



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Republique Algerienne Democratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة العربي التبسي-تبسة  
Université Larbi Tébessi- Tébessa



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Électrique

## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

En: Electronique

Spécialité: Instrumentation

Par : -ABDELMALEK Ferial

-FARAH Rania

### Sujet

Optimisation du rendement énergétique d'un  
système photovoltaïque par les techniques  
intelligentes

Présenté et soutenu publiquement, le: 22 /06/ 2021,devant le jury composé de :

Melle. GOUDER Soraya

MCB

Président

Mr. GUIZA Dhaouadi

MCB

Rapporteur

Mr. LEMITA Abdallah

MAA

Examineur

Promotion : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative flourish in purple, red, and yellow colors, featuring a central diamond shape with a small emblem inside, and symmetrical scrollwork extending outwards.

## ***REMERCIEMENT***

*Louange et remerciements à DIEU, par la grâce duquel les  
bonnes actions sont accomplies.*

*Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué  
au succès et à la rédaction de ce mémoire.*

*Tout d'abord, nous voudrions exprimer notre gratitude à la  
directrice de ce mémoire, Mr D. GUIZA, pour sa patience, sa  
disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué  
à alimenter notre réflexion.*

*Nous remercions également les professeurs de l'Université de  
TEBESSA qui nous ont fourni les outils nécessaires à la  
réussite de nos études universitaires.*

*En particulier, nous tenons à remercier Mr D. OUNNAS, de qui  
nous avons reçu un soutien épistémologique et moral.*

*Nous remercions tous les membres de l'équipe pédagogique du  
Département de génie électrique de l'Université de TEBESSA.*

## ***JE DÉDIE CE MÉMOIRE :***

*A ma source de bonheur et de motivation*

*Mes chers parents*

*En guise de respect et gratitude pour les grands sacrifices qu'ils  
ont faits.*

*Leur amour, leur bonté, leur encouragements perpétuels, leur  
soutien.*

*Puisse Allah prolonger leur vie dans le bonheur.*

*Nulle dédicace ne puisse exprimer ma reconnaissance pour leur  
patience illimitée, leur aide*

*A mon frère **AYMEN**, à mes sœurs aînées **SAMIA**, **NAWAL** et  
**AMEL**, à mes neveux **SADJA**, **ZAHREDDINE**, **MOHAMMED** et  
**BAHAEDDINE** à qui je dois tout l'amour, qu'il trouve ici  
l'expression de ma gratitude et tous mes vœux de voir ils  
réussissent leur vie.*

*Pour ma famille élargie, c'est le refuge et le retour, J'espère que  
**DIEU** te protège.*

*A mes amis avec qui j'ai passé les plus beaux jours de ma vie,  
j'espère que Dieu exaucera vos souhaits.*

## ***JE DÉDIE CE MÉMOIRE :***

*A ma source de bonheur et de motivation*

*Mes chers parents*

*En guise de respect et gratitude pour les grands sacrifices qu'ils  
ont faits.*

*Leur amour, leur bonté, leur encouragements perpétuels, leur  
soutien.*

*Puisse Allah prolonger leur vie dans le bonheur.*

*Nulle dédicace ne puisse exprimer ma reconnaissance pour leur  
patience illimitée, leur aide*

*A ma sœur **AYA**, à mes petits frères **DHIRAR**, **NIZAR** et **ADEM**  
à qui je dois tout l'amour, qu'il trouve ici l'expression de ma  
gratitude et tous mes vœux de les voir réussir dans leur vie.*

*A ma grande famille, elle est le refuge et le dos, J'espère que  
**DIEU** te protège.*

*A mes amis avec qui j'ai passé les plus beaux jours de ma vie,  
Surtout **FERIEL**, j'espère que **DIEU** exaucera vos souhaits.*

---

## ملخص:

يتمتع النظام الكهروضوئي دائمًا بكفاءة تحويل منخفضة نسبيًا لأن الطاقة التي يوفرها المولد الكهروضوئي تعتمد على الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة والشحنات الكهربائية. يمكن تحسين هذه الكفاءة من خلال الحلول القائمة على تقنيات تتبع نقاط الطاقة القصوى (MPPT). للقيام بذلك، يتم استخدام الأساليب والتقنيات التقليدية بشكل عام. ومع ذلك، فإن الأخيرة محدودة، بسبب الطبيعة غير الخطية للخلايا الكهروضوئية، وتعقيد عنصر التخزين، إلخ.

في هذا السياق، يهدف الموضوع المقترح إلى المساهمة في نمذجة الأنظمة الكهروضوئية والتحكم فيها من خلال نهج غير تقليدي قائم على منطق غامض. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها بشكل عام أن أداء تقنية MPPT الذكية القائمة على المنطق الضبابي من حيث الثبات والدقة والسرعة أفضل بكثير من التقنيات التقليدية.

**الكلمات المفتاحية:** مولد PV ، محول DC-DC ، MPPT ، اضطراب ومراقبة (P&O) ، توصيل تزايد (INC) ،

منطق ضبابي (FLC).

---

---

**Résumé :**

Le système photovoltaïque a toujours un rendement de conversion relativement faible car la puissance délivrée par le générateur PV dépend de l'irradiation solaire, de la température et des charges électriques. Ce rendement être amélioré par des solutions à base des techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT). Pour ce faire, des méthodes et des techniques conventionnelles sont généralement employées. Cependant, ces dernières sont limitées, à cause du non linéaires des cellules photovoltaïques, de la complexité de l'élément de stockage, etc...

Dans ce cadre, le thème proposé se veut une contribution à la modélisation et la commande des systèmes PV par une approche non conventionnelle basée sur la logique floue. Les résultats obtenus ont montré en général, que les performances de la technique intelligente MPPT basée sur la logique floue , en termes de stabilité, de précision et de rapidité sont beaucoup mieux que celles des techniques conventionnelles.

**Mots clés :** Générateur PV, convertisseur DC-DC, MPPT, perturbation et observation (P&O), conductance incrémentale (INC), Logique floue (FLC).

---

---

**Abstract:**

The photovoltaic system always has a relatively low conversion efficiency because the power delivered by the PV generator depends on solar irradiation, temperature and electrical charges. This efficiency can be improved by solutions based on maximum power point tracking techniques (MPPT). To do this, conventional methods and techniques are generally employed. However, these are limited, because of the non-linear nature of the photovoltaic cells, the complexity of the storage element, etc.

In this context, the proposed theme is intended as a contribution to the modeling and control of PV systems by an unconventional approach based on fuzzy logic. The results obtained have shown in general that the performance of the intelligent MPPT technique based on fuzzy logic, in terms of stability, precision and speed is much better than that of conventional techniques.

**Keywords:** PV generator, DC-DC converter, MPPT, disturbance and observation (P&O), incremental conductance (INC), Fuzzy logic (FLC).

---

# Table des matières

Remerciement	
Liste des symboles et abréviations	I
Table des matières	IV
Table des figures	VIII
Introduction générale	1
<b>Chapitre 1 : Modélisation d'un générateur photovoltaïque</b>	
1.1 Introduction	3
1.2 Générateur photovoltaïque	3
1.3 Effet photovoltaïque	4
1.4 Cellules photovoltaïques	4
1.4.1 Principe de fonctionnement	5
1.4.2 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)	7
1.4.2.1 Les cellules monocristallines	7
1.4.2.2 Les cellules poly cristallines	7
1.4.2.3 Les cellules amorphes	7
1.5 Modélisation du générateur photovoltaïque	7
1.5.1 Modèle idéal	7
1.5.2 Modèle à double diode	8
1.5.3 Modèle à simple diode	9
1.5.4 Paramètres d'une cellule photovoltaïque	10
1.5.4.1 Courant de court-circuit	10
1.5.4.2 Tension de circuit ouvert	11
1.5.4.3 Puissance maximale	11
1.5.4.4 Facteur de qualité	11
1.5.4.5 Facteur de forme	12
1.5.4.6 Rendement d'une cellule PV	12
1.5.5 Caractéristique du générateur PV	12
1.6 Validation du modèle	14
1.6.1 Bloc Simulink du modèle à une diode	15
1.6.2 Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ dans des conditions STC	16

## Table des matières

---

1.6.3 Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque	16
1.7 Paramètres d'influence sur les caractéristiques du générateur PV	17
1.7.1 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque	17
1.7.2 Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque	17
1.7.3 Influence de la résistance série	18
1.7.4 Influence de la résistance shunt	19
1.7.5 Influence du facteur de qualité	19
1.8 Association des modules PV	20
1.8.1 Association en série	20
1.8.2 Association en parallèle	21
1.8.3 Association mixte (série/parallèle)	21
1.9 Conclusion	22
<b>Chapitre 2 : Les convertisseurs statiques et la commande MPPT.</b>	
2.1 Introduction	23
2.2 Les convertisseurs DC/DC(Hacheurs)	23
2.3 Les Types des convertisseurs DC-DC	24
2.4 Modélisation des convertisseurs DC-DC	25
2.4.1 Modélisation d'un convertisseur boost	25
2.4.2 Modélisation d'un convertisseur buck	28
2.4.3 Modélisation d'un convertisseur buck-boost	30
2.5 Dimensionnement des convertisseurs boost	32
2.5.1 Choix de L'inductance L	33
2.5.2 Courant d'entrée moyen	34
2.5.3 Résistance critique	34
2.5.4 Choix de la diode	34
2.5.5 Choix de MOSFET	35
2.5.6 Choix de capacité C	35
2.6 Simulation du convertisseur boost	36

## Table des matières

2.7 Etage d'adaptation entre le générateur PV et la charge	38
2.8 Technique de commande de l'MPPT	39
2.8.1 Définition	39
2.8.2 Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum (MPPT)	39
2.8.3 Le principe de fonctionnement du MPPT d'un générateur PV	41
2.9 Conclusion	43
<b>Chapitre 3 : Maximisation de puissance dans un système PV.</b>	
3.1 Introduction	44
3.2 Classification des méthodes MPPTs	44
3.2.1 Les méthode MPPTs traditionnelles	44
3.2.1.1 Méthodes a contre réaction de tension	44
a. Méthode basée sur la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )	45
b. Méthode basée sur une tension de référence externe (Cellule pilote)	46
3.2.1.2 Méthodes a contre réaction de courant	47
3.2.1.3 Méthodes a contre réaction de puissance	48
a. La méthode Perturbe & Observe (P&O)	48
b. Méthode de la Conductance Incrémentale	51
3.2.2 Les méthodes MPPTs intelligentes	53
3.2.2.1 La commande MPPT flou	53
a. Fuzzification	54
b. Moteur d'inférence flou	54
c. Défuzzification	55
3.3 Conclusion	56
<b>Chapitre 4 : Résultat de discussion.</b>	
4.1 Introduction	57
4.2 Description du système photovoltaïque étudié	57
4.3 Résultats de Simulation	58
4.3.1 Méthode basée sur la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )	58
4.3.2 Méthode basé sur le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	60
4.3.3 La méthode Perturbe & Observe (P&O)	61

---

## Table des matières

---

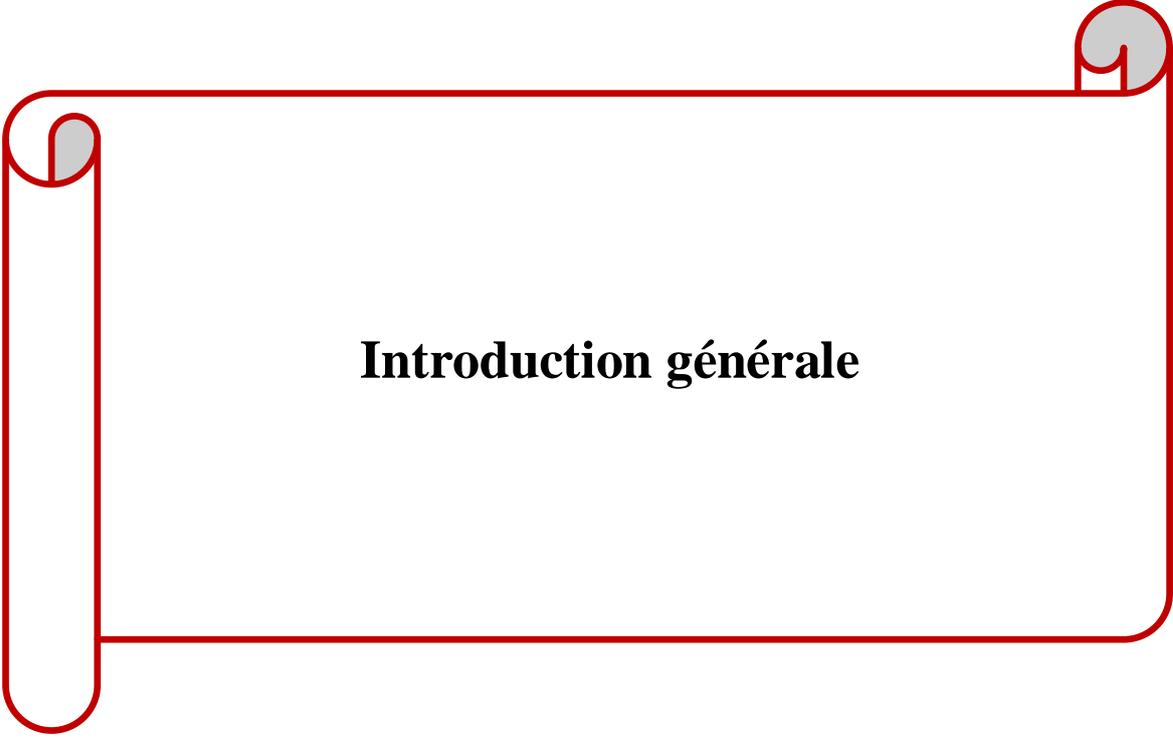
4.3.4 Méthode de la Conductance Incrémentale (INC)	63
4.3.5 Méthode basée sur la logique flou (FLC)	65
4.4 Etude comparative entre les méthodes étudiées	67
4.4.1 Comparaison entre les méthodes basées sur $V_{co}$ et $I_{cc}$	67
4.4.2 Comparaison entre les méthodes INC et P&O	68
4.4.3 Comparaison entre les méthodes $V_{co}$ et $I_{cc}$ et INC et P&O.	68
4.4.4 Comparaison entre les méthodes INC, P&O et FLC	69
4.5 Conclusion	70
Conclusion générale	71
Bibliographie	73

## Table des figures

<b>Chapitre 1 : Modélisation d'un générateur photovoltaïque</b>	
<b>Figure 1.1</b> : Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ PV.	4
<b>Figure 1.2</b> : Structure basique d'une cellule solaire.	5
<b>Figure 1.3</b> : Conduction dans les matériaux semi-conducteurs.	6
<b>Figure 1.4</b> : Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard.	6
<b>Figure 1.5</b> : Circuit équivalent d'une cellule PV (modèle idéal).	8
<b>Figure 1.6</b> : Circuit équivalent d'une cellule PV (modèle à double diodes).	9
<b>Figure 1.7</b> : Circuit équivalent d'une cellule PV (modèle à simple diode).	10
<b>Figure 1.8</b> : Caractéristiques $I-V$ et $P-V$ d'une cellule PV.	14
<b>Figure 1.9</b> : Schéma bloc du modèle à une diode.	15
<b>Figure 1.10</b> : Caractéristiques $I-V$ et $P-V$ du générateur PV dans les conditions ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $G = 1\text{KW}/\text{m}^2$ ).	16
<b>Figure 1.11</b> : Différentes zones de la caractéristique $I-V$ du générateur PV.	16
<b>Figure 1.12</b> : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques PV.	17
<b>Figure 1.13</b> : Influence de la température sur les caractéristiques PV.	18
<b>Figure 1.14</b> : Influence de la résistance série sur les caractéristiques PV.	18
<b>Figure 1.15</b> : Influence de la résistance parallèle sur les caractéristiques PV.	19
<b>Figure 1.16</b> : Influence du facteur de qualité sur les caractéristiques PV.	20
<b>Figure 1.17</b> : Association en série des modules PV.	20
<b>Figure 1.18</b> : Association en parallèle des modules PV.	21
<b>Figure 1.19</b> : Association mixte (série/parallèle) des modules PV.	21
<b>Chapitre 2 : Les convertisseurs statiques et la commande MPPT.</b>	
<b>Figure 2.1</b> : Principe de base d'un hacheur.	25
<b>Figure 2.2</b> : Schéma de base d'un convertisseur boost.	27
<b>Figure 2.3</b> : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur boost.	27
<b>Figure 2.4</b> : Circuits équivalents du convertisseur boost.	27
<b>Figure 2.5</b> : Schéma de base d'un convertisseur buck.	29

<b>Figure 2.6</b> : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur buck.	29
<b>Figure 2.7</b> : Circuits équivalents du convertisseur buck.	30
<b>Figure 2.8</b> : Schéma de base d'un convertisseur buck-boost.	31
<b>Figure 2.9</b> : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur buck-boost.	32
<b>Figure 2.10</b> : Circuits équivalents du convertisseur buck-boost.	32
<b>Figure 2.11</b> : Schéma block d'un convertisseur boost.	37
<b>Figure 2.12</b> : Tension de sortie et tension d'entrée du convertisseur boost.	38
<b>Figure 2.13</b> : Tension de sortie et tension d'entrée variable du convertisseur boost.	38
<b>Figure 2.14</b> : Répartition de la caractéristique selon le fonctionnement du hacheur utilisé.	40
<b>Figure 2.15</b> : Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT.	41
<b>Figure 2.16</b> : Fluctuation du PMM avec : a) Variation de l'éclairement et b) Variation de la charge.	42
<b>Figure 2.17</b> : Chaîne de conversion photovoltaïque.	43
<b>Chapitre 3 : Maximisation de puissance dans un système PV.</b>	
<b>Figure 3.1</b> : Principe de la méthode basée sur $V_{co}$ .	51
<b>Figure 3.2</b> : Organigramme de l'algorithme basée sur $V_{co}$ .	52
<b>Figure 3.3</b> : Principe de la méthode basée sur une cellule pilote.	52
<b>Figure 3.4</b> : Principe de la méthode basée sur $I_{cc}$ .	53
<b>Figure 3.5</b> : Organigramme de l'algorithme basée sur $I_{cc}$ .	53
<b>Figure 3.6</b> : Principe de la méthode P&O.	54
<b>Figure 3.7</b> : Organigramme de la méthode P&O.	55
<b>Figure 3.8</b> : Changement rapide de température dans le cas de la MPPT avec P&O.	56
<b>Figure 3.9</b> : Principe de la MPPT avec la méthode INC.	57
<b>Figure 3.10</b> : Organigramme de la méthode INC.	58
<b>Figure 3.11</b> : Schéma synoptique d'un système PV avec une commande MPPT flou.	59
<b>Figure 3.12</b> : Fonctions d'appartenances de l'erreur et de la variation de l'erreur.	61
<b>Figure 3.13</b> : Fonctions d'appartenances de la sortie.	61
<b>Chapitre 4 : Résultat de discussion.</b>	
<b>Figure 4.1</b> : Schéma fonctionnel du système PV.	57

<b>Figure 4.2</b> : Modèle Simulink du système PV commandé par l'algorithme MPPT.	58
<b>Figure 4.3</b> : Résultats de simulation de l'algorithme $V_{co}$ .	59
<b>Figure 4.4</b> : Résultats de simulation de l'algorithme $I_{cc}$ .	60
<b>Figure 4.5</b> : Modèle Simulink de l'algorithme P&O	61
<b>Figure 4.6</b> : Résultats de simulation de la méthode P&O.	62
<b>Figure 4.7</b> : Modèle Simulink de l'algorithme INC.	63
<b>Figure 4.8</b> : Résultats de simulation de la méthode INC.	64
<b>Figure 4.9</b> : Modèle Simulink de la méthode basée sur la logique floue.	65
<b>Figure 4.10</b> : Résultats de simulation de la méthode basée sur la logique floue.	66
<b>Figure 4.11</b> : Comparaison des algorithmes $V_{co}$ et $I_{cc}$ .	67
<b>Figure 4.12</b> : Comparaison des algorithmes P&O et INC.	68
<b>Figure 4.13</b> : Comparaison des algorithmes $V_{co}$ , $I_{cc}$ , P&O et INC.	69
<b>Figure 4.14</b> : Comparaison des algorithmes INC, P&O et FLC.	69



**Introduction générale**

## Introduction générale

---

L'évolution technologique de ces dernières années a fait augmenter la croissance de la demande d'énergie électrique, ce qui a conduit à une diminution des stocks d'énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon ...) et à une pollution de l'environnement avec pour conséquences l'effet de serre et le réchauffement climatique. Ce problème ne peut être résolu que par la substitution des énergies fossiles par les énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydroélectricité, biomasse géothermique, déchets ...) respectueuses de l'environnement et inépuisables. [1].

L'énergie solaire occupe une place majeure parmi les sources d'énergie renouvelables en raison de sa disponibilité quotidienne et l'utilisation correcte de cette énergie peut couvrir la demande mondiale en besoins énergétiques. Nous pouvons utiliser cette énergie de deux manières: l'énergie solaire photovoltaïque (PV) et l'énergie solaire thermique (PVT) [2].

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées en raison de ses avantages telles que la simplicité, la facilité d'utilisation et d'installation en plus de la durabilité. Cette dernière convertit directement la lumière du soleil en courant électrique, car les panneaux photovoltaïques ont la capacité de convertir les photons en électrons, mais les systèmes PV présentent deux inconvénients majeurs, d'une part, la puissance produite dépend des conditions climatiques (température et rayonnement solaire), et d'autre part, ils présentent des caractéristiques (puissance-tension et courant-tension) non linéaires ce qui impose l'ajout d'un étage d'adaptation entre les panneaux photovoltaïques et la charge [2].

Les convertisseurs DC-DC (Boost, Buck, Buck-Boost, Cuck ...) sont utilisés comme interfaces entre le générateur PV et la charge afin d'atteindre la puissance maximale et ainsi faire fonctionner le générateur GPV au point de puissance maximale (PPM) à l'aide d'un mécanisme de poursuite du point de puissance maximale ou en Anglais (Maximum Power Point Tracking). Un grand nombre de techniques MPPTs ont été développées qui peuvent être classées en deux catégories à savoir :

-Techniques traditionnelles comprenant les techniques à contre réaction de tension, les techniques à contre réaction de courant et les techniques à contre réaction de puissance telles que Perturbation et Observation (P&O) et Incrémentation de la Conductance (INC) [3].

-Techniques intelligentes qui sont basées sur l'exploitation de l'intelligence artificielle, on peut citer les MPPTs basés sur les réseaux de neurones artificielles (ANN) [4], sur l'optimisation par essais particuliers (PSO) [5], sur les algorithmes génétiques (GA) et les algorithmes basés sur les modèles flous.

Cette étude comporte quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'étude des notions essentielles sur les systèmes

## Introduction générale

---

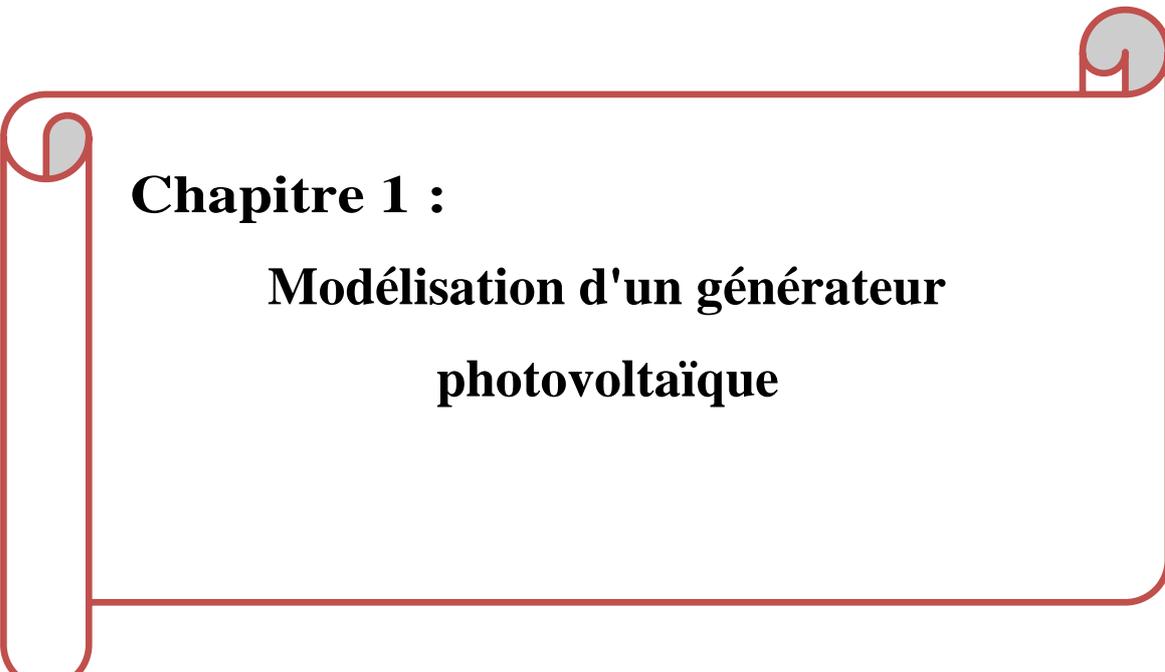
photovoltaïques, principe de conversion, ainsi le développement d'un modèle mathématique de système photovoltaïques, en fin les résultats de l'influence des paramètres interne et externe sur les caractéristique  $I-V$  et  $P-V$ .

Le deuxième chapitre est réservé à l'étude des convertisseurs de puissance DC-DC type boost, buck et buck-boost. Ensuite, on présente un modèle pour le convertisseur de type Boost qu'on a adopté dans ce travail. Enfin, on présente une vue générale sur l'adaptation entre les panneaux PV et la charge à l'aide d'un algorithme de commande MPPT.

Le troisième chapitre est dédié à la classification des MPPTs utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour extraire le maximum de puissance. On commence par les techniques traditionnelles qui comprennent les techniques basées sur la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et les techniques basées sur le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ). Ensuite, les techniques à contre réaction de puissance telles que Perturbation et de Observation (P&O) et Incrémentation de la Conductance (INC). Enfin les techniques intelligente basées sur la logique flous.

Le dernier chapitre est dédié à l'étude par simulation des différentes techniques MPPTs utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour extraire le maximum de puissance avec des conditions climatiques variables. Enfin, pour démontrer les performances des algorithmes étudiés, une comparaison des résultats de simulation est effectuée et présentée.

Ce travail se termine par une conclusion générale qui résume les différents résultats obtenus tout au long de ce travail et on donne les éventuelles perspectives envisagées.



## **Chapitre 1 :**

# **Modélisation d'un générateur photovoltaïque**

## 1.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel. Leur association en série/parallèle donne lieu à un module ou panneau photovoltaïque.

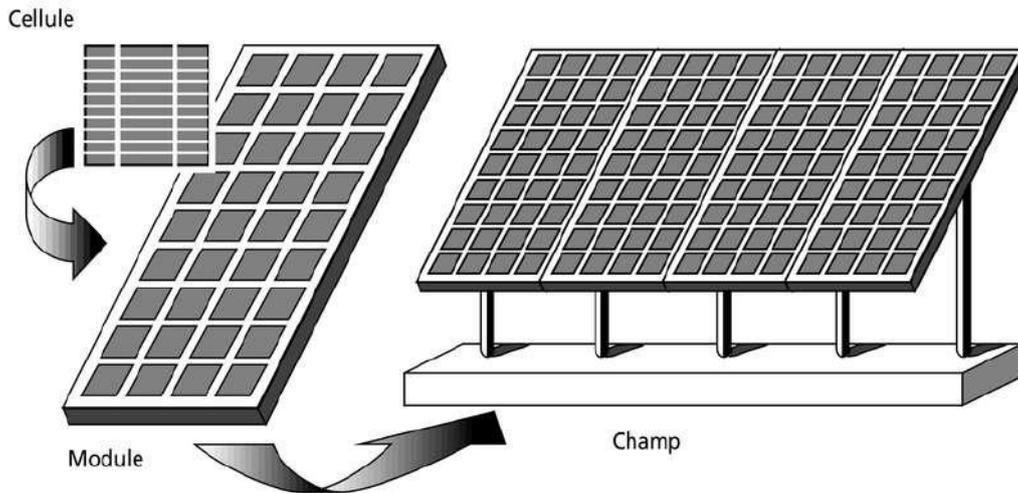
La modélisation est une étape très importante dans l'étude d'un système PV. Elle représente le fonctionnement du système réel représenté par des équations mathématiques et qui précède toutes les phases de dimensionnement, d'optimisation et de simulation. Dans la littérature, on trouve plusieurs modèles mathématiques identifiant ou représentant la cellule PV : modèle idéal, modèle à simple diode et modèle à double diodes dont les paramètres varient de quatre à sept. Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou des valeurs données par le fabricant. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes d'équations ( $I-V$ ) à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou tirés des essais expérimentaux [6].

Dans ce chapitre nous présentons la structure physique d'une cellule PV et son principe de fonctionnement. Ensuite, on étudie la modélisation du générateur PV pour déterminer les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  ainsi que les influences des différents paramètres climatiques et autres sur ces dernières. Enfin, on présente l'association des générateurs PV (en série, en parallèle et en mixte).

## 1.2 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque (GPV) est l'assemblage des cellules PV, des connexions, des pièces de protection et des supports etc... Ainsi, n'importe quel dispositif PV (cellules solaires, modules, panneaux,..) peut être désigné par le terme " générateur PV ". Pratiquement, la cellule solaire PV ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de 0.5 à 1.5 V selon les technologies utilisées [6].

Pour obtenir une puissance plus élevée, généralement, on assemble les cellules PV en série en capsulées sous verre pour former un module. Les modules sont connectés en série et /ou en parallèle pour former un panneau. Plusieurs panneaux regroupés sur un même site forment un champ PV figure 1.1.



**Figure 1.1** : Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ PV.

### 1.3 Effet photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. A l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité.

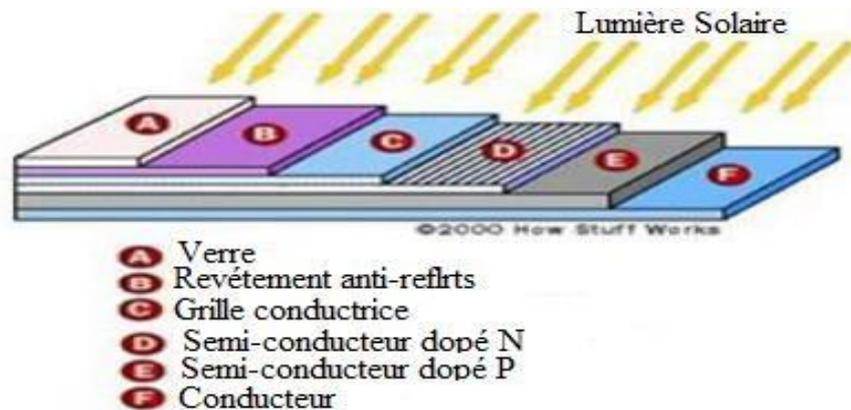
L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell-Lab., aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [7].

### 1.4 Cellules photovoltaïques

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.

- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.



**Figure 1.2 :** Structure basique d'une cellule solaire.

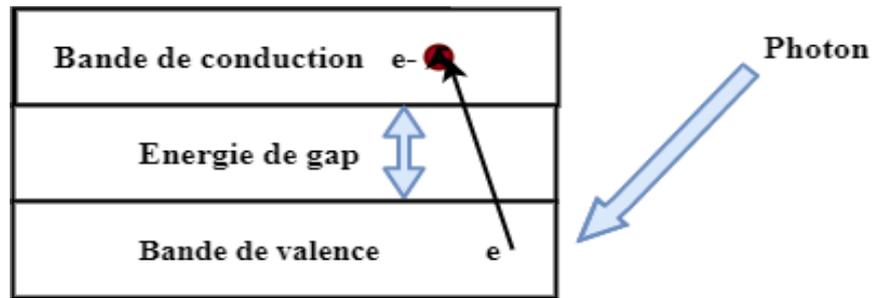
Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [8].

#### 1.4.1 Principe de fonctionnement

L'utilisation des cellules solaires débute dans le domaine spatial. Les recherches ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra attendre la crise énergétique de 1973 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

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).

C'est l'énergie du " bande gap ",  $E_g$  en électron-volt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1.0 à 1.8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.1 eV pour le silicium cristallin, et de 1.7 eV pour le silicium amorphe. La figure 1.3 montre le phénomène de conduction dans les matériaux semi-conducteurs [9].



**Figure 1.3 :** Conduction dans les matériaux semi-conducteurs.

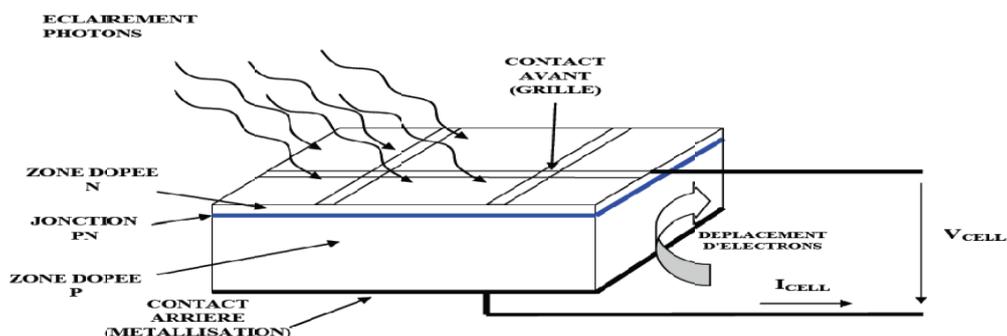
Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule. Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite vont libérer un électron négatif, laissant un " trou " positif. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique,  $E_g$ , de part et d'autre de la cellule.

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du dopage par des impuretés. Deux méthodes de dopage sont possibles :

Dopage de type N, qui consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire, libre de se mouvoir dans le cristal.

Dopage de type P utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire.

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type N et type P) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libres (électrons et trous), un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés figure 1.4 [9].



**Figure 1.4 :** Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard [9].

### **1.4.2 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)**

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent.

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [10] :

#### **1.4.2.1 Les cellules monocristallines**

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'24% en laboratoire) Cependant, elles coûtent trop chers dues à leur fabrication complexe.

#### **1.4.2.2 Les cellules poly cristallines**

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à19.8 en laboratoire).

#### **1.4.2.3 Les cellules amorphes**

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

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

### **1.5 Modélisation du générateur photovoltaïque**

La modélisation du générateur PV passe nécessairement par un choix judicieux de circuit électrique équivalent de la cellule PV et afin de développer un circuit équivalent d'une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon ce point de vue, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter le comportement non linéaire de la cellule. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant de la cellule PV. On présente trois modèles de cellule à savoir :

#### **1.5.1 Modèle idéal**

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule PV, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion. La cellule PV peut être étudiée à partir du circuit équivalent, donné par la figure 1.5, qui est composé d'un générateur de courant et d'une diode en parallèle [6].

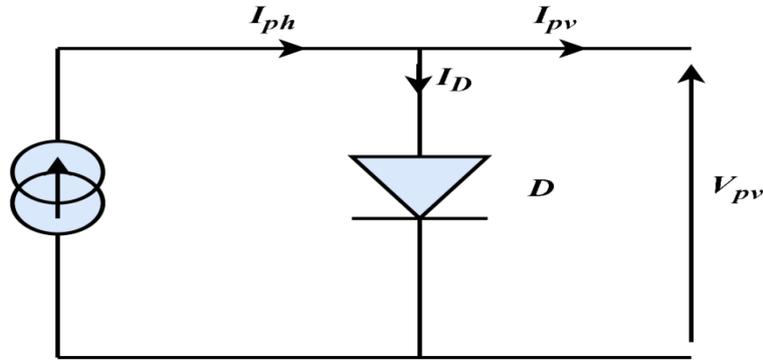
L'expression du courant aux bornes de la cellule peut être donnée par l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D \quad (1.1)$$

Où

$I_{pv}$  : courant généré par la cellule et fourni à la charge.

$I_{ph}$  : courant généré par la lumière incidente.



**Figure 1.5** : Circuit équivalent d'une cellule PV (modèle idéal).

$I_D$  : courant traversant la diode.

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique  $I$ - $V$  est donnée par la relation :

$$I_D = I_s \exp\left[\left(\frac{V_D}{AU_T}\right) - 1\right] \quad (1.2)$$

$U_T$  est la potentiel thermodynamique représentée par :

$$U_T = \frac{kT}{Q} \quad (1.3)$$

Où

$I_s$  : courant de saturation.

$V_D$  : tension aux bornes de la diode.

$A$  : facteur d'idéalité.

$k$  : constante de Boltzmann ( $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$ ).

$T$  : température.

$Q$  : charge de l'électron ( $Q = 1.9 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ).

L'équation 1.1 devient :

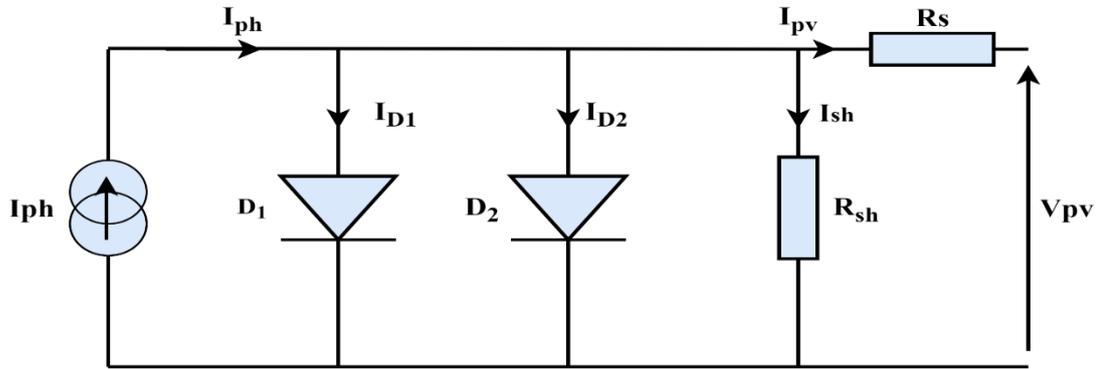
$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{AU_T}\right) - 1 \right] \quad (1.4)$$

### 1.5.2 Modèle à double diode

La figure 1.6 représente le circuit électrique équivalent d'un modèle basé sur une double diode. Il se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, de deux diodes pour la polarisation de la cellule, d'une résistance shunt et d'une résistance série [11], [12].

Selon la loi de Kirchoff on peut écrire :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (1.5)$$



**Figure 1.6 :** Circuit équivalent d'une cellule PV (modèle à double diodes).

Où  $I_{D1}$  et  $I_{D2}$  sont respectivement, les courants traversant les diodes  $D_1$  et  $D_2$ .

$I_{sh}$  est le courant dérivé par la résistance shunt.

Les courants  $I_{D1}$  et  $I_{D2}$  sont donnés par les expressions suivantes :

$$I_{D1} = I_{s1} \exp \left[ \left( \frac{V_{D1}}{A_1 U_T} \right) - 1 \right] \quad (1.6)$$

$$I_{D2} = I_{s2} \exp \left[ \left( \frac{V_{D2}}{A_2 U_T} \right) - 1 \right] \quad (1.7)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A_1 U_T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A_2 U_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (1.8)$$

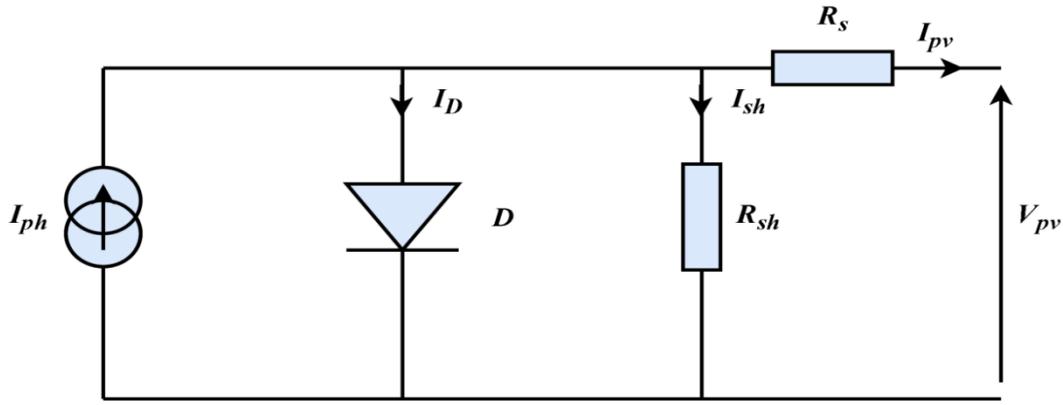
### 1.5.3 Modèle à simple diode

Dans ce travail, on s'intéresse à un modèle à simple diode avec cinq paramètres L5P (Lumped model with 5 Parametres) à cause de sa simplicité et de sa précision.

La figure 1.7 représente le schéma équivalent de ce modèle qui est composé d'un générateur de courant, dont la valeur du courant est proportionnelle à l'éclairement reçu à la surface de la cellule PV, d'une diode, d'une résistance parallèle (shunt) et d'une résistance série [13], [14].

A partir du circuit équivalent de ce modèle, on peut écrire :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (1.9)$$



**Figure 1.7 :** Circuit équivalent d'une cellule PV (modèle à simple diode).

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \right) \quad (1.10)$$

Dans ce cas, le courant électrique produit par la cellule devient comme suit :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A U_T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \right) \quad (1.11)$$

### 1.5.4 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Les paramètres de la cellule photovoltaïque extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

#### 1.5.4.1 Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) est le courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant  $V_{pv} = 0$  dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [6]. On peut écrire :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left( \frac{R_s I_{cc}}{A U_T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \right) \quad (1.12)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme  $I_s \left[ \exp\left( \frac{R_s I_{cc}}{A U_T} \right) - 1 \right]$  devant  $I_{ph}$

L'expression rapprochée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{\left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (1.13)$$

$$I_{cc}(V_{pv} = 0) \approx I_{ph} \quad (1.14)$$

### 1.5.4.2 Tension de circuit ouvert

La tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [15]. On peut écrire :

$$V_{co}(I_{pv} = 0) = AU_T \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1\right) \quad (1.15)$$

### 1.5.4.3 Puissance maximale

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule PV sous éclairage dépend de la résistance de charge. Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement  $P_{pvmax}$  ( $I_{pvmax}$ ,  $V_{pvmax}$ ) de la courbe courant-tension (le courant compris entre 0 et  $I_{cc}$  et la tension comprise entre 0 et  $V_{co}$ ) [16]. Donc, la puissance fournie par la cellule est donnée par le produit ( $V_{pv} \cdot I_{pv}$ ) c.à.d.

$$P_{pv} = V_{pv} \left[ I_{ph} - I_S \left( \exp\left(\frac{V_{pv}}{AU_T}\right) - 1 \right) \right] \quad (1.16)$$

Cette puissance fournie est maximale au point défini par :

$$\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} + I_{pv} = 0 \quad (1.17)$$

$$I_{ph} - I_S \left( \exp\left(\frac{V_{pv}}{AU_T}\right) - 1 \right) - V_{pv} I_S \left( \frac{1}{AU_T} \right) \exp\left(\frac{V_{pv}}{AU_T}\right) = 0 \quad (1.18)$$

La tension  $V_{pvmax}$  et le courant  $I_{pvmax}$  correspondant au maximum de puissance, sont alors donnés par :

$$\left( 1 + \frac{V_{pvmax}}{AU_T} \right) \exp\left(\frac{V_{pvmax}}{AU_T}\right) = 1 + \frac{I_{ph}}{I_S} \quad (1.19)$$

Donc :

$$I_{pvmax} = I_S \frac{V_{pvmax}}{AU_T} \exp\left(\frac{V_{pvmax}}{AU_T}\right) \quad (1.20)$$

Le produit ( $V_{pvmax} \cdot I_{pvmax}$ ) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit ( $V_{co} \cdot I_{cc}$ ).

### 1.5.4.4 Facteur de qualité

Ce paramètre est appelé aussi paramètre d'ajustement. De nombreux auteurs discutent des méthodes d'estimation de la valeur correcte de cette constante [17], [18]. Habituellement, ce paramètre varie entre  $1 \leq A \leq 2$  mais le choix dépend d'autres paramètres du modèle PV. Certaines valeurs de A basées sur des analyses empiriques se trouvent dans [19].

Comme donné dans [20], il existe différentes opinions sur la meilleure méthode qui permet de déterminer la valeur de  $A$  qui exprime le degré d'idéalité de la jonction  $P-N$ . valeur de  $A$  peut être modifiée par la suite à n d'améliorer le modèle, si nécessaire. Cette constante affecte la courbure de la caractéristique  $I(V)$  et peut ramener une légère amélioration de la précision du modèle.

#### 1.5.4.5 Facteur de forme

Le facteur de forme ( $ff$ ) est le facteur de remplissage (fill factor). Ce paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV. Il représente le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule notée  $P_{pvmax}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \cdot V_{co}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également [21]. Le facteur de forme est défini par la relation suivante :

$$ff = \frac{P_{pvmax}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (1.21)$$

#### 1.5.4.6 Rendement d'une cellule PV

Le rendement d'une cellule PV est donné par le rapport de la puissance électrique maximale générée et la puissance du rayonnement solaire incident

$$\eta = \frac{P_{pvmax}}{P_{inc}} \quad (1.22)$$

$P_{inc}$  est la puissance incidente. Elle est égale au produit de l'irradiation et de la surface totale du générateur PV.

$$P_{inc} = \psi \cdot S \quad (1.23)$$

Où

$\psi$  : flux global [ $W/m^2$ ].

$S$  : surface du générateur [ $m^2$ ].

#### 1.5.5 Caractéristique du générateur PV

La forme mathématique de la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est représentée par l'équation 1.11.

La photo courant  $I_{ph}$  est directement proportionnelle à l'éclairement selon la formule suivante :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_r} I_{ccr} \quad (1.24)$$

La photo courant dépend aussi de la température, son expression est donnée par :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_r} I_{ccr} [1 + K_0 (T - T_r)] \quad (1.25)$$

Avec :

$I_{ccr}$  : courant de court-circuit de la cellule sous conditions de référence.

$G$  : irradiation en (W/m<sup>2</sup>).

$G_r$  : irradiation de référence ( $G_r = 1\text{KW/m}^2$ ).

$K_0$  : coefficient de variation du courant en fonction de la température.

$T_r$  : température de référence, 298°K (25°C).

$T$  : température de la cellule.

D'autre part, le courant de saturation de la cellule varie avec la température, il est décrit comme suit :

$$I_s = I_{rs} \left( \frac{T}{T_r} \right)^{\frac{3}{A}} \exp \left( \frac{Q \cdot E_g}{K \cdot A} \right) \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \quad (1.26)$$

Où

$I_{rs}$  : courant de saturation inverse de la cellule sous conditions de référence.

$E_g$  : l'énergie du "band gap" du semi-conducteur en électron volt (eV).

$$I_{rs} = \frac{I_{ccr}}{\left( \exp \frac{QV_{cor}}{AKT_r} - 1 \right)} \quad (1.27)$$

$V_{cor}$  : tension de saturation de la cellule sous conditions de référence.

La résistance série  $R_s$  a un impact sur la pente de la courbe caractéristique près de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ . La valeur de  $R_s$  est alors donnée en évaluant la pente  $\frac{dV_{pv}}{dI_{pv}}$ . On peut calculer la résistance série dans le point  $V_{co}$  comme suite :

$$R_s = - \frac{1}{\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}} = - \frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} - \frac{1}{\frac{I_s}{AKT_r} \exp \left( \frac{QV_{cor}}{AKT_r} \right)} \quad (1.28)$$

L'équation de la caractéristique  $I = f(V)$  (équation 1.4) non linéaire est résolue par des méthodes d'itération simple. Généralement la méthode de Newton-Raphson est choisie pour la convergence rapide de la réponse. Elle est décrite comme suit :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (1.29)$$

Où

$f'(x_n)$  est la dérivée de la fonction  $f(x_n)$ .

$x_n$  est la présente itération.

$x_{n+1}$  est l'itération suivante.

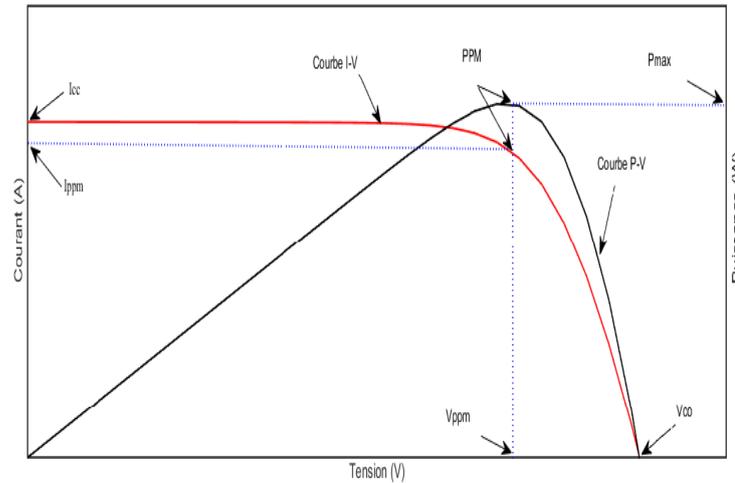
La réécriture de l'équation 1.4 donne la fonction suivante :

$$\left( f(I_{pv}) = I_{ph} - I_{pv} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{AU_T}\right) - 1 \right] = 0 \right) \quad (1.30)$$

On utilise la méthode de Newton-Raphson pour résoudre l'équation 1.30, on aura :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_n - I_s \left[ \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_n}{AU_T}\right) - 1 \right]}{-1 - I_s \left(\frac{R_s}{AU_T}\right) \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_n}{AU_T}\right)} \quad (1.31)$$

La figure 1.8 représente les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'une cellule PV à une température ( $T = 25^\circ\text{C}$ ) et une irradiation solaire ( $G = 1\text{KW/m}^2$ ).



**Figure 1.8 :** Caractéristiques  $I-V$  et  $P-V$  d'une cellule PV.

### 1.6 Validation du modèle

L'équation de la caractéristique  $I(V)$  d'un générateur PV, composé de  $N_p$  cellules en parallèle et  $N_s$  cellules en série, peut être décrite comme suit :

$$I_{pv} = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_s \left[ \exp\left(\frac{V_{pv} + \left(\frac{N_s}{N_p}\right) R_s I_{pv}}{AU_T}\right) - 1 \right] - \left( \frac{V_{pv} + \left(\frac{N_s}{N_p}\right) R_s I_{pv}}{\left(\frac{N_s}{N_p}\right) R_{sh}} \right) \quad (1.32)$$

Le module SUNTECH STPO80S-12/Bb a été choisi pour la validation du modèle mathématique. Il contient 36 cellules en silicium poly-cristallin et fournit une puissance maximale de 80W.

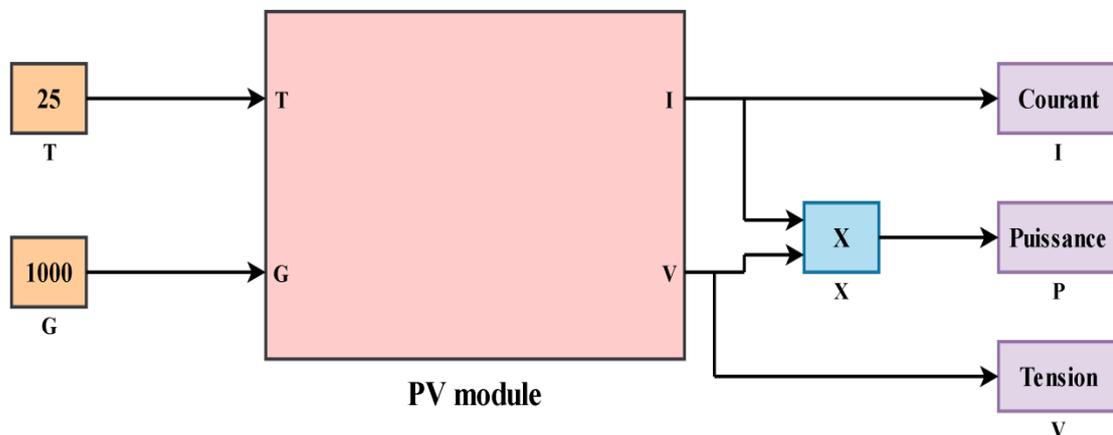
### 1.6.1 Bloc Simulink du modèle à une diode

Le bloc réalisé en utilisant l'environnement Matlab/Simulink est représenté sur figure 1.9. Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension ont été obtenues pour des conditions standards de fonctionnement (ensoleillement  $1000\text{W/m}^2$  et température  $25^\circ\text{C}$ ). Les paramètres ( $I_{cc}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{co}$ ,  $V_{mpp}$ ) sous les conditions standards de fonctionnement ( $G=1000\text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ) sont fournis par le constructeur de panneaux photovoltaïque et énuméré dans le tableau 1.1.

Puissance max du panneau $P_{ppm}$	80W
Courant au point de puissance max $I_{ppm}$	4.85A
Tension au point de puissance max $V_{ppm}$	17.5V
Courant de court-circuit $I_{cc}$	4.95A
Tension en circuit ouvert $V_{co}$	21.9V
Coefficient d'incrémentatation du courant	3.00mA/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension	-150mV/°C

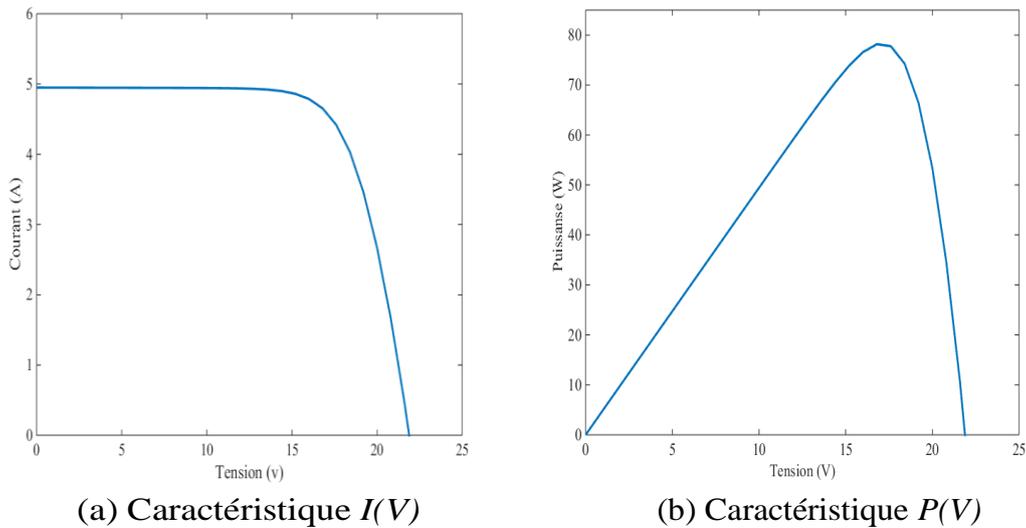
**Tableau 1.1 :** Caractéristiques du panneau utilisé SUNTECH STPO80S-12/Bb.

Afin de retrouver les caractéristiques principales de notre panneau photovoltaïque, nous avons créé le modèle mathématique cité précédemment (modèle à une diode) sous conditions STC avec l'environnement Matlab/Simulink.



**Figure 1.9 :** Schéma bloc du modèle à une diode.

### 1.6.2 Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ dans des conditions STC

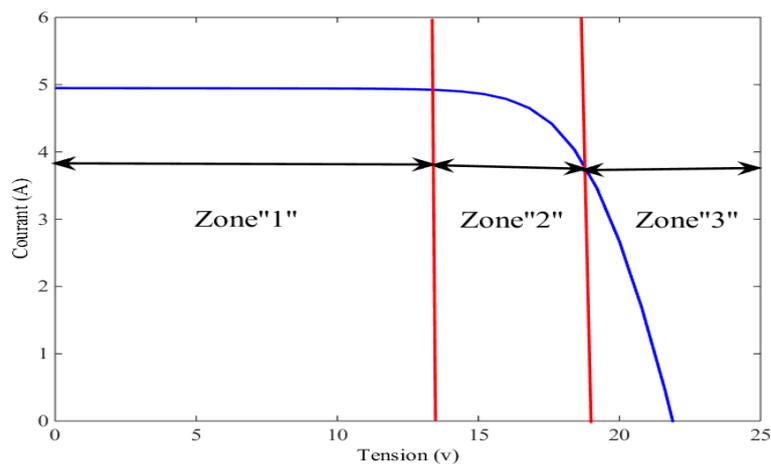


**Figure 1.10 :** Caractéristiques  $I-V$  et  $P-V$  du générateur PV dans les conditions  $(T = 25^\circ\text{C}$  et  $G = 1\text{KW}/\text{m}^2$ ).

### 1.6.3 Les zones de caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe  $I = f(V)$  est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

La figure 1.11 représente trois zones essentielles [22] :



**Figure 1.11 :** Différentes zones de la caractéristique  $I-V$  du générateur PV.

a) Zone 1 : pour cette zone, le générateur PV fonctionne comme un générateur de courant, car le courant reste constant quelle que soit la tension.

b) Zone 2 : correspond au coude de la caractéristique dans la zone intermédiaire entre les deux autres. Elle représente la zone préférée pour le fonctionnement du générateur, où le

point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

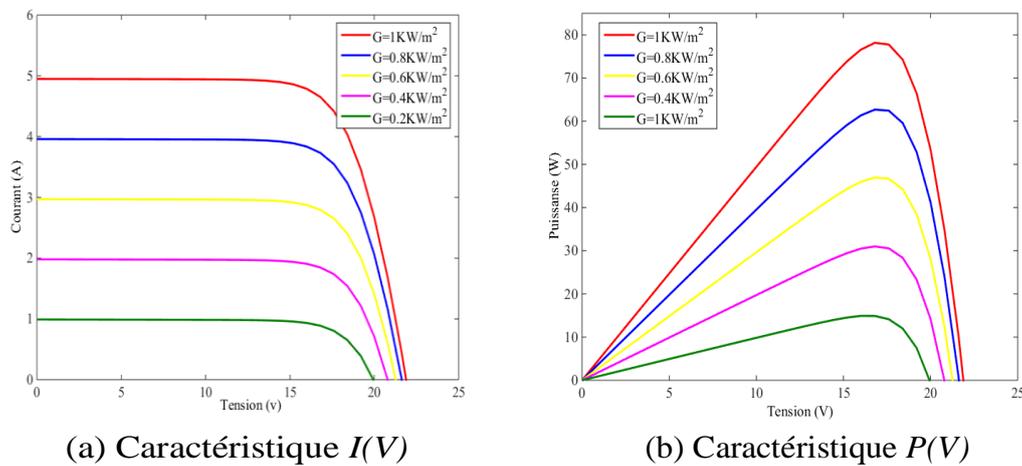
c) Zone 3 : dans cette zone, le générateur est assimilable à un générateur de tension car la variation du courant correspond à une tension presque constante.

## 1.7 Paramètres d'influence sur les caractéristiques du générateur PV

Plusieurs paramètres peuvent influencer sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  du générateur PV considéré comme nous allons le voir ci-dessous :

### 1.7.1 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque

Dans ce qui suit, les simulations ont été faites pour différentes valeurs d'ensoleillement ( $G=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\text{KW/m}^2$ ) en maintenant la température constante  $T=25^\circ\text{C}$ . Pour chaque ensoleillement nous déterminons la caractéristique courant/tension figure 1.12 (a). Ainsi que pour la caractéristique puissance/tension figure 1.12 (b).



**Figure 1.12** : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques PV.

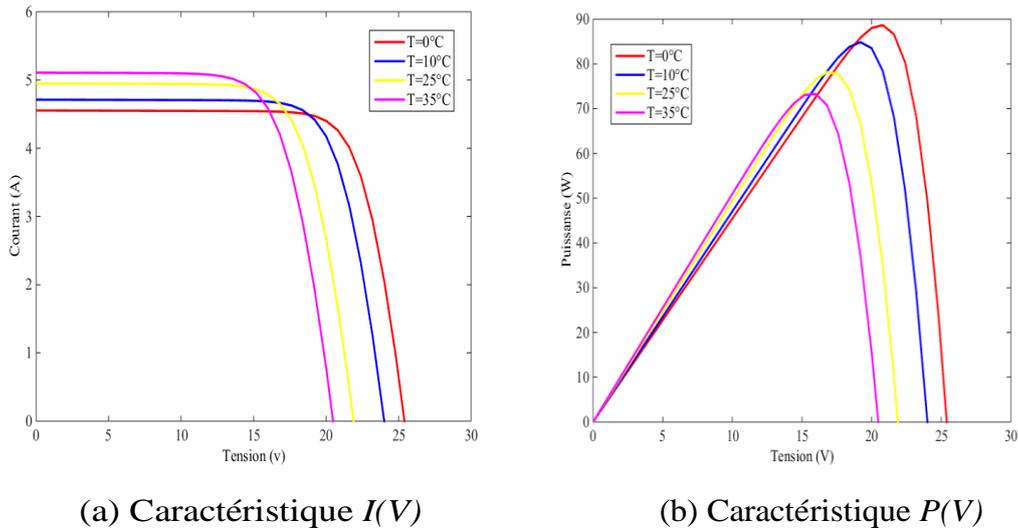
Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes :

- Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  et la puissance varie proportionnellement à l'ensoleillement  $G$ .
- La tension à vide  $V_{co}$  varie peu avec l'ensoleillement pouvant être considérée comme une constante pour une installation donnée.

### 1.7.2 Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température.

Les figures 1.13 (a) et 1.13 (b) représentent les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un générateur PV en fonction de la température et à une irradiation solaire constante.



**Figure 1.13 :** Influence de la température sur les caractéristiques PV.

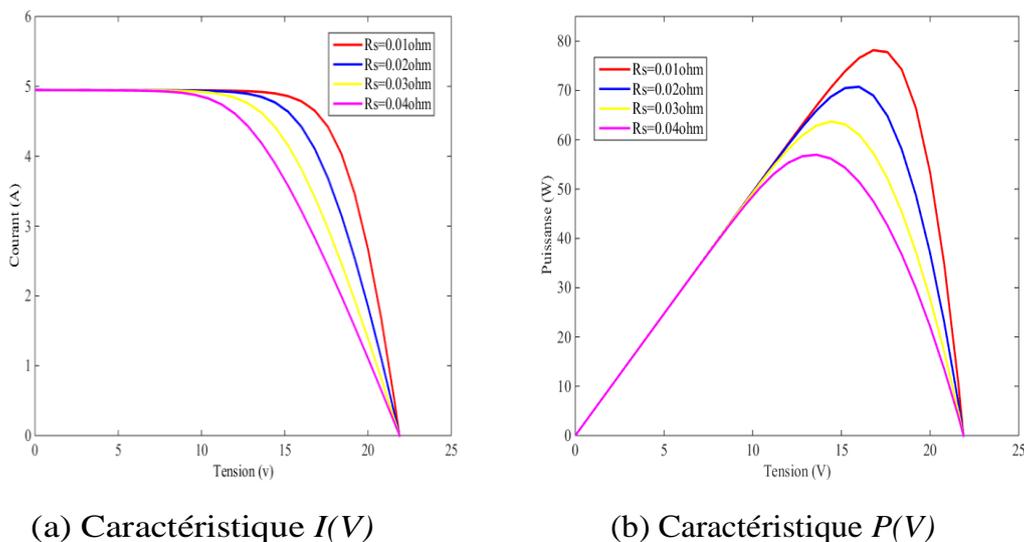
Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes :

- En faisant varier la température de 0°C à 35°C, nous remarquons que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  et la puissance  $P_{pv}$  est légèrement dépendant de la température.
- En revanche, la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  diminue lorsque la température augmente.

### 1.7.3 Influence de la résistance série

La résistance série ( $R_s$ ) caractérise les pertes à travers les grilles de collecte et les mauvais contacts ohmiques des cellules.

Les figures 1.14 (a) et 1.14 (b) montrent l'influence de la résistance série sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  dans les conditions standards  $T = 25^\circ\text{C}$  et  $G = 1\text{KW/m}^2$



**Figure 1.14 :** Influence de la résistance série sur les caractéristiques PV.

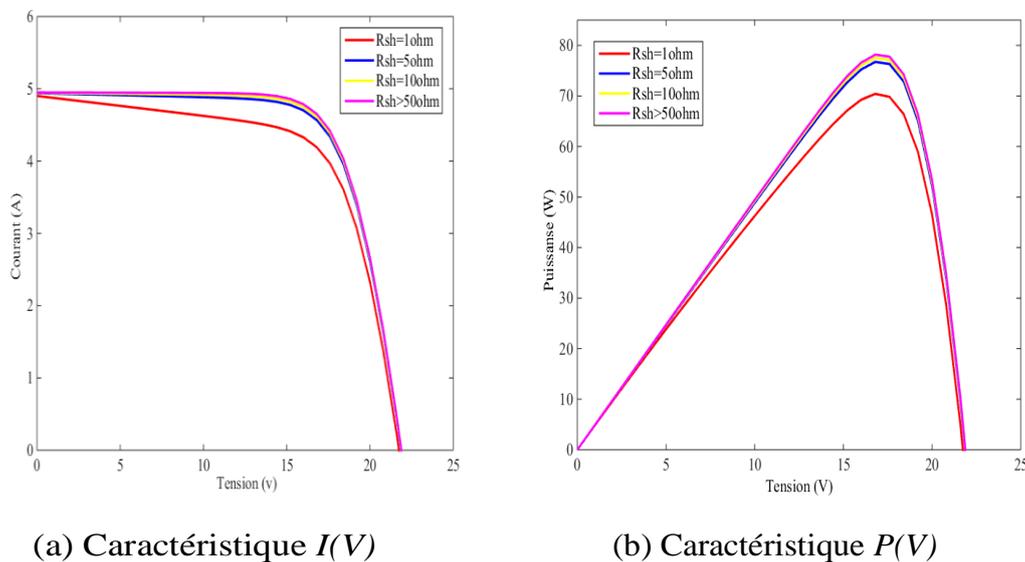
Dans la zone où le générateur PV se comporte comme un générateur de tension, la résistance série agit sur la pente de la caractéristique  $I(V)$ . Elle ne modifie pas la tension de circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, la valeur du courant de court-circuit diminue. On remarque que lorsque  $R_s$  augmente, la valeur de la tension optimale ( $V_{mpp}$ ) diminue, mais le courant optimal ( $I_{mpp}$ ) reste presque constant. Par conséquent, la puissance maximale ( $P_{mpp}$ ) augmente avec la diminution de la résistance série.

#### 1.7.4 Influence de la résistance shunt

La résistance shunt est une résistance parallèle qui représente la résistance de fuite provenant de courants parasites entre le dessus et le dessous de la cellule, par le bord en particulier, et à l'intérieur du matériau par des irrégularités ou impuretés.

Les figures 1.15 (a) et 1.15 (b) illustrent l'influence de la résistance parallèle sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  dans les conditions standards.

Les performances du module PV sont d'autant plus dégradées que la résistance parallèle est petite. Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe  $I=f(V)$  dans la zone où le module fonctionne comme une source de tension, c'est-à-dire à droite du point de puissance maximale. La chute de tension est liée au courant généré par le module.



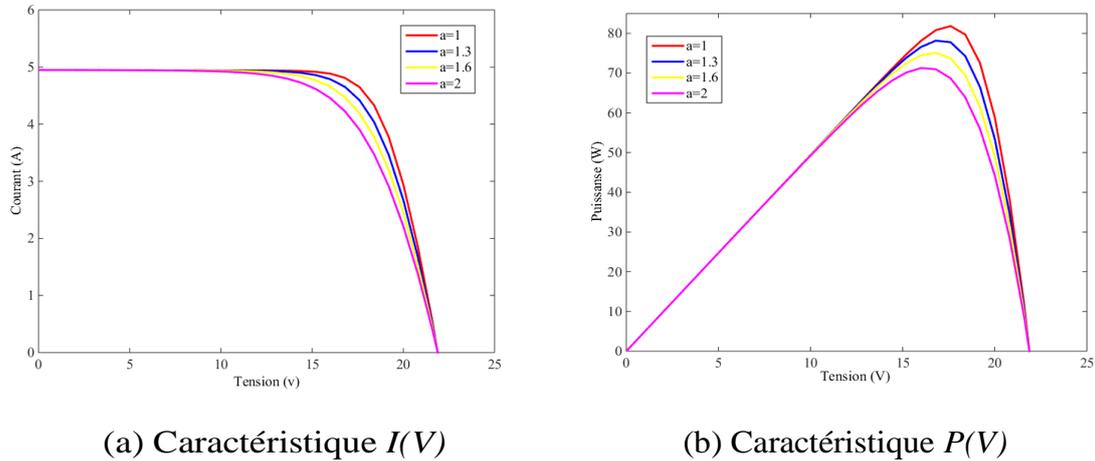
**Figure 1.15** : Influence de la résistance parallèle sur les caractéristiques PV.

#### 1.7.5 Influence du facteur de qualité

L'élévation du facteur de qualité (facteur d'idéalité) influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement.

Une valeur de 1,3 est suggérée comme valeur typique en fonctionnement normal est peut-être utilisée au départ, jusqu'à l'obtention d'une valeur plus précise, et estimée plus tard par ajustement de la courbe [23].

Les figures 1.16 (a) et 1.16 (b) représentent l'influence du facteur de qualité sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  du générateur PV.



**Figure 1.16 :** Influence du facteur de qualité sur les caractéristiques PV.

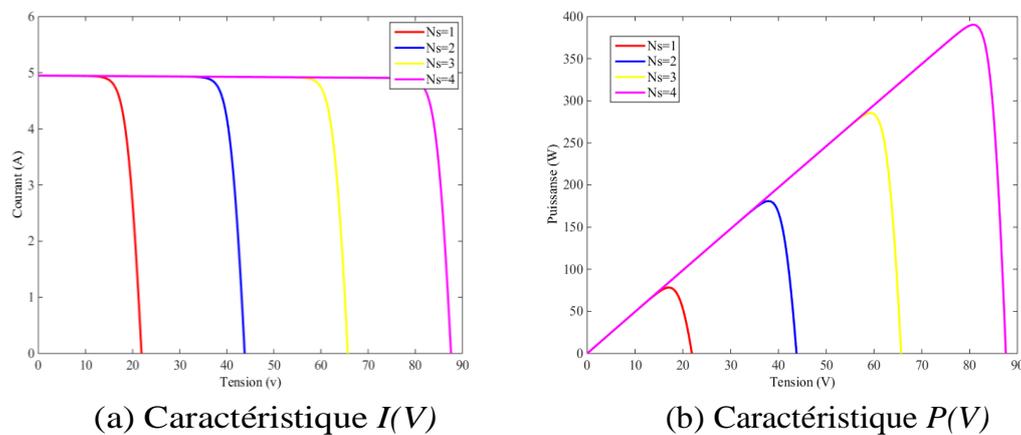
## 1.8 Association des modules PV

Pour pouvoir augmenter la tension, le courant et la puissance d'un générateur PV, on peut associer plusieurs modules PV en série ou en parallèle ou encore en mixte (série/parallèle).

### 1.8.1 Association en série

L'association de  $N_s$  (nombre en série) des modules permet d'augmenter la tension du générateur PV. Cette association délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles des modules et un courant égal à celui d'un seul module.

Les caractéristiques d'un groupement de  $N_s$  modules PV en série sont représentées par les figures suivantes :



**Figure 1.17 :** Association en série des modules PV.

### 1.8.2 Association en parallèle

Pour augmenter le courant d'un générateur PV, on associe  $N_p$  (nombre en parallèle) des modules PV identiques. Dans ce groupement, le courant est égal à la somme des courants individuels des modules et la tension reste égale à celle d'un seul module.

Les caractéristiques d'un groupement de  $N_p$  modules PV en parallèle sont représentées par les figures suivantes :

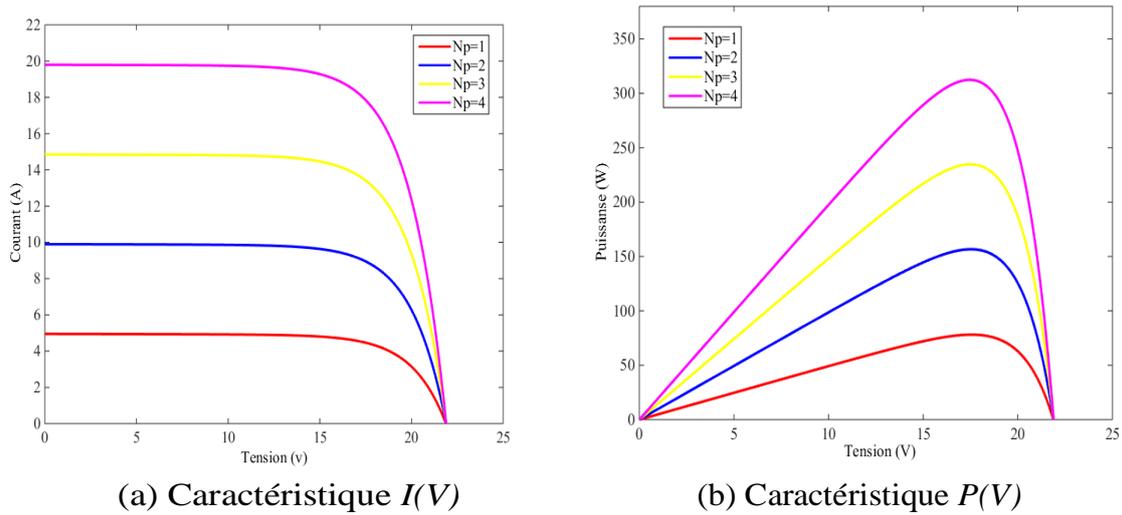


Figure 1.18 : Association en parallèle des modules PV.

### 1.8.3 Association mixte (série/parallèle)

Dans certains cas, la satisfaction des besoins en courant et en tension importants nécessite le recours à l'utilisation d'un groupement mixte (série/parallèle) de modules PV.

Les caractéristiques d'un groupement mixte des modules PV sont illustrées par les figures suivantes :

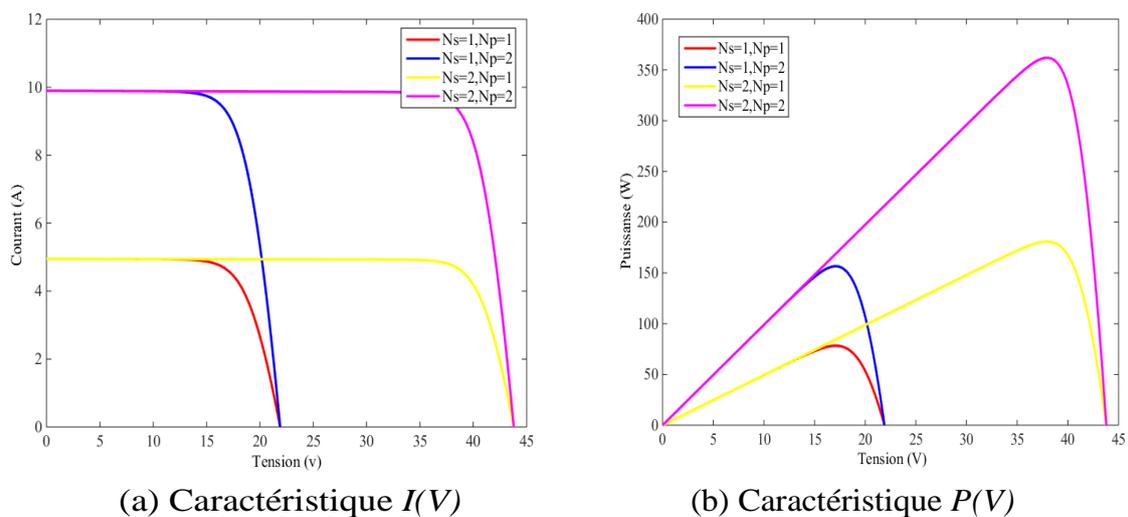
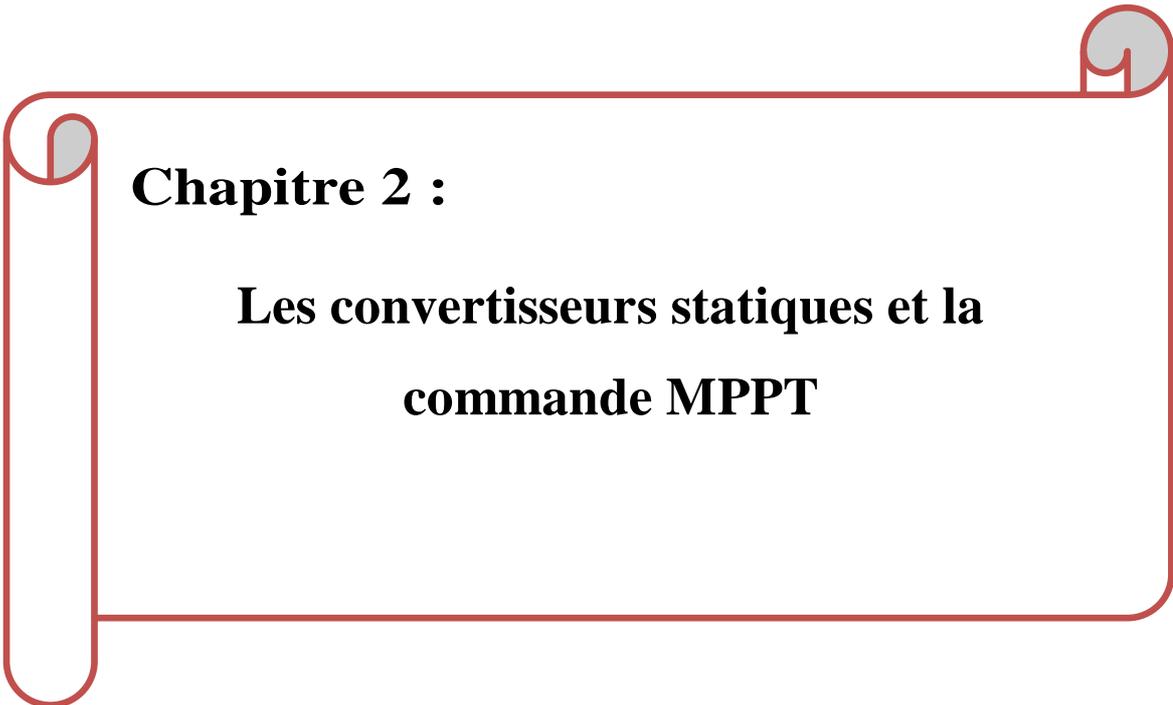


Figure 1.19 : Association mixte (série/parallèle) des modules PV.

## 1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit d'abord la structure physique d'une cellule PV et son principe de fonctionnement. Ensuite, la modélisation mathématique du générateur PV (modèle idéal, modèle à simple diode et modèle à double diode). Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur un modèle à simple diode avec cinq paramètres. Enfin, nous avons présenté l'influence des différents paramètres climatiques et autres sur les caractéristiques  $I(V)$ ,  $P(V)$  ainsi que la synthèse d'assemblage des panneaux soit en série, parallèle ou mixte.

Nous montrerons en détail sur les convertisseurs, qui représente l'étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge, en plus le principe de la commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, et cela sera le but du prochain chapitre.



## **Chapitre 2 :**

### **Les convertisseurs statiques et la commande MPPT**

## 2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons vu l'effet de l'irradiation solaire sur la sortie du générateur photoélectrique et qu'il ne pouvait pas maintenir la même sortie tout au long de la journée, et pour résoudre ce problème nous avons utilisé les convertisseurs DC-DC.

L'utilisation des convertisseurs de puissance dans divers domaines est devenue très fréquent en raison de leur efficacité, de leur petite taille, de leur simplicité et de leur facilité d'utilisation. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications : domestique (téléphone portable, ordinateurs, électroménager, ...), industries lourdes (voitures, véhicules hybrides, et électrique), navigation (navires civils et de guerre avancés, avions électriques, missiles, ...), énergies renouvelables (panneaux solaires, éoliennes, turbines à eau, ...) [24], [25].

Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) se composent de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, ces éléments ne consomment aucune puissance, ce qui implique un bon rendement. Le commutateur est un élément semi-conducteur qui fonctionne en mode de commutation (bloqué/saturé). Habituellement, le transistor MOSFET (transistor à effet de champ d'oxyde de métal) est utilisé à des puissances relativement basses et le transistor IGBT (transistor bipolaire à gâchette isolée) à des puissances plus élevées [26]. Le commutateur du convertisseur est commandé par ordres MPPTs et un signal MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), avec une fréquence de commutation  $f_s$  fixe et un rapport cyclique variable [27], [28].

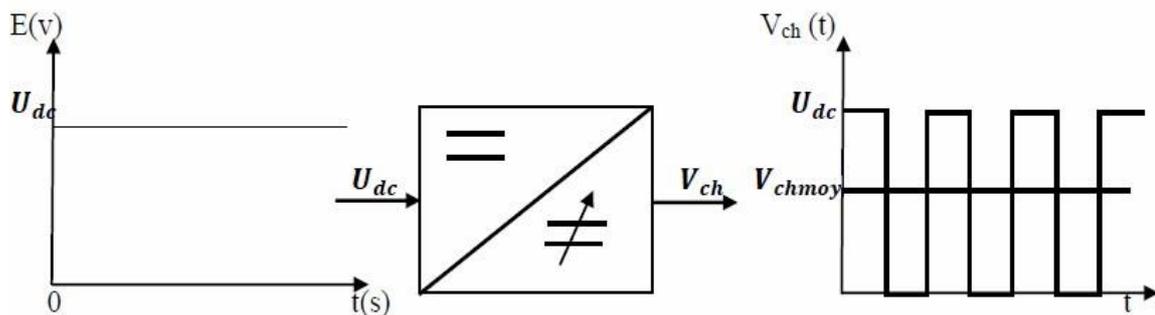
Dans ce chapitre nous présentons les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque. Ensuite, nous présentons la modélisation des convertisseurs DC-DC de type buck, buck-boost et boost. Enfin, nous présentons l'adaptation entre le générateur PV et la charge à l'aide d'une commande MPPT.

## 2.2 Les convertisseurs DC/DC(Hacheurs)

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, où pour alimenter une charge continue [29]. Il se compose de

condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ont un bon rendement, ils ne consomment aucune puissance active [29].

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [29].



**Figure 2.1** : Principe de base d'un hacheur [30].

### 2.3 Les Types des convertisseurs DC-DC

Il y a plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, en demi-pont et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques PV, les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté [31].

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu [31]. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- Abaisseurs (buck) ;
- Elévateurs (boost) ;
- Elévateurs – Abaisseurs (buck-boost) ;

La topologie buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau.

La topologie boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le buck-boost, le Cuk, et le Sepic. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC.

## **2.4 Modélisation des convertisseurs DC-DC**

L'objectif de la modélisation des convertisseurs DC-DC est d'analyser leurs comportements dynamiques afin de synthétiser les lois de commande nécessaires qui permettent d'atteindre les performances désirées. La difficulté majeure vient de la non-linéarité de ces convertisseurs ainsi que de la pluralité de leurs configurations électriques distinctes lors d'une période de commutation. Cette modélisation permet de caractériser le fonctionnement des convertisseurs DC-DC dans les deux modes de conduction (continue et discontinue) [32], [33].

Dans ce travail, nous nous intéressons uniquement à l'étude et à la modélisation des convertisseurs boost, buck et buck-boost.

### **2.4.1 Modélisation d'un convertisseur boost**

Un convertisseur boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur [34]. Il est composé essentiellement d'un interrupteur K (exemple : transistor) et d'une diode D. L'interrupteur K est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découpage fixe  $T$  et de rapport cyclique variable  $d$ . Durant chaque période, K est fermé de l'instant 0 à  $dT$  et ouvert de  $dT$  à  $T$ . Selon la présence et l'absence du courant dans l'inductance on peut répartir deux modes de fonctionnement, conduction discontinue ou conduction continue. On s'intéresse au second cas qui est le plus important. La figure 2.2 présente le schéma de principe de ce convertisseur, et la figure 2.3 donne les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes des courants (à gauche) et tensions (à droite).

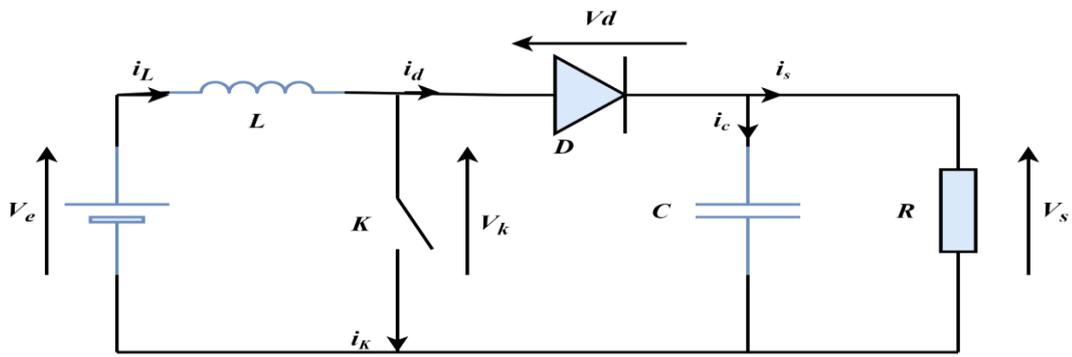


Figure 2.2 : Schéma de base d'un convertisseur boost.

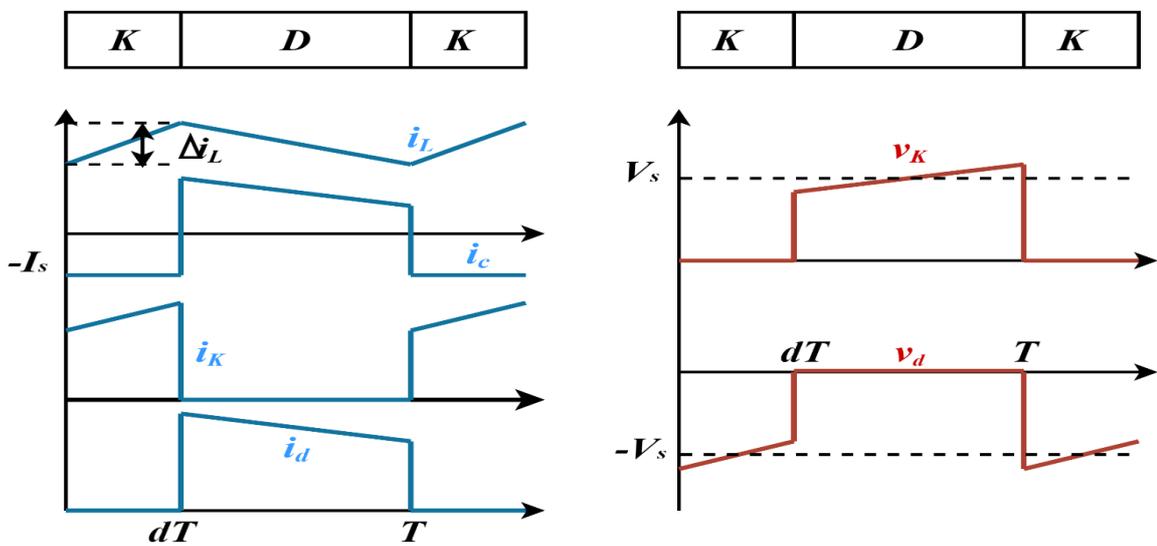


Figure 2.3 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur boost.

A la fermeture de  $K$  et à l'ouverture de  $D$  pendant l'intervalle  $[0 \text{ } dT]$ , le circuit électrique du convertisseur est présenté dans la figure 2.4 (a) :

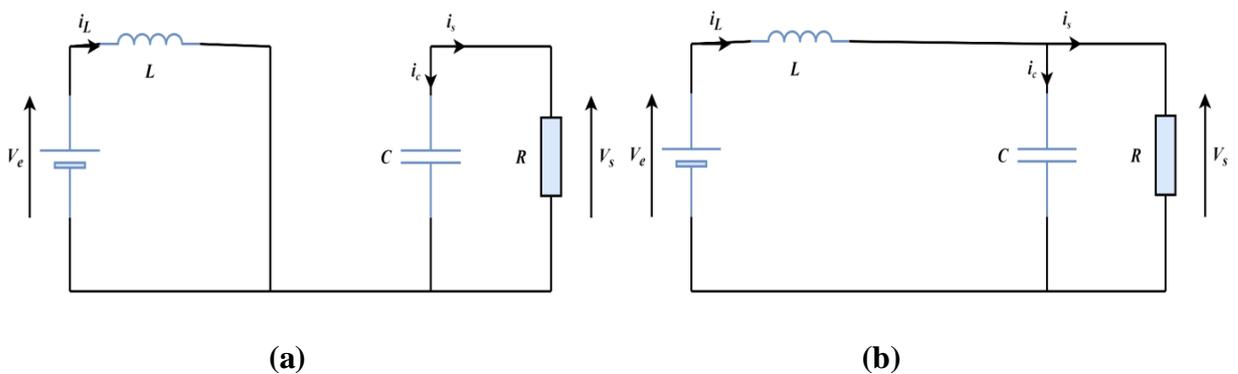


Figure 2.4 : Circuits équivalents du convertisseur boost.

$$V_e = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (2.1)$$

$$i_L = I_{\min} + \frac{V_e}{L} t \quad (2.2)$$

Avec  $I_{\min}$  montre la valeur minimale de courant dans l'inductance.

A l'instant  $t = dT$ , le courant atteint sa valeur maximale dans l'inductance  $I_{\max}$  suivant la formule 2.3 :

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{V_e}{L} dT \quad (2.3)$$

A la l'ouverture de K et à fermeture de D pendant l'intervalle  $[dT \ T]$ , le circuit électrique devient alors, voire la figure 2.4 (b) :

On a les équations 2.4 et 2.5 comme suit :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (2.4)$$

$$i_L = I_{\max} + \frac{V_s - V_e}{L} (t - dT) \quad (2.5)$$

A l'instant  $t = T$ , le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale  $I_{\min}$  :

$$I_{\min} = I_{\max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - d) T \quad (2.6)$$

Avec  $\Delta i_L = I_{\max} - I_{\min}$  : montre l'ondulation du courant dans l'inductance.

Ceci dit, l'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (2.3) et (2.6) donne la valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s$  :

$$V_s = \frac{1}{1-d} V_e \quad (2.7)$$

D'après l'équation 2.7 on peut contrôler la valeur moyenne de la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.

### 2.4.2 Modélisation d'un convertisseur buck

Un convertisseur buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur [34].

On procède de la même manière dans l'étude du convertisseur buck. La figure 2.5 illustre le principe de fonctionnement de ce convertisseur. Ainsi, la figure 2.6 donne les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes des courants (à gauche) et tensions (à droite).

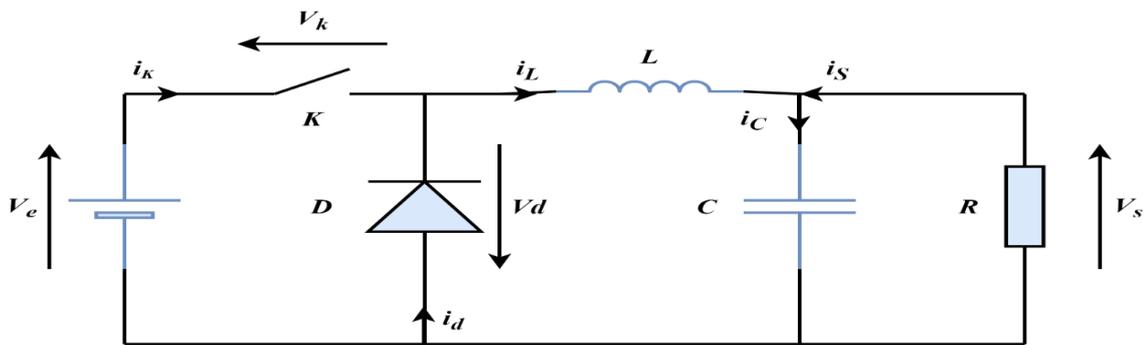


Figure 2.5 : Schéma de base d'un convertisseur buck.

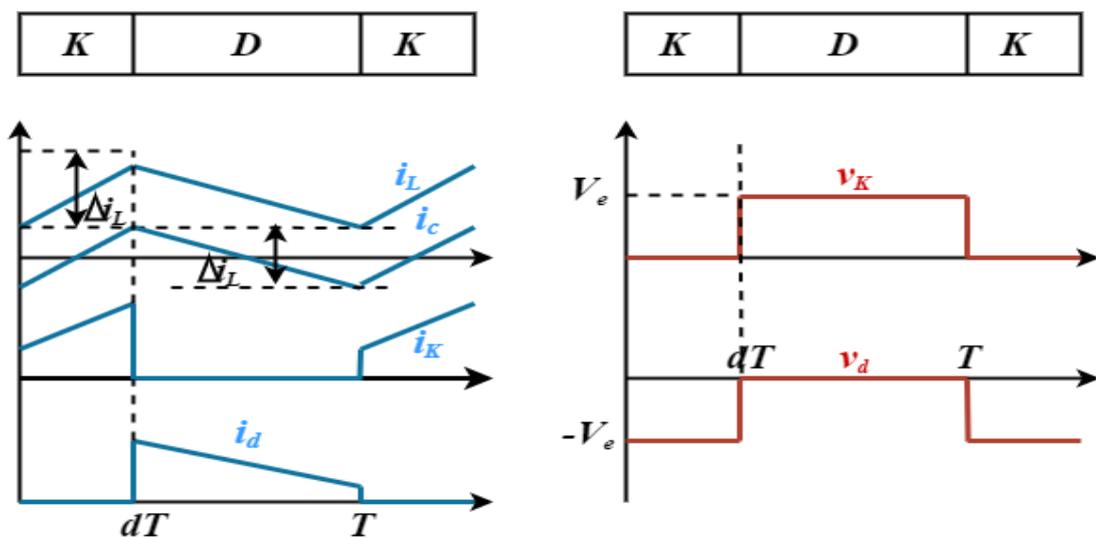
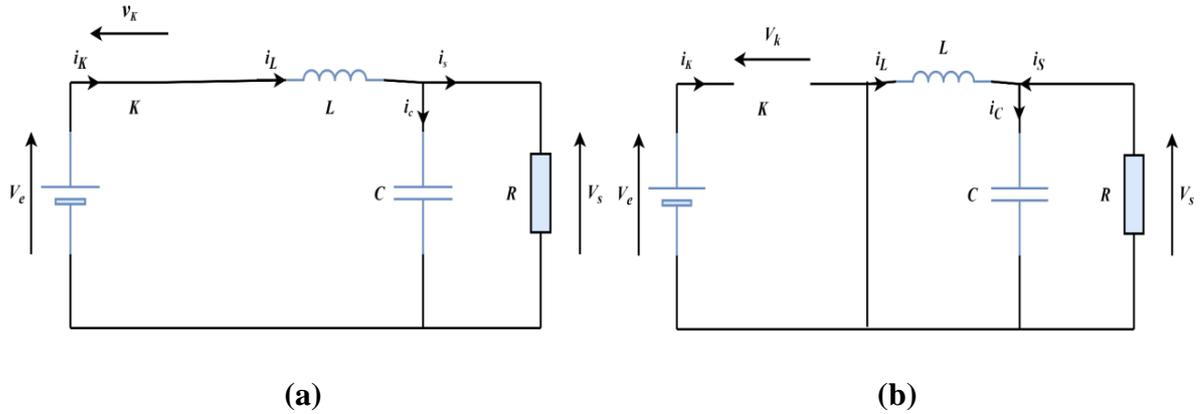


Figure 2.6 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur buck.

A la fermeture de K et à l'ouverture de D pendant l'intervalle  $[0, dT]$ , le circuit électrique du convertisseur est présenté dans la figure 2.7 (a) :



**Figure 2.7 :** Circuits équivalents du convertisseur buck.

On présente les équations 2.8 et 2.9 comme suit :

$$V_e = L \frac{di_L}{dt} + V_s \quad (2.8)$$

$$i_L = I_{\min} + \frac{V_e - V_s}{L} t \quad (2.9)$$

A l'instant  $t = dT$ , le courant atteint sa valeur maximale dans l'inductance  $I_{\max}$ .

$$I_{\max} = I_{\min} + \frac{V_e - V_s}{L} dT \quad (2.10)$$

A la l'ouverture de K et à fermeture de D pendant l'intervalle  $[dT, T]$ , le circuit électrique devient alors, voire la figure 2.7 (b) :

$$L \frac{di_L}{dt} = -V_s \quad (2.11)$$

$$i_L = I_{\max} - \frac{V_s}{L} (t - dT) \quad (2.12)$$

A l'instant  $t = T$ , le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale  $I_{min}$  exprimé comme suit :

$$I_{min} = I_{max} - \frac{V_s}{L}(1-d)T \quad (2.13)$$

Avec  $\Delta i_L = I_{max} - I_{min}$  : montre l'ondulation du courant dans l'inductance.

L'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (2.10) et (2.13) donne la valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s$  :

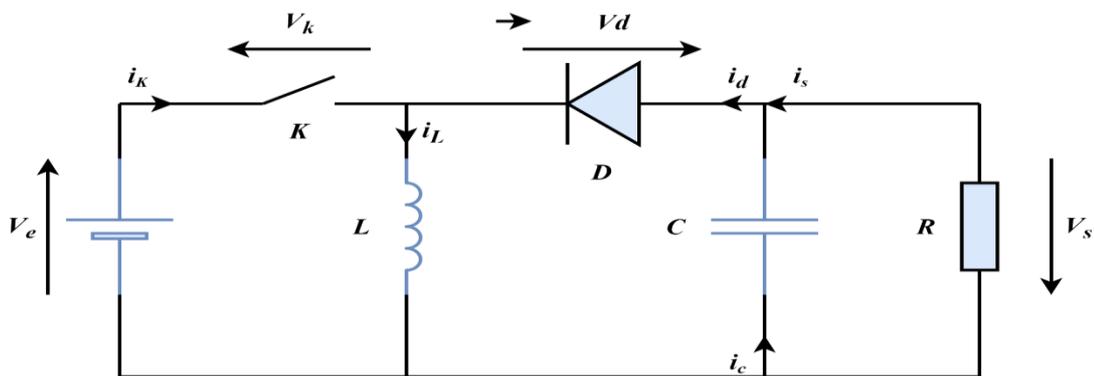
$$V_s = dV_e \quad (2.14)$$

Donc le convertisseur est abaisseur en tension.

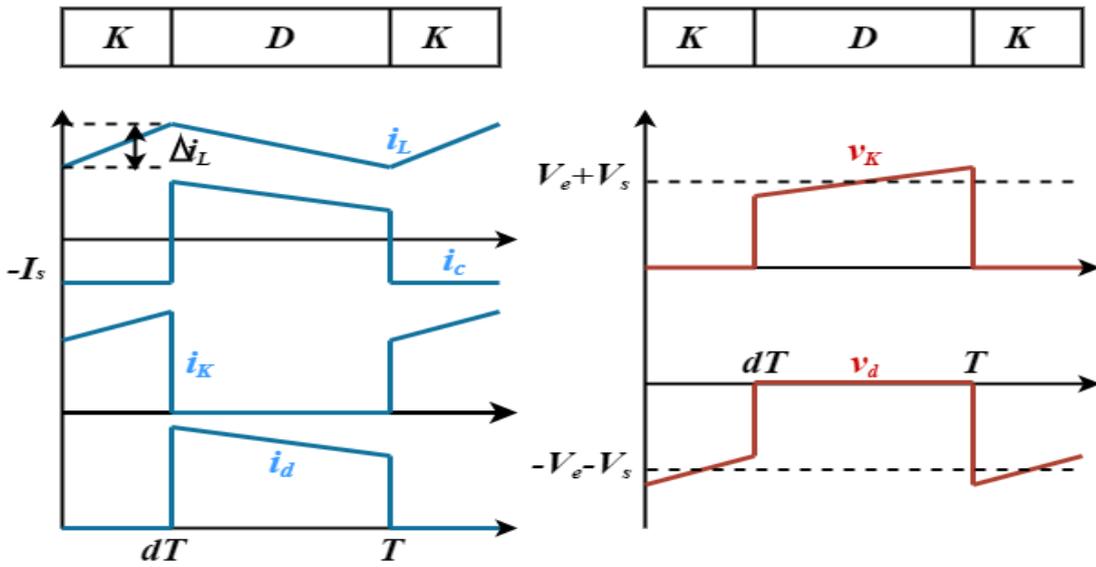
### 2.4.3 Modélisation d'un convertisseur buck-boost

Un convertisseur buck-boost contient une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse [34].

La figure 2.8 présente le principe de fonctionnement de ce convertisseur, et la figure 2.9 illustre les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes des courants (à gauche) et des tensions (à droite).

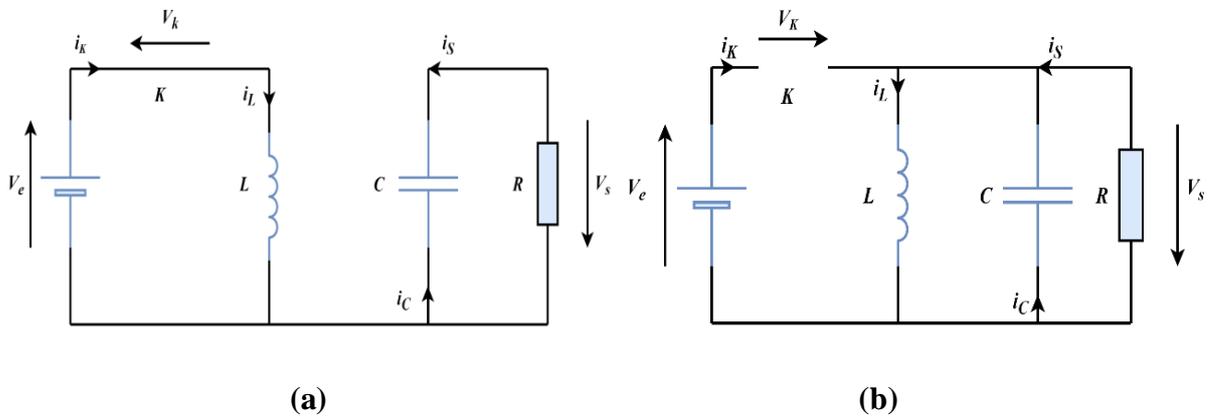


**Figure 2.8 :** Schéma de base d'un convertisseur buck-boost.



**Figure 2.9 :** Formes d’ondes des courants et tensions du convertisseur buck-boost.

A la fermeture de K et à l’ouverture de D pendant l’intervalle  $[0 dT]$ , le circuit électrique du convertisseur sera comme montré dans la figure 2.10 (a) :



**Figure 2.10 :** Circuits équivalents du convertisseur buck-boost.

On a les équations qui régissent le système comme suit :

$$V_e = L \frac{di_L}{dt} \tag{2.15}$$

$$i_L = I_{\min} + \frac{V_e}{L} t \tag{2.16}$$

A l'instant  $t = dT$ , le courant atteint sa valeur maximale dans l'inductance  $I_{max}$ .

D'où :

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} dT \quad (2.17)$$

A la l'ouverture de K et à fermeture de D pendant l'intervalle  $[dT \ T]$ , le circuit électrique devient figure 2.10 (b) :

On donne maintenant les nouvelles équations :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_s \quad (2.18)$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_s}{L} (t - dT) \quad (2.19)$$

A l'instant  $t = T$ , le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale  $I_{min}$  comme suit :

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_s}{L} (1 - d) T \quad (2.20)$$

Ainsi que l'ondulation du courant dans l'inductance est exprimée comme suit :

$$\Delta i_L = I_{max} - I_{min}$$

L'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (2.17) et (2.20) donne la valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s$  :

$$V_s = \frac{d}{1-d} V_e \quad (2.21)$$

La tension de sortie du convertisseur buck-boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur-inverseur en tension [35].

## 2.5 Dimensionnement du convertisseur boost

Afin de pouvoir dimensionner correctement les composants et notamment les semi-conducteurs, il est nécessaire de connaître les valeurs maximales (dans les conditions de fonctionnement les plus sévères) des tensions et des courants. L'interrupteur MOSFET (et donc

sa diode de corps) n'ont pratiquement aucune influence dans le fonctionnement fin du montage. A tel point que l'on peut remplacer cet interrupteur par un interrupteur idéal sans affecter les formes d'onde du montage [36].

### ❖ Hypothèses

Dans cette étude théorique, nous admettrons les hypothèses suivantes [37], [38], [39] :

- Tous les composants sont parfaits (à part ESR de condensateur).
- Le régime est supposé établi.
- Le mode de conduction est continu.
- Pour calculer le courant d'entrée, on considère que la tension à l'entrée est constante, et on néglige l'ondulation de la tension à la sortie vis à-vis de la valeur moyenne.
- Pour calculer la tension de sortie, on considère que le courant de sortie est constant, et on néglige l'ondulation du courant d'entrée vis à vis de la valeur moyenne.
- La capacité du condensateur de sortie sera supposée suffisamment grande pour que la tension à ses bornes puisse être considérée comme constante au cours de la période.

#### 2.5.1 Choix de L'inductance L

On peut écrire pour un courant d'ondulation maximale désiré  $\Delta i_{L(max)}$ :

$$L \geq \frac{dV_e}{\Delta i_L f} = \frac{V_e}{\Delta i_L f} \left(1 - \frac{V_e}{V_s}\right) = 0.129 \text{ mH} \quad (2.22)$$

Si  $L$  est inconnue on peut calculer  $\Delta i_L$  à partir de la relation suivante [40] :

$$\Delta i_L = (0.2 \text{ à } 0.4) i_{s(max)} \left(\frac{V_e}{V_s}\right) = 0.876 \text{ A} \quad (2.23)$$

- une valeur trop faible de  $\Delta i_L$  conduit à une valeur excessive de l'inductance  $L$ .
- une valeur trop élevée de  $\Delta i_L$  augmente la valeur maximale de courant que le commutateur K et la diode doivent supporter, le maximum correspond en outre au courant que K doit pouvoir interrompre.

### 2.5.2 Courant d'entrée moyen

Tous les éléments étant supposés parfaits, le rendement théorique de ce convertisseur est égal à 1. On peut donc écrire :

$$V_s \cdot i_s = V_e \cdot i_e \quad (2.24)$$

En utilisant l'équation 2.25, on trouve l'expression du courant d'entrée :

$$i_e = i_{L(moy)} = \frac{i_s}{1-d} = 0.438 \text{ A} \quad (2.25)$$

### 2.5.3 Resistance critique

Comme dans le cas précédent, le courant moyen dans la self augmente avec le courant de sortie. A la limite de la conduction continue le courant moyen dans  $L$  est  $\Delta i_L/2$  [41]. On a donc dans ce cas :

$$i_{L(moy)} = i_s \frac{V_s}{V_e} = \frac{i_s}{1-d} = \frac{\Delta i_L}{2} = 0.438 \text{ A} \quad (2.26)$$

En utilisant l'expression précédente de  $\Delta i_L$  et en écrivant  $i_s = V_s/R$  on obtient une valeur limite maximale de la résistance de charge :

$$R_{critique} \leq \frac{2 L f V_s}{V_e d (1-d)} = 62.555 \Omega \quad (2.27)$$

### 2.5.4 Choix de la diode

L'intégralité du courant transitant de la source vers la charge traverse la diode D. La valeur moyenne du courant dans la diode est donc égale au courant de sortie [43] :

$$i_{d(moy)} = i_s = 0.35 \text{ A} \quad (2.28)$$

On adoptera pour la valeur efficace du courant dans la diode la valeur approchée [42], [43]:

$$i_{d(\text{eff})} = i_e \sqrt{1-d} = \frac{i_s}{\sqrt{1-d}} = 0.391 \text{ A} \quad (2.29)$$

Durant la phase ( $0 < t < dT$ ), lorsque l'interrupteur K conduit, la diode est soumise à la tension de sortie  $V_s$  (Tension maximale aux bornes de la diode D) :

$$V_{d(\text{max})} = V_s = 21.9 \text{ V} \quad (2.30)$$

La diode présente dans le circuit boost est aussi génératrice de pertes. Elles peuvent être calculées de la façon suivante :

$$P_d = i_d V_d \quad (2.31)$$

### 2.5.5 Choix de MOSFET

Le courant crête  $i_{K(\text{max})}$  dans l'interrupteur K est atteint à  $t = dT$ . Il est exprimé par :

$$i_{K(\text{max})} = i_{L(\text{max})} = \frac{i_s}{1-d} + \frac{\Delta i_L}{2} = 0.899 \text{ A} \quad (2.32)$$

La valeur moyenne s'écrit :

$$i_{K(\text{moy})} = d i_e = \frac{d}{1-d} i_s = 0.088 \text{ A} \quad (2.33)$$

On démontre que la valeur efficace du courant dans le transistor s'écrit [42], [43] :

$$i_{K(\text{eff})} = i_e \sqrt{d \left[ 1 + \frac{1}{12} \left( \frac{\Delta i_L}{i_e} \right)^2 \right]} = 0.266 \text{ A} \quad (2.34)$$

### 2.5.6 Choix de capacité C

Durant la phase ( $0 < t < dT$ ), le condensateur fournit seul l'énergie à la charge. Le courant de sortie étant supposé constant, on peut calculer la charge fournie par le condensateur :

$$\Delta Q = i_s \cdot dT \quad (2.35)$$

Si l'on admet une ondulation  $\Delta V_s$  de la tension de sortie, on peut écrire :

$$\Delta Q = C \cdot \Delta V_s = 0.282 \cdot 10^{-6} Q \quad (2.36)$$

On en déduit la capacité du condensateur de sortie :

$$C \geq \frac{i_s \cdot d}{8 \Delta V_s f} = 0.094 \mu F \quad (2.37)$$

On démontre que la valeur efficace du courant dans le condensateur s'écrit [42], [43] :

$$i_{c(eff)} = i_s \sqrt{\frac{d + \frac{1}{12} \left( \frac{\Delta i_L}{i_s} \right)^2}{1-d}} = 0.333 A \quad (2.38)$$

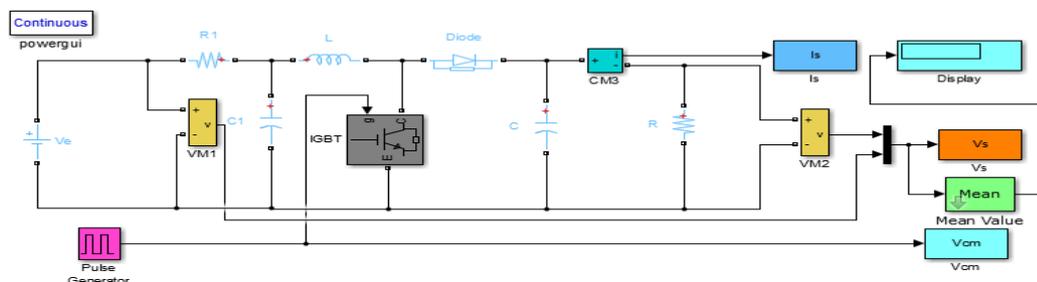
Dans la pratique, il faut également tenir compte de la résistance série équivalente ESR du condensateur.

$$\Delta V_s = ERS \left( \frac{i_{s(max)}}{1-d} + \frac{\Delta i_L}{2} \right) \quad (2.39)$$

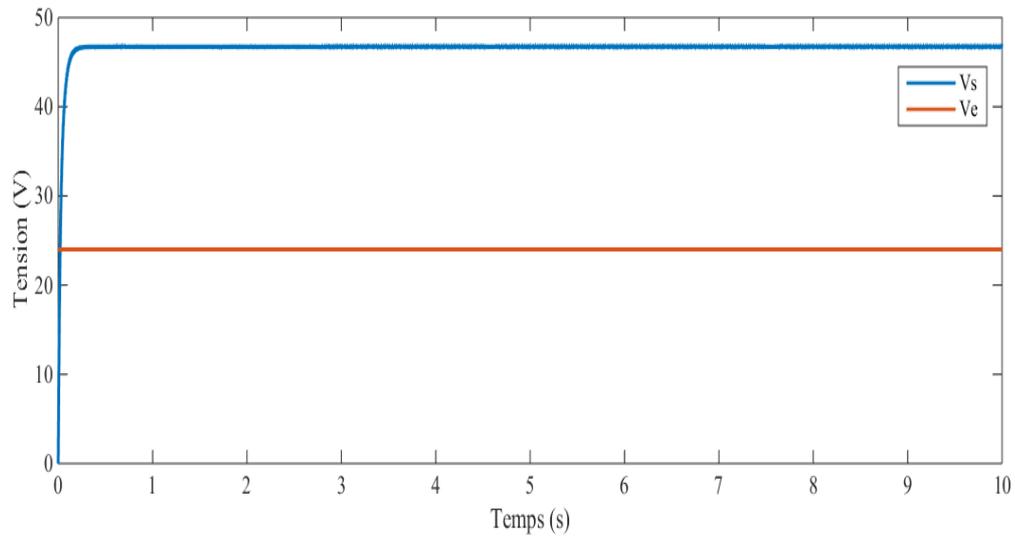
## 2.6 Simulation du convertisseur boost

Pour montrer le rôle des convertisseurs boost nous avons utilisé logiciel Matlab pour la simulation.

La figure 2.11 représente le schéma block d'un convertisseur boost :

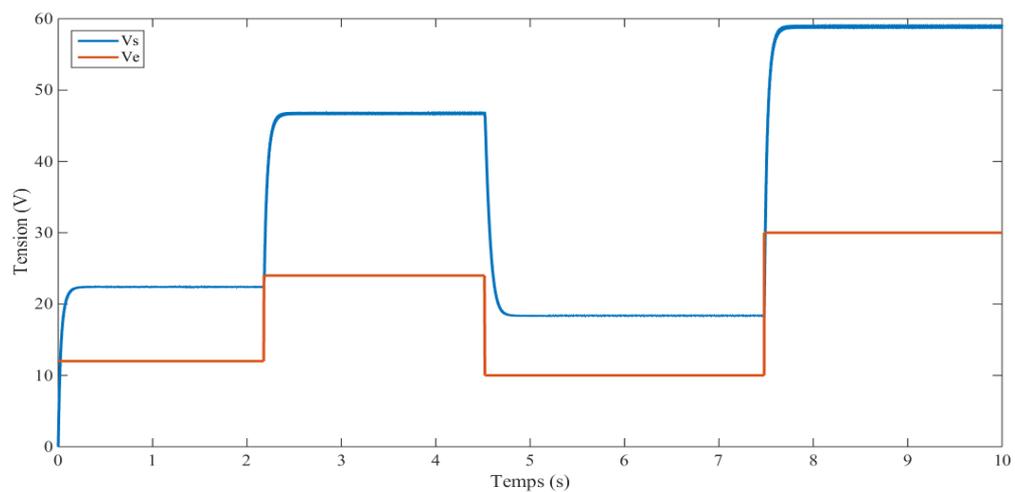


**Figure 2.11** : Schéma block d'un convertisseur boost.

**1<sup>er</sup> test ( $V_e = 24V$ ):****Figure 2.12 :** Tension de sortie et tension d'entrée du convertisseur boost.

Les résultats de simulation du convertisseur boost représentent par la figure 2.12. Cette figure représente les tensions d'entrée et sortie du convertisseur boost.

Donc les résultats du convertisseur boost effectué correctement sans rôle puisque la tension de sortie du convertisseur boost est supérieur à celle l'entrée.

**2<sup>ème</sup> test ( $V_e$  variable):****Figure 2.13 :** Tension de sortie et tension d'entrée variable du convertisseur boost.

Les résultats de simulation du convertisseur boost représentent par la figure 2.13. Cette figure représente les tensions d'entrée variable et sortie du convertisseur boost.

En changeant la valeur de la tension d'entrée à 12, 24, 10 et 30, on remarque que la tension de sortie est doublée par deux fois la tension d'entrée  $V_s = 2 \cdot V_e$ .

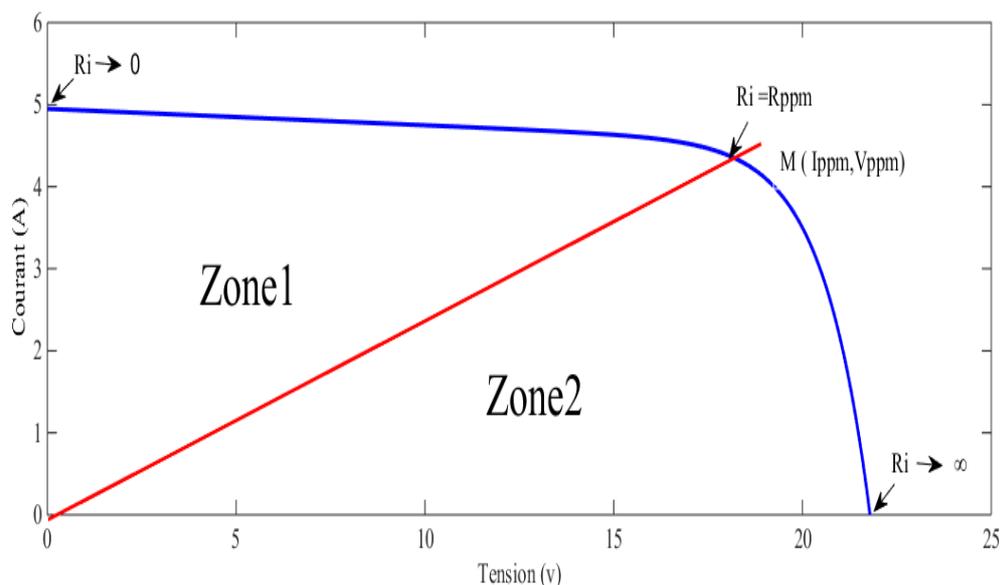
Nous concluons que le changement de la tension d'entrée n'affecte pas le principe de fonctionnement du convertisseur DC-DC.

### 2.7 Etage d'adaptation entre le générateur PV et la charge

Le convertisseur d'énergie photovoltaïque choisi est un hacheur de type survolteur ou dévolteur ou dévolteur-survolteur selon les applications de la charge. Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (Maximum Power Point Tracking) [37], [38].

Dans la (Figure 2.14), la zone (1) de la caractéristique courant-tension  $I-V$  est une zone de fonctionnement dans le mode « hacheur dévolteur » et l'MPPT est assurée pour toute résistance  $R_i$  comprise entre  $[0, R_{ppm}]$ . Ceci s'inverse pour la zone (2) de la caractéristique courant-tension  $I-V$  qui présente la zone de fonctionnement dans le mode « hacheur survolteur » ou le fonctionnement du MPPT est assuré pour toute résistance  $R_i$  comprise entre  $[R_{ppm}, \infty]$  [39].

Donc, un choix de convertisseur dévolteur ou survolteur pour une charge donnée est impératif et on peut utiliser l'un des deux types de convertisseur selon la configuration du circuit. S'il y a une possibilité de fluctuation de la tension demandée par la charge au-dessous est au-dessus de celle débité par la source, un Hacheur dévolteur/survolteur s'avère nécessaire. Dans cette partie on se limite au hacheur survolteur [42], [43].



**Figure 2.14** : Répartition de la caractéristique selon le fonctionnement du hacheur utilisé.

## 2.8 Technique de commande de l'MPPT

### 2.8.1 Définition

Les générateurs photovoltaïques ont une production électrique aléatoire directement dépendante des conditions météorologiques. Ainsi, le dimensionnement et l'exploitation optimale de l'énergie produite par ces générateurs exige l'utilisation de méthodes de gestion appropriées. De même, l'amélioration du rendement du système photovoltaïque nécessite la maximisation de la puissance du générateur PV qui permet d'établir la commande adéquate en vue de tirer le maximum de puissance de ces générateurs.

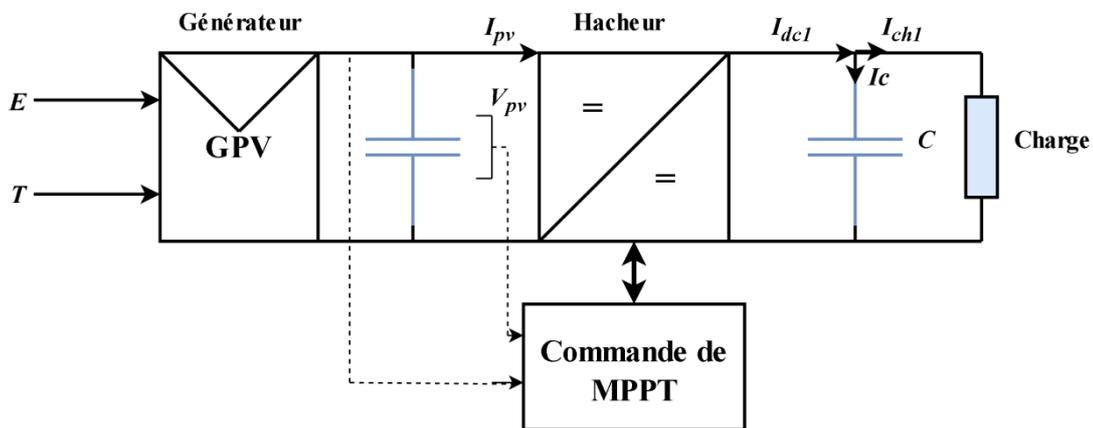
Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quelle que soit la tension de la batterie, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum [44].

### 2.8.2 Convertisseur pour la poursuite du point de puissance maximal (MPPT)

Pour la maximisation de puissance de la source PV, en intercalant un quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie DC-DC entre la source PV et la charge et avec le

contrôle rigoureux du rapport cyclique de ce dernier, Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le PPM du panneau PV et un suivi continu de la puissance maximale est assuré. Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95% [45].

La figure 2.15 représente le schéma synoptique du ce système PV.



**Figure 2.15 :** Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT.

On utilise le convertisseur de type DC/DC dans la partie Contrôle du système photovoltaïque car il est facile à contrôler par leurs rapports cycliques en utilisant un signal MLI. Ici, on utilise le hacheur Boost comme interface de puissance à contrôler par le régulateur MPPT, afin d'adapter la tension de sortie du hacheur à la tension requise par la charge [46].

Du fait non linéarité de la caractéristique  $I-V$ , le circuit MPPT oblige le système à fonctionner en permanence sur le point à puissance maximale du générateur, une fois l'éclairement ou la température change. Le hacheur capte alors la puissance électrique absorbée selon une période d'échantillonnage, et commence à incrémenter ou décrémente le rapport cyclique  $d$  pour annuler le gradient de la puissance  $P$  [47].

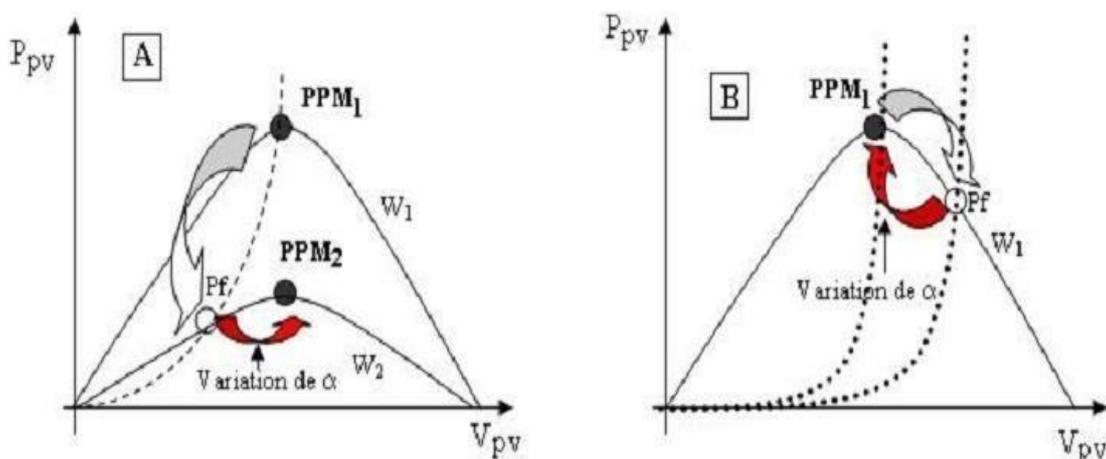
$$\frac{\delta_p}{\delta_d} = 0 \quad (2.52)$$

En effet, ces dispositifs permettent aujourd'hui d'adapter et d'optimiser la production photovoltaïque par le biais de convertisseurs de puissance DC-DC insérés entre les modules photovoltaïques et l'entrée de l'onduleur. Généralement, ces étages disposent de commandes de gestion électrique plus ou moins complexes permettant d'adapter la tension PV à la tension d'entrée de l'onduleur [48].

### 2.8.3 Le principe de fonctionnement du MPPT d'un générateur PV

La commande MPPT permet de chercher le point de fonctionnement optimal du module photovoltaïque dans les conditions météorologiques variables. Ceci est basé sur la variation automatique du rapport cyclique ( $d$ ) du signal qui commande le convertisseur d'énergie, à une valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du module [49].

Comme le montre la figure 2.16, pour une puissance incidente  $W_1$ , la puissance optimale transférée à la charge est obtenue pour un rapport cyclique  $d_{opt1}$  (point PPM1). Si la puissance incidente change  $W_2$ , alors ce point de puissance maximale est le point PPM2 et le point de fonctionnement du générateur PV est le point Pf (Figure 2.16 (a)). Pour converger vers le nouveau point PPM2, il faut ajuster le rapport cyclique  $d$  à la valeur  $d_{opt2}$ . Il en sera de même que lorsque la charge  $R_{ch}$  change (Figure 2.16 (b)) : Le point de puissance maximale dévie de sa position optimale (PPM1) ; pour converger vers ce PPM1, il faut agir sur le rapport cyclique ( $d$ ).

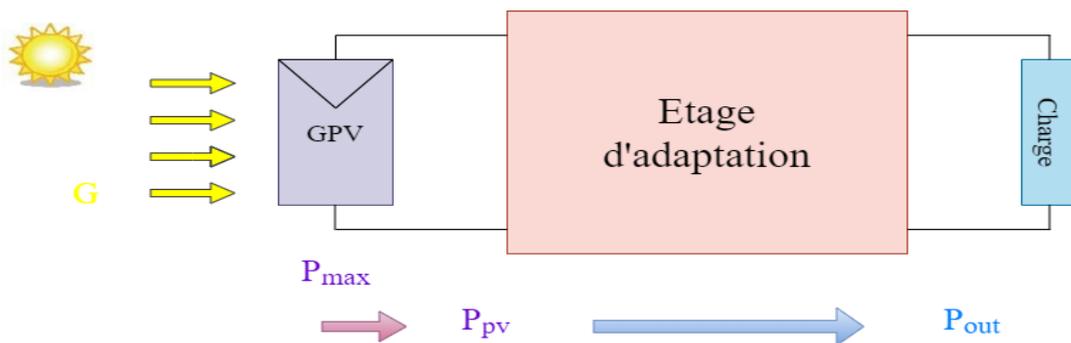


**Figure 2.16 :** Fluctuation du PMM avec : a) Variation de l'éclairement et b) Variation de la charge.

Pour sa voir l'efficacité de la technique du MPPT, on définit le rendement MPPT ( $\eta_{MPPT}$ ) comme suit :

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_e}{P_{max}} \quad (2.40)$$

Il donne le pourcentage (%) de pertes de puissance d'un module PV ( $P_e$ ), qui correspond à l'entrée de l'étage d'adaptation, par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire ( $P_{max}$ ) [50]. Pour transférer la puissance électrique produite, le mode de transfert utilisé peut présenter plus ou moins un taux de pertes lié à sa constitution. Nous définissons pour qualifier ces étages de conversion électrique-électrique et de transfert, le rendement de conversion d'un étage d'adaptation noté  $\eta_{conv}$  permettant d'évaluer les pertes liées à la conversion de puissance associée à l'étage d'adaptation.



**Figure 2.17:** Chaîne de conversion photovoltaïque.

Ce type de rendement dépend du temps et des conditions de fonctionnement. Il est nécessaire, pour obtenir une grande précision sur cette grandeur, d'effectuer les mesures de courant et de tension en entrée et en sortie de l'étage au même instant garantissant ainsi la connaissance précise du transfert de puissance effectué à un instant donné.

$$\eta_{conv} = \frac{P_{out}}{P_{PV}} \quad (2.41)$$

Le rendement global de la chaîne de conversion photovoltaïque, noté  $\eta_{total}$ , peut donc être défini comme le produit des trois rendements précédemment définis sur le même intervalle de temps.

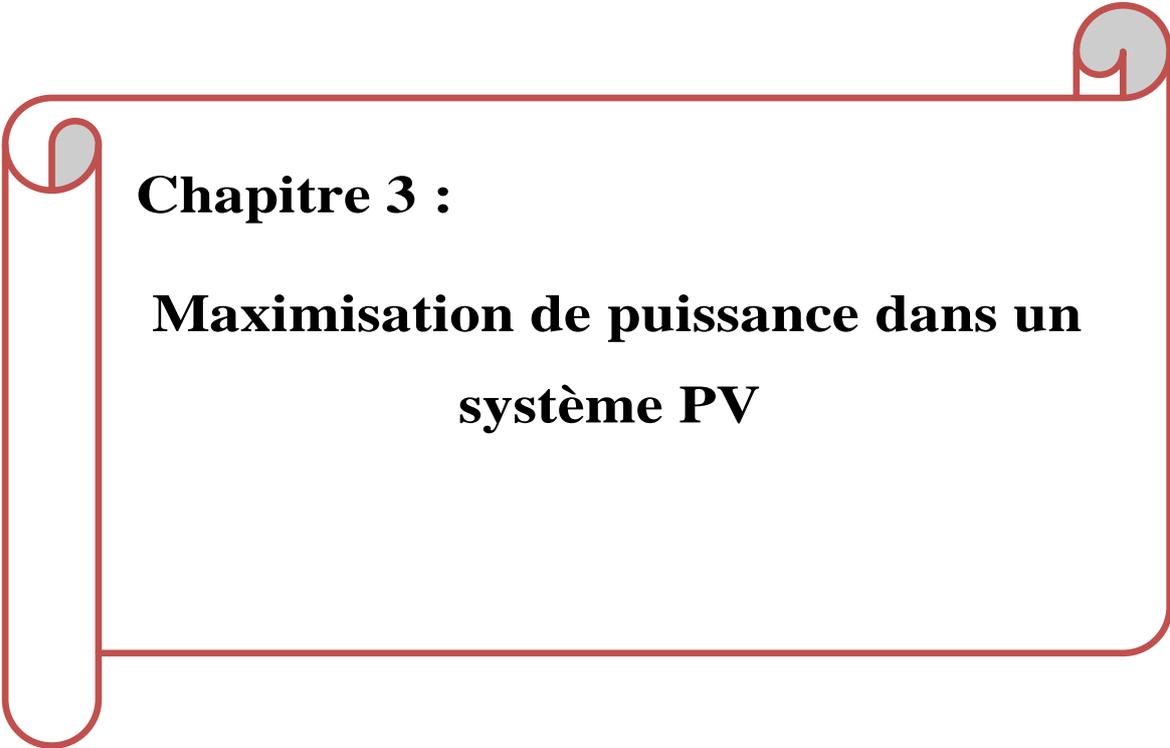
$$\eta_{tot} = \frac{P_{\max}}{G \cdot S} \cdot \frac{P_{PV}}{P_{\max}} \cdot \frac{P_{out}}{P_{PV}} \quad (2.42)$$

Ce rendement traduit la capacité de la totalité d'une chaîne PV à produire plus ou moins de l'énergie électrique. Cela permet également de comprendre la différence entre un rendement effectué en laboratoire sur des matériaux et des cellules PV sous température et irradiation contrôlées et le rendement réel des GPV installés fonctionnant en conditions réelles [50].

## 2.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes typologies des convertisseurs DC-DC (buck, boost, buck-boost) ainsi que la modélisation de chaque type. Ensuite, nous avons étudié le dimensionnement du convertisseur boost qui est utilisé dans le système PV afin de déterminer les valeurs de ses composants. Enfin, les problèmes de connexion entre le générateur PV et la charge et la nécessité d'un étage d'adaptation ont été évoqués.





**Chapitre 3 :**

**Maximisation de puissance dans un  
système PV**

### 3.1 Introduction

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les caractéristiques électriques  $I-V$  et  $P-V$  du générateur PV et sa nature non linéaire. Le générateur PV a un point de fonctionnement spécifique appelé le point de puissance maximale (PPM). Ce dernier est le point de fonctionnement optimal auquel le générateur PV fonctionne à sa puissance maximale. La position du PPM est variable dans le temps car l'énergie photovoltaïque dépend des conditions climatiques. Pour obtenir ce point, il est nécessaire d'utiliser une stratégie de commande appelée la poursuite du point de puissance maximale ou en anglais Maximum Power Point Tracking (MPPT).

Pour rechercher le point de fonctionnement optimal permettant l'extraction maximale de puissance d'un générateur photovoltaïque, plusieurs techniques MPPTs ont été développées qui diffèrent par la complexité, les capteurs requis, la vitesse de convergence, le coût, l'efficacité et matériel d'implémentation. De plus, chaque méthode peut mieux fonctionner dans certaines conditions que d'autres. Sous rayonnement stable, certaines techniques MPPTs donnent de meilleures performances, mais en cas de changement rapide, les résultats ne sont pas satisfaisants [51], [52].

Dans ce chapitre nous allons procéder au classement des techniques MPPTs en deux groupes: Technique traditionnelle qui comprend les technique à contre réaction de tension (la méthode basée sur la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et de la tension de référence externe (cellule expérimentale)) et les méthodes a contre réaction de courant (la méthode basée sur le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )) qui nécessite une connaissance préalable des caractéristiques du générateur PV, et les méthodes a contre réaction de puissance telles que les techniques de Perturbation et de Observation (P&O) et de Incrémentation de la Conductance (INC) sont les plus couramment utilisées dans les systèmes photovoltaïques commerciaux. Techniques intelligentes qui exploitent l'intelligence artificielle telles que les techniques basées sur les modèles flous.

### 3.2 Classification des méthodes MPPTs

Nous pouvons classer les techniques MPPTs comme suite :

#### 3.2.1 Les méthode MPPTs traditionnelles

Dans ce groupe on trouve les techniques suivantes :

##### 3.2.1.1 Méthodes a contre réaction de tension

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une

tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique afin d'annuler cette erreur. Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) on a trois types de méthodes :

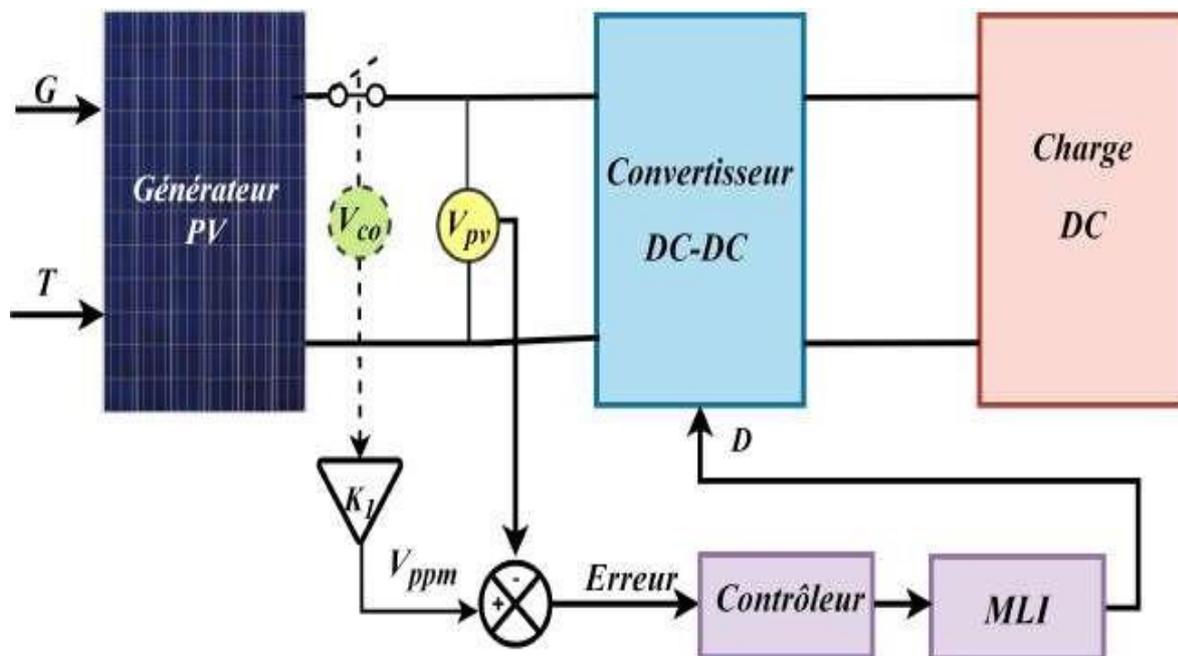
**a. Méthode basée sur la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )**

Cette méthode exploite la relation quasi linéaire entre la tension de fonctionnement en puissance maximale et la tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ ) du panneau. Cette tension est prélevée régulièrement pour ajuster la tension de référence précédente par une certaine proportionnalité ( $k$ ) généralement entre 0,73 à 0,80 pour les modules poly-cristallins (relation 3.1). Ainsi pour un ensoleillement et une température donnés la tension qui correspond à la puissance maximale du panneau est exprimée comme une fonction linéaire de la tension en circuit ouvert du panneau [53].

Par conséquent, cette technique a comme avantage sa simplicité et son coût bas [54].

La figure 3.1 illustre le principe de cette technique qui est basée sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et la tension du point de puissance maximale ( $V_{ppm}$ ) donnée par l'expression suivante :

$$V_{ppm} = k_1 \cdot V_{co} \quad (3.5)$$



**Figure 3.1** : Principe de la méthode basée sur  $V_{co}$  [6].

L'organigramme de cette méthode est donné par la figure 3.2.

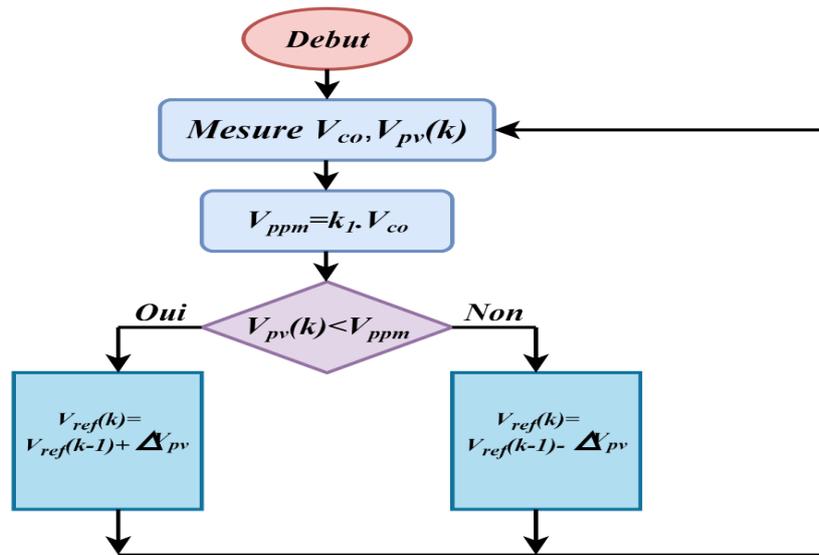


Figure 3.2 : Organigramme de l'algorithme basée sur  $V_{co}$ .

### b. Méthode basée sur une tension de référence externe (Cellule pilote)

La tension à circuit ouvert de cette cellule mesurée continuellement va nous donner une information implicite de la tension en circuit ouvert de l'ensemble des panneaux solaires, en multipliant cette tension avec le nombre de cellules en série. Cette méthode utilise un facteur fixe pour estimer la tension  $V_{ppm}$  à partir de la tension  $V_{co}$  ce qui va nous donner le PPM. Cette méthode évite l'interruption du système mais il est difficile de trouver un endroit idéal de la cellule pilote pour qu'elle donne une information parfaite de la tension  $V_{co}$  de l'ensemble pour différents ensoleillements et températures, elle utilise un facteur fixe pour estimer la tension  $V_{ppm}$  à partir de la tension  $V_{co}$  comme la méthode précédente.

Le principe de cette technique est donné par la figure 3.3.

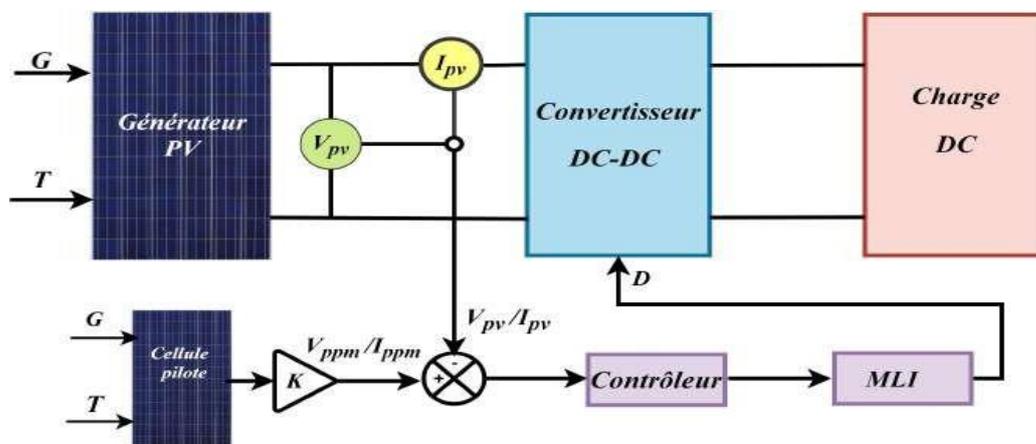


Figure 3.3 : Principe de la méthode basée sur une cellule pilote [6].

### 3.2.1.2 Méthodes a contre réaction de courant

Le courant de court-circuit du panneau solaire permet de déterminer la valeur du courant optimal pour extraire le maximum de puissance. Le courant optimal est promotionnel au courant de court-circuit, cette proportionnalité est presque constante en fonction des conditions d'ensoleillement et de température.

Dans cette méthode l'utilisation d'une cellule pilote comme source d'information de courant de court-circuit de l'ensemble des panneaux est impossible par le fait que court-circuiter en permanence cette cellule cause un échauffement supplémentaire qui va fausser l'information générée par cette cellule et provoquer sa destruction rapide [55].

Le principe de cette technique est donné par la figure 3.4.

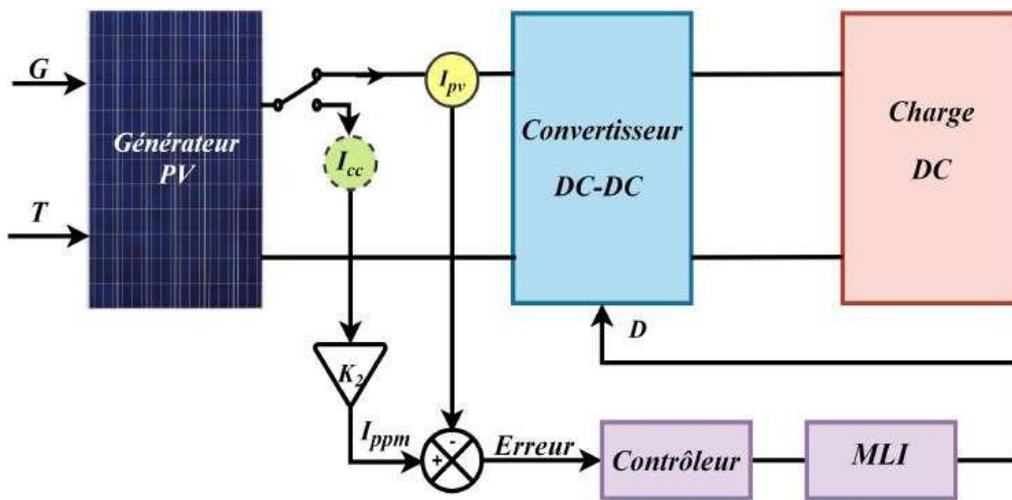


Figure 3.4 : Principe de la méthode basée sur  $I_{cc}$  [6].

L'organigramme de cette méthode est donné par la figure 3.5.

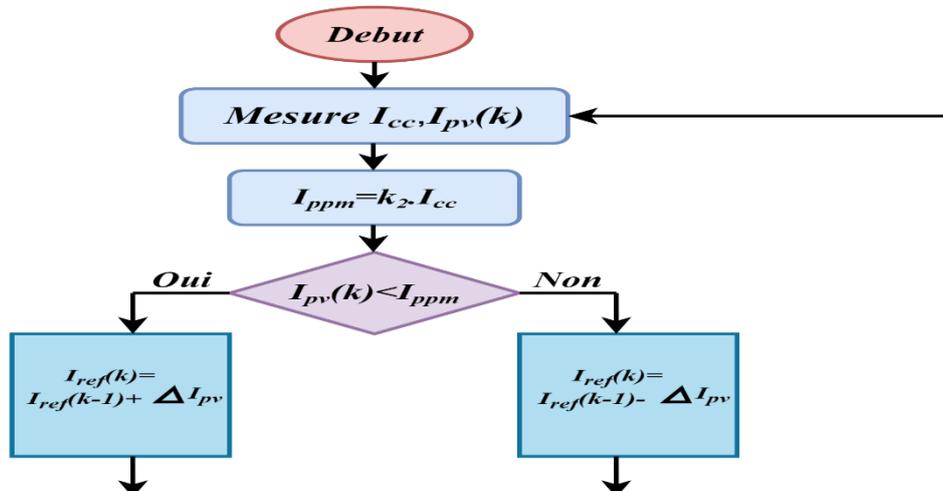


Figure 3.5 : Organigramme de l'algorithme basée sur  $I_{cc}$ .

### 3.2.1.3 Méthodes a contre réaction de puissance

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les panneaux solaires. La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures de courant  $I_{pv}$  et de tension  $V_{pv}$  du panneau :

$$P_{pv} = I_{pv} \cdot V_{pv} \quad (3.6)$$

Le sens de variation de la puissance  $P_{pv}$  est connu par l'équation (3.7) sur un temps d'échantillonnage qui représente la vitesse d'exécution du microprocesseur ou du microcontrôleur :

$$dP_{pv} = \Delta P_{pv}(k) = P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1) \quad (3.7)$$

#### a. La méthode Perturbe & Observe (P&O)

C'est une méthode largement utilisée [56], [57], elle a une structure simple, facile à implémenter et donne des résultats intéressants. Son principe est basé sur la perturbation du point de fonctionnement (en augmentant ou diminuant la tension de fonctionnement) et l'observation de son effet sur la puissance ( $P_{pv}$ ). Si la puissance augmente ( $\Delta P_{pv} > 0$ ), on est donc dans le bon sens, on continue la perturbation dans le même sens sinon ( $\Delta P_{pv} < 0$ ), donc on s'éloigne du PPM, on inverse la perturbation. La figure 3.6 illustre son principe de fonctionnement.

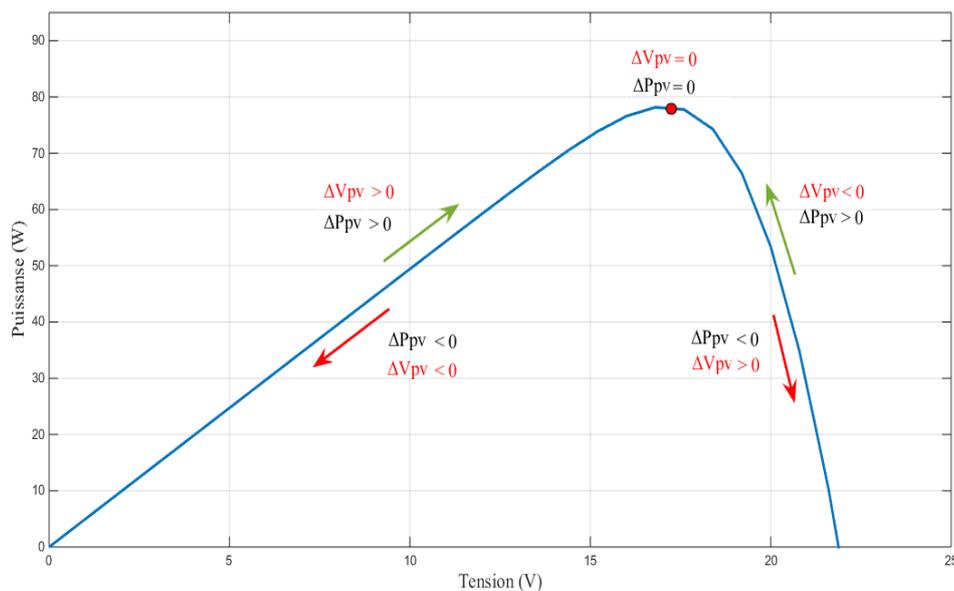


Figure 3.6 : Principe de la méthode P&O.

L'organigramme de cette méthode est donné par la figure 3.7. On récupère le courant et la tension PV puis on calcule la nouvelle puissance  $P_{pv}(t)$  et la variation de la tension ( $\Delta V_{pv}$ ), si la puissance a augmenté ( $\Delta P_{pv} > 0$ ) on est donc dans le bon sens, on continue ainsi d'augmenter  $V_{pv}$  (si  $\Delta V_{pv} > 0$ ) ou on continue de la diminuer (si  $\Delta V_{pv} < 0$ ), sinon ( $\Delta P_{pv} < 0$ ) il faut inverser (augmenter  $V_{pv}$  si  $\Delta V_{pv} < 0$  et diminuer si  $\Delta V_{pv} > 0$ ).

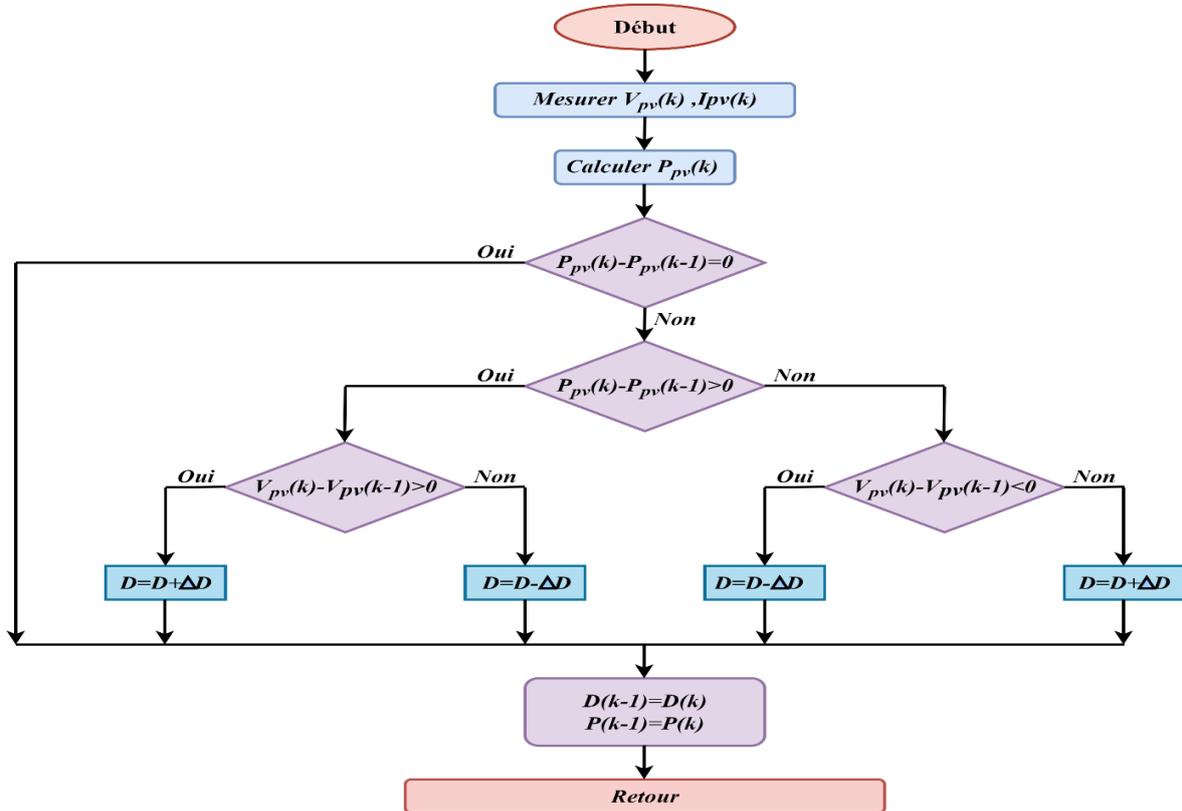
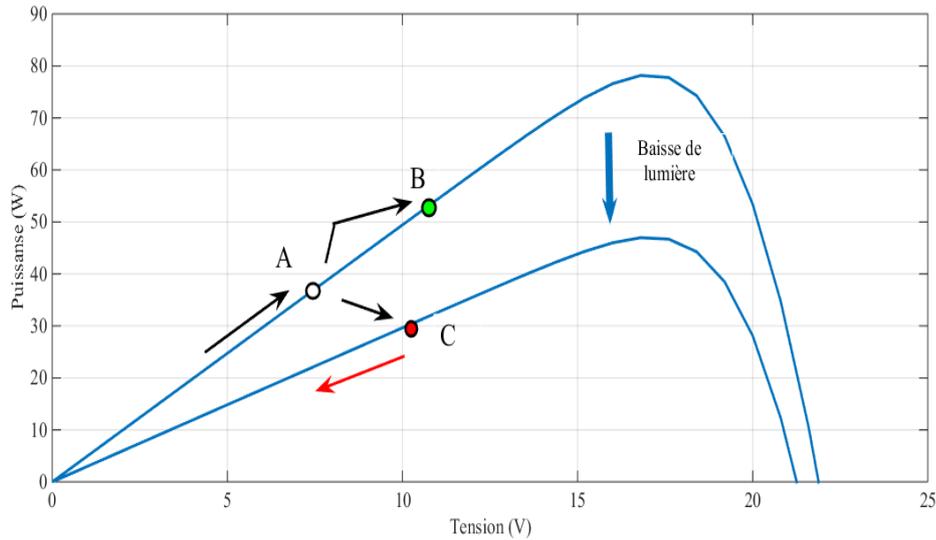


Figure 3.7 : Organigramme de la méthode P&O.

Cette méthode présente un inconvénient lors d'un changement rapide de lumière, dans ce cas la puissance du point de recherche sera perturbée par l'ensoleillement et non pas par la perturbation de l'algorithme. Cela peut amener l'algorithme à diverger, par conséquent prendre du temps pour revenir dans le bon sens et plus de temps pour atteindre le PPM.

La figure 3.8 illustre ce problème. Supposons qu'on est au point A en allant vers la droite dans le bon sens de recherche ( $\Delta V_{pv} > 0$ ), si l'on suppose que l'ensoleillement ne change pas (ou change lentement) la prochaine puissance mesurée au point B est supérieure ( $\Delta P_{pv} > 0$ ) donc on augmente  $V_{pv}$  ce qui nous rapproche du PPM. Mais si un changement brusque de lumière (diminution dans notre exemple) se produit on passe au point C et la puissance dans ce cas est plus faible ( $\Delta V_{pv} > 0$  et  $\Delta P_{pv} < 0$ ) donc la tension sera diminuée et par conséquent on s'éloigne du PPM.



**Figure 3.8 :** Changement rapide de température dans le cas de la MPPT avec P&O.

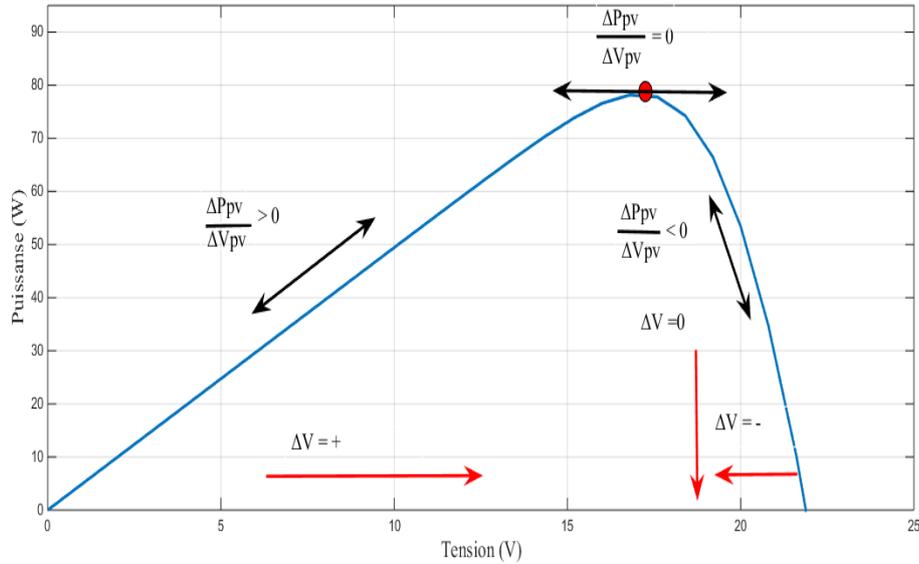
Le problème dans ce cas est qu'on surveille la variation de la puissance dans la courbe  $P-V$  pour savoir si l'on est à gauche ou à droite du PPM, ce problème est réglé avec la méthode la Conductance Incrémentale « Incremental Conductance » (INC) et ceci par la surveillance de la pente de cette courbe (prendre en compte la variation du courant) ce qui donne réellement la position du point de recherche par rapport au PPM. On remarque que même avec un changement brusque de lumière la pente de la courbe reste du même signe ce qui garde la recherche dans la même direction, cette méthode sera détaillée au paragraphe suivant.

Un autre problème avec cette méthode est le « pas » de perturbation de la tension, si le pas est grand la méthode sera plus rapide mais cela engendre de grandes oscillations de la puissance surtout autour du PPM, plusieurs travaux ont été consacrés pour remédier à ce problème. Femia et al. [58] ont proposé un pas variable (dynamique) qui augmente dans les jours les plus ensoleillés et diminue lors du faible ensoleillement ; D'Souza et al. [59] ont utilisé la Logique Floue « Fuzzy logic » (FL) pour optimiser le pas de perturbation alors que Sahnoun et al. [60] ont utilisé la méthode des Réseaux de Neurones Artificielles (ANN).

Un autre problème avec cette méthode est la convergence vers un optimum local (qui n'est pas le PPM) et ceci se produit dans le cas d'un ombrage partiel, pour éviter la convergence de la P&O vers un optimum local une combinaison de la méthode P&O avec la méthode d'Optimisation par Essaims Particulaires (PSO) est proposée par Lian et al. [61], alors que El-Helw et al. [62] ont utilisé une combinaison de P&O avec Réseaux de Neurones Artificielles (ANN).

### b. Méthode de la Conductance Incrémentale

C'est aussi une méthode facile à implémenter et largement utilisée [63], [64], elle vient remédier au problème de la divergence de la P&O dans le cas d'un changement rapide de l'ensoleillement, elle est basée sur la détermination du signe de la dérivée de la puissance (la pente) qui n'est pas influence par de l'ensoleillement (Figure 3.9).



**Figure 3.9 :** Principe de la MPPT avec la méthode INC.

La variation de la puissance en fonction de la tension est donnée par :

$$\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}} = \frac{\Delta (I_{pv} \cdot V_{pv})}{\Delta V_{pv}} = I_{pv} \cdot \frac{\Delta V_{pv}}{\Delta V_{pv}} + V_{pv} \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad (3.8)$$

Donc :

$$\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad (3.9)$$

Au point de puissance maximale la dérivée de la puissance s'annule ( $\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}} = 0$ ), ce qui

donne :

$$\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (3.10)$$

On peut remarquer que la vérification du signe de la pente revient à comparer la conductance ( $\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ ) et son incrément ( $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}}$ ) :

$$\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}} > 0 \Rightarrow \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \rightarrow \text{\`a gauche du PPM (pente positive)} \rightarrow \text{augmenter } V_{pv} \quad (3.11)$$

$$\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}} < 0 \Rightarrow \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \rightarrow \text{\`a droite du PPM} \rightarrow \text{diminuer } V_{pv} \quad (3.12)$$

$$\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}} = 0 \Rightarrow \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \rightarrow \text{au voisinage PPM} \quad (3.13)$$

Ceci est traduit par l'organigramme donnée par la figure 3.10, le dernier cas est théorique car pratiquement on n'obtient pas la valeur 0 ce qui laisse la méthode osciller autour du PPM, l'amplitude de ces oscillations peut diminuer si le pas d'augmentation (ou diminution) de la tension est très petit mais ceci rend la recherche du PPM plus lente. Beaucoup de travaux ont été consacrés à utiliser un pas variable de perturbation de la tension pour diminuer des oscillations de la puissance au voisinage du PPM [65], [66].

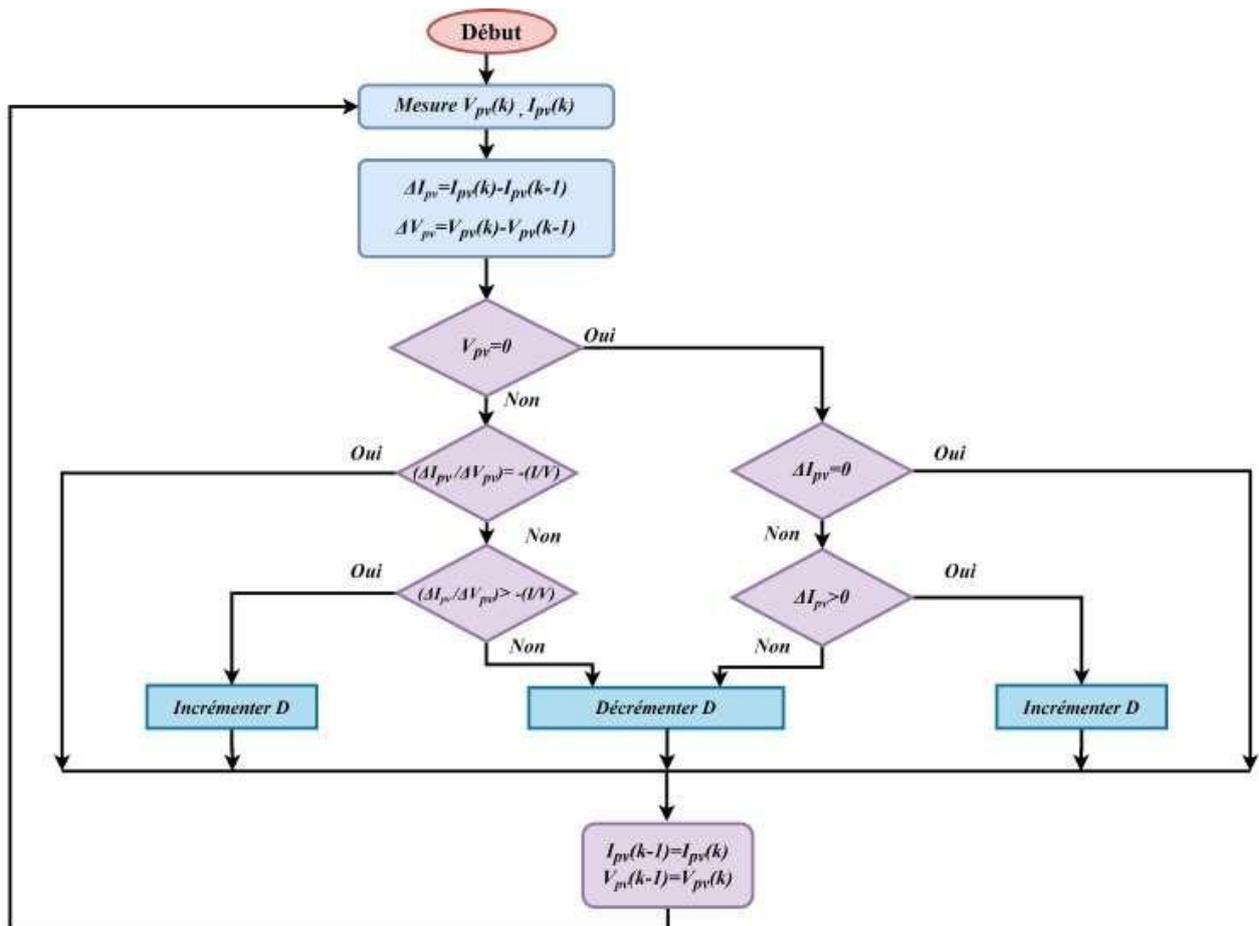


Figure 3.10 : Organigramme de la méthode INC.

Cette méthode continue de poursuivre le PPM dans le bon sens même sous une variation rapide de l'ensoleillement mais le problème est toujours l'oscillation de la puissance autour du PPM, en plus cette méthode peut converger vers un optimum local ( $\Delta P_{pv} / \Delta V_{pv} = 0$ ) dans le cas d'un ombrage partiel, Liu et al. [67] ont proposé une combinaison de la méthode INC et PSO pour la poursuite du PPM global.

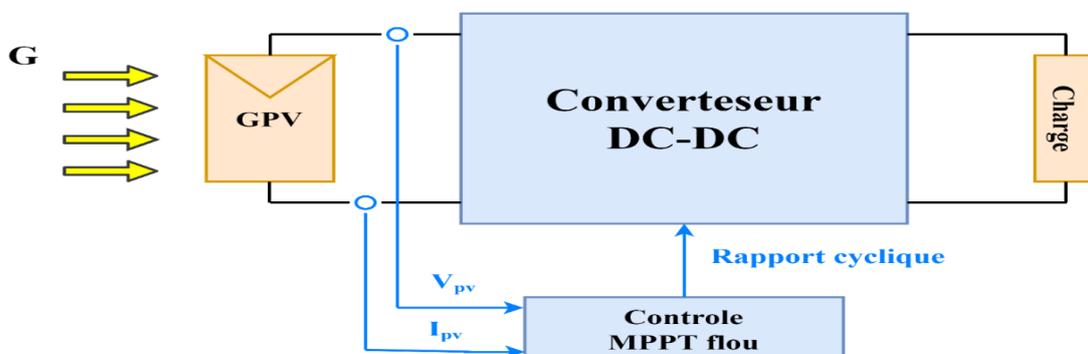
### 3.2.2 Les méthodes MPPTs intelligentes

Récemment, les méthodes intelligentes basées sur l'exploitation de l'intelligence artificielle sont utilisées pour développer de nouveaux algorithmes MPPTs. Parmi ces algorithmes on peut citer : les techniques basées sur les réseaux de neurones (RNN) [68], les techniques basées sur la logique floue (FL) [69], [70], les techniques basées sur le neurone-flou [71], les techniques basées sur les algorithmes génétiques (GA) [72] et les techniques basées sur l'optimisation par essais particulaires (PSO) [73].

Ces dernières années, la commande par logique floue a été largement utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale [74], [75]. Cette théorie est tout à fait adaptée au problème d'optimisation traité dans ce travail. En revanche, elle nécessite une connaissance parfaite du système par l'opérateur pour l'établissement des règles d'inférences [76], [77]. L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et ne nécessite pas de modèle mathématique de grande précision. Dans le cadre de la commande des systèmes PV par la logique floue, on présente, ci-après, les techniques MPPTs basées sur les modèles floue de type Mamdani.

#### 3.2.2.1 La commande MPPT flou

Dans un but de poursuivre le point maximum de puissance, comme pour toutes les méthodes de poursuite MPPTs, le contrôleur MPPT à base de logique floue fonctionne aussi suivant le même principe. Un convertisseur DC/DC (continu-continu) est généralement utilisé entre le générateur photovoltaïque et la charge (Figure 3.11).



**Figure 3.11** : Schéma synoptique d'un système PV avec une commande MPPT flou.

Comme tous contrôleurs flous, le contrôleur MPPT flou comporte les trois blocs suivants :

### a. Fuzzification

La fuzzification permet de transformer les variables réelles en variables floues. La tension ( $V_{pv}$ ) et le courant ( $I_{pv}$ ) du générateur PV peuvent être mesurés en continu et la puissance peut être calculée ( $P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv}$ ). Dans notre cas, on a deux variables d'entrée qui sont : l'erreur ( $e$ ) et la variation de l'erreur ( $\Delta e$ ). À un instant d'échantillonnage  $k$ , ces variables sont exprimées comme suit [78] :

$$e(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (3.14)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (3.15)$$

Où  $P_{pv}(k)$  et  $V_{pv}(k)$  sont respectivement la puissance et la tension du générateur PV.

### b. Moteur d'inférence flou

L'inférence (le raisonnement) est une étape qui consiste à définir un rapport logique liant les entrées et la sortie. En effet, les systèmes basés sur la commande floue utilisent des règles de type : SI-ALORS [79].

Dans le cas général du système ou de type Mamdani, la  $i^{\text{ème}}$  règle floue ( $R_i$ ), reliant les deux entrées floues (antécédentes)  $x_1$  et  $x_2$  par la sortie floue  $x_3$ , est définie par la relation suivante :

$$(R_i) : \{ \text{Si } e \text{ est } x_1 \} \text{ et } \{ \Delta e \text{ est } x_2 \} \text{ alors } \{ \Delta D \text{ est } x_3 \} \quad (3.16)$$

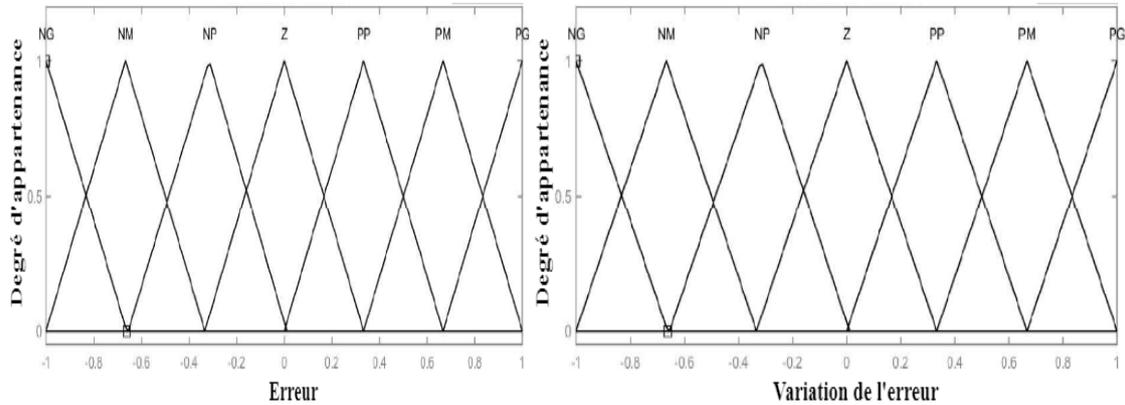
Où  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$  sont des termes linguistiques associés aux entrées et aux variables de sortie ( $e$ ,  $\Delta e$  et  $\Delta D$ ). Dans ce cas, la synthèse du contrôleur flou est assurée par le système d'inférence récapitulé dans le tableau 3.1 :

$e/\Delta e$	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NM	NM	NP	Z
NM	NG	NM	NM	NP	NP	Z	PP
NP	NG	NM	NP	NP	Z	PP	PM
Z	NM	NP	NP	Z	PP	PP	PM
PP	NM	NP	Z	PP	PP	PM	PG
NM	NP	Z	PP	PP	PM	PM	PG
PG	Z	PP	PM	PM	PG	PG	PG

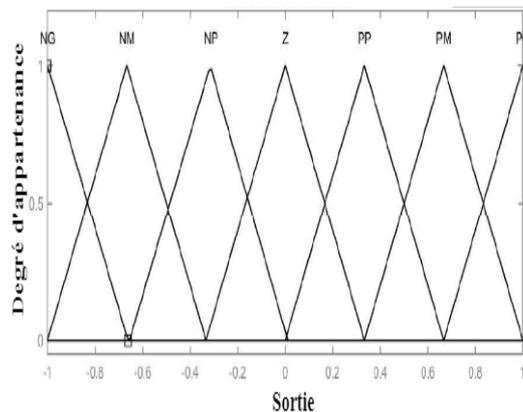
**Tableau 3.1 :** Base de règles du contrôleur flou.

Avec NG : Négatif Grand, NM : Négatif Moyen, NP : Négatif Proche, Z : Zéro, PP : Positif Proche, PM : Positif Moyen et PG : Positif Grand.

Les figures 3.12 et 3.13 montrent les fonctions d'appartenance des sept sous-ensembles flous pour les variables d'entrée et de sortie. Toutes ces fonctions sont de forme triangulaire afin de simplifier le traitement informatique.



**Figure 3.12 :** Fonctions d'appartenances de l'erreur et de la variation de l'erreur.



**Figure 3.13 :** Fonctions d'appartenances de la sortie.

### c. Défuzzification

Le convertisseur DC-DC nécessite un signal de commande  $D$  précis à son entrée. Il est nécessaire de transformer cette information floue en une information numérique réelle, cette transformation est appelée défuzzification. Les méthodes les plus utilisées pour la défuzzification sont : la moyenne des maxima (MOM), la méthode du critère maximal (MCM) et la méthode de centre de gravité (MCG) [80], [81]. Dans ce travail, la défuzzification est effectuée par l'utilisation de cette dernière pour déterminer la sortie du contrôleur ou  $(\Delta D)$ , qui peut être exprimée comme suit :

$$\Delta D(k) = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j(k)) \cdot \Delta D_j(k)}{\sum_{j=1}^n \mu(\Delta D_j(k))} \quad (3.17)$$

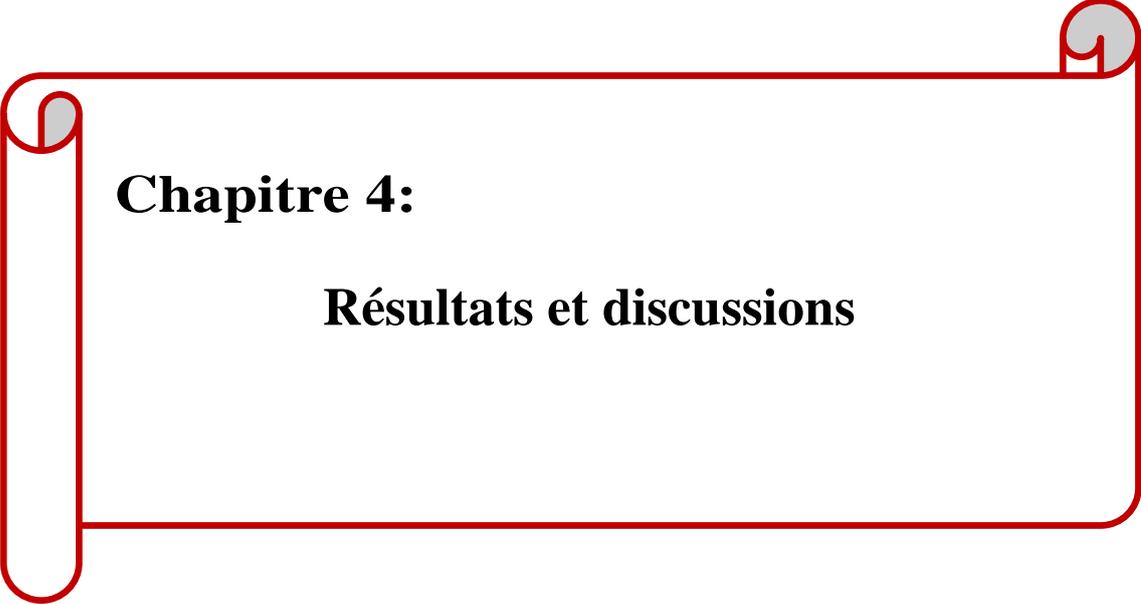
Avec  $\mu D_j$  est le degré d'activation de la  $j^{\text{ème}}$  règle.

La sortie du contrôleur ou le changement du rapport cyclique  $\Delta D(k)$ , qui est converti en rapport cyclique  $D$  par l'équation suivante :

$$D(k) = D(k-1) + K_u \Delta D(k) \quad (3.18)$$

### 3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les techniques de commande MPPTs. Cinq méthodes traditionnelles ont été présentées, à savoir : méthode basée sur la tension de circuit ouvert, méthode basée sur le courant de court-circuit, méthode basée sur la tension de référence externe (Cellule pilote), méthode Perturbe & Observe (P&O) et méthode de la Conductance Incrémentale. Parmi les méthodes intelligentes nous avons présentées la méthode basée sur la logique floue. Ces techniques forcent le générateur PV à produire en permanence le maximum de sa puissance, et cela grâce à l'insertion d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un algorithme traqueur du point de puissance maximale (MPPT). Nous présenterons les résultats des simulations dans le chapitre suivant.



## **Chapitre 4:**

### **Résultats et discussions**

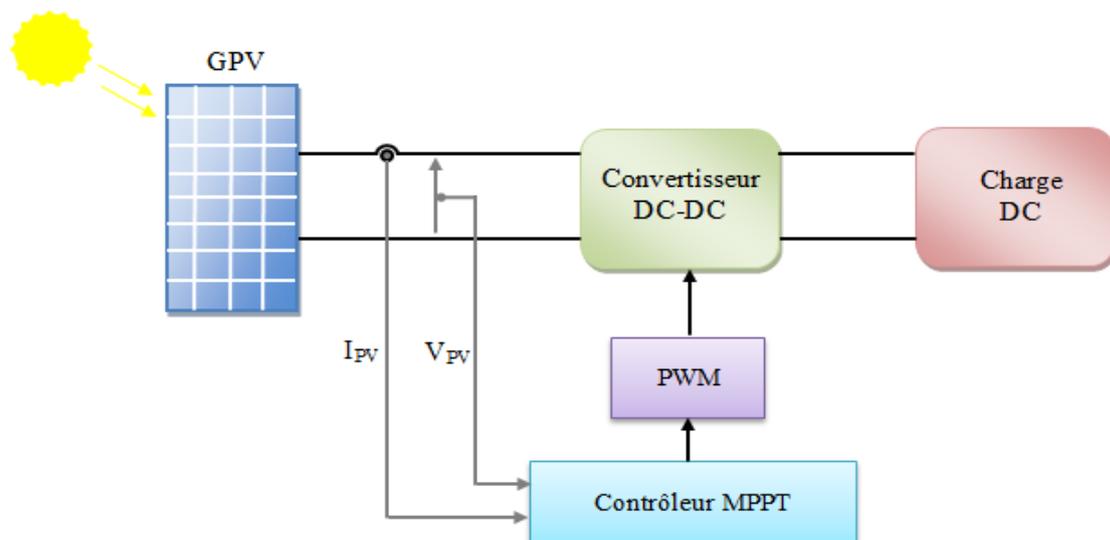
#### 4.1 Introduction

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées. La procédure de simulation lie les deux principales parties de la conception d'un système (théorique et pratique). Vu que des changements dans la conception peuvent facilement être faits à l'étape de la simulation.

Dans ce chapitre nous allons valider les concepts théoriques, d'évaluer les diverses techniques MPPT présentées au chapitre 3 et d'analyser leur comportement sous les mêmes conditions de fonctionnement. Nous effectuons également une étude comparative entre les différentes méthodes MPPT étudiées pour déterminer la technique la plus performante pour un système PV.

#### 4.2 Description du système photovoltaïque étudié

La figure 4.1 donne le schéma synoptique de notre system photovoltaïque étudié. Ce dernier est composé d'un générateur PV, une charge résistive, un convertisseur boost contrôlé par un étage MPPT.



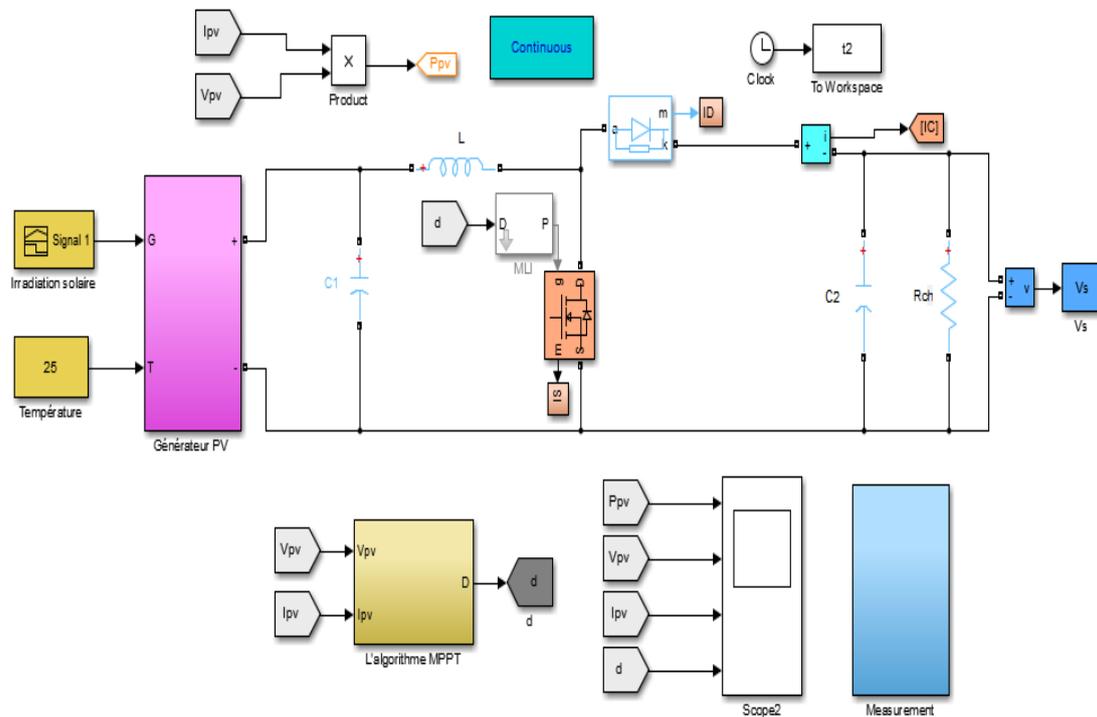
**Figure 4.1 :** Schéma fonctionnel du système PV.

- Dans cette étude, un panneau photovoltaïque de type SUNTECH STPO80S-12/Bb a été choisi. Il est constitué de 36 cellules PV et délivré, dans les conditions standards, une puissance de 80W. Ce panneau a été étudié et validé dans le chapitre 1.
- le dimensionnement du convertisseur boost ainsi que les tests de simulation ont été présentés dans les chapitres 2.

### 4.3 Résultats de Simulation

Dans cette partie nous allons tester les méthodes étudiés dans le chapitre 3.

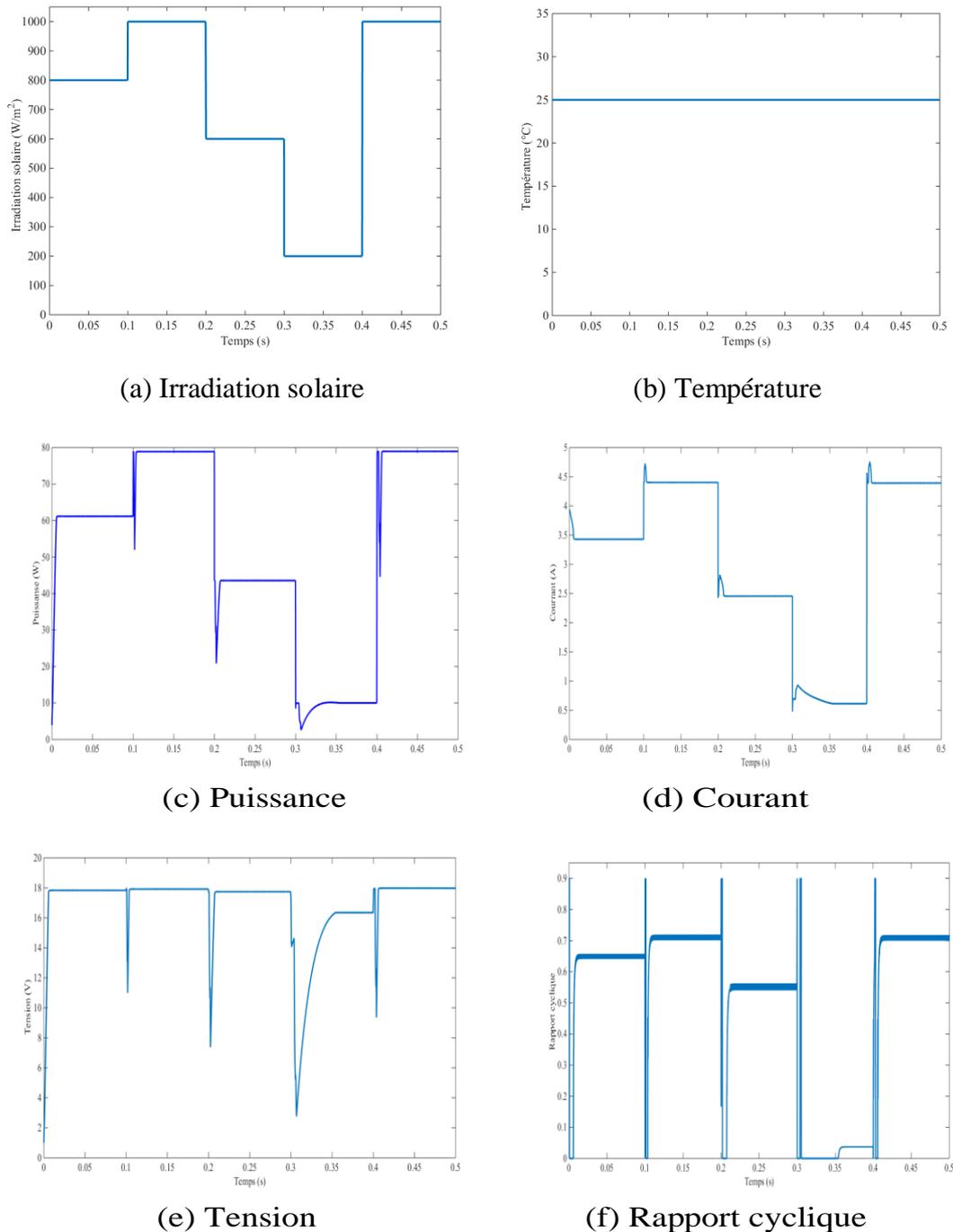
Le modèle Simulink du système PV commandé par un algorithme MPPT est montré dans la figure 4.2.



**Figure 4.2 :** Modèle Simulink du système PV commandé par l'algorithme MPPT.

#### 4.3.1 Méthode basée sur la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )

Les profils d'irradiation solaire et de température sont indiqués sur les figures 4.3(a) et 4.3(b), tandis que les réponses de la puissance, le courant, la tension et le rapport cyclique sont présentés, respectivement, sur les figures 4.3(c) ,4.3(d), 4.3(e) et 4.3(f).



**Figure 4.3 :** Résultats de simulation de l'algorithme  $V_{co}$ .

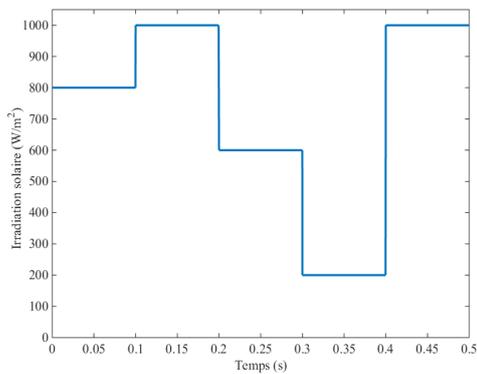
A travers les résultats de simulation, on constate que le problème avec cette méthode réside dans la perte de puissance disponible lorsque la charge est déconnectée du générateur PV.

Aussi, la constante  $k_1$  n'est pas toujours entre 71% et 78% de la tension  $V_{co}$ . Pour pallier à ce problème, des cellules pilotes sont utilisées pour obtenir la tension  $V_{co}$ . Ces cellules doivent être choisies avec précision, afin de représenter le plus fidèlement possible les caractéristiques du générateur PV.

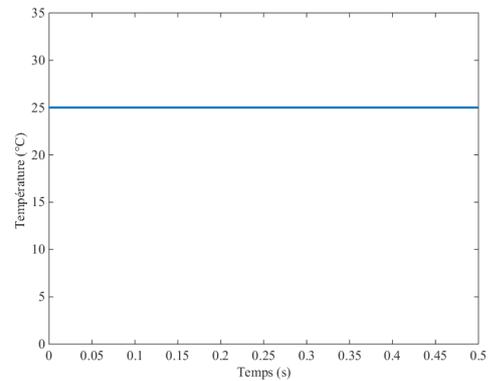
### 4.3.2 Méthode basé sur le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

On conserve les mêmes profils d'irradiation et de température comme indiqué sur les figures 4.4(a) et 4.4(b).

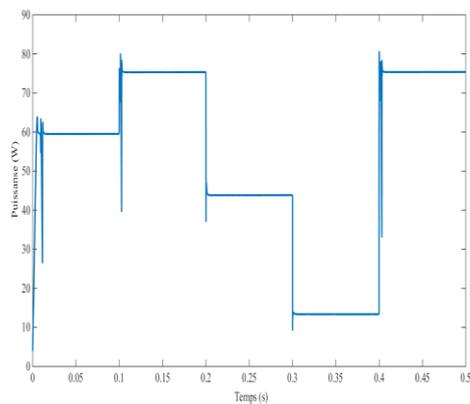
Les figures 4.4(c), 4.4(d), 4.4(e) et 4.4(f) et représentent, respectivement, les réponses de la puissance, le courant, la tension et le rapport cyclique.



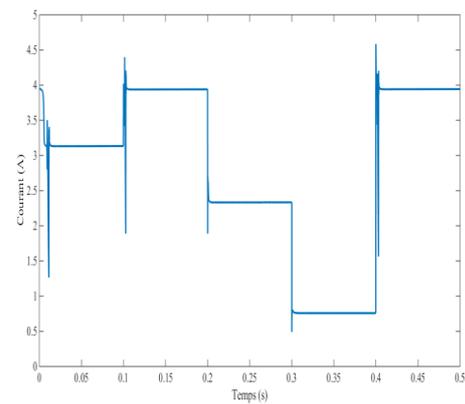
(a) Irradiation solaire



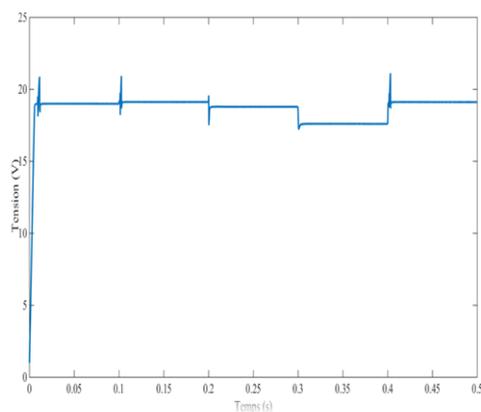
(b) Température



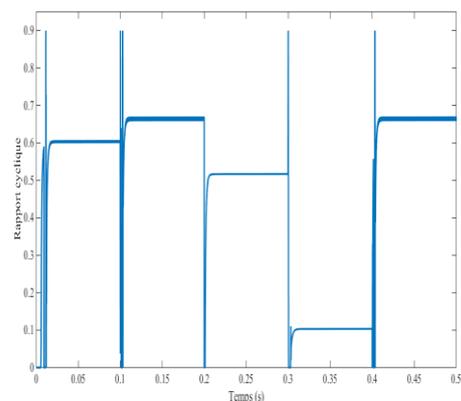
(c) Puissance



(d) Courant



(e) Tension



(f) Rapport cyclique

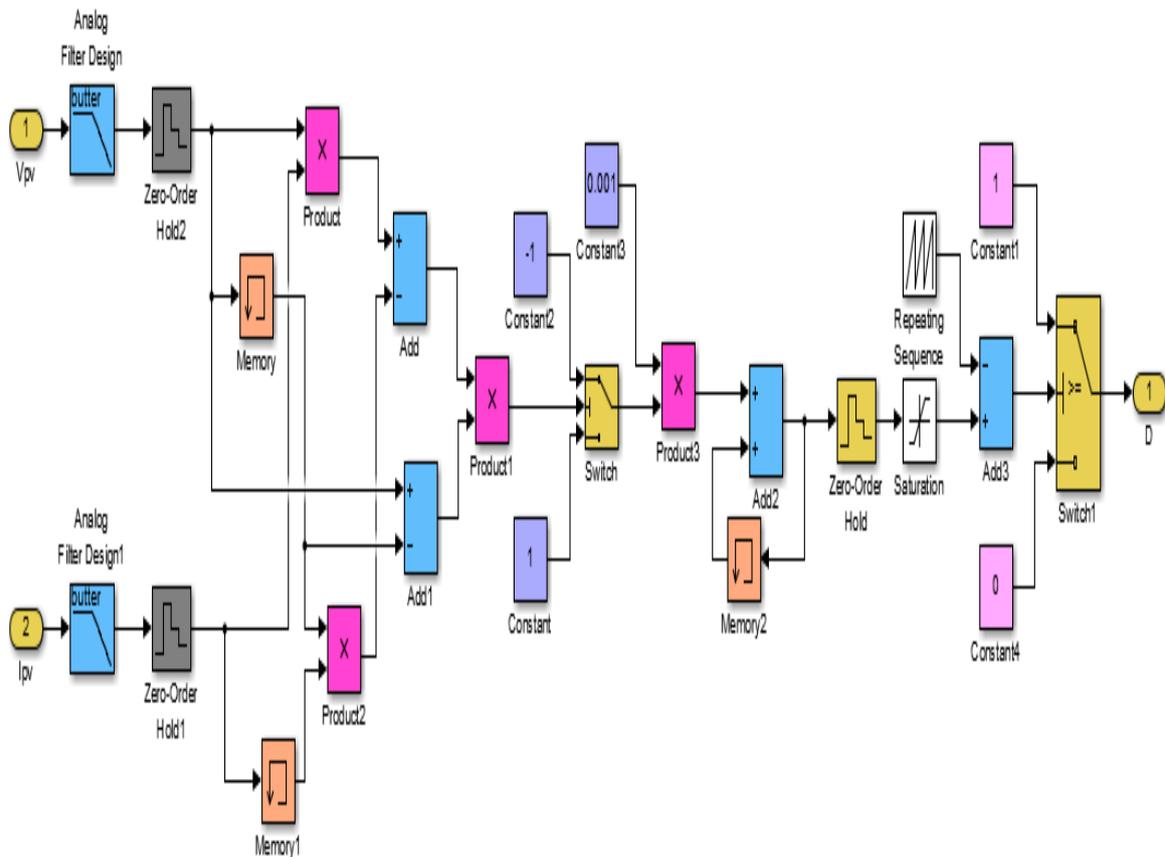
**Figure 4.4** : Résultats de simulation de l'algorithme  $I_{cc}$ .

La mesure du courant  $I_{cc}$  durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté dans la chaîne avant le convertisseur pour court-circuiter le générateur et mesurer le courant  $I_{cc}$ . Ceci augmente le nombre de composants et donc le coût. A noter que la puissance de sortie est réduite lors de la mesure du courant  $I_{cc}$ . De plus, le PPM n'est jamais atteinte.

### 4.3.3 Méthode Perturbe & Observe (P&O)

La méthode MPPT P&O, est généralement une technique très utilisée pour contrôler le point de puissance maximale d'un système PV.

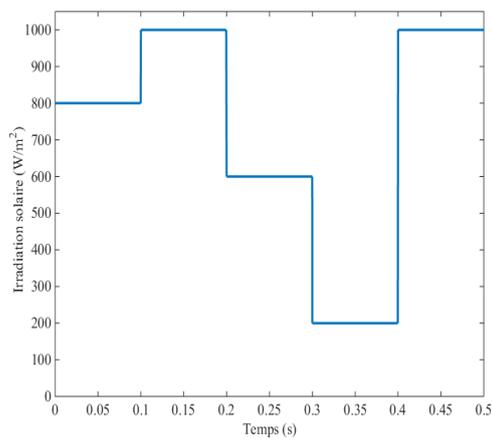
La figure 4.5 illustre le schéma bloc de l'algorithme P&O sous Simulink.



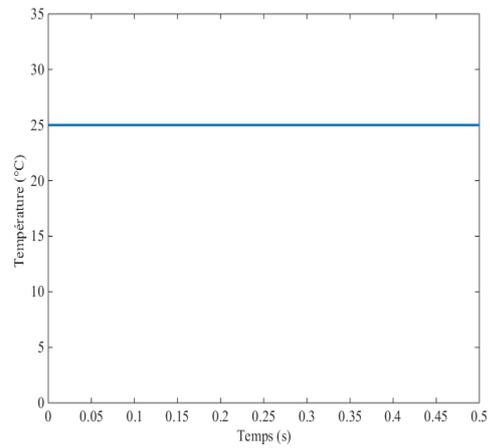
**Figure 4.5 :** Modèle Simulink de l'algorithme P&O.

Nous conservons les mêmes profils d'irradiation et de température comme indiqué sur les figures 4.6(a) et 4.6(b).

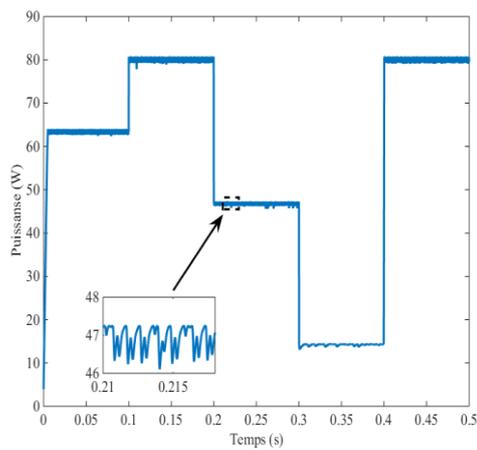
Les figures 4.6(c), 4.6(d), 4.6(e) et 4.6(f) et représentent, respectivement, les résultats de la puissance, le courant, la tension et le rapport cyclique.



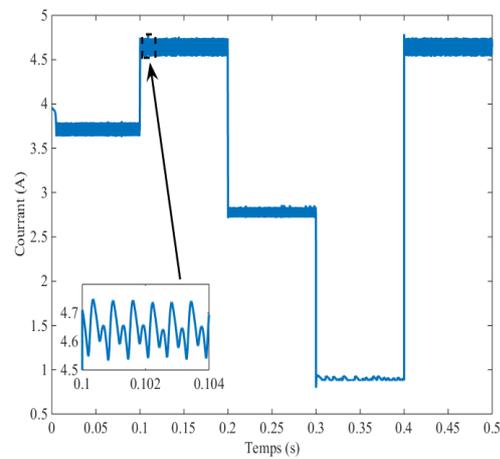
(a) Irradiation solaire



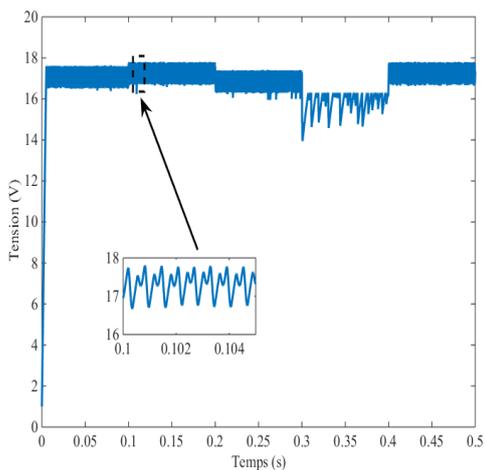
(b) Température



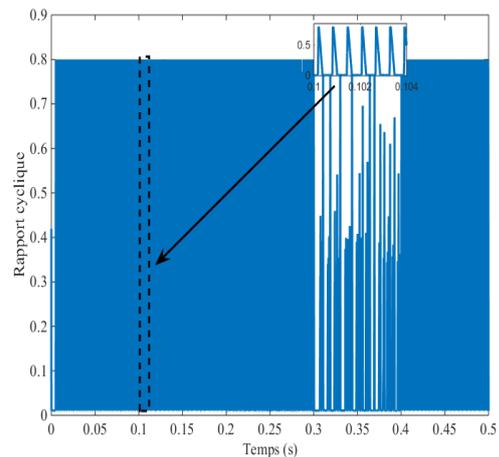
(c) Puissance



(d) Courant



(e) Tension



(f) Rapport cyclique

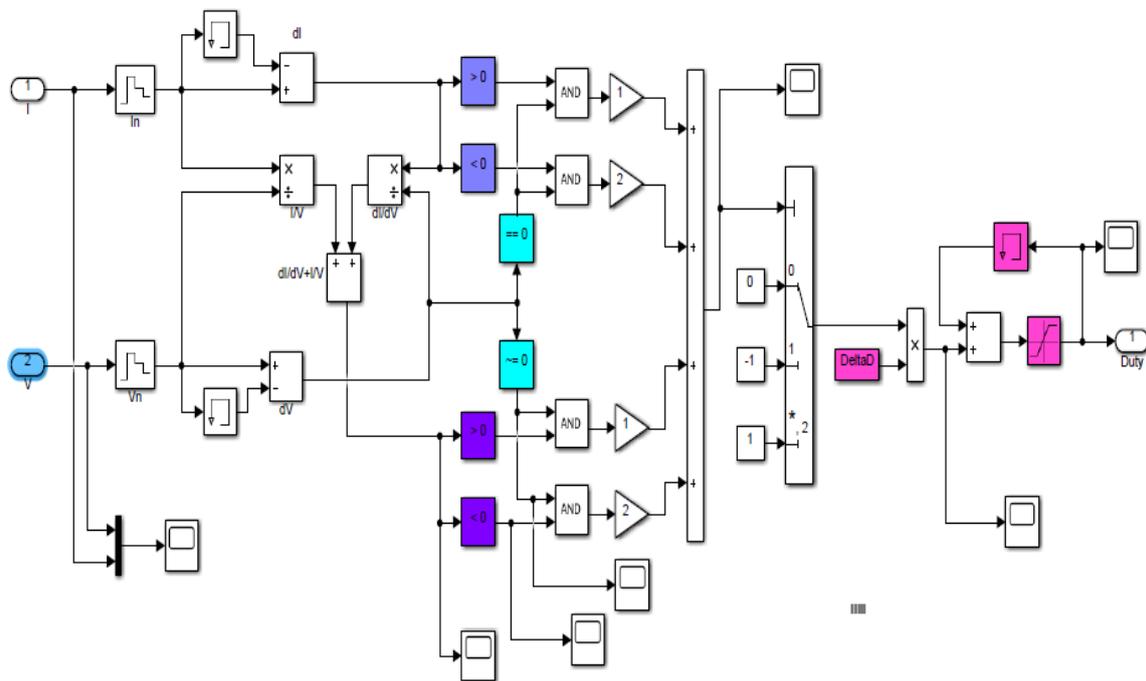
**Figure 4.6 : Résultats de simulation de la méthode P&O.**

À travers ces résultats de la simulation, nous voyons que l'inconvénient majeur de l'algorithme P&O réside dans sa mauvaise interprétation de la localisation du PPM lors d'un changement brusque des conditions climatiques.

Cette technique présente un autre inconvénient, qui est le pas de perturbation de tension. Si le pas est grand, alors le procédé sera plus rapide, mais cela génère de grandes oscillations de la puissance autour de PPM.

#### 4.3.4 Méthode de la Conductance Incrémentale (INC)

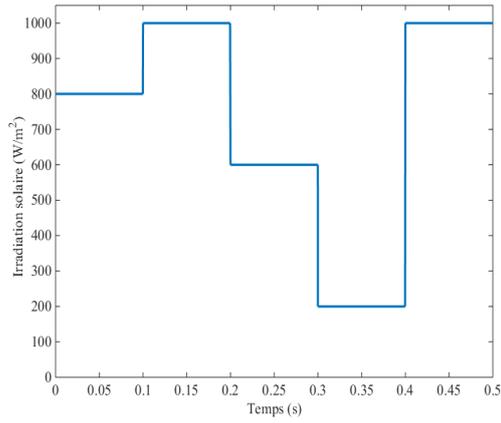
La figure 4.7 illustre le schéma bloc de l'algorithme INC sous Simulink.



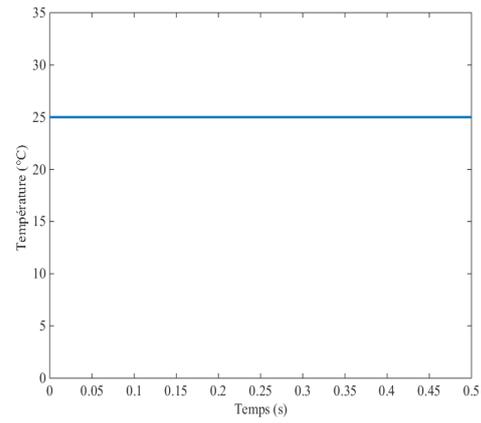
**Figure 4.7 :** Modèle Simulink de l'algorithme INC.

Nous gardons les mêmes profils d'irradiation et de température comme indiqué sur les figures 4.8(a) et 4.8(b).

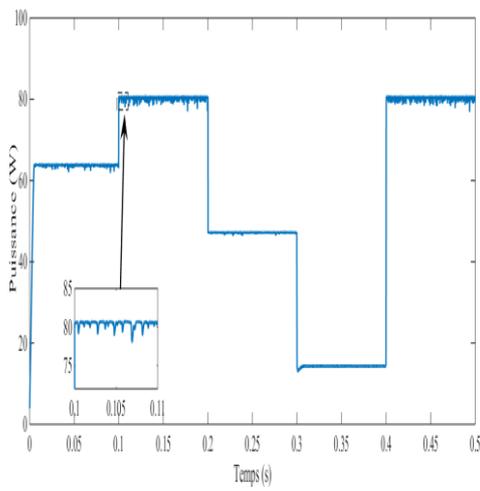
Les figures 4.8(c), 4.8(d), 4.8(e) et 4.8(f) et représentent, respectivement, les résultats de la puissance, le courant, la tension et le rapport cyclique.



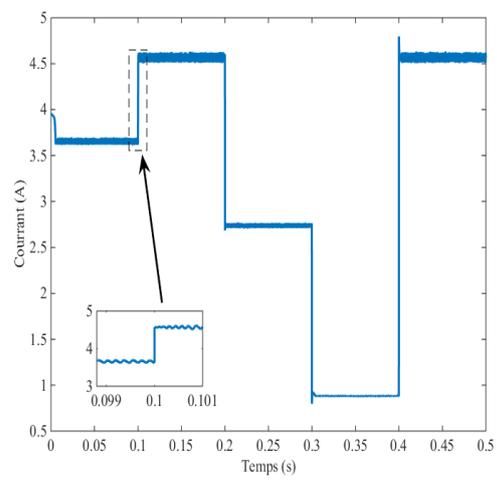
(a) Irradiation solaire



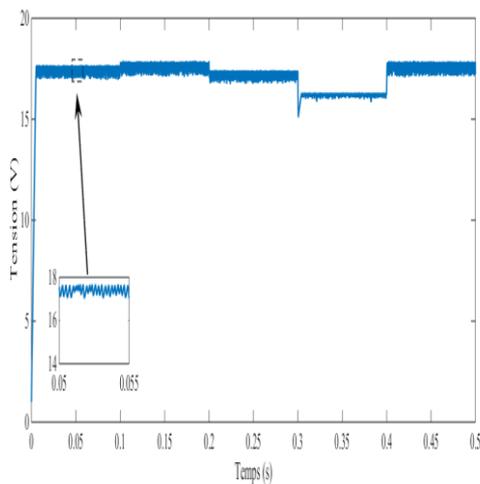
(b) Température



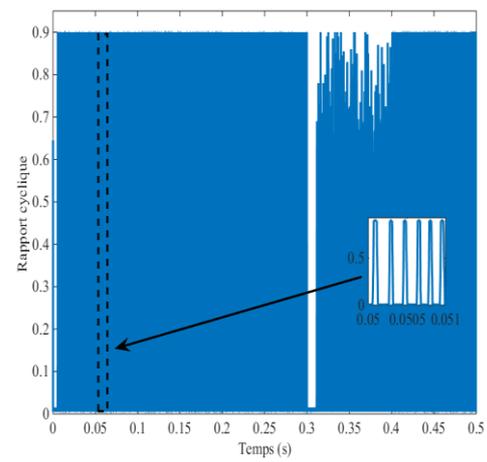
(c) Puissance



(d) Courant



(e) Tension



(f) Rapport cyclique

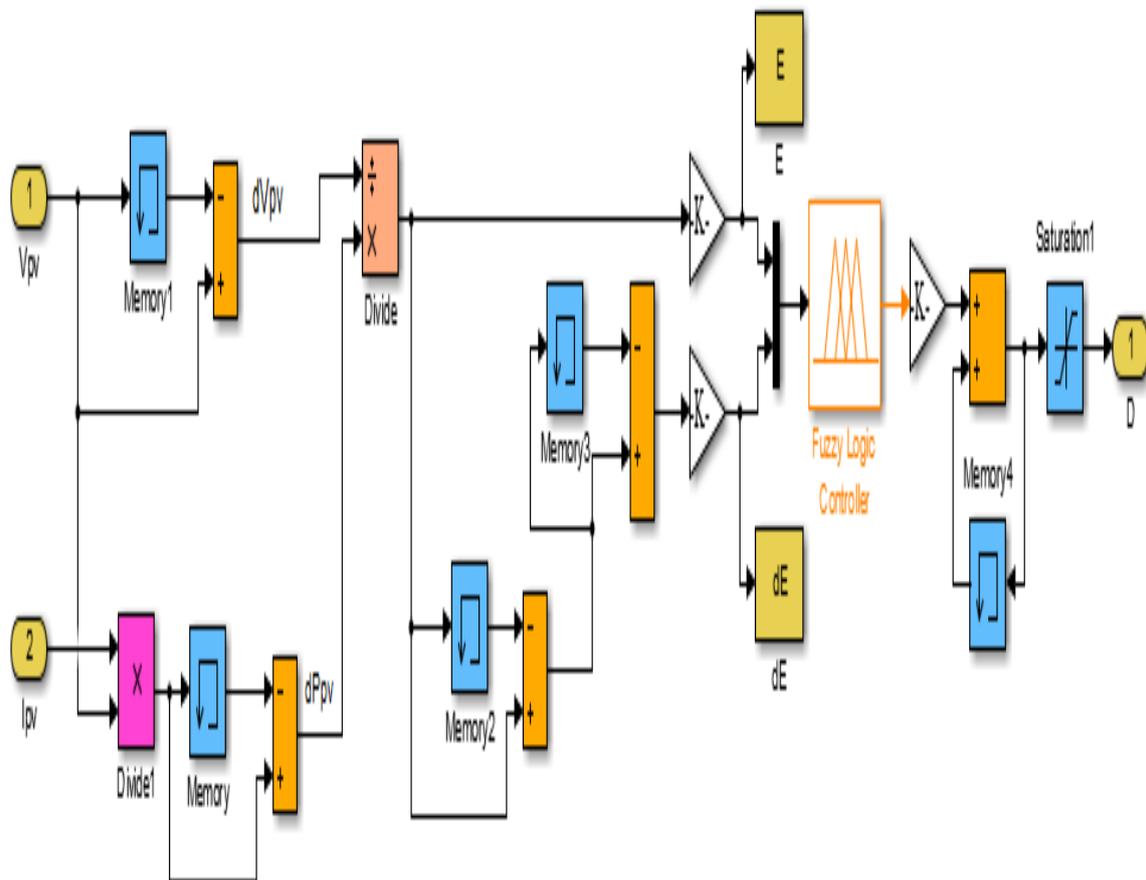
Figure 4.8 : Résultats de simulation de la méthode INC.

D'après ces résultats, on peut dire la méthode INC est plus performante que la méthode P&O, car il atteint le PPM dans un temps relativement rapide.

Cette méthode continue de suivre le PPM dans la bonne direction même sous le contraste rapide de l'ensoleillement, mais le problème est toujours l'oscillation de la force autour du PPM.

#### 4.3.5 Méthode basée sur la logique flou (FLC)

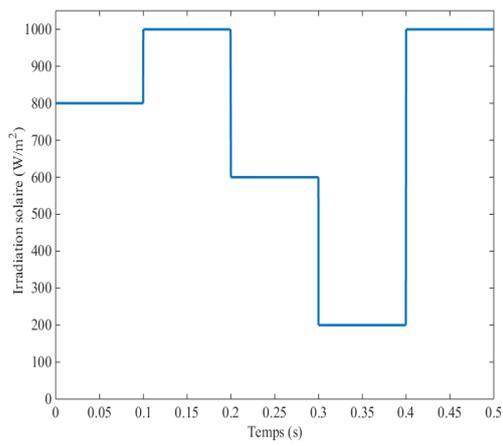
La figure 4.9 illustre le schéma bloc l'algorithme basée sur la logique flou sous Simulink.



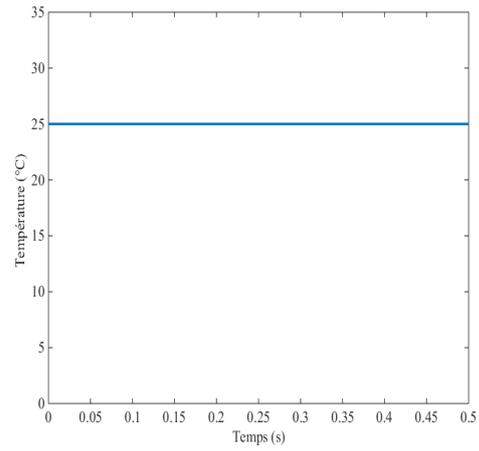
**Figure 4.9 :** Modèle Simulink de la méthode basée sur la logique flou.

Nous conservons les mêmes profils d'irradiation et de température comme indiqué sur les figures 4.10(a) et 4.10(b).

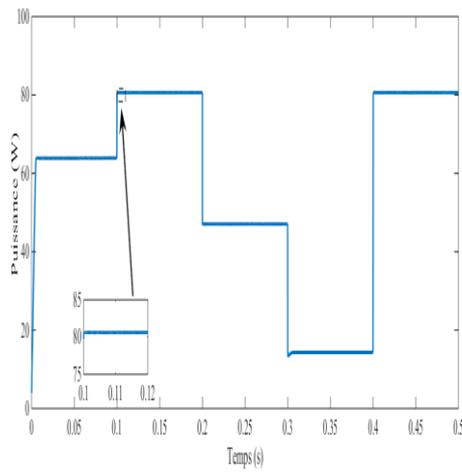
Les figures 4.10(c), 4.10(d), 4.10(e) et 4.10(f) et représentent, respectivement, les résultats de la puissance, le courant, la tension et le rapport cyclique.



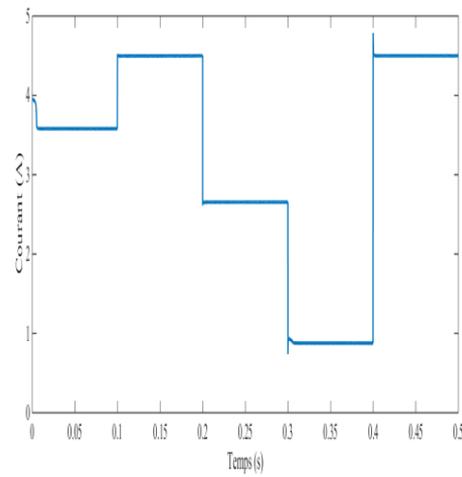
(a) Irradiation solaire



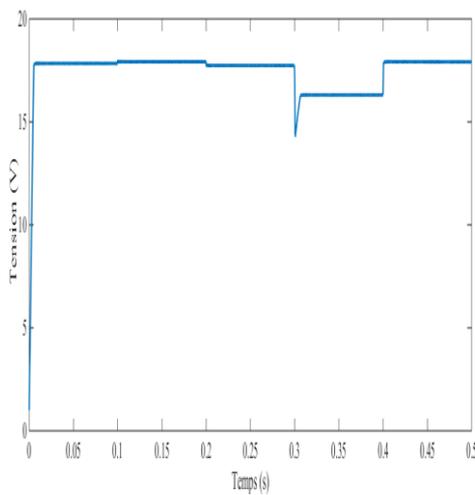
(b) Température



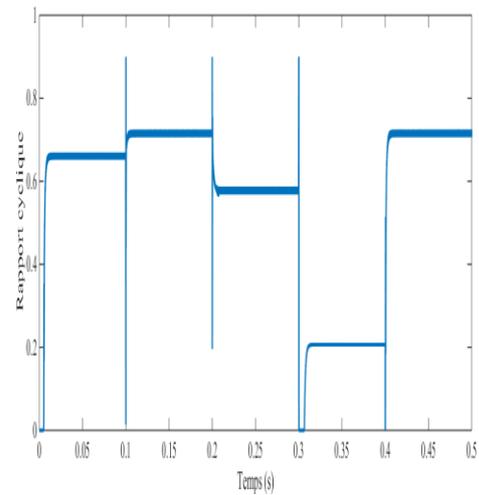
(c) Puissance



(d) Courant



(e) Tension



(f) Rapport cyclique

**Figure 4.10 :** Résultats de simulation de la méthode basée sur la logique floue.

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que l'algorithme basé sur la logique floue est robuste et efficace. En effet, cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations. En outre, il conduit à de meilleures performances, avec l'absence d'oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse plus rapide.

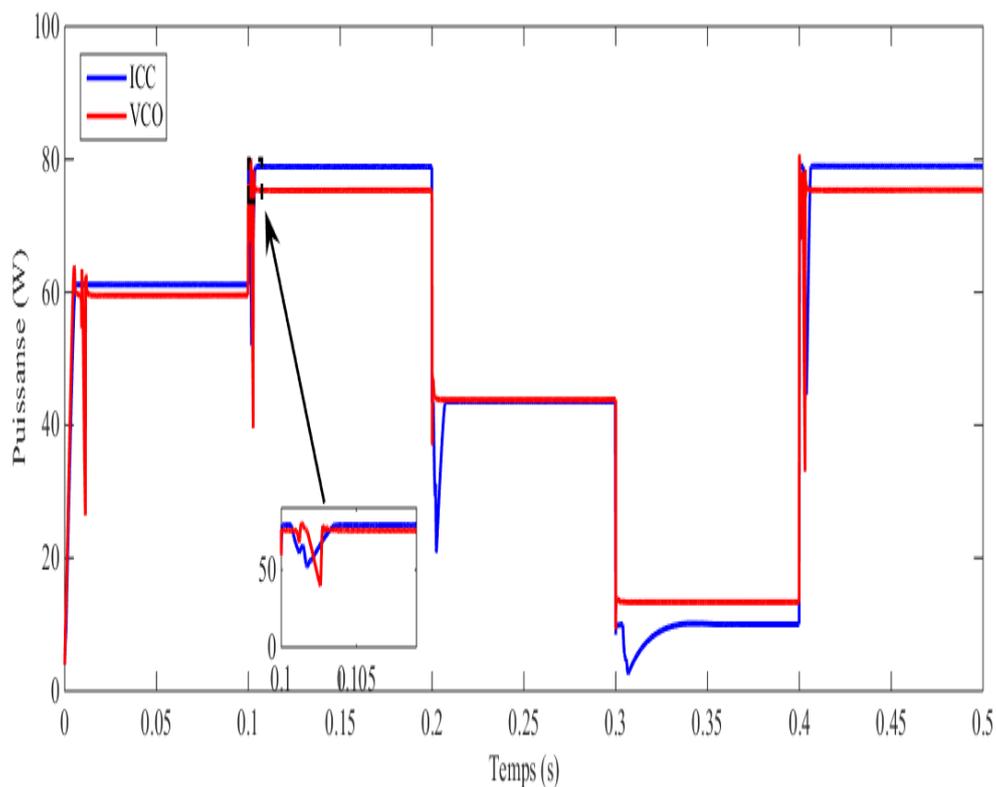
#### 4.4 Etude comparative entre les méthodes étudiées

Afin de comparer les performances des différentes méthodes de commande étudiées, nous avons fait une étude comparative entre les résultats obtenus.

##### 4.4.1 Comparaison entre les méthodes basées sur $V_{co}$ et $I_{cc}$

Dans ce cas, nous comparerons les techniques MPPTs basées sur  $V_{co}$  et  $I_{cc}$ .

La figure 4.11 montre l'évolution de la puissance de sortie en utilisant les deux algorithmes MPPTs  $V_{co}$  et  $I_{cc}$ .



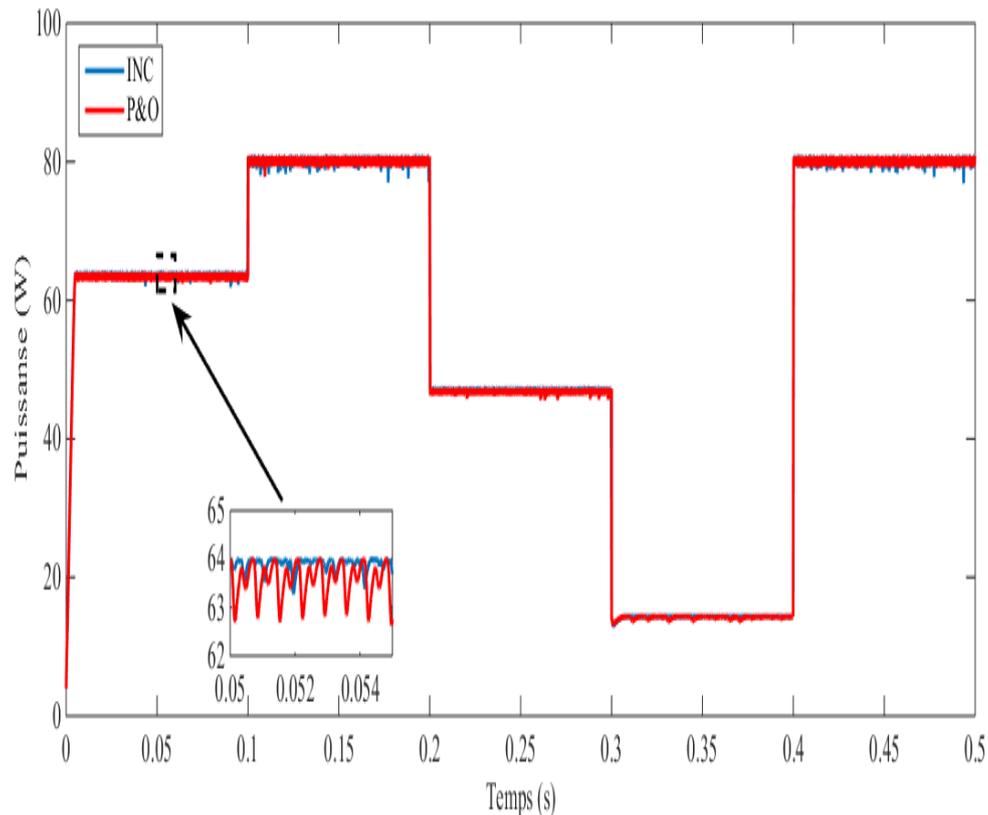
**Figure 4.11** : Comparaison des algorithmes  $V_{co}$  et  $I_{cc}$ .

Il nous semble, à travers une comparaison de simulation entre  $V_{co}$  et  $I_{cc}$ , que chacune des deux méthodes contient un problème de perte de puissance, mais la méthode à contre réaction de courant présente de meilleur performance en comparaison de celle à contre réaction de tension.

#### 4.4.2 Comparaison entre les méthodes INC et P&O

En comparant les simulations entre les méthodes traditionnelles P&O et INC.

La figure 4.12 montre l'évolution de la puissance de sortie en utilisant les deux algorithmes MPPTs P&O et INC.



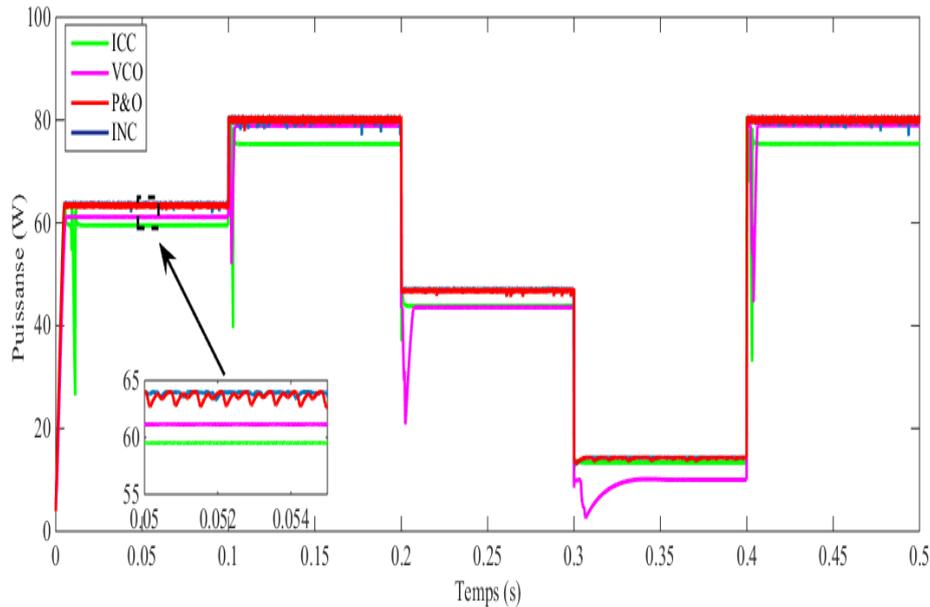
**Figure 4.12 :** Comparaison des algorithmes P&O et INC.

On peut dire que les deux algorithmes peuvent garantir une puissance maximale, cependant l'algorithme INC atteint le PPM en un temps relativement rapide et se comporte mieux lorsqu'il y a un changement rapide des conditions météorologiques. On remarque aussi la présence d'oscillations autour du PPM dans les courbes des deux algorithmes.

#### 4.4.3 Comparaison entre les méthodes $V_{co}$ et $I_{cc}$ et INC et P&O.

Dans ce cas, nous présenterons une comparaison entre toutes les méthodes traditionnelles étudiées dans ce chapitre. La comparaison se fait entre INC, P&O,  $V_{co}$  et  $I_{cc}$ .

La figure 4.13 montre l'évolution de la puissance de sortie en utilisant les quatre algorithmes MPPTs INC, P&O,  $V_{co}$ ,  $I_{cc}$ .

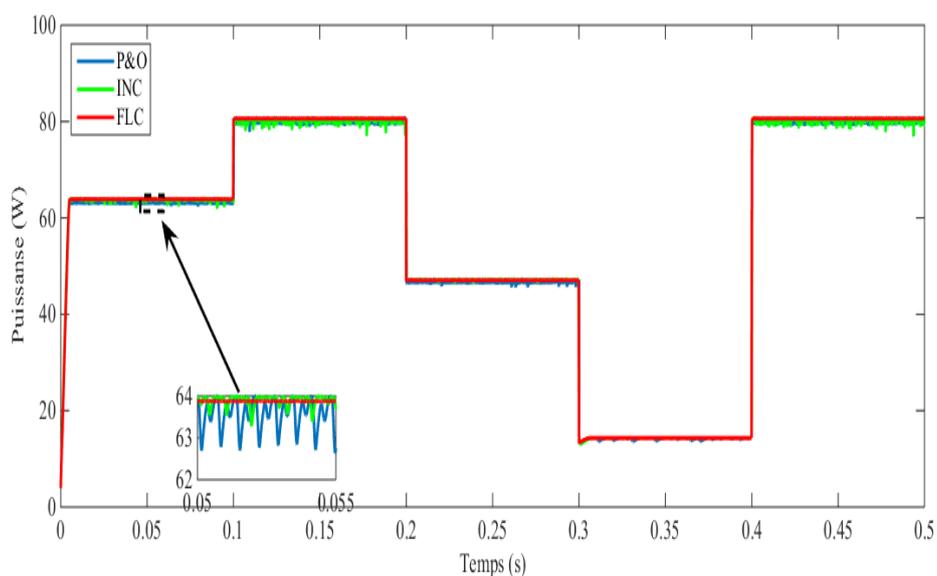


**Figure 4.13 :** Comparaison des algorithmes  $V_{CO}$ ,  $I_{CC}$ , P&O et INC.

D'après ces résultats de comparaison entre les méthodes traditionnelles P&O, INC,  $V_{CO}$  et  $I_{CC}$ , nous pouvons dire que les quatre algorithmes peuvent garantir une puissance maximale, mais chaque méthode possède des avantages et des inconvénients comme nous avons expliqué précédemment. Cette comparaison montre que la méthode est INC est plus performante que les autres méthodes car elle résout certains de leurs inconvénients.

#### 4.4.4 Comparaison entre les méthodes INC, P&O et FLC

Dans la figure suivante, nous comparerons les meilleures techniques traditionnelles INC et P&O avec la technique intelligente FLC.



**Figure 4.14 :** Comparaison des algorithmes INC, P&O et FLC.

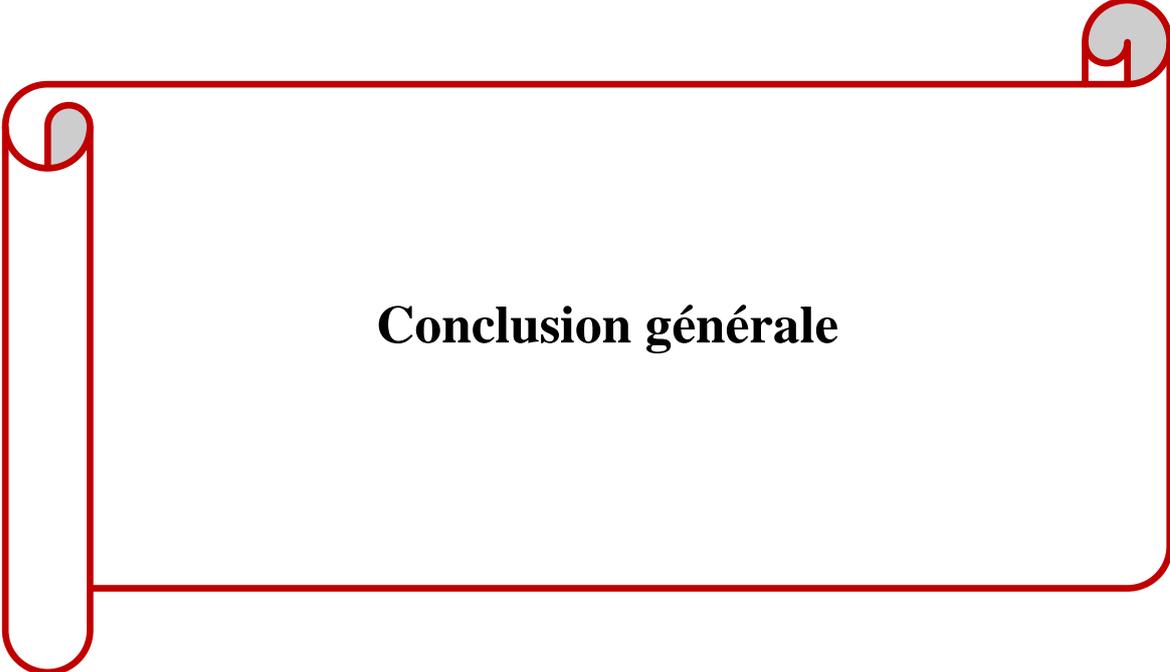
D'après cette comparaison on remarque que la méthode basée sur la logique floue donne de bons résultats par rapport aux autres types de MPPTs. La commande par logique floue permet d'avoir une réponse plus rapide en comparaison avec les méthodes traditionnelles, de réduire les fluctuations en régime transitoire et de mieux poursuivre le point de puissance maximal avec des pertes de puissance moindres.

#### **4.5 Conclusion**

Dans ce chapitre nous allons valider les concepts théoriques, d'évaluer les diverses techniques MPPT présentées au chapitre 3 et d'analyser leur comportement sous les mêmes conditions de fonctionnement. Nous effectuons également une étude comparative entre les différentes méthodes MPPT étudiées pour déterminer la technique la plus performante pour un système PV.

Dans ce travail, différentes stratégies de commande MPPT sont étudiées et développées pour les systèmes photovoltaïques afin d'améliorer leurs rendements. Nous avons commencé par la présentation de la conception et de la simulation d'un contrôleur basé sur des méthodes traditionnelles tel que la méthode basée sur  $V_{co}/I_{cc}$ , la méthode P&O et la méthode INC. Ensuite, nous avons donné les résultats de simulation de la méthode intelligente basée sur la logique floue. Enfin, pour vérifier l'efficacité et la performance de méthodes basée sur la logique floue, une étude comparative entre les résultats obtenus a été effectuée.

Les résultats de simulation montrent que le contrôleur flou fournit de bonnes performances et montre une très bonne dynamique par rapport aux autres stratégies sous la variation des conditions météorologiques.



**Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

Dans notre projet l'étude est basée sur modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Dans le premier chapitre, nous avons commencé à introduire des concepts sur l'énergie photovoltaïque, le principe de fonctionnement de la cellule et du générateur photovoltaïque, puis nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et du générateur photovoltaïque et étudié le comportement du générateur à l'aide de l'outil Matlab Simulink (constitué de 36 cellules en série) dans des conditions standard ( $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ) et nous avons également étudié l'effet de la température et de l'éclairement solaire et d'autres facteurs, y compris la méthode de connexion des cellules photovoltaïques sur la production de l'énergie électrique. Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié les convertisseurs statiques DC-DC (Buck, Boost, Buck-Boost) qui permettent l'adaptation entre le générateur photovoltaïque. Ensuite nous avons présenté la modélisation et simulation du convertisseur boost utilisé dans le système PV étudié. Enfin nous avons donné un aperçu sur l'adaptation entre les panneaux PV et la charge à l'aide d'un algorithme de commande MPPT.

Dans le troisième chapitre, nous avons classé les techniques MPPTs en deux groupes:

Techniques traditionnelles qui comprennent les techniques à contre réaction de tension, les techniques à contre réaction de courant et les techniques à contre réaction de puissance.

Techniques intelligentes: dans ce groupe nous nous sommes intéressés à la technique basée sur la logique floue.

Dans le dernier chapitre les résultats de simulation de chaque technique ont été présentés dans la première partie. Dans la deuxième partie nous avons effectué une étude comparative entre les techniques étudiées pour déterminer la plus performante entre elles pour maximiser la puissance dans les systèmes PV.

Cette étude a abouti aux résultats suivants:

## Conclusion générale

---

- Le courant délivré par le GPV est directement proportionnel à l'ensoleillement par contre la tension aux bornes du GPV est relativement peu dégradée par l'accroissement de celui-ci.

- L'augmentation de la température conduit à une diminution nette de la tension de circuit ouvert, à une légère augmentation du courant de court-circuit, et à une diminution de la puissance maximale.

- Pour profiter de la puissance maximale délivrée par un panneau solaire, l'utilisation d'un étage d'adaptation entre ce panneau et la charge est nécessaire.

- L'algorithme flou est capable d'extraire le maximum de puissance délivrée par un générateur PV avec une vitesse de poursuite élevée. Il est également plus efficace que les algorithmes conventionnels.

Pour une éventuelle continuité du présent travail, il est possible d'énumérer quelques perspectives à cette étude dont on peut citer :

- Exploitation de nouveaux algorithmes MPPT ;
- Introduction d'autres types de convertisseurs DC/DC ;
- Etude sur le diagnostic des défauts dans la chaîne de conversion PV par l'utilisation de la logique floue.

- [1] Silvano Vergura, « A complete and simplified datasheet-based model of pv cells in variable environmental conditions for circuit simulation », *Energies*, vol. 9, no. 5, page 326, 2016.
- [2] Eduardo Manuel Godinho Rodrigues, Radu Godina, Mousa Marz-band et Edris Pouresmaeil, « Simulation and Comparison of Mathematical Models of PV Cells with Growing Levels of Complexity », *Energies*, vol. 11, no. 11, page 2902, 2018.
- [3] Mohamed Haraoubia, « Intitulé : Etude simulation d'un générateur de panneau photovoltaïque », PhD thesis, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2019.
- [8] Sa a Krour, « Optimisation des paramètres d'une cellule photovoltaïque par les algorithmes génétiques », PhD thesis, 2015.
- [13] Mohammed Sadok, « Détermination des Paramètres, Performances et Etude de la Dégradation des Modules Photovoltaïques en milieu saharien », PhD thesis, 2011.
- [6] Dhaouadi Guiza, « Contribution à l'Etude et commande d'un système Photovoltaïque. Université 20 Aout 1955 – SKIKDA », Thèse Doctorat en Sciences, 2019.
- [7] R. Jimmy et al, « Le pompage photovoltaïque », Édition Multi mondes, 1999.
- [8] M. Blhadj, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister, Centre Universitaire de Bechar, 2007-2008.
- [9] B. Flèche & D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », juin 2007.
- [10] M. L. Louazane, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla », Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar-Batna, 16/06/2008.
- [11] A. Metatla, N. Talbi et S. Benzahioul, « On the modelling of photovoltaic generators: A comparative study », In 2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), pages 1 5, IEEE, 2013. (Cité en page 29.).
- [12] N. Belhaouas, MS. Ait Cheikh, A. Malek et C. Larbes, « Matlab-Simulink of photovoltaic system based on a two-diode model simulator with shaded solar cells », *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 16, no. 1, pages 65 73, 2013. (Cité en page 29.).
- [13] Omer Aydin, Haluk Gozde, Mahir Dursun et M. Cengiz Taplamacioglu, « Comparative Parameter Estimation of Single Diode PV-Cell Model by Using Sine-Cosine Algorithm and Whale Optimization Algorithm », In 2019 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), pages 65 68, IEEE, 2019. (Cité en page 30.).
- [14] Nezihe Yildiran2016 et Emin Tacer, « Identification of photovoltaic cell single diode discrete model parameters based on datasheet values », *Solar Energy*, vol. 127, pages 175 183, 2016. (Cité en page 30.).

- [15] Abdallah Zegaoui, P. Petit, M. Aillerie, JP. Sawicki, AW. Belarbi, MD. Krachai et JP. Charles, « Photovoltaic cell/panel/array characterizations and modeling considering both reverse and direct modes », *Energy Procedia*, vol. 6, pages 695 703, 2011. (Cité en page 32.).
- [16] Abdelmalek Bouden et Abdeslam Haouam, « Modulation numérique de nouveaux systèmes à EnR », PhD thesis, Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2018. (Cité en page 32.).
- [17] C. Carrero, J. Amador et S. Arnaltes. « A single procedure for helping PV designers to select silicon PV modules and evaluate the loss resistances », *Renewable Energy*, vol. 32, no. 15, pages 2579 2589, 2007. (Cité en page 33.).
- [18] Geo Walker et al, « Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model », *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, vol. 21, no. 1, pages 49 56, 2001. (Cité en page 33.).
- [19] Widalys De Soto, Sanford A Klein et William A Beckman, « Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance », *Solar energy*, vol. 80, no. 1, pages 78 88, 2006. (Cité en page 33.).
- [20] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli et Ernesto Ruppert Filho, « Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays », *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 24, no. 5, pages 1198 1208, 2009. (Cité en page 33.).
- [21] Mohamed Riabi, « Contribution au dimensionnement des conduites fermées de forme circulaire et non circulaire », PhD thesis, Université Mohamed Khider-Biskra, 2012. (Cité en page 33.).
- [22] I. Bendjamaa, « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen, 2011/2012.
- [23] Hala J El Khozondar, Rifa J El-Khozondar et Khaled Matter, « Parameters influence on MPP value of the photovoltaic cell *Energy Procedia* », vol. 74, pages 1142 1149, 2015. (Cité en page 40.).
- [24] S. Sivakumar, M. Jagabar Sathik, PS. Manoj et G. Sundararajan, « An assessment on performance of DC-DC converters for renewable energy applications », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pages 1475 1485, 2016. (Cité en page 44.).
- [25] Ali Moshar Movahed, Heydar Toossian Shandiz et Syed Kamal Hosseini Sani, « Comparison of fractional order modelling and integer order modelling of fractional order buck converter in continuous condition mode operation », *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 14, no. 5, pages 531 542, 2016. (Cité en page 44.).

- [26] Nicolas Bonvin, « Convertisseur DC/DC 3kW pour photovoltaïque », PhD thesis, Haute Ecole d'Ingénierie, 2015. (Cité en page 44.).
- [27] Qingxiang Liu, « Advanced control of multi-terminal DC/DC converter », PhD thesis, Nanyang Technological University, 2019. (Cité en page 44.).
- [28] Dhaouadi Guiza, Ounnas Djamel, Soufi Youcef et Chenikher Salah, « Implementation of Incremental Conductance Based MPPT Algorithm for Photovoltaic System », In 2019 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA), pages 1 5, IEEE, 2019. (Cité en pages 2, 44 et 69.).
- [29] R. Merahi, R. Chenni, « amélioration de la commande p& ; o par une détection synchrone du courant de batterie », Université des Frères Mentouri route de Ain El Bey de Constantine, 2011.
- [30] Alayat Mahmoud, Boucetta Issam, kelaiaia Mounia Samira, « maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de mppt soumis à des éclairagements différents », Master Académique, Université Badji Mokhtar Annaba, faculté sciences de l'ingénierat, département d'électrotechnique, Master Académique, Annaba, 2017.
- [31] A. Oi, « Design and simulation of photovoltaïque water pumping system », Thèse de Magister de l'université California, USA, Septembre 2005.
- [32] Fatiha Khelili, « Contribution à la modélisation des Convertisseurs multicellulaires parallèles magnétiquement couplées », PhD thesis, Université Mohamed Khider Biskra, 2018. (Cité en page 44.).
- [33] Satyajit Hemant Chincholkar, « Modeling, analysis and control of high-order switching power converters », PhD thesis, Nanyang Technological University, 2017. (Cité en page 44.).
- [34] Touil Nacer Eddine, Ghenbazi Slimane, Lammouchi zakaria, « modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », Master Académique, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, faculté des sciences et de la technologie, El-Oued, 2015
- [35] N. Aouchiche, M.S. Aït Cheikh, A. Malek, « poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation », division énergie solaire photovoltaïque, Centre de développement des énergies renouvelables, Alger, 2013.
- [36] Cours d'Électronique de Puissance, « Chapitre 9-Modélisation des Alimentations à Découpage », EDP – IUT GEII 2emeannée – Option EEP – 2004/2005.
- [37] Ali Jaafar, « Contribution à la Modélisation, l'Analyse et l'Optimisation de Lois de Commande pour Convertisseurs DC-DC de Puissance », Thèse de Doctorat, Supélec, 2011.
- [38] Jean Schutz, « Méthodologie de Conception d'une Alimentation a Découpage », Institut

National Polytechnique de Grenoble-INPG, 1999.

[39] Ang Simon and Alejandro Oliva, « Power-Switching Converters, Second Edition », CRC Press, 2005.

[40] Application Report, « Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage », Texas Instruments, no. SLVA477B, August 2015.

[41] J. Auvray, « Alimentations à Découpage », Cours de Systèmes Électroniques, [https://www.2Favri.cours.pagespersoorange.fr%2FCours%2FSE\\_016\\_Alimentations\\_decoupage.pdf](https://www.2Favri.cours.pagespersoorange.fr%2FCours%2FSE_016_Alimentations_decoupage.pdf), Dernier accès, 26/04/2016.

[42] Cedrick Lupangu Nkashama, « Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Home Power Supply », Master Thesis, University of KwaZulu-Natal, Durban. April, 2011.

[43] Joël Redoutey, « Alimentations à découpage », Cours de Conception des Systèmes Automatisés, Centre de Marseille, [http://jredoutey.free.fr/Puissance/Alimentations\\_a\\_decoupage.pdf](http://jredoutey.free.fr/Puissance/Alimentations_a_decoupage.pdf), Dernière accès, 26/04/2016.

[44] W. Boucheritte, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau », Mémoire de Magister, en Electrotechnique, Université Mohamed Khider, Biskra, 2013.

[45] Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister, en Microélectronique–Photovoltaïque, Centre Universitaire de Bechar, 2008.

[46] M. Hatti, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », JCGE ; 08, Lyon, 2008.

[47] A. Betka, A. Moussi, « Rendement maximise d'un moteur asynchrone alimente par une source photovoltaïque », LarhyssJournal, ISSN 1112-3680, pp. 151-162, Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface, 2003.

[48] Mayouf Somia, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, Juin 2016.

[49] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié, « Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique », Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007).

[50] M. Dariga, « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour

l'application aéronautique », Thèse Doctorat de l'Université de Toulouse, 2011.

[51] Slimane Hadji, « Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque », PhD thesis, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2018. (Cité en pages 67 et 81.).

[52] Yuchuan Zhang, « Control and power management of photovoltaic systems with plug-in hybrid electric vehicles as energy storage », PhD thesis, University of Tasmania, 2018. (Cité en pages 67 et 69.).

[53] « New Perturb and Observe MPPT Algorithm and its Validation using data from PV module », International Journal of Advances in Engineering & Technology, ISSN: 2231-1963.

[54] « Optimisation de L'ensemble Onduleur, Moteur et Pompe branche sur un Générateur Photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine.

[55] « Mathematics Advances in Research and Application», Scholarly Editions (TM).

[56] B. Das, A. Jamatia, A. Chakraborti, P. R. Kasari, et M. Bhowmik, « New Perturb and Observe MPPT algorithm and its validation using data From PV module », Int. J. Adv. Eng. Techno, vol. 4, no 1, p. 579-591, 2012.

[57] T. C. C. Saibabu et J. S. Kumari, « Modeling and Simulation of PV Array and its Performance Enhancement Using MPPT (P&O) Technique », Int. J. Comput. Sci. Commun. Netw. vol. 1, no 1, p. 9-16, oct 2011.

[58] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, et M. Vitelli, « Optimizing sampling rate of P&O MPPT technique », in 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004, p. 1945-1949.

[59] N. S. D'Souza, L. A. C. Lopes, et X. Liu, « Comparative study of variable size perturbation and observation maximum power point trackers for PV systems », Electr. Power Syst. Res., vol. 80, no 3, p. 296-305, mars 2010.

[60] M. A. Sahnoun, H. M. R. Ugalde, J.-C. Carmona, et J. Gomand, « Maximum Power point Tracking Using P&O Control Optimized by a Neural Network Approach: A Good Compromise between Accuracy and Complexity », Energy Procedia, vol. 42, p. 650-659, 2013.

[61] K. L. Lian, J. H. Jhang, et I. S. Tian, « A Maximum Power Point Tracking Method Based on Perturb-and-Observe Combined With Particle Swarm Optimization », IEEE J. Photovolt., vol. 4, no 2, p. 626-633, mars 2014.

[62] H. M. El-Helw, A. Magdy, et M. I. Marei, « A Hybrid Maximum Power Point Tracking

Technique for Partially Shaded Photovoltaic Arrays », IEEE Access, vol. 5, p. 11900-11908, 2017.

[63] K. H. Hussein, « Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions », IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib, vol. 142, no 1, p. 59, 1995.

[64] A. Safari et S. Mekhilef, « Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT With Direct Control Method Using Cuk Converter », IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 58, no 4, p. 1154-1161, avr 2011.

[65] Fangrui Liu, Shanxu Duan, Fei Liu, Bangyin Liu, et Yong Kang, « A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems », IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no 7, p. 2622-2628, juill 2008.

[66] N. E. Zakzouk, B. W. Williams, A. A. Helal, M. A. Elsharty, et A. K. Abdelsalam, « Improved performance low-cost incremental conductance PV MPPT technique », IET Renew. Power Gener, vol. 10, no 4, p. 561-574, avr 2016.

[67] J. Liu, J. Li, J. Wu, et W. Zhou, « Global MPPT algorithm with coordinated control of PSO and INC for rooftop PV array », J. Eng., vol. 2017, no 13, p. 778-782, janv 2017.

[68] R Divyasharon, R Narmatha Banu et D Devaraj, « Artificial Neural Network based MPPT with CUK Converter Topology for PV Systems Under Varying Climatic Conditions », In 2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS), pages 1-6. IEEE, 2019. (Cité en page 69.).

[69] Djamel Ounnas, Mesouad Ramdani, Salah Chenikher et Tarek Bouktir, « Optimal reference model based fuzzy tracking control for wind energy conversion system », International Journal of Renewable Energy Research (IJ-RER), vol. 6, no. 3, pages 1129-1136, 2016. (Cité en page 69.)

[70] Youcef Soufi, Mohcene Bechouat, Sami Kahla et Kais Bouallegue, « Maximum power point tracking using fuzzy logic control for photovoltaic system », In 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), pages 902-906. IEEE, 2014. (Cité en page 69.).

[71] Zaiem Kamar, « Commande d'un système photovoltaïque par contrôleur Neuro-Flou Réduit », PhD thesis, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2019. (Cité en page 69.).

[72] Neeraj Priyadarshi, Arvind Anand, Amarjeet Sharma, Farooque Azam, Vipin Singh et Ravi Sinha, « An experimental implementation and testing of GA based maximum power point tracking for PV system under varying ambient conditions using dSPACE DS 1104 controller », International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), vol. 7, no. 1,

pages 255-265, 2017. (Cité en page 69.).

[73] Youcef Soufi, Sami Kahla et Mohcene Bechouat, « Particle swarm optimization based sliding mode control of variable speed wind energy conversion system », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 45, pages 20956-20963, 2016. (Cité en page 69.).

[74] Mohcene Bechouat, « Commandes non linéaires des systèmes photovoltaïques », PhD thesis, Université 8 mai 1945 Guelma, 2017. (Cité en page 69.).

[75] Boualem Boukezata, « Etude et commande d'une chaîne de conversion d'énergie d'un système solaire photovoltaïque », PhD thesis, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2018. (Cité en page 69.).

[76] Boualem Bendib, « Une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes », PhD thesis, 2018. (Cité en pages 17, 27, 67, 69, 76 et 81.).

[77] Yuchuan Zhang, « Control and power management of photovoltaic systems with plug-in hybrid electric vehicles as energy storage », PhD thesis, University of Tasmania, 2018. (Cité en pages 67 et 69.).

[78] Boualem Bendib, « Une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes », PhD thesis, 2018. (Cité en pages 17, 27, 67, 69, 76 et 81.).

[79] Slimane Hadji, « Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque », PhD thesis, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2018. (Cité en pages 67 et 81.)

[80] Abdullah M Noman, Khaled E Addoweesh et Hussein M Mashaly, « DSPACE real-time implementation of MPPT-based FLC method », *International Journal of Photo energy*, vol. 2013, 2013. (Cité en page 83.)

[81] Unal Yilmaz, Ali Kircay et Selim Borekci, « PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pages 994-1001, 2018. (Cité en pages 2 et 83.)