



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar- EL Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Réseaux Electriques

Thème

**Modélisation et simulation d'un générateur
PV et MPPT à l'aide de la méthode P&O,
INC et de la logique floue**

Dirigé par :

Dr. KECHIDA Ridha

Réalisé par :

MESBAHI Achwak

NASRI Ikram

Année universitaire 2022/2023.



REMERCIEMENT



Nous remercions tout d'abord notre Dieu qui nous a donné la force et la volonté de développer cette entreprise.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à notre encadrant, Mr. Zechida Ridha, pour avoir suggéré ce travail, pour son encadrement, son écoute, ses éclaircissements, ses conseils, ses orientations et ses encouragements qu'il nous a apportés.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury qui nous ont fait l'honneur de présider notre jury de soutenance.

Nous exprimons également notre gratitude à tous ceux qui ont coopéré avec nous, le

Département de génie électrique de l'Université d'El-Qued.

Aussi à nos camarades de promotion de la promotion 2022-2023.

Master Réseaux Electriques,

Nous remercions également tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

ملخص: شهد استغلال الطاقات المتجددة تطورات مهمة خلال العقد الماضي. نوجه هذه الدراسة لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية باستخدام التكنولوجيا الكهروضوئية. هدفنا هو تحقيق أقصى قدر من الكفاءة باستخدام وحدة PV. من أجل تعظيم أداء أنظمة الطاقة الشمسية؛ من الضروري الحفاظ على الحد الأقصى لتتبع نقطة الطاقة (MPPT) لمصدر الطاقة.

لهذا فإننا سنقوم في هذا العمل بمقارنة ثلاث طرق مختلفة لتتبع نقطة الاستطاعة القصوى MPPT (طريقة "التشويش والملاحظة) (P&O، طريقة زيادة الموصلية (INC) وطريقة "المنطق الغامض (FLC). محتوى هذا العمل الذي تم على برنامج MATLAB/SIMULINK يمثل جميع الخطوات المتبعة لتنفيذ محاكات هذه الطرق وبيبين مميزاتها ومدى فعاليتها.

كلمات مفتاحية: الألواح الكهروضوئية، تتبع نقطة الاستطاعة العظمى (MPPT)، لغة البرمجة (MATLAB/SIMULINK)، التشويش والملاحظة (P&O)، طريقة زيادة الموصلية (INC)، المنطق الغامض (FLC).

Résumé : L'exploitation des énergies renouvelables a connu d'importants développements au cours de la dernière décennie. Cette étude se concentre sur la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique à l'aide de la technologie photovoltaïque. Notre objectif est d'obtenir un rendement maximal en utilisant un module PV. Afin de maximiser les performances des systèmes d'énergie solaire, il est essentiel de maintenir le suivi du point de puissance maximale (MPPT) de la source d'entrée.

Dans ce travail, nous effectuerons une comparaison entre trois algorithmes de commande MPPT : la méthode Perturbe & Observe (P&O), la méthode d'incrémentation de la conductance (INC) et la Logique Floue (FLC). Ce travail comprend les étapes de simulation de ces commandes, ainsi que la démonstration de leurs caractéristiques et performances. Toutes les simulations ont été réalisées dans l'environnement *MATLAB/SIMULINK*.

Mots clés : Photovoltaïque, PV, MPPT, P&O, INC, FLC.

Abstract: The exploitation of renewable energies has experienced significant developments in the last decade. In this study, we focus on the conversion of solar energy into electrical energy through photovoltaics. Our aim is to achieve maximum efficiency using a PV module. To maximize the performance of solar energy systems, it is necessary to continuously track the Maximum Power Point (MPPT) of the input source.

In this work, we will compare three MPPT control algorithms: the Perturb & Observe method (P&O), the Incremental Conductance method (INC), and Fuzzy Logic. This work encompasses the simulation steps for these control algorithms and demonstrates their characteristics and performances. All simulations were conducted using the *MATLAB/SIMULINK* environment.

Keywords: Photovoltaic, PV, MPPT, P&O, INC, Fuzzy Logic.

TABLE DES MATIÈRES

Titre	Page
TABLE DES MATIÈRES	III
TABLE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES ABREVIATIONS	X
Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art des systèmes photovoltaïques	
I.1. Introduction	3
I.2. Les énergies renouvelables, ressources et exploitation	4
I.3. L'énergie solaire	5
I.3.1. Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques)	5
I.3.2 Solaire thermique	5
I.4. Rayonnement solaire	5
I.4.1. Rayonnement direct	5
I.4.2. Rayonnement diffus	6
I.4.3. Rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol	6
I.4.4. Rayonnement global	6
I.5. L'énergie solaire photovoltaïque	6
I.6. Cellule photovoltaïque	6
I.7. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	6
I.7.1. L'effet photovoltaïque	6
I.7.2. Cellule photovoltaïque	7
I.8. Type de cellule photovoltaïque	10
I.8.1. Cellules mono-cristallines	10
I.8.2. Cellules poly-cristallines	10
I.8.3. Cellules amorphes	11
I.9. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	10
I.9.1. Modèle d'une cellule photovoltaïque	10
I.9.2. Paramètres d'une cellule photovoltaïque	12
I.10. L'énergie photovoltaïque en Algérie	13
I.11. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	14
I.12. Conclusion	15
Chapitre II : Etage d'adaptation DC/DC avec commande MPPT	
II.1. Introduction	17
II.2. Connexion directe générateur photovoltaïque-charge	17
II.3. Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge	19
II.4. Convertisseurs DC-DC survolteur (Boost)	19
II.6. Technique de commande de l'MPPT	22
II.6.1. Définition	22
II.6.2. Principe de fonctionnement de MPPT	23

II.7.	Méthode Perturbe & Observe (P&O)	24
II.8.	Méthode d'Incrémentation de la Conductance (INC)	25
II.9.	Résultats de la simulation de la commande MPPT	26
II.10.	Conclusion	33

CHAPITRE III : Commande MPPT basée sur l'approche Floue

III.2	Logique floue	36
III.2.1	Historique	36
III.2.2	Domaine d'application	36
III.2.3	Base de la logique floue	37
III.3.	Règles floues	37
III.3.1.	La logique floue	37
III.4.	Technique MPPT par logique floue	38
III.4.1.	Fuzzification	39
III.4.2.	Inférence	39
III.4.3.	Défuzzification	40
III.5.	Commande MPPT à base de contrôleur floue	40
III.5.1.	Fuzzification	41
III.5.2.	Les variables linguistiques	43
III.6.	Inférence	45
III.7.	Avantages et inconvénients du réglage par logique floue	46
III.7.1.	Avantages	46
III.7.2.	Inconvénients	46
III.8.	Simulation du système photovoltaïque	46
III.9.	Etude comparative par simulation	52
III. 10.	Conclusion	57

Chapitre IV : Réalisation d'un convertisseur Boost MPPT

IV.I.	Introduction	59
IV.2	Matériels utilisé	59
IV.2.1	Les modules photovoltaïques	59
IV.3.	Le microcontrôleur	60
IV.4.	Résultats pratique	62
IV.5	Discussion générale de résultats	66
IV.6.	Conclusion	66
	Conclusion générale	67
	Bibliographiques	68
	Annexe	71

TABLE DES FIGURES

	Titre	Page
Figure (I.1) :	Types de rayonnement solaire reçus au sol.	4
Figure (I.2) :	Représentation schématique d'une cellule solaire.	6
Figure (I.3) :	Dopage type N.	8
Figure (I.4) :	Dopage type P	8
Figure (I.5) :	Jonction PN.	8
Figure (I.6) :	Type de cellule photovoltaïque.	9
Figure (I.7) :	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.	10
Figure (I.8) :	Influence des résistances shunts et série sur la caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque	10
Figure (II.1) :	Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.	15
Figure (II.2) :	Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe pour différentes charges DC.	15
Figure (II.3) :	Convertisseur statique DC-DC comme adaptateur entre un générateur PV et une charge.	16
Figure (II.4) :	Caractéristiques ($I = f(V)$ et $P = f(V)$) du module Canadian Solar.CS5C-80M pour différents éclairagements $T=25^\circ$.	18
Figure (II.5) :	Caractéristiques ($I = f(V)$ et $P = f(V)$) du module Canadian Solar.CS5C-80M pour différentes températures, $E=1000 \text{ wh/m}^2$.	19
Figure. (II.6) :	Principe de la commande MPPT.	20
Figure. (II.7) :	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	21
Figure (II.8) :	(a) Organigramme de l'algorithme P&O, (b) et (c) caractéristiques puissance-tension des points de fonctionnement PV	22
Figure (II.9) :	Organigramme de l'algorithme de l'incrémentale de la conductance INC.	23
Figure (II.11) :	Résultat de simulation de tension généré par PV ($E=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).	25
Figure (II.12) :	Résultat de simulation de courant généré par PV ($E=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).	25
Figure (II.13) :	Résultat de simulation de puissance généré par PV ($E=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).	25

T=25°C).

Figure (II.14) :	Résultat de simulation de rapport cyclique pour ($E=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).	25
Figure (II.15) :	Variation de l'irradiation et température constantes.	26
Figure (II.16) :	Résultats de simulation de tension générée par PV pour différents éclairagements ($T=25^\circ\text{C}$).	27
Figure (II.17) :	Résultats de simulation de courant générée par PV pour différents éclairagements ($T=25^\circ\text{C}$).	27
Figure. (II.18) :	Résultats de simulation de puissance générée par PV pour différents éclairagements ($T=25^\circ\text{C}$).	27
Figure. (II.19) :	Résultat de simulation de rapport cyclique pour différents éclairagements ($T=25^\circ\text{C}$).	27
Figure. (II.20) :	Variation de la température et une irradiation fixe.	28
Figure. (II.21) :	Résultats de simulation de puissance générée par PV pour différentes températures ($E=1000\text{W/m}^2$)	29
Figure. (II.22) :	Résultats de simulation de tension générée par PV pour différentes températures ($E=1000 \text{ W/m}^2$)	29
Figure. (II.23) :	Résultats de simulation de courant générée par PV pour différentes températures ($E=1000 \text{ W/m}^2$)	29
Figure. (II.24) :	Résultat de simulation de rapport cyclique pour différentes températures ($E=1000 \text{ W/m}^2$)	29
Figure (III.1) :	Comparaison d'un ensemble classique et un ensemble flou.	32
Figure (III.2) :	Traitement flou.	33

Figure (III.3) :	Structure d'un régulateur flou.	34
Figure (III.4) :	Schéma synoptique d'un système PV avec une commande MPPT floue.	35
Figure (III.5) :	Structure de base d'un contrôleur flou.	36
Figure (III.6) :	Variation de la puissance par rapport à la variation de la tension.	37
Figure (III.7) :	Représentation des fonctions d'appartenance.	38
Figure (III.8) :	Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.	39
Figure (III.9) :	Résultat de simulation de tension généré par PV	41
Figure (III.10) :	Résultats de simulation de courant généré PV	41
Figure (III.11) :	Résultat de simulation de puissance généré par PV	41
Figure (III.12) :	Variation de l'irradiation et température constantes.	41
Figure (III.13) :	Résultats de simulation de tension générée par PV (T=25°C).	42
Figure (III.14) :	Résultats de simulation de courant générée par PV (T=25°C).	42
Figure (III.15) :	Résultats de simulation de puissance générée par PV(T=25°C).	42
Figure (III.16) :	Variation de la température et une irradiation fixe.	43
Figure (III.17) :	Résultats de simulation de puissance générée par PV (E=1000W/m ² .)	43
Figure (III.18) :	Résultats de simulation de tension et (c) générée par PV (E=1000W/m ²)	43
Figure (III.19) :	Résultats de simulation de courant générée par PV (E=1000 W/m ²)	43
Figure (III.20).	Résultat de simulation de puissance généré par PV (E=1000 W/m ² , T=25°C).	44
Figure (III.21).	Résultat de simulation de tension généré par PV (E=1000 W/m ² , T=25°C).	44
Figure (III.22).	Résultat de simulation de courant généré par PV (E=1000 W/m ² , T=25°C).	44
Figure (III.23).	Résultats de simulation de puissance générée par PV (T=25°C).	45
Figure (III.24).	Résultats de simulation de tension générée par PV(T=25°C).	45
Figure (III.25).	Résultats de simulation de courant générée par PV (T=25°C).	45
Figure (III.26).	Résultats de simulation de puissance générée par PV (E=1000W/m ²)	46

Figure (III.27) : Résultats de simulation de tension générée par PV ($E=1000\text{W}/\text{m}^2$)	46
Figure (III.28) : Résultats de simulation du courant générée par PV ($E=1000\text{W}/\text{m}^2$)	46
Figure (IV.1) : Les modules PV utilisés dans notre étude	48
Figure (IV.2) : Carte Arduino UNO	49
Figure (IV.3) : Photo réelle de convertisseur Boost.	49
Figure (IV.4) : Schéma global du système photovoltaïque réalisé.	50
Figure (IV.5) : Résultats de expérimentales en utilisant la méthode P&O	51
Figure (IV.6) : Résultats de expérimentales en utilisant la méthode INC	52

LISTE DES TABLEAUX

Titre de tableaux		Page
Tableau (II.1) :	Caractéristiques principales du module Canadian Solar.CS5C-80M	18
Tableau (II.2):	Caractéristiques principales du convertisseur boost	24
Tableau (III.1):	Règles d'inférence du contrôleur MPPT flou	39
Tableau (IV.2).	Les composants de hacheur	49

LISTE DES ABREVIATIONS

GPV	Générateur Photovoltaïque.
P_{\max}	Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque.
AC	Courant Alternative.
DC	Courant Continue.
PPM	Power Point Maximum.
V_{opt}	La Tension Optimale.
I_{opt}	Courant Optimal.
PV	Photovoltaïque.
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
P&O	Perturbe & Observe.
INC	Incrémentation de la conductance
V_{pv}	Tension de sortie de la cellule(V),
I_{pv}	Courant de sortie de la cellule(A),
I_{ph}	Courant photo-générer ou photo-courant (A),
I_{sat}	Courant de saturation de la diode (A),
q	Charge d'électron $q= 1.6 \cdot 10^{-19}(c)$,
k	Constant de Boltzmann ($k= 1.38 \cdot 10^{-23} J/k$),
T	Température absolue de fonctionnement de la jonction (k°),
n	Facteur d'idéalité de la diode ($n \in [1, 3]$),
R_s	Résistance série(Ω),
R_p	Résistance parallèle(Ω),

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, notre planète a connu une augmentation significative des émissions de gaz à effet de serre, en raison des avancées considérables dans la technologie et l'industrie. Malheureusement, cela a eu des conséquences néfastes, notamment des perturbations climatiques et des catastrophes naturelles majeures. L'utilisation du développement des énergies non polluantes s'est ainsi imposée comme la solution ultime à ce problème. À l'ère du développement durable, l'énergie photovoltaïque connaît une croissance rapide en raison de son potentiel considérable en tant que source d'énergie renouvelable.

Les panneaux solaires ou photovoltaïques (PV) sont l'élément de base de tout système de conversion d'énergie photovoltaïque. La caractéristique électrique du panneau PV est de nature non linéaire et possède un point particulier appelé « Point de Puissance Maximale » (en anglais "Maximum Power Point" MPP). Ce point est le point de fonctionnement optimal pour lequel le panneau opère à sa puissance maximale [1-3].

L'énergie photovoltaïque est fortement dépendante des conditions climatiques et de la localisation du site, ce qui rend la localisation du point de puissance maximale (MPP) variable dans le temps et donc difficile. La plupart des systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque utilisent une technique ou un algorithme spécifique appelé "*Maximum Power Point Tracking*" (MPPT) qui vise à suivre le point de puissance maximale.

Le MPPT vise à améliorer et à optimiser l'exploitation des systèmes photovoltaïques. Il permet d'avoir un gain qui peut atteindre 25%, d'où son importance. Techniquement, le MPPT fait appel à une interface entre le panneau et la charge qui est généralement un dispositif de conversion de puissance [4].

Notre travail vise principalement à effectuer une étude comparative entre différentes méthodes permettant d'optimiser l'extraction de la puissance maximale à partir du générateur photovoltaïque (GPV).

Dans le premier chapitre, nous présenterons l'énergie photovoltaïque. Nous expliquerons le principe de fonctionnement, les principales caractéristiques et les paramètres d'une cellule solaire. Enfin, nous aborderons les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter le convertisseur statique ainsi que leur principe de fonctionnement, suivi par le principe de la commande MPPT et ses différentes techniques.

Dans le troisième chapitre nous présenterons la commande floue d'un système photovoltaïque pour la recherche du point de puissance maximale (MPP).

Le quatrième chapitre expliquera en détail l'expérience pratique que nous avons réalisée, en décrivant les dispositifs utilisés et en présentant les résultats obtenus à partir de cette expérience.

Enfin, nous concluons notre thèse par un chapitre de conclusion générale qui résumera l'intérêt de notre étude et mettra en évidence les principales conclusions et recommandations.

Chapitre I.

Etat de l'art des systèmes photovoltaïques

Chapitre I.

Etat de l'art des systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1836 par Antoine Becquerel, mais ce n'est que dans les années 60 que les premières applications concrètes ont vu le jour avec l'essor de l'industrie spatiale. Depuis ce temps, les recherches dans ce domaine n'ont cessé d'évoluer afin de pouvoir offrir une alternative aux énergies fossiles en apportant des solutions pour l'amélioration globale des performances des systèmes de conversion photovoltaïque et les rendre plus abordables [05].

Dans ce chapitre, nous présenterons l'énergie photovoltaïque en détaillant son principe de fonctionnement, les principales grandeurs caractéristiques et les paramètres associés aux cellules solaires. De plus, nous aborderons de manière approfondie les avantages et les inconvénients de cette forme d'énergie renouvelable.

I.2. Les énergies renouvelables, ressources et exploitation

Par rapport aux énergies fossiles, les énergies renouvelables sont considérées comme des sources inépuisables, c'est-à-dire sa vitesse de formation est plus grande que sa vitesse d'utilisation [06]. Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs raisons :

- Elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ;
- Elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux.

Les principales sources d'énergies renouvelables sont : les énergies éolienne, solaire, géothermique, hydraulique, ainsi que l'énergie issue de la biomasse. [07]

I.3 L'énergie solaire

L'énergie solaire se réfère à l'énergie émise par le soleil sous forme de lumière et de chaleur. Cette forme d'énergie est pratiquement inépuisable à l'échelle de l'humanité, ce qui la classe parmi les sources d'énergie renouvelables. Pour capter cette énergie, nous utilisons des capteurs

spécifiques qui absorbent les rayons solaires et les redistribuent selon deux principaux modes de fonctionnement :

I.3.1- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques)

Dans ce cas l'énergie solaire est captée et transformée en électricité.

I.3.2- Solaire thermique

Dans ce cas, la chaleur des rayons solaires est captée et utilisée, pour chauffer de l'eau ou pour produire de l'électricité.

I.4 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est une onde électromagnétique émise par la surface de soleil qui résulte des réactions de fusion de l'hydrogène en hélium ayant lieu au cœur du soleil. Le rayonnement solaire incident sur un capteur solaire est composé de trois parties :

Le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi par la surface de la terre, comme montre la figure suivante : [8-10]

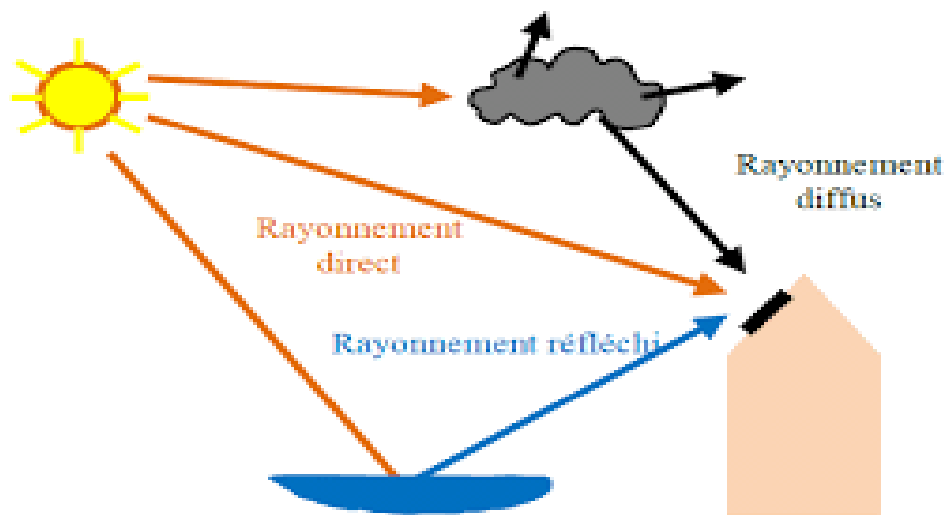


Figure I.1: Types de rayonnement solaire reçus au sol.

I.4.1. Rayonnement direct

La conversion du rayonnement direct est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

I.4.2. Rayonnement diffus

C'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

I.4.3. Rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

I.4.4. Rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol.

1.5. L'énergie solaire photovoltaïque

Elle provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé dans la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série /parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique photovoltaïque produite est ainsi disponible soit sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau.

I.6. Cellule photovoltaïque

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi- conducteurs généralement à base de silicium (SI), qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Les cellules sont raccordées entre- elles pour former des modules photovoltaïques pouvant convertir en électricité environ 15% de l'énergie solaire reçue. [11]

I.7. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.7.1. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un des effets photoélectriques. Il est mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire. Il est le produit du choc des photons de la lumière sur un matériau semi-conducteur qui transmet leur énergie aux électrons qui génèrent une tension électrique. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semiconducteur qui génère alors des paires électrons-trous créant une tension ou un courant électrique. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de

ce principe. Ils sont appelés photodiodes, phototransistors ou des photopiles. Cet effet photovoltaïque est notamment utilisé dans les panneaux solaires photovoltaïques. [12]

I.7.2. Cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée dopage. Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type N (exemple : silicium dopé au phosphore). Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type P (exemple: silicium dopé au bore). [13]

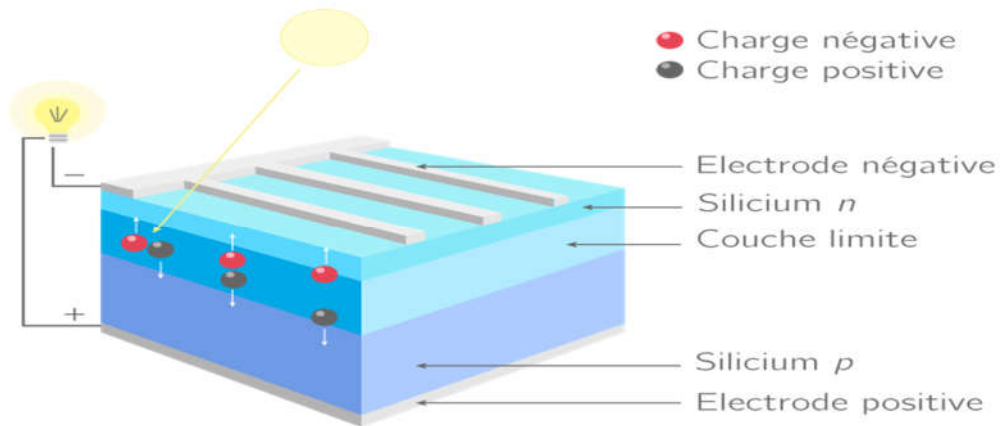


Figure I.2: Représentation schématique d'une cellule solaire. [14]

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore. Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN). Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés la figure (I.2).

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes. Suivants : Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ; Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ; Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons/ trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N. [15]

A. Matériaux semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des corps solides dont la conductivité électrique se situe entre celle des métaux et celle des isolants. La conductivité électrique des solides est une propriété qui est due à la présence d'électrons libres de se déplacer dans le milieu et de générer ainsi un courant électrique.

B. Semi-conducteurs intrinsèques

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge. Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon,...). Mais le nombre d'électrons libres dans un semi- conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal. [16]

C. Semi-conducteurs extrinsèques

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

D. Dopage de type N

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif). [17]

E. Dopage de type P

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur

au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore. [18]

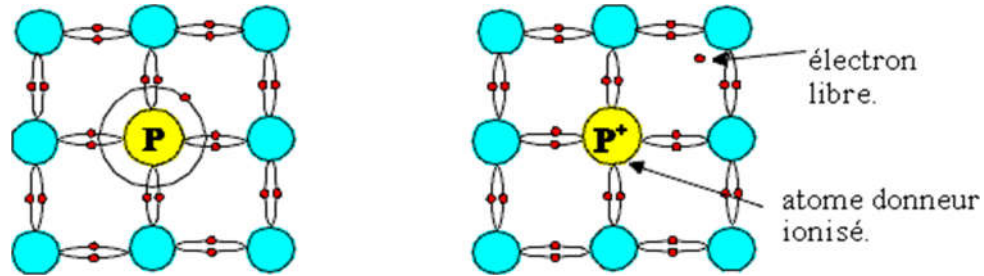


Figure I.3: dopage type N .[18]

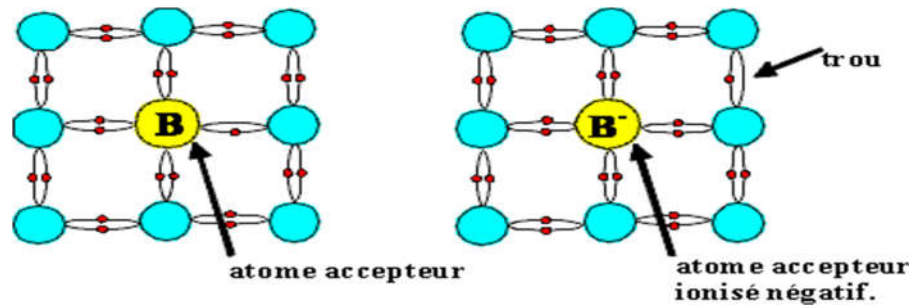


Figure I.4: dopage type P .[18]

F. La jonction PN

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent: c'est la zone de transition. Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner. [18]

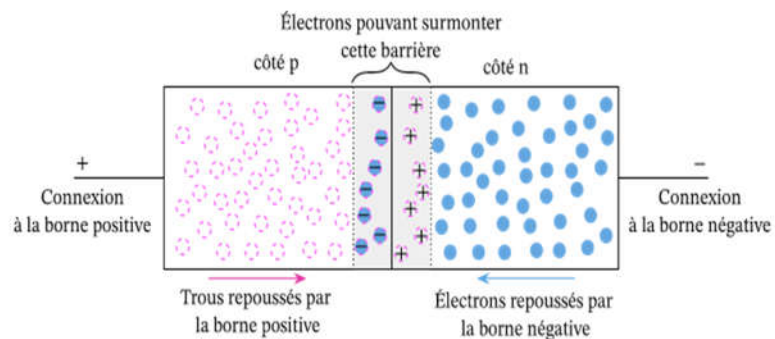


Figure I.5 : jonction PN .[18]

I.8. Type de cellule photovoltaïque

I.8.1. Cellules mono-cristallines

On appelle cellule monocristalline une cellule issue d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Ce genre de cellule est rond, parfois presque carré, et possède une couleur uniforme. Les panneaux à cellules monocristallines offrent un rendement de 14 à 18 %. Leur méthode de production restant complexe et coûteuse (il faut beaucoup d'énergie pour obtenir du cristal de silicium pur), ces panneaux sont donc chers. [19]

I.8.2. Cellules poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines sont issues d'un bloc de silicium cristallisé en cristaux multiples. Elles ont souvent un aspect rectangulaire. Les panneaux solaires à cellules poly-cristallines ont un rendement plus faible que ceux à cellules monocristallines (de 11 à 15 %). Leur coût de production étant moins élevé, elles offrent le meilleur rapport qualité/prix.

I.8.3. Cellules amorphes

Les cellules photovoltaïques amorphes sont produites à partir d'un « gaz de silicium », qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Cette technique permet d'utiliser des couches très minces de silicium. Les cellules photovoltaïques amorphes sont moins coûteuses à produire que les précédentes, mais leur rendement n'est que de 7 à 9 %. [19]



a: monocristallines



b: polycristallines



c: amorphes

Figure I.6: Type de cellule photovoltaïque. [20]

I.9. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

I.9.1. Modèle d'une cellule photovoltaïque

La figure (I.7) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode.

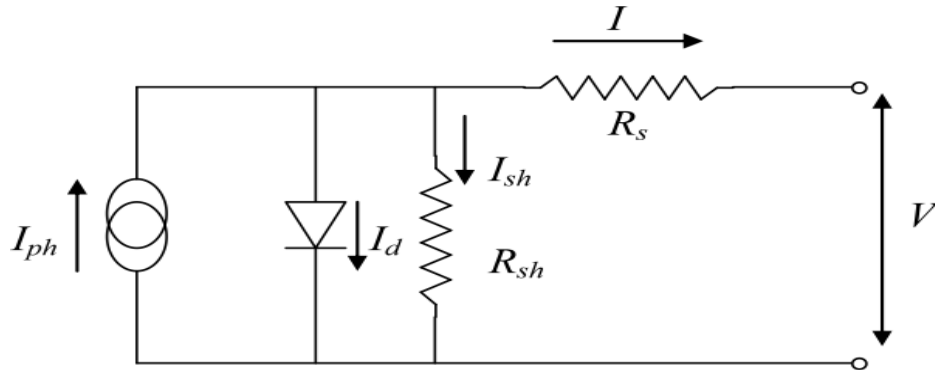


Figure I.7. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule, figure (I.8) :

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt (R_p) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

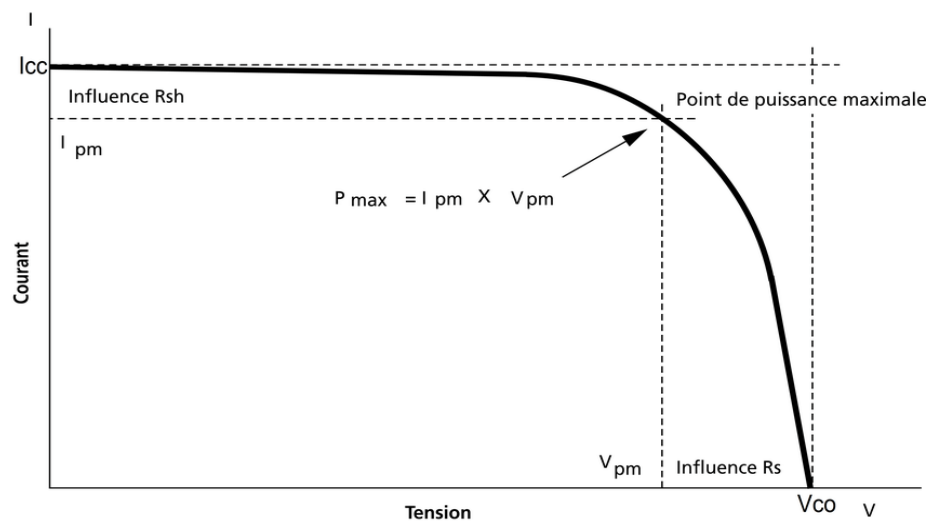


Figure I.8. Influence des résistances shunts et série sur la caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par :

$$I_{pv} - I_{sat} \left[\frac{q \left(V_{pv} + (I_{pv} * R_s) \right)}{n.k.T} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_s)}{R_p} \quad (I.1)$$

I.9.2. Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

I.9.2.1. Courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V_{pv} dans l'équation (I.1), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \frac{q(I_{cc} * R_s)}{n.k.T} - 1 \right] - \frac{(I_{cc} * R_s)}{R_p} \quad (I.2)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_{sat} \left[\exp \frac{q(I_{cc} * R_s)}{n.k.T} - 1 \right]$ devant I_{ph} L'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_p}} \quad (I.3)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$).

I.9.2.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co})

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp \frac{qV_{pv}}{n.k.T} - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (I.4)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (I.5)$$

I.9.2.3. La puissance maximale

C'est la puissance électrique maximale que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale V_{max} et à une intensité maximale I_{max} lorsqu'il est question de puissance

maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement **STC** standard (25° et un éclairement de 1000 w/m²), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête.

I.9.2.4. Facteur de forme FF

C'est le rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge sur le produit de (**I_{cc}**, **V_{co}**).

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{I_{mpp} V_{mpp}}{I_{cc} V_{co}} \quad (I.6)$$

Pour les cellules ayant moyen rendement, le **FF** des valeurs d'ordre **0.7** à **0.85**. Le facteur de forme **FF** diminue si la température augmente.

I.9.2.5. L'efficacité (rendement) de la conversion

C'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance de rayonnement incident sur la surface **X** de la cellule.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{inc}} = \frac{I_{mpp} I_{cc} FF}{P_{inc}} \quad (I.7)$$

Avec **P_{inc}** est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles.

I.10. L'énergie photovoltaïque en Algérie

L'Algérie est probablement le pays Africain et Méditerranéen disposant du potentiel d'énergie renouvelable le plus important à l'échelle régionale, de même que les capacités les plus appropriées au développement et à l'exploitation de ce potentiel. Un potentiel énergétique lié à plusieurs types de sources, mais dont l'énergie solaire demeure la plus importante en disponibilité et puissance et, sans doute aussi, la plus compétitive à développer à l'avenir sous diverses formes.

L'Algérie est en effet l'un des plus importants gisements d'énergie solaire au monde avec une durée d'insolation de 2.000 à 3.900 heures par an, et une irradiation journalière de 3.000 à 6.000 Wh/m², soit l'équivalent de 10 fois la consommation mondiale.

L'exploitation de l'énergie solaire a été entamée par la réalisation d'une centrale à Hassi R'mel d'une capacité de 15 mégawatts. D'autres projets sont envisagés, « A très long terme, à l'horizon 2025, jusqu'à 15% de l'électricité sera produite à partir du solaire. Le développement de ces énergies permettra d'épargner le gaz pour l'exporter ou l'utiliser dans la pétrochimie. A très long terme, on pourra même exporter l'énergie solaire et éolienne si elle est compétitive vers d'autres pays ».

La promotion et le développement des énergies alternatives constituent donc une nécessité incontournable au développement des énergies alternatives aura également un effet positif sur la préservation de l'environnement et la lutte contre le chômage. « Les énergies solaire et éolienne sont moins polluantes. L'investissement dans ce secteur permettra de créer des emplois et d'épargner l'utilisation des énergies fossiles comme le gaz, l'essence, le GPL, etc. qui peuvent être exportées ou utilisées pour générer des activités industrielles ». [21]

I.11. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque [22]

A. Les Avantages

- ✓ Sa gratuité et pas de pollution.
- ✓ Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- ✓ Sa structure fixe.
- ✓ Son coup de maintenance bas.
- ✓ Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- ✓ Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts sucrerait pour alimenter la planète entière.

B. Inconvénients et Limites

- ✗ Le coût élevé de l'installation.
- ✗ Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- ✗ La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- ✗ Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- ✗ Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution. La fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

I.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les concepts généraux des systèmes photovoltaïques, en mettant l'accent sur les cellules photovoltaïques et leur capacité à convertir l'énergie solaire en électricité. Nous avons également examiné les différents types de cellules et leur rendement, ainsi que les modules photovoltaïques et leurs paramètres. De plus, nous avons étudié l'influence de l'irradiation solaire et de la température sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension.

Chapitre II.

Etage d'adaptation DC/DC avec commande MPPT

Chapitre II.

Etage d'adaptation DC/DC avec commande MPPT

II.1. Introduction

Ce chapitre met en évidence que les générateurs photovoltaïques présentent des caractéristiques non linéaires (I-V) et ne fonctionnent de manière optimale qu'à un seul point spécifique, dans des conditions uniformes d'éclairement, de température et de charge. Les variations climatiques ou les fluctuations de comportement de la charge peuvent entraîner une dégradation des performances du générateur photovoltaïque (GPV). Afin d'obtenir la puissance maximale disponible d'un GPV malgré cette dégradation, il est nécessaire d'adapter en permanence la charge au générateur photovoltaïque. Cette adaptation peut être réalisée en utilisant un convertisseur DC-DC contrôlé par un mécanisme de poursuite MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Ensuite, nous avons testé les commandes MPPT telles que P&O (*Perturb and Observe*) et INC (*Incremental*). Cela nous a permis de modifier facilement les paramètres du système, tels que les conditions météorologiques, et d'observer l'impact de la commande sur le générateur photovoltaïque.

Dans la suite, nous procéderons à diverses simulations sur un système photovoltaïque (PV) composé principalement d'un panneau PV et d'un hacheur élévateur, contrôlé par des techniques de commande MPPT. L'objectif de ces simulations est de mettre en évidence l'impact des changements météorologiques sur le système PV et d'observer la réaction de notre système face à ces variations.

II.2. Connexion directe générateur photovoltaïque-charge

Le système le plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un générateur photovoltaïque (*GPV*) et d'une charge qui utilise directement l'énergie produite du *GPV*. Cette énergie est dépendante fortement de l'éclairement, de la température et de la nature de la charge [23].

La charge d'un *GPV* peut être dynamique ou statique. La charge dynamique a des caractéristiques variables sur toute la plage de fonctionnement, tandis que la charge statique a une caractéristique stable sur toute la plage de fonctionnement. La charge résistive a des caractéristiques statiques et linéaires sur toute la plage de fonctionnement [24].

La connexion directe d'un *GPV* à une charge est le principe de fonctionnement le moins cher, dans la mesure où la charge accepte bien la connexion directe au générateur de puissance continue. Cette configuration est illustrée à la figure (II.1).

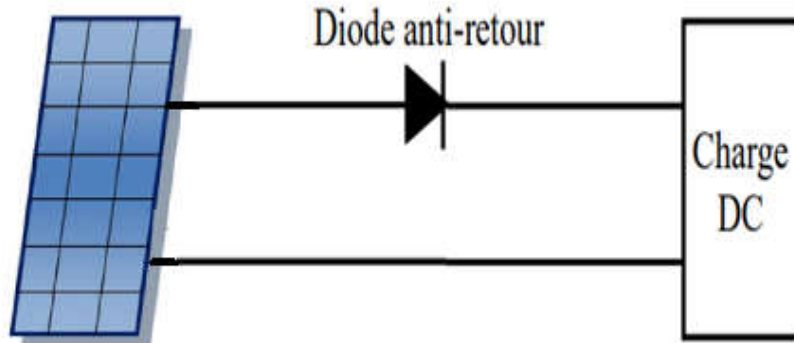


Figure. (II.1). Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.

L'inconvénient majeur de cette connexion est la dépendance entre la puissance fournie par le générateur et la charge c'est-à-dire le transfert de P_{max} disponible aux bornes du *GPV* vers la charge n'est pas non plus garanti [25], [26]. Un autre inconvénient c'est que la connexion directe du *GPV* n'est pas valable sur une charge AC car le *GPV* fournit un courant continu. Pour la connexion d'un *GPV* à une charge alternative, un étage d'adaptation de type onduleur est nécessaire. Ainsi, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le *GPV* et la charge [27], [28].

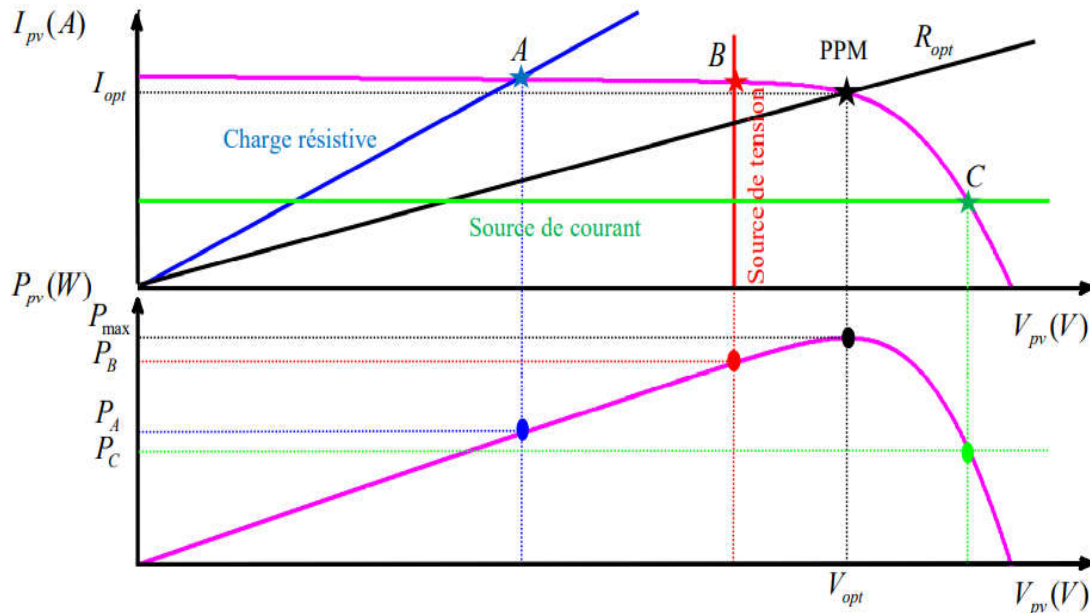


Figure. (II.2) : Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe pour différentes charges DC.

La charge DC peut être: une charge purement résistive, une charge de type source de tension ou une charge de type source de courant. Sur la figure (II.2), les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un GPV sont représentées ainsi que les caractéristiques (I-V) des trois types de charges.

Les points de fonctionnement A B C, sont les points d'intersection entre la caractéristique (I-V) du GPV et celles des trois types de charge. Le fonctionnement optimal s'obtient pour le PPM qui correspond à la tension optimale V_{opt} et au courant optimal I_{opt} .

Pour ces trois points, les puissances fournies par le générateur sont respectivement P_A, P_B, P_C . Ces puissances sont toutes des valeurs de puissances inférieures à la puissance maximale disponible P_{max} . Donc, il faut remédier à ce problème par l'ajout d'un étage d'adaptation [27-29].

II.3. Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge

Afin d'extraire, à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation est utilisé. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments. Il assure, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur. L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter.

II.4. Convertisseurs DC-DC survolteur (Boost)

En effet, d'un hacheur parallèle est également connu sous différents noms tels que l'hacheur élévateur, hacheur survolteur ou hacheur de type Boost. La figure (II.3) représente un convertisseur élévateur qui permet de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie plus élevée.

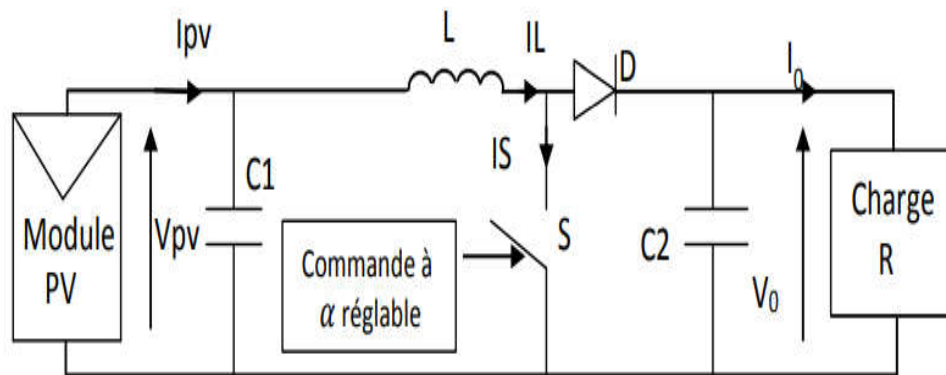


Figure. (II.3): Convertisseur statique DC-DC comme adaptateur entre un générateur PV et une charge.

Puisque la tension du panneau photovoltaïque (formé de plusieurs cellules en série et en parallèle) est faible, l'utilisation d'un convertisseur DC-DC type Boost pour augmenter cette tension et rendre possible la connexion du générateur photovoltaïque aux différentes charges est nécessaire, en conséquence, le coût en sera réduit [30-33].

Ce convertisseur comprend la source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur « K » peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). Le commutateur peut être un transistor *MOSFET* ou un *IGBT* qui peut commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. Un condensateur est intégré dans le circuit du convertisseur Boost, dont le but est de réduire les harmoniques à haute fréquence [34].

➤ Modèle mathématique équivalent

L'application des lois de *Kirchhoff* sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

Pour le premier intervalle αT_s :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{pv}}{dt} = I_{pv} - I_L \quad (\text{II.1})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_0 \quad (\text{II.2})$$

$$V_L = L \frac{dV_L}{dt} = V_{pv} - R_L I_L \quad (\text{II.3})$$

Pour le deuxième intervalle $(1-\alpha)T_s$:

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{pv}}{dt} = I_{pv} - I_L \quad (\text{II.4})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \quad (\text{II.5})$$

$$V_L = L \frac{dV_L}{dt} = V_{pv} - V_0 - R_L I_L \quad (\text{II.6})$$

II.5. Résultat et simulation

Pour simuler le comportement du *GPV*, nous avons utilisé le logiciel *Matlab/Simulink*. Le générateur photovoltaïque choisi est un module de (*Canadian Solar.CS5C-80M*). Les paramètres de ce module sont donnés dans tableau (II.1). L'implémentation sous Simulink du *GPV* est illustrée sur les figures (II.4) et (II.5).

Tableau (II.1) : Caractéristiques Principales du Module *Canadian Solar.CS5C-80M*

Puissance maximale aux conditions STC P_{max}	80.15W
Tension du circuit ouvert V_{oc}	21.8 V
Courant de court-circuit I_{sc}	4.97A
Tension au PPM V_{mpp}	17.5V
Courant au PPM I_{mpp}	4.58A
Coefficient de température pour V_{oc}	-0.37399 V / °C
Coefficient de température pour I_{sc}	0.088994 A / °C

Les résultats de simulation $I = f(V)$ et $P = f(V)$ à travers la figure (II.4) permet de voir le comportement de *GPV* en fonction l'éclairement variable et la température constant :

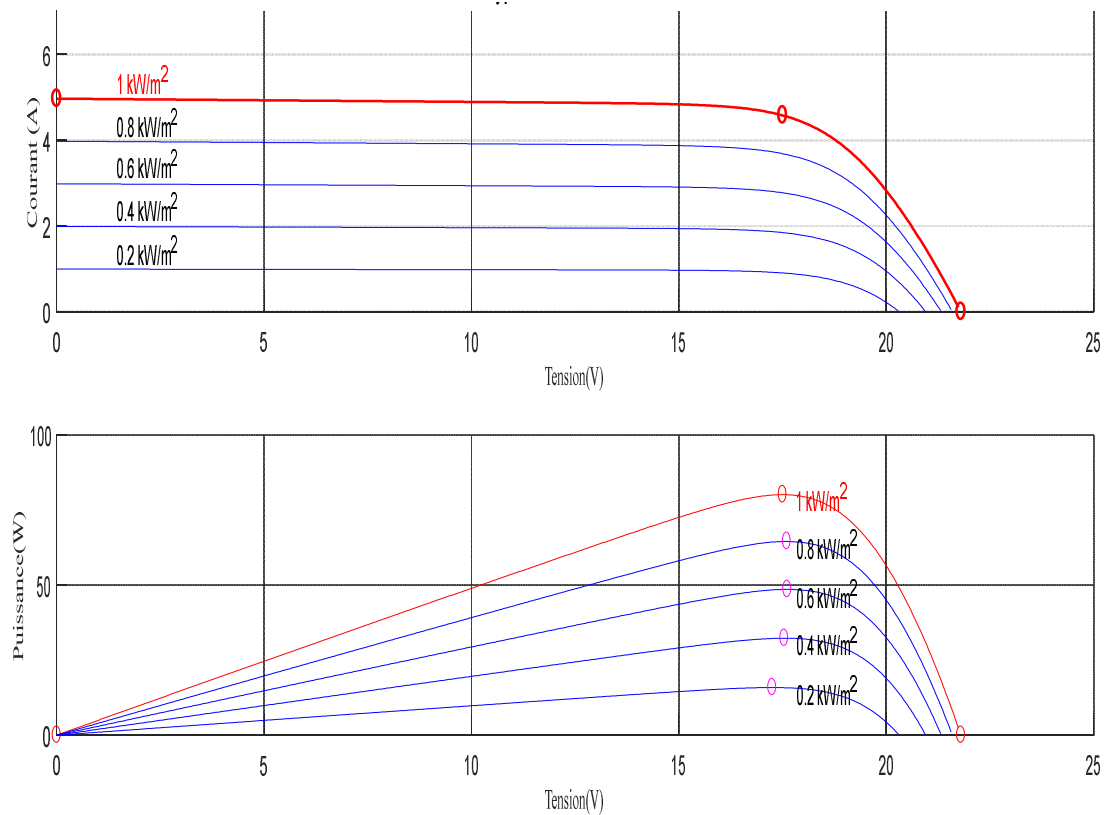


Figure. (II.4) : Caractéristiques ($I = f(V)$ et $P = f(V)$) du module *Canadian Solar.CS5C-80M* pour différents éclairements $T=25^{\circ}$.

Les résultats de simulation $I = f(V)$ et $P = f(V)$ à travers la figure (II.5) permet de voir le comportement de *GPV* en fonction la température variable et l'éclairement constant :

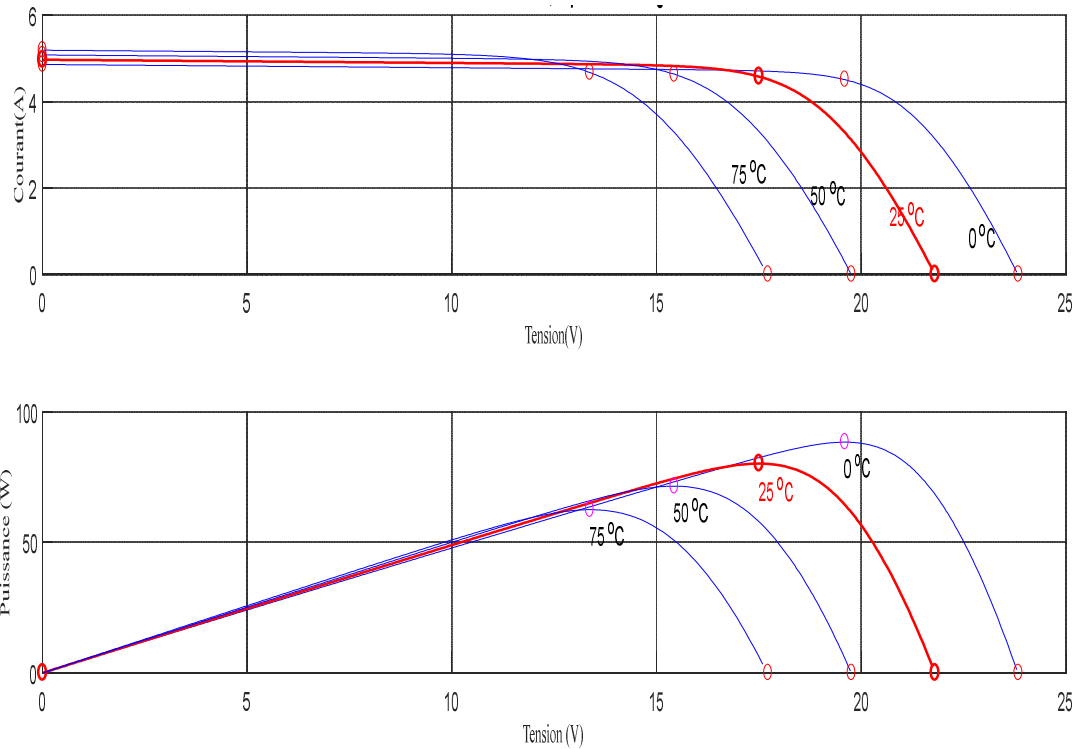


Figure. (II.5) : Caractéristiques ($I = f(V)$ et $P = f(V)$) du module Canadian Solar. CS5C-80M pour différentes températures, $E=1000 \text{ wh/m}^2$.

II.5.1. Interprétation des résultats

➤ Influence de l'éclairement:

La figure (II.4) illustre l'impact de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. À température constante, on observe une variation significative du courant, tandis que la tension varie légèrement. En effet, le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, tandis que la tension de circuit ouvert suit une fonction logarithmique. Cela explique pourquoi le courant réagit de manière plus sensible aux variations de l'éclairement par rapport à la tension.

➤ Influence de la température:

La figure (II.5) met en évidence la diminution de la tension d'un module photovoltaïque avec l'augmentation de la température du module PV. En revanche, le courant de court-circuit connaît une légère augmentation avec la température du module PV. Ces figures illustrent clairement la réduction du rendement due à l'élévation de la température sur la cellule. De plus, on peut observer sur la figure (II.5) que l'augmentation de la température entraîne également une diminution de la puissance maximale disponible.

II.6. Technique de commande de l'MPPT

II.6.1 Définition

Dans un système photovoltaïque comprenant une source photovoltaïque et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente une étape importante. Cette technique de commande est souvent nommée dans la littérature «*Maximum Power Point Tracking, MPPT*».

Par définition, une commande *MPPT*, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur *PV* de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance [34]. Où, Les performances de ces commandes dépendent de la rapidité d'atteindre le point de puissance maximale, de la façon d'osciller autour de ce point et de la robustesse de ce contrôleur face aux changements atmosphériques brutaux tels que l'ombrage partiel (*OP*) [31].

II.6.2 Principe de fonctionnement de MPPT

Le suiveur de point de puissance maximum (*MPPT*) permet au module photovoltaïque de fonctionner à son point de puissance maximale. Le principe des commandes de (*MPPT*) est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (*PPM*) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

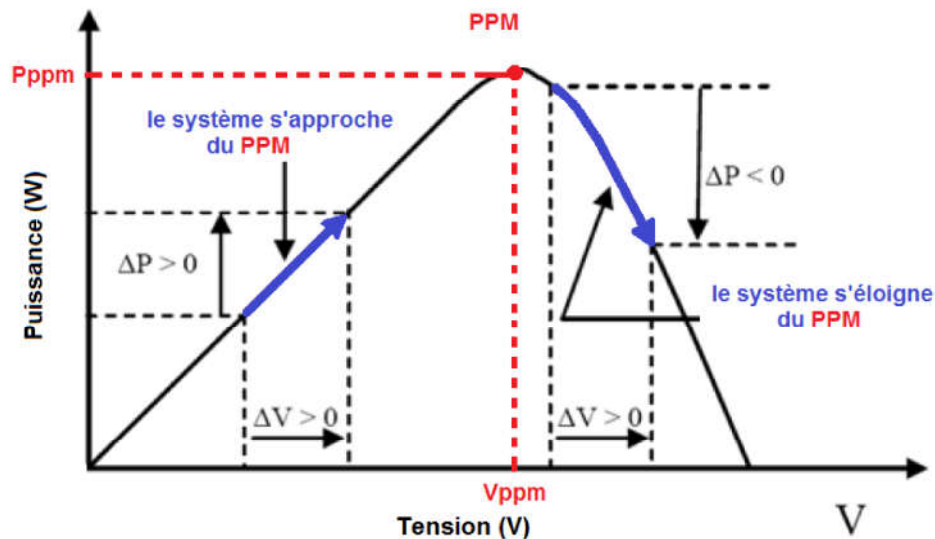


Figure. (II.6): Principe de la commande MPPT.

Il est généralement conçu avec un convertisseur qui régule la puissance prélevée sur le panneau solaire. Le point de puissance maximale (*MPP*) est généralement contrôlé par deux variables de contrôle. La tension ou la puissance, mesurée à chaque fois est utilisée à nouveau dans une boucle pour déterminer si le module solaire est au point de puissance maximale [33].

L'association d'un convertisseur statique *DC/DC*, comme illustré à la figure (II.3), modifie le point de fonctionnement du panneau à l'aide d'une commande externe afin de maximiser l'énergie transférée de manière permanente. L'algorithme de recherche *MPPT* peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé [33].

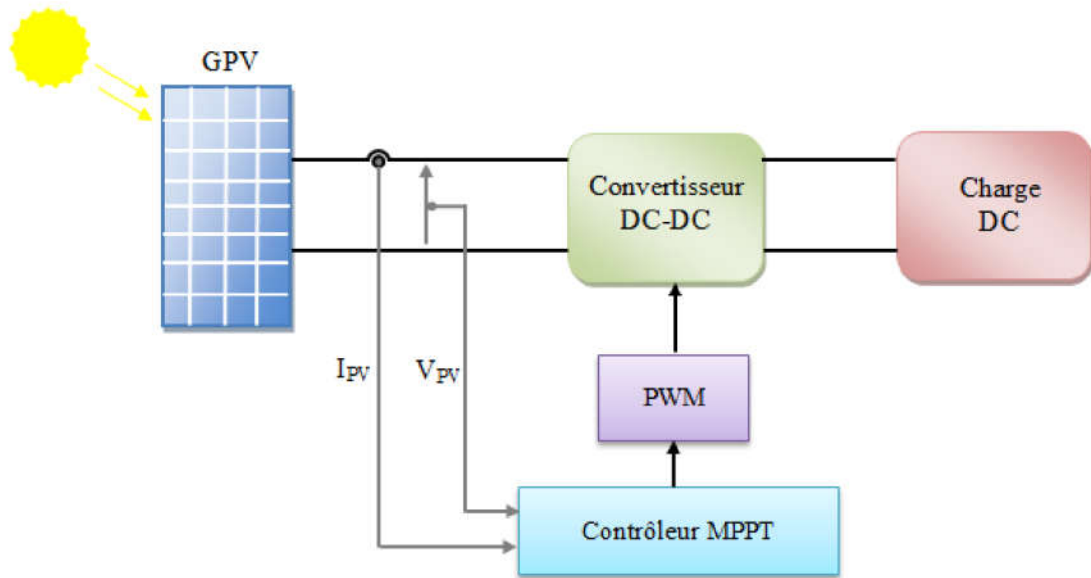


Figure. (II.7): Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

Généralement, les algorithmes *MPPT* sont classés en deux catégories :

- ✓ **Algorithmes classiques**: comme "Incrément des conductances (*IncCon*)" et "Perturbation et l'observation (*P&O*)". Ces techniques sont faciles à mettre en œuvre en raison de leur moindre complexité dans l'algorithme. Ils sont efficaces pour des conditions d'irradiation uniformes car le *PV* ne générera qu'un seul *MPP* dans ces conditions. Ces algorithmes seront rappelés dans la suite de ce chapitre
- ✓ **Algorithmes intelligents** : basés sur l'optimisation, ils incluent l'algorithme de recherche de coucou (*CSA*), Optimisation par essaim de particules (*PSO*) et des autres algorithmes métaheuristiques. Ces méthodes peuvent rechercher le vrai *PPM* dans des conditions d'environnement dynamiques avec ombrage partiel, où le module *PV* possédera plusieurs pics dans la courbe P-V [24].

II.7. La méthode Perturbe & Observe (P&O)

C'est l'algorithme de poursuite du *PPM* le plus utilisé. Et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution du rapport cyclique α du convertisseur *DC-DC*, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau [28].

Dans l'algorithme *P&O*, une valeur fixe de perturbation est utilisée pour produire un signal de référence pour la boucle de commande extérieure. La variable de perturbation peut être la valeur de référence pour la tension aux bornes du générateur photovoltaïque ou le courant de sortie du panneau *PV* ou le signal de rapport cyclique du convertisseur *DC-DC*.

L'organigramme de base de l'algorithme *P&O* est représenté à la figure (II.8. (a)). Cet algorithme est basé sur le balayage des courbes caractéristiques tension-courant-puissance à la recherche d'une condition déterminée qui signale le *PPM*. Comme le montre la figure (II.8. (b)), si le point de fonctionnement de la puissance est sur le côté gauche du *PPM*, l'algorithme doit le déplacer vers la droite pour être plus proche du *PPM*, et vice versa s'il se trouve du côté opposé (du côté droit), comme le montre la figure (II.8. (c)) [33].

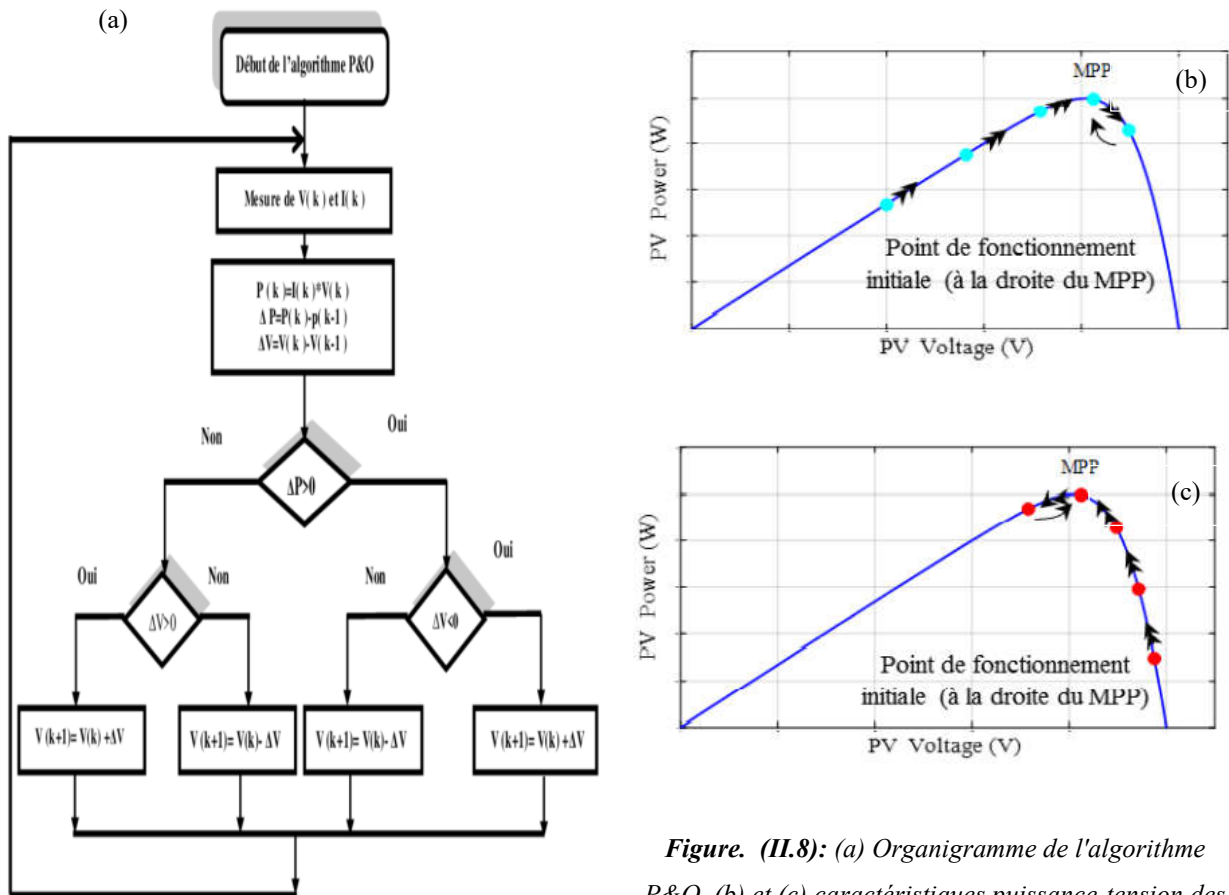


Figure. (II.8): (a) Organigramme de l'algorithme P&O, (b) et (c) caractéristiques puissance-tension des points de fonctionnement PV

II.8. La méthode d'incrémental de la conductance (INC)

L'algorithme de l'incrémental de conductance (INC) est une technique MPPT classique qui utilise deux sondes pour la mesure de la tension V de fonctionnement et du courant I du module PV. Cette méthode repose sur le fait que la dérivée de la puissance P de sortie par rapport à la tension V du module PV est égale à zéro au point de puissance maximale (MPP).

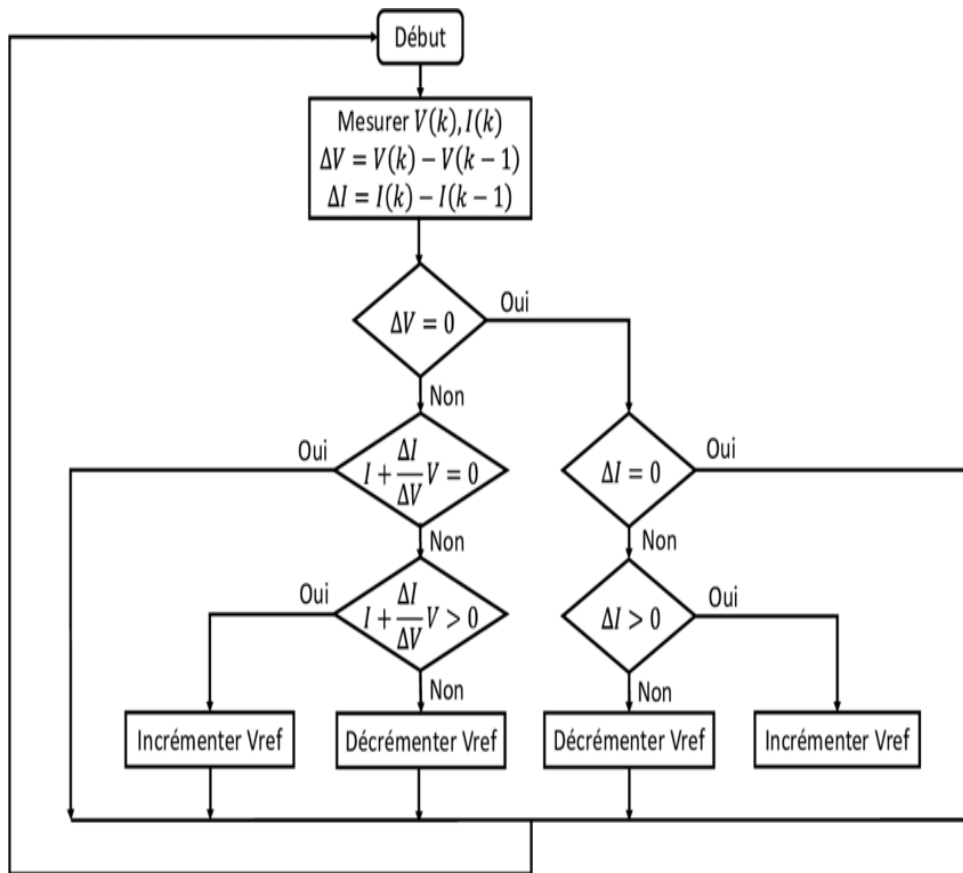


Figure. (II.9): Organigramme de l'algorithme de l'incrémental de la conductance INC.

Donc on a l'ensemble d'équations suivant:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (\text{II.7})$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Leftrightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (\text{II.8})$$

Selon l'algorithme INC représenté sur la figure (II.9), la fonction centrale utilise les conditions suivantes afin d'atteindre le MPP :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \text{ pour } \rightarrow V = V_{mpp} \quad (\text{II.9})$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ pour } \rightarrow V < V_{mpp} \quad (\text{II.10})$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \text{ pour } \rightarrow V > V_{mpp} \quad (\text{II.11})$$

Si l'équation (II.9) est vérifiée, donc le système PV a atteint le MPP et aucun changement de la tension de fonctionnement n'est nécessaire, sinon la tension de fonctionnement est modifiée en conséquence. [31]

II.9. Résultats de la Simulation de la commande MPPT

Pour tester l'efficacité des algorithmes proposés, une simulation numérique du système développée et implémentée dans le logiciel *MATLAB/SIMULINK* software. Le générateur photovoltaïque choisi est un module de (*Canadian Solar.CS5C-80M*). Les paramètres de ce module sont donnés dans tableau (II.1) et ses courbes courant-tension et puissance-tension sont représentées sur la figure (II.11), (II.12) et (II.13). Le tableau (II.2) montre les paramètres du convertisseur boost. Les réponses dynamiques pour les sorties de courant, de tension et de puissance du générateur PV sont représentées sur les figures suivant.

Tableau (II.2): Caractéristiques Principales du convertisseur boost.

Convertisseur boost	Valeurs nominales
Inductance(L)	3.3e-3 H
Capacité (C_{in})	470e-6 F
Capacité (C_{out})	470e-6 F
Résistance de la charge (R)	28 Ω

❖ Profil fixe :

On effectue la simulation du système dans les conditions standards ($E=1000W/m^2$, $T=25^\circ C$, $R=28 \Omega$) pour extraire la puissance optimale de notre système. Donc la tension du module PV après l'utilisation de la technique de recherche de l' $MPPT$ représente la tension maximale (17 V).

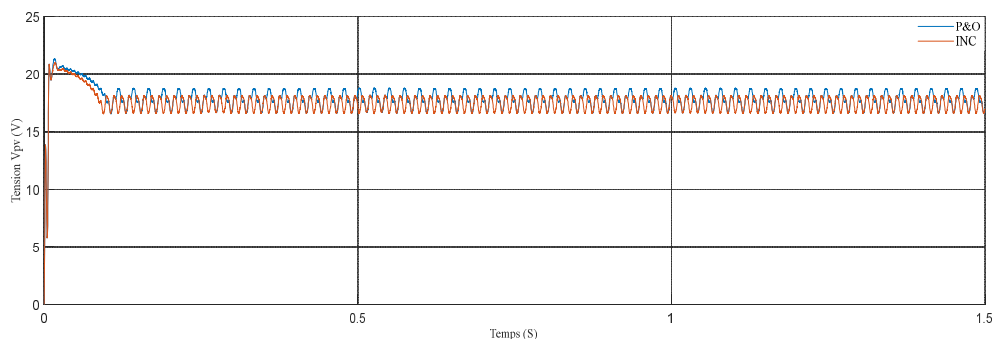


Figure. (II.11): Résultat de simulation de tension généré par PV ($E=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

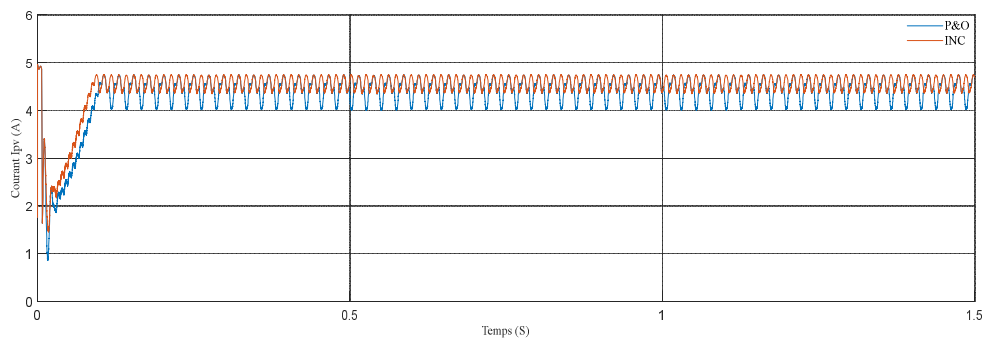


Figure. (II.12): Résultats de simulation de courant généré par PV ($E=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

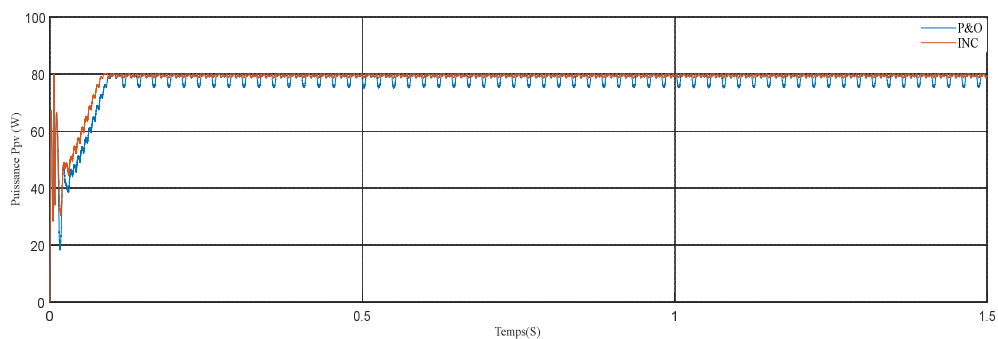


Figure. (II.13): Résultat de simulation de puissance généré par PV ($E=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

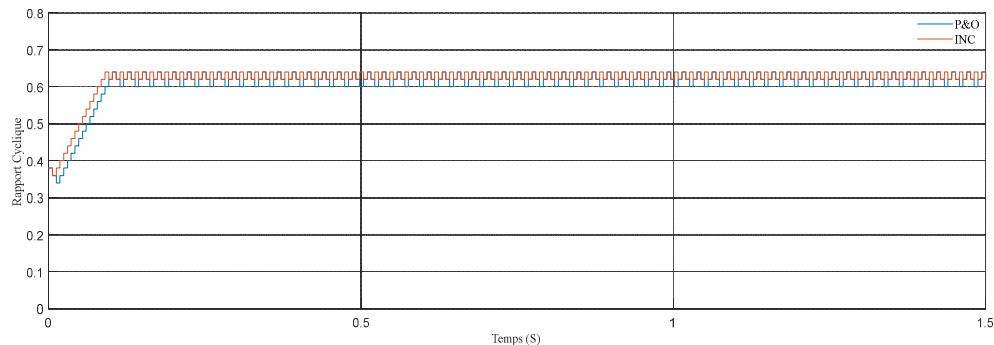


Figure. (II.14): Résultat de simulation de rapport cyclique pour ($E=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

↳ Interprétation des résultats

D'après ces résultats précédents et pour un éclairement $E=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$ (conditions standard), on constate que la puissance croit jusqu'à l'atteinte du point max *PPM* et il se stabilise jusqu'à la fin de simulation pour les deux méthodes utilisées (*P&O* et *INC*) c'est-à-dire sont en mesure de suivre correctement le *MPP*, on remarque aussi que le convertisseur Boost fournit une tension supérieure à celle fournie par le module photovoltaïque. En plus, le *INC* fournit un temps de réponse le plus court.

❖ Profil variable : (Irradiation variable et température constantes)

Nous avons effectué nos essais en appliquant sur le système une température fixe de 25°C .

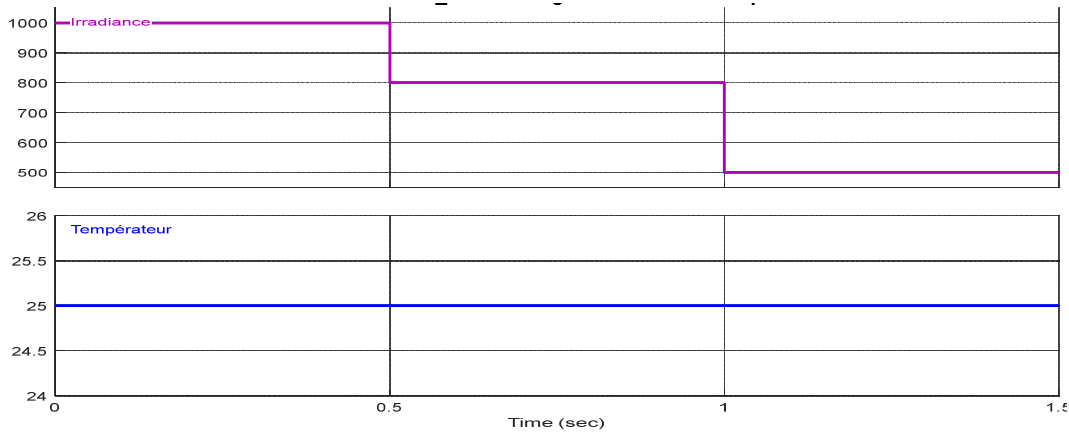


Figure. (II.15) : Variation de l'irradiation et température constantes.

↳ Interprétation des résultats

A partir des résultats de la simulation dans les figures (de (II.11) à (II.15)) pour un éclairement variable, on peut remarquer :

- Les figures (de (II.11), à (II.12) et (II.13)) montrent que l'allure des courbes de tension, du courant et la puissance et sont proportionnels à l'irradiation et ils se développent suivant la variation de cette dernière, tel que la diminution de l'irradiation implique une diminution de la puissance photovoltaïque produite dans les deux méthodes *P&O* et *INC*.
- La tension optimale correspondante, obtenue à partir des algorithmes *P&O* et *INC* est représentée sur la figure (II.15), présente des oscillations lors du changement d'irradiation. Donc le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximal correspondant à cette irradiation.
- La figure (II.20), démontre la valeur de signal de commande (rapport cyclique) présente des pics est due aux changements de l'éclairement, c'est-à-dire il est proportionnel aux variations brusques de l'éclairement.

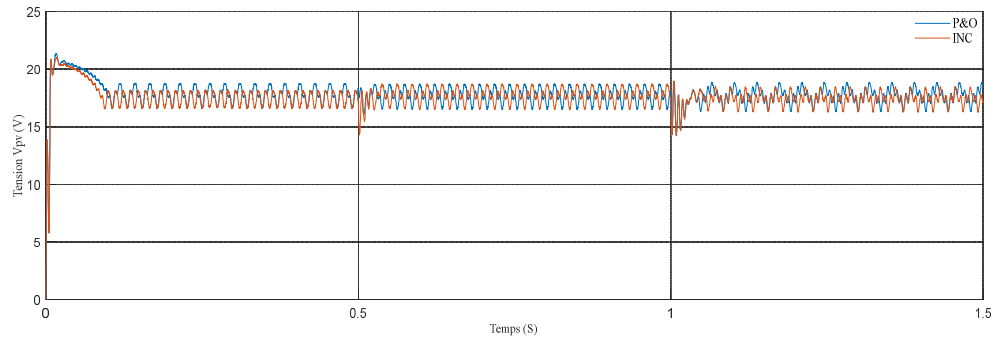


Figure. (II.16) : Résultats de simulation de tension générée par PV pour différents éclaircements ($T=25^{\circ}\text{C}$).

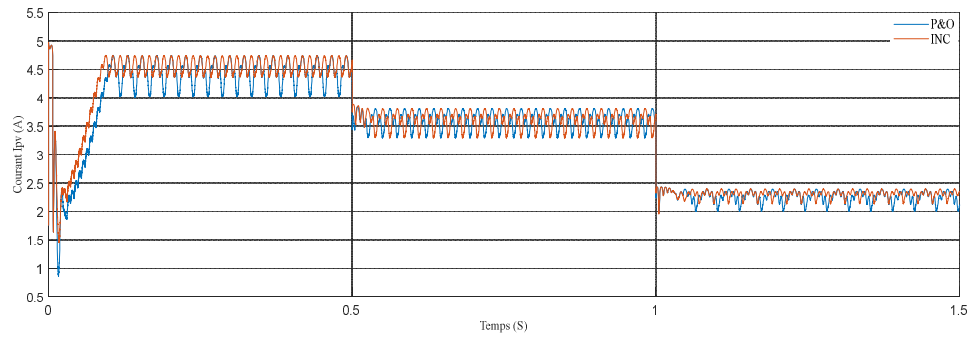


Figure. (II.17) : Résultats de simulation de courant générée par PV pour différents éclaircements ($T=25^{\circ}\text{C}$).

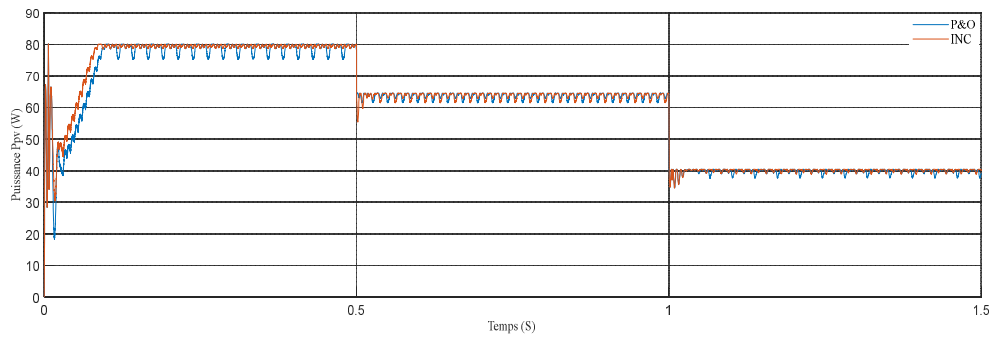


Figure. (II.18) : Résultats de simulation de puissance générée par PV pour différents éclaircements ($T=25^{\circ}\text{C}$).

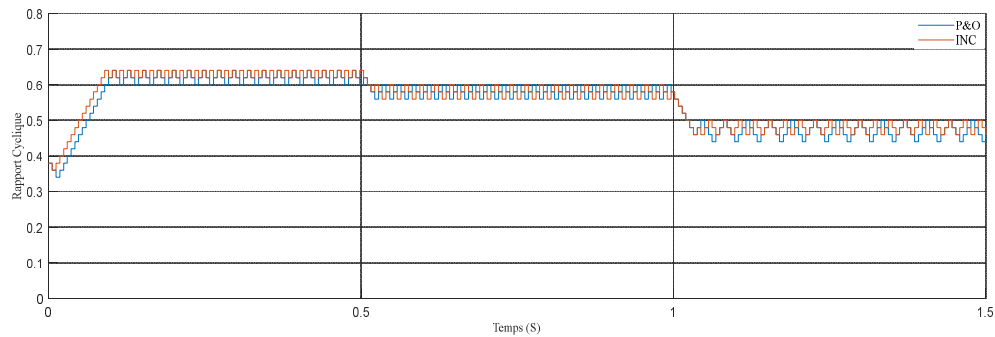


Figure. (II.19): Résultat de simulation de Rapport Cyclique pour différents éclaircements ($T=25^{\circ}\text{C}$).

❖ Avec perturbation (Irradiation constante et température variable)

Nous avons effectué nos essais en appliquant sur notre système une température variable présentée sur la figure (II.20) et une irradiation fixe de $E=1000 \text{ W/m}^2$.

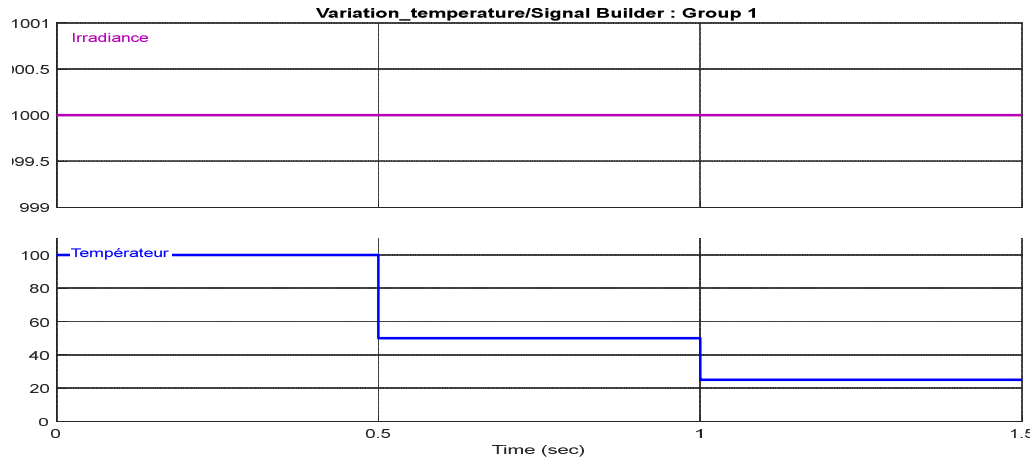


Figure. (II.20) : Variation de la température et une irradiation fixe.

↳ **Interprétation des résultats**

- Les figures (de (II.16) à (II.19)) pour température variable, représentent successivement l'allure de la tension, le courant et la puissance du module photovoltaïque lors de la variation simultanée de la température pour les deux méthodes P&O et INC.
- Le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette température.

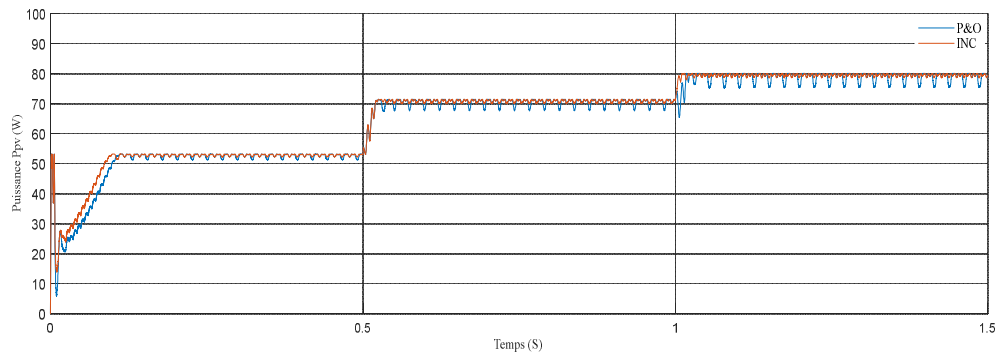


Figure. (II.21) : Résultats de simulation de puissance générée par PV pour différentes températures ($E=1000W/m^2$)

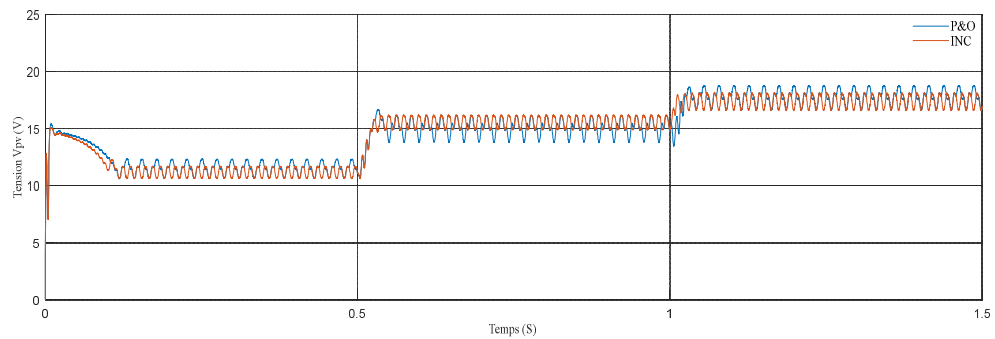


Figure. (II.22) : Résultats de simulation de tension générée par PV pour différentes températures ($E=1000 W/m^2$)

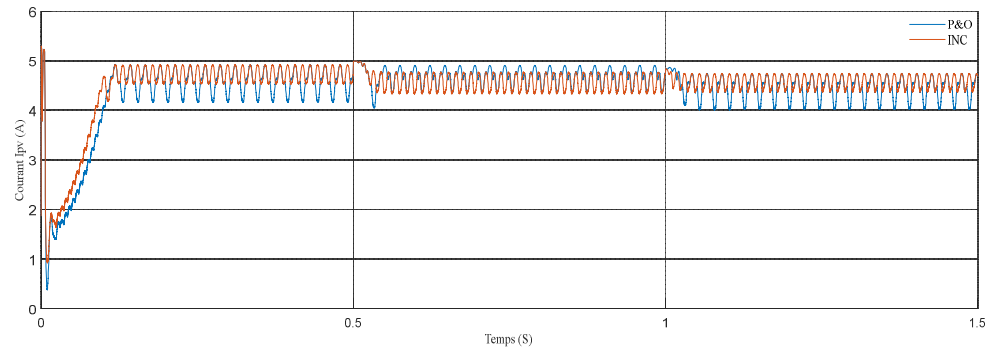


Figure. (II.23) : Résultats de simulation de courant générée par PV pour différentes températures ($E=1000 W/m^2$)

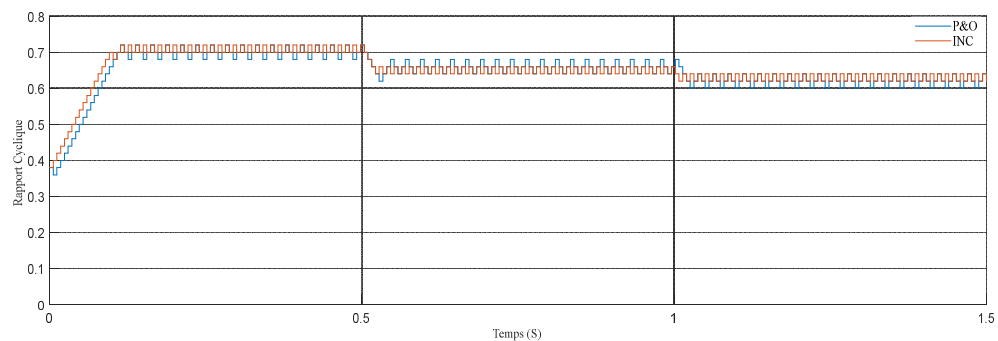


Figure. (II.24) Résultat de simulation de Rapport Cyclique pour différentes températures ($E=1000 W/m^2$)

II.10. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mieux comprendre les concepts clés liés à la connexion *GPV-charge*, à l'étage d'adaptation et aux techniques de recherche du point de puissance maximale. Les simulations ont fourni des informations précieuses sur le comportement du système photovoltaïque dans des conditions changeantes, ce qui contribue à l'amélioration de son rendement global.

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence de l'éclairement et de la température sur la puissance produite par le *GPV*. Nous avons également présenté une analyse des composants de l'étage d'adaptation, en mettant l'accent sur le convertisseur DC-DC de type "Boost" et son choix basé sur ses principes de fonctionnement. Ensuite, nous avons expliqué les principes de fonctionnement des algorithmes *MPPT* les plus couramment utilisés, à savoir "*Perturb and Observe*" (P&O) et "*Incremental Conductance*" (INC). Ces algorithmes visent à rechercher le point de puissance maximale du *GPV*.

Enfin, nous avons effectué des simulations des algorithmes de commande *MPPT* (P&O et INC) dans l'environnement *Simulink*, en tenant compte des changements rapides des conditions atmosphériques (éclairement et température). Les résultats de simulation ont été présentés pour évaluer la performance des algorithmes dans ces conditions variables.

Chapitre III.

Commande MPPT Basée sur l'Approche Floue

Chapitre III

Commande MPPT Basée sur l'Approche Floue

III.1 Introduction

La logique floue suscite un intérêt croissant parmi les chercheurs, les ingénieurs, les industriels et tous ceux qui cherchent à formaliser des méthodes empiriques, à généraliser des modes de raisonnement naturels, à automatiser la prise de décision dans leur domaine et à développer des systèmes artificiels capables d'accomplir des tâches traditionnellement réalisées par les êtres humains.

La simulation est un outil puissant pour évaluer les performances théoriques d'un système. En effet, elle permet de tester le système dans des conditions facilement contrôlables et de surveiller facilement ses performances. La procédure de simulation lie les deux principales étapes de la conception d'un système : l'étude théorique et la réalisation d'un prototype. Étant donné que des modifications de conception peuvent être facilement apportées lors de la simulation, il est possible d'expérimenter avec un large éventail de variations des conditions de fonctionnement afin d'aboutir à une solution optimale.

III.2 Logique floue

III.2.1 Historique

La logique floue (*fuzzy logic*) a fait son apparition en 1965 avec les travaux de *Lotfi Zadeh*. Ce dernier a formalisé la représentation et le traitement de connaissance imprécises ou approximatives afin de traiter des systèmes de grande complexité ou mal connus. En 1973, le professeur *Zadeh* publie un article dans l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), il y mentionne pour la première fois le terme de variables linguistiques (dont la valeur est un mot et non un nombre). En 1974, *Madani* (*Université de Londres*) réalise un contrôleur flou expérimental pour commander un moteur à vapeur. Dans les années 80, plusieurs applications commencent à émerger. Elle a été utilisée dans plusieurs domaines variés de contrôle et de régulation [35].

III.2.2 Domaine d'application

L'approche de traitement des problèmes par la logique floue est différente de celle adoptée, à priori dans une démarche scientifique. Elle est beaucoup plus pragmatique que déterministe. La décision en logique floue est basée sur la notion d'expertise qui permet de quantifier le flou à partir de connaissance à priori ou acquise antérieurement. Les domaines d'application de la logique floue dans un processus de prise de décision s'imposent dans les cas suivants [36] :

- Pour les systèmes complexes dans lesquels la modélisation est difficile ou impossible ;
- Pour les systèmes contrôlés par des experts humains ;
- Quand l'observation humaine est à l'origine d'entrées ou des règles de contrôle ;
- Pour les systèmes ayant de nombreuses entrées/sorties continues ou discontinues ;
- Pour les commandes MPPT des systèmes photovoltaïques.

III.2.3 Base de la logique floue

III.2.3.1 Principe de base de la logique floue

Dans la théorie des ensembles classiques, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble. La notion d'ensemble est à l'origine de nombreuses théories mathématiques. Cette notion essentielle ne permet cependant pas de rendre compte de situations pourtant simples et rencontrées fréquemment. C'est pour prendre en compte de telles situations, qu'a été créée la notion d'ensemble flou. La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle, chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles qui ont été définis. Les contours de chaque ensemble flou (Figure III.1) ne sont « nets », mais « flous » ou «graduels».

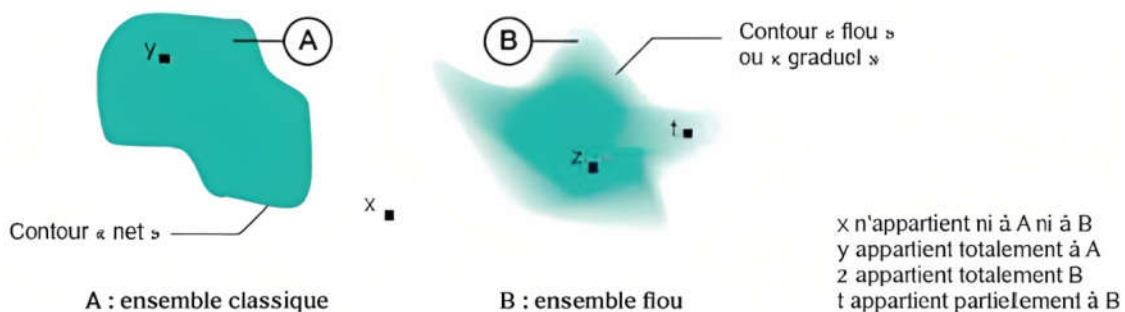


Figure III.1 Comparaison d'un ensemble classique et un ensemble flou.

III.3 Règles floues

III.3.1 La logique floue

La logique floue a pour objectif de formaliser et de mettre en œuvre la façon de raisonner d'un être humain. En cela, elle peut être classée dans le domaine de l'intelligence artificielle. L'outil le plus utilisé dans les applications de logique floue est la base de règles floues. Une base de règles floues est composée de règles qui sont généralement utilisées en parallèle, mais peuvent également être enchaînées dans certaines applications. Une règle est du type : SI « prédicat » ALORS « conclusion ». Par exemple : SI température élevée et pression forte ALORS ventilation forte et soupape grande ouverte.

a. Prédicat : Un prédicat (encore appelé prémisse ou condition) est une combinaison de propositions par des opérateurs ET, OU, NON. Les propositions « température élevée » et « pression forte » de l'exemple précédent sont combinées par l'opérateur ET pour former le prédicat de la règle. **b. Conclusion** : La conclusion d'une règle floue est une combinaison de propositions liées par des opérateurs ET. Dans l'exemple précédent, « ventilation forte » et « soupape grande ouverte » sont la conclusion de la règle. Le traitement flou d'une règle comporte trois étapes fonctionnelles résumées dans la figure (III.2) [36].

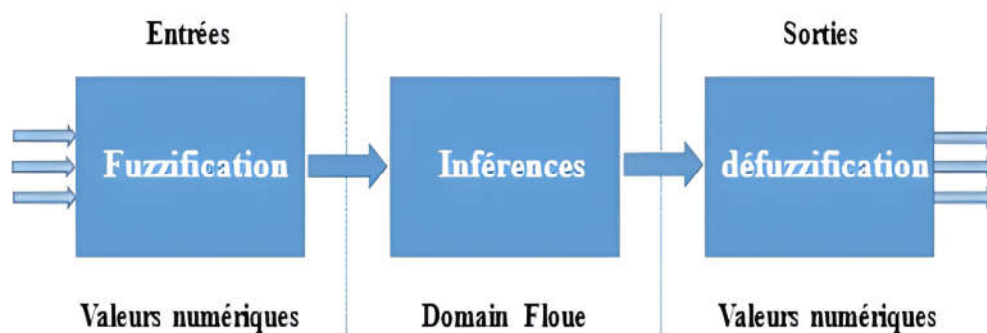


Figure (III.2). Traitement flou.

III.4 Technique MPPT par logique floue

Récemment, des contrôleurs à logique floue ont été introduits dans le suivi du PPM dans les systèmes PV. Pour un régulateur flou la connaissance du modèle mathématique du processus n'est pas nécessaire. C'est l'expérience des opérateurs du procédé ou les connaissances des experts, qui sont pris en compte pour établir la commande floue. Les algorithmes de réglage conventionnels sont alors remplacés par une série de règles linguistiques.

La commande par logique floue peut opérer lorsque les procédés à commander sont mal connus ou difficiles à décrire précisément, ou lorsque les variables sont évaluées subjectivement et exprimées en langage naturel et non numériquement. Elle est simple à réaliser, flexible et donc facilement adaptable aux conditions de fonctionnement du processus. Les règles sont faciles à comprendre et à modifier puisqu'elles sont exprimées par des termes du langage naturel. L'architecture interne d'un régulateur floue est donnée par la figure (III.3) [37].

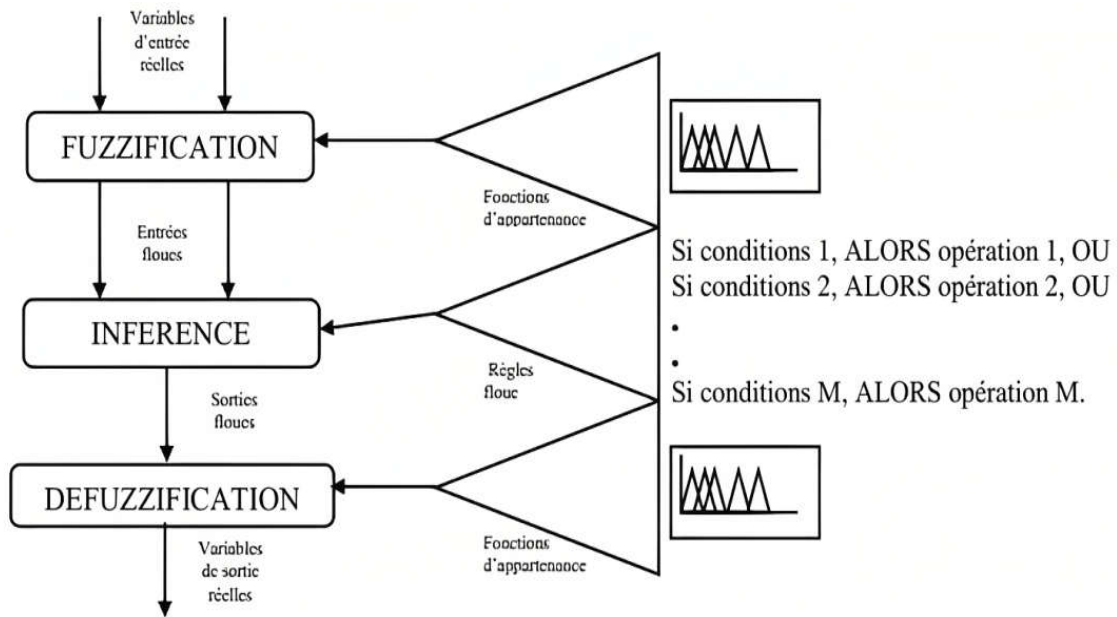


Figure (III.3). Structure d'un régulateur flou.

III.4.1 Fuzzification

L'opération de fuzzification, permettant le passage des grandeurs réelles aux valeurs floues, consiste à déterminer les différents univers de discours correspondant aux domaines de variation des variables d'entrée et de sortie. Ensuite, définir pour chacune des variables ses sous-ensembles flous ainsi que leurs fonctions d'appartenance associée [36, 38].

III.4.2 Inférence

L'opération d'inférence permet de relier les valeurs des variables linguistiques d'entrée à celles des variables linguistiques de sortie par une table de règles, qui doivent tenir compte du comportement statique et dynamique du système à commander. C'est un mécanisme qui, en manipulant les règles floues, établit une décision.

Il existe plusieurs méthodes d'inférence : Maximum-Minimum, MaxProduit, Somme Produit. Le nom de la méthode désigne les opérateurs utilisés respectivement pour l'agrégation des règles floues et l'implication floue [36, 38].

III.4.3 Défuzzification

Elle consiste à définir précisément quelle doit être l'action sur le processus. En effet, le procédé ne peut pas interpréter des ordres linguistiques fournis par les méthodes d'inférence.

L'opération de défuzzification permet de calculer à partir de la fonction d'appartenance résultante, la valeur réelle de la variable de sortie à appliquer au processus. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification : méthode du maxima, méthode du centre de gravité, méthode de la moyenne des maxima. Il est toutefois reconnu que la méthode du centre de gravité donne les meilleurs résultats. Notons que des blocs de normalisation et de dé normalisation sont ajoutés respectivement en entrée et en sortie du régulateur floue afin qu'il soit transportable et adaptable même avec des paramètres différents [36-39].

III.5 Commande MPPT à base de contrôleur floue

Dans un but de poursuivre le point maximum de puissance, comme pour toutes les méthodes de poursuite MPPT, 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 III.4).

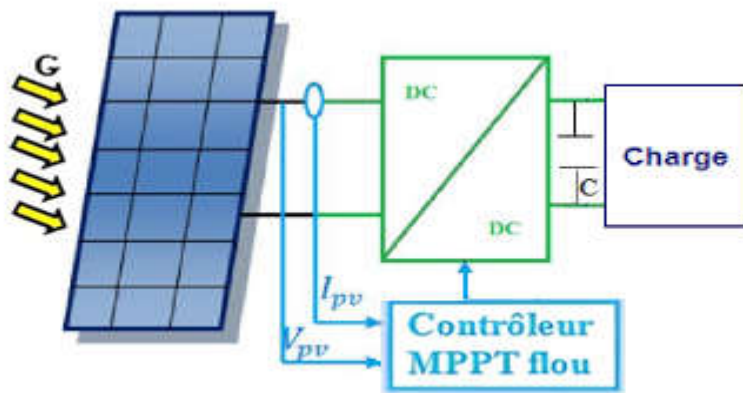


Figure (III.4). Schéma synoptique d'un système PV avec une commande MPPT floue.

Comme tous contrôleurs flous, le contrôleur MPPT flou comporte les trois blocs suivants : Fuzzification des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions triangulaire, ensuite l'inférence ou ces variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis pour déterminer la réponse appropriée. Et enfin la défuzzification pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs en utilisant la défuzzification par le centre de gravité.

La structure de base de notre contrôleur flou est donnée par la figure (III.5).

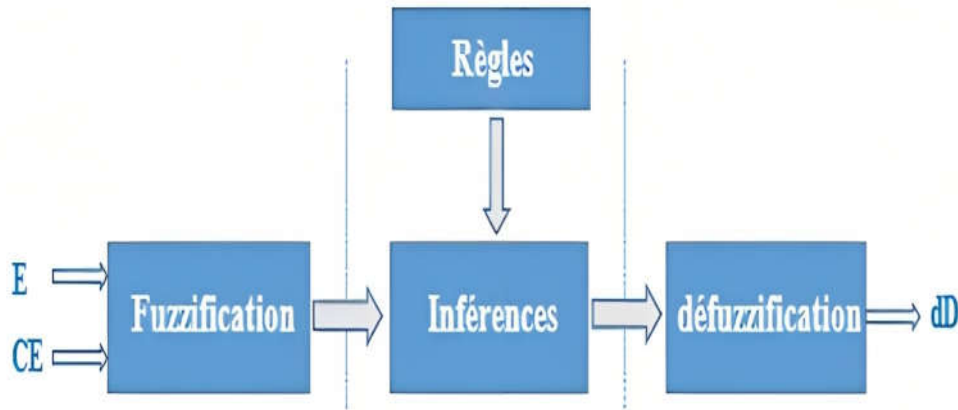


Figure (III.5). Structure de base d'un contrôleur flou.

Avec : dD : La variation du rapport cyclique D ,

E : L'erreur, CE : La variation de l'erreur.

Pour l'implémentation de notre contrôleur flou, nous allons nous baser sur l'algorithme MPPT P&O, pour modéliser les différentes parties de ce contrôleur.

III.5.1 Fuzzification

La tension et le courant actuels du générateur photovoltaïque sont mesurés instantanément, et la puissance peut être ainsi calculée :

$$E(k) = \frac{p(k) - p(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (III.1)$$

$$CE = E(k) - E(k-1) \quad (III.2)$$

Où $P(k)$ et $V(k)$ sont la puissance et la tension de module PV, respectivement. Dans le cas de notre travail on va choisir l'univers de discours des variables d'entrée (erreur (E)) et le changement d'erreur (CE)) et de sortie (dD) d'après la méthode P&O qui a été étudiée précédemment.

D'après la figure (III.6) on peut déduire l'univers du discours de chaque variable d'entrée/sortie comme suit :

$$\begin{cases} E = \frac{\Delta p}{\Delta V} \in [-50 \quad 6.6] \\ CE = E(k) - E(k-1) \in [-50 \quad 6.6] \end{cases} \quad (III.3)$$

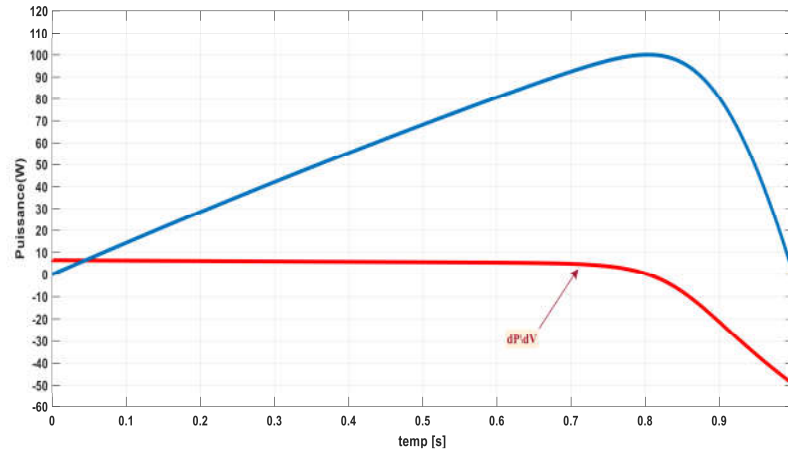


Figure (III.6). Variation de la puissance par rapport à la variation de la tension.

De la même manière, nous pouvons définir l'intervalle de variation du rapport cycle D comme suit :

$$dD \in [-0.1 \quad 0.1] \quad (III.4)$$

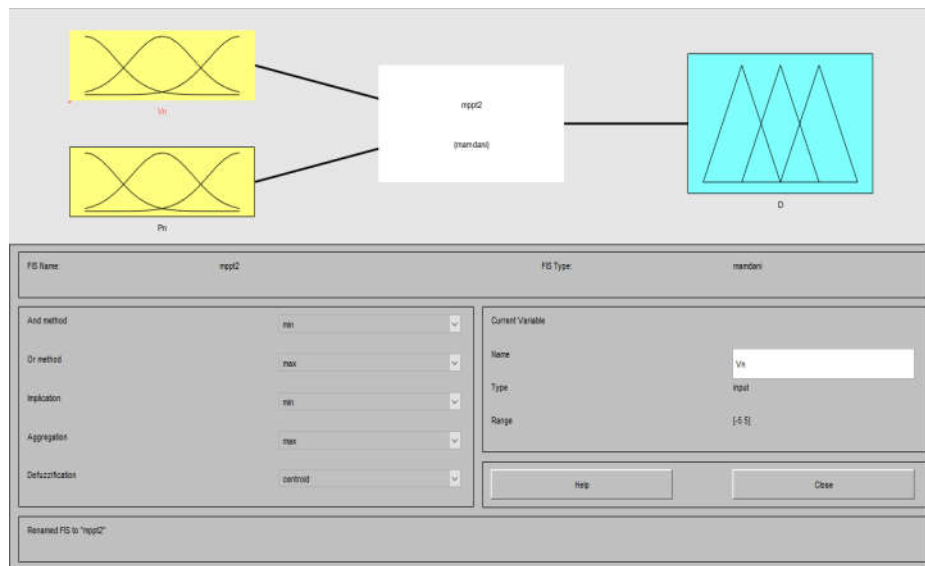
La valeur de l'entrée $E(k)$ nous indique de quel côté est situé le point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale MPP. Si cette valeur est positive, cela veut dire que le point de fonctionnement se trouve à gauche du point MPP, si par contre elle est négative alors le point de fonctionnement est à droite du point MPP. L'entrée $CE(k)$ nous permet d'estimer le degré d'éloignement entre le point de fonctionnement et le point MPP. Si sa valeur est petite, cela veut dire que le point de fonctionnement est encore loin du point MPP, si par contre cette valeur est élevée cela indique que le point de fonctionnement est très proche du point MPP. Ces deux entrées nous permettent de prendre la décision appropriée sur la valeur de la sortie dD du pas du rapport cyclique. Augmenter le rapport cyclique du convertisseur DC-DC permet d'augmenter la tension du point de fonctionnement et inversement.

III.5.2 Les variables linguistiques

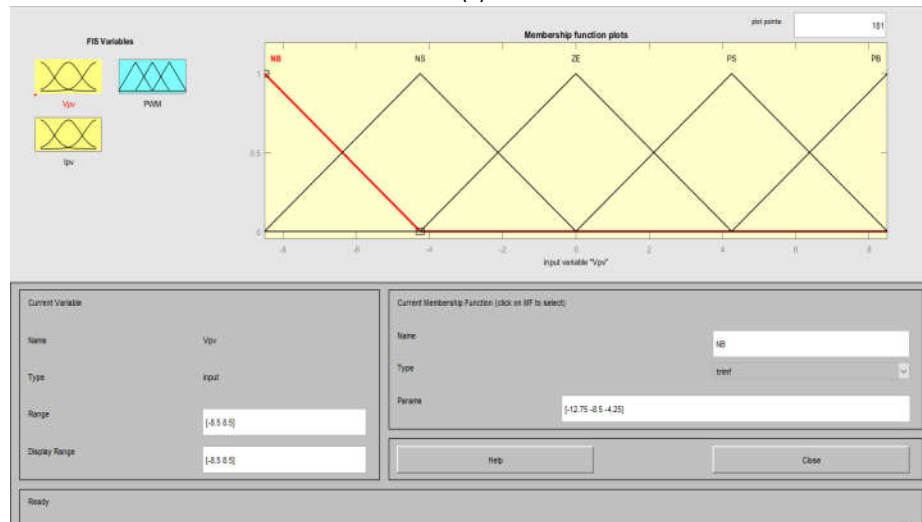
En utilisant les bases des sous-ensembles flous, on peut exprimer les variables d'entrées et de sorties en termes des variables linguistiques suivantes : PG : (positif grand), PP : (positif petit), ZE : (environ Zéro), NP : (négatif petit) et NG : (négatif grand).

Les fonctions d'appartenance sont représentées par la figure suivante. Afin de simplifier notre exemple, on prend des fonctions d'appartenance triangulaires.

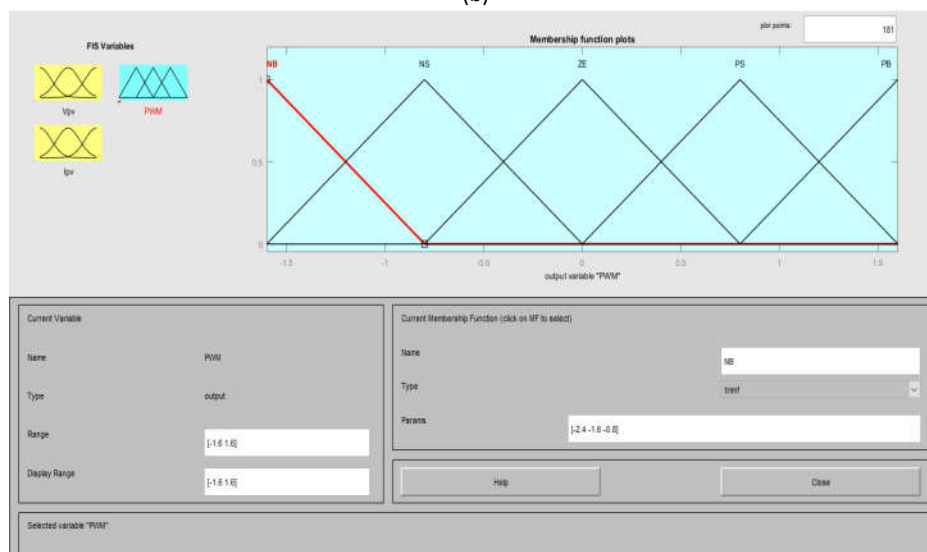
La figure (III.7) – Fonctions d'appartenances de : (a) ; L'entrée erreur E , (b) L'entrée changement d'erreur CE et (c) La sortie dD . Montre les fonctions d'appartenance du cinq sous ensemble flou de base pour les variables d'entrée et de sortie.



(a)



(b)



(c)

Figure (III.7). Représentation des fonctions d'appartenance.

Le fonctionnement du Fuzzy dépend des réglés introduites dans le bloc «Rules Editor», comme illustré dans la figure (III.8).

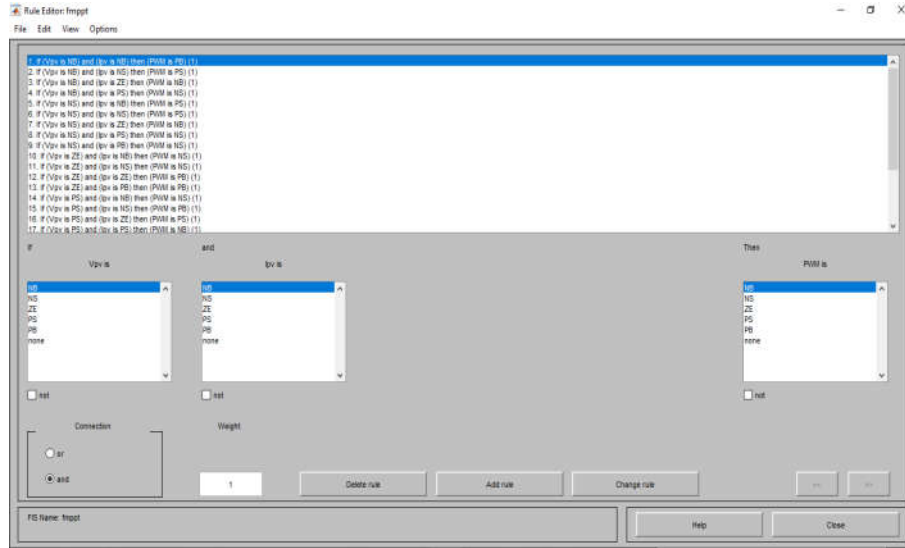


Figure (III.8). Schéma bloc de l'algorithmme à base de la logique floue.

III.6. Inférence

Après l'étape de fuzzification, l'étape d'inférence commence à construire des règles floues qui permettent d'aboutir à la commande en fonction des valeurs de l'erreur et de sa variation. Les règles floues relient les variables de sortie aux variables d'entrée pour tirer des conclusions ou des inférences floues. Une règle floue comporte une prémisse du genre « Si l'erreur est négative (N) ET la variation de l'erreur est négative (N) » et une déduction floue du type « Alors la variation du rapport cyclique est positive (+) ». Dans notre cas les deux variables d'entrées sont définies, chacune, par 3 ensembles flous, on aboutit à 3×3 règles floues (Tableau III.1).

Grâce à ces règles floues, et en répondant à la spécification du système, dans notre cas, il s'est positionné au point de puissance maximale. La matrice d'inférence du contrôleur MPPT fluu donnant la sortie ΔD peut être tracée (Tableau III.1).

Tableau (III.1). Règles d'inférence du contrôleur MPPT fluu.

$\Delta P(K)$ $\Delta D(K)$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	NM	NM	NB	NB
NS	PB	PM	PS	NS	NS	NM	NB
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NB	NM	NS	PS	PS	PM	PB
PB	NB	NB	NM	PM	PM	PB	PB

III.7 Avantages et inconvénients du réglage par logique floue [28]

III.7.1 Avantages du réglage par logique floue

- ☑ Le non nécessité de la modélisation du système.
- ☑ La possibilité d'implémenter des connaissances linguistiques de l'opérateur du processus.
- ☑ La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (systèmes non linéaire et difficile à modéliser).
- ☑ La disponibilité de système de développement efficace, soit par microprocesseur ou PC, soit par des circuits intégrés.

III.7.2 Inconvénients du réglage par logique floue

- ☒ Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix de grandeur mesurée. Détermination de la fuzzification, des inférences et de la dé fuzzification).
- ☒ L'approche artisanale et asymptotique (implantation des connaissances de l'opérateur souvent difficile).
- ☒ L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute circonstances (en l'absence d'un modèle valable).
- ☒ La cohérence des inférences non garanties (possibilité d'apparition de règles d'inférences contradictoires).

III.8 . Simulation d'un système photovoltaïque

❖ **Profil fixe** : On effectue la simulation du système dans les conditions standards ($E=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$, $R=28\ \Omega$) pour extraire la puissance optimale de notre système. Donc la tension du module PV après l'utilisation de la technique de recherche de l'*MPPT* représente la tension maximale (17.7 V).

❖ **Interprétation des résultats**

D'après ces résultats précédents et pour un éclairement $E=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$ (conditions standard), on constate que la puissance croit jusqu'à l'atteinte du point max *PPM* et il se stabilise jusqu'à la fin de simulation pour la méthode de logique floue :

On remarque sur la figure (III.9) que le signal de logique floue atteint et converge vers la puissance maximale $\approx 80\text{ (w)}$, ce qui montre l'efficacité et la robustesse de son algorithme.

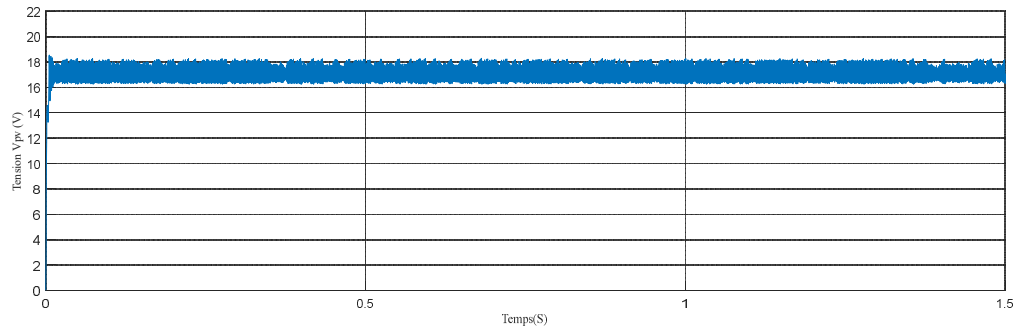


Figure (III.9). Résultat de simulation de tension généré par PV

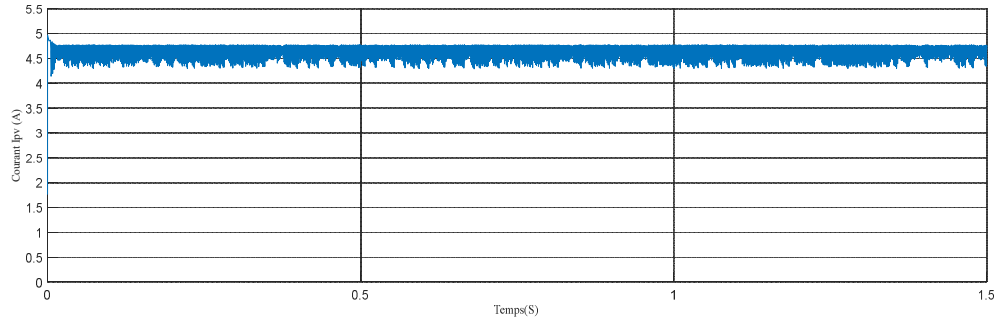


Figure (III.10). Résultats de simulation de courant généré PV

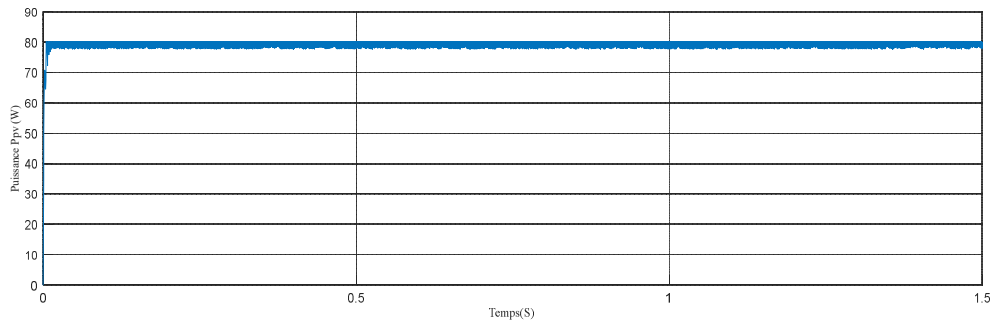


Figure (III.11). Résultat de simulation de puissance généré par PV

❖ **Profil variable : Irradiation variable et température constantes**

Nous avons effectué nos essais en appliquant sur le système une température fixe de 25°C.

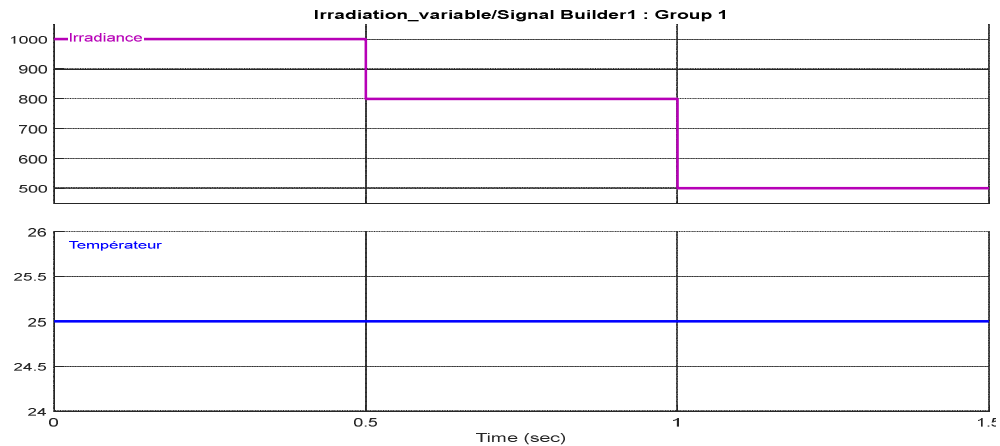
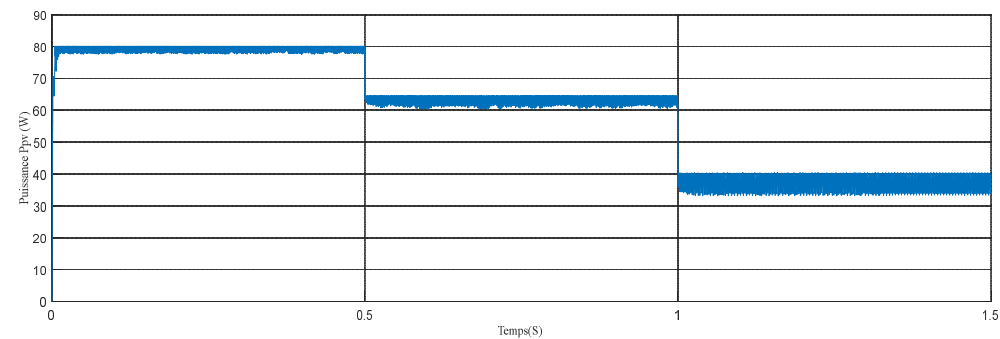
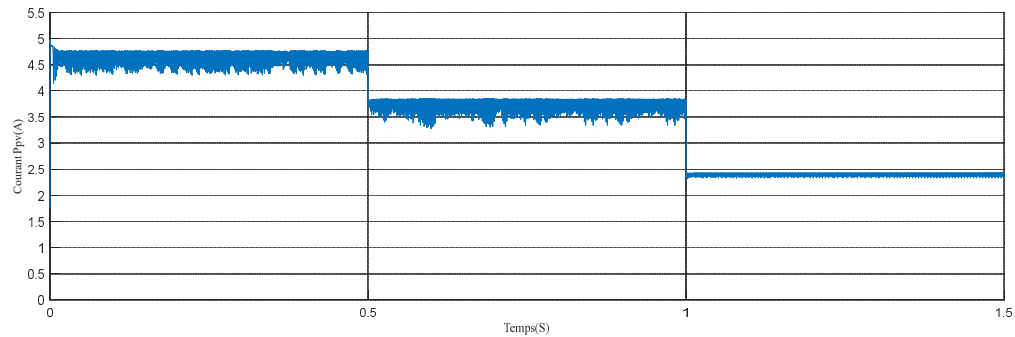
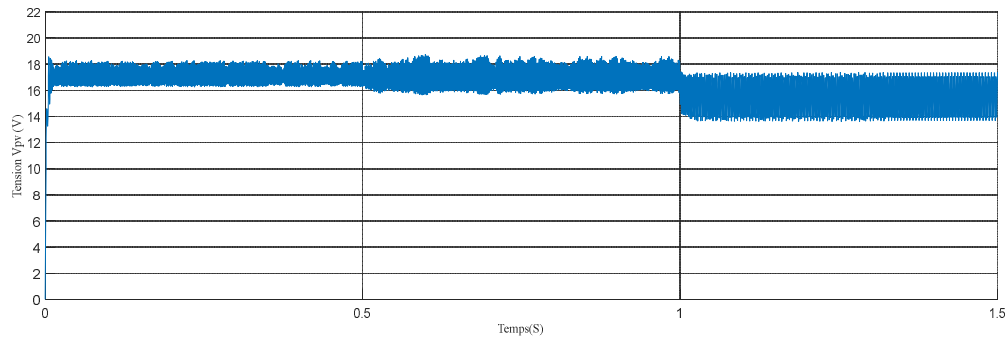


Figure (III.12). Variation de l'irradiation et température constantes.



↳ Interprétation des résultats

A partir des résultats de la simulation dans les figures (III.12) à (III.15) pour un éclairage variable, on peut remarquer :

- Les figures ((III.13-15)) montrent que l'allure des courbes de tension, de courant et d'énergie est proportionnelle à l'irradiation et évolue en fonction du changement de ce dernier, de sorte qu'une diminution du rayonnement signifie une légère diminution de l'énergie photoélectrique générée par la méthode de la logique floue.
- La tension optimale, obtenue à partir de l'algorithme de logique floue illustré à la figure (III.12), affiche les oscillations lors du changement d'irradiation. Ainsi le point d'énergie maximum se déplace pour atteindre le nouveau maximum correspondant à cette irradiation.

❖ **Profil variable : Température variable et irradiation constante**

Nous avons effectué nos essais en appliquant sur notre système une température variable présentée sur la figure (III.16) et une irradiation fixe de $E=1000 \text{ W/m}^2$.

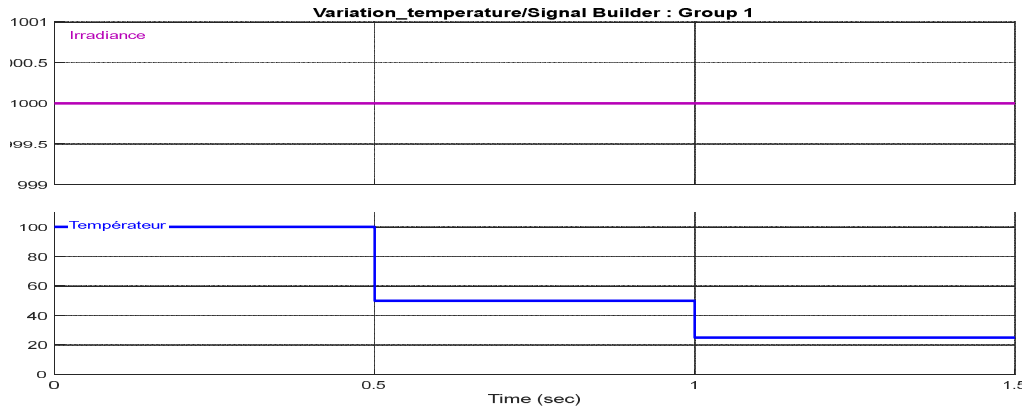


Figure (III.16). Variation de la température et une irradiation fixe.

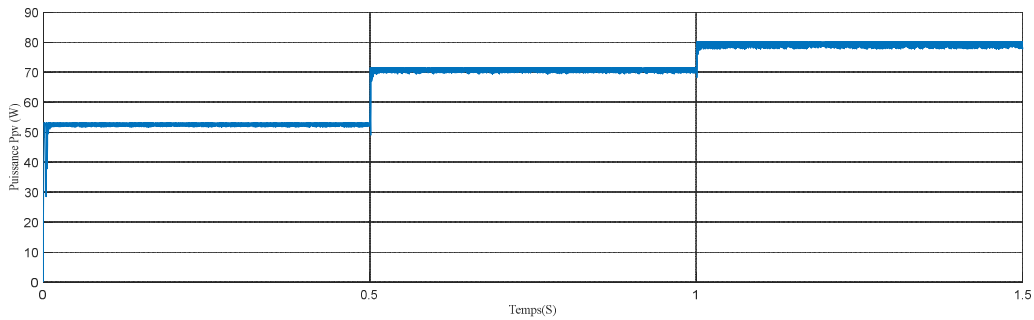


Figure (III.17). Résultats de simulation de puissance générée par PV ($E=1000 \text{ W/m}^2$.)

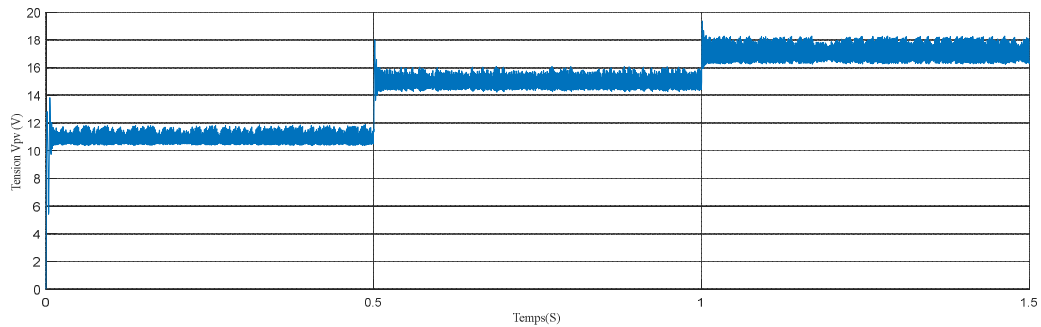


Figure (III.18). Résultats de simulation de tension et (c) générée par PV ($E=1000 \text{ W/m}^2$)

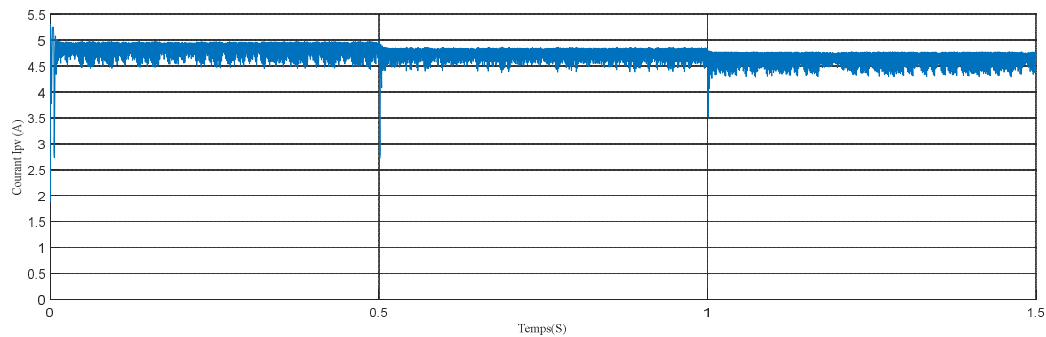


Figure (III.19). Résultats de simulation de courant générée par PV ($E=1000 \text{ W/m}^2$)

↳ Interprétation des résultats

Cette méthode s'est avérée très efficace lorsque modification des conditions climatiques.

9. Etude comparative par simulation

Cette partie est consacrée à l'étude comparative des trois méthodes (P&O, INC, FLC) suit le point de puissance maximum.

❖ **Profil fixe** : Une étude a été faite sous les conditions STC c'est à-dire avec un éclairement fixé à 1000W/m^2 et la Température à 25°C .

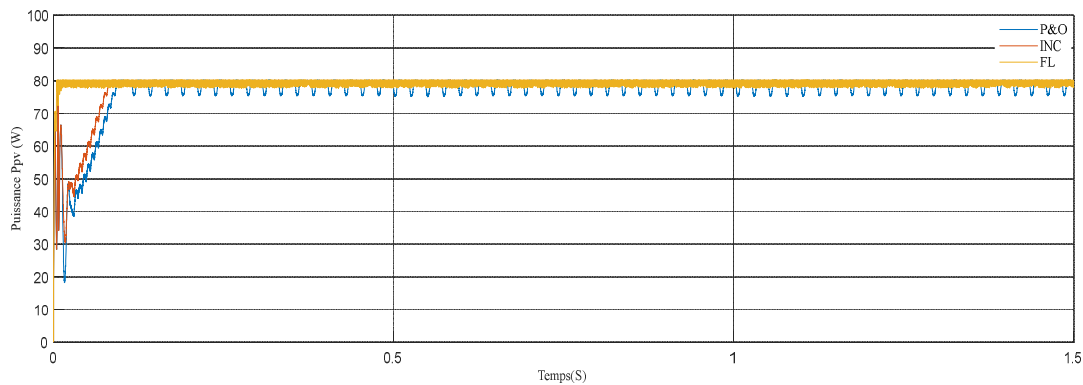


Figure (III.20). Résultat de simulation de puissance générée par PV ($E=1000\text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

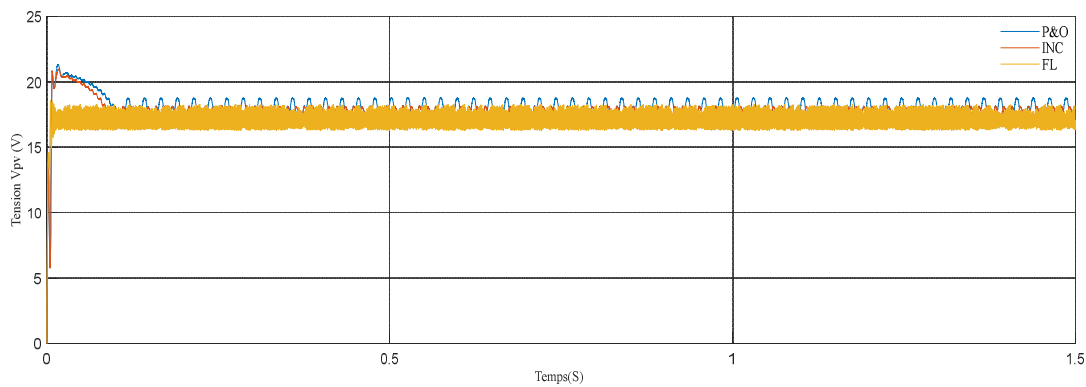


Figure (III.21). Résultat de simulation de tension générée par PV ($E=1000\text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

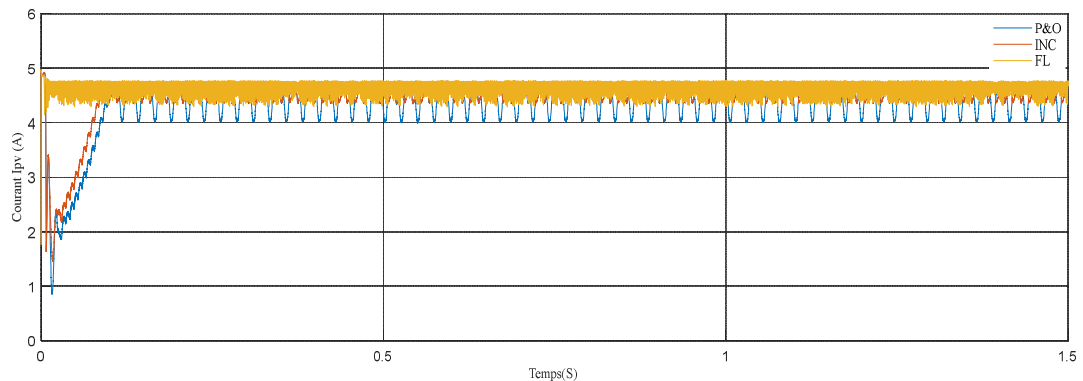


Figure (III.22). Résultat de simulation de courant généré par PV ($E=1000\text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

❖ Profil variable : Irradiation variable et température constantes

Nous avons effectué nos essais en appliquant sur le système une température fixe de 25°C.

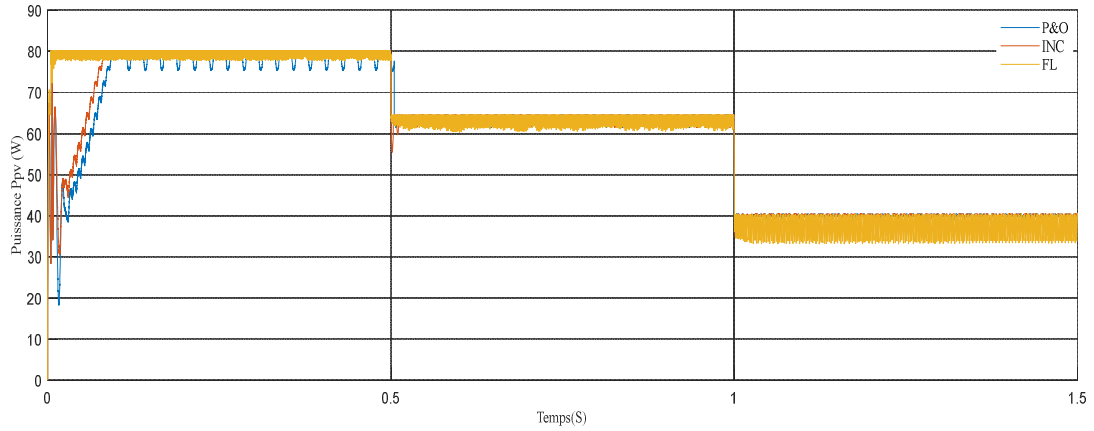


Figure (III.23). Résultats de simulation de puissance générée par PV ($T=25^{\circ}\text{C}$).

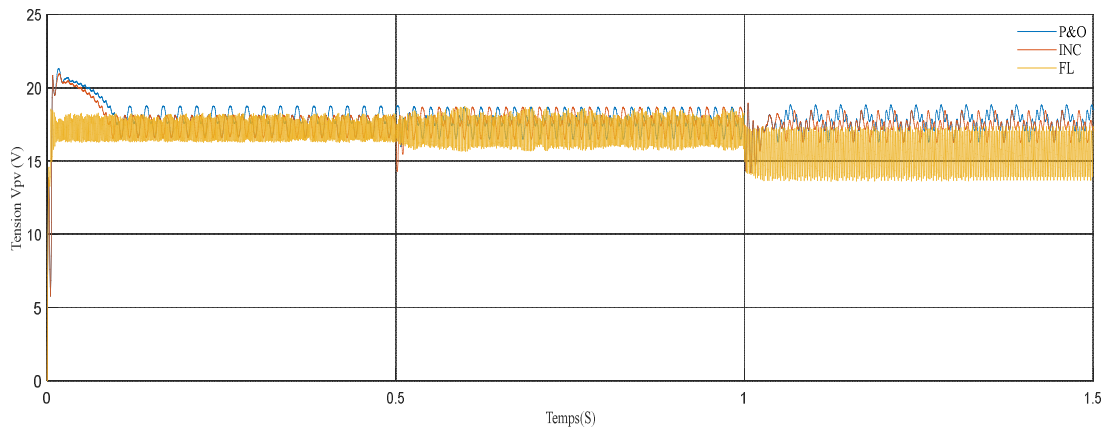


Figure (III.24). Résultats de simulation de tension générée par PV ($T=25^{\circ}\text{C}$).

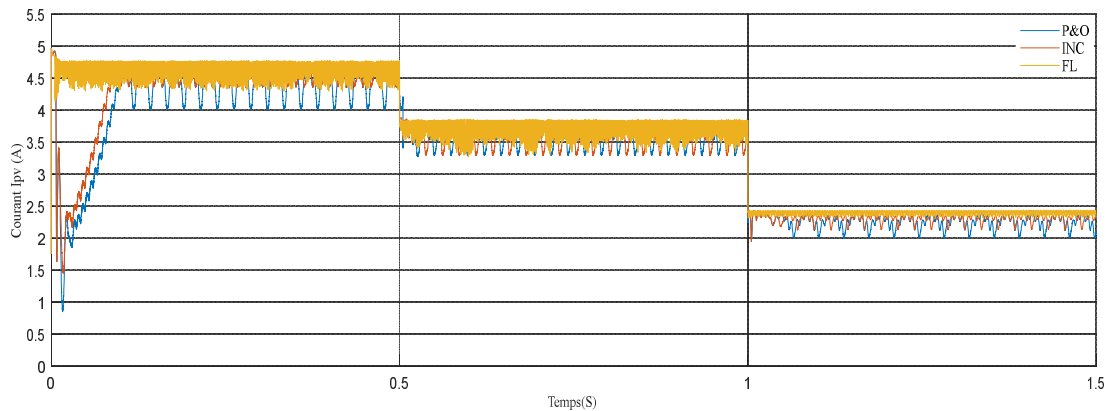


Figure (III.25). Résultats de simulation de courant générée par PV ($T=25^{\circ}\text{C}$).

❖ Profil : Irradiation constante et température variable

Nous avons effectué nos essais en appliquant sur notre système une température variable présentée sur la figure (III.26) et une irradiation fixe de $E=1000 \text{ W/m}^2$.

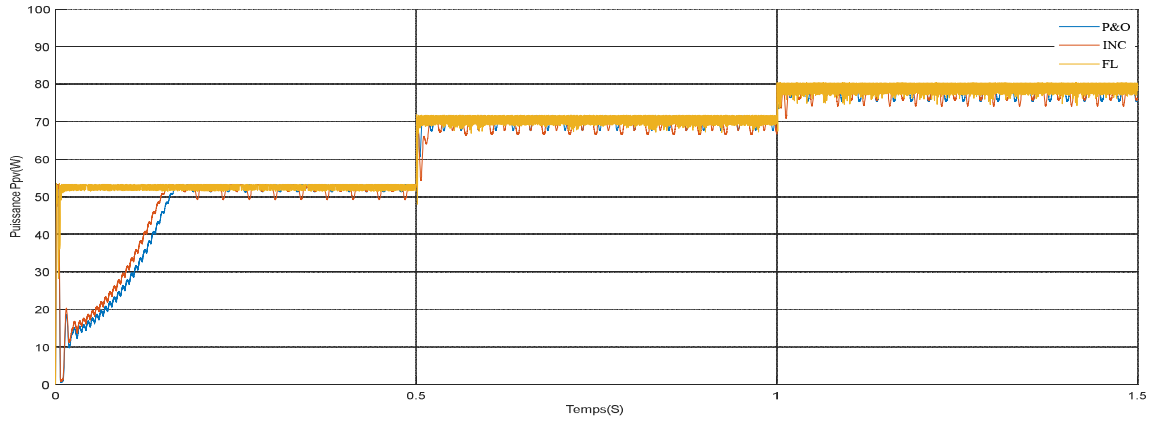


Figure (III.26). Résultats de simulation de puissance générée par PV ($E=1000 \text{ W/m}^2$)

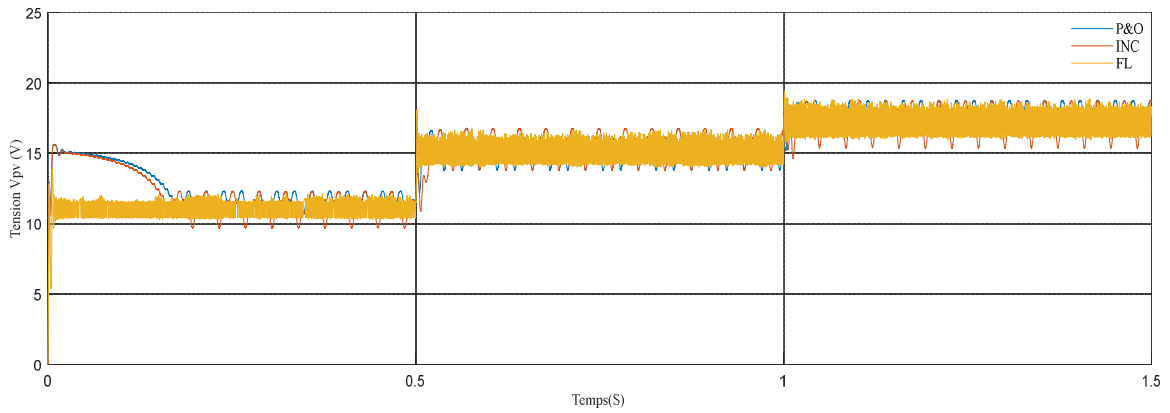


Figure (III.27). Résultats de simulation de tension générée par PV ($E=1000 \text{ W/m}^2$)

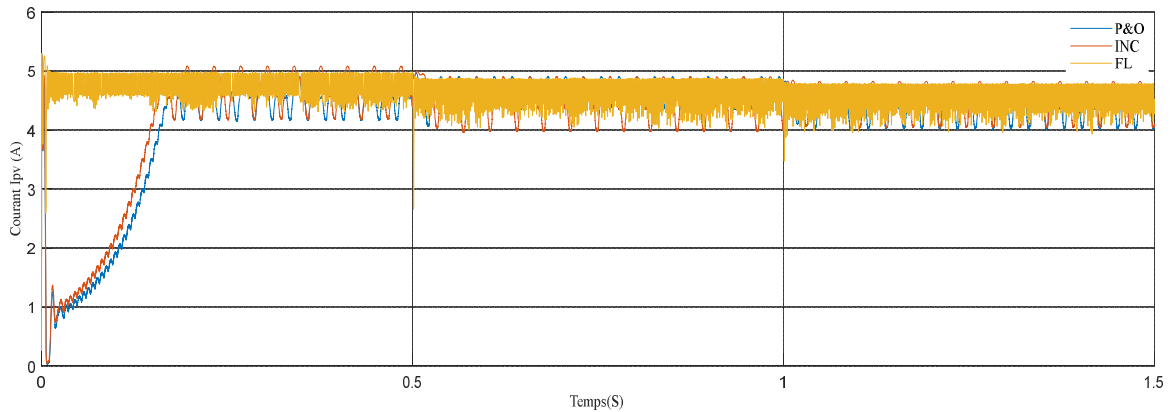


Figure (III.28). Résultats de simulation du courant générée par PV ($E=1000 \text{ W/m}^2$)

↳ **Interprétation des résultats**

Les simulations effectuées en utilisant les techniques P&O, INC et FLC dans différentes conditions météorologiques ont démontré que le contrôleur MPPT FLC obtenait de meilleurs résultats en termes de robustesse face aux changements des paramètres météorologiques, par rapport aux contrôleurs MPPT P&O et INC. La puissance de charge suit fidèlement la puissance du GPV, indépendamment des variations des paramètres météorologiques pour les deux contrôleurs.

L'algorithme FLC fonctionne au point optimal sans oscillations et présente également un bon comportement en régime transitoire. Toutefois, l'implémentation de ce type d'algorithme est plus complexe que celle des algorithmes classiques, en plus de dépendre du tableau d'inférences.

III. 10. Conclusion

Les simulations effectuées en utilisant les techniques P&O, INC et logique floue dans différentes conditions météorologiques ont permis de conclure que le contrôleur flou offre de meilleurs résultats en termes de robustesse et de rapidité par rapport aux contrôleurs P&O et INC.

La méthode P&O, bien qu'efficace pour le suivi du PPM, présente des pertes de puissance considérables en raison des oscillations du point de fonctionnement du système autour de sa position optimale et d'un régime transitoire prolongé.

La méthode INC est une amélioration de la méthode P&O, offrant des pertes de puissance moindres autour du PPM par rapport à la méthode P&O, ainsi qu'un régime transitoire plus court.

En utilisant le contrôleur flou pour la poursuite du point maximum, la vitesse de suivi est plus rapide et le taux d'ondulation autour du PPM est très faible, même face à différentes variations. Les pertes de puissance sont également réduites pendant le régime transitoire, ce qui entraîne une amélioration du rendement du système.

Chapitre IV

Réalisation d'un convertisseur

Boost MPPT

Chapitre IV

Réalisation d'un convertisseur Boost MPPT

IV.I. Introduction

Dans ce chapitre dédié à la réalisation du système PV, nous détaillons les étapes de construction de le hacheur Boost. Nous présentons également la carte Arduino UNO utilisée dans ce projet. Ensuite, nous mettons en avant les différents composants du système, tels que le module *Sunmodule SW 80*, le capteur de courant et le capteur de tension. Enfin, nous procédons à des tests pratiques du système PV pour évaluer son fonctionnement réel.

IV.2 Module photovoltaïque



Figure (IV.1). Les modules PV utilisés dans notre étude

IV. 3. Microcontrôleur

Le microcontrôleur Arduino UNO utilise le microprocesseur ATmega328P. Ce processeur fonctionne à une fréquence d'horloge de 16 MHz. Il possède une mémoire RAM de 2 kB, EEPROM de 1 kB et aussi une mémoire Flash de 32 kB (pour la programmation et l'enregistrement de données).

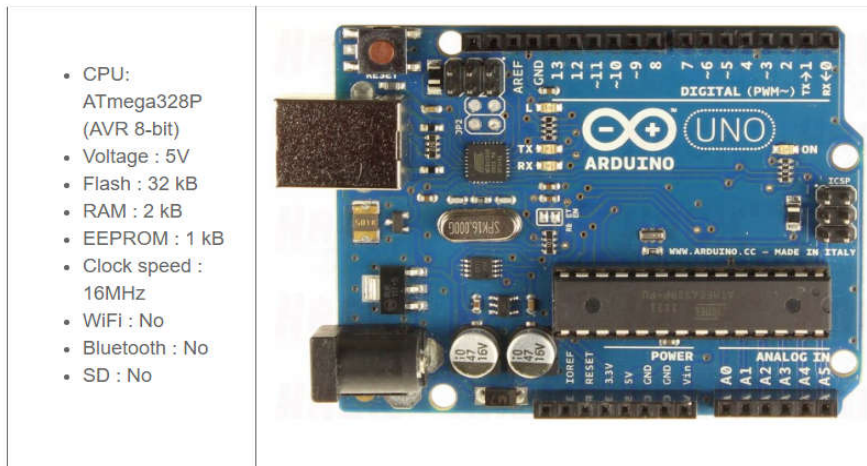


Figure (IV.2). Carte Arduino UNO

IV.4. Réalisation d'un convertisseur Boost :

Les composants de le hacheur sont :

Tableau (IV.2). Les composants de le hacheur

Convertisseur boost	Valeurs nominales
Inductance(L)	3.3e-3 H
Capacité (C_{in})	470e-6 F
Capacité (C_{out})	470e-6 F
L'optocoupleur	HCPL 3180
Régulateur 15 V	B0515S- 1W
La diode	MBR20100 CT
Transistor	IRFP260

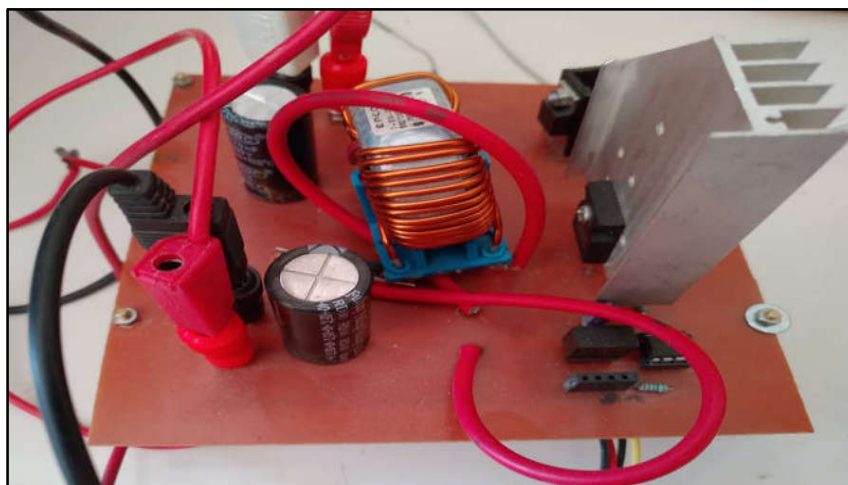


Figure (IV.3). Photo réelle de convertisseur-Boost.

IV. 5. Résultats pratique

Les résultats pratiques, des algorithmes étudiés, sont données par les figures (IV.4). Ces figures montrent la puissance fournie par le GPV pour une paire de la température et de l'éclairement à différentes conditions ambiantes.



Figure (IV.4). Schéma global du système photovoltaïque réalisé.

IV.5.2. Résultats pour la méthode P&O

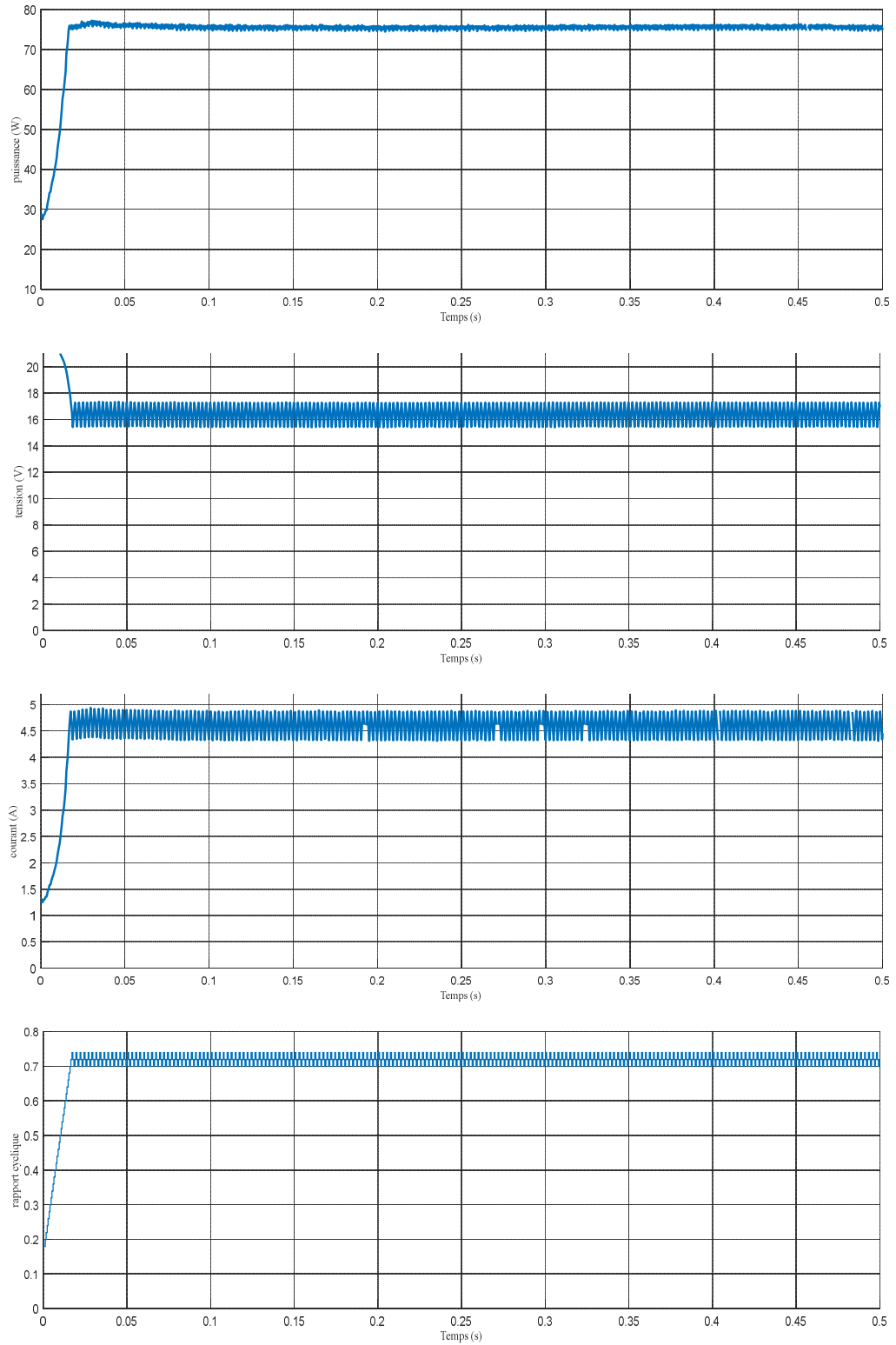


Figure (IV.5). Résultats expérimentaux de méthode P&O

IV.5.1. Résulta pour la méthode INC

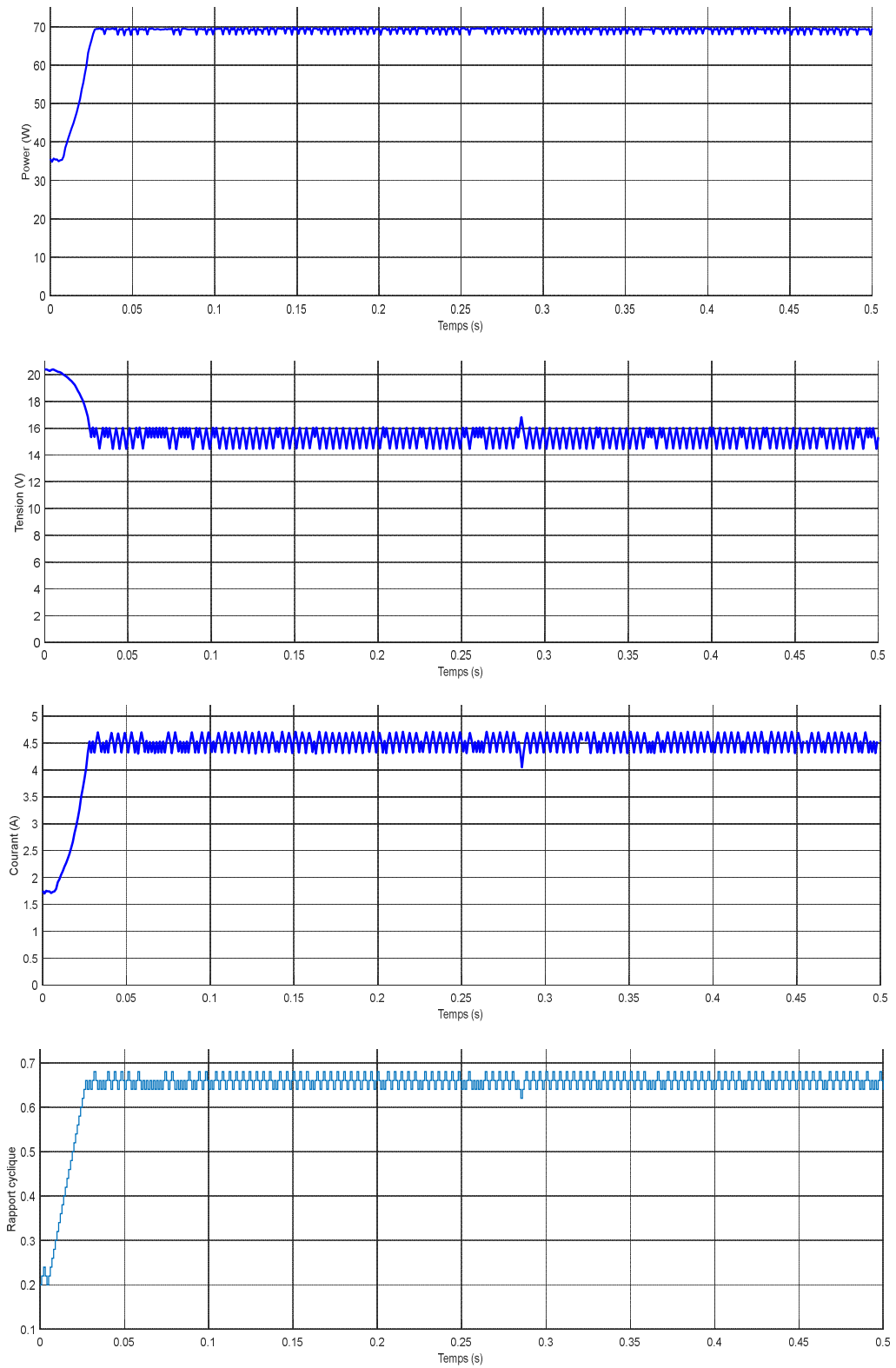


Figure (IV.6). Résultats expérimentaux de méthode INC.

IV.6. Discussion générale de résultats

Les résultats pratiques montrent que les algorithmes (P&O et INC) MPPT présentent une bonne capacité de suivre le MPPT, pour de la température et de l'éclairement à différentes conditions ambiantes.

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé un hacheur Boost et un système photovoltaïque. Nous avons introduit la carte Arduino UNO utilisée dans ce projet. Ensuite, nous avons décrit les différents composants du système, notamment le capteur de courant et le capteur de tension. Enfin, nous avons effectué des tests pratiques sur le système PV en utilisant deux méthodes de commande MPPT : "P&O" et "INC".

Les résultats des tests pratiques démontrent que le système PV parvient à transférer la puissance maximale fournie par le module PV à la charge. Les deux algorithmes fournissent des résultats similaires dans l'optimisation de la puissance.

Conclusion générale

Le mémoire présenté a pour objectif d'étudier la modélisation et la simulation d'un générateur photovoltaïque (PV) ainsi que du système de suivi du point de puissance maximale (MPPT) en utilisant les méthodes P&O et INC, ainsi que la logique floue (FLC).

Dans le premier chapitre, nous avons entamé par examiner les différents types d'énergie solaire. Ensuite, nous avons expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et présenté les différents types de cellules disponibles.

Dans le deuxième chapitre, nous avons approfondi l'étude des composants de l'étage d'adaptation, notamment les convertisseurs DC-DC et leurs commandes MPPT. L'objectif était de maximiser la puissance du générateur photovoltaïque. Nous avons pris le temps d'expliquer en détail le choix et le fonctionnement du convertisseur DC-DC de type "Boost". Dans la suite de notre étude, nous avons approfondi les principes de fonctionnement des algorithmes les plus couramment utilisés dans la recherche du point de puissance maximale (MPPT) : la méthode Perturb and Observe (P&O) et la méthode Incremental Conductance (INC). Nous avons expliqué en détail leur fonctionnement et leur utilisation dans les systèmes photovoltaïques.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les résultats de nos simulations. Ces résultats ont démontré que la commande MPPT basée sur la logique floue (FLC) est plus robuste et performante par rapport à une commande MPPT conventionnelle. Nous avons effectué une étude comparative entre les trois méthodes MPPT : P&O, INC et FLC. Dans différentes conditions climatiques, les trois méthodes ont donné des résultats satisfaisants.

Dans le quatrième chapitre de notre travail, nous avons abordé la réalisation pratique du hacheur Boost et du système photovoltaïque. Tout d'abord, nous avons présenté la carte Arduino UNO qui a été utilisée dans notre travail comme une plateforme de contrôle pour le système PV. Cette carte offre une flexibilité et une facilité d'utilisation pour la mise en œuvre des algorithmes de commande MPPT.

Ensuite, nous avons réalisé des tests pratiques sur le système photovoltaïque en utilisant deux méthodes de commande MPPT: la méthode Perturb and Observe (P&O) et la méthode Incremental Conductance (IncCond). Ces tests ont été réalisés en conditions réelles en modifiant les conditions d'éclairage sur le générateur photovoltaïque. Les résultats obtenus lors des tests pratiques sont comparables à ceux obtenus lors des simulations. Cela confirme l'efficacité des algorithmes MPPT et leur capacité à suivre le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque, même dans des conditions réelles et variables.

Annexe

❖ Programme de l'algorithme (P&O-MPPT) et la suivante :

```
function D = ModPandO(V, I)
Dinit = 0.6; %Initial value for D output
Dmax = 0.65; %Maximum value for D
Dmin = 0.1; %Minimum value for D
deltaD = 0.0007; %Increment value used to increase/decrease the duty cycle
D
persistent Vold Pold Dold M;
dataType = 'double';

if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
    M=1;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;

M=abs(dP);

if M < 0.005
    D=Dold;
else
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = Dold - deltaD*M;
        else
            D = Dold + deltaD*M;
        end
    else
        if dV < 0
            D = Dold + deltaD*M;
        else
            D = Dold - deltaD*M;
        end
    end
end

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

Dold=D;
Vold=V;
Pold=P;
```

❖ **Programme de l'algorithme (INC-MPPT) et la suivante :**

```
function D = ModINC(V, I)

Dinit = 0.42; %Initial value for D output
Dmax = 0.65; %Maximum value for D
Dmin = 0.1; %Minimum value for D
deltaD = 0.005; %Increment value used to increase/decrease the duty cycle
D

persistent Vold Pold Dold M Iold;
dataType = 'double';
if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Iold=0;
    Dold=Dinit;
    M=1;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;
dI= I - Iold;
M=abs(dP);

if M < 0.005
    D=Dold;
else
    if dV == 0
        if dI == 0
            D=Dold;
        elseif dI>0
            D=Dold - (M*deltaD);
        else
            D=Dold + (M*deltaD);
        end
    else
        if dI/dV == -I/V
            D=Dold;
        elseif dI/dV>-I/V
            D=Dold - (M*deltaD);
        else
            D=Dold + (M*deltaD);
        end
    end
end
if D >= Dmax | D<= Dmin
    D=Dold;
end

Dold=D;
Vold=V;
Pold=P;
Iold=I;
```



Figure (a). La fenêtre « Ruleviewer » du contrôleur MPPT flou sur Matlab.

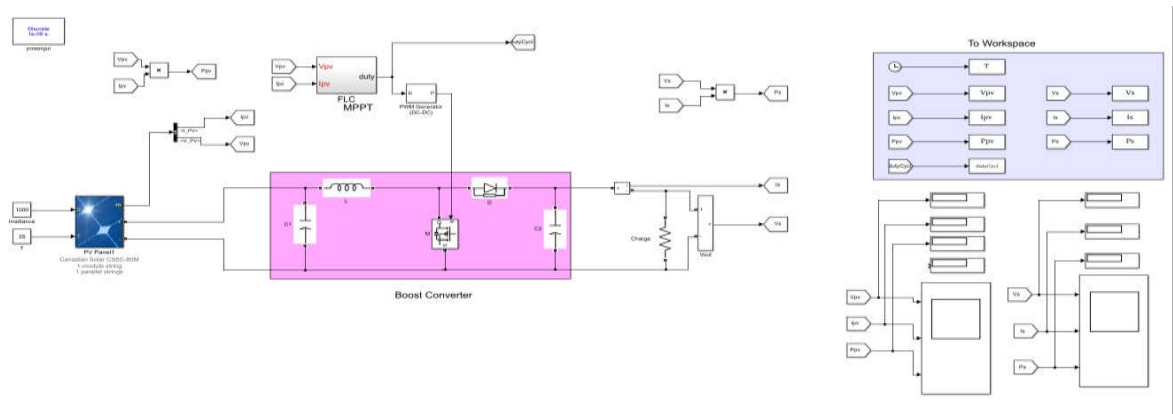


Figure (b). Schéma bloc d'un système photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT (Logique Floue).

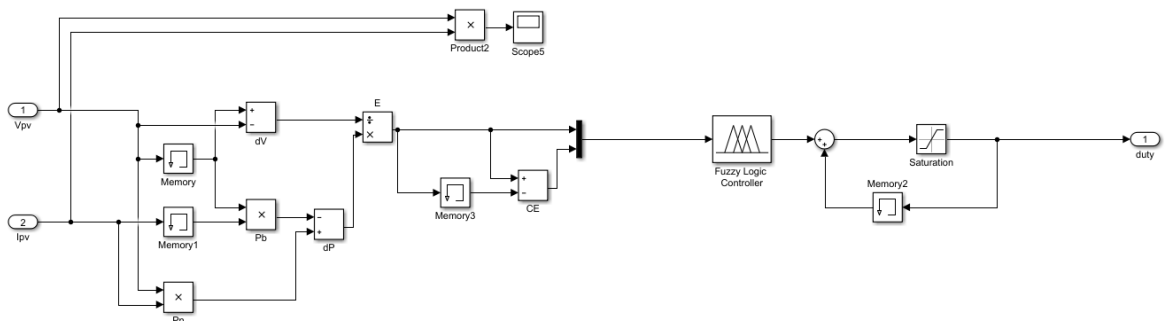


Figure (c). Le Schéma bloc de la commande MPPT (Logique Floue).

Bibliographiques

- [01]. Yehia Lalili, Commande MPPT d'un système photovoltaïque sous irradiation uniforme et non-uniforme, Mémoire de Fin d'étude pour l'obtention du Diplôme Master en Automatique, Option: Automatique et Systèmes, Université Mohammed Seddik Benyahia – JIJEL, 2020/2021.
- [02]. F. HEROGUEL, "Les Cellules Photovoltaïques," Ecole Normale Supérieure, Lyon, Epreuve de projet, 2007.
- [03]. BEHIR Boubaker - KHEMIDA Fathi et GUETROUNE Kheir eddine, Optimisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT floue, , Mémoire de Fin d'étude pour l'obtention du Diplôme Master en Automatique, Option: Réseaux électriques, L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2019.
- [04]. M. Hatti, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, 2008.
- [05]. <https://www.clicours.com/lenergie-solaire-photovoltaïque/>, 23/02/2023, 14 :10.
- [06]. I.Zemghassene "Recharge d'une batterie avec un panneau photovoltaïque et poursuite de point de puissance maximale" Master académique en Automatique UMMTO 2018.
- [07]. N.Berreziga, S.Babou, « commande directe par la méthode incrémentale conductance (IncCond) d'un panneau photovoltaïque » Master en électrotechnique Université de Tizi-Ouzou septembre 2018.
- [08] Hadji Slimane Thèse de doctorat "Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie photovoltaïque" Université Ferhat Abbas de Sétif octobre 2018.
- [09] S.Arab – D.Toudert "Étude d'un Système Photovoltaïque" Mémoire de fin d'études en vue d'obtention Master académique Université de Tizi-Ouzou 2017.
- [10] M. BERROUBI Abdennoure "Commande par mode de glissement des convertisseurs Buck et Boost intégrés dans un système photovoltaïque" Mémoire Master en génie électrique
- [11] AKHAM Amel BENSAAD BAKHTA Soulef, Modélisation, simulation et commande d'un Système Photovoltaïque, Master académique en Electronique Spécialité : Instrumentation, Université El-wancharissi de Tissemsilt, 2021.
- [12] <http://www.solarserver.de/?gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>.

- [13] BENSACI Wafa , «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2012.
- [14] BOUALEM, DENDIB, « Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative », mémoire de magister, Université Ferhat Abbes–Sétif, 2007.
- [15] M.BEDRANE Farid. Etude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. Université Abderrahmane MIRA de Bejaia
- [16] Ogbi Zoulikha, « Mesure automatisée du spectre d'absorption optique des cellules solaires », mémoire de master, Université Med khider Biskra ,2014.
- [17] BENADEL Faiza. Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
- [18] M. Dietschy, «Les cellules photovoltaïques», cours classes préparatoires CPE, Institution des Chartreux Année 2004-2005
- [19]. M. SLAMA Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïque interconnectées au réseau électrique», mémoire de magister, Université Ferhat Abbes –Sétif ,2012.
- [20] HAKOUMI Ahmed, BENAMAR Abdeldjalil, Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue, Mémoire De: Master En Electrotechnique Option: Commande Electrique, Université Ahmed Draia Adrar, 2019.
- [21] <https://www.algerie-eco.com/2018/04/04/energie-solaire-lalgerie-enfin-determinee-a-exploiter-son-enorme-potentiel/>, 25/02/2023, 16 :53.
- [22] ZIAT Soheir Ibtisse, MEDJAHED nour el houda, Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque commandé par la commande MPPT (P&O), Master en : Domaine: Science et Technologie Filière : Electromecanique Spécialité : Electromecanique, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2019/2020.
- [23] F.Z. ZERHOUNI, M. ZEGRAR et A. BOUDGHENE STAMBOULI ;"Connexion directe source d'énergie renouvelable verte non polluante photovoltaïque à une charge", Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4 (2009) 585 – 595.
- [24] Y. LALILI;" Commande MPPT d'un système photovoltaïque sous irradiation uniforme et non-uniforme", Mémoire de Master, Université Mohammed Seddik Benyahia-JIJEL, 2020/2021.

- [25] CH. WASSILA FAIZA; "Réalisation d'une commande buck-boost pour PV", Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2017-2018.
- [26] : M me. BELOUNIS Ouassila, Réglage par contrôleur flou d'un entraînement électrique un hacheur à GTO-MCC », Memoire De Fin D'etudes en vue de L'obtention Du Diplome D'ingenieur D'etat En Genie Electrotechnique, UNIVERSITE DE M'SILA, 2008/2009.
- [26] M. ALAYAT, I. BOUCETTA; " Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents", Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, juin 2017.
- [27] A.BELKAID; "Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome", Thèse de Doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas-Setif1, 19/10/2015.
- [28] M.HACID, L.KACI;" Caractérisation et commande d'un système photovoltaïque", Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, 2021.
- [29] O.M. BOUKLI-HACENE; "Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique", Thèse de Magister, Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, 2011.
- [30] M. S. BENSAOUDI, S E. ARAR;"Etude d'un convertisseur boost pour système photovoltaïque", Mémoire de Master, HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES Tlemcen, 2020.
- [31] N. AOUCHICHE;" Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque", Thèse de Doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté, 2020.
- [32] A. MAHAMMEDI;" Contribution to the control of a Power Converter with Improved Topologies Associated with a Photovoltaic Generator Based on Advanced Techniques", Thèse de Doctorat en sciences, Université Ziane Achour-Djelfa, 2020.
- [33] L. TARGANT, S. KHALEF; " Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique", Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, 2018.
- [34] Kh. Bouchareb, A.Touati; "Modélisation et Simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT basée sur un mode glissant", Mémoire de Master, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2021.
- [35] : H. BUHLER" Réglage par logique floue " -Presse polytechniques et universitaires – 1994.
- [36] : Walid, A. B. I. (2019). Commande floue pour l'optimisation de la puissance d'un générateur photovoltaïque (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA)

[37] : Boudia, A. (2020). Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec un système de stockage à base d'une inductance supraconductrice (SMES) (Doctoral dissertation, Univ M'sila).

[38] : K. Khettab, « Techniques avancées pour la synthèse et l'amélioration des performances des systèmes de commande adaptative d'ordre fractionnaire pour les processus incertains ». Thèse de doctorat, Université de Skikda – 2016.