



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Republique Algerienne Democratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de d'Électronique et Télécommunications

# MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Filière : **Electronique**

Spécialité : **Instrumentation**

Par : EL HASSASNA Imed

**THEME**

**Commande d'un système photovoltaïque à base  
d'un réseau de neurone artificiel**

Présenté et évalué, le 12/ 06 /2024, par le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Qualité
M. GATTAL Azzeddine	MCB	Président
M. GUIZA Dhaouadi	MCA	Rapporteur
Mme CHERIET Leyla	MCB	Examineur

Promotion : 2023/2024



تبسة في : 2024/06/25

قسم الإلكترونيك و الاتصالات

## إشهاد

يشهد رئيس لجنة المناقشة الخاصة بمذكرة التخرج لمستوى ماستر الموسومة بـ:

.....Commande d'un système photovoltaïque.....  
à base de neurones artificiels.....

من أنجاز الطلبة:

الرقم	الاسم واللقب	الشعبة	التخصص	السنة الجامعية
1	الحسانة عماد	الإلكترونيك	أداتية	2024/2023
2	/			

قد استكملا تصحيح الأخطاء وتقييدا بالملاحظات المقدمة من طرف لجنة المناقشة.

رئيس لجنة المناقشة

فكار مزال من

## **Remerciements**

*Dans la douce caresse du vent et sous le regard bienveillant d'Allah, je m'incline humblement devant la vie, tissée de courage, de persévérance et de santé, qui a jalonné mes années d'études. C'est avec gratitude que je remercie le Tout-Puissant pour chaque souffle qui a nourri mon esprit et chaque épreuve qui a forgé ma résilience.*

*À mon guide et mentor, le Dr. Guiza Dhaouadi, et à M. Ayeb Brahim, architectes de mon succès académique, je dédie mes plus sincères remerciements. Leurs encouragements, leur savoir infini et leur patience ont illuminé mon chemin vers la réalisation de ce travail. Dans le jardin de la connaissance, vous avez été mes jardiniers les plus précieux.*

*À ceux qui ont éclairé le chemin de ma thèse de leur expertise, je vous adresse ma profonde reconnaissance. Au Président du jury le Dr. GATTAL Azzeddine et au membre éminent la Dr. CHERIET Leyla, votre temps et vos discussions enrichissantes ont donné vie à mes idées et inspiré mes réflexions.*

*À mon épouse, source inépuisable de soutien, d'amour et de motivation, je t'offre mes plus tendres remerciements. Tes encouragements ont été le carburant de ma persévérance, ton amour, mon refuge dans les tempêtes de l'apprentissage. À mes enfants, sans même le savoir, vous avez été mes étoiles-guides dans la nuit de mes doutes.*

*À ma famille, dont les bras ont toujours été ouverts et le soutien inébranlable, je vous offre mes plus sincères remerciements. À mes frères, Mourad et Abdelhak, et à mes sœurs, ainsi qu'à leurs époux, merci pour votre présence constante et votre soutien indéfectible. À mon beau-père et ma belle-mère, votre amour et votre soutien ont été un phare dans les tempêtes de la vie.*

*À mes collègues de la société de distribution de l'électricité et du gaz de Tébessa, merci pour votre soutien inconditionnel et vos encouragements. Votre camaraderie a été le fil d'or tissant ma toile de réussite.*

*À tous ceux, proches ou éloignés, qui ont essuyé mes larmes de découragement et partagé mes sourires de victoire, je vous adresse mes plus chaleureux remerciements. Ensemble, nous avons gravé les pages de cette aventure.*

*Dans ce ballet de remerciements, que chaque pas résonne comme une ode à la gratitude, tissant les fils invisibles qui unissent nos cœurs dans la joie et la reconnaissance.*

---

## ***Dédicace***

*Je dédie ce travail à la mémoire de mes chers et regrettés parents, dont l'amour et le soutien ont été les fondations de ma vie. Que Dieu les accueille dans son vaste paradis, où leur lumière continuera de briller éternellement.*

*À ma femme, compagne de mon cœur, et à ses parents, qui ont été ma famille par alliance, je vous offre ma reconnaissance la plus profonde. Votre soutien indéfectible et votre amour ont été ma force dans les moments difficiles.*

*À mes enfants, mes plus grandes inspirations, à mes frères et sœurs ainsi qu'à leurs conjoints, je vous dédie ce travail avec tout mon amour et ma gratitude. Votre présence et votre soutien ont été des rayons de lumière dans mon parcours.*

*À mes collègues de travail et à mes amis, qui ont partagé avec moi les hauts et les bas de cette aventure, je vous remercie pour votre soutien et votre amitié indéfectibles.*

*Que ce travail soit un témoignage de l'amour, de la dévotion et de la gratitude que je porte à tous ceux qui ont croisé mon chemin et enrichi ma vie de leur présence.*

***IMED***

---

تعتبر الطاقة المتجددة المعتمدة على توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية الأفضل بين مصادر الطاقة البديلة لكثرتها وملاءمتها للبيئة. ومع ذلك فإن الأنظمة الكهروضوئية لها عيبان رئيسيان: تأثير الظروف المناخية على الطاقة المنتجة وعدم خطية خصائصها مما يفرض ضرورة إضافة محول DC-DC بين النظام والحمل لاستخراج أقصى قدر من الطاقة للحمل باستخدام خوارزمية تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) ولهذا الغرض، يتم استخدام العديد من التقنيات التقليدية والذكية لاختيار دورة العمل المثالية لتتبع نقطة الطاقة القصوى (PPM) الهدف من هذا العمل هو تطبيق تقنيات ذكية تعتمد على الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) لتحسين الطاقة في النظام الكهروضوئي. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الأساليب المعتمدة على ANN قادرة على استخلاص الحد الأقصى من الطاقة التي يوفرها المولد الكهروضوئي بسرعة تتبع عالية. كما أنها أكثر كفاءة من خوارزميات الاضطراب والمراقبة (P&O) التقليدية والتوصيل المتزايد (INC).

**الكلمات المفتاحية:** محول DC-DC ، نقطة الطاقة القصوى (PPM) ، الاضطراب والمراقبة (P&O) ، الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN).

---

## Résumé

L'énergie renouvelable basée sur la production d'électricité à partir de l'énergie solaire est considérée comme la meilleure parmi les sources d'énergie alternatives en raison de son abondance et de son respect de l'environnement. Cependant, les systèmes photovoltaïques présentent deux inconvénients majeurs : l'influence des conditions climatiques sur la puissance produite et la non linéarité de leurs caractéristiques qui impose la nécessité de l'ajout d'un convertisseur DC-DC entre le système et la charge pour extraire le maximum de puissance à la charge à l'aide d'un algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT). A cet effet, diverses techniques conventionnelles et intelligentes sont utilisées pour la sélection du rapport cyclique optimal afin de suivre le point de puissance maximale (PPM). Le but de ce travail est l'application des techniques intelligentes basées sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) pour optimiser la puissance dans un système photovoltaïque. Les résultats obtenus ont démontré que les méthodes basées sur les RNA sont capables d'extraire le maximum de puissance délivrée par un générateur PV avec une vitesse de poursuite élevée. Elles sont également plus efficaces que les algorithmes conventionnels perturbation et observation (P&O) et de conductance incrémentale (INC).

**Mots clés** : Convertisseur DC-DC, point de puissance maximale (PPM), perturbation et observation (P&O), réseau de neurones artificiel (RNA).

---

**Abstract**

Renewable energy based on electricity generation from solar energy is considered the best among alternative energy sources due to its abundance and environmental friendliness. However, photovoltaic systems have two major drawbacks: the influence of climatic conditions on the power produced and the non-linearity of their characteristics which imposes the need to add a DC-DC converter between the system and the load to extract maximum power to the load using a Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm. For this purpose, various conventional and intelligent techniques are used for selection of the optimal duty cycle to track the maximum power point (PPM). The aim of this work is the application of intelligent techniques based on artificial neural networks (ANN) to optimize power in a photovoltaic system. The results obtained demonstrated that ANN-based methods are capable of extracting the maximum power delivered by a PV generator with a high tracking speed. They are also more efficient than conventional perturbation and observation (P&O) and incremental conductance (INC) algorithms.

**Keywords:** DC-DC converter, maximum power point (MPP), perturbation and observation (P&O), artificial neural network (ANN).

---

### Symboles

$E_{ph}$	rayonnement solaire
$h_{\nu}$	les photons d'énergie
$N$	Charge négative
$P$	Charge positive
$I_{pv}$	Courant généré par la cellule et fourni à la charge généré par la cellule et fourni à la charge
$I_{ph}$	Courant généré par la lumière incidente
$I_D$	Courant traversant la diode
$U_T$	le potentiel thermodynamique
$I_S$	Courant de saturation
$V_D$	Tension aux bornes de la diode
$A$	Facteur d'idéalité
$K$	Constante de Boltzmann ( $K = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J. K}^{-1}$ )
$T$	Température
$Q$	Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
$I_{D1}$	le courants traversant la diode $D_1$
$I_{D2}$	le courants traversant la diode $D_2$
$I_{sh}$	le courant dérivé par la résistance shunt
$I_{cc}$	Le courant de court-circuit
$V_{pv}$	La tension du panneau photovoltaïque
$V_{co}$	La tension de circuit ouvert
$P_{vmax}$	puissance maximale fournie par une cellule PV
$I_{vmax}$	Courant maximal fourni par une cellule PV
$V_{vmax}$	Tension maximale fournie par une cellule PV
$P_{inc}$	est la puissance incidente
$\Psi$	flux global [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$S_G$	Surface du générateur [ $\text{m}^2$ ]
$I_{CCR}$	Courant de court-circuit de la cellule sous conditions de référence
$G$	Irradiation en ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$G_r$	Irradiation de référence ( $G_r = 1\text{KW}/\text{m}^2$ )
$K_0$	Coefficient de variation du courant en fonction de la température
$T_r$	Température de référence, $298^\circ\text{K}$ ( $25^\circ\text{C}$ )
$I_{rs}$	Courant de saturation inverse de la cellule sous conditions de référence
$E_g$	L'énergie du "band gap" du semi-conducteur en électron volt (eV) ou énergie de seuil
$N_p$	cellules en parallèle
$N_s$	cellules en série
$t_{on}$	La durée de fermeture de l'interrupteur
$\alpha$	le rapport cyclique
$L$	Une inductance

---

ABREVIATIONS

PV	photovoltaïques
GPV	générateur photovoltaïque
SPV	Système photovoltaïque
Si	Silicium
Ge	germanium
Se	sélénium
GaAs	arséniure de gallium
CdTe	tellure de cadmium
CIGS	Cuivre indium Gallium sélénium
CZTS	cuivre zinc etain soufre
CC/CC	Courant Continu/Courant Continu
MPPT	Maximum Power Point Tracking
CC/AC	Convertisseur courant continu/ courant alternatif
PLL	Boucle à verrouillage de phase en anglais (phased locked loop)
PPM	Point de puissance maximal
P&O	La méthode Perturbation et observation
INC	la méthode incrémentation de la conductance
LF	la logique floue
FLC	le contrôleur à logique floue
RNA	les réseaux de neurones artificiels
ANFIS	le système d'inférence neuro-floue adaptatif
FIS	un système d'inférence floue
CE	le changement d'erreur
PB	positif grand
PS	Petit positive
ZE	environ zéro
NS	négatif petit
NB	négatif grand
tanh	Tangente hyperbolique

*Sommaire*

## Table des matières

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
ملخص.....	iii
Résumé.....	iv
Abstract.....	v
Liste des symboles et abréviations.....	vi
Table des matières.....	viii
Table des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xiv
Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques</b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Croissance historique des énergies renouvelables dans le monde.....	3
I.3. Système photovoltaïque.....	4
I.3. 1. Effet photovoltaïque.....	4
I.3. 2. Générateur photovoltaïque.....	4
I.3. 3. Cellule photovoltaïque.....	4
I.3. 4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	5
I.3. 5. Matériaux et technologies des cellules PV.....	6
I.3.5.1. Cellules photovoltaïques au silicium cristallin.....	6
I.3.5.1.1. Silicium monocristallin.....	6
I.3.5.1.2. Silicium poly cristallin.....	7
I.3.5.1.3. Silicium en ruban autosupporté.....	7
I.3.5.2. Cellules photovoltaïques aux couches mince.....	8
I.3.5.2.1. Cellules à base de silicium amorphes.....	8
I.3.5.2.2. Cellules à base de CIS / (CIGS).....	8
I.3.5.3. Autres technologies.....	9
I.3.5.3.1. Cellule multi-jonction.....	9
I.3.5.3.2. Cellule solaire CZTS (innovation 2016).....	10
I.4. Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque.....	10
I.4. 1. Modèle idéal.....	11

I.4. 2. Modèle à simple diode.....	12
I.4. 3. Modèle à double diode.....	13
I.4. 4. Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	13
a) Courant de court-circuit.....	14
b) Tension de circuit ouvert.....	14
c) Puissance maximale.....	14
d) Facteur de qualité.....	15
e) Rendement d'une cellule PV.....	15
I.4. 5. Caractéristique du générateur PV.....	15
I.4. 6. Paramètres d'influence sur les caractéristiques du générateur PV.....	17
a) Influence de l'éclairement.....	17
b) Influence de la température.....	18
I.5. Association des modules PV.....	18
I.5. 1. Association en série.....	18
I.5. 2. Association en parallèle.....	18
I.5. 3. Association mixte (série/parallèle).....	20
I.6. Classification des systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque.....	21
I.6. 1. Systèmes autonomes.....	21
I.6. 2. Systèmes photovoltaïques hybrides.....	22
I.6. 3. Systèmes photovoltaïques à injection aux réseaux.....	22
I.7. Conclusion.....	23
CHAPITRE II: Convertisseur DC-DC	
II.1. Introduction.....	24
II.2. Convertisseur DC-DC.....	24
II.2.1. Convertisseur survolteur boost.....	26
a) Principe de fonctionnement.....	27
b) Paramètres du survolteur "boost".....	29
II.2. 2. Convertisseur dévolteur "buck".....	30
a) Principe de fonctionnement.....	30
b) Paramètres du dévolteur "buck".....	32
II.2. 3. Convertisseur dévolteur-survolteur " buck-boost".....	33
a) Principe de fonctionnement.....	33
b) Paramètres du convertisseur "buck-boost".....	35

II.3. Principe de la recherche du point de puissance maximale.....	35
II.4. Conclusion.....	37
<b>CHAPITRE III: Maximisation de puissance dans un système PV</b>	
III.1. Introduction.....	38
III.2. Classification des algorithmes de recherche MPPT.....	38
III.2.1. Méthodes conventionnelles.....	38
a) Perturbe & Observe (P&O).....	39
b) Méthode d'incrémentation de la conductance (INC).....	41
III.2.2. Les méthodes avancées.....	43
a) Commande MPPT par logique floue (FLC).....	43
b) Commande MPPT par ANN .....	47
c) Commande MPPT par ANFIS.....	51
III.3. Conclusion.....	54
<b>CHAPTER IV: Résultats et discussions</b>	
IV.1. Introduction.....	55
IV.2. Système PV autonome.....	55
IV.2.1. Caractéristiques du générateur PV.....	56
IV.2.2. Validation du convertisseur boost.....	56
IV.2.3. Système PV autonome commandé par une méthode hybride RNA-PI.....	57
IV.2.4. Résultats de simulation.....	58
a) Test dans des conditions standards.....	58
b) Test dans des conditions variables.....	60
IV.3. Système raccordé au réseau.....	63
IV.3.1. Caractéristiques du générateur PV.....	64
IV.3.2. Système raccordé au réseau commandé par un contrôleur ANFIS.....	65
IV.3.3. Résultats de simulation.....	67
a) Test dans des conditions standards.....	67
b) Test dans des conditions variables.....	69
IV.4. Conclusion.....	72
Conclusion générale.....	73
Références.....	74

<b>Figure I.1.</b> La croissance historique des énergies renouvelables dans le monde.....	3
<b>Figure I.2.</b> Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	5
<b>Figure I.3.</b> Cellule au Silicium monocristallin.....	6
<b>Figure I.4.</b> Cellule au Silicium poly-cristallin.....	7
<b>Figure I.5.</b> Cellule à base de silicium amorphes.....	8
<b>Figure I.6.</b> Cellule photovoltaïque en couche mince à base de cuivre.....	9
<b>Figure I.7.</b> Cellule multi-jonction.....	10
<b>Figure I.8.</b> Cellule solaire CZTS.....	10
<b>Figure I.9.</b> Circuit équivalent d'une cellule PV (modèle idéal).....	11
<b>Figure I.10.</b> Circuit équivalent d'une cellule PV (modèle à simple diode).....	12
<b>Figure I.11.</b> Circuit équivalent d'une cellule PV (modèle à double diodes).....	13
<b>Figure I.12.</b> Caractéristiques I-V et P-V du générateur PV.....	17
<b>Figure I.13.</b> Influence de l'éclairement sur les caractéristiques PV.....	17
<b>Figure I.14.</b> Influence de la température sur les caractéristiques PV.....	18
<b>Figure I.15.</b> Branchement des panneaux en série.....	19
<b>Figure I.16.</b> Les caractéristiques d'un groupement de $N_s$ modules PV en série.....	19
<b>Figure I.17.</b> Branchement des panneaux en parallèle.....	20
<b>Figure I.18.</b> Les caractéristiques d'un groupement de $N_p$ modules PV en parallèle.....	20
<b>Figure I.19.</b> Les caractéristiques d'un groupement mixte des modules PV.....	21
<b>Figure I.20.</b> Système PV autonome.....	21
<b>Figure I.21.</b> Système PV hybride.....	22
<b>Figure I.22.</b> Système PV à injection aux réseaux.....	22
<b>Figure II.1.</b> Symbole d'un convertisseur DC/DC.....	24
<b>Figure II.2.</b> Durée de fonctionnement de l'hacheur.....	25
<b>Figure II.3.</b> Circuit électrique d'un convertisseur boost.....	25
<b>Figure II.4.</b> Forme d'ondes des tensions et des courants d'entrée et de sortie du « Boost» en fonction du rapport cyclique $\alpha$ et la période $T_s$ .....	27
<b>Figure II.5.</b> Schéma équivalent du convertisseur Boost pour S fermé.....	28
<b>Figure II.6.</b> Schéma équivalent du convertisseur Boost pour S ouvert.....	28
<b>Figure II.7.</b> Schéma électrique du convertisseur buck.....	30

<b>Figure II.8.</b> Forme d'ondes des tensions et des courants d'entrée et de sortie du boost .....	31
<b>Figure II.9.</b> Circuits équivalents du convertisseur buck "S" fermé .....	31
<b>Figure II.10.</b> Circuits équivalents du convertisseur buck "S" ouvert.....	32
<b>Figure II.11.</b> Schéma électrique du convertisseur buck-boost .....	33
<b>Figure II.12.</b> Tensions et courants du convertisseur buck-boost.....	34
<b>Figure II.13.</b> Chaîne de conversion PV contrôlée par une commande MPPT .....	35
<b>Figure II.14.</b> Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale.....	36
<b>Figure III.1.</b> Schéma de converge vers le PPM par P&O .....	39
<b>Figure III.2.</b> Algorithme P&O.....	40
<b>Figure III.3.</b> Algorithme de la méthode Incrément de conductance .....	42
<b>Figure III.4.</b> Le principe de la commande a logique floue.....	43
<b>Figure III.5.</b> Fonction d'appartenance de chacune des variables linguistiques d'entrée .....	45
<b>Figure III.6.</b> Fonction d'appartenance de sortie .....	47
<b>Figure III.7.</b> Architecture d'un réseau de neurones avec une seule couche cachée .....	48
<b>Figure III.8.</b> Différentes fonctions des activations .....	49
<b>Figure III.9.</b> Structure de l'algorithme ANN-MPPT proposé .....	50
<b>Figure III.10.</b> Architecture d'ANFIS .....	52
<b>Figure IV.1.</b> Modèle Simulink du système PV autonome avec une commande MPPT .....	55
<b>Figure IV.2.</b> Caractéristiques I-V et P-V du GPV .....	56
<b>Figure IV.3.</b> Tension d'entrée et tension de sortie du convertisseur boost.....	57
<b>Figure IV.4.</b> Courant d'entrée et courant de sortie du convertisseur boost .....	57
<b>Figure IV.5.</b> Structure du RNA .....	57
<b>Figure IV.6.</b> Performance de RNA .....	58
<b>Figure IV.7.</b> Tension du GPV dans les conditions standards .....	58
<b>Figure IV.8.</b> Courant du GPV dans les conditions standards .....	59
<b>Figure IV.9.</b> Puissance du GPV dans les conditions standards .....	59
<b>Figure IV.10.</b> Tension de sortie du SPV autonome dans les conditions standards .....	59
<b>Figure IV.11.</b> Courant de sortie du SPV autonome dans les conditions standards .....	60
<b>Figure IV.12.</b> Puissance de sortie du SPV autonome dans les conditions standards.....	60

<b>Figure IV.13.</b> Profil de radiation solaire .....	61
<b>Figure IV.14.</b> Tension du GPV pour radiation variable .....	61
<b>Figure IV.15.</b> Courant du GPV pour radiation variable.....	61
<b>Figure IV.16.</b> Puissance du GPV pour radiation variable .....	62
<b>Figure IV.17.</b> Tension de sortie du SPV pour radiation variable .....	62
<b>Figure IV.18.</b> Courant de sortie du SPV pour radiation variable .....	62
<b>Figure IV.19.</b> Puissance de sortie du SPV pour radiation variable .....	63
<b>Figure IV.20.</b> Système PV raccordé au réseau .....	64
<b>Figure IV.21.</b> Caractéristiques I-V et P-V du GPV .....	65
<b>Figure IV.22.</b> MPPT basé sur le contrôleur ANFIS pour un système lié au réseau .....	65
<b>Figure IV.23.</b> MPPT basé sur ANFIS dans MATLAB .....	66
<b>Figure IV.24.</b> Analyse des performances de l'entraînement de l'ANN pour la régression .....	66
<b>Figure IV.25.</b> Puissance du GPV dans les conditions standards .....	67
<b>Figure IV.26.</b> Tension de sortie du boost dans les conditions standards .....	67
<b>Figure IV.27.</b> Tension du réseau dans les conditions standards .....	68
<b>Figure IV.28.</b> Courant du réseau dans les conditions standards .....	68
<b>Figure IV.29.</b> Puissance active dans les conditions standards.....	68
<b>Figure IV.30.</b> Puissance réactive dans les conditions standards.....	69
<b>Figure IV.31.</b> Puissance du GPV pour radiation variable .....	69
<b>Figure IV.32.</b> Tension de sortie du convertisseur boost pour radiation variable.....	70
<b>Figure IV.33.</b> Tension du réseau pour radiation variable .....	70
<b>Figure IV.34.</b> Courant du réseau pour radiation variable .....	70
<b>Figure IV.35.</b> Puissance active pour radiation variable .....	71
<b>Figure IV.36.</b> Puissance réactive pour radiation variable .....	71

---

<b>Tableau III.1</b> Règles floues .....	46
<b>Tableau IV.1</b> Caractéristiques du module PV .....	56
<b>Tableau IV.2</b> Paramètres du convertisseur boost .....	56
<b>Tableau IV.3</b> Efficacité de MPPT étudié .....	63
<b>Tableau IV.4</b> paramètres de système PV considéré liée au réseau.....	64

---

# *Introduction générale*

## Introduction générale

L'énergie est la base de toute activité humaine. De nos jours, une grande partie de la demande mondiale en énergie est assurée à partir de ressources fossiles. Cependant, les réserves de combustibles fossiles sont limitées [1]. Certains pays développés se sont orientés vers l'énergie nucléaire, alors que cette dernière n'est pas à la portée de tous les états et surtout des pays en voie de développement et présente des risques d'accidents graves [2]. En effet, la croissance de la demande énergétique mondiale, l'épuisement inévitable des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, et la détérioration de l'environnement causée par ces types d'énergies, a incité au développement de nouvelles sources d'énergies, renouvelables, assurant ainsi une durabilité et une protection de l'environnement qui est devenue un point très important [3][4].

L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque semble être une nécessité pour l'avenir. En effet, le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la plus abondante sur terre. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant une année. Afin de mieux exploiter cette énergie et d'optimiser sa collecte par les capteurs photovoltaïques, il est nécessaire de connaître la distribution de l'irradiation solaire sur le lieu de l'implantation prévu pour l'installation photovoltaïque, sous différentes orientations et inclinaisons . [3]

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie, mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique I-V du générateur photovoltaïque dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur, un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont connues sous le nom de MPPT 'Maximum Power Point Tracking' associées au hacheur, lequel assure le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale. Les techniques MPPT sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques en poursuivant continuellement le point de puissance maximale (MPP), ce qui n'est pas évident à atteindre. En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. Aussi, plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées [5].

Le but de ce travail est de contrôler un système photovoltaïque (PV) autonome et un système PV connecté au réseau en utilisant deux méthodes classiques, P&O et INC, ainsi qu'une méthode intelligente basée sur le réseau de neurones artificiels (RNA) et une méthode hybride ANFIS.

Ce mémoire sera organisé comme suit :

Dans le premier chapitre on présente tout d'abord une vue générale sur les systèmes photovoltaïques, Ensuite, on étudie la modélisation du générateur PV pour déterminer les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  ainsi que les influences des différents paramètres climatiques sur ces dernières. Enfin, on présente l'association des générateurs PV (en série, en parallèle et en mixte).

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des convertisseurs DC-DC, la première partie a été réservé la modélisation des convertisseurs DC-DC de type Boost, Buck et Buck-Boost. La deuxième partie de ce chapitre est dédié au principe de la recherche du point de puissance maximale.

Le troisième chapitre porte sur les différentes méthodes MPPTs utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour extraire la puissance maximale. On commence par la classification des méthodes MPPTs en deux groupes : classiques et intelligentes. Ensuite, les méthodes les plus utilisées P&O et INC. Enfin, les méthodes basées sur RNA, LF, et ANFIS. sont présentées en détail.

Le dernier chapitre est réservé aux résultats et discussions. On commence par l'application de la méthode conventionnelle INC sur un système PV autonome ainsi que la méthode basée sur RNA Ensuite, on applique la méthode conventionnelle P&O et un contrôleur ANFIS sur un système PV connecté au réseau pour produire une puissance active de 100 KVA. Enfin, les résultats de simulation obtenus à partir des méthodes traditionnelles ont été comparés à leurs des méthodes basées sur RNA.

Le mémoire se termine par une conclusion générale, où nous récapitulons les résultats obtenus et envisageons les directions possibles pour les travaux futurs.

*Chapitre I*

*Généralités sur les systèmes  
photovoltaïques*

## I.1. Introduction

Les énergies renouvelables émergent comme des alternatives essentielles et viables. Parmi les sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique, la biomasse, et la géothermie sont les plus notables. Ces technologies exploitent des ressources naturelles inépuisables pour produire de l'énergie, permettant ainsi une gestion plus durable et écologique de nos besoins énergétiques.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui est découvert en 1839 par le physicien français Antoine Becquerel, consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) [3].

Dans ce chapitre, on présente tout d'abord une vue générale sur les systèmes photovoltaïques, Ensuite, on étudie la modélisation du générateur PV pour déterminer les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  ainsi que les influences des différents paramètres climatiques et autres sur ces dernières. Enfin, on présente l'association des générateurs PV (en série, en parallèle et en mixte).

## I.2. Croissance historique des énergies renouvelables dans le monde

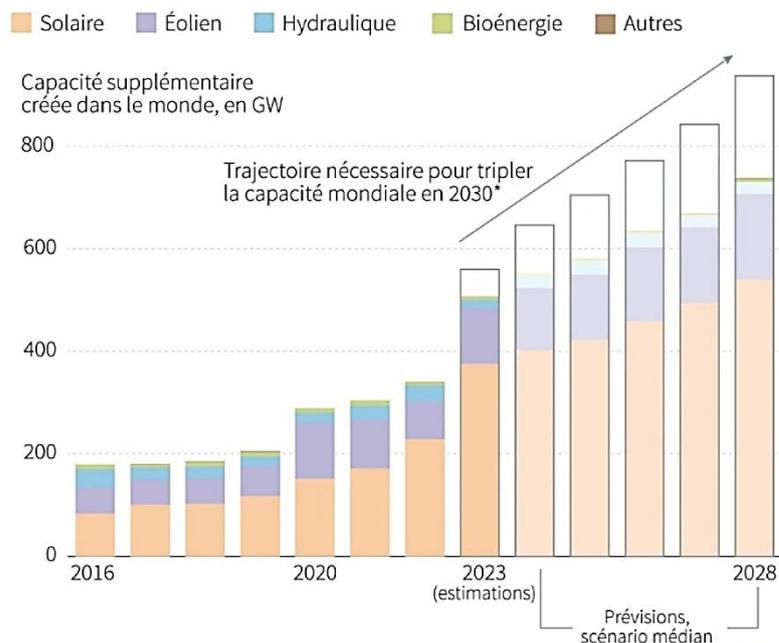


Fig. I.1. La croissance historique des énergies renouvelables dans le monde [4].

La croissance des énergies renouvelables a pris de l'ampleur au cours des dernières décennies, marquée par une prise de conscience accrue des enjeux environnementaux et des avancées technologiques significatives. Voici un aperçu de cette croissance historique présenté dans Fig. I.1.

### **I.3. Système photovoltaïque**

Le système PV désigne la technologie utilisée pour convertir la lumière du soleil directement en électricité. Cette conversion est rendue possible grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïques qui sont composées de matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium.

Les systèmes photovoltaïques représentent une technologie clé dans la transition vers une énergie plus durable et propre. Ils jouent un rôle crucial dans l'atténuation des impacts environnementaux de la consommation énergétique humaine et sont au cœur des stratégies de développement durable à travers le monde.

#### **I.3. 1. Effet photovoltaïque**

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

**Photo** : qui signifie lumière.

**Volta** : du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827, inventeur de la pile électrique).

L'effet PV constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [3].

#### **I.3. 2. Générateur photovoltaïque**

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV (GPV) est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules. Ainsi la caractéristique I-V du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire [7].

#### **I.3. 3. Cellule photovoltaïque**

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique par la force électromotrice, qui est créée par l'excitation de la surface de la cellule photovoltaïque, par les rayons solaires basés sur le phénomène de l'effet photovoltaïque, la tension générée peut varier entre 0.3v et 0.7v en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et le vieillissement de la cellule.

### I.3. 4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales.

La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable.

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit: Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ( $E_{ph} = h\nu$ ) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires « électron- trou ».

Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule (Fig. I.2) [8].

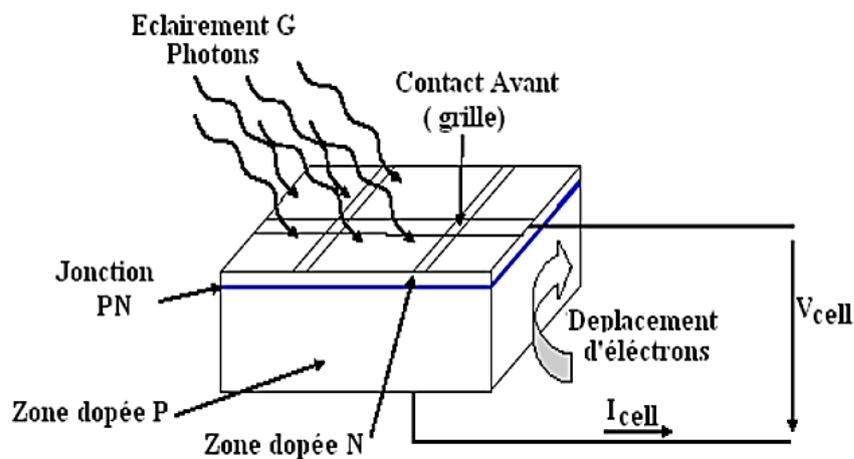


Fig. I.2. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

### I.3. 5. Matériaux et technologies des cellules PV

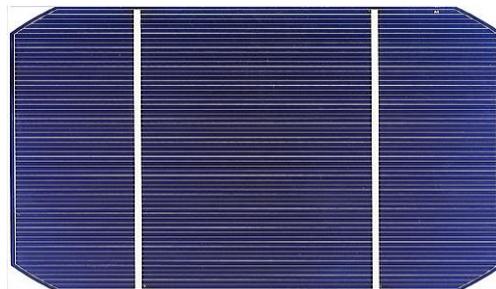
La technologie de fabrication des cellules PV est en plein développement, avec la considération, surtout, du rendement et du coût. Les principales technologies les plus utilisées actuellement sont : le silicium cristallin avec une très grande utilisation de plus 80% de l'utilisation mondiale et les couches minces à base de Si amorphe, monocristallin et d'autres technologies [9].

#### I.3.5.1. Cellules photovoltaïques au silicium cristallin

Les cellules les plus utilisées sont encore aujourd'hui les cellules au silicium cristallin, dites de première génération, de plus 80% des panneaux sur le marché [10].

##### I.3.5.1.1. Silicium monocristallin

Le silicium est un élément dit cristallin, c'est-à-dire qu'il a une forme cristalline. Le silicium, en effet, comme le germanium, cristallise est une structure Genre diamant. Grâce au procédé Czochralsk pour l'obtention de silicium ultra pur, et possibilité d'ajuster le comportement électronique du silicium en dopant des éléments comme le bore ou le phosphore (dopage) dans le cristal, d'où la porte s'ouvre application dans les produits électroniques [11].



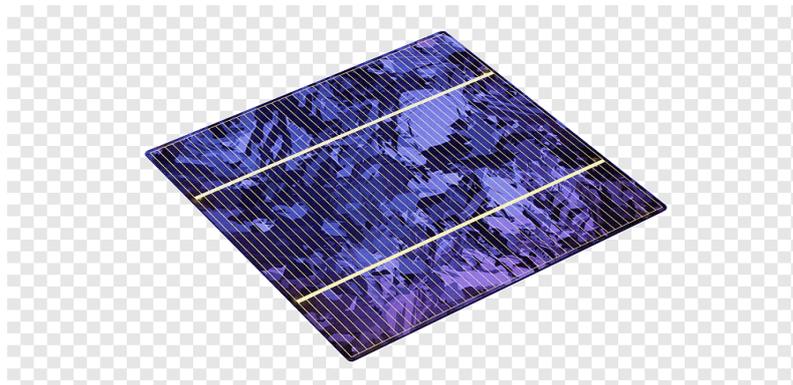
**Fig. I.3.** Cellule au Silicium monocristallin.

La Fig. I.3 présente une cellule au Silicium monocristallin qui est fabriquée à partir de silicium monocristallin, elle présente plusieurs avantages et inconvénients. Ces cellules offrent un meilleur rendement énergétique comparé au silicium poly cristallin, avec des rendements commerciaux allant de 12 à 20% et pouvant atteindre environ 25% en laboratoire. De plus, leur durée de vie est significative, avoisinant les 30 ans. Cependant, elles sont plus coûteuses que les alternatives poly cristallines et leur rendement tend à diminuer sous un faible éclaircissement.

Sur le plan économique, le coût plus élevé du silicium monocristallin est un facteur à considérer, bien que ses performances supérieures justifient l'investissement pour certaines applications. Ces aspects font du silicium monocristallin un choix important pour les secteurs demandant une haute efficacité, malgré ses coûts initiaux plus élevés.

### I.3.5.1.2. Silicium poly cristallin

Le poly silicium est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation de structures colonnaires à gros cristaux, appelées poly silicium, pour limiter les effets délétères des joints de grains. Les rendements de conversion industrielle étaient de l'ordre de 8 à 10 % avant 1980 [10]. Aujourd'hui, les meilleurs panneaux poly cristallins affichent des rendements allant jusqu'à 18 %. C'est la technologie la plus représentative sur le marché du photovoltaïque car elle combine un rendement de conversion élevé avec des coûts de production faibles par rapport à l'industrie du silicium monocristallin [12].



**Fig. I.4.** Cellule au Silicium poly-cristallin.

Les panneaux en poly silicium, offrant un bon rendement d'environ  $100 \text{ W/m}^2$  et une durée de vie de plus de 30 ans, représentent une option économiquement avantageuse grâce à leur coût inférieur au monocristallin, malgré un rendement réduit sous faible éclaircissement, ils montrent un rendement module commercial de 11 à 15 % avec un record en laboratoire d'environ 20 %, et actuellement, ils possèdent le meilleur rapport qualité/prix sur le marché (Voir Fig. I.4).

### I.3.5.1.3. Silicium en ruban autosupporté

D'un point de vue technologique, les techniques de production de silicium en bandes autoportantes sont très intéressantes, qu'elles soient obtenues par capillarité entre deux lèvres de carbone ou par croissance sur des films ou des grilles de carbone. Au cours des années 1990, ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche, dont certains ont même atteint la conception de lignes de production préindustrielles. Cependant, toutes ces techniques "ruban" ont été largement affectées par la vitesse de croissance très lente (quelques centimètres/min) imposée par les critères de solidification (permettant la séparation des impuretés et le contrôle de la taille des cristaux), maintenant elle est moins et aujourd'hui moins utilisée [15,16].

### **I.3.5.2. Cellules photovoltaïques aux couches minces**

Les cellules solaires de la deuxième génération représentent les cellules solaires à base de couche mince ou (thin film) en anglais. Cette technologie fait appel à des procédés de fabrication visant la diminution de l'épaisseur des cellules.

L'intérêt de cette technologie vient de la faible quantité de matériaux nécessaires à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules de première génération.

#### **I.3.5.2.1. Cellules à base de silicium amorphes**

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncée ou marron [12]. Les coûts de fabrication sont sensiblement meilleurs que ceux du silicium cristallin. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une alternative économique est recherchée, ou, quand très peu d'électricité est nécessaire (par exemple, alimentation des montres, calculatrices, luminaires de secours).

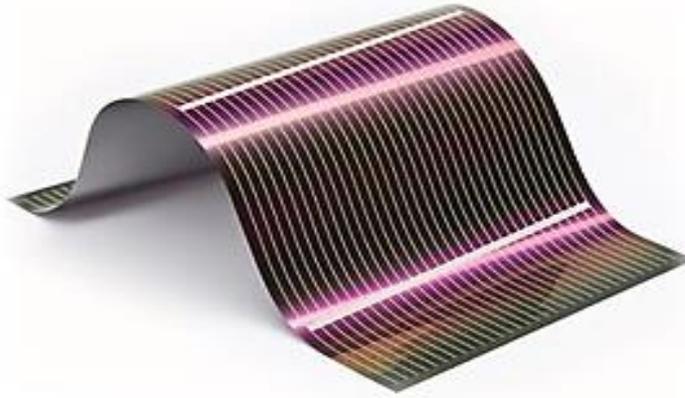


**Fig. I.5.** Cellule à base de silicium amorphes.

Les cellules photovoltaïques amorphes (Fig. I.5), souvent utilisées pour des applications à faible consommation énergétique comme les montres ou les calculatrices, présentent des avantages comme un fonctionnement efficace sous faible éclairage, une moindre sensibilité aux températures élevées, et un coût inférieur comparé aux cellules en silicium cristallin; néanmoins, elles affichent un rendement modeste en plein soleil (environ  $60 \text{ W/m}^2$ ) et nécessitent une plus grande surface pour égaler les rendements des cellules plus épaisses, avec un rendement module commercial entre 5 et 9 % et un record en laboratoire d'environ 13.4 %.

#### **I.3.5.2.2. Cellules à base de cuivre indium sélénium (CIS)/Cuivre indium Gallium sélénium (CIGS)**

Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces (voir Fig. I.6), de type CIS (cuivre, indium, sélénium) ou CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium).



**Fig. I.6.** Cellule photovoltaïque en couche mince à base de cuivre.

Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre). De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince [12].

Les cellules CIS, offrent des rendements supérieurs par rapport à d'autres types de cellules photovoltaïques en couche mince et peuvent être construites sur des substrats flexibles. Cependant, elles présentent généralement des rendements plus faibles que les cellules traditionnelles plus épaisses, avec des rendements commerciaux oscillant entre 9 et 11 %, et un rendement record en laboratoire d'environ 19.3 %. Malgré des matières premières plus accessibles, les investissements antérieurs dans la technologie du silicium au début des années 2000 ont réduit leur compétitivité économique, suite à la baisse des coûts de fabrication des cellules traditionnelles.

### **I.3.5.3. Autres technologies**

Les laboratoires technologiques sont sans cesse à la recherche de nouveaux matériaux semi-conducteurs afin de créer les cellules photovoltaïques de demain.

#### **I.3.5.3.1. Cellule multi-jonction**

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches comme il est présenté sur Fig. I.7, elles permettent de convertir les différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion [12].

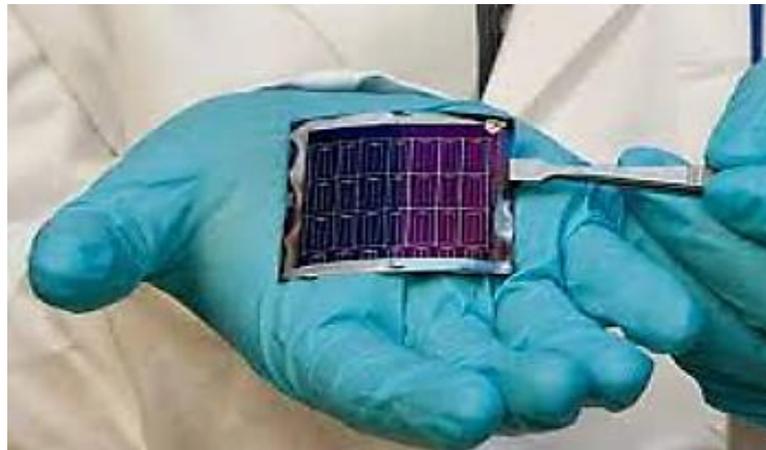
Grâce à leurs différentes couches capturant diverses parties du spectre solaire, elles offrent des rendements de conversion énergétique sans précédent. Cependant, elles présentent peu d'applications commerciales et, bien qu'initialement développées pour le secteur spatial, elles restent peu accessibles sur le marché général en raison de leur coût élevé.



**Fig. I.7.** Cellule multi-jonction.

#### **I.3.5.3.2. Cellule solaire CZTS : cuivre zinc étain soufre (innovation 2016)**

Les cellules photovoltaïques CZTS présentées sur la Fig. I.8, aussi minces qu'une pellicule de film - moins de  $5\ \mu\text{m}$  d'épaisseur - sont fabriquées en appliquant une mince couche de matériau contenant cuivre, zinc, étain et soufre, sur un support comme le verre ou le plastique, qui a l'avantage d'être flexible. Elles peuvent ainsi être utilisées sur des supports variés contrairement aux cellules au silicium: surfaces incurvées, transparentes, ou en superposition d'autres matériaux. Le rendement actuel des cellules photovoltaïques CZTS en laboratoire est de 7,6% pour des cellules d'un  $\text{cm}^2$  (selon l'Australien Centre for Advanced Photovoltaics) [12].



**Fig. I.8.** Cellule solaire CZTS.

#### **I.4. Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque**

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie, plusieurs modèles électriques ont été proposés dans la littérature pour représenter la cellule photovoltaïque [17] [18] [19] [20].

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être ramené à un schéma électrique équivalent dont les éléments sont modélisables. Le choix du circuit électrique équivalent doit être judicieux pour tenir compte des paramètres intrinsèques de la cellule et extrinsèques qui influent sur le comportement de la cellule notamment, la température et le rayonnement. Les modèles développés pour approcher le comportement non-linéaire dû à la jonction PN, se présentent sous deux familles [21]:

- Modèle à une diode, appelée aussi à exponentielle simple.
- Modèle à deux diodes, appelées aussi à exponentielle double.

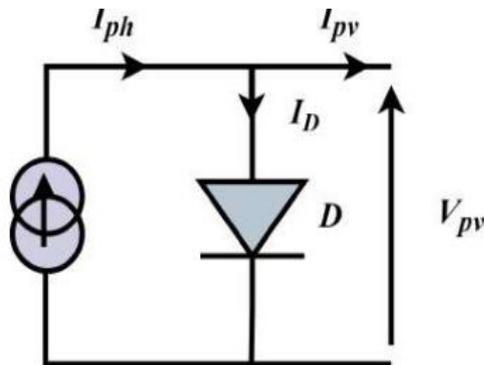
Ces modèles se différencient entre - eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant de la cellule PV.

On présente trois modèles de cellule à savoir [17] :

#### I.4. 1. Modèle idéal

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule PV, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion. La cellule PV peut être étudiée à partir du circuit équivalent, donné par la figure Fig. I.9, qui est composé d'un générateur de courant et d'une diode en parallèle [22]. L'expression du courant aux bornes de la cellule peut être donnée par l'équation suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D \quad (I. 1)$$



**Fig. I.9.** Circuit équivalent d'une cellule PV (modèle idéal).

Où

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

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

$I_D$ : Courant traversant la diode.

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

$$I_D = I_S \left[ \exp \left( \frac{V_D}{AU_T} \right) - 1 \right] \quad (I. 2)$$

$U_T$  est le potentiel thermodynamique représenté par :

$$U_T = \frac{KT}{Q} \quad (I. 3)$$

Où :  $I_S$  : Courant de saturation.

$V_D$ : Tension aux bornes de la diode.

A: Facteur d'idéalité.

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

T : Température.

Q : Charge de l'électron ( $Q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ).

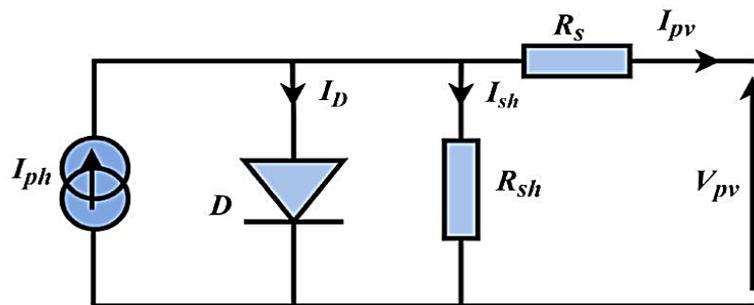
L'équation (I.1) devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_S \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{AU_T} \right) - 1 \right] \quad (I. 4)$$

#### I.4. 2. Modèle à simple diode

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est présenté dans la Fig. I.10.

Il inclut une source de courant, une diode, une résistance série et une résistance shunt [17].



**Fig. I.10.** Circuit équivalent d'une cellule PV (modèle à simple diode).

A partir du circuit équivalent de ce modèle [6], le courant généré par la cellule pourra être présenté par l'équation suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (I. 5)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \right) \quad (I.6)$$

Dans ce cas, le courant électrique produit par la cellule devient comme suit [5] :

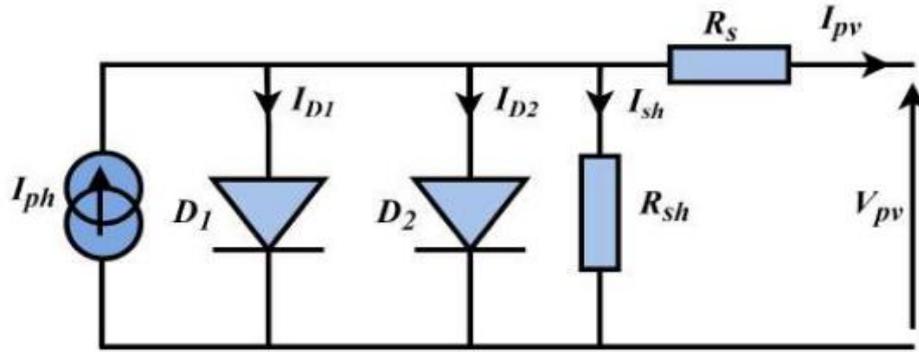
$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A U_T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \right) \quad (I.7)$$

#### I.4. 3. Modèle à double diode

La Fig. I.11 représente le circuit électrique équivalent d'un modèle basé sur une double diode. Il se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, de deux diodes pour la polarisation de la cellule, d'une résistance shunt et d'une résistance série [23-34].

Selon la loi de Kirchhoff on peut écrire :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (I.8)$$



**Fig. I.11** Circuit équivalent d'une cellule PV (modèle à double diodes).

Où :

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

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

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

$$I_{D1} = I_{s1} \left[ \exp \left( \frac{V_{D1}}{A_1 U_T} \right) - 1 \right] \quad (I.9)$$

$$I_{D2} = I_{s2} \left[ \exp \left( \frac{V_{D2}}{A_2 U_T} \right) - 1 \right] \quad (I.10)$$

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A_1 U_T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A_2 U_T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \right) \quad (I.11)$$

#### I.4. 4. Paramètres d'une cellule photovoltaïque [15]

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

##### a) Courant de court-circuit

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

$$I_{CC} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{R_s I_{CC}}{AU_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{R_s I_{CC}}{R_{sh}}\right) \quad (I. 12)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme :

$$I_s \left[ \exp\left(\frac{R_s I_{CC}}{AU_T}\right) - 1 \right] \text{ devant } I_{ph}$$

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

$$I_{CC} \simeq \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (I. 13)$$

$$I_{CC} (V_{pv} = 0) \simeq I_{ph} \quad (I. 14)$$

##### b) Tension de circuit ouvert

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

$$V_{CO} (I_{pv} = 0) \simeq AU_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (I. 15)$$

##### c) Puissance maximale

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule P V sous éclairage dépend de la résistance de charge. Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement  $P_{max}$  ( $I_{max}$ ,  $V_{max}$ ) de la courbe courant-tension (le courant compris entre 0 et  $I_{CC}$  et la tension comprise entre 0 et  $V_{CO}$ ).

Le produit ( $I_{max}$ ,  $V_{max}$ ) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit ( $V_{CO} \cdot I_{CC}$ )

#### d) Facteur de qualité

Ce paramètre est appelé aussi paramètre d'ajustement. De nombreux auteurs discutent des méthodes d'estimation de la valeur correcte de cette constante. Habituellement, ce paramètre varie entre  $1 \leq A \leq 2$ , mais le choix dépend d'autres paramètres du modèle PV, il existe différentes opinions sur la meilleure méthode qui permet de déterminer la valeur de paramètre A qui exprime le degré d'idéalité de la jonction P – N. Une valeur initiale de A peut être choisie pour ajuster le modèle PV. Cette valeur de A peut être modifiée par la suite afin d'améliorer le modèle, si nécessaire. Cette constante affecte la courbure de la caractéristique I (V) et peut ramener une légère amélioration de la précision du modèle.

#### e) Rendement d'une cellule PV

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

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{inc}}} \quad (\text{I. 16})$$

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

$$P_{\text{inc}} = \Psi \cdot S_G \quad (\text{I. 17})$$

où  $\Psi$ : flux global [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

$S_G$ : surface du générateur [ $\text{m}^2$ ].

#### I.4. 5. Caractéristique du générateur PV

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

$$I_{\text{pv}} = I_{\text{ph}} - I_s \left[ \exp \left( \frac{V_{\text{pv}} + R_s I_{\text{pv}}}{A U_T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V_{\text{pv}} + R_s I_{\text{pv}}}{R_{\text{sh}}} \right) \quad (\text{I. 18})$$

Le photo-courant  $I_{\text{ph}}$  est directement proportionnel à l'éclairement et dépend aussi de la température, son expression est la suivante [16] :

$$I_{\text{ph}} = \frac{G}{G_r} [I_{\text{CCR}} + K_0 (T - T_r)] \quad (\text{I. 19})$$

Avec :

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

$G$ : Irradiation en ( $W/m^2$ ).

$G_r$ : Irradiation de référence ( $G_r = 1KW/m^2$ ).

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

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

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

$$I_s = I_{rs} \left( \frac{T}{T_r} \right)^{\frac{3}{A}} \exp \left( \frac{Q \cdot E_g}{K \cdot A} \right) \cdot \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \quad (I.20)$$

Où

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

$E_g$ : L'énergie du "band gap" du semi-conducteur en électron volt (eV) ou énergie de seuil.

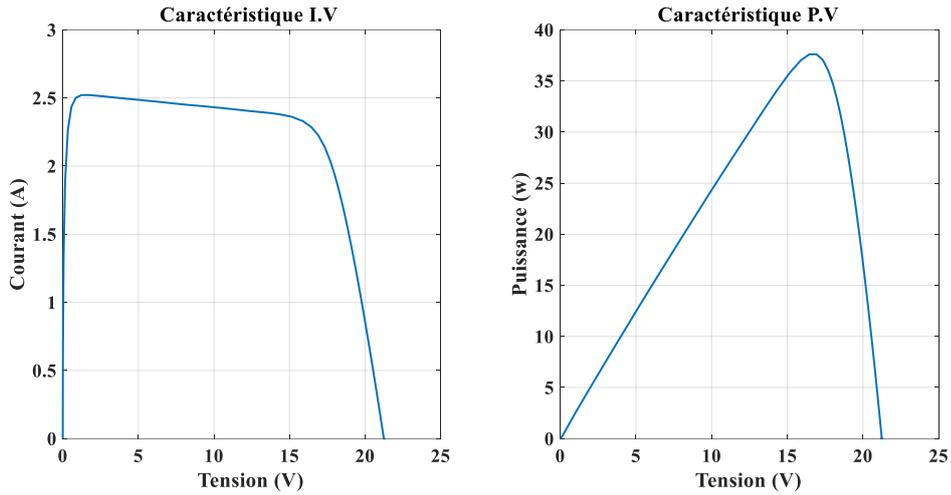
Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin (c-Si), et 1,7 eV pour le silicium amorphe (a-Si).

Étant donné que la tension générée par une seule cellule photovoltaïque peut varier entre 0,3 V et 0,7 V, en fonction du matériau utilisé, de la disposition de la cellule, ainsi que des effets de la température et du vieillissement, les modules photovoltaïques, qui assemblent plusieurs cellules en série et en parallèle, sont cruciaux pour fournir des tensions et des courants plus élevés, adaptés aux exigences des applications électriques.

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

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + \frac{N_s}{N_p} R_s I_{pv}}{N_s A U_T} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V_{pv} + \frac{N_s}{N_p} R_s I_{pv}}{\frac{N_s}{N_p} R_{sh}} \right) \quad (I.21)$$

La Fig. I.12 montre les caractéristiques I-V et P-V du GPV considéré dans les conditions standards de température et d'ensoleillement ( $T = 25^\circ C$ ,  $G = 1 KW/m^2$ ).



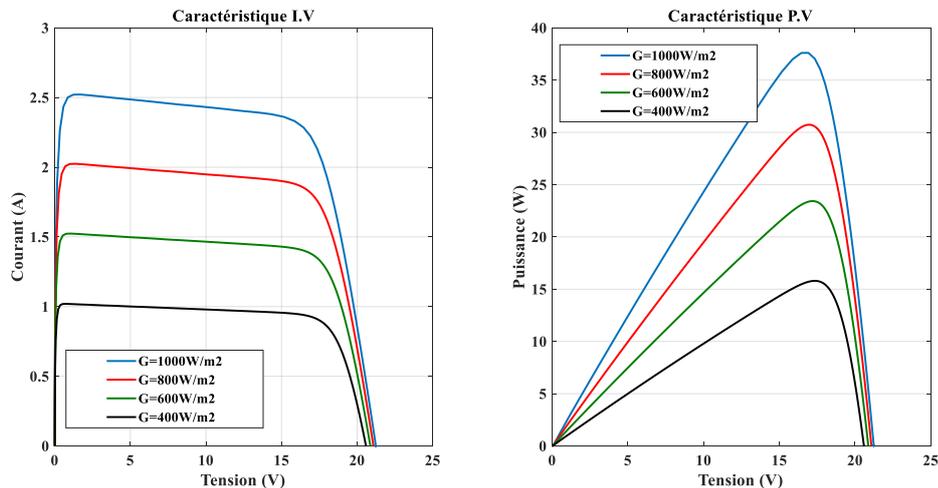
**Fig. I.12.** Caractéristiques I-V et P-V du générateur PV.

#### I.4. 6. Paramètres d'influence sur les caractéristiques du générateur PV

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

##### a- Influence de l'éclairement

Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) et on fait varier l'éclairement. La Fig. I.13 représente les caractéristiques  $I=f(v)$  pour différents niveaux de rayonnement ( $G = 400, 600, 800, 1000\text{W/m}^2$ ) et pour ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) :

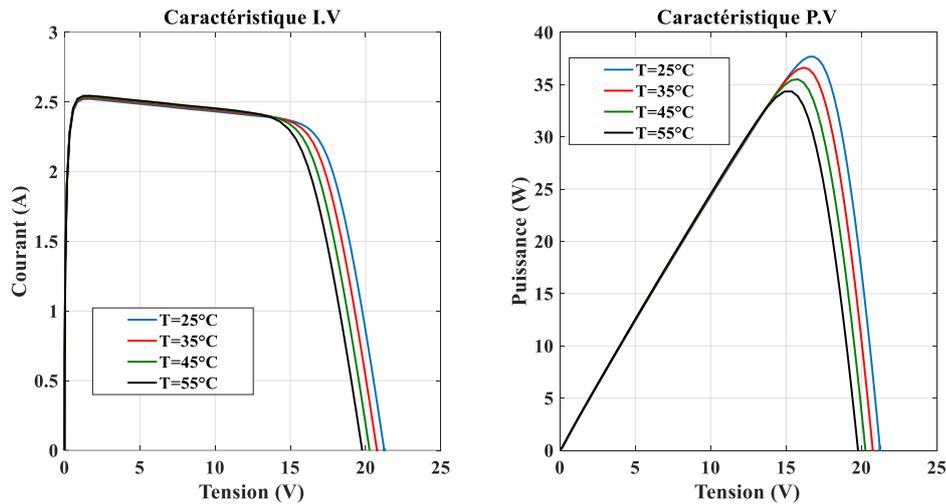


**Fig. I.13.** Influence de l'éclairement sur les caractéristiques PV.

On remarque que la tension  $V_{\text{max}}$  correspondante à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, par contre le courant  $I_{\text{max}}$  augmente fortement avec cette dernière.

## b- Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température. La Fig. I.14 représente les caractéristiques I(V) et P(V) d'un générateur PV en fonction de la température (en faisant varier la température de 25°C jusqu'à 55°C) et à une irradiation solaire constante ( $G=1000\text{W/m}^2$ ).



**Fig. I.14.** Influence de la température sur les caractéristiques PV.

On remarque que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi que celle de la puissance maximale alors que le courant reste presque inchangé.

### I.5. Association des modules PV

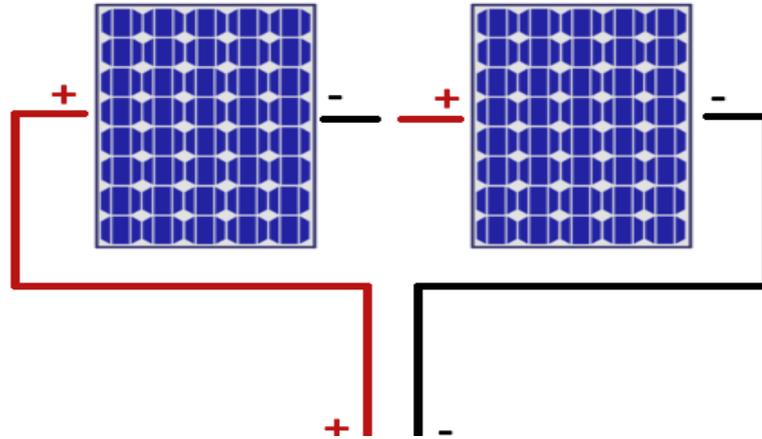
Pour pouvoir augmenter la tension, le courant et la puissance d'un générateur PV, on peut associer plusieurs modules PV en série ou en parallèle ou encore en mixte (série/parallèle).

#### I.5. 1. Association en série

Lorsqu'on branche des modules photovoltaïques en série, cela additionne les voltages, tout en conservant un ampérage identique. Il s'effectue normalement entre des modules de même ampérage.

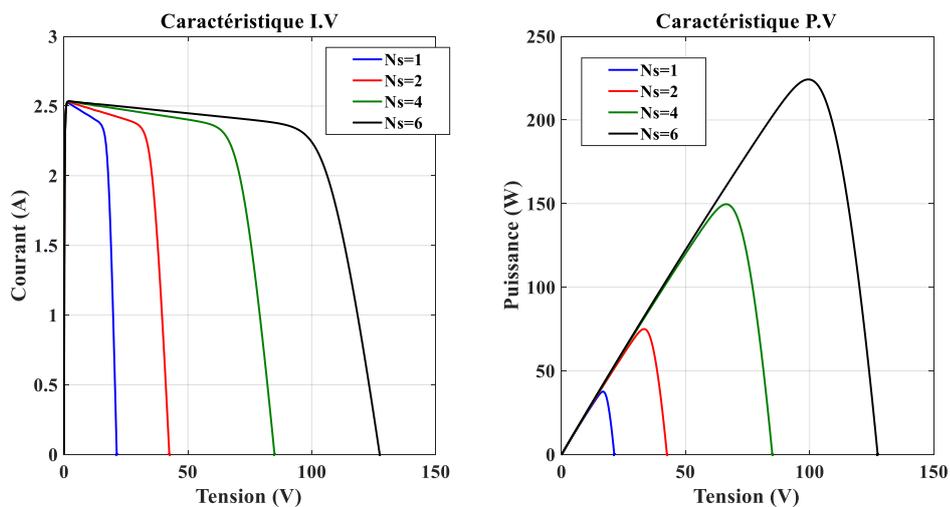
Dans le cas contraire, l'ensemble s'aligne sur l'ampérage le plus faible. Le même courant traverse chaque cellule tandis que la tension globale est la somme des tensions à travers toutes les cellules.

Pour un branchement en série, il faut relier les pôles positifs d'un module aux pôles négatifs d'un autre module (Voir Fig. I.15).



**Fig. I.15.** Branchement des panneaux en série.

Les caractéristiques d'un groupement de  $N_s$  modules PV en série sont représentées par la figure (Fig. I.16) :

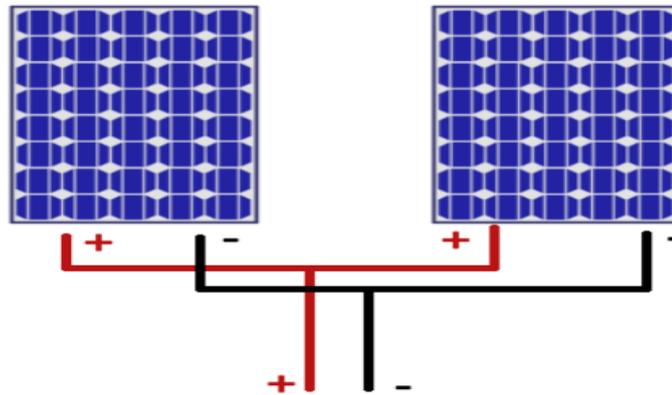


**Fig. I.16.** Les caractéristiques d'un groupement de  $N_s$  modules PV en série.

### I.5. 2. Association en parallèle

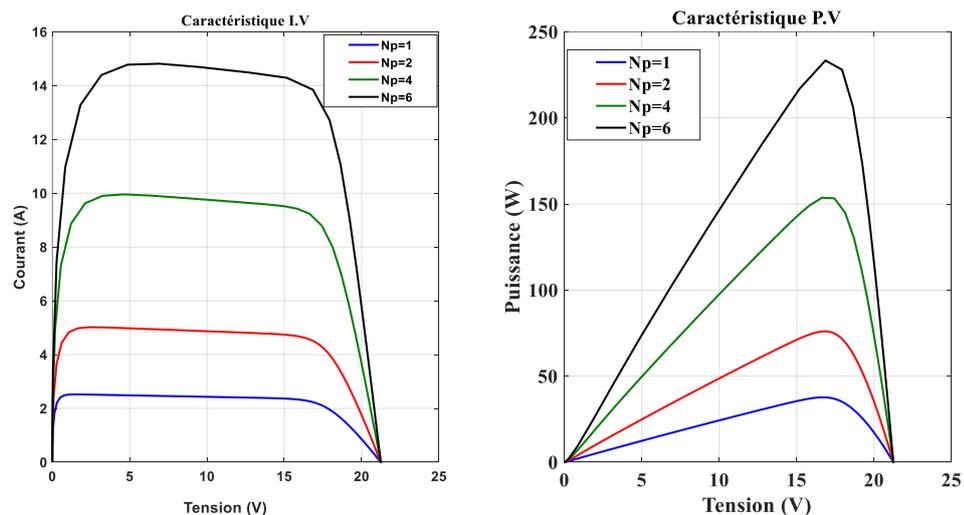
Lors d'un montage de modules en parallèle, ce sont les intensités (ampérage) qui s'additionnent, tandis que la tension (voltage) reste identique. Le résultat est donc inverse d'un branchement en série. Il s'effectue normalement entre des modules de même voltage, et ce, afin d'éviter tout risque de surtension ou de court-circuit. Les intensités peuvent quant à elles être différentes, puisqu'elles s'additionnent. Ce type de branchement est utilisé lorsqu'on souhaite une forte intensité.

Pour un branchement en parallèle, il faut relier les bornes positives entre elles. Il en est de même pour les bornes négatives, cela comme indiqué sur la Fig. I.17.



**Fig. I.17.** Branchement des panneaux en parallèle.

Les caractéristiques d'un groupement de  $N_p$  modules PV en parallèle sont représentées par la Fig. I.18:

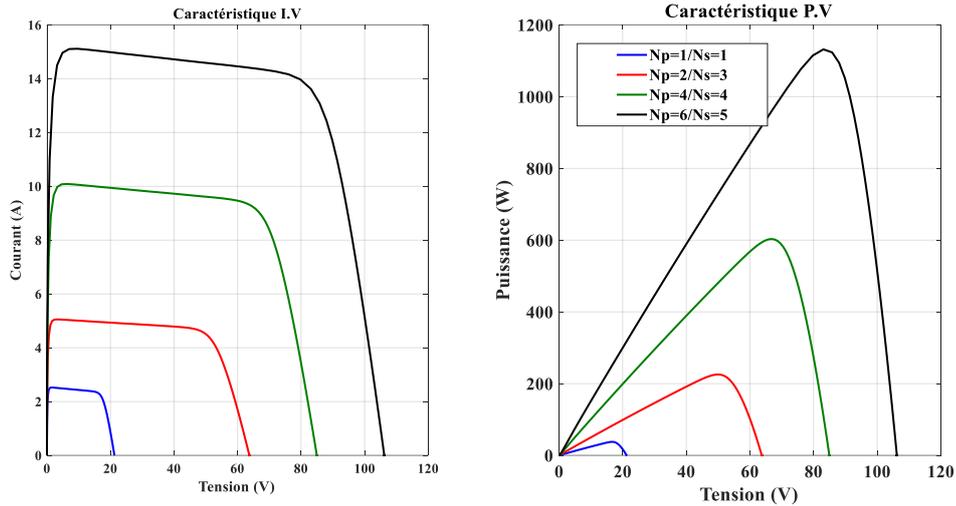


**Fig. I.18.** Les caractéristiques d'un groupement de  $N_p$  modules PV en parallèle.

### I.5. 3. Association mixte (série/parallèle)

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

Les caractéristiques d'un groupement mixte des modules PV sont illustrées par la Fig. I.19.



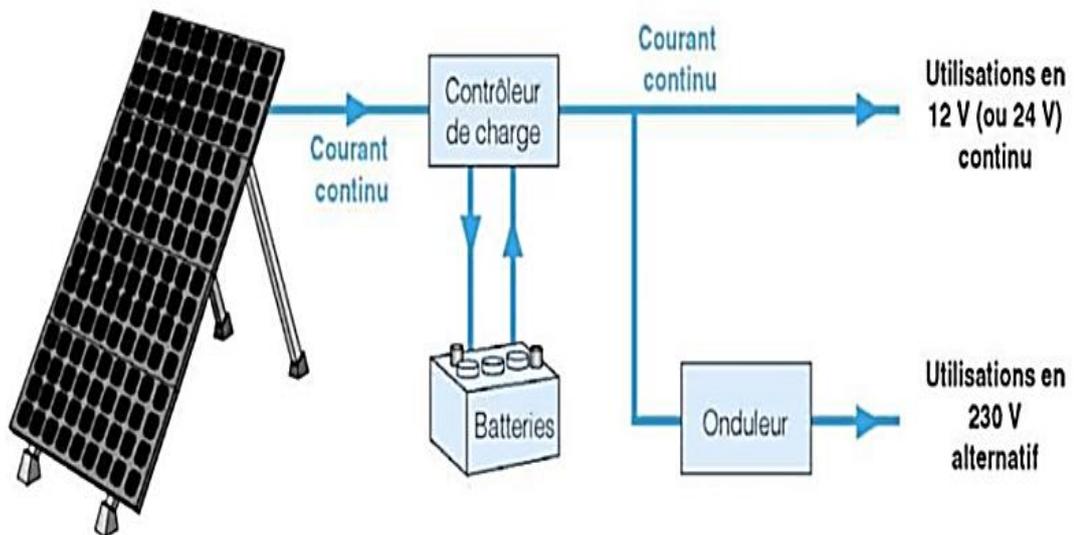
**Fig. I.19.** Les caractéristiques d'un groupement mixte des modules PV.

## I.6. Classification des systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque

Les systèmes de conversion d'énergie PV sont classés en trois types : autonomes, hybrides et raccordés au réseau. Le type à choisir dépendra des besoins énergétiques et du site.

### I.6. 1. Systèmes autonomes

Un système photovoltaïque (PV) autonome, également connu sous le nom de système PV hors réseau, est une installation solaire conçue pour fonctionner indépendamment du réseau électrique. Ces systèmes sont typiquement utilisés dans des endroits où il n'est pas viable ou économique de se connecter au réseau électrique principal. Ils sont particulièrement utiles pour l'alimentation électrique dans des zones reculées, des cabanes isolées, des véhicules de loisirs, des bateaux, ou des systèmes de communication et de surveillance (Voir Fig. I.20).



**Fig. I.20.** Système PV autonome.

### I.6. 2. Systèmes photovoltaïques hybrides

Les systèmes hybrides sont généralement des systèmes PV couplés à une autre source d'énergie (éolienne ou groupe électrogène par exemple) dotés d'accumulateurs de stockage d'énergie, leur rôle est de palier aux insuffisances (voir Fig. I.21).

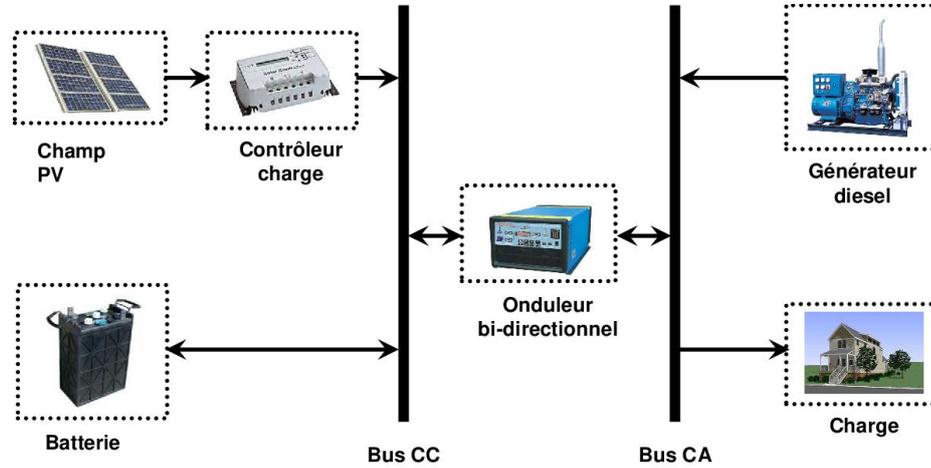


Fig. I.21. Système PV hybride.

### I.6. 3. Systèmes PV à injection aux réseaux

Les systèmes PV à injection au réseau, également connus sous le nom de systèmes PV connectés au réseau, sont des installations solaires qui sont directement reliées au réseau électrique public. Contrairement aux systèmes PV autonomes, ces installations ne disposent pas de batteries pour stocker l'énergie qu'elles produisent. Au lieu de cela, toute l'électricité générée est soit immédiatement consommée par le propriétaire, soit injectée dans le réseau électrique général (Voir Fig. I.22).

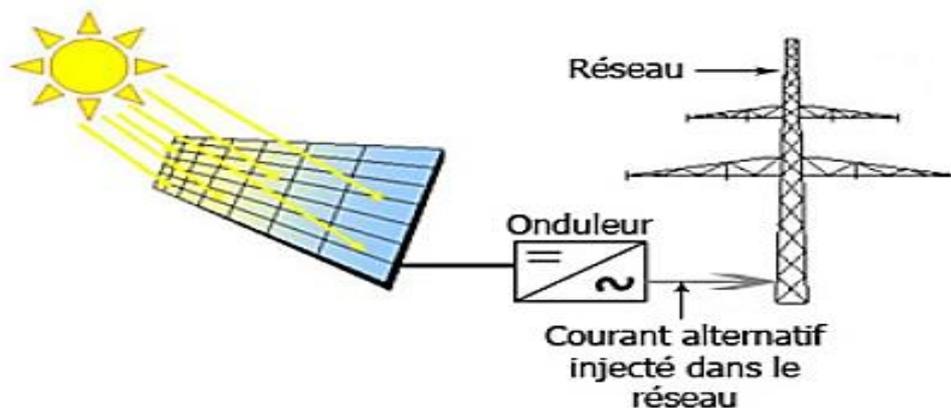


Fig. I.22. Système PV à injection aux réseaux.

## **I.7. Conclusion**

L'électricité photovoltaïque est sans doute la plus confortable des énergies, car elle est non polluante et peut être produite sur son lieu de consommation, en dehors et à part du réseau électrique de son entourage car elle est le résultat de la transformation de la lumière du soleil en électricité en passant juste par le générateur photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions sur les énergies renouvelables d'une manière générale ; par la suite, nous avons présenté en détail l'énergie photovoltaïque en commençant par le principe de la conversion photovoltaïque, on enchaîne par le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque et son module. La puissance maximale d'un module solaire dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

Le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement. Le chapitre suivant est dédié à la commande d'un système photovoltaïque pour le maintien à sa production maximale.

*Chapitre II*  
*Convertisseurs DC-DC*

## II.1. Introduction

Comme on a constaté dans le premier chapitre que la puissance maximale générée par un module PV dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. La position du point de puissance maximale changera à son tour et dépendra des changements de la température ainsi que de l'ensoleillement.

Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque. Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT).

Ce chapitre se concentre sur l'étude des convertisseurs DC-DC, particulièrement utiles dans les systèmes PV. La modélisation d'un convertisseur boost sera la première étape, puis nous établirons des relations mathématiques nécessaires pour déterminer les valeurs optimales de ses composants. Ensuite, nous examinerons les différents types de convertisseurs, tels que les convertisseurs Boost, Buck et Buck-Boost. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présenterons le principe de fonctionnement du point de puissance maximale (MPPT).

## II.2. Convertisseur DC-DC

L'hacheur est un convertisseur continue-continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant) (voir Fig. II.1). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue.

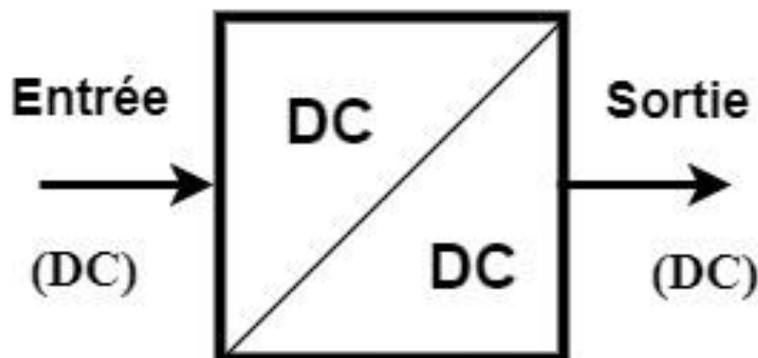
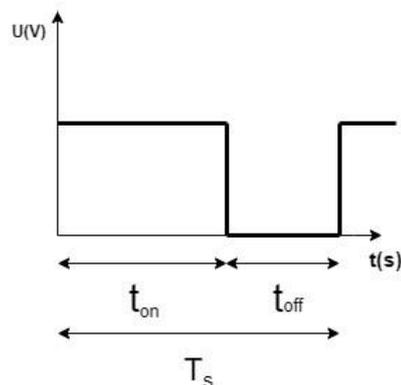


Fig. II.1 Symbole d'un convertisseur DC-DC.

L'hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [26].

L'hacheur permet la modulation de l'énergie entre une source et une charge continue. Cette source et cette charge peuvent être soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant). Il est constitué d'un interrupteur commandé qui peut être un transistor (pour des faibles puissances) ou un thyristor (pour grande puissance). Le rapport entre la durée  $t_{on}$  de fermeture de l'interrupteur et la période de commutation  $T_s$  s'appelle le rapport cyclique  $\alpha$  (voir Fig. II.2).

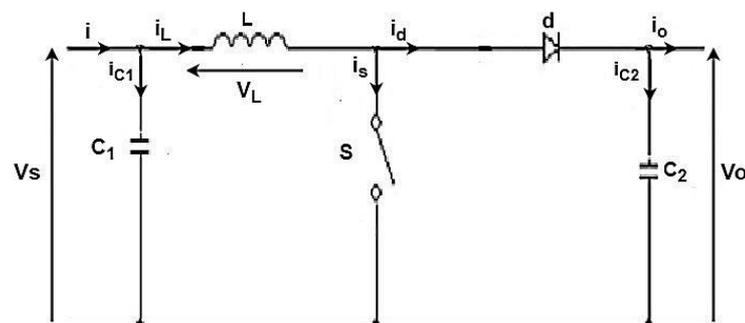
$$\alpha = \frac{t_{on}}{T_s} \quad \text{Ou bien: } t_{on} = dT_s \quad \text{d'où: } t_{off} = (1 - \alpha) \cdot T_s \quad (\text{II.1})$$



**Fig. II.2.** Durée de fonctionnement de l'hacheur.

Il existe plusieurs types de convertisseurs statiques DC-DC dont les plus connus sont : Le convertisseur statique survolteur (boost), le convertisseur statique dévolteur (Buck), le convertisseur mixte dévolteur-survolteur (buck-boost).

Ces convertisseurs sont utilisés fréquemment dans les systèmes PV pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux PV avec les différentes charges.



**Fig. II.3.** Circuit électrique d'un convertisseur boost [27].

### II.2. 1. Convertisseur survolteur (boost)

Le convertisseur boost est connu par le nom d'élévateur de tension, il permet de convertir la tension continue d'entrée en une tension de sortie plus élevée [25].

Le schéma de la Fig. II.3 représente le circuit électrique d'un convertisseur survolteur boost. Il comprend :

- **Une inductance L**

L'inductance est un composant crucial, elle stocke l'énergie sous forme de champ magnétique lorsqu'un courant la traverse et la libère ensuite. L'inducteur aide à lisser le courant d'entrée et joue un rôle clé dans la détermination de la performance du convertisseur, incluant la régulation de la tension de sortie et l'efficacité du convertisseur.

- **Une diode d**

La diode permet le passage du courant dans une seule direction. Elle bloque le retour du courant de la sortie vers l'entrée quand l'interrupteur (transistor) est ouvert, permettant ainsi à la tension aux bornes de la charge d'être supérieure à celle de l'entrée.

- **Un transistor S**

Le transistor agit comme un interrupteur commandé dans le circuit. Dans la plupart des cas, il s'agit d'un MOSFET ou d'un transistor bipolaire. L'état du transistor (ouvert ou fermé) régule la quantité d'énergie transférée de l'inducteur à la sortie et contrôle ainsi la tension de sortie.

- **Un condensateur de sortie  $C_2$**

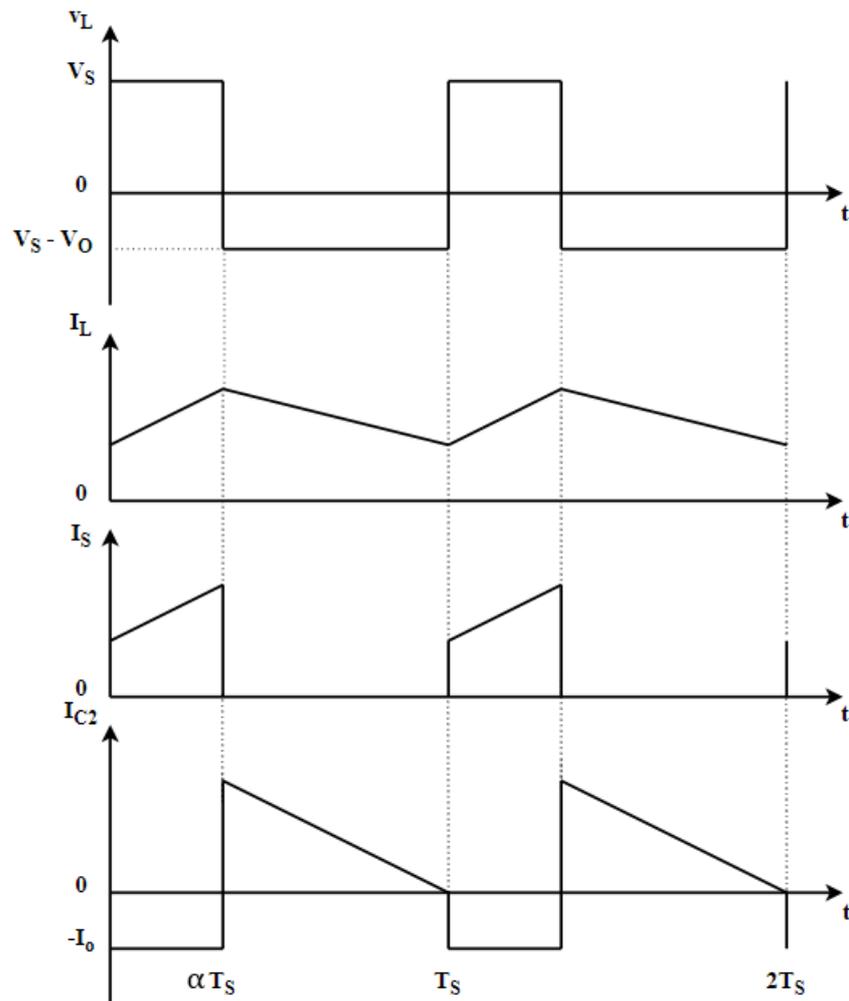
Le condensateur de sortie est utilisé pour lisser la tension de sortie et fournir une tension continue au chargement. Il réduit également le bruit et les variations de la tension de sortie, ce qui est essentiel pour maintenir une sortie stable.

Le convertisseur boost est généralement utilisé dans des applications telles que les alimentations régulées pour les appareils électroniques portables, les systèmes d'énergie renouvelable pour augmenter la tension de modules photovoltaïques basse tension, et dans des applications automobiles où une tension plus élevée est nécessaire à partir d'une batterie de tension plus basse.

### a. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement repose sur la commutation périodique d'un interrupteur (généralement un transistor) pour contrôler le transfert d'énergie de l'entrée vers la sortie.

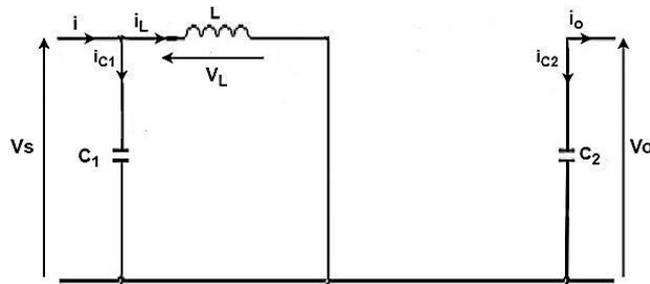
La Fig. II.4. représente les différentes formes d'ondes des tensions et des courants d'entrée et de sortie du «boost» en fonction du rapport cyclique  $\alpha$  et la période  $T_s$  [26].



**Fig. II.4.** Forme d'ondes des tensions et des courants d'entrée et de sortie du « Boost» en fonction du rapport cyclique  $\alpha$  et la période  $T_s$  [27].

#### Première période ("S" fermé)

Le schéma de la Fig. II.5 représente le circuit électrique d'un convertisseur survolteur boost lorsque S est fermé.



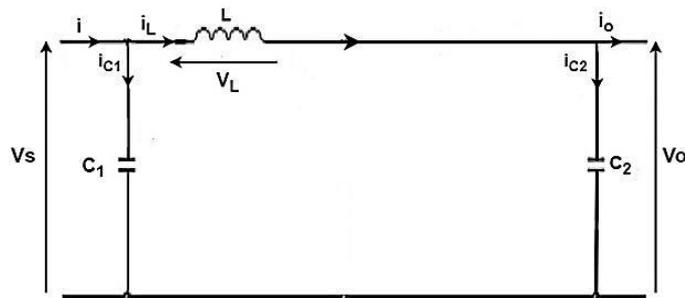
**Fig. II.5.** Schéma équivalent du convertisseur Boost pour S fermé

La diode est polarisée en inverse pour la fermeture sur l'intervalle  $[0, \alpha.T_s]$ . L se charge et le courant délivré par la source commence à augmenter progressivement. Pendant cet intervalle de temps on a les expressions suivantes [27]:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_L(t)}{dt} = i(t) - i_L(t). \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t). \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s(t). \end{array} \right. \quad (\text{II. 2})$$

### Deuxième période ("S" ouvert)

La Fig. II.6 représente le schéma équivalent du convertisseur boost pendant  $(1 - \alpha)T_s$  où la diode assure la continuité du courant dans l'inductance.



**Fig. II.6.** Schéma équivalent du convertisseur Boost pour S ouvert.

L'énergie emmagasinée est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. Dans ce cas, On obtient l'ensemble suivant d'équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_s(t)}{dt} = i(t) - i_L(t). \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t). \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s(t) - V_o(t). \end{array} \right. \quad (\text{II. 3})$$

### b. Paramètres du survolteur “boost”

Il est nécessaire de sélectionner les valeurs optimales des composants du survolteur afin de garantir le bon fonctionnement de ce convertisseur. Pour ce faire, il est nécessaire de suivre les étapes suivantes pour calculer ces composants :

- **La résistance  $R_{mp}$**

$$R_{mp} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \quad (\text{II. 4})$$

$$R_{mp} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \quad (\text{II. 5})$$

- **La résistance de sortie  $R$**

$$R = \frac{R_{mp}}{(1 - \alpha)^2} \quad (\text{II. 6})$$

- **Le rapport cyclique  $\alpha$**

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{mp}}{R}} \quad (\text{II. 7})$$

- **La tension de sortie  $V_o$**

$$V_o = V_{mp} \sqrt{\frac{R}{R_{mp}}} \quad (\text{II. 8})$$

- **L'inductance  $L$**

$$L = \left( \frac{V_{mp} * \alpha}{(f * \Delta i_L)} \right) \quad (\text{II. 9})$$

- **Pour**

$$\Delta i_L = 0.3 * i_L \quad (\text{II. 10})$$

- **Condensateur d'entrée  $C_1$**

$$C_1 = \frac{\alpha}{8. L. \Delta V_{mp} \cdot f^2} \quad (\text{II. 11})$$

- Condensateur de sortie  $C_2$

$$C_2 = \frac{\alpha}{R * \Delta V_{mp} * f} \quad (\text{II. 12})$$

- Avec

$$\Delta V_{mp} = 0.05 * V_{mp} \quad (\text{II. 13})$$

## II.2. 2. Convertisseur dévolteur “buck”

La Fig. II.7 représente le schéma électrique d'un convertisseur buck qui est une alimentation à découpage permettant de convertir la tension de source  $V_s$  en une tension plus basse  $V_o$ . Il est constitué d'un interrupteur  $S$  en série avec le générateur, d'une diode  $d$ , d'une inductance  $L$  et d'un condensateur  $C_2$ .

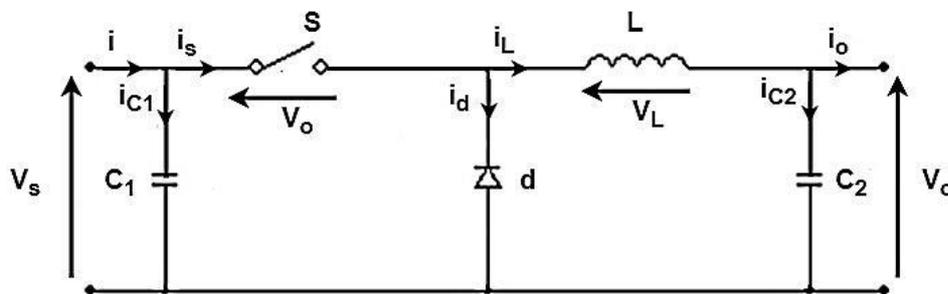


Fig. II.7. Schéma électrique du convertisseur buck.

### a. Principe de fonctionnement

Afin d'analyser le fonctionnement du convertisseur dévolteur et d'extraire son modèle mathématique, nous examinons les forme d'ondes des tensions et des courants d'entrée et de sortie du « Buck » en fonction du rapport cyclique  $\alpha$  (voir Fig. II.8) et le circuit équivalent pour les états ouvert et fermé de la période  $T_s$ ,

- Première période ("S" fermé)

Le circuit équivalent du convertisseur dévolteur buck est présenté dans la Fig. II.9, durant la période  $t \in [0, \alpha. T_s]$ ,  $S$  est fermé.

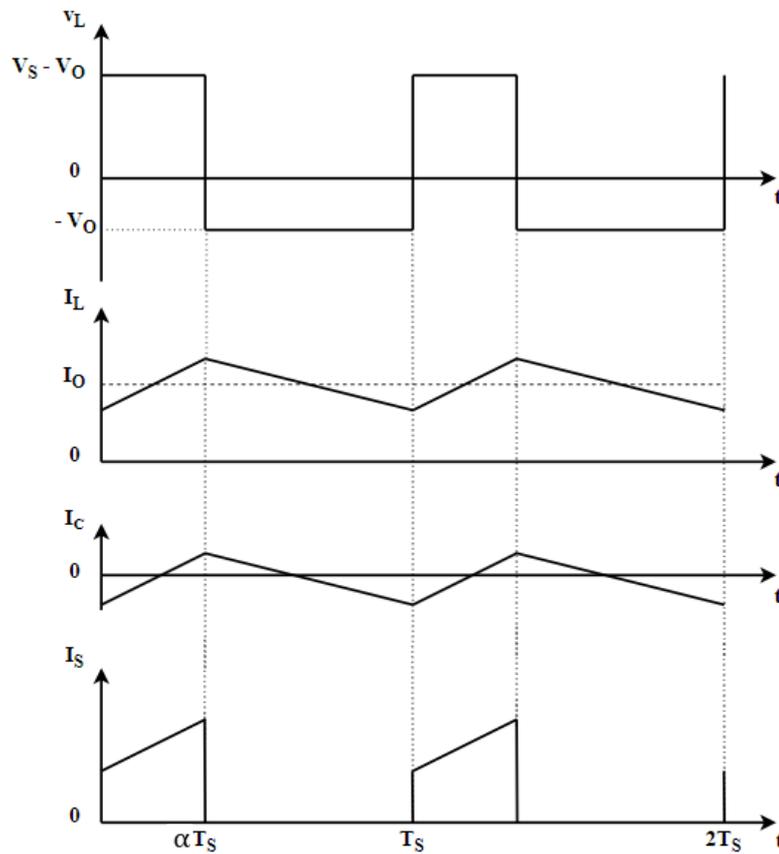


Fig. II.8. Forme d'ondes des tensions et des courants d'entrée et de sortie du boost.

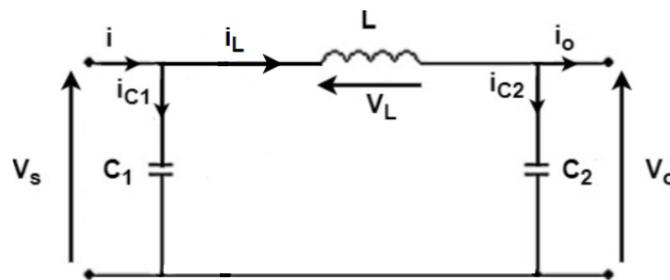


Fig. II.9. Circuits équivalents du convertisseur buck "S" fermé.

Durant cette période la source d'entrée fournit l'énergie à la résistance de charge à travers l'inductance L. Le courant  $i_L$  et la tension  $V_o$  sont donnés par les expressions suivantes :

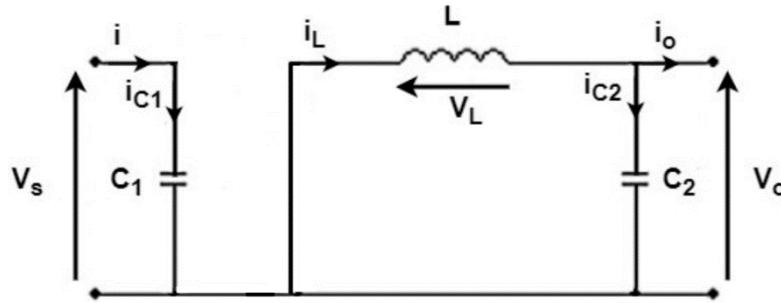
- Pour  $t \in [0, \alpha \cdot T_s]$ , S est fermé :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_s(t)}{dt} = i(t) - i_L(t). \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t). \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s(t) - V_o(t). \end{cases} \quad (II.14)$$

- **Deuxième période ("S" ouvert)**

le schéma équivalent du convertisseur buck pendant la période  $t \in [\alpha.T_s, T_s]$  est illustré dans la Fig. II.10.

Durant cette période, l'énergie stockée dans l'inductance  $L$  est déchargée dans le condensateur et la résistance de charge à travers la diode qui est en état de conduction afin de protéger l'interrupteur.



**Fig. II.10.** Circuits équivalents du convertisseur dévolteur buck "S"ouvert.

- Pour  $t \in [\alpha.T_s, T_s]$ , S est ouvert :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_s(t)}{dt} = i(t). \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t). \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o(t). \end{cases} \quad (\text{II. 15})$$

**b. Paramètres du dévolteur "buck"**

La tension en sortie du convertisseur abaisseur est influencée par le rapport cyclique du convertisseur. Non seulement la tension de sortie, mais aussi d'autres paramètres importants tels que les variations du courant et de la tension, ainsi que les valeurs minimales et maximales du courant traversant l'inducteur, tous dépendant du rapport cyclique.

Les relations entre ces paramètres et  $\alpha$  sont décrites par les équations suivantes [28]:

$$V_o = \alpha V_s \quad (\text{II. 16})$$

$$\Delta i_L = \frac{1}{L} (V_s - V_o) \alpha T_s = \frac{V_o}{L} (1 - \alpha) T_s \quad (\text{II. 17})$$

$$I_{\min} = V_o \left( \frac{1}{R} - \frac{(1 - \alpha) T_s}{2L} \right) \quad (\text{II. 18})$$

$$I_{\max} = V_o \left( \frac{1}{R} + \frac{(1-\alpha)T_s}{2L} \right) \quad (\text{II. 19})$$

$$\Delta V_o = \frac{(1-\alpha)T^2 V_o}{8LC} \quad (\text{II. 20})$$

$$L_{\min} = \frac{(1-\alpha)R}{2f} \quad (\text{II. 22})$$

$$r = \frac{\Delta V_o}{V_o} \quad (\text{II. 23})$$

D'où; 
$$r = \frac{(1-\alpha)}{8LCf^2} \quad (\text{II. 24})$$

$$C_{\min} = \frac{(1-\alpha)V_o}{8rLf^2} \quad (\text{II. 25})$$

### II.2. 3. Convertisseur dévolteur-survolteur "buck-boost"

Le convertisseur dévolteur-survolteur, montré dans la Fig. II.11, combine les propriétés des deux convertisseurs précédents pour convertir une tension continue d'entrée à une tension de sortie de valeur souhaitée.

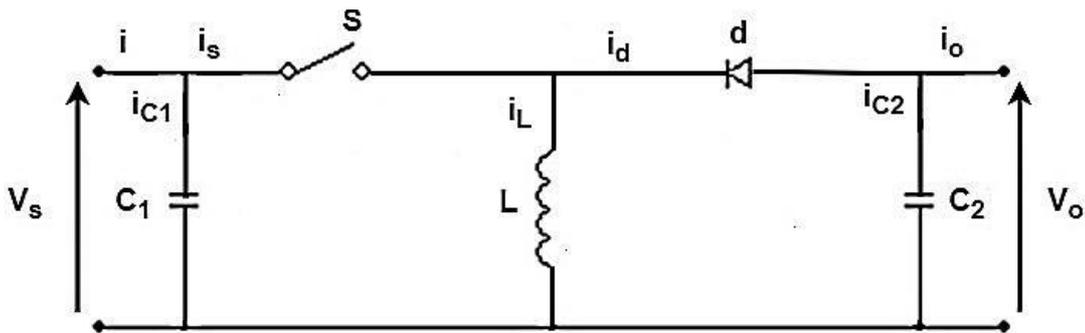


Fig. II.11. Schéma électrique du convertisseur buck-boost.

#### a. Principe de fonctionnement

Durant l'intervalle  $t \in [0, \alpha T_s]$  (voir Fig. II.12), S est en état de conduction, L se charge.

On obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_s(t)}{dt} = i(t) - i_L(t). \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t). \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s(t). \end{cases} \quad (\text{II. 26})$$

L'interrupteur S s'ouvre au début de l'intervalle  $t \in ]\alpha T_s, T_s]$ , le courant délivré par L, circule à travers la diode pour alimenter la charge. Puisque le courant est forcé à traverser la charge, la tension de sortie  $V_o$  du convertisseur dévolteur-survolteur est négative par rapport à la masse et sa valeur peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée  $V_s$ . On a l'ensemble d'équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_s(t)}{dt} = i(t). \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t). \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_o(t). \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

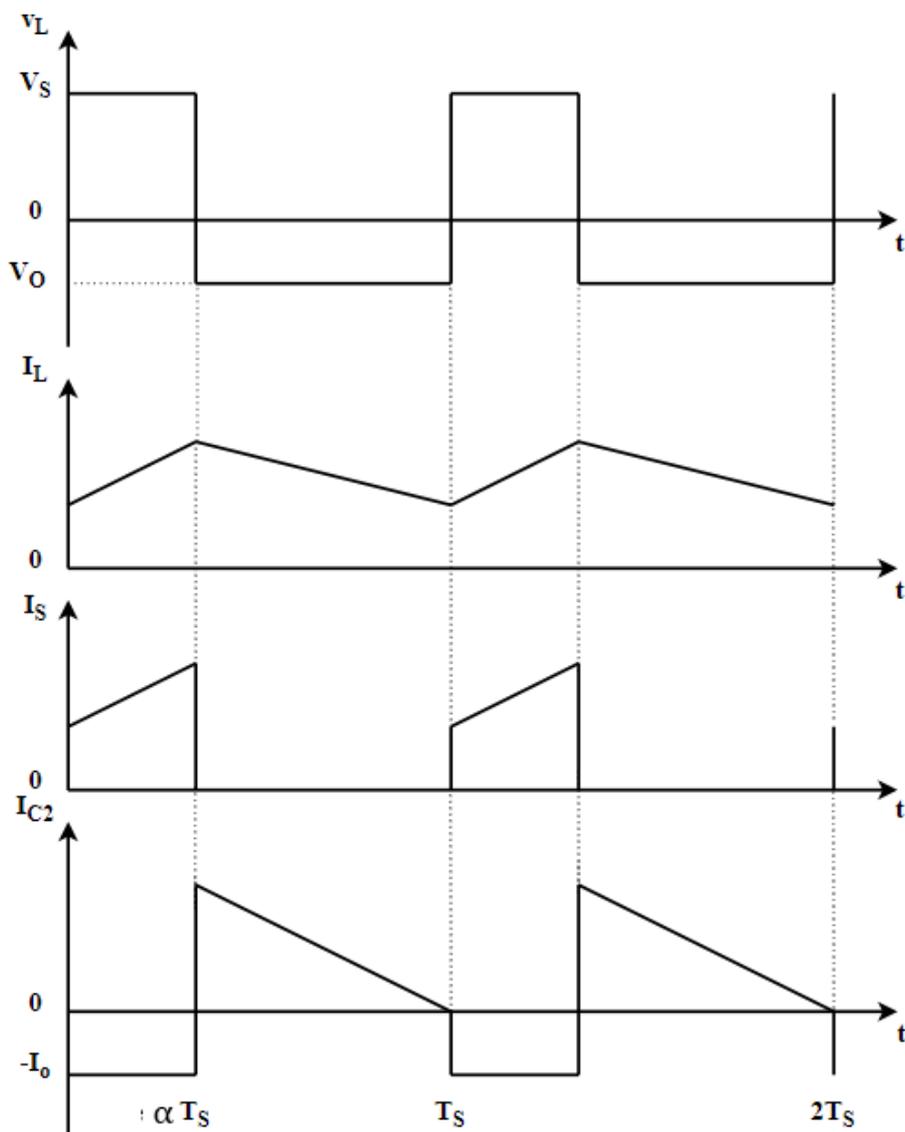


Fig. II.12. Tensions et courants du convertisseur buck-boost.

### b. Paramètres du convertisseur “ buck-boost ”

En régime permanent, le rapport de conversion de convertisseur Buck-Boost s'écrit ainsi :

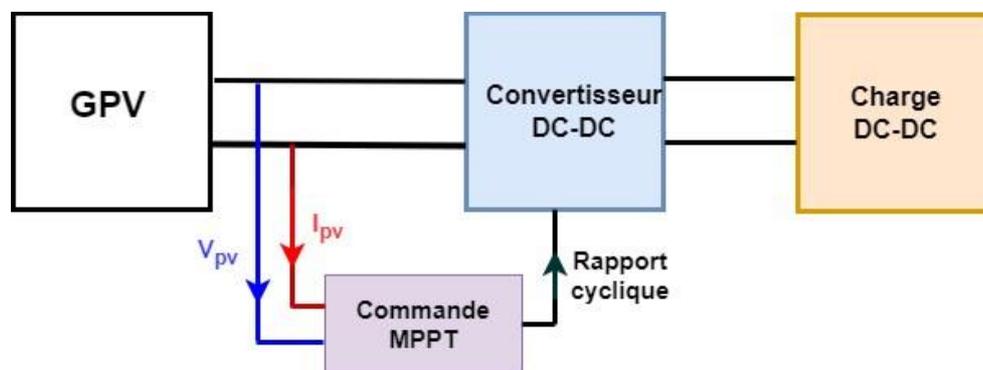
$$V_s * \alpha T_s = V_o * (1 - \alpha) * T_s \quad (\text{II. 28})$$

$M(D)$  est calculé à partir de l'équation suivante :

$$M(\alpha) = \frac{V_o}{V_s} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (\text{II. 29})$$

### II.3. Principe de la recherche du point de puissance maximale

La Fig. II.13 représente une chaîne de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT.



**Fig. II.13** Chaîne de conversion PV contrôlée par une commande MPPT.

Le principe de cette commande est de faire varier le rapport cyclique du convertisseur DC-DC pour extraire le maximum de puissance que le générateur PV peut fournir quelles que soient les changements climatiques. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM. En général, cet algorithme est basé sur la variation du rapport cyclique en fonction de l'évolution de ses paramètres d'entrée (courant, tension et puissance du générateur PV) jusqu'à l'atteinte du PPM.

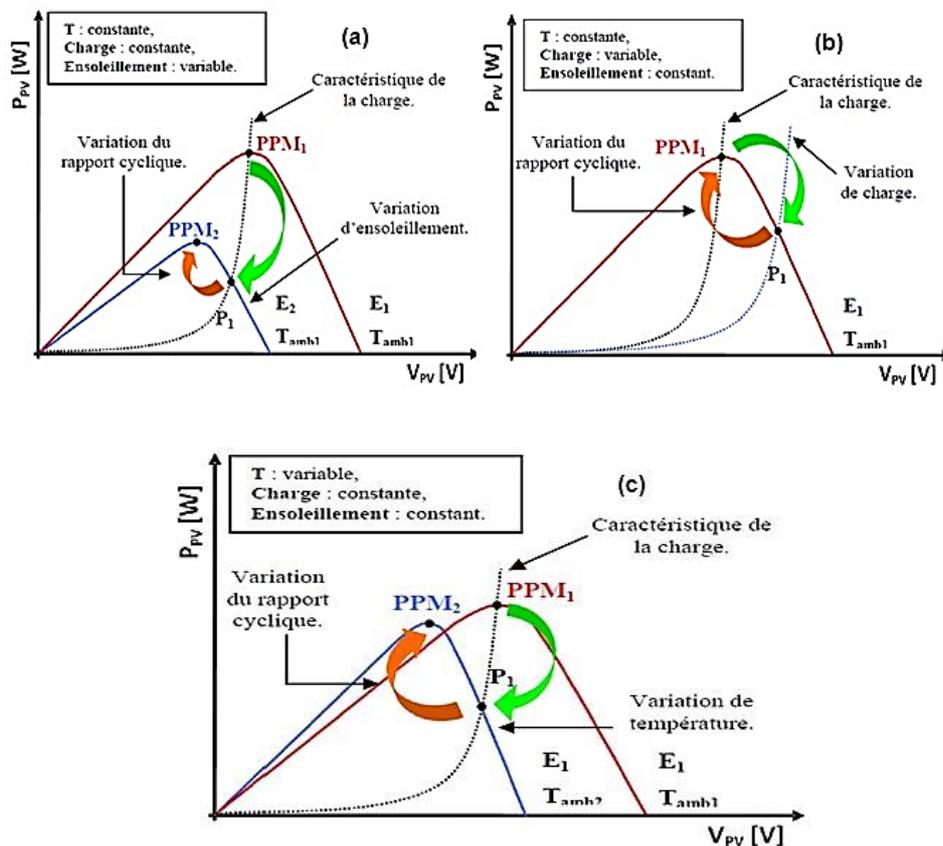
La Fig. II.14 illustre trois cas de perturbation. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximale  $PPM_1$  vers un nouveau point  $P_1$  de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur de rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum  $PPM_2$ .

Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du générateur photovoltaïque (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédant.

En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique pour rechercher et atteindre le PPM (point de puissance maximale) du générateur photovoltaïque [29].



**Fig. II.14** Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale.  
 (a) suite à une variation d'insolation, (b) suite à une variation de charge,  
 (c) suite à une variation de température

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse de principales méthodes de poursuite du point de puissance maximale (PPM) existants et les plus répandues sont présentés dans le chapitre suivant.

## II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié les différents types des convertisseurs DC-DC utilisés dans la conversion d'énergie solaire photovoltaïque. Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. Dans un tel système, l'interface entre le générateur photovoltaïque et la charge est réalisée par une électronique communément appelée convertisseur MPPT qui possède deux fonctions. Premièrement, l'extraction du maximum de puissance du générateur photovoltaïque et deuxièmement, la gestion de la charge en contrôlant le flux d'énergie entre deux sources continues. La topologie du convertisseur à utiliser est fixée par les niveaux de tensions.

## *Chapitre III*

*Maximisation de puissance*

*dans un système PV*

### III.1. Introduction

L'exploitation optimale de l'énergie électrique disponible aux bornes du générateur photovoltaïque peut contribuer à la réduction du coût global du système. L'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking : MPPT) est utilisé pour extraire la puissance maximale du panneau solaire en contrôlant les variations de la caractéristique courant-tension des cellules qui est affectée par la variation de l'éclairement et de la température. Dans le domaine de la conversion d'énergie, la commande MPPT contrôle le convertisseur DC-DC assurant l'interface de puissance entre le générateur photovoltaïque et la charge qui permet au générateur d'énergie de fournir une puissance maximale. Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant, aux contrôleurs plus performant utilisant des algorithmes de poursuite de point maximum de puissance délivrée par le générateur photovoltaïque. Ces dernières années des techniques de commandes plus robuste ont été associées à la commande MPPT telle que la logique floue afin d'augmenter le rendement des panneaux solaires. Dans ce contexte plusieurs méthodes de poursuite et algorithmes ont été mises en application, chacune présente des avantages et des inconvénients. Dans ce chapitre, on présente par les méthodes conventionnelles, telle que la méthode Perturbation et Observation (P&O) et Incrémentation de la Conductance (INC) ainsi que les méthodes intelligentes, où on s'intéresse aux techniques basées sur les RNA.

### III.2. Classification des algorithmes de recherche MPPT

La classification des algorithmes de recherche MPPT peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies, (Méthodes de commandes) utilisées. On présentera deux catégories, les méthodes conventionnelles et les méthodes avancées :

#### III.2.1. Méthodes conventionnelles

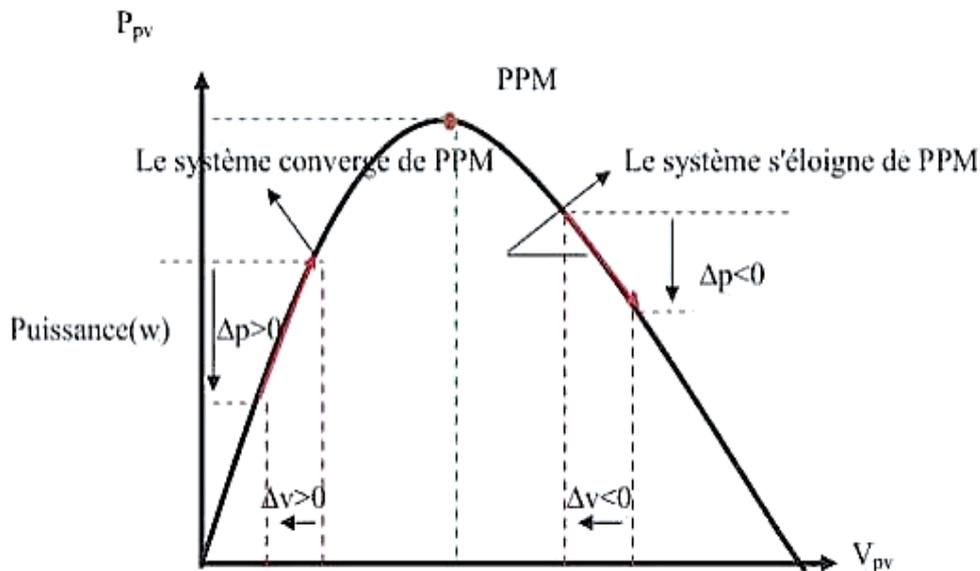
Les méthodes conventionnelles incluent l'utilisation des mesures de tension et de courant des panneaux. Leur algorithme repose sur la variation de ces mesures. Ces algorithmes présentent l'avantage de ne pas exiger une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux solaires photovoltaïques. On exposera la méthode Perturbe & Observe (P&O) et l'incrément de conductance.

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

Le principe de la commande MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de la puissance  $P_{pv}$  qui en résulte.

Ainsi, comme l'illustre la Fig. III.1, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM.

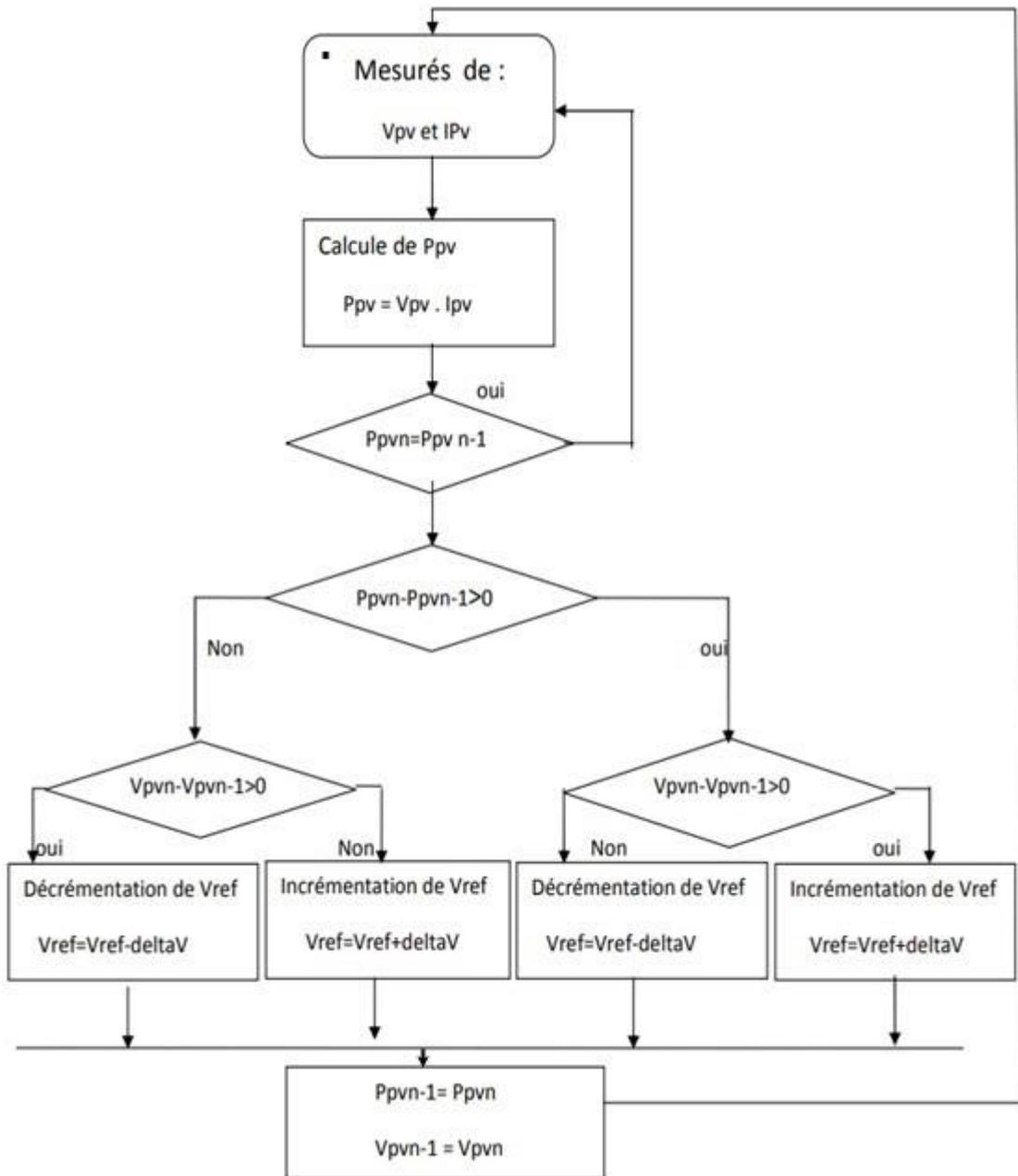
Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de la tension sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande [25].



**Fig. III.1.** Schéma de convergence vers le PPM par P&O.

La FIG. III.2 représente l'algorithme conventionnelle associé à une commande MPPT de type P&O.

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



**Fig. III.2** Algorithme P&O.

Telle que :

$P_{pv_n}$  : puissance dans le temps (t).

$P_{pv_{n-1}}$  : puissance dans le temps (t - 1).

$V_{pv_n}$  : Tension dans le temps (t).

$V_{pv_{n-1}}$  : Tension dans le temps (t - 1).

$$\Delta p = P_{pv_n} - P_{pv_{n-1}} \quad (\text{III. 1})$$

$$\Delta v = V_{pv_n} - V_{pv_{n-1}} \quad (\text{III. 2})$$

La méthode P&O est couramment employée en raison de sa simplicité d'application, cependant elle pose quelques difficultés en raison des fluctuations du PPM qu'elle génère dans le régime établi, car la procédure de recherche du PPM doit être répétée régulièrement, ce qui oblige à répéter régulièrement la procédure. Le système doit constamment osciller autour du PPM une fois qu'il est atteint. Il est possible de réduire les oscillations en diminuant la valeur de la variable de perturbation. Toutefois, une valeur d'incrément faible ralentit la recherche du PPM, il est donc nécessaire de trouver un équilibre entre précision et rapidité. Ce qui complique l'optimisation de cette commande.

### b. Méthode d'incrémentation de la conductance (INC)

Cette technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des connaissances sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM, ainsi la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{III. 3})$$

L'évolution de la puissance du module  $P_{pv}$  par rapport à la tension  $V_{pv}$  donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite.

- Si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ , le pf est à gauche du PPM.
- Si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ , le pf est sur le PPM.
- Si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ , le pf est à droite du PPM.

Le lien entre la conduction et la dérivée de la puissance  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$  peut-être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} \frac{d(I_{pv} \cdot V_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \cong I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{III. 4})$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance :

- Si  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ , le pf est à gauche du PPM.
- Si  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ , le pf est sur le PPM.
- Si  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ , le pf est à droite du PPM.

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$  comme illustre l'algorithme de la FIG. III.3.

$V_r$  Correspond à la tension de référence et force le GPV à fonctionner à cette valeur. Si on est au PPM, alors la tension  $V_r$  correspond à la tension optimale  $V_{opt}$ . Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de  $\Delta I_{pv}$ . Cela indique alors un changement de conditions climatiques, donc un nouveau PPM à rechercher. Pour cela l'algorithme incrémente ou décrémente la valeur de  $V_r$  jusqu'à atteindre le PPM, le schéma de principe de cette méthode est illustré sur FIG. III.3 [29].

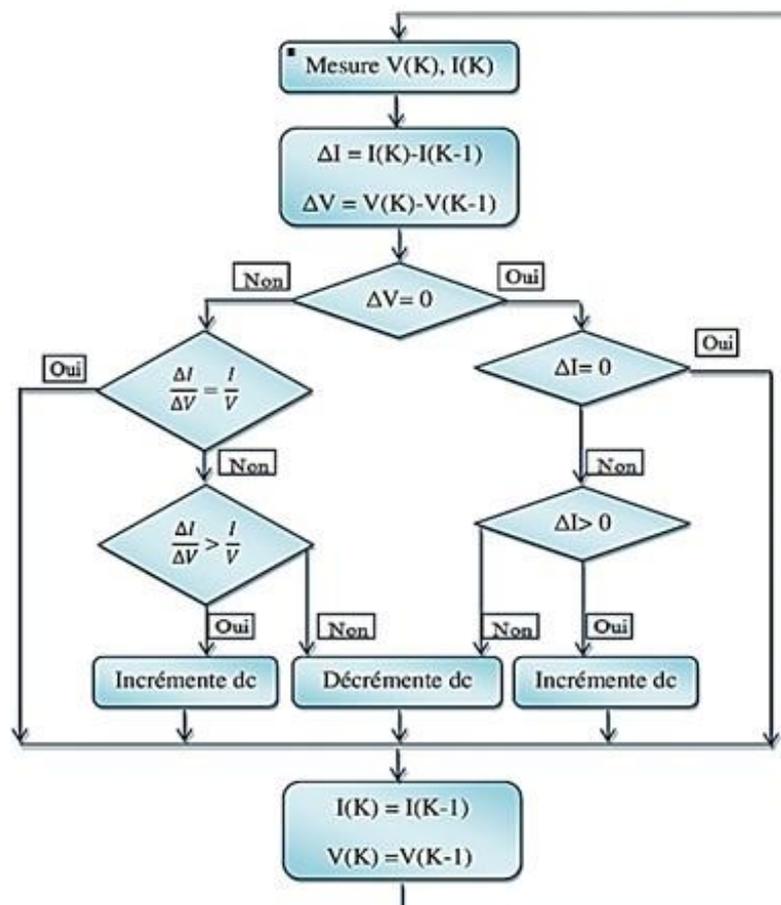


Fig. III.3. Algorithme de la méthode Incrément de conductance.

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du PPM car il est difficile de remplir la condition, ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme Incrément de conductance est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long.

### III.2.2. Méthodes avancées

Plusieurs études ont été réalisées afin d'optimiser l'efficacité des systèmes qui utilisent des panneaux solaires. Cela a entraîné la création d'algorithmes de contrôle utilisant l'intelligence artificielle, qui joue un rôle de plus en plus crucial dans le secteur de l'énergie en raison de sa capacité à superviser des systèmes complexes. Différents algorithmes ont été mis au point pour surveiller le point de puissance maximale (MPPT), dont le contrôleur à logique floue (FLC). Il y a aussi des modèles qui utilisent des réseaux neuronaux artificiels (ANN) et d'autres qui utilisent le système d'inférence floue neurologique adaptatif (ANFIS), un réseau de neurones artificiels basé sur le système d'inférence floue. Le principal inconvénient de ces systèmes est la nécessité d'un apprentissage et d'un paramétrage spécifiques pour chaque application et chaque situation [30].

#### a. Commande MPPT par logique floue (FLC)

Pour Commander ou optimiser un processus par des méthodes conventionnelles exige la connaissance des différents paramètres qui peuvent influencer sur celui-ci et agir en conséquence afin de contraindre le système à atteindre et l'objectif fixé. Seulement cette connaissance est souvent entachée d'erreurs et d'imprécisions qui accompagnent toute modélisation du processus. De plus, le couplage existant entre les variables du système rend la commande d'optimisation plus difficile. Il est possible de résoudre ce problème en utilisant des méthodes dites robustes telle que la logique floue.

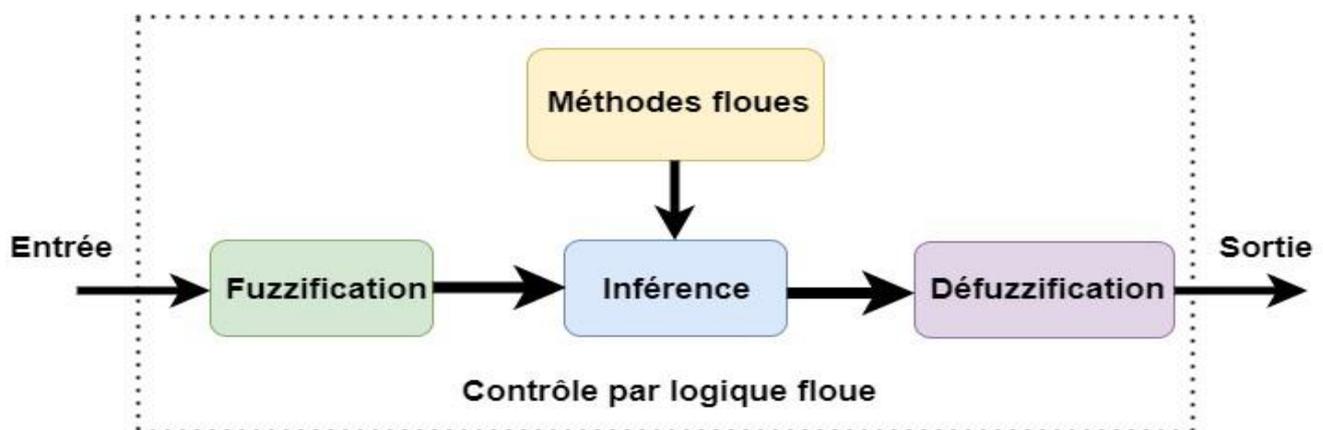


Fig. III.4 Le principe de la commande à logique floue.

La logique floue est un ensemble de logique à valeurs multiples, par rapport à l'ensemble binaire, où la variable n'a que deux états, valeurs vraies et fausses. La variable de logique floue est comprise entre zéro et un, ce qui introduit le concept de vérité partielle, où la valeur de la variable peut varier entre vrai et faux complet [31-32].

Le contrôleur flou MPPT génère les variables d'entrée floues requises en lisant les signaux de tension et de courant du panneau PV. Les variables d'entrée floues sont ensuite utilisées pour calculer les commandes de rapport de charge afin d'ajuster le point de fonctionnement du panneau PV afin de maximiser la puissance de sortie.

MPPT utilise l'approche floue de type Mamdani [33]. La méthode Mamdani se décompose en quatre étapes (voir Fig. III.4):

- Fuzzification.
- Méthodes floue.
- Inférences.
- Défuzzification.

Dans l'application de FLC pour MPPT, l'erreur E et le changement d'erreur CE à la k<sup>ème</sup> itération est :

$$E(K) = \frac{P_{PV}(K) - P_{PV}(K - 1)}{V_{PV}(K) - V_{PV}(K - 1)} \quad (III. 5)$$

$$CE(K) = E(K) - E(K - 1) \quad (III. 6)$$

Où  $P_{PV}$  et  $V_{PV}$  sont respectivement la puissance et la tension du panneau PV. Dans le cas de PPM, E(K) doit être nul. Tandis que CE(K) exprime la direction de déplacement de ce point de fonctionnement. A chaque itération k<sup>ème</sup>, nous comparons la position réelle E(k) avec la position précédente E(K - 1). Si ça augmente :

$$E(K) > E(K - 1) \leftrightarrow E(K) - E(K - 1) > 0 \leftrightarrow CE(K) > 0 \quad (III. 7)$$

PPM est située à gauche de la position actuelle et s'il diminue, il s'affiche à gauche.

$$E(K) < E(K - 1) \leftrightarrow E(K) - E(K - 1) < 0 \leftrightarrow CE(K) < 0 \quad (III. 8)$$

Le MPP est situé à droite de la position actuelle.

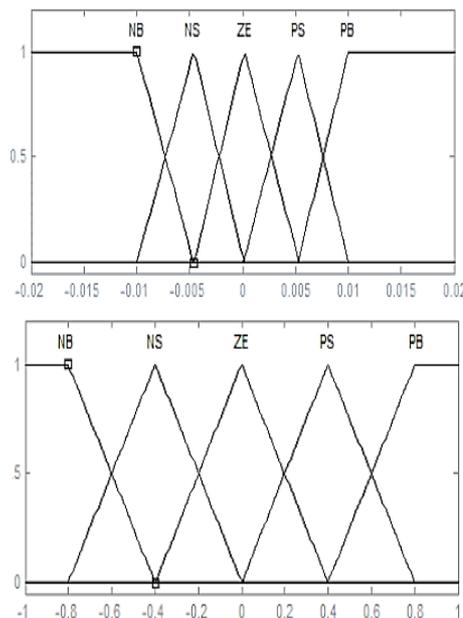
Pour déterminer la plage d'erreur et la modification de la plage d'erreur, nous avons effectué des tests de simulation de plusieurs systèmes d'irradiation et de température. Les résultats ont indiqué que l'intervalle d'erreur était d'environ  $[-0.02 ; 0.02]$  et que la modification de l'intervalle d'erreur était d'environ  $[-1 ; 1]$ .

La sélection des membres dépend principalement de l'expérience et de l'expertise. Les formes triangulaires et trapézoïdales sont les formes les plus couramment utilisées, car elles peuvent produire les meilleurs résultats.

Les fonctions d'appartenance aux entrées utilisées sont données par la Fig. III.5. Un ensemble flou à cinq termes, positif grand (PB), positif petit (PS), zéro (ZE), négatif petit (NS) et négatif grand (NB) est défini pour décrire les variables d'entrée.

Une fois la fuzzification terminée, le système basé sur des règles floues peut être défini. Autrement, les algorithmes MPPT flous doivent fournir des bases de règles exprimées dans des langages naturels pour la rationalité et l'inclusion. Les conditions de ces règles sont des expressions logiques telles que si... Alors..... . Les méthodes utilisées pour formuler les règles floues sont l'expérience et compétence [34].

L'analyse de la courbe  $P = f(V)$  établira une table de règles floues. Sur la base des performances attendues, la caractéristique  $P = f(V)$  est divisée en cinq zones [35], illustrées dans la Fig. III.5.



**Fig. III.5.** Fonction d'appartenance de chacune des variables linguistiques d'entrée.

- Dans la Zone 1, la pente est positive. Le point d'opération est situé à gauche et loin du MPP. A ce stade, les taux de droits devraient augmenter considérablement pour atteindre rapidement le MPP.
- En Zone 2 : La pente reste positive, et celui de l'opérateur est à gauche, à proximité. Dans ce cas, le rendement sera légèrement augmenté par les vibrations du système.
- Zone 3 : Le point de fonctionnement est situé autour du PPM. Dans ces conditions, l'objectif est de maintenir le même taux de droit.
- En Zone 4, la pente est négative et le point de fonctionnement est à droite mais proche du PPM. Dans ce cas, la puissance est légèrement réduite pour minimiser les vibrations du système.
- Dans la zone 5, la pente est toujours négative. L'opérateur est éloigné du PPM et se situe à droite. Pour le moment, le rapport cyclique devrait être considérablement réduit pour revenir rapidement au PPM.

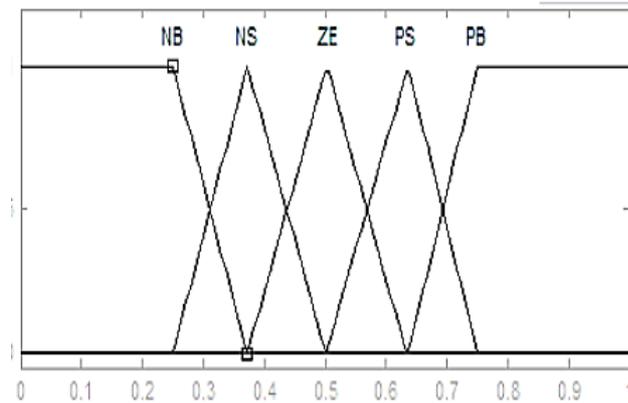
La base de règles se compose de 25 règles et l'entrée est un ensemble flou d'erreurs (E) et d'erreurs (CE), comme le montre le tableau III.1.

**Tableau III.1.** Règles floues.

$\Delta E$	NB	NS	ZE	PS	PB
E					
NB	ZE	ZE	PB	PB	PB
NS	ZE	ZE	PS	PS	PS
ZE	PS	ZE	ZE	ZE	NS
PS	NS	NS	ZE	ZE	ZE
PB	NB	NB	ZE	ZE	ZE

La sortie de cette table de règles correspond aux modifications du rapport cyclique. L'explication ci-dessus est que la table de règles floues est divisée en cinq régions.

La variable de sortie est la commande de changement du rapport cyclique et la charge est transmise au convertisseur DC-DC. La Fig. III.6 montre la part des droits de modification.



**Fig. III.6** Fonction d'appartenance de sortie.

Les classes sont notées comme suit :

NB : pour négatif grand.

NS : pour moyennement petit.

ZE : pour environ zéro.

PS : Petit positive.

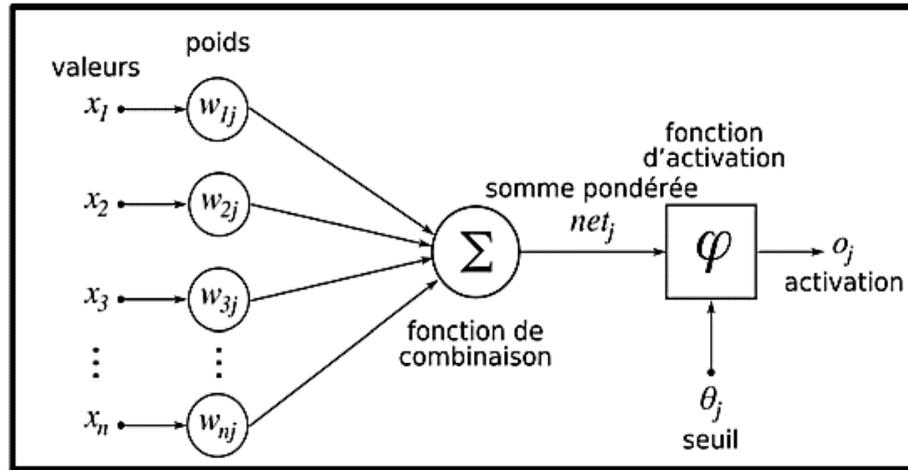
PB : pour positif grand.

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrée. Elles relient le signal de sortie aux signaux d'entrée par des conditions linguistiques prenant en compte l'expérience ou le savoir-faire acquis par un opérateur humain [35].

### **b. Commande MPPT par ANN**

Les réseaux de neurones artificiels (ANN) sont des techniques d'apprentissage automatique courantes utilisées pour résoudre différents types et problèmes de complexité. L'ANN se caractérise par une fonction rapide. Afin d'exécuter l'ANN précis, une grande taille de données du système d'entrée et de sortie, les variables doivent être utilisées pour les processus de formation ou d'apprentissage afin d'établir une bonne relation de formation entre les variables d'entrée et de sortie de l'ANN [37].

Dans une architecture typique d'un réseau ANN, il existe plusieurs couches de l'entrée à la sortie, avec une ou plusieurs couches cachées prises en sandwich entre les deux. Il convient de noter que la plage idéale pour les données d'entrée se situe entre zéro et un, car c'est là que la couche d'entrée reçoit les données. Les étapes intermédiaires du traitement ANN sont réalisées par la ou les couches cachées.



**Fig. III.7.** Architecture d'un réseau de neurones avec une seule couche cachée.

Enfin, la couche de sortie de l'ANN est l'endroit où la valeur de référence pour le contrôleur est fournie. La structure du neurone, unité de base des réseaux de neurones, est illustrée à la Fig. III.7.

Pour la fonction d'activation, on peut choisir parmi quatre types différents de fonctions d'activation proposées pour appliquer l'opération souhaitée à l'entrée net de la fonction.

$$\text{net} = \sum_{i=1}^N W_{ni} X_{ni} + B \quad (\text{III. 9})$$

Selon la Fig. III.8 et les références [38-39] qui présentent respectivement les fonctions de transfert suivantes :

- **Fonction de transfert sigmoïde**

$$\varphi(\text{net}) = \frac{1}{1+e^{-a \cdot \text{net}}}, \quad a : \text{paramètre de la pente.} \quad (\text{III. 10})$$

- **Fonction de transfert tangente hyperboliques**

$$\varphi(\text{net}) = \tanh(\text{net}) \quad (\text{III. 11})$$

- **Fonction de transfert seuil**

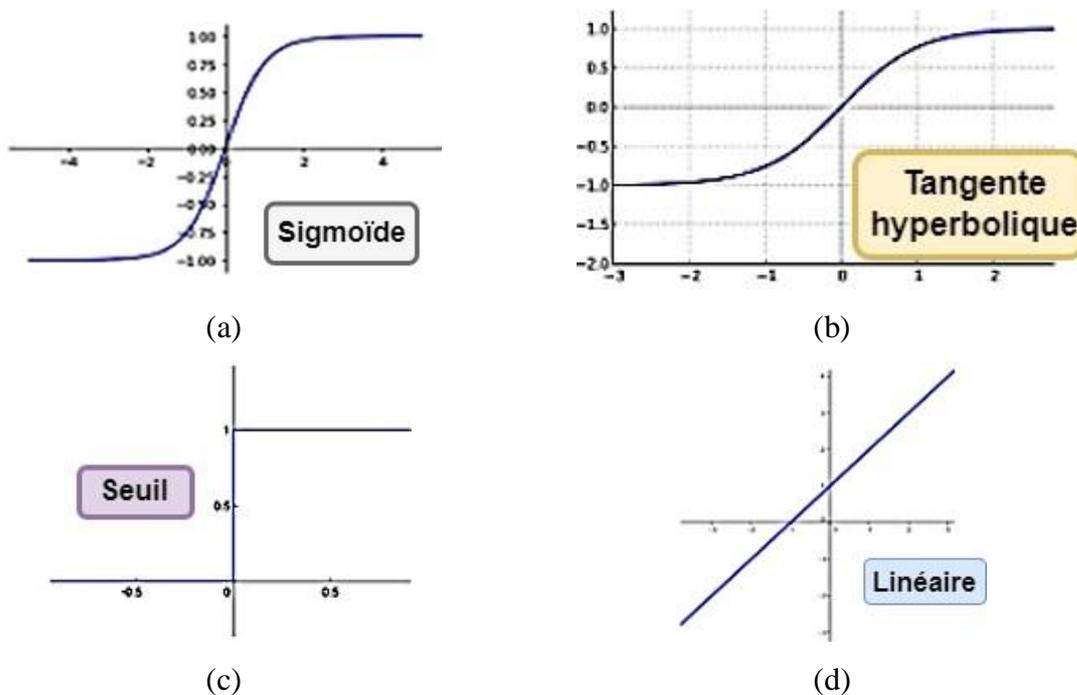
$$\varphi(\text{net}) = \begin{cases} 1 & \text{si } \text{net} \leq 0 \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (\text{III. 12})$$

- **Fonction de transfert linéaire**

$$\varphi(\text{net}) = a \cdot \text{net} + b \quad (\text{III. 14})$$

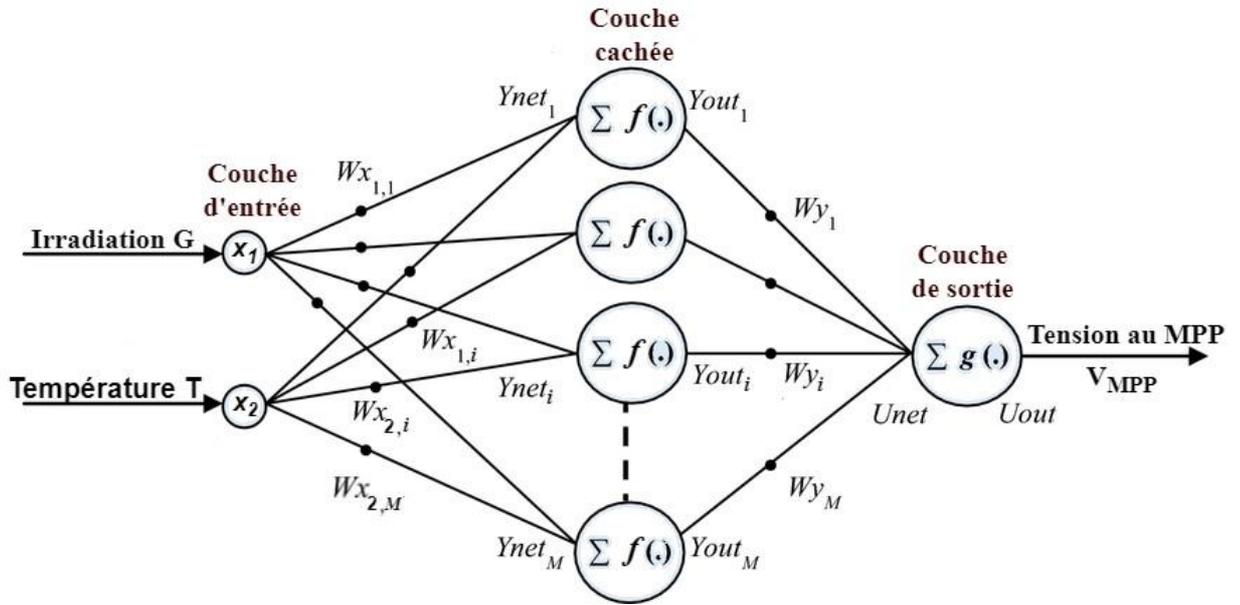
Actuellement, les réseaux de neurones sont utilisés comme technologie efficace pour suivre les cibles MPPT jusqu'à des points de puissance maximaux en déterminant des tensions de référence dans différentes conditions d'irradiation et de température ambiante. La tension de référence ANN est utilisée par le convertisseur du système pour suivre le MPPT.

Aujourd'hui, les réseaux de neurones artificiels suscitent un intérêt croissant. Ils sont appliqués à divers domaines sans nécessiter d'informations détaillées sur le fonctionnement du système et analysent les bases de données de formation pour établir la relation entre les variables d'entrée et de sortie. Ils fournissent des algorithmes informatiques logiciels pour résoudre des problèmes non linéaires complexes, évitant ainsi les techniques conventionnelles qui ne parviennent pas à suivre les changements dans des conditions évoluant rapidement.



**Fig. III.8** Différentes fonctions des activations  
(a) sigmoïde, (b) tangente hyperbolique, (c) seuil, (d) linéaire.

Cette étude utilise un ANN à anticipation à trois couches pour générer instantanément la référence de tension MPP maximale ( $V_{MPP}$ ), comme le montre la Fig. III.9. Seules deux variables de la sphère atmosphérique sont utilisées comme entrées ANN : le rayonnement solaire ( $G$ ) et la température ( $T$ ). La variable du neurone de sortie est la tension  $V_{MPP}$ , qui correspond à la puissance maximale extraite de la source PV [40].



**Fig. III.9.** Structure de l'algorithme ANN-MPPT proposé.

La référence de tension MPP ( $V_{MPP}$ ) est représentée par le neurone de sortie instantané ( $U_{out}$ ), qui a l'expression suivante :

$$U_{out} = g(U_{net}) \quad (III.15)$$

Où  $g(.)$  est la fonction d'activation de la couche de sortie et  $U_{net}$  est l'entrée de la couche de sortie, définie comme suit :

$$U_{net} = \sum_{j=1}^M W_{y_j} \cdot Y_{out_j} \quad (III.16)$$

$$Y_{out_j} = f(Y_{net_j}) \quad (III.17)$$

$$Y_{net_j} = \sum_{i=1}^N W_{x_{i,j}} \cdot x_i \quad (III.18)$$

De la même manière, les entrées et sorties de la couche cachée sont  $Y_{net}$  et  $Y_{out}$ . Le poids qui sépare la couche cachée de la couche de sortie est appelé  $W_{y_j}$ , et le poids qui sépare la couche d'entrée de la couche cachée est appelé  $W_{x_{i,j}}$ .  $N$  est le nombre de nœuds d'entrée (dans notre cas,  $N = 2$ ), qui sont représentés par les variables  $x_i$ ,  $i = 1, 2$  et  $T, G$  qui sont respectivement la température et le radiation.  $M$  est le nombre de nœuds dans la couche cachée ( $M = 10$ ).

Comme défini dans les équations (III.15-III.18), la première étape consistait à créer des données de formation entrées-sorties couvrant toutes les circonstances climatiques potentielles. Nous avons utilisé à cette fin le modèle mathématique de la source PV, discuté dans les équations (III.15-III.18). L'étape suivante consiste à calculer le MPP directement dans un environnement en ligne, en sautant la partie itérative [41].

**Irradiation,  $G(\text{w/m}^2)$**

$$G = [(G_{\max} - G_{\min}) \times \text{rand}] + G_{\min} \quad (\text{III. 19})$$

**Température,  $T(^{\circ}\text{C})$**

$$T = [(T_{\max} - T_{\min}) \times \text{rand}] + T_{\min} \quad (\text{III. 20})$$

**Maximum Voltage**

$$V_{\text{opt}} = (V_{\text{mp}} + K_{\text{oc}}(T_{\text{opt}} - 25)) \quad (\text{III. 21})$$

**Maximum courant,  $I_{\text{MP}}(\text{A})$ :**

$$I_{\text{opt}} = \frac{G_{\text{opt}}}{1000} (I_{\text{mp}} + K_0(T_{\text{opt}} - 25)) \quad (\text{III. 22})$$

**Maximum puissance ,  $P_{\text{MP}}(\text{W})$ :**

$$P_{\text{MP}} = V_{\text{MP}} \times I_{\text{MP}} \quad (\text{III. 23})$$

**Rapport cyclique :**

$$dc_{\text{opt}} = 1 - \frac{V_{\text{opt}}}{V_{\text{out}}} \quad (\text{III. 24})$$

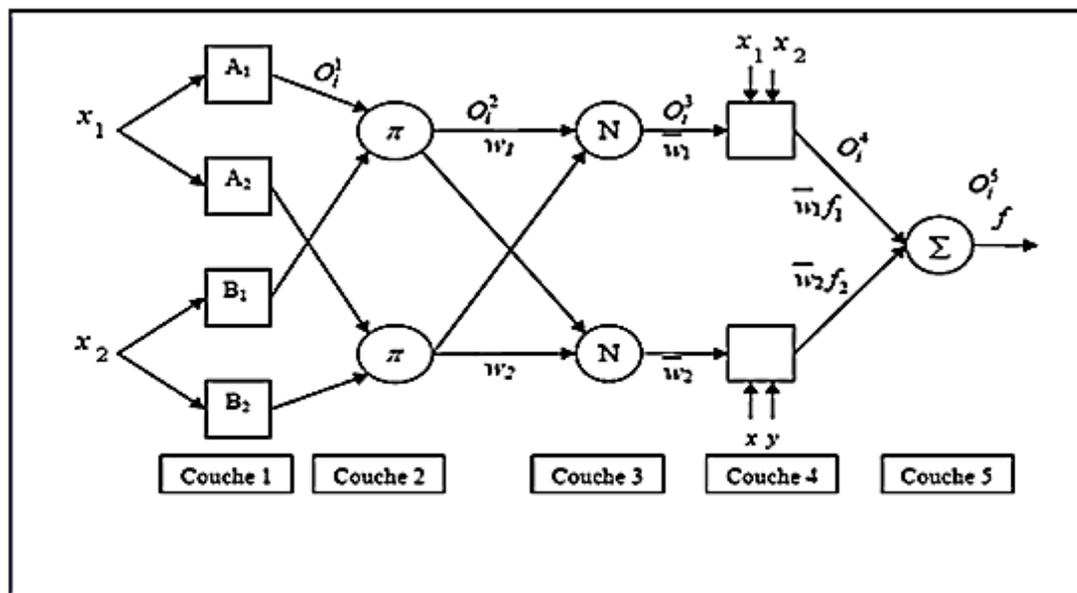
**c. Commande MPPT par ANFIS**

Dans cette section, après avoir décrit les réseaux de neurones (ANN), nous nous penchons sur une nouvelle architecture appelée Système d'Inférence Neuro-Floue Adaptatif (ANFIS), qui a été largement employée pour représenter ou approximer un système non linéaire.

Dans cette partie, nous exposons une classe de Neuro-Fuzzy ainsi que les architectures et les méthodes d'apprentissage des réseaux adaptatifs. Le réseau sous-jacent est un ensemble de différents paradigmes de réseaux de neurones qui possèdent une capacité d'apprentissage supervisé. La combinaison d'ANN et de systèmes flous offre généralement l'avantage de faciliter la traduction du système final en un ensemble de règles "si-alors".

On peut définir le système flou comme une structure de réseau de neurones qui partage des connaissances à travers les connexions. Le développement et l'utilisation de la stratégie d'inférence neuro-floue ont démontré que les systèmes hybrides neuronaux et flous présentent des avantages dans divers domaines, tels que l'adaptation directe des connaissances articulées en tant qu'ensemble de règles linguistiques floues. Le système adaptatif d'inférence neuro-floue (ANFIS) est un système d'inférence floue utilisé dans le cadre d'un réseau de neurones adaptatif [30].

La logique floue et les réseaux de neurones artificiels sont utilisés dans cette procédure pour traduire un ensemble de données donné de plusieurs entrées ou d'une seule entrée en une seule sortie. En combinant les méthodes de rétropropagation et des moindres carrés, ANFIS construit un système d'inférence floue (FIS) à l'aide d'ensembles de données d'entrée-sortie. Les paramètres de la fonction d'appartenance floue du FIS sont ensuite affinés [42].



**Fig. III.10.** Architecture d'ANFIS [42].

Par souci de simplicité, le système d'inférence floue est considéré comme ayant une sortie ( $f$ ) et deux entrées ( $x_1$ ) et ( $x_2$ ). Les règles communes établies à l'aide des règles fuzzy si....., alors sont fournies comme suit [44-46]:

$$\text{Rule1 : si } x \text{ est } A_1 \text{ et } y \text{ est } B_1, \text{ alors } f_1 = p_1x + q_1y + r_1 \quad (\text{III. 25})$$

$$\text{Rule2 : si } x \text{ est } A_2 \text{ et } y \text{ est } B_2, \text{ alors } f_2 = p_2x + q_2y + r_2 \quad (\text{III. 26})$$

Le schéma de la Fig. III.10, correspondant à l'architecture d'ANFIS qui se compose de cinq couches.

### Couche 1

Chaque nœud  $i$  dans cette couche est un nœud carré avec une fonction d'appartenance.

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x_1) \quad (\text{III. 27})$$

Avec  $x_1, x_2$ : l'entrée du nœud  $i$ .

$A_i$ : Label linguistique associé au nœud de la fonction, en d'autre terme  $O_i^1$  est la fonction d'appartenance de  $A_i$  et il spécifie le degré d'appartenance avec lequel  $x$  satisfait.

Généralement  $\mu_{A_i}(x_1)$  est choisi sous forme de cloche avec son maximum égal à 1 et le minimum égal 0.

$$\mu_{A_i}(x_1) = \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{x_1 - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (\text{III. 28})$$

Ou la fonction gaussienne

$$\mu_{A_i}(x_1) = \exp \left[ - \left( \frac{x_1 - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \quad (\text{III. 29})$$

Dans le modèle de Jang, les fonctions d'appartenances sont des gaussiennes, où  $\{ , b_i , c_i \}$  sont des paramètres qui font référence aux paramètres prémisses. Les valeurs de ces derniers changes selon diverse exhibition de la fonction d'appartenance [43].

### Couche 2

Les sorties de cette couche sont les poids des règles, ils sont obtenus par une simple multiplication des entrés dans chaque cellule [31].

$$W_i = \mu_{A_i}(x_1) * \mu_{B_i}(x_1) \quad (\text{III. 30})$$

### Couche 3

Cette couche normalise les résultats fournis par la couche précédente. Les résultats obtenus représentent le degré d'implication de la valeur dans le résultat final [31].

$$\bar{W}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1,2 \quad (\text{III. 31})$$

#### Couche 4

Chaque nœud  $i$  dans cette couche est un nœud qui se calcule de la façon suivante [43]:

$$O_i^4 = \overline{W}_i f_i = \overline{W}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \quad (\text{III. 32})$$

$\overline{W}_i$ : sont les sorties de la couche 3.

$\{p, r_i\}$  : sont les paramètres appelé paramètres conséquents de la fonction de sortie.

#### Couche 5

Dans cette couche, la cellule fait la somme des sorties de la couche précédente et retourne donc en sortie, la valeur approximative de la fonction désirée [43].

$$O_i^5 = \sum_i \overline{W}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (\text{III. 33})$$

Dans notre travail, comme représenté sur les équations (III.19 - III.24), nous avons utilisés la tension et le courant de PV comme entrées, et le rapport cyclique optimal comme sortie [47-48].

### III.3. Conclusion

Afin d'augmenter le rendement des systèmes PV, il est nécessaire d'assurer la poursuite du point de puissance maximale pour extraire le maximum de puissance du générateur PV. La recherche d'une technique MPPT performante reste l'objectif des chercheurs et fait l'objet d'un grand nombre de travaux. Dans ce chapitre les méthodes MPPT ont été classées en deux groupes : méthodes conventionnelles et méthodes intelligentes. Les méthodes P&O et INC sont les plus couramment utilisées pour suivre le PPM, mais elles nécessitent des informations précises sur le système PV considéré. Les méthodes basées sur RNA déterminent le rapport cyclique optimal grâce à un apprentissage supervisé basé sur l'algorithme de rétro propagation. Les résultats de simulation de ces méthodes seront présentés dans le chapitre suivant.

## *Chapitre IV*

### *Résultats et discussions*

## IV.1. Introduction

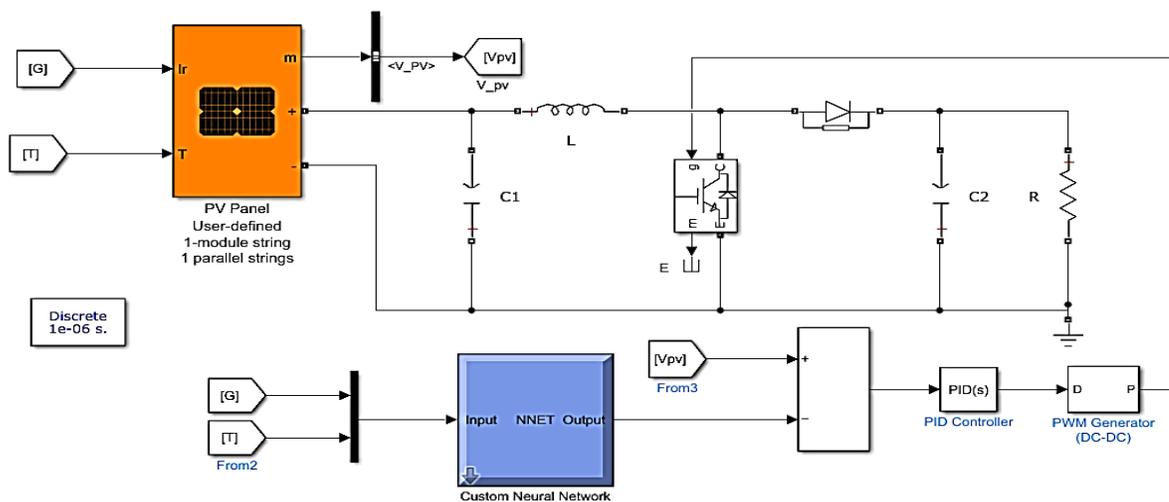
L'utilisation croissante de l'outil informatique et le développement des techniques de régulation dans le domaine industriel est devenu une réalité qui se manifeste par la fiabilité et la puissance du calculateur numérique qui offre la possibilité d'implantation de la loi de commande avec une grande flexibilité du fait qu'elle peut être modifiée par un programme. Le réseau de neurones artificiels est l'une de ces techniques intelligentes qui permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain. Pour cela, les méthodes basées sur RNA ont connu un intérêt important dans la communauté scientifique au cours des dernières années.

Ce chapitre, a pour but la simulation d'un système photovoltaïque adapté par un convertisseur boost avec une commande MPPT par l'utilisation de l'environnement MATLAB/Simulink. On commence par l'application de la méthode conventionnelle INC et la méthode RNA -PI sur un système PV autonome. Ensuite, on applique la méthode conventionnelle P&O et un contrôleur ANFIS sur un système PV connecté au réseau pour produire une puissance active de 100 KVA. Enfin, les résultats de simulation obtenus à partir des méthodes traditionnelles ont été comparés à leurs des méthodes basées sur RNA.

## IV.2. Système PV autonome

Dans cette partie, on étudie un système PV autonome qui se compose de générateur photovoltaïque, convertisseur boost, charge résistive et un étage MPPT.

La Fig. IV.1 représente le modèle Simulink du système PV autonome étudié dans cette partie.



**Fig. IV.1** Modèle Simulink du système PV autonome avec une commande MPPT.

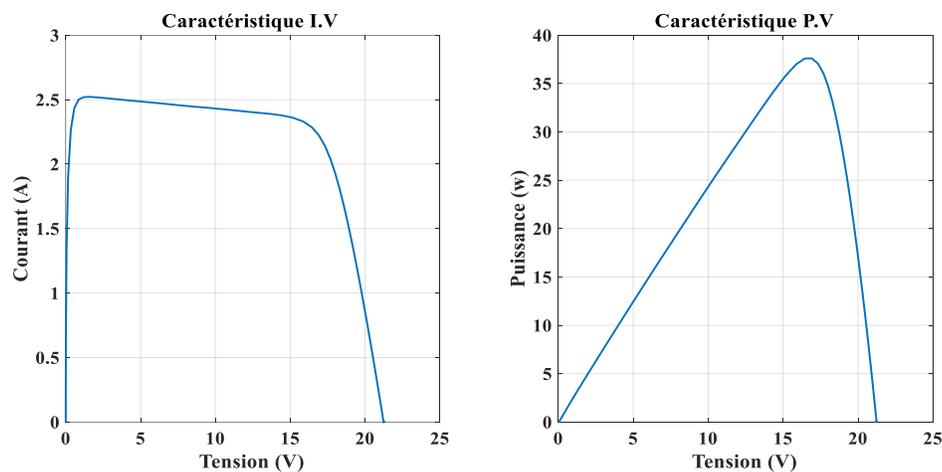
### IV.2.1 Caractéristiques du générateur PV

Nous avons utilisé un module PV dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1** Caractéristiques du module PV.

Déscription	valeur
Puissance maximale ( $P_{\max}$ )	37.26 W
Tension maximale ( $V_{\max}$ )	16.56 V
Courant de crête ( $I_{\max}$ )	2.25 A
Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	21.24 V
Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ )	2.55 A

La Fig. IV.2 montre les caractéristiques I-V et P-V du GPV considéré dans les conditions standards.



**Fig. IV.2** Caractéristiques I-V et P-V du GPV.

### IV.2.2 Validation du convertisseur boost

Le Tableau IV.2 présente les paramètres du convertisseur boost utilisé dans ce système PV.

**Tableau IV.2** Paramètres du convertisseur boost.

Déscription	valeur
Tension de sortie ( $V_o$ )	30 V
Condensateur d'entrée (C1)	65.32 $\mu$ F
Condensateur de sortie (C2)	278.22 $\mu$ F
Inductance (L)	1.71 $\mu$ H
Fréquence de commutation (f)	10 kHz

Les Figs. IV.3 et IV.4 présentent les résultats de simulation de la tension et du courant d'entrée et de sortie du convertisseur boost. La tension de sortie augmente jusqu'à atteindre une valeur d'environ 30 V.

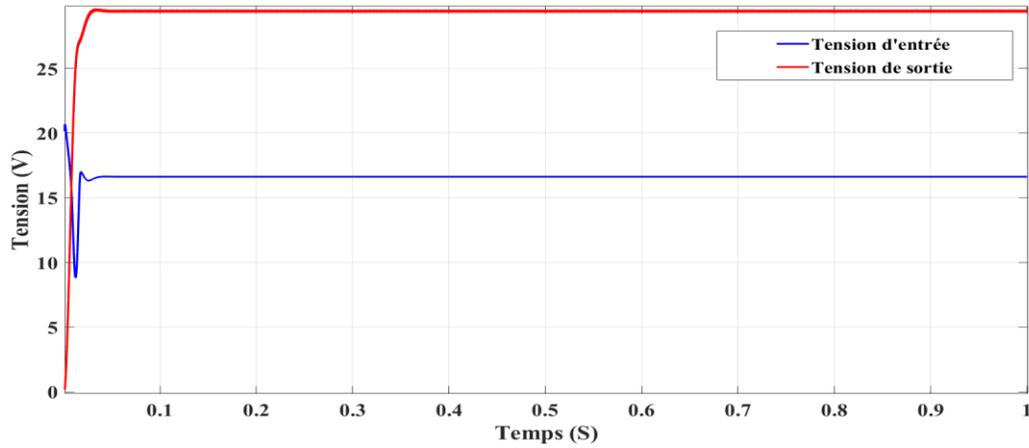


Fig. IV.3 Tension d'entrée et tension de sortie du convertisseur boost.

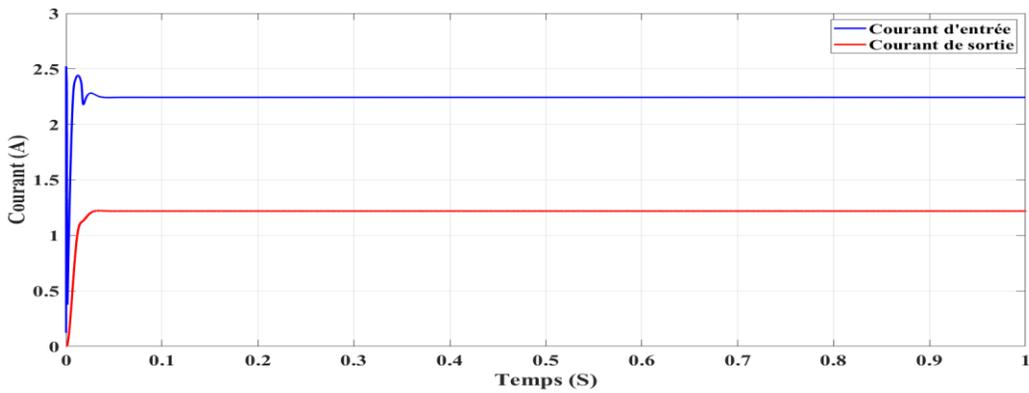


Fig. IV.4. Courant d'entrée et courant de sortie du convertisseur boost.

### IV.2.3 Système PV autonome commandé par une méthode hybride RNA-PI

Dans cette partie de notre travail, nous avons proposé l'utilisation d'un réseau de neurones artificiels (RNA) pour prédire l'entrée d'un régulateur PI (avec  $k_p = 1$  et  $k_i = 1$ ). Pour cela, nous avons utilisé  $G$  et  $T_a$  comme entrées, et la tension optimale comme sortie, avec 1000 données pour chaque entrée et sortie. Nous avons réparti ces données en 70 % pour l'apprentissage, 15 % pour la validation, et 15 % pour le test.

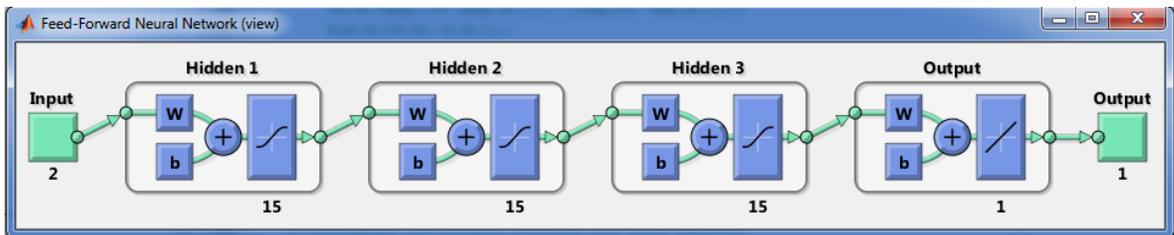


Fig. IV.5 Structure du RNA.

Nous avons utilisé trois couches cachées, chaque couche comportant 15 neurones comme indiqué sur la Fig. IV.5. Les performances du RNA utilisé sont présentées dans la Fig. IV.6, où la valeur du critère d'erreur EQM est de  $2.19139 \times 10^{-14}$  pour l'apprentissage,  $1.40554 \times 10^{-14}$  pour la validation, et  $9 \times 10^{-15}$  pour le test.

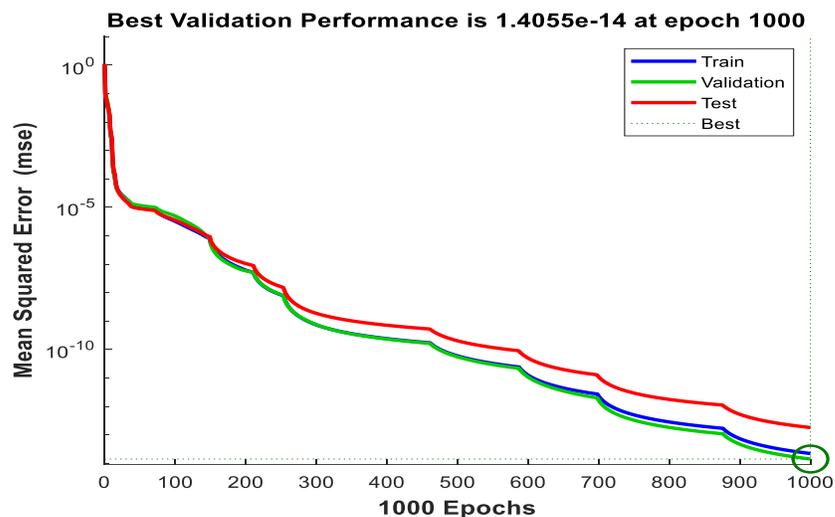


Fig. IV.6 Performance de RNA.

#### IV.2.4 Résultats de simulation

Afin de montrer l'efficacité de la méthode hybride proposée, des tests de simulation ont été effectués sur un système PV autonome dans les conditions standards et variables. Les résultats obtenus par les deux méthodes RNA-PI et INC ont été comparés.

##### a. Test dans des conditions standards

Les Figures IV.7, IV.8 et IV.9 présentent respectivement les résultats de simulation de la tension, du courant et la puissance du GPV dans des conditions standards.

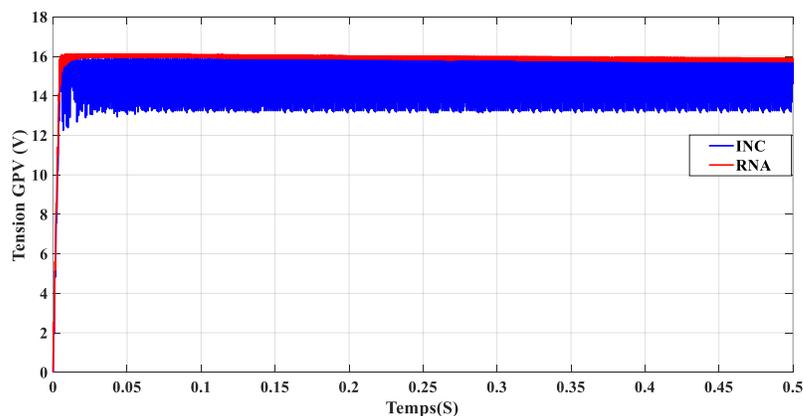
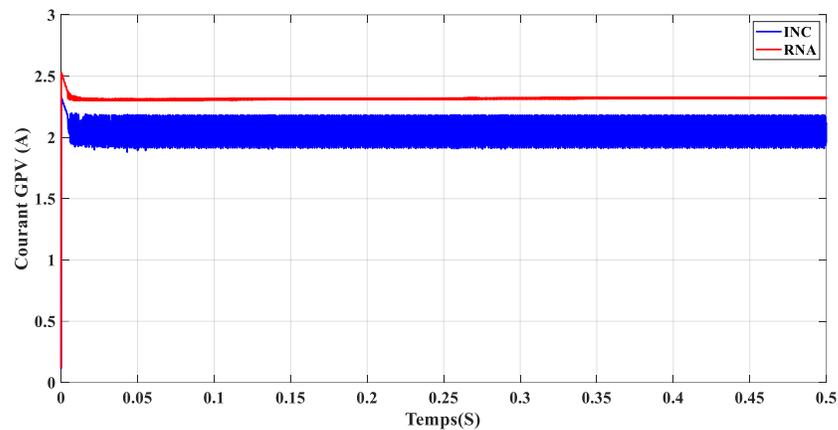
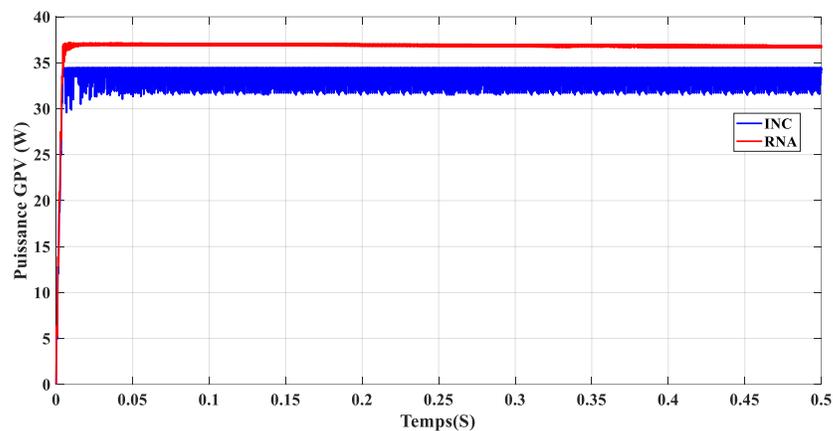


Fig. IV.7 Tension du GPV dans les conditions standards.

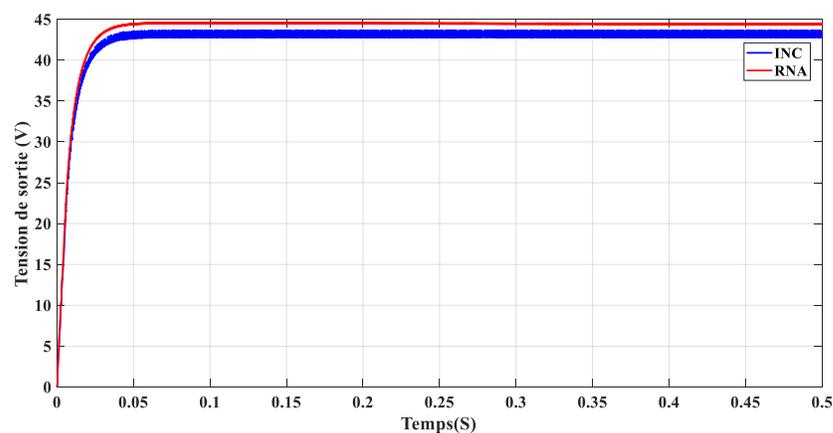


**Fig. IV.8** Courant du GPV dans les conditions standards.

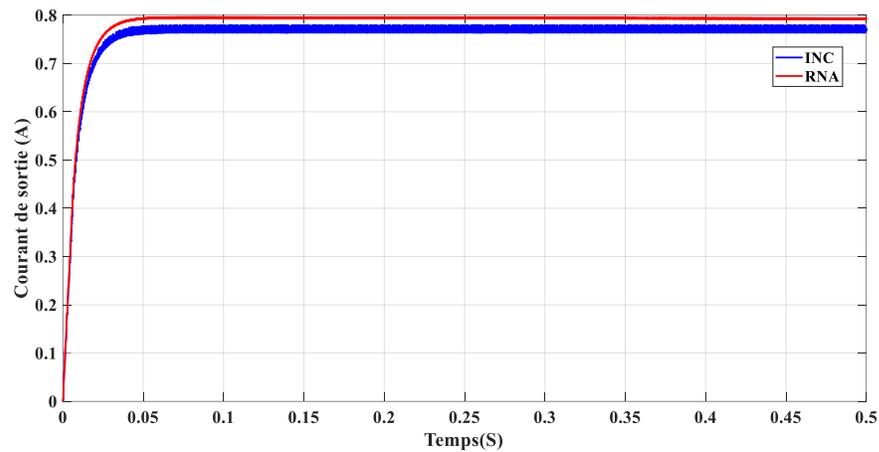


**Fig. IV.9** Puissance du GPV dans les conditions standards.

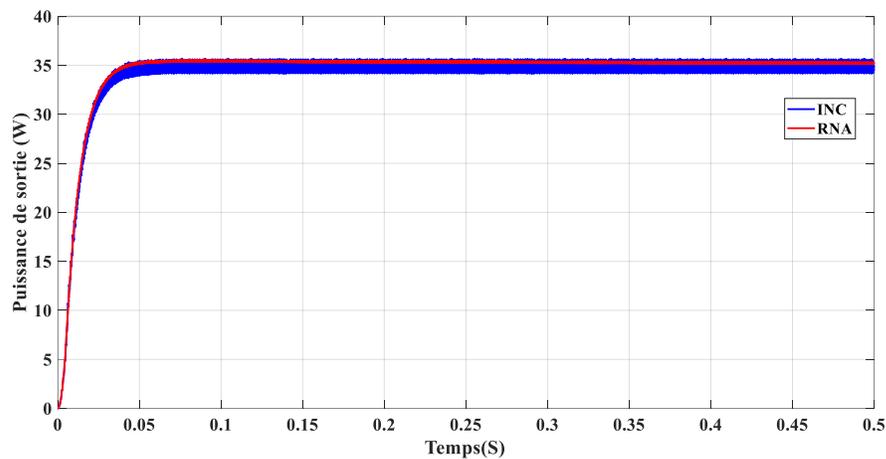
Les Figures IV.10, IV.11 et IV.12 représentent respectivement les résultats de simulation de la tension de sortie, courant de sortie et la puissance de sortie du système PV autonome dans des conditions standards.



**Fig. IV.10** Tension de sortie du SPV autonome dans les conditions standards.



**Fig. IV.11** Courant de sortie du SPV autonome dans les conditions standards.

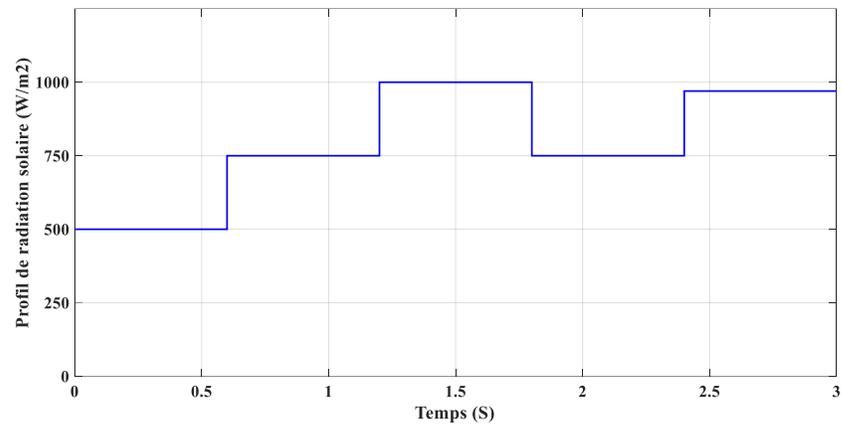


**Fig. IV.12** Puissance de sortie du SPV autonome dans les conditions standards.

Selon les figures précédentes, la puissance de sortie du atteint 35,28 W sans problème grâce à l'utilisation du contrôleur RNA, tandis que l'utilisation de l'algorithme INC entraîne des oscillations dans sa courbe.

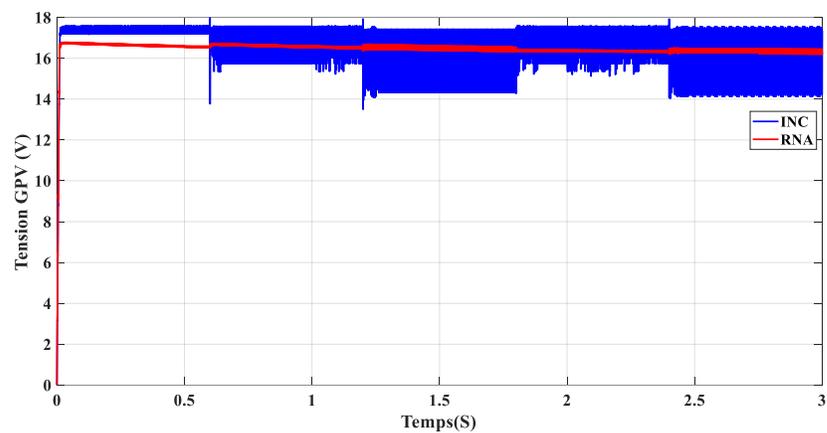
#### **b. Test dans des conditions variables**

On garde  $T=25^{\circ}\text{C}$  et on prend le radiation solaire variable  $G = (500, 750, 970, 1000)\text{W/m}^2$ . Le profil de radiation est présenté dans la Fig. IV.13.

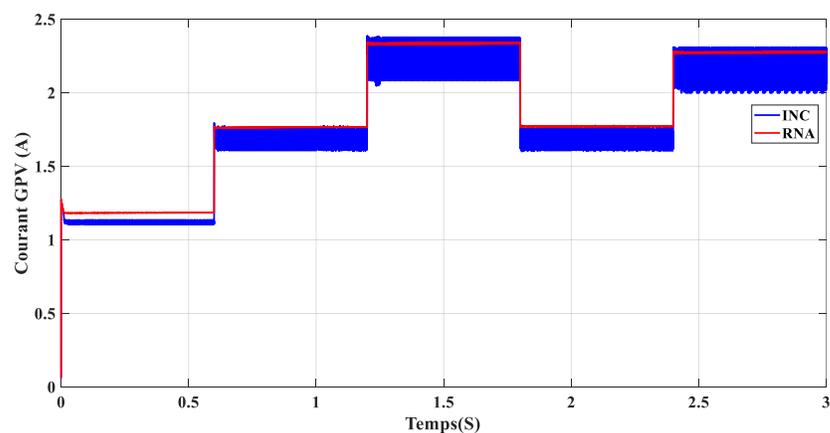


**Fig. IV.13** Profil de radiation solaire.

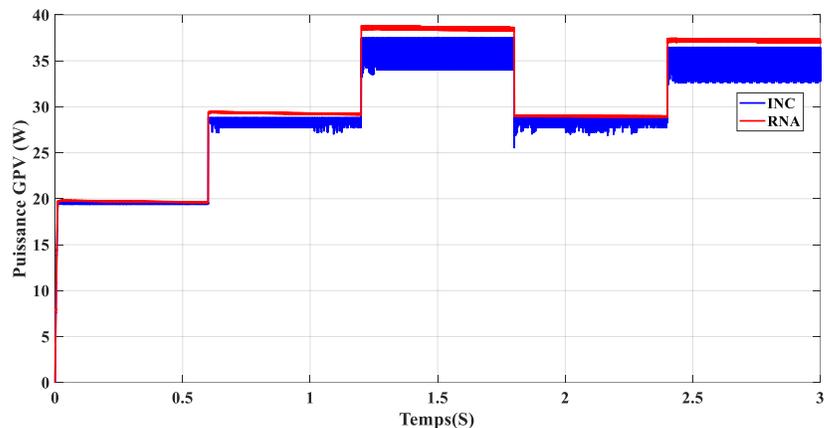
Les Figures IV,14, IV,15, IV,16 montrent respectivement les résultats de simulation de la tension, du courant et de la puissance du GPV du SPV autonome dans les conditions de radiation variable.



**Fig. IV.14** Tension du GPV pour radiation variable.

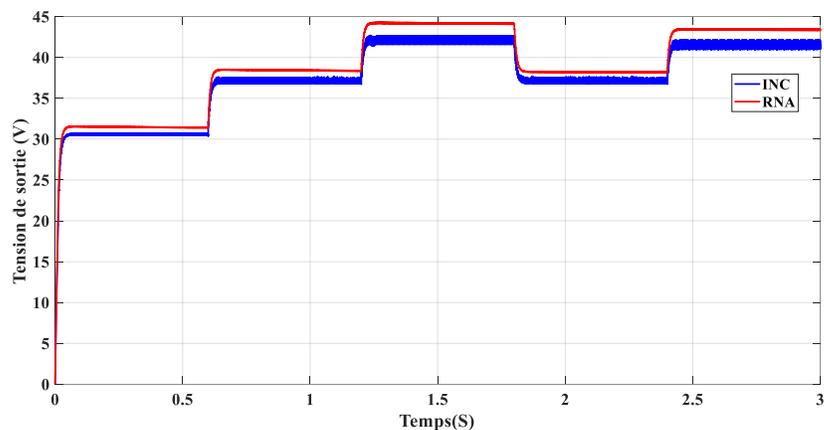


**Fig. IV.15** Courant du GPV pour radiation variable.

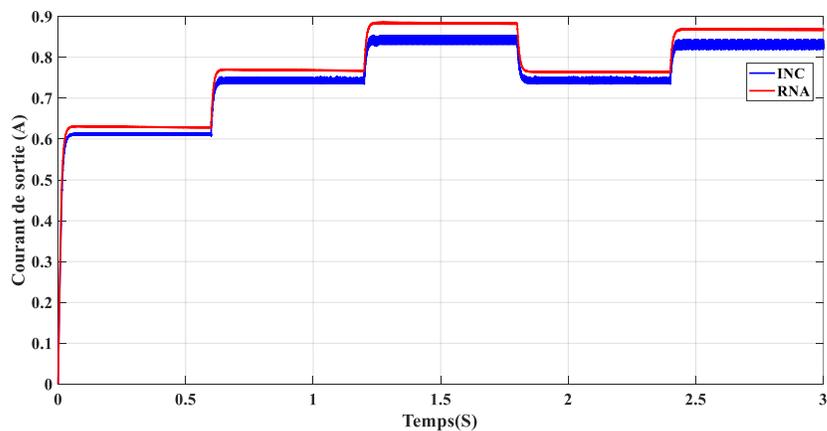


**Fig. IV.16** Puissance du GPV pour radiation variable.

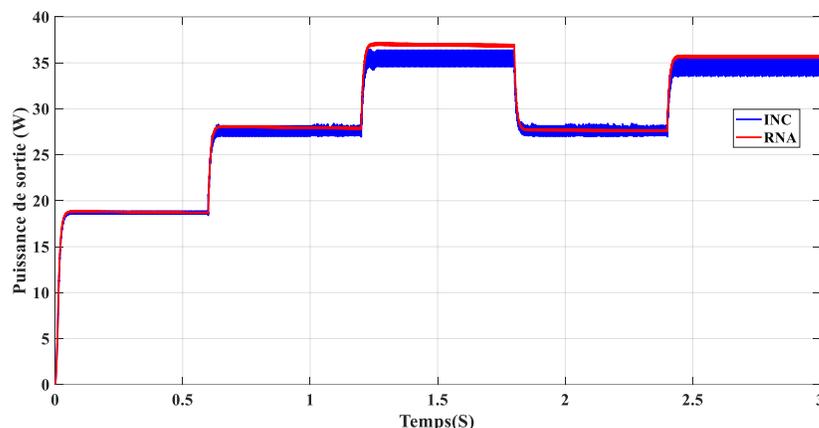
Les Figures IV,17, IV,18, IV,19 illustrent respectivement les résultats de simulation de la tension de sortie, courant de sortie et la puissance de sortie du système PV autonome avec la radiation variable.



**Fig. IV.17** Tension de sortie du SPV pour radiation variable.



**Fig. IV.18** Courant de sortie du SPV pour radiation variable.



**Fig. IV.19** Puissance de sortie du SPV pour radiation variable.

Dans l'intervalle [0 à 0.6s], avec une irradiation de  $500\text{W/m}^2$ , la puissance de sortie du boost atteint 18,65 W et 17,98 W en utilisant respectivement les contrôleurs RNA-PI et INC.

Dans les intervalles [0,6 à 1,2s] et [1,8 à 2,4s], avec une irradiation de  $750\text{W/m}^2$ , la puissance de sortie du boost atteint 28,19 W en utilisant le contrôleur RNA-PI et 27,12 W en utilisant le contrôleur INC.

Dans l'intervalle [2,4 à 3s], avec une irradiation solaire de  $970\text{W/m}^2$ , la puissance de sortie du boost atteint 35,76 W avec le contrôleur RNA-PI et 33,72 W avec le contrôleur INC.

Le tableau IV.3 présente l'efficacité (voir équation IV.1) de chaque contrôleur étudié pour les différents niveaux d'irradiation solaire proposés.

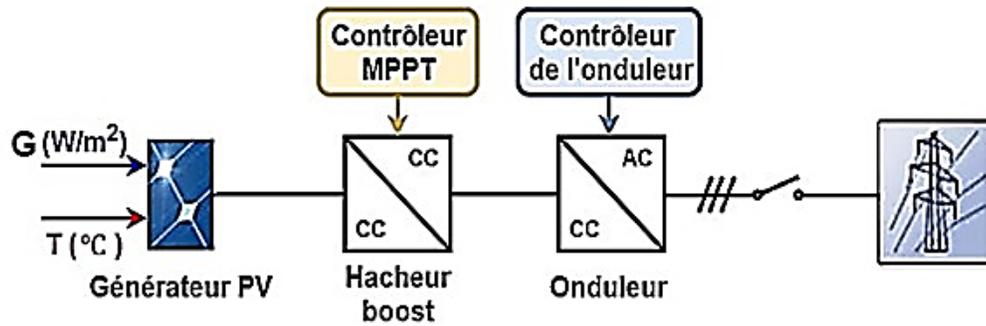
**Tableau IV.3** Efficacité de MPPT étudié.

	$500\text{W/m}^2$	$750\text{W/m}^2$	$970\text{W/m}^2$	$1000\text{W/m}^2$
INC	92.04 %	93.88 %	95.07 %	97.59 %
RNA-PI	92.96 %	96.89 %	98.51%	99.25 %

$$\text{Efficacité} = \frac{\text{Puissance de sortie}}{\text{Puissance de GPV}} \quad (\text{IV. 1})$$

### IV.3 Système raccordé au réseau

Pour prouver la supériorité des méthodes basées sur le RNA, on applique dans cette partie le contrôleur ANFIS pour optimiser la puissance dans un système PV raccordé au réseau. Ce système est composé de : générateur PV, convertisseur boost, onduleur, contrôleur MPPT, contrôleur de l'onduleur comme illustré dans la figure suivante (voir Fig. IV.20):



**Fig. IV.20** Système PV raccordé au réseau.

Pour synchroniser le système photovoltaïque avec le réseau électrique, on utilise la boucle à verrouillage de phase (Phase locking loop (PLL)) qui est une méthode de synchronisation très efficace à utiliser dans les onduleurs de puissance connectés à un réseau susceptible de subir des perturbations temporaires. La PLL permet de distinguer la phase et la fréquence instantanée de sortie de celles d'entrée.

### IV.3.1 Caractéristiques du générateur PV

Nous avons utilisé un GPV dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau IV.4.

**Tableau IV.4** paramètres de système PV considéré liée au réseau.

Déscription	Valeur
Puissance maximale ( $P_{mp}$ )	213.15 W
Tension maximale ( $V_{mp}$ )	29 V
Courant maximale ( $I_{mp}$ )	7.35 A
Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	36.3 V
Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ )	7.84 A
Nombre des cellules en séries ( $N_s$ )	12
Nombre des cellules en parallèles ( $N_p$ )	42
Fréquence de switch (f)	5 kHz
Fréquence de réseau ( $F_r$ )	50 HZ
Inductance (L)	1 mH
Condensateur d'entrée ( $C_{in}$ )	1000 $\mu$ F
Condensateur de sortie ( $C_o$ )	2000 $\mu$ F
Inductance de filtre ( $L_f$ )	500 $\mu$ H
Condensateur de filtre ( $C_f$ )	18.37 $\mu$ F
Puissance nominale (P)	5.5 KW

La Fig. IV.21 montre les caractéristiques I-V et P-V du GPV considéré dans les conditions standards.

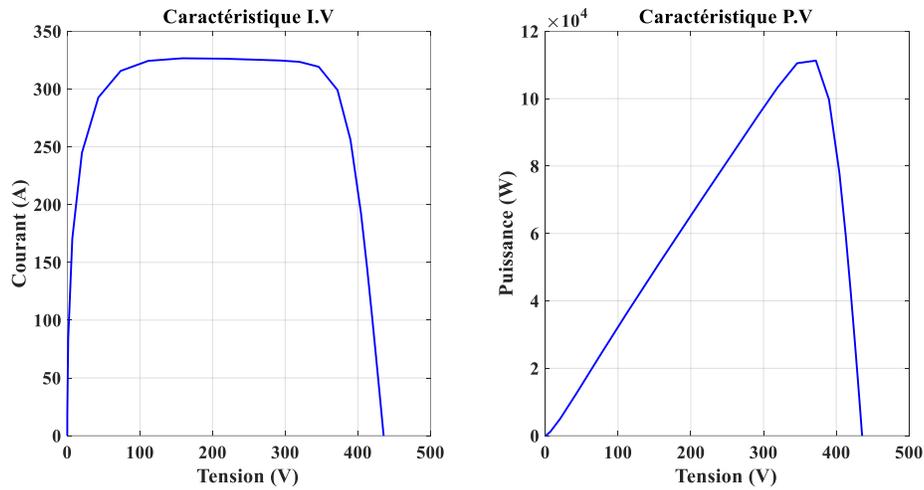


Fig. IV.21. Caractéristiques I-V et P-V du GPV.

### IV.3.2 Système raccordé au réseau commandé par un contrôleur ANFIS

Dans cette étude nous nous intéressons au contrôle d'un convertisseur DC-DC. La Fig. IV.22 représente le modèle Simulink du système PV raccordé au réseau et commandé par un contrôleur ANFIS.

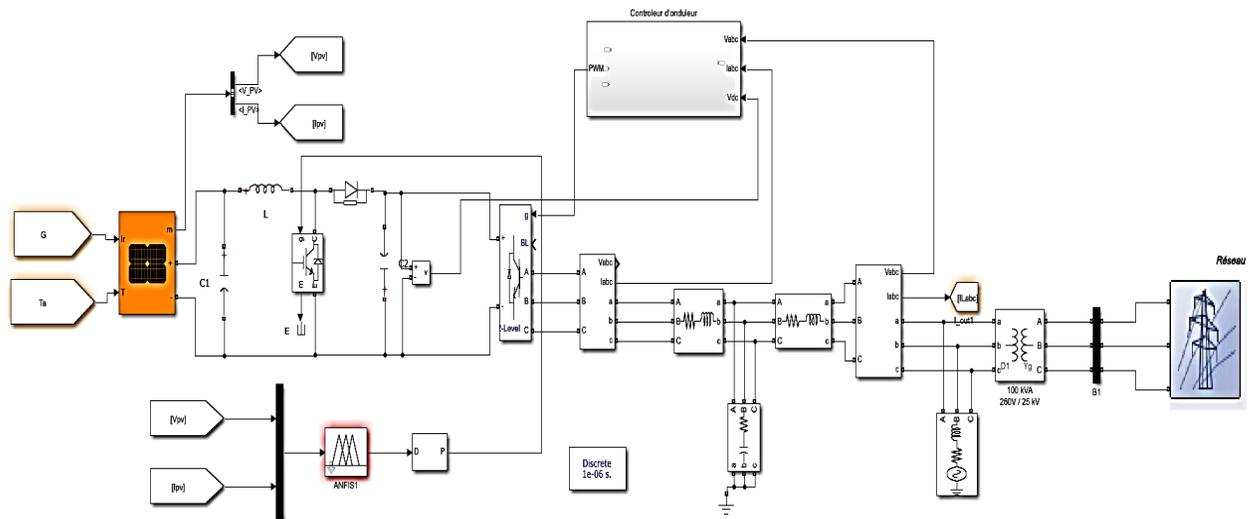


Fig. IV.22 MPPT basé sur le contrôleur ANFIS pour un système lié au réseau.

La Fig. IV.23 présente le contrôleur ANFIS utilisé pour le système PV dans l'interface MATLAB. Nous avons effectué 180 itérations avec 6 sous-ensembles flous pour chaque entrée et 36 règles définissant la sortie. Le critère d'erreur RMSE est de  $RMSE = 1.22811 \times 10^{-5}$ . La Fig. IV.24 représente l'analyse des performances de l'entraînement de l'ANN pour la régression.

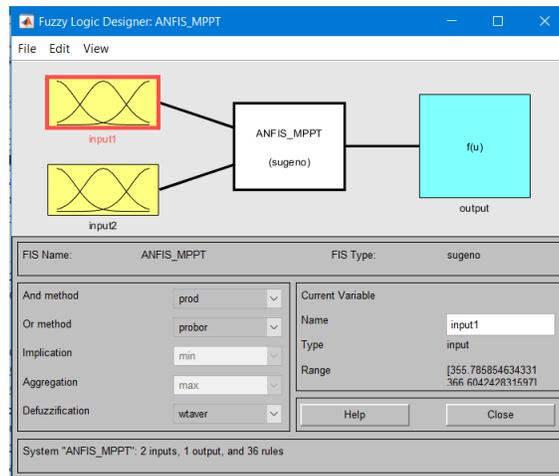


Fig. IV.23 MPPT basé sur ANFIS dans MATLAB.

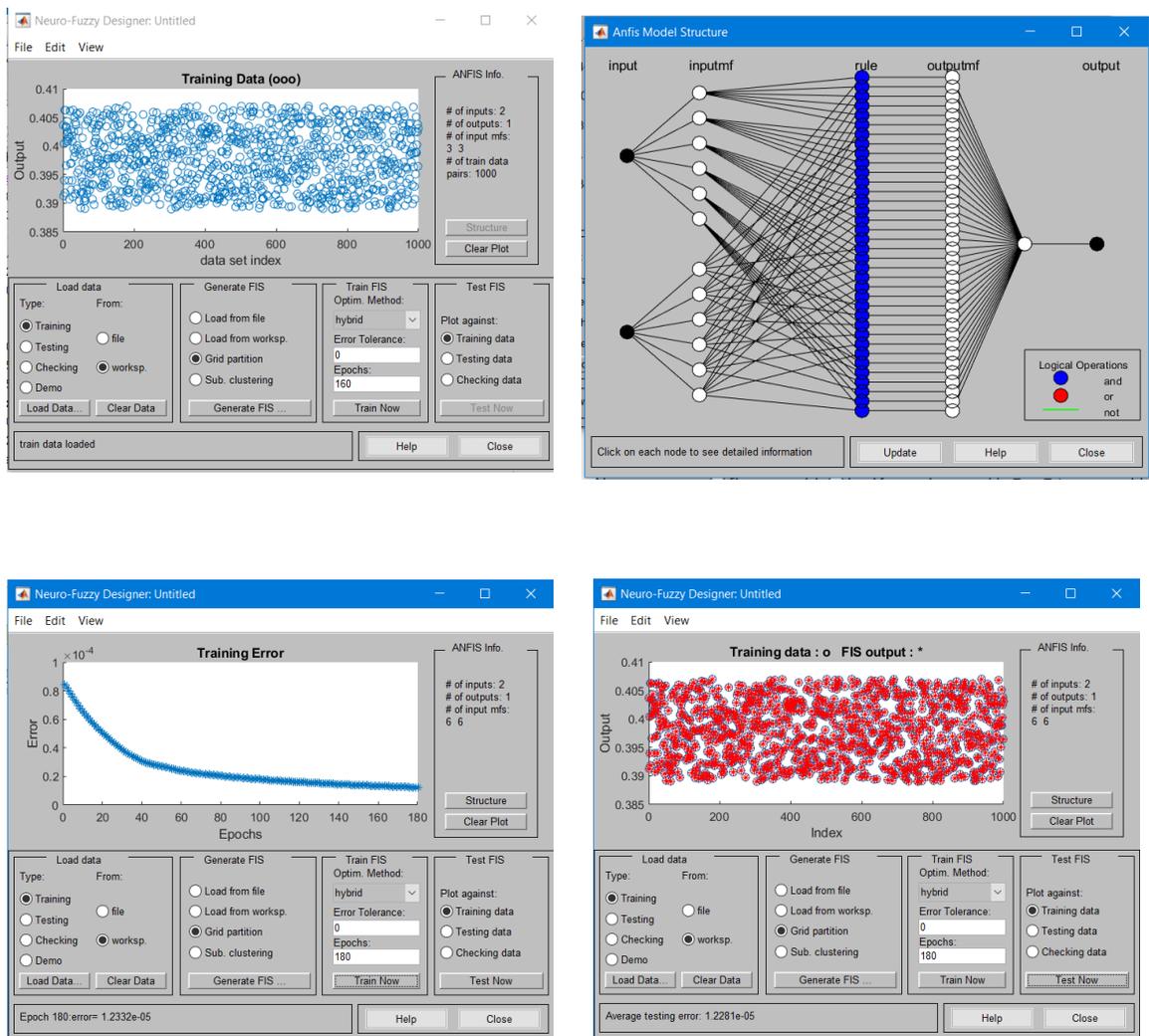


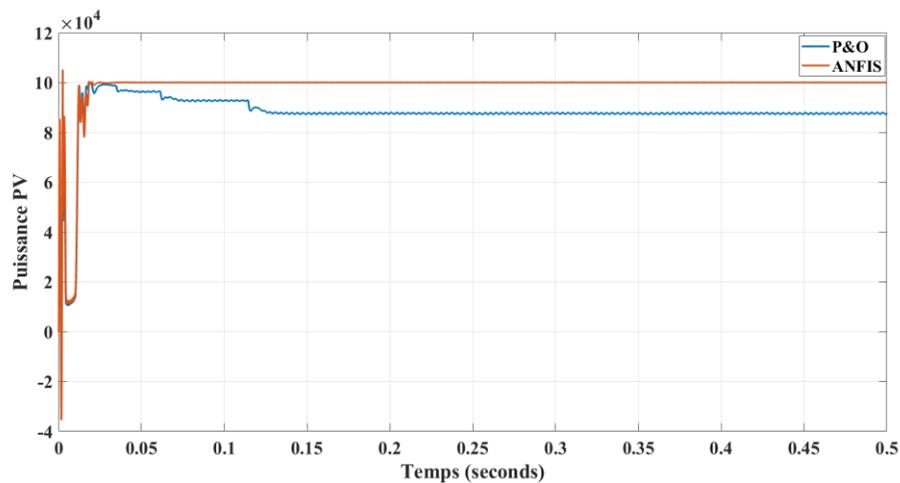
Fig. IV.24 Analyse des performances de l'entraînement de l'ANN pour la régression

### IV.3.3 Résultats de simulation

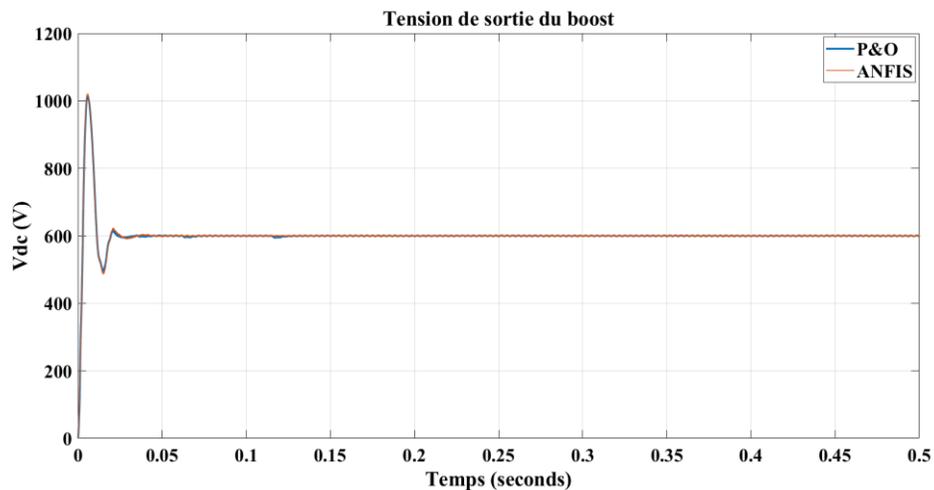
Après avoir montré l'efficacité des méthodes basées sur les RNA pour faire fonctionner un système photovoltaïque autonome à sa puissance maximale, nous effectuons dans cette partie des tests de simulation sur un système PV connecté au réseau par l'application d'une méthode inélégante (ANFIS) et une autre méthode conventionnelle P&O, et les résultats obtenus sont également comparés.

#### a. Test dans des conditions standards

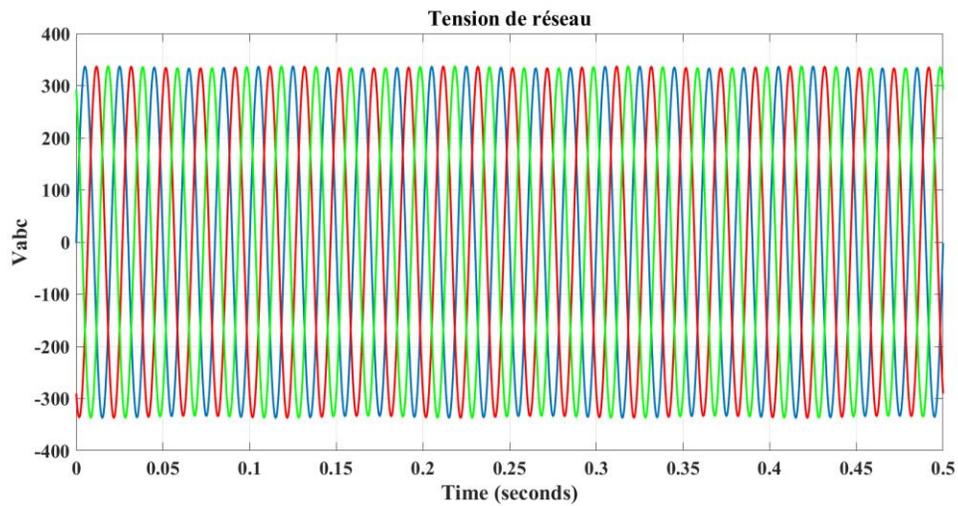
Les figures IV.25, IV.26, IV.27, IV.28, IV.29 et IV.30 illustrent respectivement les résultats de simulation de la puissance du GPV, la tension de sortie du convertisseur boost, la tension et le courant du réseau, ainsi que la puissance active et réactive du système PV connecté au réseau dans des conditions standard.



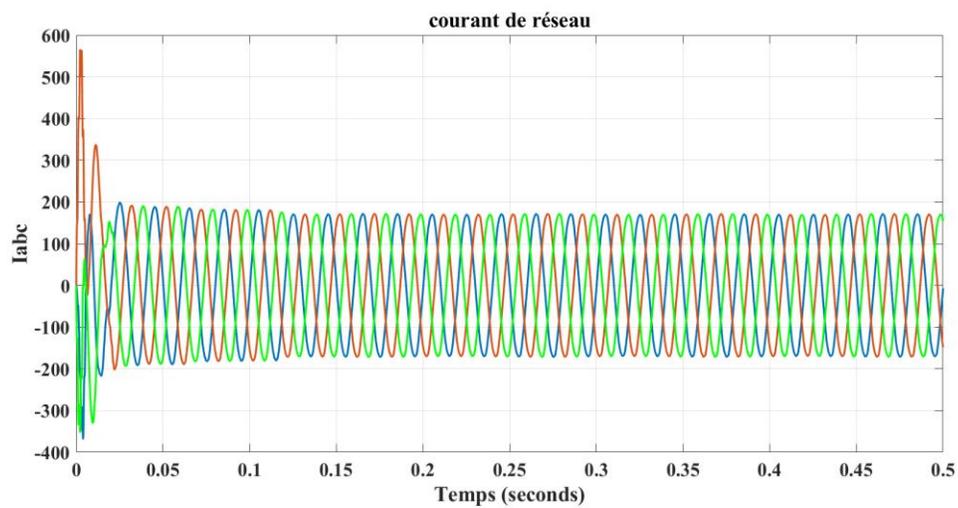
**Fig. IV.25** Puissance du GPV dans les conditions standards.



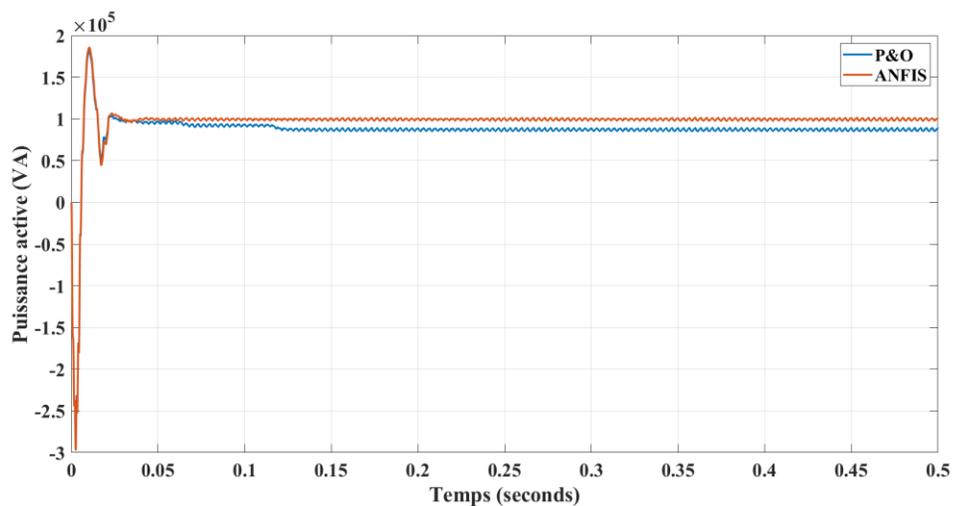
**Fig. IV.26** Tension de sortie du boost dans les conditions standards.



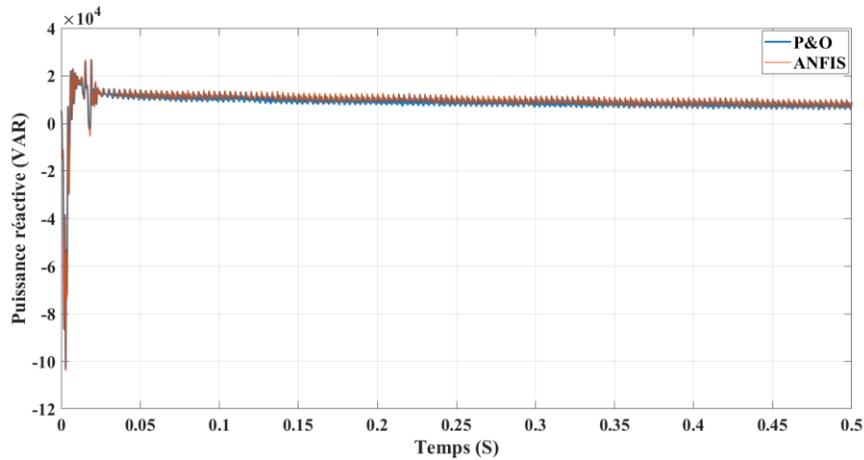
**Fig. IV.27** Tension du réseau dans les conditions standards.



**Fig. IV.28** Courant du réseau dans les conditions standards.



**Fig. IV.29** Puissance active dans les conditions standards.



**Fig. IV.30** Puissance réactive dans les conditions standards..

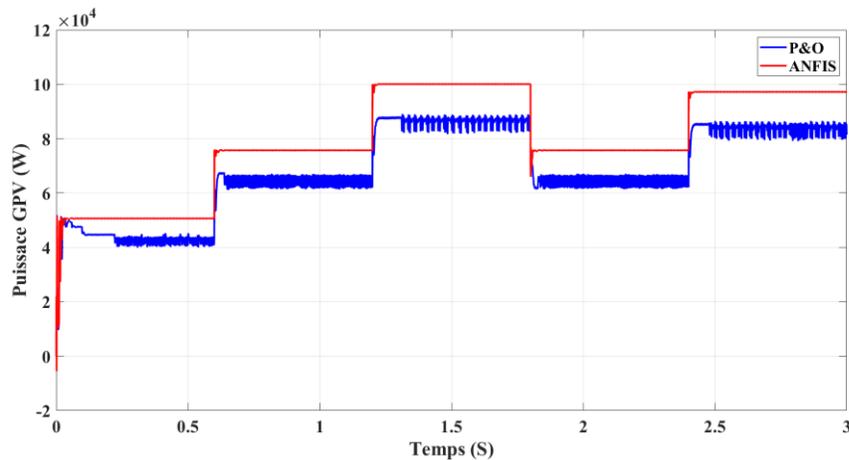
Selon les résultats de simulation illustrés dans les figures précédentes, la puissance du PV atteint 99 979,9 W lors de l'utilisation du contrôleur ANFIS, par rapport à l'algorithme P&O où la puissance du PV atteint 87 674 W.

De plus, la puissance active atteint 101 177 VA avec l'utilisation du contrôleur ANFIS, tandis que l'algorithme P&O donne 89 616,8 VA.

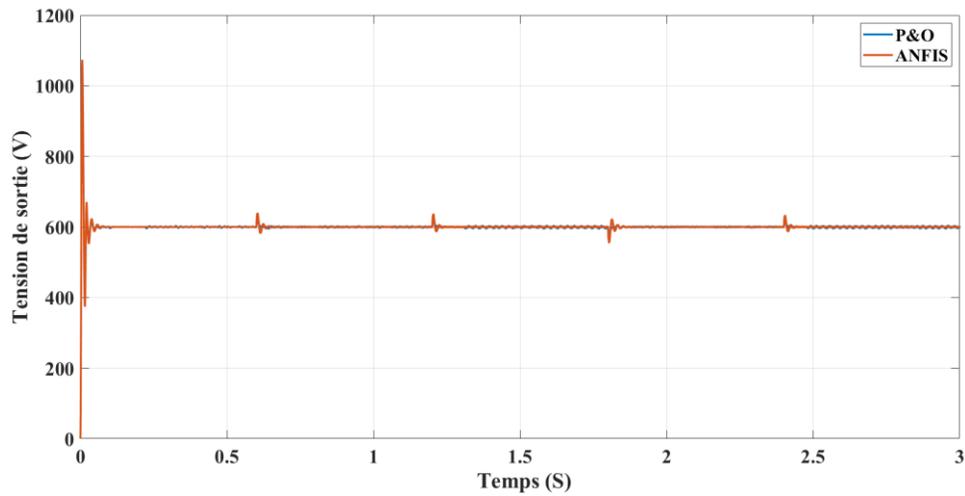
#### b. Test dans des conditions variables

On garde le même profil que celui utilisé dans le système PV autonome ( $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $G = (500, 750, 970, 1000) \text{ W/m}^2$ ) comme il est illustré sur la figure IV.13.

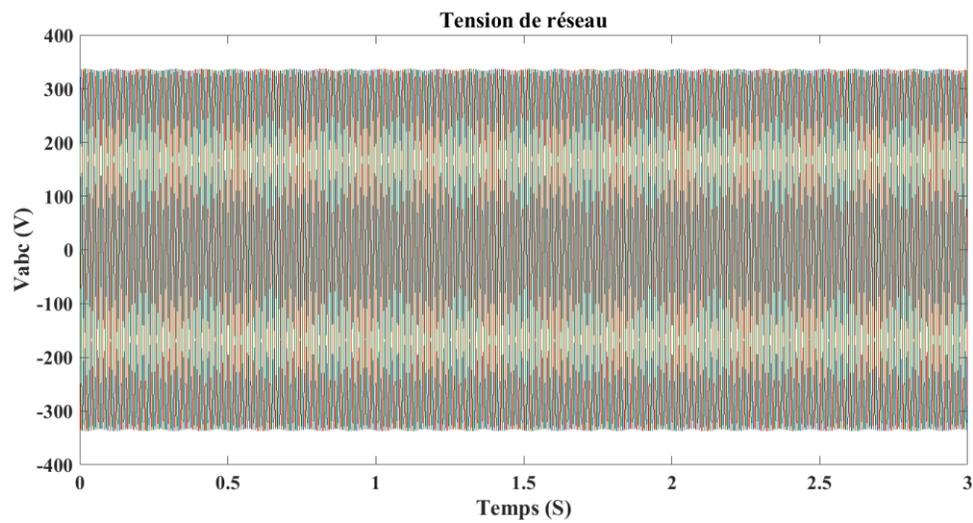
La puissance du GPV, la tension de sortie du convertisseur boost, la tension et le courant du réseau sont illustrés respectivement dans les figures IV.31, IV.32, IV.33 et IV.34. Tandis que la puissance active et réactive pour différents niveaux de radiation sont représentés respectivement dans les figures IV.35 et IV.36.



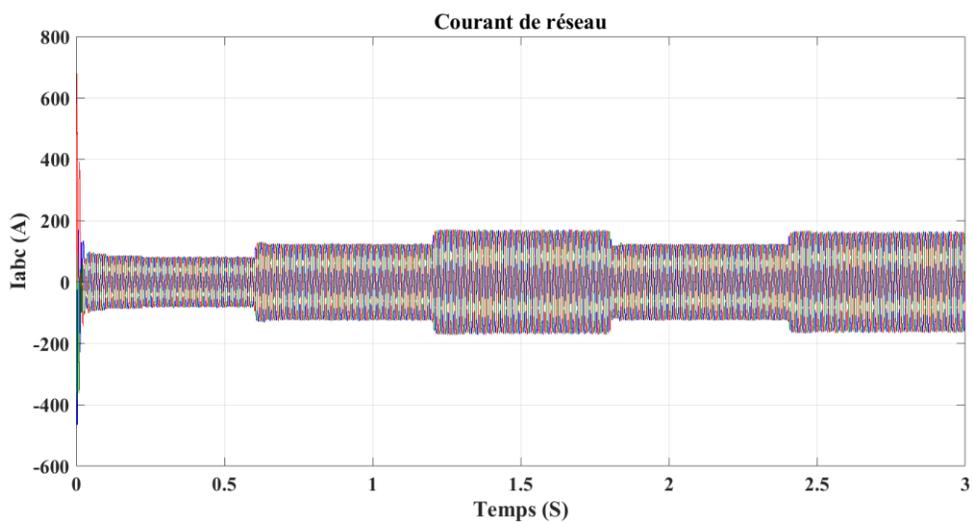
**Fig. IV.31** Puissance du GPV pour radiation variable.



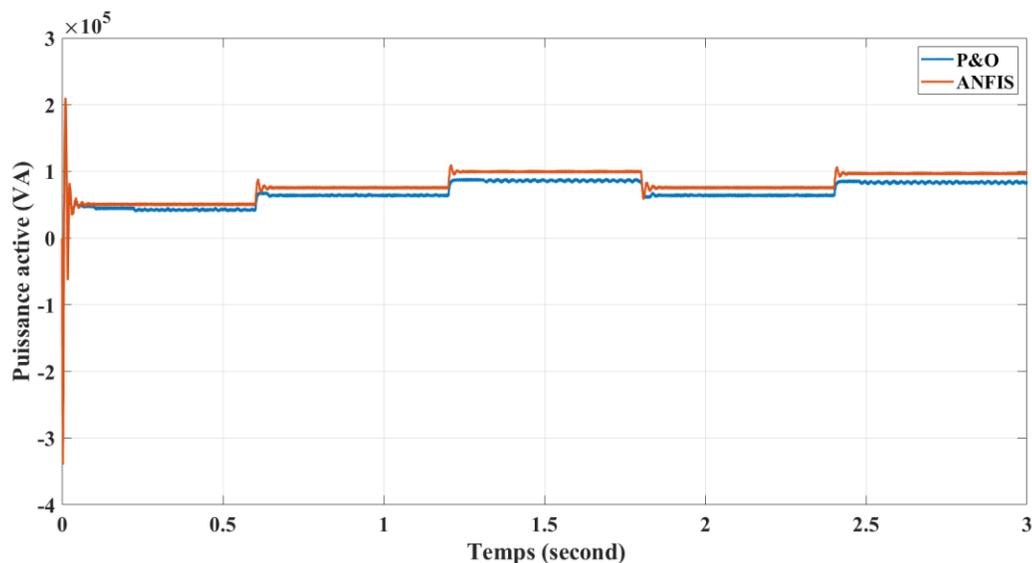
**Fig. IV.32** Tension de sortie du convertisseur boost pour radiation variable.



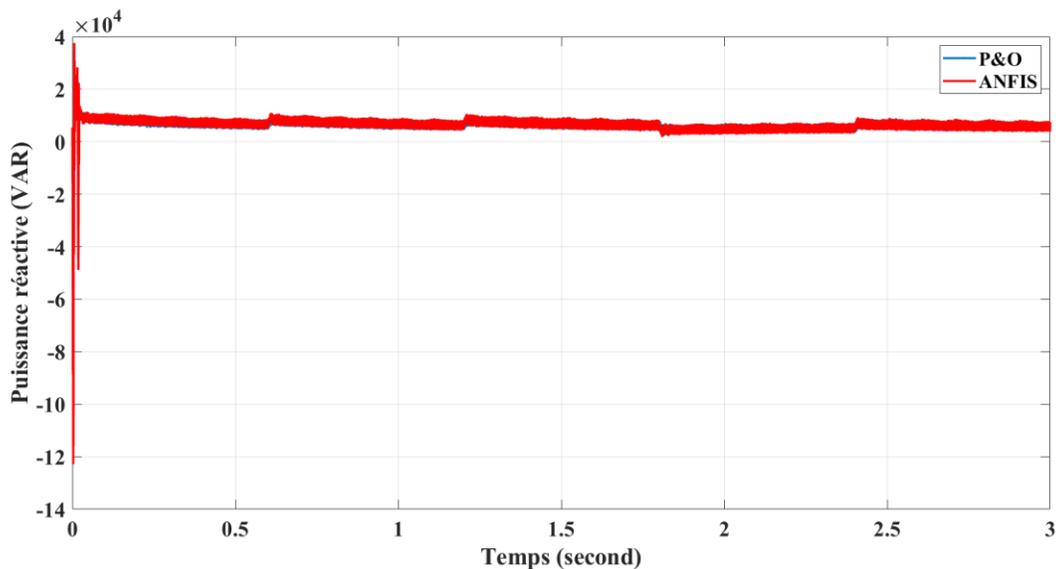
**Fig. IV.33** Tension du réseau pour radiation variable.



**Fig. IV.34** Courant du réseau pour radiation variable.



**Fig. IV.35** Puissance active pour radiation variable.



**Fig. IV.36** Puissance réactive pour radiation variable.

Selon les figures IV.31 et IV.35, dans l'intervalle  $[0, 0,6 \text{ s}]$  avec une irradiation de  $500 \text{ W/m}^2$ , la puissance du GPV atteint  $50\,606,4 \text{ W}$  avec le contrôleur ANFIS et  $44\,316,9 \text{ W}$  avec l'algorithme P&O. Le contrôleur ANFIS peut fournir une puissance active de  $54\,635,9 \text{ VA}$ , tandis que l'algorithme P&O atteint une puissance active de  $42\,847,6 \text{ VA}$ .

Dans les intervalles  $[0,6 \text{ à } 1,2 \text{ s}]$  et  $[1,8 \text{ à } 2,4 \text{ s}]$ , avec une irradiation de  $750 \text{ W/m}^2$ , la puissance du PV atteint  $75\,805,9 \text{ W}$  avec le contrôleur ANFIS et  $65\,746,1 \text{ W}$  avec l'algorithme P&O. La puissance active atteint  $79\,008,6 \text{ VA}$  avec le contrôleur ANFIS et  $62\,402,9 \text{ VA}$  avec l'algorithme P&O.

Dans l'intervalle [2,4 à 3 s], avec une irradiation solaire de  $970 \text{ W/m}^2$ , la puissance du PV atteint  $97\,290,5 \text{ W}$  avec le contrôleur ANFIS et  $85\,707,3 \text{ W}$  avec l'algorithme P&O. Le contrôleur ANFIS peut fournir une puissance active de  $98\,762,4 \text{ VA}$ , tandis que l'algorithme P&O atteint une puissance active de  $85\,105 \text{ VA}$ .

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que l'algorithme basé sur les RNA est robuste et efficace. En effet, cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations. En outre, il est caractérisé par un bon comportement en régime transitoire.

On constate aussi à travers ces résultats de simulation que l'inconvénient majeur de les algorithmes conventionnels P&O et INC réside dans sa mauvaise interprétation de la localisation du PPM lors d'un changement brusque des conditions climatiques. Cette technique présente aussi des problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi, car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller autour du PPM.

#### **IV.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons utilisé quatre techniques pour le suivi du PPM dans un système PV autonome et un système PV raccordé au réseau. Pour le système PV autonome, l'algorithme INC est couramment utilisé dans l'industrie en raison de sa simplicité d'implémentation et du temps réduit nécessaire pour le suivi du PPM. Cependant, cette technique rencontre plusieurs problèmes lors des variations de l'irradiation solaire, car elle se base sur les variations de la tension et du courant du PV. Ces problèmes entraînent une diminution de l'efficacité, résultant en une perte d'énergie. En revanche, le contrôleur RNA-PI ne nécessite pas de modèle mathématique du système PV et offre une efficacité élevée comparée à l'algorithme INC.

Pour le système PV connecté au réseau, l'algorithme P&O présente des oscillations et une faible efficacité lors des changements atmosphériques, ce qui affecte la puissance active. En revanche, le contrôleur ANFIS fournit une puissance active plus élevée par rapport à l'algorithme P&O à différents niveaux d'irradiation solaire. Le principal obstacle rencontré par les contrôleurs RNA et ANFIS est le choix précis de la base de données.

## *Conclusion générale*

### Conclusion générale

L'énergie solaire est l'une des énergies alternatives les plus importantes et les plus utilisées parmi les énergies renouvelables. Cependant, la production d'énergie photovoltaïque dépend fortement des conditions environnementales. Optimiser cette production nécessite la conception d'un système PV performant capable de s'adapter aux variations atmosphériques.

Dans ce mémoire, nous nous sommes concentrés sur les méthodes MPPTs les plus utilisées P&O et INC et celles basées sur les RNA ont été présentées. Ensuite on a effectué des tests de simulation par l'utilisation de l'environnement Matlab/Simulink. Enfin, on a abordé une étude comparative entre les méthodes traditionnelles et les méthodes intelligentes étudiées.

Nous avons commencé par une étude théorique du système photovoltaïque, en mettant l'accent sur le système PV et ses composants. Nous avons passé en revue les différents types de convertisseurs DC/DC et le rôle des éléments d'un réseau électrique. Nous avons également présenté les quatre techniques MPPT utilisées dans notre étude comparative.

Par la suite, nous avons implémenté la méthode conventionnelle INC et une méthode intelligente RNA-PI pour suivre le point de puissance maximum dans un système autonome. Enfin, nous avons utilisé la méthode conventionnelle P&O et le contrôleur ANFIS pour produire une puissance active de 100 KVA dans un système raccordé au réseau.

Les résultats de simulation obtenus ont montré que l'approche ANN présente des avantages significatifs pour le suivi du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. Elle offre une précision de suivi améliorée et une meilleure stabilité du point de puissance maximale par rapport à l'approche conventionnel (P&O et INC). Cependant, il convient de noter que l'implémentation de l'approche ANN peut nécessiter un temps de formation plus long et une complexité de mise en œuvre plus élevée que l'approche O&P. Il est recommandé aux concepteurs et aux ingénieurs de prendre en compte les spécificités de leur système et de choisir l'approche MPPT qui répond le mieux à leurs besoins.

Comme perspective, pour les systèmes d'énergie renouvelable, nous envisageons de travailler avec une source d'énergie hybride (PV + éolienne + batterie) afin de tirer parti de toutes les conditions climatiques. Pour l'étape de commande, nous appliquerons des méthodes méta-heuristiques telles que PSO et GWO pour éviter les problèmes liés à la base de données.

## *Bibliographie*

- [1] AL ANFAF, Mohamed Mladjao Mouhammad. Contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges. 2016. Thèse de doctorat. Université de Lorraine.
- [2] OUADAHI, MERIEM et ABDI, KHADIDJA. Préfaisabilité et dimensionnement d'une centrale PV reliée au réseau pour l'alimentation de l'Hôpital Youcef Demerdji de Tiaret. 2020. Thèse de doctorat. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-.
- [3] Trahi Fatiha. "Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels. Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche lampa", mémoire de magister en électronique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [4] <https://www.lagazettefrance.fr/thumbs/1200%C3%9710000/articles/2024/01/34EE6UK>
- [5] MEZOUAR, Ahlam. ÉTUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES D'UNE CHEMINÉE SOLAIRE À SIMPLE ET À DOUBLE VITRAGE. mémoire de master.2017
- [6] BOUCERREDJ, Leila. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque par la commande mppt. Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism, 2021, vol. 5, no 5, p. 197-205.
- [7] Yahya, Ahmed Ould Mohamed, Abdel Kader Ould Mahmoud, and Issakha Youm. "Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque " Journal of Renewable Energies 11.3 (2008): pages 474-475.
- [8] Bendjamâa Ibrahim. "Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque", mémoire de magister, Université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen, 2012.
- [9] Tyagi, V. V., et al. "Progress in solar PV technology: Research and achievement". Renewable and sustainable energy reviews 20 (2013): 443-461.
- [10] Mambrini Thomas. "Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies", hèse de doctorat. Paris 11, 2014, (Page 60).
- [11] Benadla Nadjat. "Etude comparative de différentes cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités", thèse de doctorat. Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid, 2020 (Page43).
- [12] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaique>
- [13] BECKE, Axel D. et ROUSSEL, Marc R. "Exchange holes in inhomogeneous systems: A coordinate-space model". Physical Review A, 1989, vol. 39, no 8, p. 3761.
- [14] Slater, John C. "Wave functions in a periodic potential", physical Review 51.10 (1937): 846.
- [15] KOELLING, D. D. et ARBMAN, G. O. "Use of energy derivative of the radial solution in an augmented plane wave method: application to copper". Journal of Physics F: Metal Physics, 1975, vol. 5, no 11, p. 2041.
- [16] ANDERSEN, O. Krogh. "Linear methods in band theory". Physical Review B, 1975, vol. 12, no 8, p. 3060.
- [17] Dr Dhaouadi GUIZA. "Contribution à l'étude et commande d'un système photovoltaïque", thèse de doctorat, université 20 aout 1955 – skikda, 2020.
- [18] Townsend, Timothy U. "A method for estimating the long-term performance of direct coupled photovoltaic systems". M. S. Thesis – Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [19] Eckstein, Jurgen Helmut. "Detailed Modeling of Photovoltaic Components". M. S. Thesis. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1990.
- [20] Fry, Bryan. " Simulation of Grid-Tied Building Integrated Photovoltaic Systems". M.S. Thesis, Mechanical Engineering, U. of Wisconsin-Madison, 1998.

- [21] Guechari Amar, Righi Benaissa. "Modélisation et validation de la performance de modèle à quatre paramètres de circuits équivalents de la cellule photovoltaïque", mémoire de master. Université d'Adrar, 2013.
- [22] Safia Krour. "Optimisation des paramètres d'une cellule photovoltaïque par les algorithmes génétiques". PhD thèse. Université Ferhat abbas sétif 1, 2015.
- [23] A Metatla, N Talbi et S Benzahioul. "On the modelling of photovoltaic generators". A comparative study. In 2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), pages 1-5. IEEE.
- [24] N Belhaouas, MS Ait Cheikh, A Malek et C Larbes. "MatlabSimulink of photovoltaic system based on a two-diode model simulator with shaded solar cells". *Revue des énergies renouvelables*, vol. 16, no. 1, pages 65-73, 2013. (Cité en page 29).
- [25] Slama Fateh. "Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique", thèse de doctorat, 2018.
- [26] A. Immad et B. mohamed ali. "Commande MPPT d'un système photovoltaïque utilisant différentes structures de convertisseurs statiques DC/DC", mémoire de master, Université 08 mai 1945 guelma, 2018.
- [27] Aouchiche Nedjma. "Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque", thèse de doctorat. Université Bourgogne Franche-Comté, 2020.
- [28] IQBAL, Zafar, NASIR, Usman, RASHEED, Muhammad Tahir, et al. "A comparative analysis of synchronous buck, isolated buck and buck converter". In : 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). IEEE, 2015. p. 992-996.
- [29] CABAL, Cedric. Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque. 2008. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III. Chapitre 3
- [30] Gaied Chortane, Bacem. "Amélioration de l'algorithme MPPT pour un système PV par l'intégration des nouvelles techniques basées sur l'intelligence artificielle", thèse de doctorat. Ecole de technologie supérieure, 2022.
- [31] B. Bendib, F. Krim, H. Belmili, M. F. Almi, and S. Boulouma, "Advanced Fuzzy MPPT Controller for a stand-alone PV system", *energy procedia*, vol. 50, pp. 383–392, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.046.
- [32] M. Fannakh, M. L. Ehafyani, and S. Zouggar, "Hardware implementation of the fuzzy logic MPPT in an Arduino card using a Simulink support package for PV application", *IET Renew. Power Gener.*, vol. 13, no. 3, pp. 510–518, 2019, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5667.
- [33] M. N. Ali, K. Mahmoud, M. Lehtonen, and M. M. F. Darwish, "An Efficient Fuzzy-Logic Based Variable-Step Incremental Conductance MPPT Method for Grid-Connected PV Systems", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 26420–26430, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3058052.
- [34] M. Dabboussi, A. Hmidet, and O. Boubaker, "An efficient fuzzy logic MPPT control approach for solar PV system: A comparative analysis with the conventional perturb and observe technique", 6th IEEE Int. Energy Conf. ENERGYCon 2020, pp. 366–371, 2020, doi: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236503.
- [35] H. Rezk, M. Aly, M. Al-Dhaifallah, and M. Shoyama, "Design and hardware implementation of new adaptive fuzzy logic-based mppt control method for photovoltaic applications", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 106427–106438, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2932694.

- [36] T. U. Hassan et al., "A novel algorithm for MPPT of an isolated PV system using push pull converter with fuzzy logic controller", *Energies*, vol. 13, no. 15, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/en13154007.
- [37] R. B. Roy et al., "A Comparative Performance Analysis of ANN Algorithms for MPPT Energy Harvesting in Solar PV System", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 102137–102152, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3096864.
- [38] S. Duman, N. Yorukeren, and I. H. Altas, "A novel MPPT algorithm based on optimized artificial neural network by using FPSOGSA for standalone photovoltaic energy systems", *Neural Comput. Appl.*, vol. 29, no. 1, pp. 257–278, 2018, doi: 10.1007/s00521-016-2447-9.
- [39] H. A. Attia, "High performance PV system based on artificial neural network MPPT with PI controller for direct current water pump applications", *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1329–1338, 2019, doi: 10.11591/ijpeds.v10.i3.pp1329-1338.
- [40] A. M. Farayola, A. N. Hasan, and A. Ali, "Efficient photovoltaic mppt system using coarse gaussian support vector machine and artificial neural network techniques", *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. 14, no. 1, pp. 323–339, 2018, doi: 10.24507/ijic.14.01.323.
- [41] L. P. N. Jyothy and M. R. Sindhu, "An Artificial Neural Network based MPPT Algorithm for Solar PV System", *Proc. 4th Int. Conf. Electr. Energy Syst. ICEES 2018*, pp. 375–380, 2018, doi: 10.1109/ICEES.2018.8443277.
- [42] K. J. Reddy et al., "A stochastic variance reduction gradient-based GSO-ANFIS optimized method for maximum power extraction of proton exchange membrane fuel cell", *Energy Convers. Manag.* X, vol. 21, no. December 2023, p. 100505, 2024, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100505.
- [43] Benabadi Ismahan. "Optimisation d'une Base de Règles Floues : Application à la commande d'un drone", thèse de magister. Université des sciences et de la technologie d'oran mohamed boudiaf, 2011.
- [44] S. Padmanaban, N. Priyadarshi, M. S. Bhaskar, J. B. Holm-Nielsen, V. K. Ramachandaramurthy, and E. Hossain, "A Hybrid ANFIS-ABC Based MPPT Controller for PV System with Anti-Islanding Grid Protection: Experimental Realization", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 103377–103389, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2931547.
- [45] H. Tao, M. Ghahremani, F. W. Ahmed, W. Jing, M. S. Nazir, and K. Ohshima, "A novel MPPT controller in PV systems with hybrid whale optimization-PS algorithm based ANFIS under different conditions", *Control Eng. Pract.*, vol. 112, no. August 2020, p. 104809, 2021, doi: 10.1016/j.conengprac.2021.104809.
- [46] M. Lasheen and M. Abdel-Salam, "Maximum power point tracking using Hill Climbing and ANFIS techniques for PV applications: A review and a novel hybrid approach", *Energy Convers. Manag.*, vol. 171, no. March, pp. 1002–1019, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.06.003.
- [47] C. G. Villegas-Mier, J. Rodriguez-Resendiz, J. M. Álvarez-Alvarado, H. Rodriguez-Resendiz, A. M. Herrera-Navarro, and O. Rodríguez-Abreo, "Artificial neural networks in mppt algorithms for optimization of photovoltaic power systems: A review", *micromachines*, vol. 12, no. 10, 2021, doi: 10.3390/mi12101260.
- [48] K. Amara et al., "Improved Performance of a PV Solar Panel with Adaptive Neuro Fuzzy Inference System ANFIS based MPPT", *7th Int. IEEE Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2018*, vol. 5, pp. 1098–1101, 2018, doi: 10.1109/ICRERA.2018.8566818.