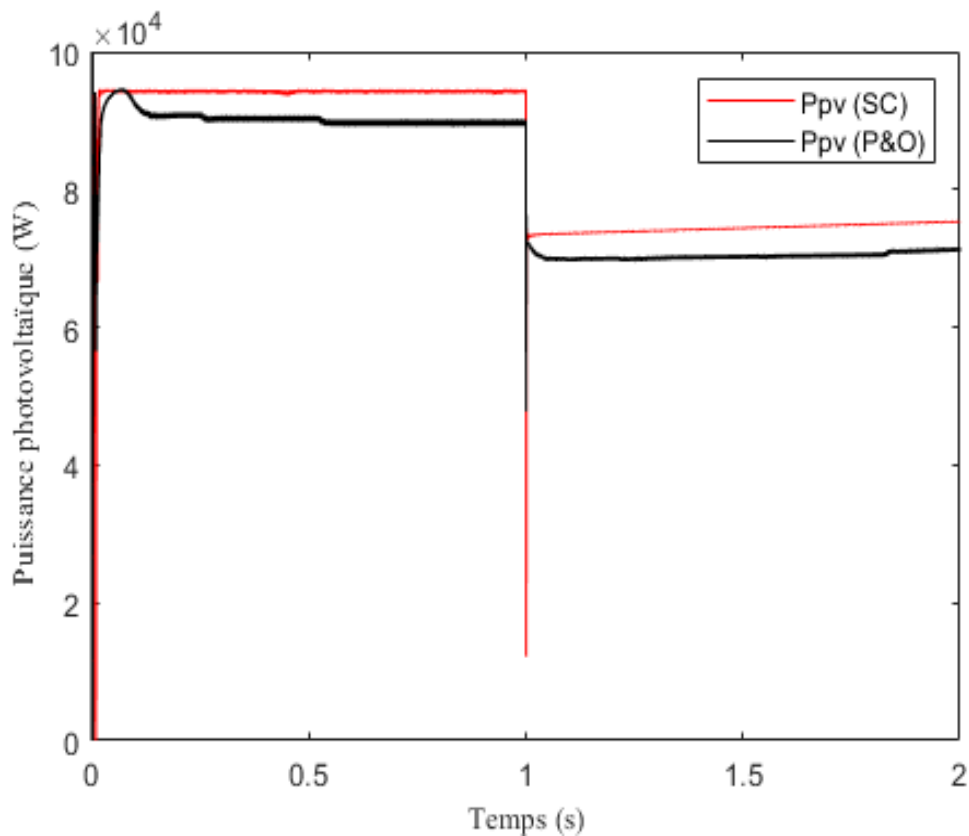


Figure III.47 : Puissance photovoltaïque (2<sup>ème</sup> cas)

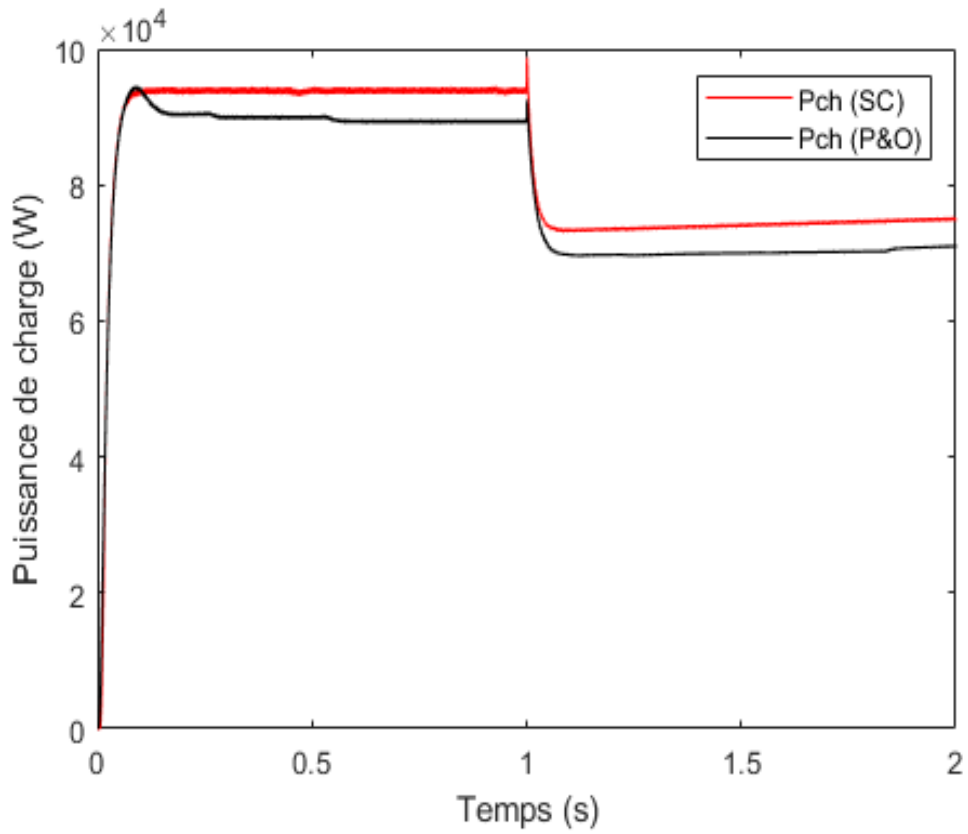


Figure III.48 : Puissance de charge (2<sup>ème</sup> cas)

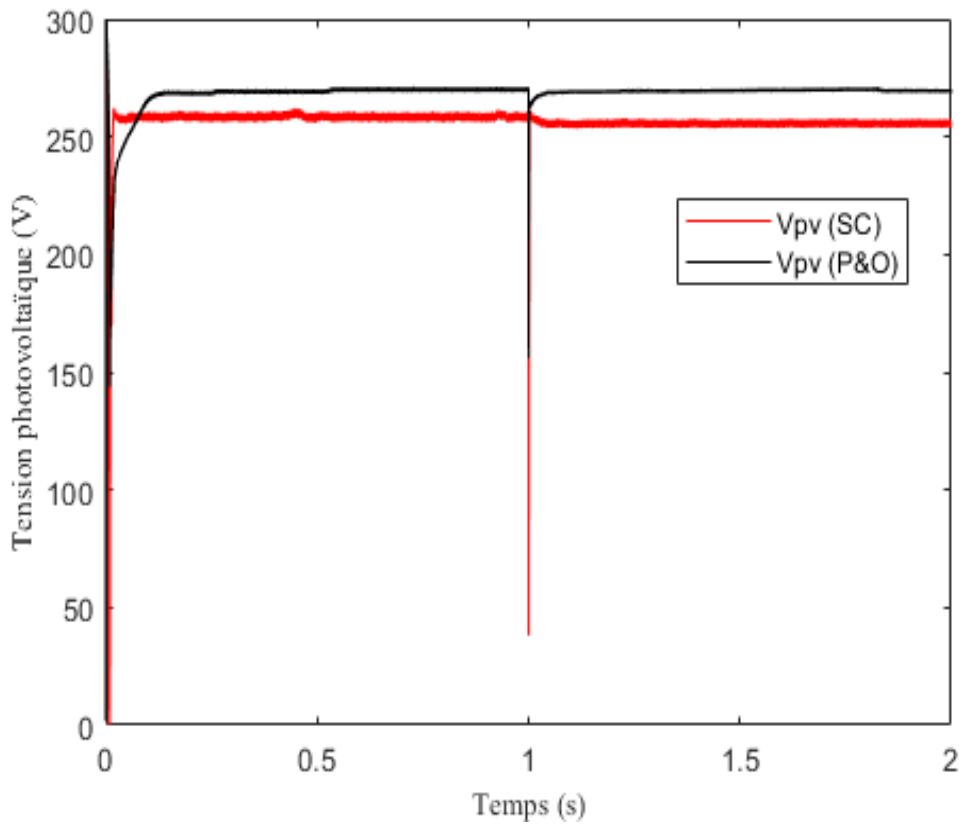


Figure III.49 : Tension photovoltaïque (2<sup>ème</sup> cas)

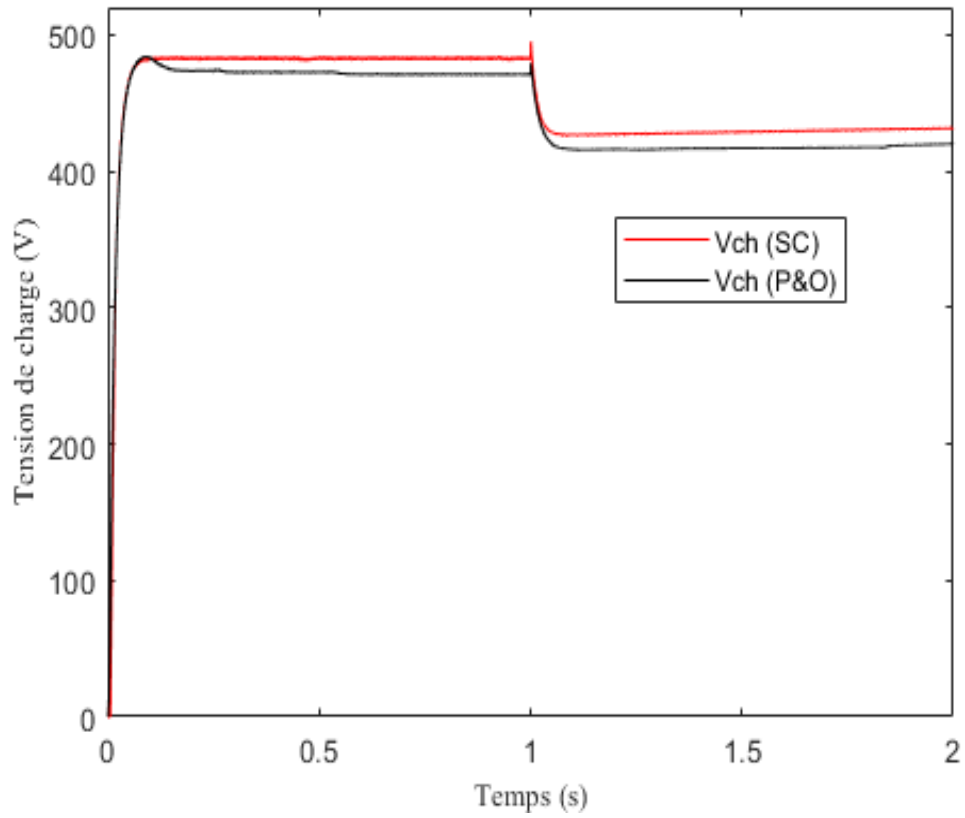


Figure III.50 : Tension de charge (2<sup>ème</sup> cas)

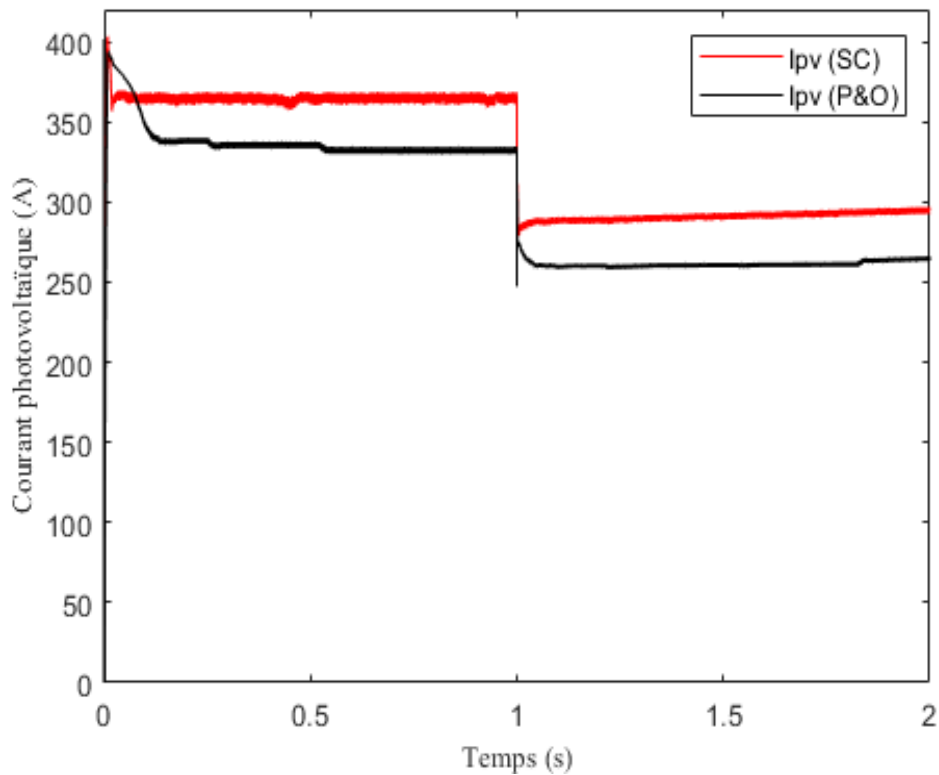


Figure III.51 : Courant de photovoltaïque (2<sup>ème</sup> cas)

Cas 3 : Température variable :

Un autre facteur qui influence la caractéristique du générateur PV est la température T. On maintient le niveau de l'éclairement à une valeur constante (1000 W/ m<sup>2</sup>) et on fait varier la température selon la figure suivante :

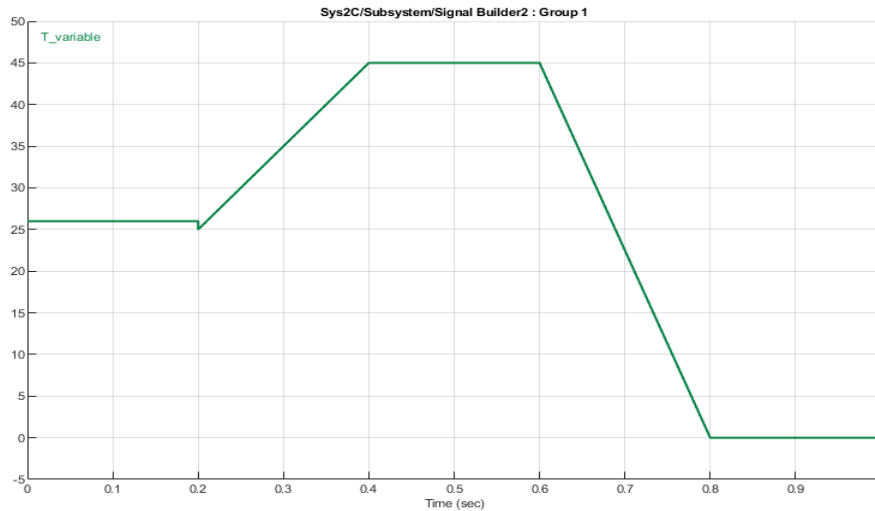


Figure III.52 : Variation de la température en fonction du temps

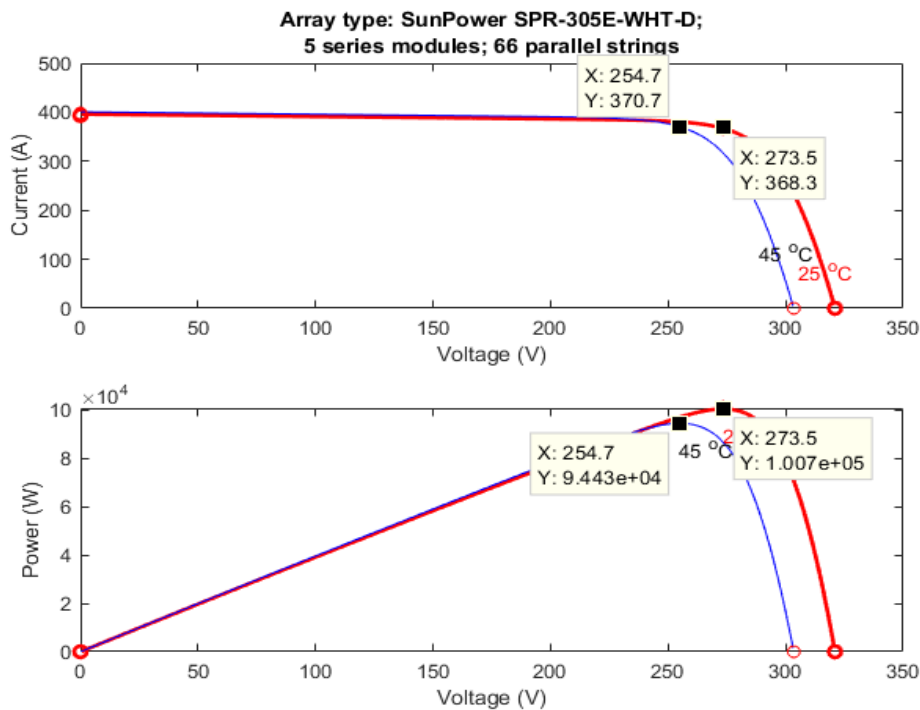


Figure III.53 : Caractéristique du panneau PV

Les caractéristiques du système PV dans ces conditions sont montrées sur la figure suivante :

Les résultats de simulation sont représentés sur les figures III.53-III.57.

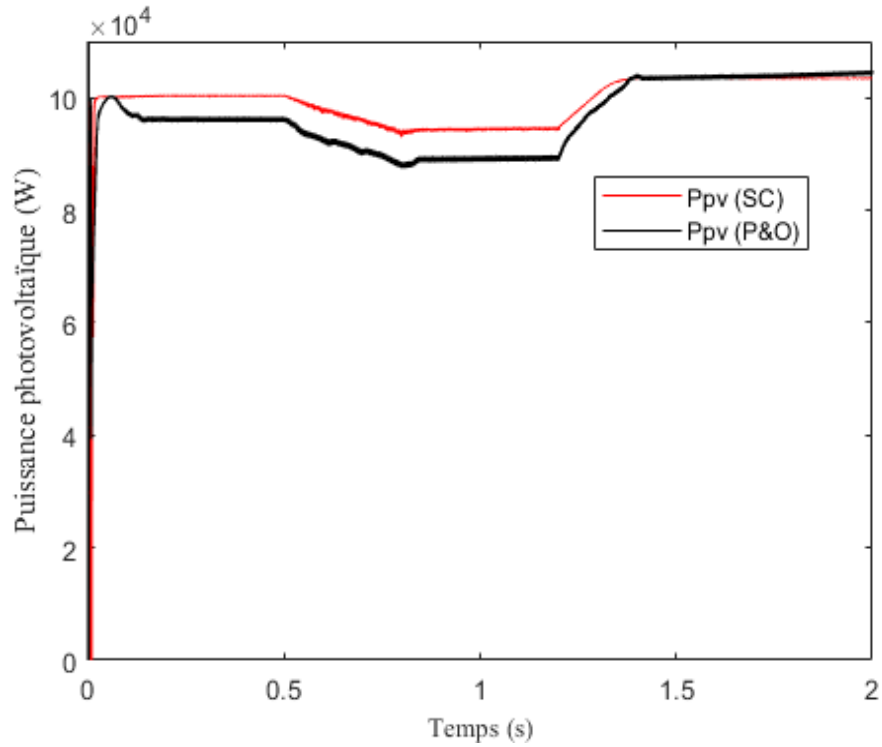


Figure III.54 : Puissance photovoltaïque (3<sup>ème</sup> cas)

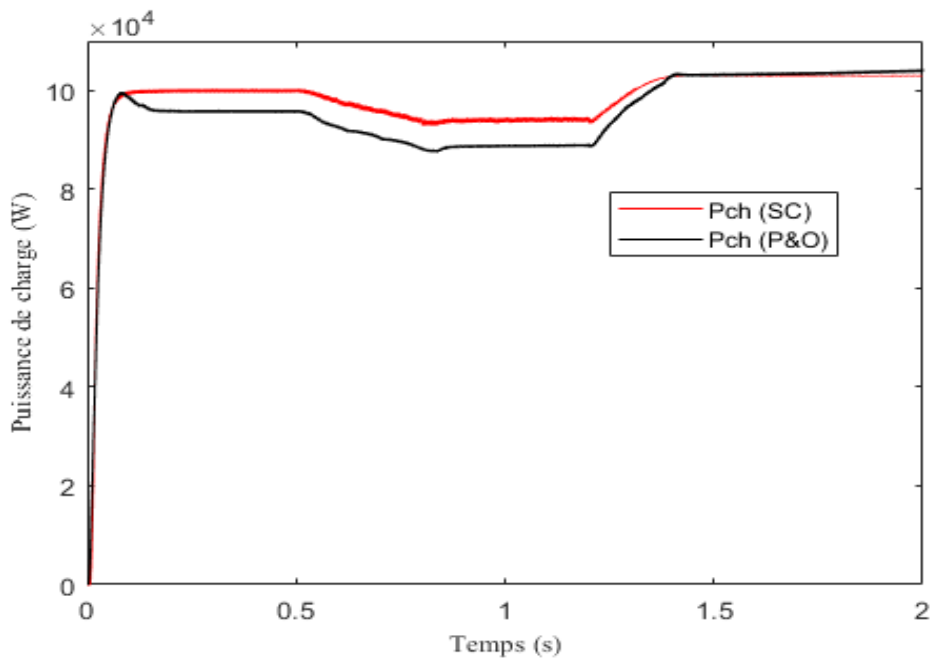


Figure III.55 : Puissance de charge (3<sup>ème</sup> cas)



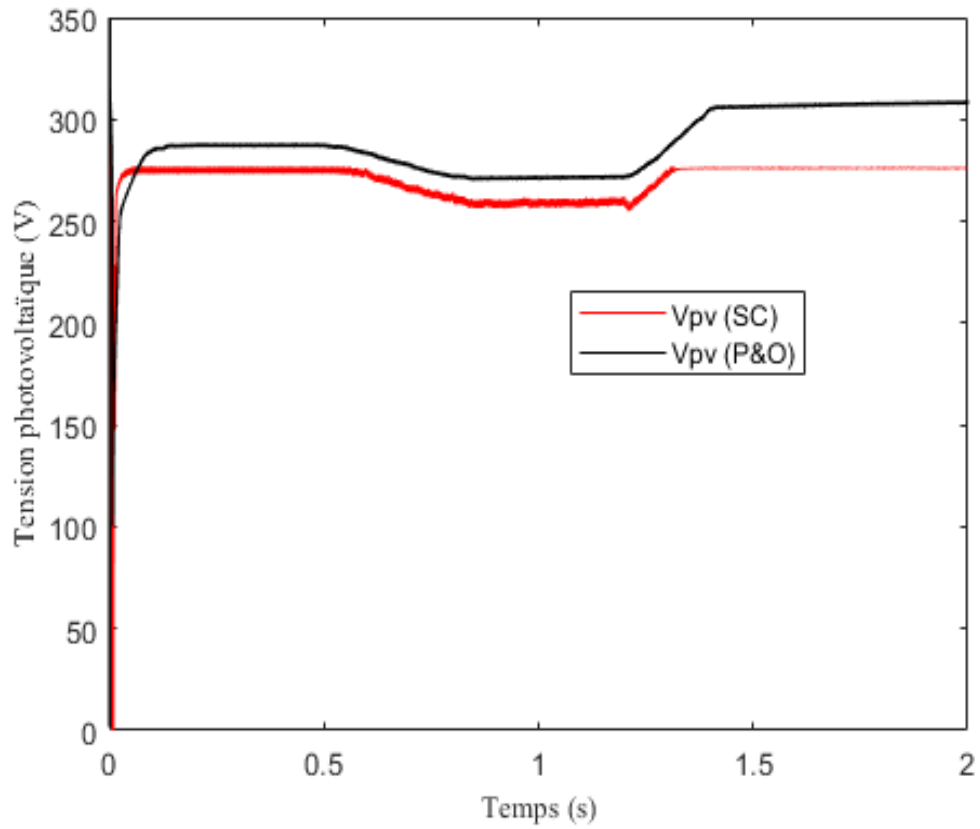


Figure III.56 : Tension photovoltaïque (3<sup>ème</sup> cas)

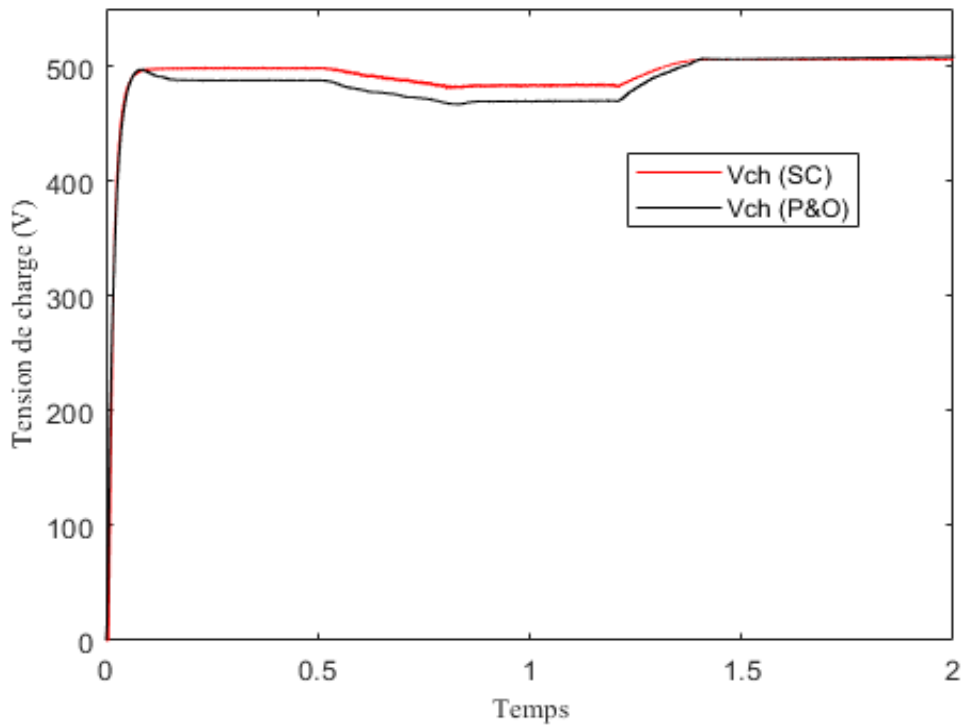
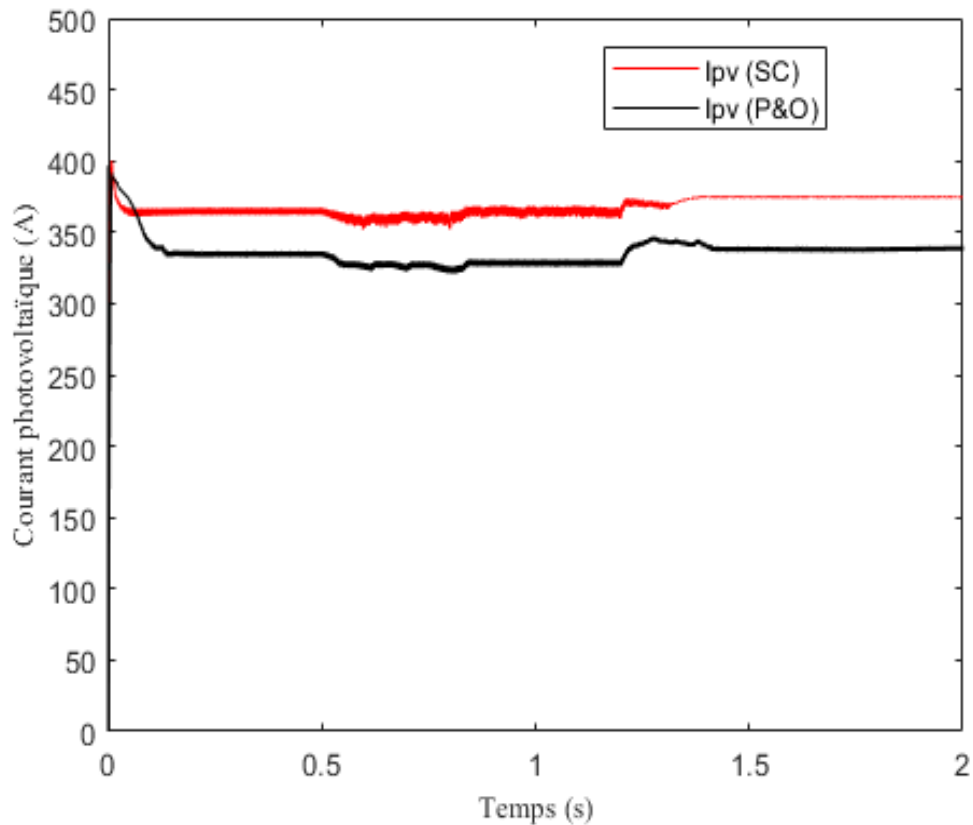


Figure III.57 : Tension de charge (3<sup>ème</sup> cas)



**Figure .III.58** : Courant photovoltaïque (3<sup>ème</sup> cas)

On peut noter que les temps de réponses sont presque les mêmes que ceux de la simulation, Précédente pour les deux approches. Lors du régime transitoire, on remarque que la trajectoire du PPM obtenue en appliquant la commande SC est meilleure que celle obtenue avec le P&O.

#### **Cas 4 : Eclairement et température variable :**

Une autre étude portant sur la comparaison des performances des méthodes MPPT sous et éclairement variables (figure 59) a été effectuée température.

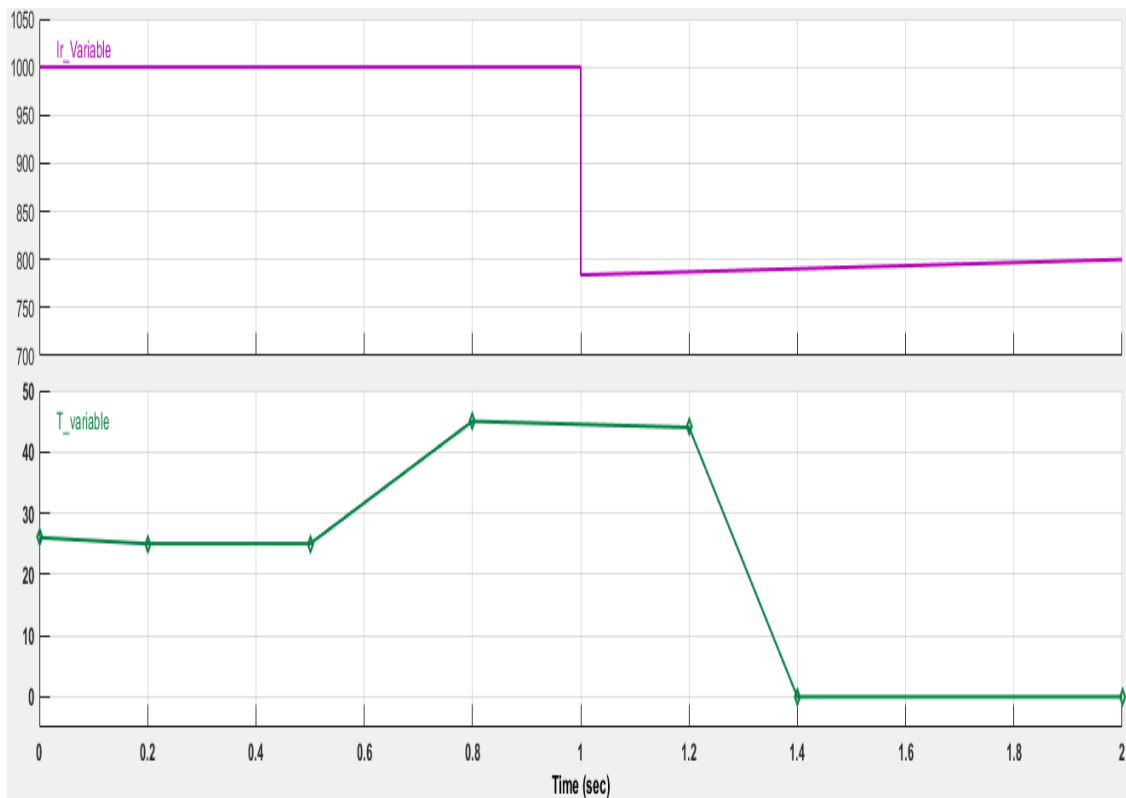


Figure III.59 : Variation de la température et de l'éclairement en fonction du temps

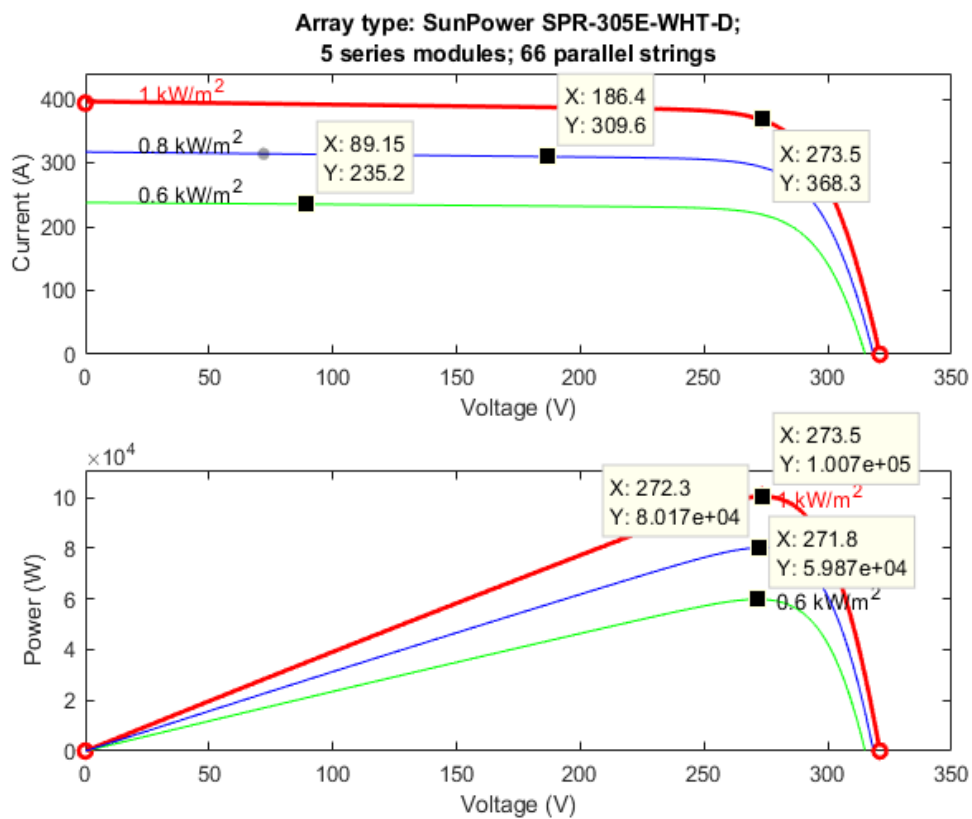


Figure III.60 : Caractéristique du panneau PV

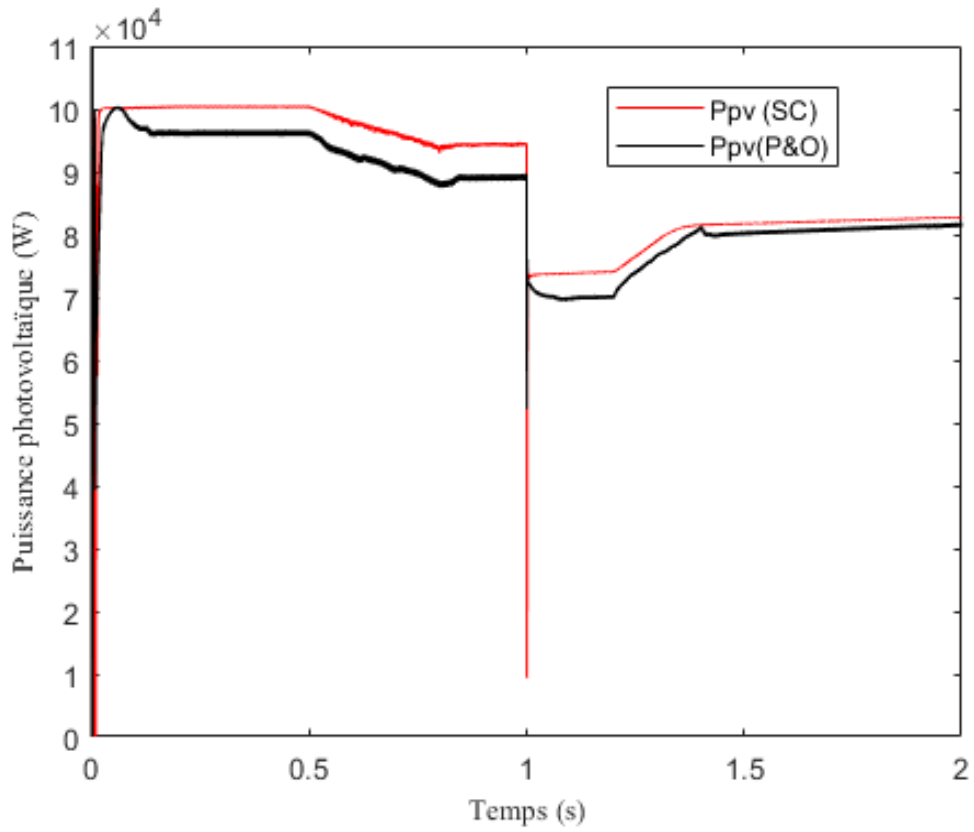


Figure III.61 : Puissance photovoltaïque (4<sup>ème</sup> cas)

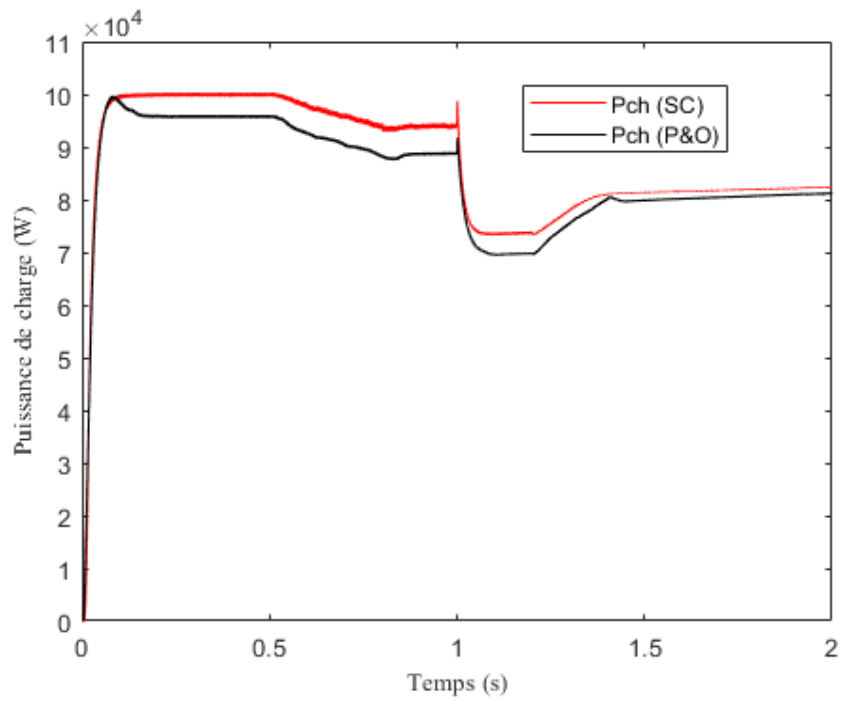


Figure III.62 : Puissance de charge (4<sup>ème</sup> cas)

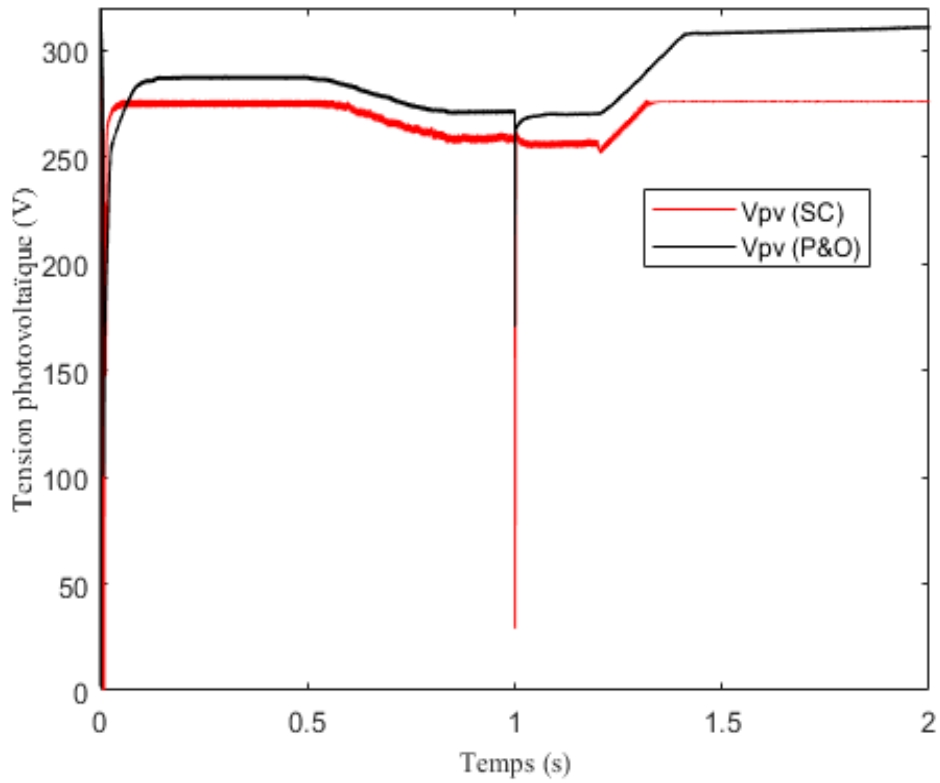


Figure III.63 : Tension photovoltaïque (4<sup>ème</sup> cas)

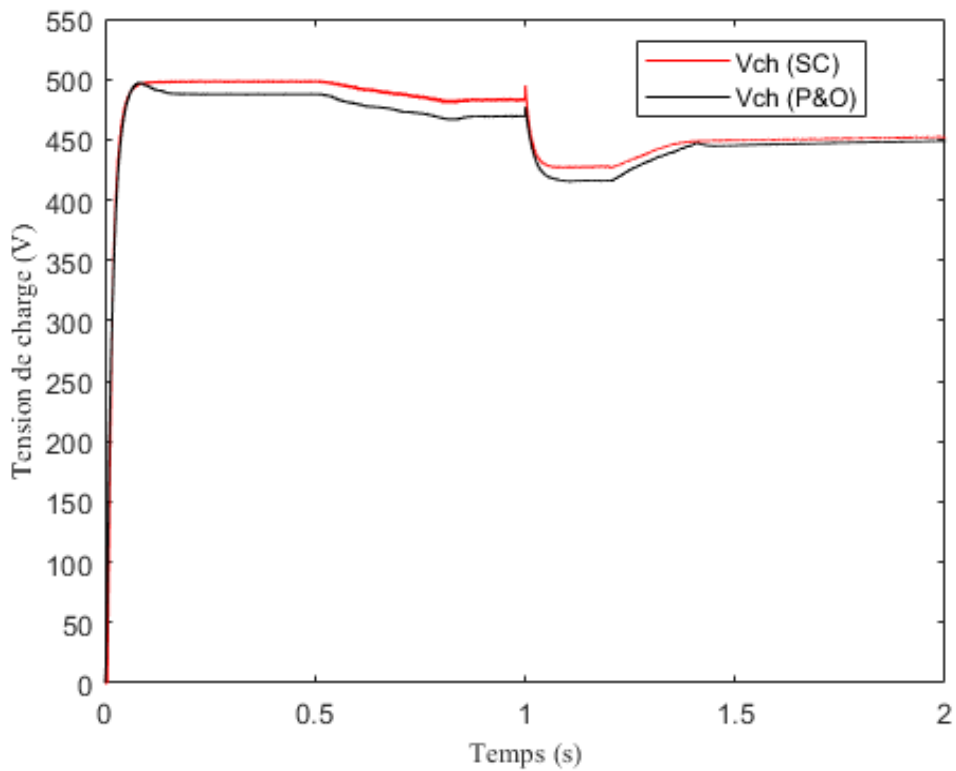
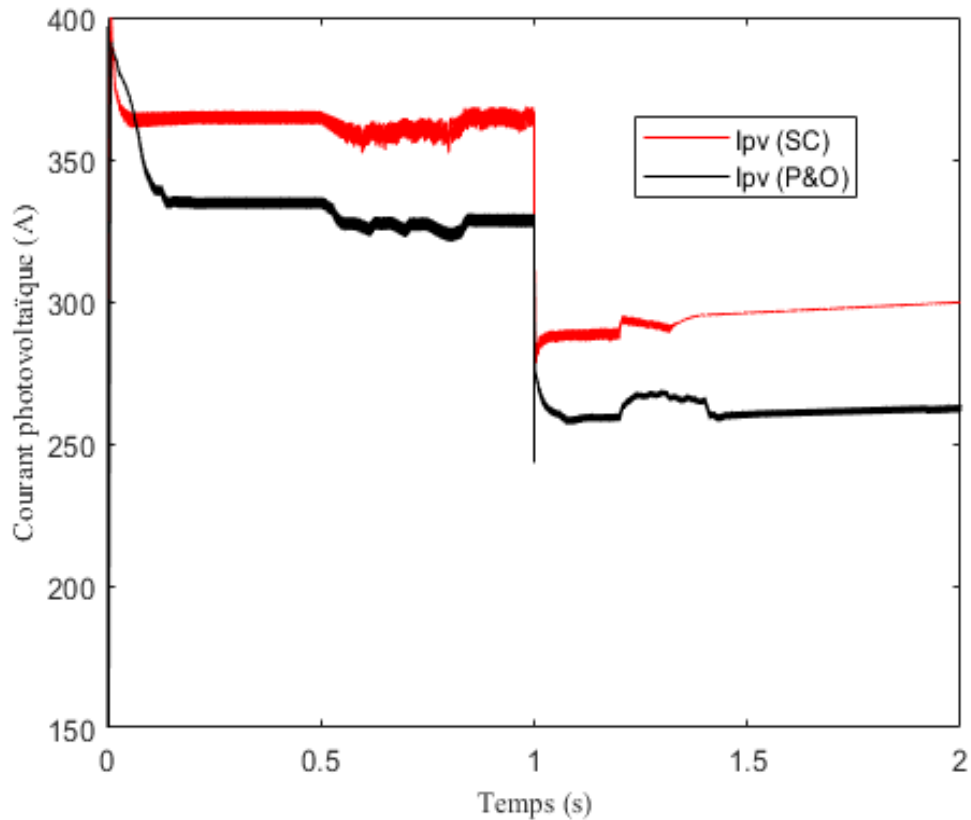


Figure III.64 : Tension de charge (4<sup>ème</sup> cas)



**Figure III.65** : Courant photovoltaïque (4<sup>ème</sup> cas)

Les résultats de simulation prouvent que les deux techniques utilisées sont capables de suivre la variation de l'éclairement et de la température afin d'atteindre le MPPT

Ces résultats montrent aussi que l'approche SC est meilleure en termes de poursuite du MPPT

D'efficacité et de dépassement. L'algorithme P&O présente des oscillations qui se traduisent Physiquement par une perte de puissance.

### III.5. Conclusion :

Dans le troisième chapitre, un bref rappel des théories de la commande synergétiques présenté. Les développements des lois de commande avancées basées sur cette approche pour la recherche du MPPT d'un système photovoltaïque sont revisités faisant ressortir la robustesse décente dernière. Une étude comparative avec la méthode P&O a été réalisée prouvant l'efficacité de l'approche préconisée. Les résultats de simulation sont donnés pour des variations de température et d'éclairement.



**Conclusion  
Générale**

# Conclusion Générale :

Dans ce mémoire, nous avons étudié un système photovoltaïque de point de vue de la commande par une nouvelle technique commande non linéaire à savoir la commande synergétique dans un schéma MPPT. Le contrôleur SC est utilisé pour l'extraction de la puissance maximale à partir de la source PV. Sur la base des travaux réalisés pour atteindre les principaux objectifs, les points généraux de ce travail sont résumés comme suit :

- ✓ Premièrement, nous avons étudié les fondamentaux du système photovoltaïque et ces différents composants tels que les panneaux solaires, le modèle mathématique de la cellule solaire, ainsi que les topologies des convertisseurs statiques DC-DC.
- ✓ Deuxièmement, nous avons présenté les techniques disponibles dans la littérature pour l'extraction de la puissance maximale du PV et nous avons étudiée de nombreuses techniques MPPT comprenant les techniques conventionnelles.
- ✓ Troisièmement, nous avons présenté et dérivé le modèle mathématique du contrôleur P&O-SC. L'algorithme P&O est utilisé pour générer un signal de référence de la tension photovoltaïque pour le suivi de la tension optimale du panneau. Ce signal de référence est transmis au contrôleur SC afin d'atteindre le MPP et maximiser la puissance du système PV. En termes des performances de suivi de tension photovoltaïque et la poursuite de puissance maximale, les résultats obtenus par le contrôleur SC ont été comparées à ceux obtenus par le contrôleur P&O conventionnel.
- ✓ Enfin, nous aspirons que ce travail serve de référence et fournisse un aperçu important du contrôle MPPT des systèmes photovoltaïques.





# **Références**

### References:

- [1] Buresch, M. (1983). Photovoltaic energy systems: Design and installation. New York.
- [2] Hernández-Callejo, L., Gallardo-Saavedra, S., & Alonso-Gómez, V. (2019). A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance. *Solar Energy*, 188, 426-440.
- [3] Häberlin, H. (2012). Photovoltaics: system design and practice. John Wiley & Sons.
- [4] Mandalaki, M., & Tsoutsos, T. (2020). *Solar Shading Systems: Design, Performance, and Integrated Photovoltaics*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.
- [5] J. P. Ram, T. S. Babu, and N. Rajasekar, "A comprehensive review on solar pv maximum power point tracking techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 826–847, 2017.
- [6] M. Sivagamasundari, P. M. Mary, and V. Velvizhi, "Maximum power point tracking for photovoltaic system by perturb and observe method using buck boost converter," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 2, no. 6, pp. 2433–2439, 2013.
- [7] D. Sera, L. Mathe, T. Kerekes, S. V. Spataru, and R. Teodorescu, "On the perturb-and-observe and incremental conductance mppt methods for pv systems," *IEEE journal of photovoltaics*, vol. 3, no. 3, pp. 1070–1078, 2013.
- [8] S. Titri, C. Larbes, K. Y. Toumi, and K. Benatchba, "A new mppt controller based on the ant colony optimization algorithm for photovoltaic systems under partial shading conditions," *Applied Soft Computing*, vol. 58, pp. 465–479, 2017.
- [9] A. Ali, K. Almutairi, M. Z. Malik, K. Irshad, V. Tirth, S. Algarni, M. Zahir, S. Islam, M. Shafiullah, N. K. Shukla et al., "Review of online and soft computing maximum power point tracking techniques under non-uniform solar irradiation conditions," *Energies*, vol. 13, no. 12, p. 3256, 2020.
- [10] A. Bahgat, N. Helwa, G. Ahmad, and E. El Shenawy, "Maximum power point tracking controller for pv systems using neural networks," *Renewable Energy*, vol. 30, no. 8, pp. 1257–1268, 2005.

- [11] I. Purnama, Y.-K. Lo, and H.-J. Chiu, "A fuzzy control maximum power point tracking photovoltaic system," in 2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ- IEEE 2011). IEEE, 2011, pp. 2432–2439.
- [12] L. M. Elobaid, A. K. Abdelsalam, and E. E. Zakzouk, "Artificial neural network-based photovoltaic maximum power point tracking techniques: a survey," *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 8, pp. 1043–1063, 2015.
- [13] A. A. Kulaksız and R. Akkaya, "A genetic algorithm optimized ann-based mppt algorithm for a stand-alone pv system with induction motor drive," *Solar Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 2366–2375, 2012
- [14] Mars, N., Grouz, F., Essounbouli, N., &Sbita, L. (2017). Synergetic MPPT controller for photovoltaic system. *J. Electr. Electron. Syst*, 6(232), 2332-0796.
- [15] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 16, no. 1, 2001.S.
- [16] B. Yang, W. Li, Y. Zhao, and X.He, "Design and analysis of a grid-connected photovoltaic power system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 4, 2010.
- [17] R. Khanna, Q. Zhang, W. Stanchina, G. Reed, and Z.-H. Mao, "Maximum power point tracking using model reference adaptive control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 3, pp. 1490–1499, 2014.
- [18] C. Konstantopoulos and E. KOUTROULIS, "Global maximum power point tracking of flexible photovoltaic modules," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 2817–2828, 2014.
- [19] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, 2005.
- [20] T. ESRAM, J. Kimball, P. Krein, P. Chapman, and P. Midya, "Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 5, 200 .
- [21] R. Mastromauro, M. Liserre, and A. Dell'Aquila, "Control issues in single-stage photovoltaic systems: Mppt, current and voltage control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, no. 2, pp. 241-254,2012.
- [22] T. ESRAM and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking Techniques," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [23] S.-C. Tan, Y. Lai, and C. Tse, "General design issues of slidingmode controllers in dc-dc converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 3, pp. 1160–1174, 2008.
- [24] S. Tan, Y. M. Lai, and C. K. Tse, "General design issues of sliding-mode controllers in dc-dc converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 3, pp. 1160–1174, 2008.

## Références

---

- [25] Y. Levron and D. Shmilovitz, "Maximum power point tracking employing sliding mode control," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 60, no. 3, 2013.
- [26] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "A technique for improving p&omppt performances of double-stage gridconnected photovoltaic systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, pp. 4473–4482, 2009.
- [27] Ait-cheikh, « Étude, investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », Thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique, Alger 2007.
- [28] T. Esram and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," IEEE Transactions on energy conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [29] J. Chavarria, D. Biel, F. Guinjoan, C. Meza, and J. Negroni, "Energy-balance control of pv cascaded multilevel grid-connected inverters under level-shifted and phase-shifted pwms," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 1, pp. 98–111, 2013.
- [30] BALLOUTI ADEL, Modélisation et Simulation Comportementale des Systèmes à Energie Renouvelable par VHDL-AMS, thèse de Doctorat, Faculté de Technologie, Département d’électronique, Université Ferhat Abbas-Sétif, pp04-pp06.
- [31] <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/15e-inventaire-Chap01-Fr.pdf>.
- [32] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_hydraulique](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_hydraulique).
- [33] S.Belakehal, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées. aux Energies Renouvelables", thèse de Doctorat, université de Constantine, 2010.
- [34] M. Gapderou, "Atlas Solaire de L’Alg", Tome, 2, OPU 1983.
- [35] a b Aperçu 2016 des marchés photovoltaïques mondiaux, Agence internationale de l’énergie, 2017.
- [36] «Perspective du marché mondial de l’énergiesolaire2015-2019» [www.solarpowereurope.org](http://www.solarpowereurope.org) ;Solar Power Europe (SPE), anciennement EPIA-EuropeanphotovoltaicIndustry Association Archivé de l’original (PDF) le 9 juin 2015 Récupéré le 9 juin 2015.
- [37] un b «Instantané de la PV mondiale 1992-2014» (PDF).[iea-pvps.org](http://iea-pvps.org). Agence internationale de l’énergie - Programme de systèmes d’énergie photovoltaïque. 30 mars 2015. Archivé de l’original le 30 mars 2015.
- [38] CSP est tombé par le bord du chemin - mais peut revenir grand d’ici 2020" CleanTechnica . 27 février 2014.
- [39] S. Ait-cheikh, " Étude, investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques", Thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique, Alger 2007.
- [40] N. Ait Khelifa " Modélisation d’un système de pompage photovoltaïque utilisant un moteur synchrone à commutation naturelle ", Mémoire de Maste2, Université de Bejaïa, 2011.
- [41] A. Luque, S. Hegedus: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering Ltd, 2003.

- [42] F. Cheddadi, I. Boumhidi, S. Sefriti “Comparaison entre la Commande MPPT par mode glissant et la Perturbation et Observation pour les systèmes Photovoltaïques” IMAT3E’18 International Meeting on Advanced Technologies in Energy and Electrical Engineering.
- [43] R. Shubhobrata, B. RanjitKumer et M. Maitra, Singapore, “*Block Backstepping Design of Nonlinear State Feedback Control Law for Underactuated Mechanical systems,*” Springer, 2016.
- [44] Abdeslame, D.; Merzouk, N.K.; Mekhtoub, S.; Abbas, M.; Dehmas, M. Estimation of power generation capacities of a wind farms installed in windy sites in Algerian high plateaus. *Renew. Energy* 2017, 103, 630–640. [CrossRef]
- [45] B. Boukezata, A. Chaoui, J.-P. Gaubert, and M. Hachemi, “Power Quality Improvement by an Active Power Filter in Grid-connected Photovoltaic Systems with Optimized Direct Power Control Strategy,” *Electr. Power Components Syst.*, vol. 44, no. 18, pp. 2036–2047, 2016.
- [46] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, and A. Lazaro, “Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems,” *Solar energy materials and solar cells*, vol. 90, 2006 pp. 1555-1578.
- [47] D. Sera, “Real-time modelling, diagnostics and optimised MPPT for residential PV systems,” PhD Thesis, Aalborg University, Denmark, 2009.
- [48] G.M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, 2<sup>nd</sup> Edition, Wiley-IEEE Press, 2013.
- [49] G.A. Raiker, U. Loganathan, *and al.* “Current Control of Boost Converter for PV interface with Momentum based Perturb and Observe MPPT.” *IEEE, Trans on Ind. Appl.* 2021.
- [50] M. Agunasekan, V. Krishnasamy, , S. Selvam, *and al.* “An Adaptive Resistance Perturbation Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Applications.” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 196890-196901,2020.
- [51] A. Baghini, *Handbook of power quality*, John Wiley. 2008.
- [52] N. Aouchiche “Conception d’une commande MPPT optimale à base d’intelligence artificielle d’un système photovoltaïque” Thèse de doctorat de Génie électrique, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2020.
- [53] A. Kolesnikov, G. Veselov, *Modern applied control theory: synergetic approach in control theory*, in Russian, Moscow-Taganrog, TSURE press, 2(2000).

- [54] A. Kolesnikov, G. Veselov, A. Monti, F. Ponci, E. Santi, and R. A. Dougal, Synergetic Synthesis of DC-DC Boost Converter Controllers : Theory and Experimental Analysis ‘’, Proceedings of 17th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference, 1, PP. 409-415, Dallas, TX, April 2002.
- [55] I. Kondratiev, E. Santi, R. A. Dougal and G. Veselov, Synergetic control for m-parallel connected DC-DC buck converters, Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1(2004) 182-188.
- [56] A. Monti, E. Santi, K. Proddutur and R. A. Dougal, Synergetic control for DC-DC Boost converter: implementation options, IEEE Trans, on Industry Applications, 39(6)(2003)1803-1813.
- [57] Z. Jiang, R.A. Dougal, Synergetic control of power converters for pulse current charging of advanced batteries from a fuel cell power source, IEEE Trans. Power Electron. 19 (4) (2004) 1140–1150.
- [58] E. V. Larsen and D. A. Swann, Applying power system stabilizers, Part III: Practical considerations, IEEE Trans, on Power Apparatus and Syst., 100(6) (1981)3034-3046.
- [59] A. Kolesnikov, G. E. Veselov, A. Popov, A. Kolesnikov, M. Medvedev and R. A. Dougal, I. Kondratiev, Synergetic Control for group of DC–DC Buck Converters, Proceedings of the Power system 2002 conference: Impact of distributed generation, March 13-15, 2002. Ramada Inn, Clemson, SC.
- [60] A. A .Kolesnikov, Synergétique : processus d’auto organisation et commande, (En Russe) Taganrog 2004, Russie.
- [61] I. Kondratiev and R. Dougal, General synergetic control strategies for arbitrary number of paralleled buck converters feeding constant power load: implementation of dynamic current sharing, IEEE ISIE 2006, July 9-12, 2006, Montreal, Quebec, Canada.
- [62] Z. Jiang, Design of a nonlinear power system stabilizer using synergetic control theory, Electr. Power Syst. Res. 79 (6) (2009) 855–862.