

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES

- ANNABA -



المدرسة العليا للتكنولوجيات
الصناعية - عنابة -

Année / 2020

DEPARTEMENT DU SECOND CYCLE
FILIÈRE

ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

Conception d'une commande MPPT optimale à base de l'algorithme génétique pour un système solaire photovoltaïque en présence de l'ombrage partiel

Spécialité

Production Electrique et Energie Renouvelables

Par

CHELGHOUM Aimene

GUEMMOUD Med CHAFIK

Sous la direction de :

DEKHANE Azzeddine

Grade

MCB

Établissement d'affiliation

ESTI Annaba

Devant le jury

Président :

Examineurs :

Table des matières

Remerciement.....	1
Résumé.....	2
Liste des figures.....	3
Liste des tableaux.....	5
Introduction générale.....	6
Chapitre I : Généralité sur le photovoltaïque	8
Introduction.....	9
I.1 Propriétés de la lumière du soleil	9
I.1.1 Les bases de la lumière du soleil	9
I.1.2 Energie de photon.....	10
I.1.3 Flux photoniques	10
I.1.4 Irradiance spectrale.....	10
I.1.5 Densité de puissance rayonnante	11
I.1.6 Rayonnement d'un corps noir.....	11
I.1.7 L'irradiance solaire	12
I.1.8 Rayonnement solaire à la surface de la Terre	13
I.1.9 Effets atmosphériques	14
I.1.10 Masse d'air	15
I.2 Semi-conducteurs.....	15
I.2.1 Formation de la jonction PN	16
I.3 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	16
I.4 Types et rendement des cellules photovoltaïques.....	16
I.4.1 Cellules au silicium polycristallin.....	17
I.4.2 Cellules au silicium monocristallin	17
I.4.3 Cellules au silicium amorphe	17
I.4.4 Cellules utilisant d'autres matériaux que le silicium	17
I.5 Protections d'un générateur photovoltaïque	18
I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	18
Conclusion	19
CHAPITRE II Modélisation d'un panneau photovoltaïque.....	20
Introduction.....	21
II.1 Circuit équivalent d'une cellule solaire	21
II.1.1 Cas d'une cellule idéale	21

II.1.2 Cas d'une cellule réelle	22
II.2. Influence de l'Éclairement.....	26
II.3. Influence de la température.....	27
II.4. Influence de la résistance série.....	27
II.5. Influence de la résistance parallèle.....	28
II.6. Association des Cellules Photovoltaïques	29
II.6.1 Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle	29
II.6.2 Association des Cellules Photovoltaïques en série	30
II.6.3 Association des Cellules Photovoltaïques en mixte.....	31
Conclusion	31
CHAPITRE III Convertisseur DC-DC et les techniques de la commande MPPT	32
Introduction.....	33
III.1 Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale.....	33
III.2 Étage d'adaptation	34
A. Représentation	34
B. Les hacheurs	35
C. Type des hacheurs.....	35
D. Analyse et choix du convertisseur	38
III.3 commande MPPT.....	39
III.3.1 Principe de la recherche du point de puissance maximal	39
III.3.2 Techniques de commandes (Classification)	39
III.3.3 Méthodes classiques de commande MPPT.....	40
A. Introduction des méthodes classiques en particulier P&O et IncCond.....	40
B. Algorithme Hill Climbing	40
C. Algorithme perturbation et observation (P and O simple).....	41
D. Méthode par incrémentation de conductance	43
III.3.4 Méthodes intelligentes de commande	44
A. Introduction des techniques intelligentes.....	44
B. MPPT par la logique floue	45
C. MPPT par les réseaux de neurones.....	46
D. MPPT par la Méthodologie de l'ANFIS	48
III.3.5 Méthodes évolutionnaires de commande MPPT	51
A. MPPT par les algorithmes génétiques :.....	51
Conclusion	60

Chapitre IV Résultats et discussions	61
Introduction	62
IV.1 Courbes caractéristiques des panneaux photovoltaïques	62
IV.2 le modèle du système photovoltaïque avec la méthode de MPPT proposé sur MATLAB	68
IV.3 Algorithme proposé.....	70
IV.4. RESULTATS DES SIMULATIONS ET DISCUSSION	71
Conclusion	74
Conclusion générale	75
Bibliographie.....	76
Annexe	79

Remerciement

En terminant notre projet de fin d'études, nous remercions Dieu, notre créateur, de nous avoir donné les forces, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail.

Nous adressons nos sincères gratitude à nos directeurs de mémoire Messieurs DEKHANE Azzeddine, ATOUI Issam et BOUAKKAZ Med Salah. Nous les remercions de nous avoir encadrées, aidées, orientées et conseillées.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, et d'avoir lu, examiné et évalué ce mémoire.

Finalement, nous tenons à exprimer nos remerciements à nos familles qui nous ont toujours encouragées et soutenues, ainsi qu'à nos chères amies pour leurs appuis et encouragements. De tout cœur, Merci.

ملخص

تعتمد الطاقة الخارجة للوحه على عدد من المعلمات مثل شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلية وما إلى ذلك ... نظرًا للخصائص الكهربائية غير الخطية للخلايا الكهروضوئية ومجموعاتها، يمكن تحسين كفاءة الأنظمة الكهروضوئية عن طريق الحلول القائمة على تقنيات MPPT. هناك طرق MPPT تقليدية تُستخدم غالبًا، وهي طريقة الاضطراب والمراقبة (P&O) وطريقة المواصلة الإضافية (IncCond) وأقدم طريقة لتسليق التلال. ما يسمى بالطرق الذكية، مثل Fuzzy Controller، والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) و anfis. وبالتالي الأساليب التطورية، وخاصة تلك القائمة على AGs. لهذا الغرض، تم تقديم نموذج Matlab لمكونات النظام الكهروضوئي، بالإضافة إلى اللوحات الثلاث المتطابقة الموضوعه في سلسلة متبوعه بمحاكاة الخوارزمية المقترحة. لهذا الغرض، تم تطوير نماذج رياضية لمكونات النظام (لوحة). أثبتت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام أداة Matlab Simulink بشكل عام أن أداء وحدة التحكم MPPT AGs يضمن تشغيل النظام الكهروضوئي في أقصى نقطة طاقة في ظل ظروف مناخية مختلفة، خاصة في حالة التظليل الجزئي

Résumé

La puissance de sortie d'un panneau dépend d'un certain nombre de paramètres lesquels l'intensité du rayonnement solaire, la température des cellules, etc. En raison des caractéristiques électriques non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des techniques MPPT. Il existe des méthodes MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de perturbation et d'observation (P&O), la méthode de conductance incrémentale (IncCond) et la plus ancienne Hill-climbing. Les méthodes dites intelligentes, telle que le contrôleur flou, les réseaux de neurones artificiels (ANN) et l'anfis. Ainsi les méthodes évolutionnaires en particulier celle basée sur les AGs. Pour cela, une modélisation sur Matlab des composantes d'un système PV est présentée, ainsi celles des trois panneaux identiques mise en séries suivie par simulation de l'algorithme proposé. Pour ce faire, les modèles mathématiques des composants du système (panneau) ont été développés. Les résultats de simulation, obtenus à l'aide de l'outil Matlab Simulink, ont prouvé en général que les performances du contrôleur MPPT des AGs assure le fonctionnement du système photovoltaïque dans le point de puissance maximum dans différentes conditions climatiques en particulier le cas de l'ombrage partiel.

Abstract

The output power of a panel depends on a number of parameters such as the intensity of solar radiation, cell temperature, etc... Due to the non-linear electrical characteristics of PV cells and their combinations, the efficiency of PV systems can be improved by solutions based on MPPT techniques. There are conventional MPPT methods that are often used, namely the Perturbation and Observation Method (P&O), the Incremental Conductance Method (IncCond) and the oldest Hill-climbing method. So-called intelligent methods, such as Fuzzy Controller, Artificial Neural Networks (ANN) and anfis. Thus, evolutionary methods, especially the one based on AGs. For this, a Matlab model of the components of a PV system is presented, as well as the three identical panels put in series followed by simulation of the proposed algorithm. For this purpose, mathematical models of the system components (panel) have been developed. The simulation results, obtained using the Matlab Simulink tool, proved in general that the performance of the AGs MPPT controller ensures the operation of the PV system in the maximum power point under different climatic conditions, especially in the case of partial shading.

Liste des figures

Figure 1 Distance entre la terre et le soleil. [2]	13
Figure 2 Irradiance solaire reçoit par la terre.....	14
Figure 3 Angle de la masse d'air.....	15
Figure 4 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.....	18
Figure 5 Schéma équivalent d'une cellule idéale	21
Figure 6 Schéma équivalent d'une cellule réelle.....	22
Figure 7 Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle	24
Figure 8 caractéristique I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque.....	25
Figure 9 caractéristique I-V (influence de l'Éclairement)	26
Figure 10 caractéristique I-V (influence de la température).....	27
Figure 11 caractéristique I-V (influence de la résistance série)	28
Figure 12 caractéristique I-V (influence de la résistance parallèle)	28
Figure 13 caractéristique P-V (influence de la résistance parallèle)	29
Figure 14 caractéristique I-V (trois cellules photovoltaïque raccordée en parallèle)	30
Figure 15 caractéristique I-V (deux cellules photovoltaïque raccordée en sérié).....	30
Figure 16 caractéristique I-V (plusieurs cellules photovoltaïques raccordées en sérié-parallèle).....	31
Figure 17 Connexion directe d'un panneau photovoltaïque (PV) – charge.	34
Figure 18 Points de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque avec différents types de charges en connexion directe.....	34
Figure 19 Etage d'adaptation.	35
Figure 20 Convertisseur buck (abaisseur)	36
Figure 21 Convertisseur boost (élevateur).....	37
Figure 22 Convertisseur buck-boost.....	37
Figure 23 Convertisseur cuk	38
Figure 24 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge DC	39
Figure 25 Caractéristique de fonctionnement de la méthode Hill-climbing.....	41
Figure 26 Organigramme de la méthode Hill-Climbing.....	41
Figure 27 Organigramme de la méthode P&O	42
Figure 28 Caractéristique P-V de fonctionnement de la méthode P&O	42
Figure 29 Caractéristique I-V de fonctionnement de la méthode incrémentation de conductance	43
Figure 30 Organigramme de la méthode incrémentation de conductance.....	44
Figure 31 schéma explicatif de la méthode de la logique floue.....	45

Figure 32 Architecture d'un réseau de neurones artificiel	46
Figure 33 Architecture d'un réseau de neurones artificiel appliqués sur le photovoltaïque.....	48
Figure 34 Architecture d'un ANFIS	49
Figure 35 Organigramme de la méthode des algorithmes génétique	52
Figure 36 Exemple de croisement avec un seul site.....	57
Figure 37 Exemple de croisement multipoints.....	58
Figure 38 Exemple de mutation	58
Figure 39 Courbe des caractéristiques P-V et I-V du panneau dans les STC	63
Figure 40 Courbe des caractéristiques P-V et I-V des trois panneaux identiques en séries dans les STC	64
Figure 41 Courbe des caractéristiques P-V et I-V des trois panneaux identiques en séries dans le profil d'ensoleillement P1.....	65
Figure 42 Courbe des caractéristiques P-V et I-V des trois panneaux identiques en séries dans le profil d'ensoleillement P2.....	66
Figure 43 Courbe des caractéristiques P-V et I-V des trois panneaux identiques en séries dans le profil d'ensoleillement P3.....	67
Figure 44 Courbe des caractéristiques P-V des trois panneaux identiques en séries dans les trois profils d'ensoleillement P1,P2,P3 et les STC	68
Figure 45 Schéma bloc d'un panneau photovoltaïque dans MATLAB/Simulink.....	69
Figure 46 Schéma bloc des trois panneaux photovoltaïques misent en séries dans MATLAB/Simulink	69
Figure 47 Schéma bloc d'un système photovoltaïque avec la commande basée sur les AGs dans MATLAB/Simulink.....	70
Figure 48 Organigramme de l'algorithme génétique appliqué sur l'MPPT.....	71
Figure 49 Réponse de la stratégie MPPT proposée à diverses conditions d'exploitation : tension du PV, courant du PV, puissance du PV.....	73

Liste des tableaux

Tableau 1 Irradiance solaire moyenne des différentes planètes. [2].....	13
Tableau 2 Valeurs des paramètres de simulation	25
Tableau 3 Table de règles à cinq classes (matrice d'inférences).....	46
Tableau 4 Caractéristiques du système des trois panneaux identiques misent en séries utilisant le module Kyocera -KC200GT	68
Tableau 5 Points de puissance maximale du réseau PV pour les scénarios de simulation.....	72

Introduction générale

L'augmentation du Coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part. En plus, l'utilisation par l'humanité de quantités considérables de combustibles fossiles est à l'origine d'un déséquilibre important du cycle du carbone, ce qui provoque une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre et, par voie de conséquence, entraîne des changements climatiques destructifs. Le danger est aussi omniprésent dans les installations nucléaires par le risque d'accidents (ETATS-UNIS-1979, UKRAINE (Tchernobyl)-1986, JAPON-2011, ...), et par les déchets toxiques qui en résultent. Tous ces facteurs font que l'énergie renouvelable devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse. Leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes ; ce sont les énergies de l'avenir. Plusieurs pays ont bien compris ce challenge et malgré les contraintes naturelles et financières de grands efforts sont consacrés au développement de ces ressources, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque qui est l'objet de notre travail. Selon les chiffres donnés en 2017 de « *International Energy Agency* » [1] la production de l'énergie photovoltaïque (PV) va tripler en 8 ans seulement (de 300 TWh en 2016 à plus de 900 TWh en 2022).

Cependant les inconvénients majeurs de cette énergie sont le prix du générateur qui reste encore élevé ainsi que le rendement énergétique relativement bas. Pour surmonter ces problèmes, deux voies sont souvent suivies :

- L'augmentation du rendement énergétique en adoptant des technologies de très haut niveau lors de la fabrication des cellules photovoltaïques.
- La maximisation la puissance délivrée par le générateur car le rendement peut baisser encore si le panneau ne fonctionne pas autour de son point de puissance maximale qui lui aussi change de position si les conditions climatiques changent, d'où la nécessité d'une technique de poursuite continue de ce point.

Plusieurs techniques ont été proposées pour la poursuite du point de puissance maximale (MPPT); partant des méthodes classiques allant aux techniques intelligentes jusqu'aux les plus récentes, les méthodes évolutionnaires en particulier la commande utilisant les algorithmes génétiques qui est la plus efficace pour différent conditions climatiques spécialement le cas

d'ombrage partiel ou nous nous coïncidons avec plusieurs points de puissances mximums locaux (PPMLs) et sera pratiquement difficile de trouver le point de puissance maximum global (PPMG), ce qui n'est pas le cas avec les AGs.

Objectif du travail

L'objectif de ce mémoire est de prouver l'aptitude de l'algorithme génétique de trouver le point de puissance maximale dans les cas les plus difficiles possibles en l'illustrant par l'ombrage partiel dans trois (3) cas différents, pour atteindre cet objectif, nous avons scindé notre mémoire en quatre chapitres.

Structure de la mémoire

Le premier chapitre présente quelques notions de base sur l'énergie solaire, les propriétés de la lumière du soleil, les semis conducteurs et jonctions. Après on a entamé le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque et les différents types des cellules, ainsi leurs avantages et leurs inconvénients.

Ensuite, nous passerons au deuxième chapitre consacré à la modélisation du panneau, puis nous donnerons les principales caractéristiques d'un PV et l'influence de différents paramètres sur ces derniers.

- Dans le 3ème, une modélisation de convertisseurs DC_DC à savoir, le convertisseur Boost. De plus, il donne une description de la majorité des techniques MPPT incluant le principe de fonctionnement, et l'organigramme de chacune des méthodes, et nous nous intéresserons à l'étude de la méthode basée sur les algorithmes génétiques. Pour bien présenter cette commande, une description de ces derniers est donnée, avec l'explication des différentes étapes.

- Le 4ème chapitre est consacré à une étude par la simulation de l'algorithme proposé. Pour ce faire, une modélisation avec Matlab/Simulink d'un système PV (GPV, boost) est présentée, complétée par l'implémentation de la technique des AGs. Pour démontrer les performances de l'algorithme, les résultats de simulation des trois profils d'ombrage sont alors discutés.

Chapitre I :

Généralité sur le photovoltaïque

Introduction

A l'aide des cellules solaires le processus de conversion direct de rayonnement solaire en électricité est le photovoltaïque [2]. Aujourd'hui grâce à sa source en matière première le soleil qui est une source énergétique quasiment illimitée il y'a une croissance rapide et plus importante à la production conventionnelle d'électricité à partir des fossiles non renouvelables [3]. Par rapport à la production conventionnelle le photovoltaïque est un nouveau venu, il a commencé à faire ses premiers pas dans les années 1950, avec la nécessité d'une source d'alimentation autonome dans les satellites utilisé dans l'industrie spatiale dans les années 1960 la recherche photovoltaïque a reçu leur premier coup de pouce majeur, avec la crise du pétrole dans les années 1970 le monde a commencé à penser sérieusement sur l'opportunité des sources d'énergies renouvelables pour une utilisation terrestre. Ce qui a favorisé à son tour l'étude de photovoltaïque comme moyen de génération d'énergie terrestre. Aujourd'hui les cellules photovoltaïques offrent une meilleure qualité de vie à ce qui n'ont pas accès au réseau.

Pour comprendre ce processus, nous avons rappelé dans ce chapitre quelque notion de base sur l'énergie solaire, les propriétés de la lumière du soleil, les semi-conducteurs et jonctions.

Une fois ces notions sont bien expliquées, il devient facile d'entamer le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque et les différents types des cellules photovoltaïques. [2]

I.1 Propriétés de la lumière du soleil

I.1.1 Les bases de la lumière du soleil

La fraction de l'énergie totale émise par le soleil c'est la lumière que nous voyons tous les jours. La lumière est une forme de « rayonnement électromagnétique » et parmi plusieurs formes de lumières il y'a le visible que nous voyons tous les jours. La lumière a été décrite comme une onde qui a une certaine longueur d'onde d'après le spectre électromagnétique et les photons sont les constituions principaux de la lumière. D'après le principe « dualité onde-particule » un photon peut apparaitre comme une onde ou comme une particule.

Pour comprendre comment la lumière incidente interagit avec le convertisseur photovoltaïque il existe plusieurs caractéristiques importantes.

Les caractéristiques sont :

- Le contenu spectral de la lumière incidente ;
- La densité de puissance rayonnante du soleil ;

On va revenir sur ces caractéristiques dans la suite de ce chapitre [2].

I.1.2 Energie de photon

La longueur d'onde et l'énergie de photon sont les caractéristiques principales d'un photon. Il existe une relation entre ses deux caractéristiques données par l'équation [2] :

$$E = h \times c/\lambda \quad (I.1)$$

Avec :

E : énergie de photon

H : constant de Planck

C : vitesse de la lumière

I.1.3 Flux photoniques

Le nombre de photon par seconde par unité de surface c'est le flux photoniques Φ . Pour déterminer le nombre d'électron générer par la cellule solaire donc le courant produit il est nécessaire de déterminer le flux de photons [4].

I.1.4 Irradiance spectrale

L'irradiance spectrale en fonction de la longueur d'onde (ou de l'énergie) des photons, notée F , est la manière la plus courante de caractériser une source lumineuse. Il donne la densité de puissance à une longueur d'onde particulière. Les unités d'irradiance spectrale sont en $Wm^{-2} \mu m^{-1}$. Le terme Wm^{-2} est la densité de puissance à la longueur d'onde λ (μm). Par conséquent, le m^{-2} se réfère à la surface de l'émetteur de lumière et le μm^{-1} se réfère à la longueur d'onde d'intérêt [4].

$$F(\lambda) = \Phi E \frac{1}{\Delta\lambda} \quad (1.2)$$

$F(\lambda)$ est l'irradiance spectrale en $Wm^{-2} \mu m^{-1}$;

Φ est le flux photonique en # photons $m^{-2} sec^{-1}$;

E et λ sont respectivement l'énergie et la longueur d'onde du photon en joules et en mètres ;

I.1.5 Densité de puissance rayonnante

L'intégration de l'irradiance spectrale $F(\lambda)$ sur tous les longueurs d'onde est égale à la densité de puissance rayonnante et on peut la calculer à travers cette équation [2] :

$$H = \int_0^{\infty} F(\lambda) d\lambda \quad (1.3)$$

Avec :

H : densité de puissance rayonnante

$F(\lambda)$: irradiance spectrale

I.1.6 Rayonnement d'un corps noir

Il est nécessaire de passer par le rayonnement d'un corps noir pour comprendre le comportement du rayonnement solaire, un corps noir absorbe tout le rayonnement incident à sa surface et émet un rayonnement en fonction de sa température, l'irradiance spectrale d'un corps noir est mathématiquement décrite par l'équation de Planck comme suite [3] :

$$F(\lambda) = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 (\exp(\frac{hc}{k \lambda T}) - 1)} \quad (1.4)$$

λ est la longueur d'onde de la lumière.

T est la température du corps noir (K).

F est l'irradiance spectrale en $Wm^{-2} \mu m^{-1}$.

H , c et k sont des constantes.

La densité de puissance totale d'un corps noir est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$H = \sigma T^4 \quad (1.5)$$

σ est la constante de Stefan-Boltzmann.

T est la température du corps noir en Kelvin.

1.1.7 L'irradiance solaire

Le soleil est une sphère chaude de gaz, à cause des réactions de fusion nucléaire au cœur de soleil les températures atteignent plus de 20 millions degré kelvin à l'intérieur, la photosphère est la couche extérieure du soleil dont la température est d'environ 6000K. Comme le soleil est un corps noir, appliquant la loi de Stephan Boltzmann : $H_{soleil} = 64.106 \text{ W/m}^2$. (Pour $T = 5800 \text{ K}$)

Afin de calculer la puissance totale émise par le soleil on multiplie la densité de puissance émise par la surface de soleil. $P_{soleil} = 3,6 \cdot 10^{26}$ watts.

Après avoir comprendre ces notions, on peut définir l'irradiance solaire (H_0 en W/m^2) par la densité de puissance incidente sur un objet due à l'illumination du soleil. Tel que seule une fraction de la puissance totale émise par le soleil frappe un objet dans l'espace qui est à une certaine distance du soleil. Cependant, la puissance totale du soleil est maintenant répartie sur une surface beaucoup plus grande et donc l'irradiance solaire sur un objet dans l'espace diminue à mesure que l'objet s'éloigne du soleil ce qui est illustré dans le tableau ci-dessous [2] :

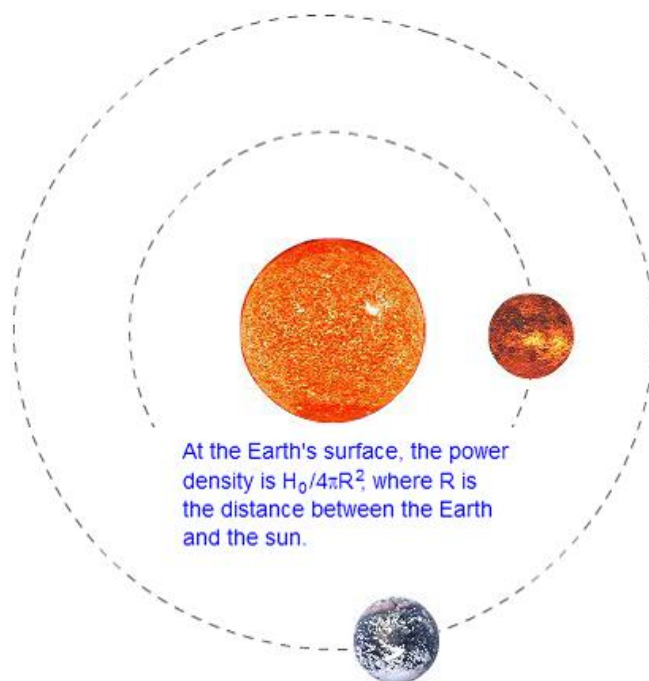


Figure 1 Distance entre la terre et le soleil. [2]

Planète	Distance (x 10 ⁹ m)	Irradiance solaire moyenne (W / m ²)
Mercure	57	9116,4
Terre	150	1366,1
Jupiter	778	50,5

Tableau 1 Irradiance solaire moyenne des différentes planètes. [2]

I.1.8 Rayonnement solaire à la surface de la Terre

Bien que le rayonnement solaire incident sur l'atmosphère terrestre soit relativement constant, le rayonnement à la surface de la Terre varie considérablement en raison de :

- Les effets atmosphériques, y compris l'absorption et la diffusion.
- Les variations locales de l'atmosphère, telles que la vapeur d'eau, les nuages et la pollution.
- Latitude de l'emplacement.
- La saison de l'année et l'heure de la journée [5].

I.1.9 Effets atmosphériques

Les effets atmosphériques ont plusieurs impacts sur le rayonnement solaire à la surface de la Terre. Les effets majeurs pour les applications photovoltaïques sont :

- Une réduction de la puissance du rayonnement solaire due à l'absorption, la diffusion et la réflexion dans l'atmosphère.
- Une modification du contenu spectral du rayonnement solaire due à une plus grande absorption ou diffusion de certaines longueurs d'onde.
- L'introduction d'une composante diffuse ou indirecte dans le rayonnement solaire.
- Les variations locales de l'atmosphère (telles que la vapeur d'eau, les nuages et la pollution) qui ont des effets supplémentaires sur la puissance incidente, le spectre et la directivité [2].

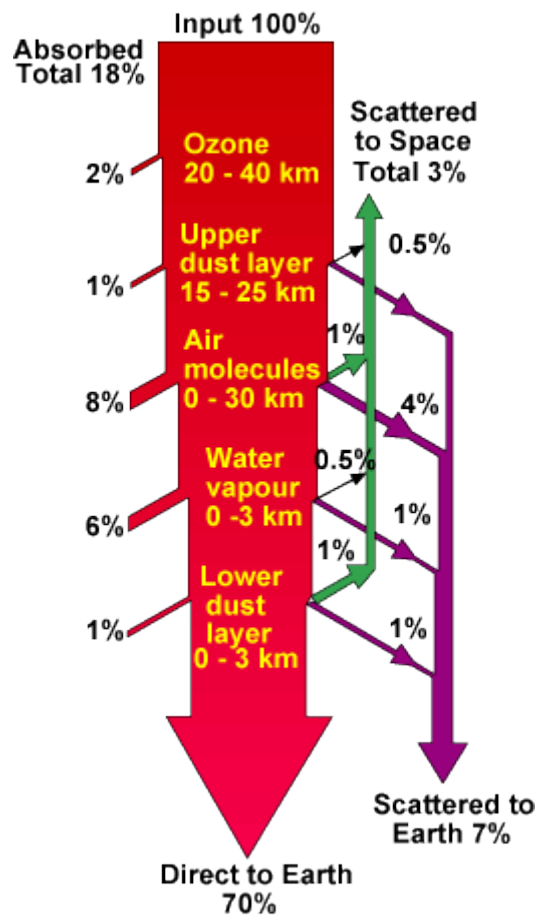


Figure 2 Irradiance solaire reçoit par la terre

I.1.10 Masse d'air

La masse d'air est la longueur de trajet que la lumière parcourt dans l'atmosphère, normalisée à la longueur de trajet la plus courte possible (c'est-à-dire lorsque le soleil est directement au-dessus). La masse d'air quantifie la réduction de la puissance de la lumière lorsqu'elle traverse l'atmosphère et est absorbée par l'air et la poussière. La masse d'air est définie comme [3] :

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (1.6)$$

Où θ est l'angle par rapport à la verticale

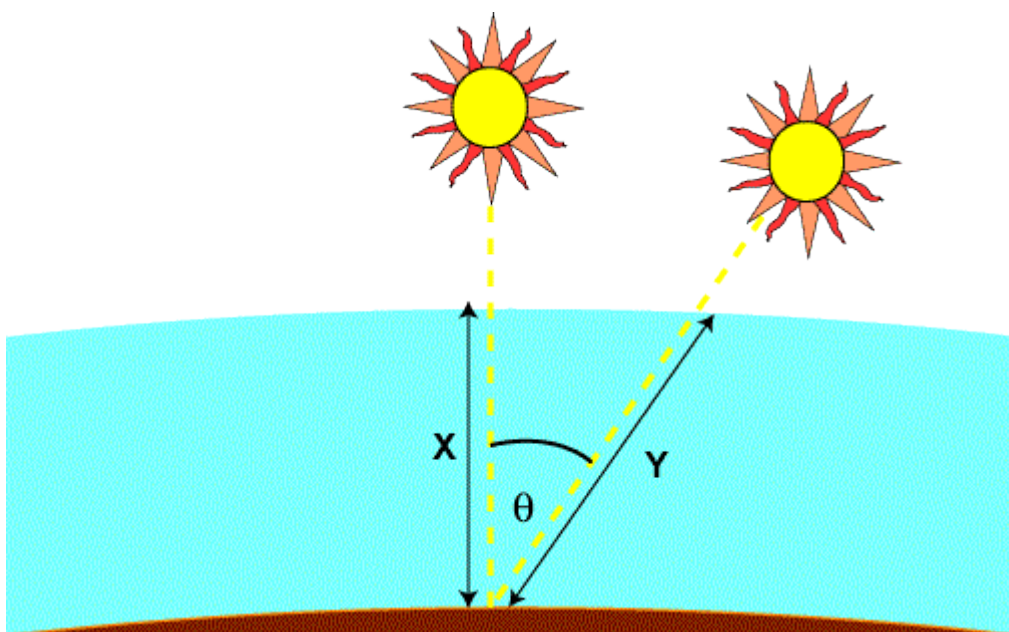


Figure 3 Angle de la masse d'air

La masse d'air représente la proportion de l'atmosphère que la lumière doit traverser avant de heurter la Terre par rapport à sa longueur de trajet aérien, et est égale à Y / X [2].

I.2 Semi-conducteurs

Les semi-conducteurs agissent comme des isolants à basses températures et des conducteurs à des températures plus élevées car les électrons qui entourent les atomes semi-conducteurs peuvent se détacher de leur liaison covalente et se déplacer librement sur le réseau. D'où

vient cette propriété conductrice qui constitue la base pour comprendre comment nous pouvons utiliser ces matériaux dans les appareils électriques. Citant que l'élément semi-conducteur le plus utilisé est le silicium car il est peu coûteux et il se trouve en très grande quantité sur terre ou il constitue 28% de l'écorce terrestre, sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique. [6]

I.2.1 Formation de la jonction PN

La bande interdite est la quantité minimale d'énergie requise pour qu'un électron se libère en quittant sa bande de valence. Lorsque l'énergie de la bande interdite est atteinte, l'électron est excité dans un état libre, et peut donc participer à la conduction. Mais, la présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant. Pour cela le dopage est une technique utilisée pour faire varier le nombre d'électrons et de trous dans les semi-conducteurs. Sachant qu'un trou se crée lorsque l'électron dont il était lié auparavant participe également à la conduction.

Alors le dopage des matériaux de type N tel que phosphore (P) augmentent la conductivité d'un semi-conducteur (Silicium) en augmentant le nombre d'électrons disponibles et les matériaux de type P comme le bore (B) augmentent la conductivité en augmentant le nombre de trous présents. [7]

I.3 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base silicium. Elle se constitue de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N qui créent une jonction PN. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Alors une différence de potentiel est créée entre les deux couches, et mesurée entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. [8]

I.4 Types et rendement des cellules photovoltaïques

Comme on l'a vu, un panneau est un assemblage des cellules photovoltaïques. Il existe plusieurs types des cellules qui se différencient par le semi-conducteur utilisé et la fabrication de ce semi-conducteur c'est-à-dire la technologie utilisée. En dehors du prix, le choix d'un type

de cellule n'a que peu de conséquences pour l'utilisateur, la principale différence sera la surface. [9]

I.4.1 Cellules au silicium polycristallin

Les modules utilisant des cellules au silicium polycristallin ont en général un rendement compris entre 12 et 14%. Ces cellules sont simples à fabriquer et a un cout pas cher (raisonnable). Les cellules polycristallines sont reconnaissables aux formes irrégulières des cristaux qui apparaissent nettement à l'œil nu. [9]

I.4.2 Cellules au silicium monocristallin

Les cellules au silicium monocristallin offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le marché entre 13 à 15%. Ces cellules sont plus compliquer à fabriquer et plus cher par rapport à les cellules polycristallin. [9]

I.4.3 Cellules au silicium amorphe

La cellule au silicium amorphe est constituée d'un silicium ayant une structure atomique désordonnée, c'est à dire non-cristallisé. Ce matériau absorbe beaucoup plus la lumière qu'un silicium cristallin. Il fait partit de la technologie "couche mince" qui consistent à déposer sous vide sur un substrat (verre, métal, plastique, ...) une fine couche uniforme composée d'un, et plus souvent de plusieurs matériaux réduits en poudre. Les cellules sont de couleur gris foncé. [9]

I.4.4 Cellules utilisant d'autres matériaux que le silicium

Ils font partie des cellules à couche mince fabriqué par autres matériaux (diséléniure de cuivre et d'iridium (CIS), tellurure de cadmium (CdTe)...), on peut citer :

- Les cellules à l'arséniure de gallium utilisées essentiellement dans les applications spatiales
- Les cellules multicouches, multi-jonctions, hybrides ou tandem qui superposent plusieurs couches minces afin d'exploiter différentes longueurs d'onde de la lumière et d'offrir des rendements plus élevés (dépassant parfois 40% en laboratoire)
- Les cellules solaires organiques sont créées à partir des matériaux de synthèse, donc moins chères, mais qui offrent encore des rendements et une durée de vie trop faibles. [9]

I.5 Protections d'un générateur photovoltaïque

Afin d'augmenter la durée de vie de l'installation photovoltaïque il est nécessaire d'utiliser des protections dans l'installation pour éviter notamment les pannes destructrices venant de l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

La diode anti-retour en cas de connexion parallèle pour éviter les courants négatifs.

La diode by-pass en cas de dysfonctionnement d'une cellule à cause d'ombrage ou autres problèmes pour éviter les points chauds et de ne pas perdre la totalité de la chaîne photovoltaïque. [10]

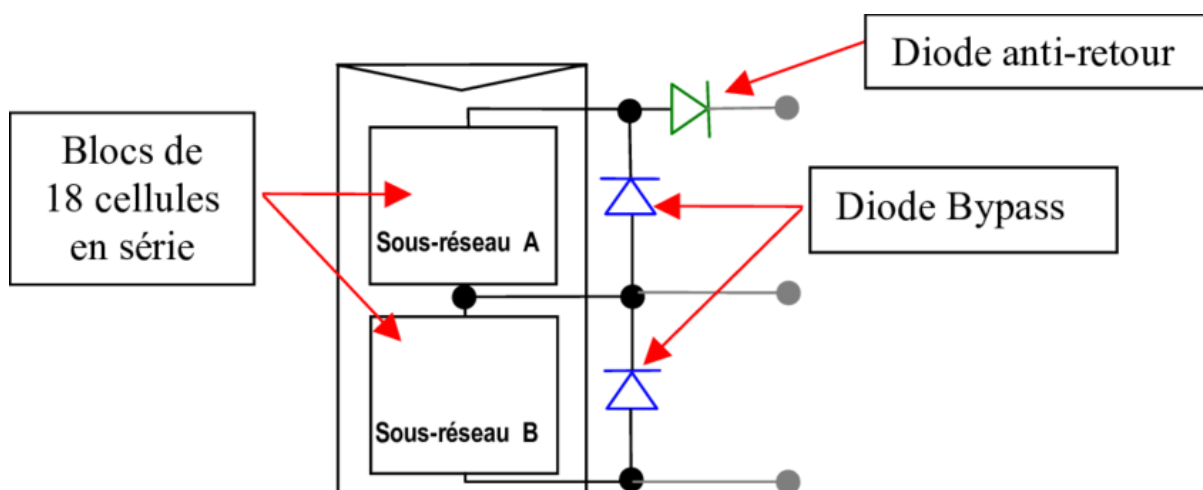


Figure 4 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Avantages

L'énergie solaire est renouvelable en excellence à cause de sa source en matière première le soleil.

L'un des formes d'énergies qui n'émet pas un gaz à effet de serre c'est-à-dire propre et non polluante.

Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.

Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation photovoltaïque sont relativement faibles.

Une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux. [3] – [11] – [12]

Inconvénients

Cout d'investissement relativement élevé.

L'intermittence de l'énergie solaire qui donne la nécessité d'un système de stockage électrique.

Le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle d'une perte de rendement de 1 % par an.

Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 % (pour les meilleurs).

Les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre, chrome, silicium, cadmium et tellure. [3] – [11] – [12]

Conclusion

Nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur l'énergie solaire, les propriétés de la lumière du soleil, les semi-conducteurs et jonctions.

Une fois on a bien compris ces notions, il est devenu facile d'entamer le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque et les différents types des cellules photovoltaïques.

CHAPITRE II

Modélisation d'un panneau photovoltaïque

Introduction

Le système photovoltaïque converti l'éclairement en électricité dont le dispositif basique de ce système est la cellule photovoltaïque, ces cellules peuvent être regroupées pour former des modules ou des panneaux et ces derniers sont regroupés pour former un grand champ photovoltaïque [3]. Alors, afin de construire le modèle du générateur PV (GPV), il faut tout d'abord choisir le circuit électrique équivalent à cette source [13].

La cellule photovoltaïque est décrite par sa caractéristique non linéaire I-V. Les textes suivants présentent en détails les équations qui forment le modèle I-V et la méthode utilisé pour obtenir les paramètres de l'équation [4].

II.1 Circuit équivalent d'une cellule solaire

II.1.1 Cas d'une cellule idéale

La manière la plus simple qui représente la cellule photovoltaïque soumise à l'éclairement connectée à une charge est le modèle idéal dont le circuit équivalent de cette cellule est composé d'une source de courant montée en parallèle avec une diode (figure (5)).

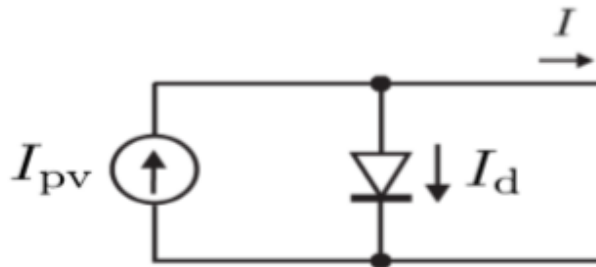


Figure 5 Schéma équivalent d'une cellule idéale

L'équation basique retenue de ce modèle qui décrit mathématiquement la caractéristique I-V de la cellule idéale est :

$$I = I_{pv} - I_d \quad (II.1)$$

Ou I_{pv} est le courant généré par la lumière incidente qui est directement proportionnel à l'irradiation du soleil, I_d est le courant de diode [3].

II.1.2 Cas d'une cellule réelle

L'équation (1) ne représente pas la caractéristique I-V d'un panneau photovoltaïque réel parce que celui-ci est composé de plusieurs cellules ce qui nécessitent l'inclusion de paramètres supplémentaires à l'équation représenté sur la figure (6).

Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant I_{pv} caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s), et une résistance parallèle (R_p). [14]

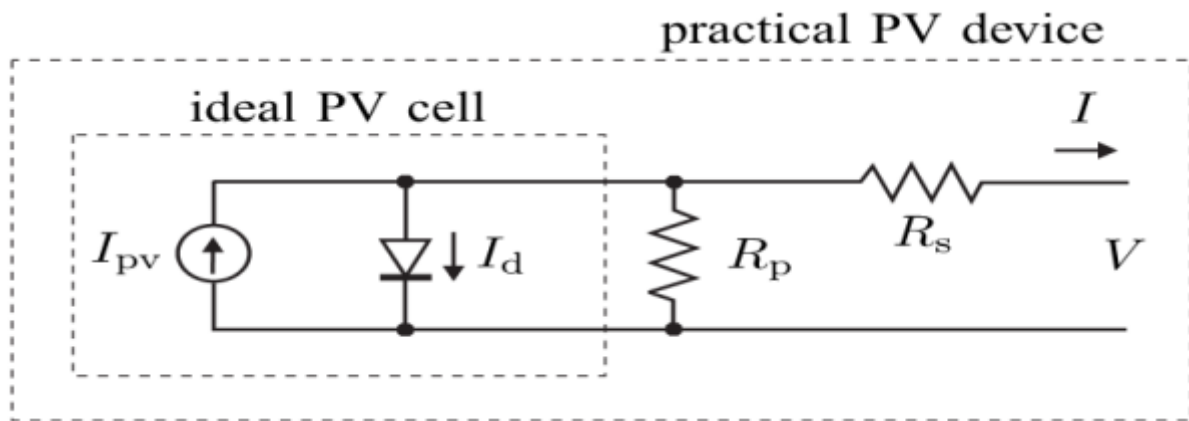


Figure 6 Schéma équivalent d'une cellule réelle

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple.

On exprime le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque sous la forme mathématique suivante :

$$I = I_{pv} - I_d - I_p \quad (II.2)$$

I : Courant générer par la cellule photovoltaïque ;

I_{pv} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) ;

I_d : Le courant circulant dans la diode.

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (II.3)$$

$$I_d = I_{0,cell} [\exp(\frac{qV}{aKT}) - 1] \quad (II.4)$$

$$I_0 = I_{0,n} \left(\frac{T_n}{T}\right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{aK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right) \right] \quad (II.5)$$

$$I_{0,n} = \frac{I_{cc,n}}{\exp\left(\frac{V_{co,n}}{aV_{t,n}}\right) - 1} \quad (II.6)$$

$$R_p = V_{ppm}(V_{ppm} + I_{ppm}R_s) / \{V_{ppm}I_{pv} - V_{ppm}I_0 \exp \left[\frac{(V_{ppm} + I_{ppm}R_s)}{N_s a} * \frac{q}{KT} \right] + V_{ppm}I_0 - p_{max,e} \} \quad (II.7)$$

$$I_{pv,n} = \frac{R_s + R_p}{R_p} I_{cc,n} \quad (II.8)$$

$$R_{p,Min} = \frac{V_{ppm}}{I_{cc,n} - I_{ppm}} - \frac{V_{co,n} - V_{ppm}}{I_{ppm}} \quad (II.9)$$

$I_{0,n}$: est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence T_n et l'éclairement de référence ;

T : Température de la jonction des cellules PV [°K] ;

T_n : Température de référence des cellules PV [°K] ;

a : facteur d'idéalité de la jonction ;

E_g : Énergie de gap [ev] ;

R_s : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules ;

V : La tension de sortie ;

I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p ;

R_p : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés Les résistances. [15]

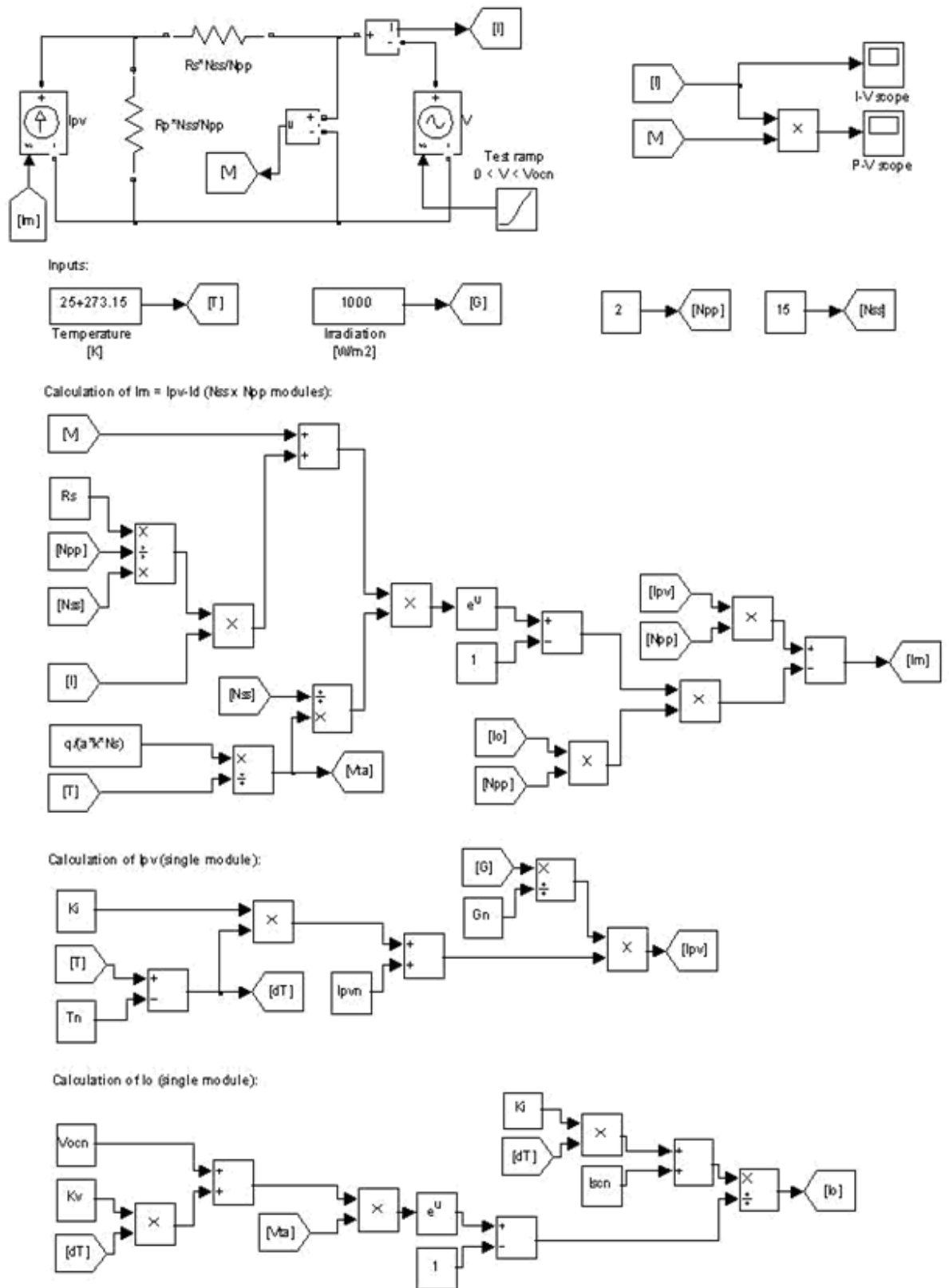


Figure 7 Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle

Présentation du module KYOCERA KC200GT

Les paramètres du module	La valeur de chaque paramètre
Le nombre des cellules en séries N_s	54
La tension maximale $V_{ppm}(V)$	26,3
La tension en circuit ouvert $V_{co}(V)$	32,9
Le courant maximal $I_{PPM}(A)$	7,61
Le courant de court-circuit $I_{cc}(A)$	8,21

Tableau 2 Valeurs des paramètres de simulation

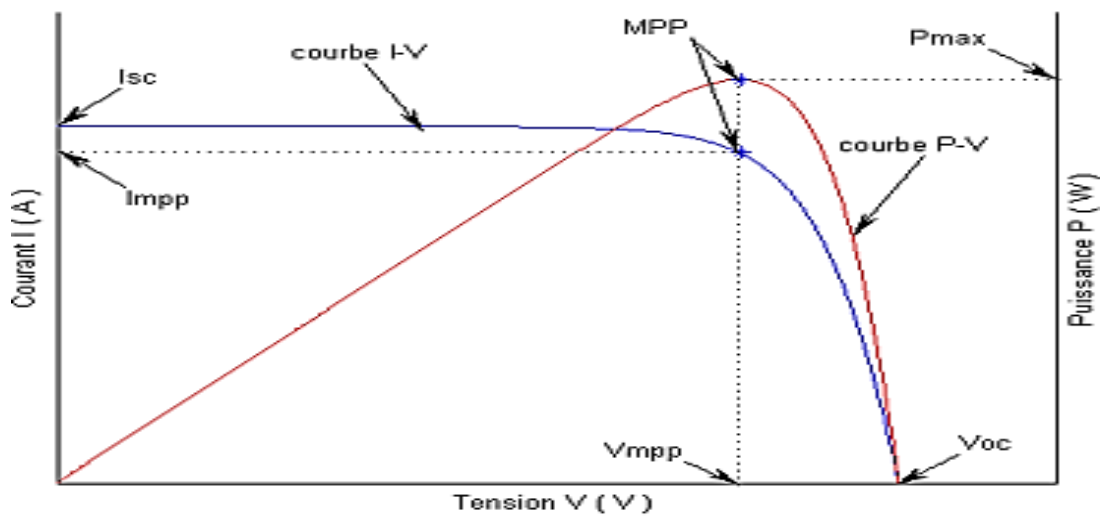


Figure 8 caractéristique I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque

Dans cette figure (Figure 8), il y a trois points remarquables :

Le point de court-circuit ($0, I_{cc}$) : (c.à.d. le point où la courbe I-V rencontre l'axe de courant), où I_{cc} est le courant de court-circuit qui peut être captée en connectant les bornes positive et négative de modules PV. Elle est la plus grande valeur de courant généré lorsque la tension est nulle ($V=0$).

Le point de circuit ouvert ($V_{co}, 0$) : (c.à.d. le point où la courbe I-V rencontre l'axe de tension). Où V_{co} est la tension de circuit ouvert du module PV. Il reflète la tension du module en obscurité. Dans ce cas, aucun courant n'est généré ($I=0$).

Le point de puissance maximale, PPM (V_{ppm}, I_{ppm}) : dans ce cas, on dit que le module PV fonctionne avec une efficacité optimale et fournit sa puissance maximale (P_{max}) donnée par :

$$P_{max} = V_{ppm} I_{ppm} \tag{II.10}$$

Avec I_{ppm} et V_{ppm} sont respectivement les valeurs optimales du courant et de la tension du module PV.

En plus de cela, on peut définir deux paramètres importants du module PV :

Le facteur de forme (FF) : C'est le rapport de la puissance maximale générée (P_{max})

au produit $I_{CC} \cdot V_{CO}$

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{CO} I_{CC}} = \frac{I_{ppm} V_{ppm}}{V_{CO} I_{CC}} \quad (II.11)$$

Pour les cellules ayant un rendement moyen, FF a des valeurs de l'ordre de 0.7 à 0.85.

Le rendement de conversion : Le rendement de conversion : C'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance de rayonnement incident (G) sur la surface (S) du module PV. [16]

$$= \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{ppm} V_{ppm}}{S \cdot G} = \frac{V_{CO} I_{CC} FF}{S \cdot G} \quad (II.12)$$

II.2. Influence de l'Éclairement

En faisant varier l'éclairement entre 400 w/m² et 1000 w/m² avec un pas de 200, la caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$) est donnée par les figures (9). On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

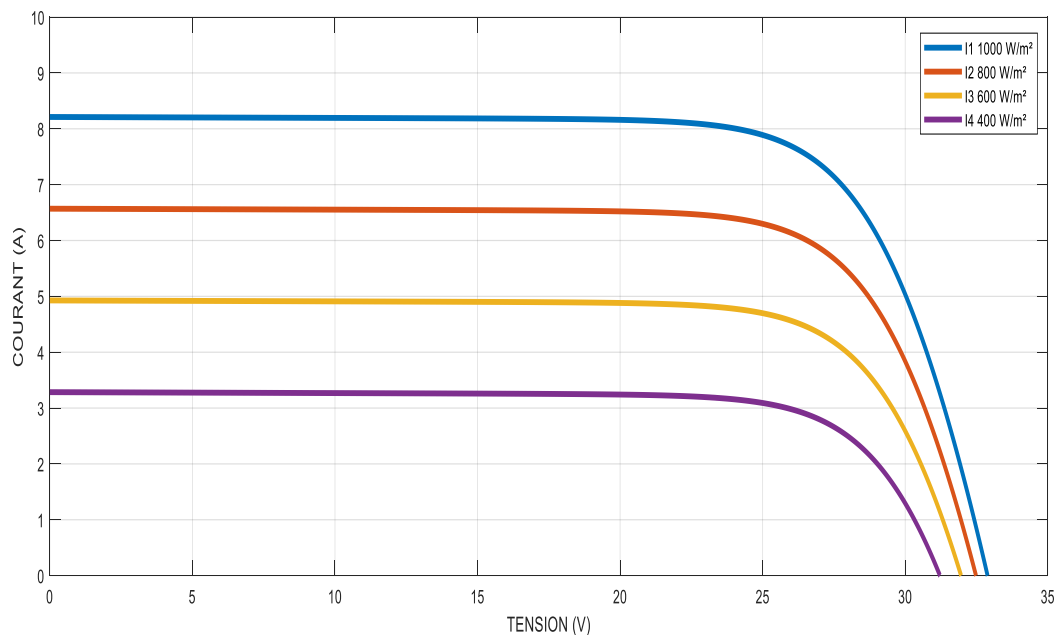


Figure 9 caractéristique I-V (influence de l'Éclairement)

II.3. Influence de la température

La température a une grande influence sur les performances de la cellule. Cet effet se traduit principalement par une diminution de la tension générée (et une très légère augmentation du courant). Selon les modèles, ce comportement a entraîné une perte de rendement de 0,5% par rapport au rendement maximum de la cellule.

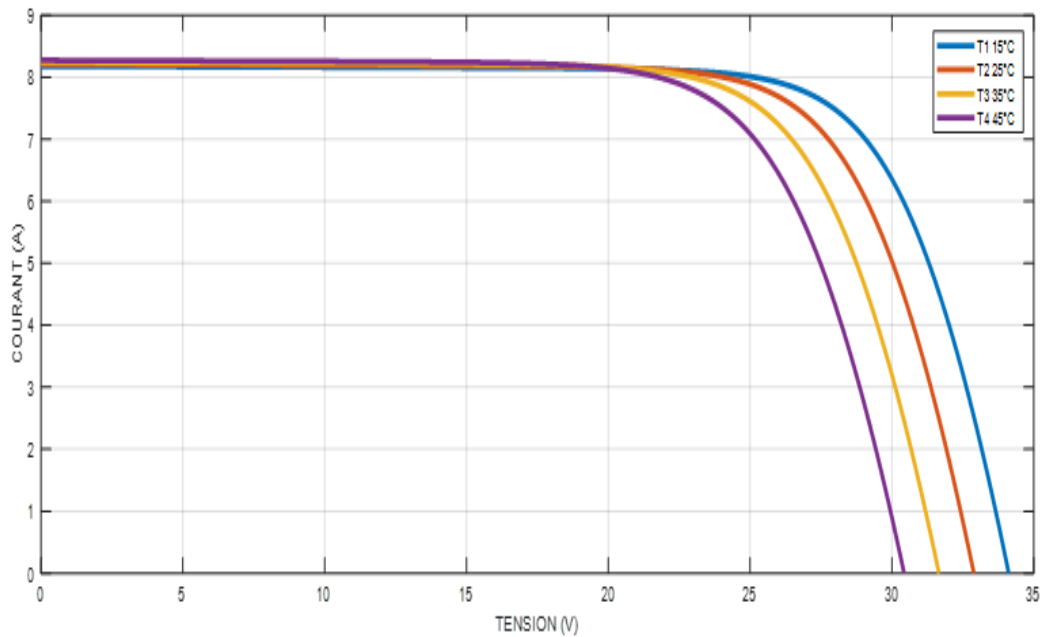


Figure 10 caractéristique I-V (influence de la température)

La perte de tension d'un module ou d'une cellule peut être estimée par la formule suivante :

$$U(T^{\circ}) = U(25^{\circ}C) + (\Delta T^{\circ} * \alpha) \quad (II.13)$$

Avec

ΔT : augmentation de température par rapport aux conditions STC (25°C)

α : coefficient de température V_{co} [mV/K], valeur fournie par le fabricant

II.4. Influence de la résistance série

Le principal impact de la résistance série est de réduire le facteur de remplissage, bien que des valeurs trop élevées puissent également réduire le courant de court-circuit.

La figure ce dessous montre cette influence :

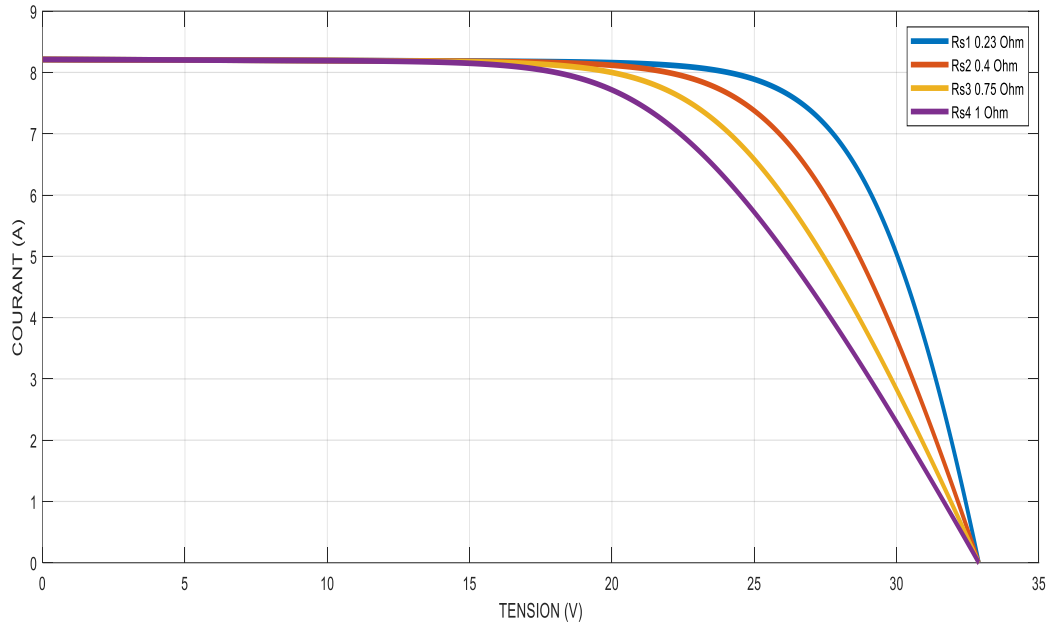


Figure 11 caractéristique I-V (influence de la résistance série)

II.5. Influence de la résistance parallèle

La résistance parallèle R_p influe légèrement sur la tension en circuit ouvert V_{co} , les figures ces dessous montrent cette influence [2] :

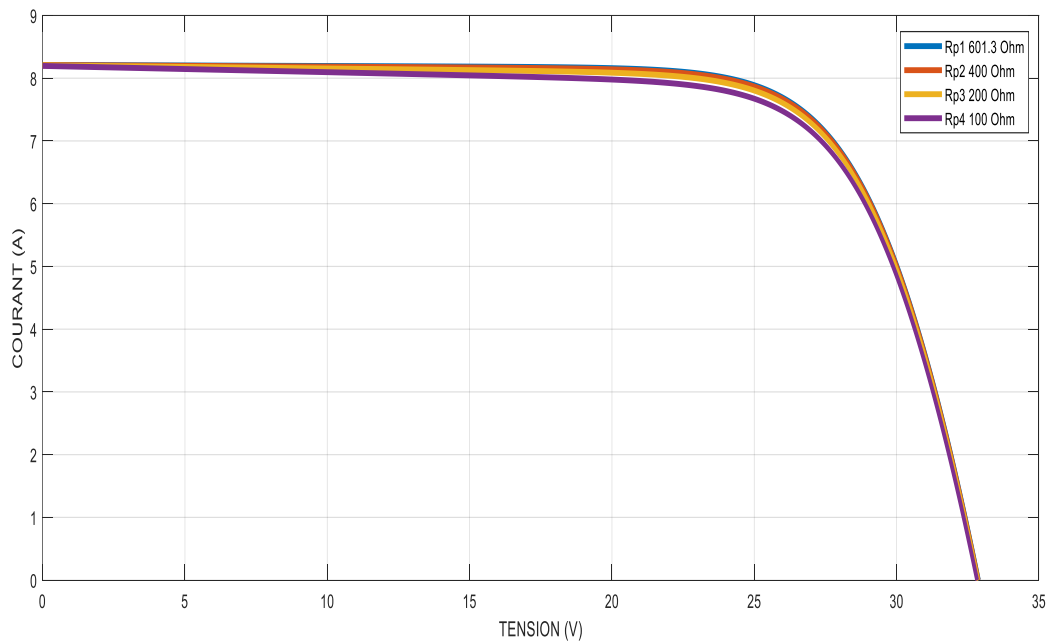


Figure 12 caractéristique I-V (influence de la résistance parallèle)

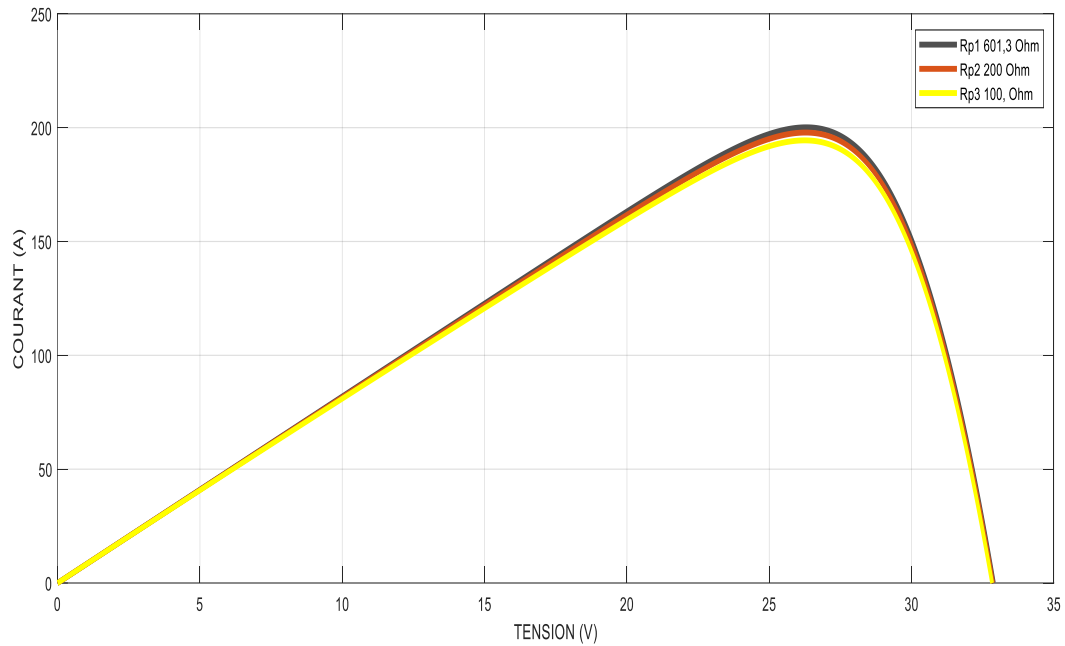


Figure 13 caractéristique P-V (influence de la résistance parallèle)

II.6. Association des Cellules Photovoltaïques

Un générateur photovoltaïque est un ensemble des cellules photovoltaïques misent en séries et en parallèles dont le but est d'augmenter le courant et la tension générer c'est-à-dire la puissance générer. [17]

II.6.1 Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle

La mise en parallèle sert à augmenter la valeur du courant généré par le panneau, Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules. [17]

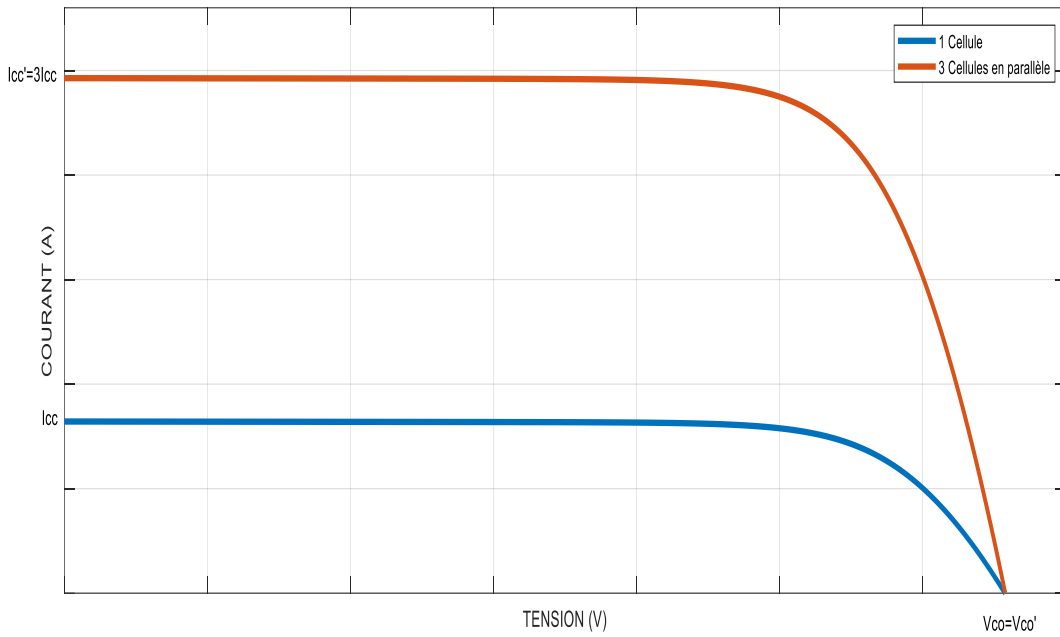


Figure 14 caractéristique I-V (trois cellules photovoltaïque raccordée en parallèle)

II.6.2 Association des Cellules Photovoltaïques en série

La mise en série sert à augmenter la valeur de la tension générée par le panneau, Par association en série, les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules. [17]

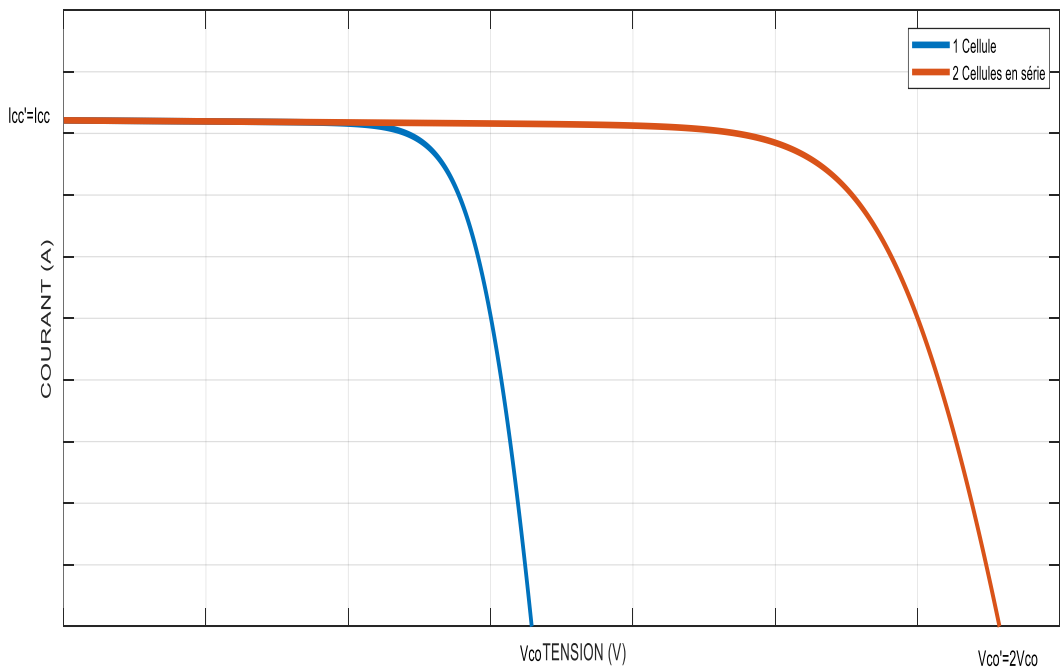


Figure 15 caractéristique I-V (deux cellules photovoltaïque raccordée en série)

II.6.3 Association des Cellules Photovoltaïques en mixte

Certaines applications électriques nécessitent une augmentation de la valeur de la tension et du courant délivrés par les cellules solaires, la solution est de faire une association série-parallèle (association mixte). On parlera dans ce cas de module et de panneaux solaires. [18]

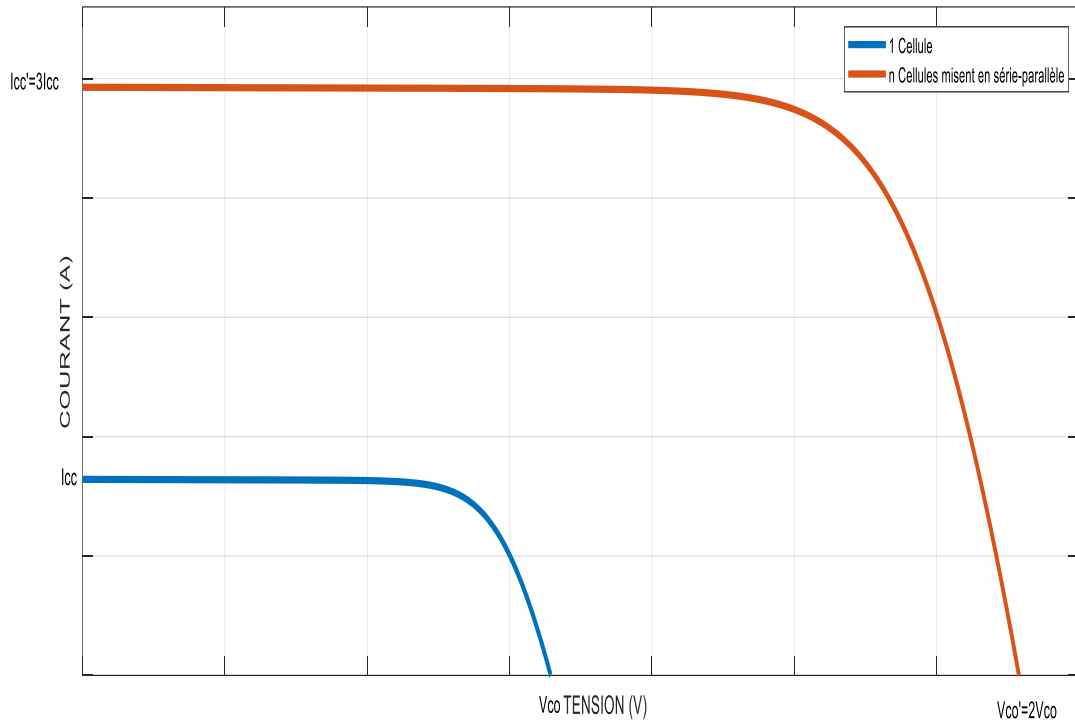


Figure 16 caractéristique I-V (plusieurs cellules photovoltaïques raccordées en série-parallèle)

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'un élément essentiel du système photovoltaïque qui est la cellule photovoltaïque et le générateur PV, ses caractéristiques et ses performances. Ainsi, l'influence de quelques paramètres sur ces caractéristiques telles que l'éclairement et la température. Pour le fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge ou un autre système que nous allons l'étudier dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

Convertisseur DC-DC et les techniques de la commande MPPT

Introduction

L'inconvénient majeur de l'énergie photovoltaïque est son faible rendement. En plus, la caractéristique de la puissance d'un panneau photovoltaïque (PPV) n'est pas linéaire en fonction de la tension à ses bornes, dont elle est maximale pour un point, c'est le point de puissance maximale (PPM), il est donc très important de faire fonctionner le panneau PV autour du PPM pour profiter du maximum de la conversion énergétique [19]. Alors une des stratégies pour obtenir un fonctionnement optimal s'appelle la méthode de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Pour cela, de nombreux chercheurs se concentrent sur ces algorithmes MPPT pour extraire la puissance maximale dans des conditions climatiques différentes, en particulier lorsque la température et l'éclairement solaire changent de façon soudaine. Sur la base de l'algorithme de commande, qui peut-être plus ou moins compliquée, ces méthodes de MPPT proposées peuvent être classées en méthodes classiques, intelligents et évolutionnaires

En général, la poursuite du point de puissance maximum PPM d'un système PV dépend de l'algorithme MPPT et du circuit de commande. Ce circuit fait appel un hacheur DC-DC qui est considéré comme une résistance variable dont la commande, est basée généralement sur l'ajustement du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le PPM

Pour cela, dans ce chapitre nous présenterons d'abord l'ensemble hacheur système de commande, et nous étudions le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, à savoir après rechercher le point de puissance maximale (MPPT). [3]

III.1 Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale

La conception de systèmes photovoltaïques optimisés doit prendre en compte la nature même de la source. Pour un générateur photovoltaïque (PV), l'éclairement, la température, et aussi le vieillissement global du système font varier la production de puissance. Il faut donc arriver à concilier ces comportements avec ceux propres à une charge, qu'elle que soit de nature continue (DC) comme des batteries ou bien alternative (AC) comme le réseau électrique 240V/50Hz. Dans ces conditions, un point de fonctionnement correspondant à l'intersection des deux caractéristiques électriques doit exister pour qu'une connexion source- charge soit possible. Pour mieux comprendre ceci, prenons le cas d'une connexion directe entre un panneau PV et une charge résistive R [20],

comme illustré dans la figure (17). Introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge est la solution communément adoptée pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, Ainsi, le générateur est alors susceptible de délivrer sa puissance maximale. [21]

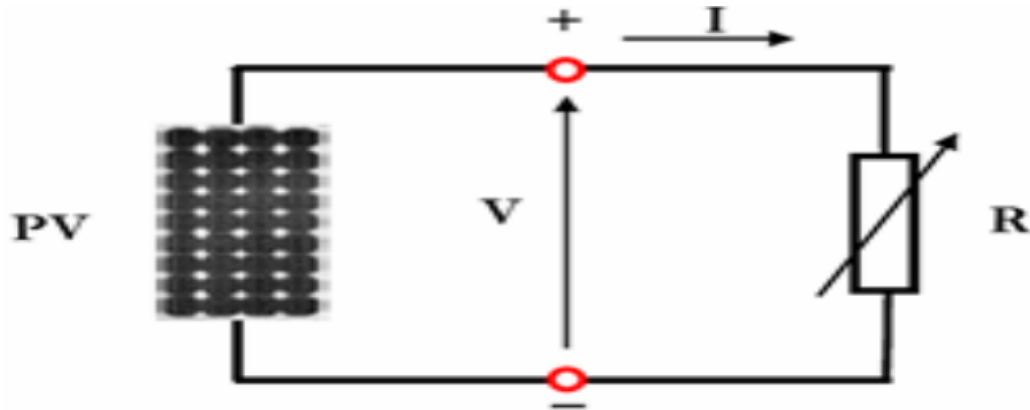


Figure 17 Connexion directe d'un panneau photovoltaïque (PV) – charge.

III.2 Étage d'adaptation

A. Représentation

Pour bien comprendre ce terme, on suppose que la nature de la charge est continue. On présente ainsi dans la figure (18) les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un générateur photovoltaïque et les caractéristiques $I(V)$ des trois types de charge.

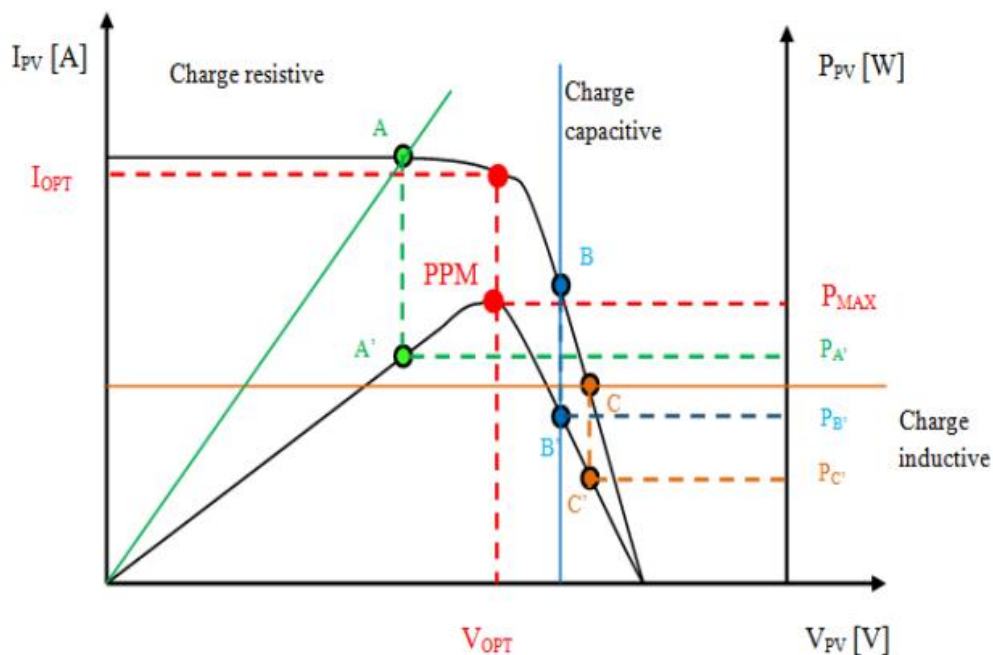


Figure 18 Points de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque avec différents types de charges en connexion directe.

Les points, P_a, P_b, P_c les puissances fournies par le générateur, correspondent à des valeurs inférieures à la puissance maximale disponible.

Alors, un étage d'adaptation est utilisé comme interface entre les deux éléments afin d'extraire cette puissance maximale avec un rendement de conversion très élevé et de la transférer aisément à la charge. Cet étage est décrit dans la figure (19). [22] – [3]

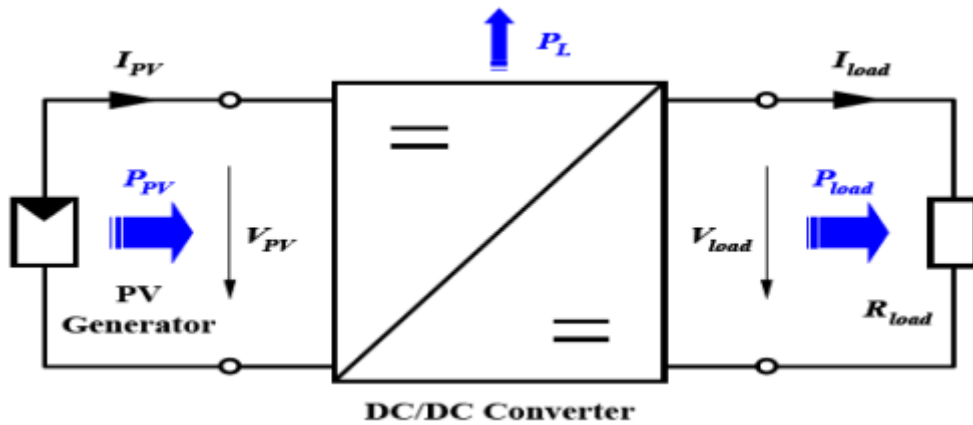


Figure 19 Etage d'adaptation.

B. Les hacheurs

Les hacheurs sont les convertisseurs statiques qui permettent le transfert de l'énergie électrique d'une source continue vers une autre source continue, Ils sont composés essentiellement d'un interrupteur K (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode D afin de contrôler le transfert et l'écoulement de l'énergie entre les panneaux solaires et la charge aussi ils sont utilisés comme une interface d'adaptation qui assure la poursuite du point de puissance maximale selon des stratégies de contrôle spécifiques. [23]

C. Type des hacheurs

Les convertisseurs DC-DC sont classés en deux types : les convertisseurs isolés de la source comme le convertisseur « Flyback » et les convertisseurs non isolés de la source. Dans ce chapitre on va s'intéresser par les convertisseurs non isolés de la source. [3]

1. Les convertisseurs non isolés de la source

Il existe quatre configurations de base :

- **Convertisseur abaisseur « BUCK »**

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage et à blocage commandes (transistor bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et un interrupteur a blocage et amorçage spontanés (diode).

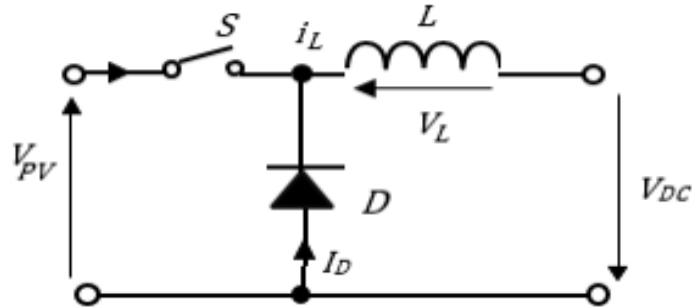


Figure 20 Convertisseur buck (abaisseur)

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage ($T = 1/f$), comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le transistor passant et la diode, polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à αT , avec α compris entre 0 et 1 lors de la seconde, on bloque le transistor la diode devient passante. Cette phase dure de αT à T ; α est appel rapport cyclique. [23]

La valeur moyenne de la tension de sortie :

$$V_{DC} = \alpha V_{PV} \quad (III.1)$$

- **Convertisseur élévateur « BOOST »**

Le hacheur quand va utiliser dans ce mémoire est fait partie de la famille des convertisseurs continu/continu. Dans cet hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Ce convertisseur est utilisé dans les alimentations à découpage quand la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée, Cette structure demande un interrupteur commande à l'amorçage et au blocage (bipolaire, MOS, IGBT...) et une diode (amorçage et blocage spontanés) et une inductance.

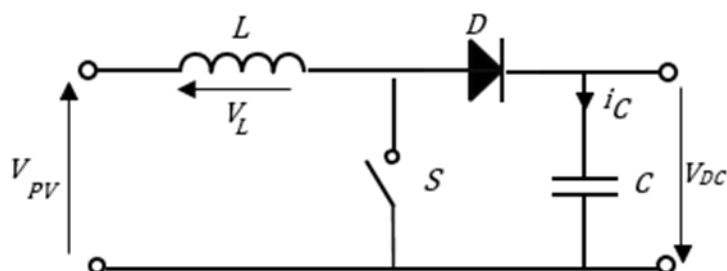


Figure 21 Convertisseur boost (élevateur)

Dans la phase qui dure de 0 à αT , l'interrupteur commandé est fermé, la tension à ses bornes est nulle. La source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée et le courant dans l'inductance croît linéairement.

Pour la seconde phase, de αT à T , on ouvre l'interrupteur commandé et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode qui devient passante. [24]

La valeur moyenne de la tension de sortie :

$$V_{PV} = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_{DC} \quad (III.2)$$

- **Convertisseur abaisseur- élevateur « BUCK-BOOST »**

Ce convertisseur statique permet d'avoir une tension continue variable supérieure ou inférieure à la tension d'entrée qui est fixe. Lors de la première phase de conduction, de 0 à αT , l'interrupteur commandé est fermé. La diode n'est pas passante et l'inductance stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée. Lors de la seconde phase, de αT à T , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. L'inductance restitue son énergie à la charge. En conduction continue et sachant que la valeur moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, on a :

$$V_{PV} \alpha T = V_{DC} (1 - \alpha) T \quad (III.3)$$

$$V_{DC} = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_{PV} \quad (III.4)$$

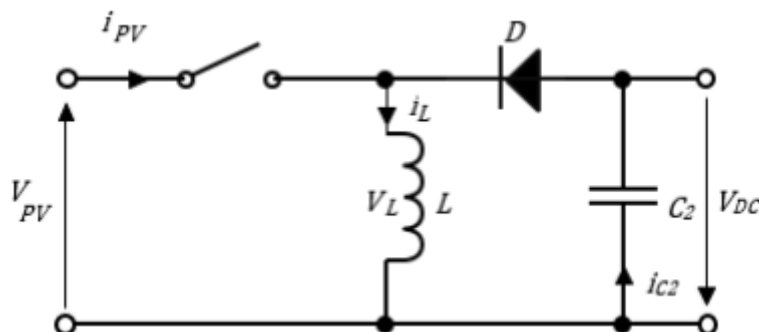


Figure 22 Convertisseur buck-boost

- Lorsque $\alpha > 0.5$, le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost (élevateur).

• Lorsque $\alpha < 0.5$, le hacheur buck-boost fonctionne comme un hacheur buck (abaisseur). [24]

• **Convertisseur Çuk**

Un convertisseur Çuk utilise un condensateur pour stocker l'énergie. Le convertisseur Çuk tient son nom de son inventeur ; et le premier à décrire cette topologie. Le Çuk est constitué de deux inductances, de deux condensateurs, d'un interrupteur (généralement un transistor) et d'une diode. Le schéma de base d'un convertisseur Çuk est représenté par la figure (23). Un inconvénient subsiste concernant l'inversion du signe de la tension de sortie par rapport à celle de l'entrée. Par sa structure, le convertisseur Çuk peut travailler avec des tensions de sortie plus petites ou plus grandes que la tension d'entrée. Le fonctionnement de base d'un convertisseur Çuk en mode de conduction continue est l'objet de cette section. En régime permanent, les tensions moyennes des inductances sont nulles, ainsi en appliquant la loi des mailles autour de la boucle extérieure du circuit représenté sur la figure

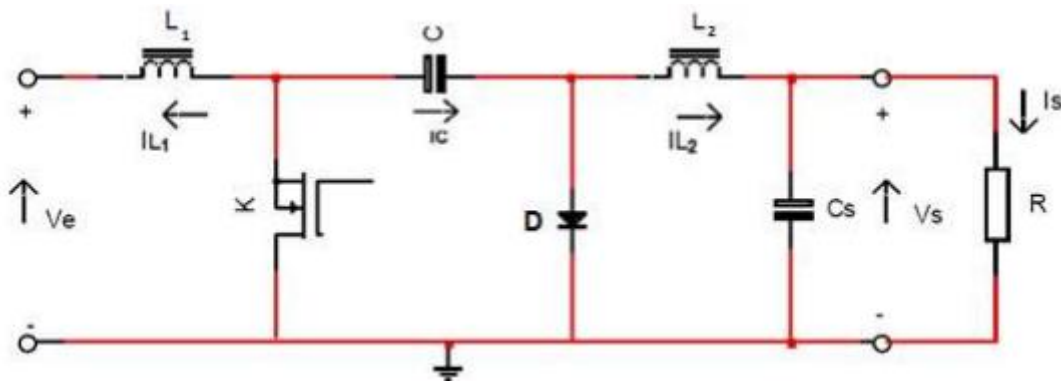


Figure 23 Convertisseur cuk

Le circuit est alimenté par une source de tension V_e , la sortie est chargée par une résistance R et débite un courant I_s . L'interrupteur K , symbolisé ici comme un MOSFET de puissance, est rendu périodiquement conducteur avec un rapport cyclique α à la fréquence $F = 1/T$. On distingue deux modes de fonctionnement de ce circuit selon que le courant circulant dans l'inductance L est ou non continu (ne s'annule pas au cours de la période). Le mode conduction continue étant le plus intéressant pour ce convertisseur, nous n'étudierons que ce mode. [24]

D. Analyse et choix du convertisseur

Un panneau solaire PV est un générateur d'électricité continu basse tension. Il est préférable de mettre un dispositif élévateur de tension comme étage adaptateur d'impédance entre la

source et la charge. Tous les convertisseurs cités précédemment excepté le Buck, peuvent jouer ce rôle d'élévateur de tension. D'ailleurs, les structures Buck-Boost, Cuk sont élévatrices pour un rapport cyclique supérieur à un demi. Si on regarde à la complexité des structures, le Boost est le plus simple. Les contraintes en tension et en courant sur les interrupteurs et les diodes sont presque similaires pour les différentes topologies élévatrices. [22]

III.3 commande MPPT

III.3.1 Principe de la recherche du point de puissance maximal

La chaîne de puissance d'un GPV ou il alimente une charge DC à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT peut être représentée comme indiquée sur la figure (24). Le rapport cyclique du CS est varié par la commande MPPT de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit la puissance maximale disponible à ses bornes. Comme nous avons cité avant (dans l'introduction), l'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du CS (I_{PV} et V_{PV}). Un bilan sur les différents types d'algorithmes MPPT est présenté, dans la section suivante. [3]

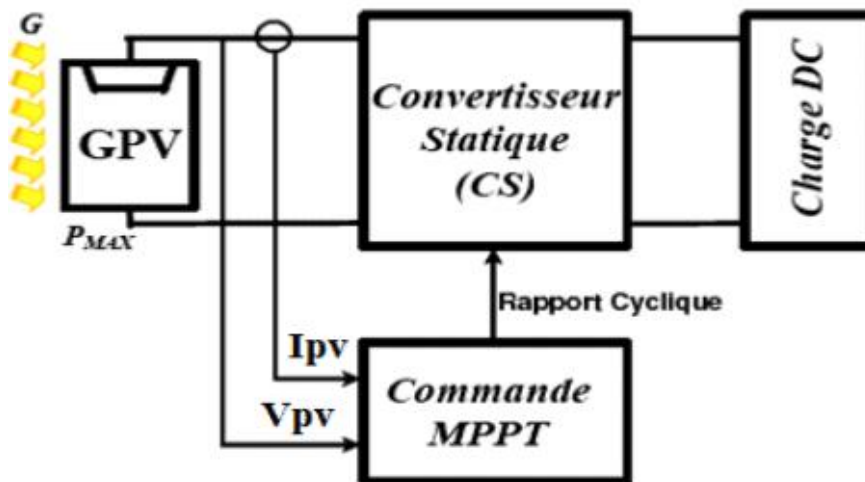


Figure 24 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge DC

III.3.2 Techniques de commandes (Classification)

Les techniques MPPT sont apparues depuis 1968 en commençant par les applications spatiales, on peut trouver actuellement dans la littérature scientifique plus d'une vingtaine de

méthodes MPPT. Ces techniques varient dans la complexité, la rapidité, la robustesse, et la stabilité. Dans ce qui suit on présente les méthodes les plus utilisées. En outre, les méthodes MPPT peuvent être classées en méthodes conventionnelles, intelligentes et évolutionnaires. [19]

III.3.3 Méthodes classiques de commande MPPT

A. Introduction des méthodes classiques en particulier P&O et IncCond

Les principaux avantages de ces deux méthodes sont leurs compatibilités avec n'importe quel générateur PV, elles ne nécessitent pas d'informations sur le générateur PV, et sont simples à implémenter sur un contrôleur numérique. En plus, il est possible d'intégrer ces méthodes dans des onduleurs commerciaux. Ces méthodes sont basées sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance $P_v = f(V_p)$ obtenue directement de la caractéristique du (PV).

Le point de puissance maximale (PPM) est obtenu lorsque la dérivée de la puissance par rapport à la tension s'annule, c'est-à-dire, lorsque $\frac{dP_v}{dV_p} = 0$. [3]

B. Algorithme Hill Climbing

La technique Hill Climbing (HC) est une méthode mathématique d'optimisation. Comme son nom l'indique, elle fait monter le point de fonctionnement le long d'une caractéristique pour atteindre le maximum de la fonction puissance du GPV contre le rapport cyclique du convertisseur α (Figure (25)). La perturbation est appliquée pour plusieurs itérations sur le paramètre α en l'incrémentant ou en le décrémentant de $\Delta\alpha$ jusqu'à avoir la dérivée $dP/d\alpha$ nulle. La figure (26) présente l'algorithme d'exécution de cette technique. La méthode HC est plus simple à mise en œuvre car elle possède une seule boucle de régulation. Cependant, elle présente des oscillations et peut même diverger lors du changement rapide des conditions atmosphériques. [25] – [26]

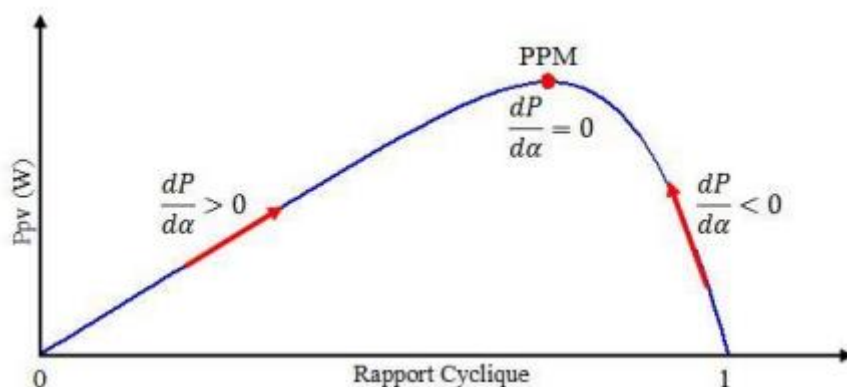


Figure 25 Caractéristique de fonctionnement de la méthode Hill-climbing

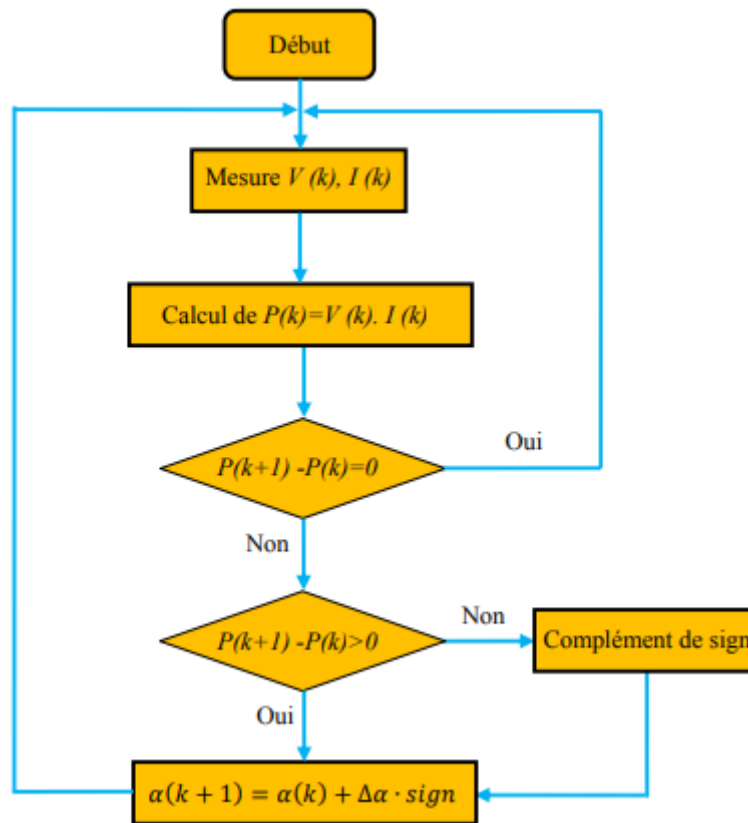


Figure 26 Organigramme de la méthode Hill-Climbing

C. Algorithme perturbation et observation (P and O simple)

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie de panneau. La figure (27) donne l'organigramme de cet algorithme.

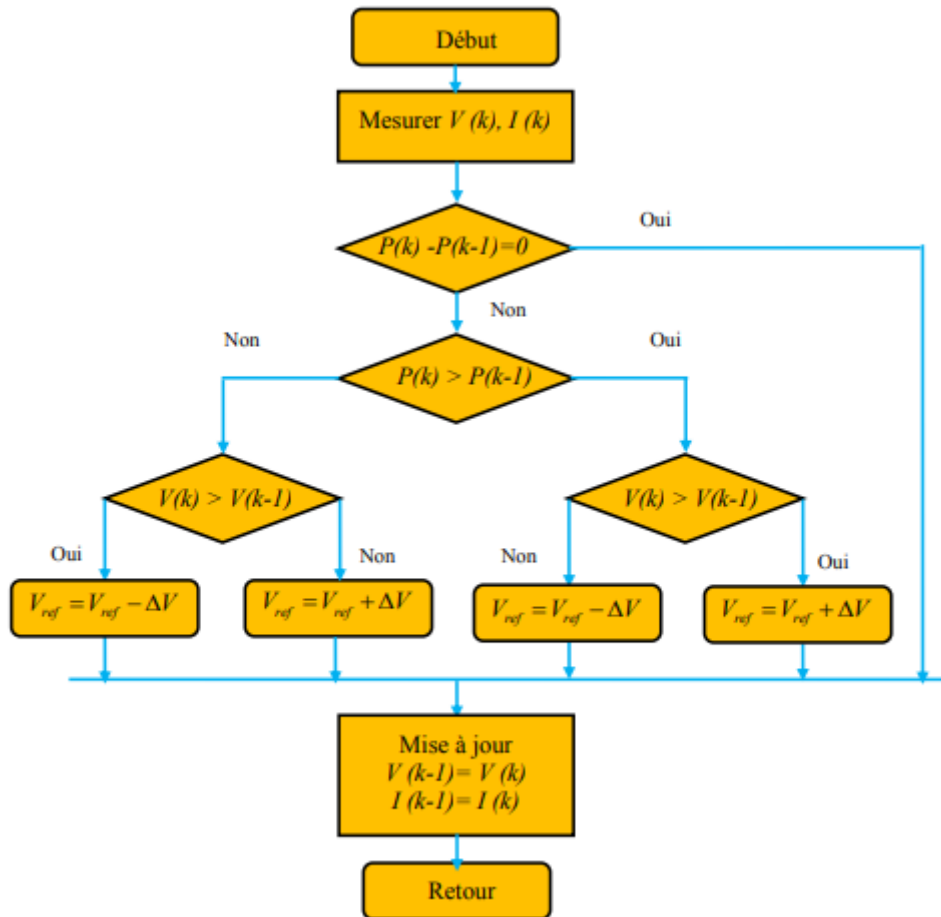


Figure 27 Organigramme de la méthode P&O

Le point de puissance maximale (PPM) est présenté dans la figure suivante :

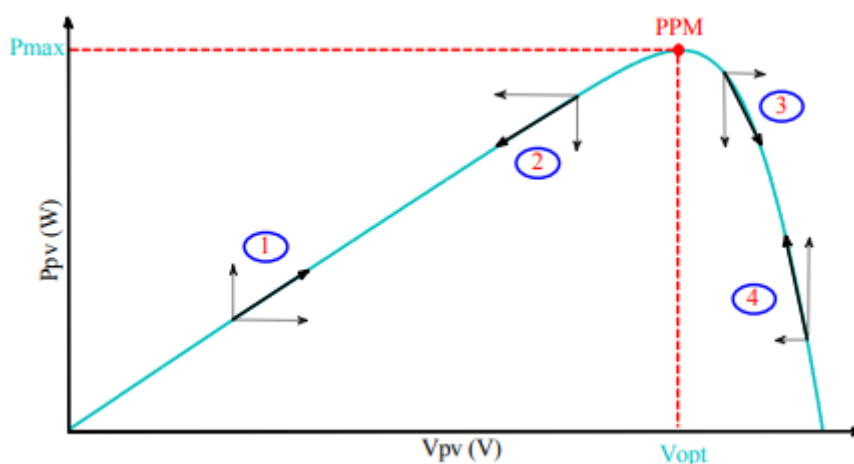


Figure 28 Caractéristique P-V de fonctionnement de la méthode P&O

Un inconvénient de la méthode de P&O est décrit par Hussein et Ali, Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du

panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui l'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance. [27] - [22]

D. Méthode par incrémentation de conductance

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro [28]. Ceci peut être décrit par les équations suivantes :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV} \cdot I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \quad (III.5)$$

$$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \quad (III.6)$$

Le $\frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ terme représente l'opposé de la conductibilité instantanée du panneau photovoltaïque,

$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}$: représente le terme d'incrément de conductance.

Par conséquent, pour le point de puissance maximum (PPM), ces deux termes peuvent être égaux mais de signes opposés. Si le point de fonctionnement ne coïncide pas avec le point (PPM), l'inégalité de l'équation indique la position de la tension de fonctionnement si elle est plus grande ou inférieure à la tension du point de puissance maximum (PPM). [29]

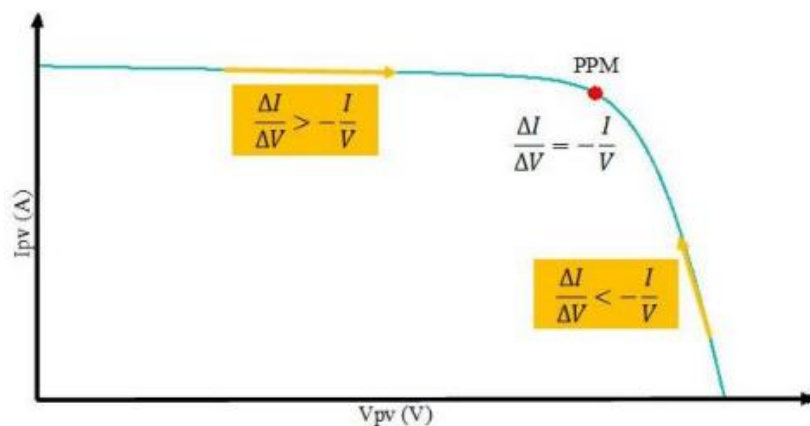


Figure 29 Caractéristique I-V de fonctionnement de la méthode incrémentation de conductance

$$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}, \left(\frac{dP}{dV} = 0\right) \quad (III.7)$$

$$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} > -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}, \left(\frac{dP}{dV} > 0\right) \quad (III.8)$$

$$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} < -\frac{I_{PV}}{V_{PV}}, \left(\frac{dP}{dV} < 0\right) \quad (III.9)$$

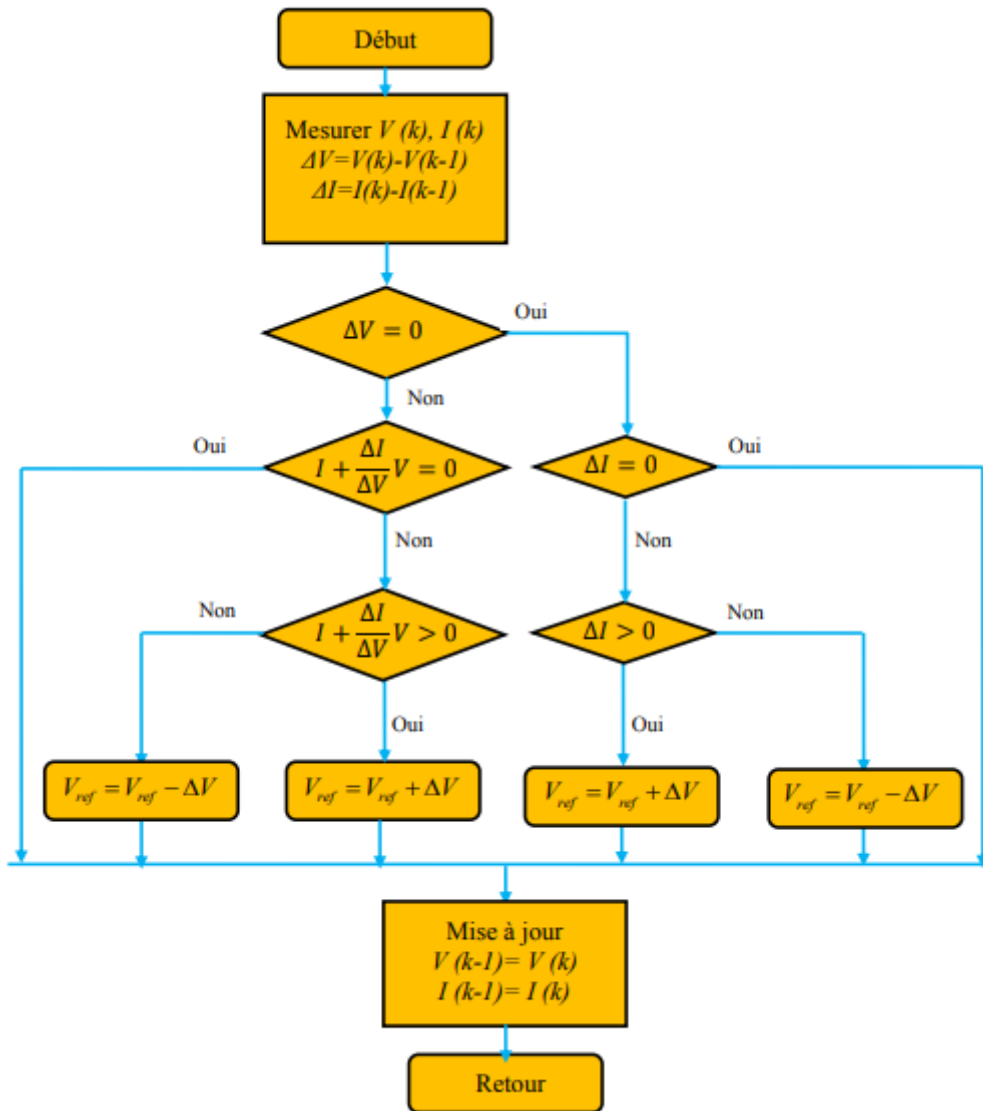


Figure 30 Organigramme de la méthode incrémentation de conductance

III.3.4 Méthodes intelligentes de commande

A. Introduction des techniques intelligentes

Les techniques intelligentes (méthodes à base de la logique floue (FL) et des réseaux de neurones artificiels (RNA)) sont plus efficaces. Elles ont une réponse rapide, mais elles sont

plus complexes par rapport aux techniques classiques qui sont généralement simples, pas chers et moins efficaces. [3]

B. MPPT par la logique floue

Le contrôleur flou comporte les trois blocs suivants : Fuzzification des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions trapèze et triangulaire, ensuite l'inférence où ces variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis pour déterminer la réponse appropriée. Et enfin la défuzzification pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs en utilisant la défuzzification cent roide. La structure de base de notre contrôleur flou est donnée par la figure suivante :

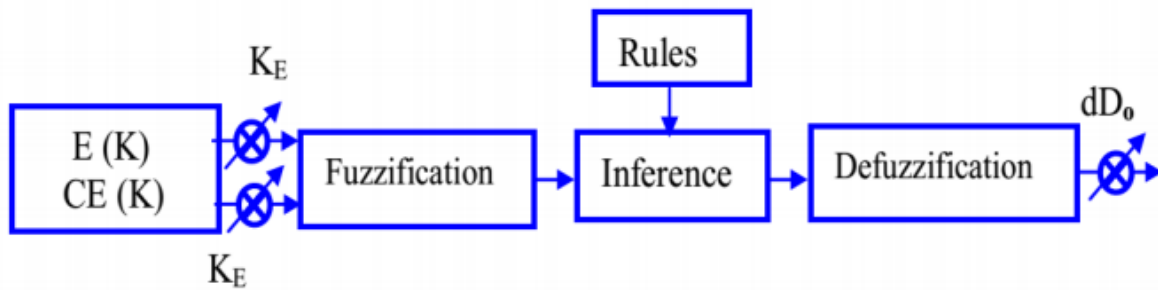


Figure 31 schéma explicatif de la méthode de la logique floue

Calcul de la variation de la commande dD en suivant les étapes suivantes:

- **Fuzzification**

La commande est déterminée sur la base de la satisfaction de deux critères concernant deux variables d'entrées de contrôleur proposé, à savoir l'erreur(E) et le changement d'erreur(CE), à un instant d'échantillonnage k . Les variables E et là CE sont exprimés comme suit :

$$E(k) = \frac{P(k)-P(k-1)}{V(k)-V(k-1)} \quad (III.10)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (III.11)$$

Où $P(k)$ et $V(k)$ sont la puissance et la tension de module PV, respectivement. Par conséquent, $E(k)$ est zéro au point de puissance maximale du module PV. Ces variables d'entrée sont exprimées en termes de variables ou étiquettes linguistiques telles que le GP (grand positif), PP (petit positif), Z0 (zéro), PN (petit négatif), GN (grands négatifs) en employant les sous-ensembles flous de base.

• **Méthode d'inférence**

Le tableau III.1 montre les règles du contrôleur flou, où toutes les entrées de la matrice sont les ensembles flous de l'erreur (E), le changement de l'erreur (CE) et le changement du rapport cyclique ($dD = \alpha$) au convertisseur. Dans le cas de la commande floue, la règle de la commande doit être conçue pour que la variable d'entrée E doive toujours être zéro

		NB	NS	ZE	PS	PB
E(k)	CE(k)					
NB		ZE	ZE	PB	PB	PB
NS		ZE	ZE	PB	PB	PB
ZE		PS	ZE	ZE	ZE	NS
PS		NS	NS	NS	ZE	ZE
PB		NB	NB	NB	ZE	ZE

Tableau 3 Table de règles à cinq classes (matrice d'inférences)

• **Défuzzification**

La défuzzification peut être fonctionné normalement par deux algorithmes

- La méthode de critère maximale (MCM).
- La méthode Centre une gravité. [30]

C. MPPT par les réseaux de neurones

• **Généralités sur les réseaux de neurones artificiels**

Un réseau de neurones artificiels est un système informatique s'inspirant du fonctionnement du cerveau humain. Il se compose des neurones artificiels, Chaque neurone est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. Un poids (w) est associé à chacun de ces entrées représente la force de la connexion.

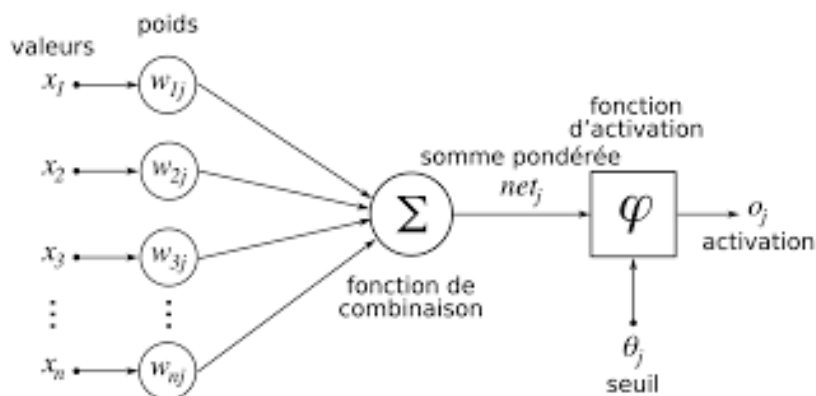


Figure 32 Architecture d'un réseau de neurones artificiel

En général, un neurone formel est un élément de traitement possédant n entrées (qui sont les entrées externes ou les sorties des autres neurones) et une seule sortie (Figure (32)). Son traitement consiste à affecter à sa sortie y_i le résultat d'une fonction de seuillage f (dite aussi la fonction d'activation). [16]

$$y_i = f(a_i) = f([\sum_{j=1}^n w_{ij} \times x_j] + b_i) \quad (\text{III.12})$$

- **Fonction d'activation**

Cette fonction permet de définir l'état interne du neurone en fonction de son entrée totale.

Il existe plusieurs types de fonction d'activation, nous citons à titre d'exemple quelques fonctions qui sont souvent utilisées :

- Fonction binaire a seuil
- Fonction linéaire
- Fonction linéaire à seuil ou multi-seuils
- Fonction sigmoïde [31]

- **Prediction du MPPT a base des RNA**

Les RNA peuvent être classés en deux grandes catégories en fonction de leurs structures de connexion : Les réseaux 'Feed-forward' (ou non-récurrents) et les réseaux "Feedback" de rétroaction (ou récurrente).

Les réseaux "feed-forward" sont le type le plus couramment utilisé, principalement en raison de la difficulté d'apprentissage des réseaux de rétroaction (feedback), malgré ce dernier sont plus appropriés pour représenter des systèmes dynamiques.

Les Perceptrons Multicouches (PMC) sont les réseaux de neurones les plus connus. Un perceptron est un réseau de neurones artificiel du type feedforward, c'est à dire à propagation directe. Dans notre cas, pour modéliser un générateur photovoltaïque, nous proposons un réseau MLP à trois couches (comme montré sur la Figure (33)) :

- La première est celle des entrées (l'irradiation G_a et la Température T_a).

- La deuxième est dite couche cachée (ou couche intermédiaire) et constitue le cœur du réseau de neurones. Ses fonctions d'activation sont du type sigmoïde (*tansig*).
 - La troisième, constituée ici par trois neurones ($V_{ppm}, I_{ppm}, P_{max}$), est la couche de sortie. Ses fonctions d'activation sont du type linéaire (*purelin*).
- [16]

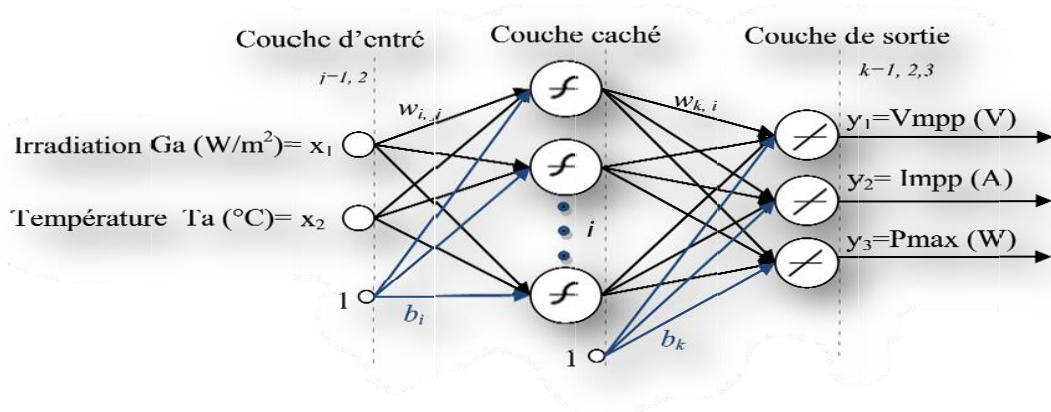


Figure 33 Architecture d'un réseau de neurones artificiel appliqués sur le photovoltaïque

D. MPPT par la Méthodologie de l'ANFIS

- **Utilisation de la Méthodologie de l'ANFIS**

Le système ANFIS est une classe de réseau adaptatif proposé par Jang. Il peut être vu comme un réseau de neurones non bouclé pour lequel chaque couche est un composant d'un système neuro-flou. Le modèle ANFIS est le modèle le plus utilisé en pratique, utilisé en poursuite de trajectoire, en approximation non linéaire, la commande dynamique et le traitement du signal

- **Architecture d'un ANFIS**

Dans un ANFIS, les connexions entre neurones sont seulement utilisées pour spécifier le sens de la propagation des stimulations provenant des autres neurones. Pour la structure d'ANFIS, elle est composée de cinq couches, et les règles de type si prémisse alors conséquent. L'ANFIS est l'un de tous premiers systèmes neuro-flou qui existent. Il est très cité dans la littérature car il a prouvé son efficacité avec son algorithme d'apprentissage simplifié : la méthode de descente de gradient et la méthode des moindres carrés.

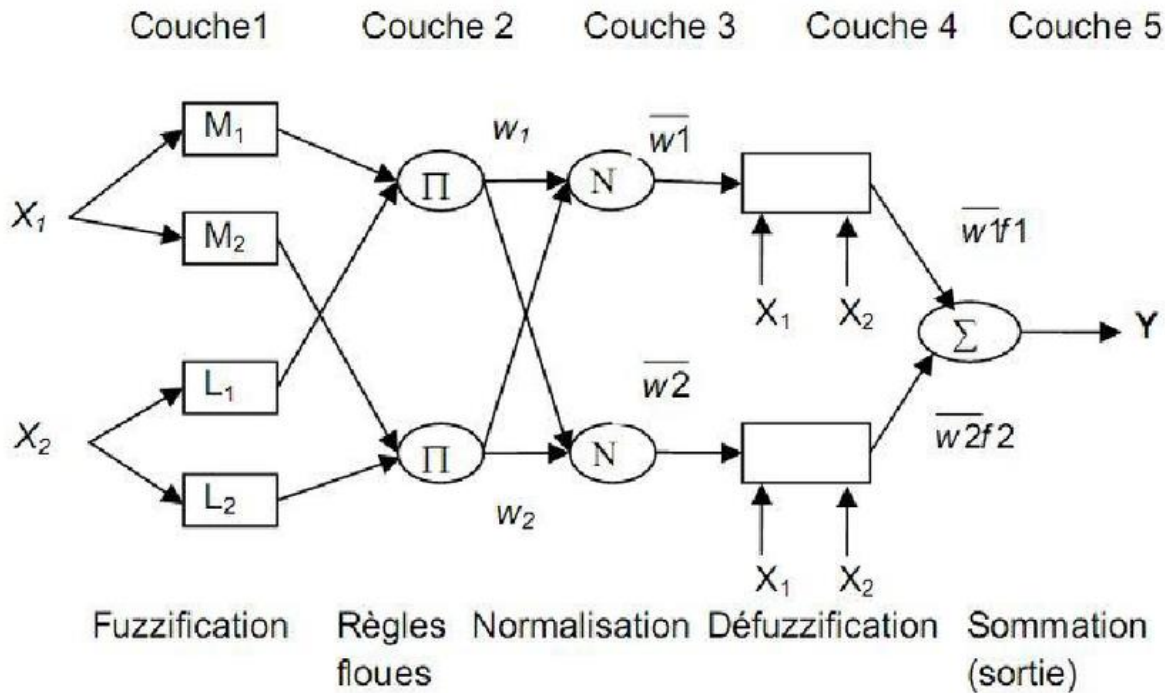


Figure 34 Architecture d'un ANFIS

- **Première Couche (fuzzification)**

C'est le passage du monde réel (une tension, un nombre, ...) à la représentation floue. Une architecture de type ANFIS comporte autant de neurones qu'il y'a de sous-ensembles flous dans le système d'inférence représenté. Chaque neurone calcule le degré de vérité d'un sous-ensemble flou particulier par sa fonction de transfert. La seule restriction sur le choix de cette fonction concerne sa dérivabilité. En retrouve dans la littérature, l'utilisation, de fonctions gaussiennes et les paramètres modifiables qui sont le centre et la pente de la gaussienne (variance).

La fonction d'activation des neurones i de la première couche :

$$f_i^1 = UA_i(x) \tag{III.13}$$

Tel que x est l'entrée au neurone i , et A_i est un sous ensemble flou correspondant au variable x . En d'autres termes, f_i^1 est la fonction d'appartenance du A_i et il indique le degré auquel donné x satisfait le quantifier A_i . Nous choisissons $\mu_{A_i}(x)$ pour être en forme de (Gaussien, triangle, trapézoïdal) avec le maximum égal à 1 et le minimum égal à 0.

- **La deuxième couche cachée (Règles floue)**

Elle exprime le déroulement de toutes les règles de description du processus qui sert à calculer le degré d'activation des prémisses. Les neurones de cette couche représentent chacun la prémisse d'une règle. Ils reçoivent en entrée le degré de vérité des différents sous-ensembles flous qui composent cette prémisse et ont en charge du calcul de son propre degré de vérité. Les fonctions d'activation utilisées pour ces neurones dépendent des opérateurs présents dans les règles (ET ou OU).

La fonction d'activation des neurones i de la première couche :

$$w_k = UA_i(x) * UB_i(x) \quad (III.14)$$

- **La troisième couche cache (normalisation)**

Les neurones N sont des neurones fixes, ils effectuent la normalisation de la valeur de vérité de la règle (poids).

$$\bar{w}_k = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2 \quad (III.15)$$

- **La quatrième couche cachée (defuzzification)**

Où se fait le passage de la représentation floue à la représentation réelle. Cette couche sert à déterminer les paramètres de la partie conséquence des règles (p, q, r) . La fonction de chaque neurone dans cette couche est la suivante :

$$f_k^4 = \bar{w}_k \times f_k = \bar{w}_k \times (p_k x + q_k y + r_k) \quad (III.16)$$

Où \bar{w}_k est la sortie de la troisième couche

Les paramètres $\{p_i, q_i, r_i\}$ sont appelés paramètres de la conséquence.

- **La couche de sortie**

Le neurone de la couche 5 est un neurone fixe, à une entrée donnée, il délivre la réponse du réseau donnée par :

$$f_i^5 = \sum_i \bar{w}_k f_k^4 \quad (III.17)$$

• **Avantages méthode ANFIS**

- Elles peuvent profiter de l'expertise humaine
- En l'absence de l'expertise humaine, leur conception peut se baser sur la réponse du système

- Elles tiennent compte des changements qui surviennent dans le processus
- Certaines architectures sont moins coûteuses que d'autres en termes d'implémentation matérielle
- La plupart de ces architectures sont évolutives. [32]

III.3.5 Méthodes évolutionnaires de commande MPPT

A. MPPT par les algorithmes génétiques :

C'est au début des années 60 que John Holland de l'Université du Michigan a commencé à s'intéresser à ce qui allait devenir les algorithmes génétiques (AGs). Ses travaux ont trouvé un premier aboutissement en 1975 avec la publication de son livre « Adaptation in Natural and Artificial System ».

C'est une méthode d'optimisation globale fournit des solutions aux problèmes n'ayant pas de solutions calculables en temps raisonnable de façon analytique ou algorithmique applicable aux systèmes linéaires et non-linéaires, fondée sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. [33]

- **Principe d'un AG :**

Le principe de fonctionnement d'un AG est assez simple ; on part d'une population d'individus (chromosomes), représentant des solutions initiales, aléatoirement générée, en appliquant les opérations de la génétique sur cette population (les parents) on arrive à engendrer une nouvelle population (descendants) et les individus les plus adaptés (solutions plus proches) seront pris pour former la population suivante, et ainsi de suite jusqu'à l'obtention de la solution optimale. [19]

- **Étapes d'un algorithme génétique :**

Les étapes d'un AG simple sont inspirées de la théorie de la reproduction naturelle. L'idée générale est d'appliquer les transformations génétiques sur une population d'individus pour arriver en fin à un individu plus adapté (optimal) [34]. Alors les étapes sont donc les suivantes :

- **Initialisation** : Une population initiale de N chromosomes est tirée aléatoirement.
- **Évaluation** : Chaque chromosome est décodé, puis évalué.
- **Sélection** : Création d'une nouvelle population par l'utilisation d'une méthode de sélection appropriée.
- **Reproduction** : Possibilité de croisement et mutation au sein de la nouvelle population.

- **Insertion** : C'est l'intégration de la nouvelle population de descendants où les individus le moins adaptés vont disparaître.

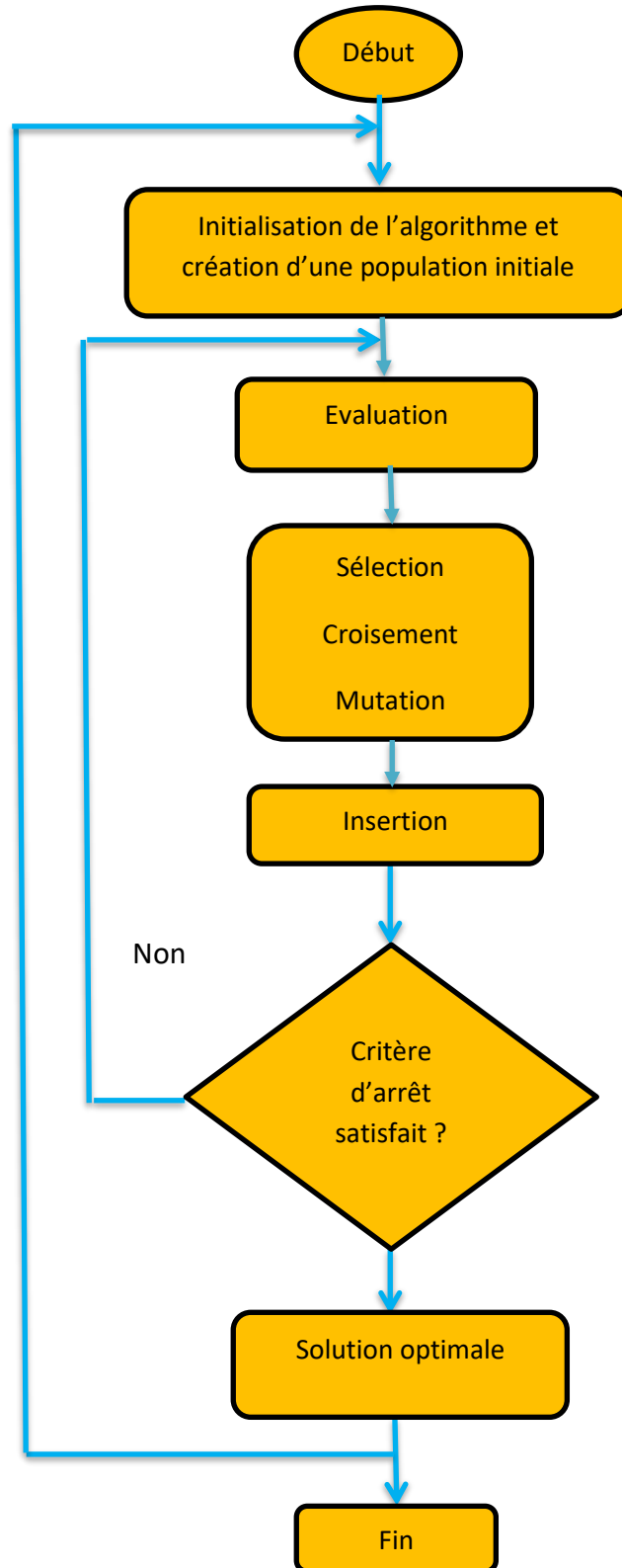


Figure 35 Organigramme de la méthode des algorithmes génétique

- Initialisation :

La procédure est assez simple. Elle consiste en un tirage aléatoire de N individus dans l'espace de recherche permis (la population). Ces individus sont en général codés, il existe trois principaux types de codage : binaire, gray ou réel. On peut facilement passer d'un codage à l'autre.

En codage binaire, qui est le plus utilisé, une chaîne binaire représentant l'individu (constituée donc par des 0 et des 1) est générée d'une manière aléatoire avec équiprobabilité, le nombre de bits S est appelé la longueur de l'individu. Bien évidemment, la précision dépend de la longueur du chromosome.

La population donc forme une matrice dans laquelle le nombre de ligne représente le nombre d'individus N et le nombre de colonnes est le nombre de bits S de chaque individu (précision). Un individu peut contenir deux ou plusieurs variables, dans ce cas la longueur de cet individu est donc la somme des précisions de chaque variable. [19]

- Décodage :

On présente ici le codage le plus simple qui est le codage binaire, on appelle Phénotype la valeur réelle de l'individu (après décodage), et Génotype la représentation binaire d'un individu,

On utilise un vecteur binaire A (chromosome), pour représenter les valeurs réelles de la variable x . Le nombre de bits est la longueur du chromosome, notée :

$$S = l(A) \quad (\text{III.18})$$

Soient :

$$d = [x_{min}, x_{max}] \quad (\text{III.19})$$

$$l_d = x_{max} - x_{min} \quad (\text{III.20})$$

Avec :

x : La forme réelle de l'individu ;

S : Le nombre de bits ;

A : La forme binaire de l'individu ;

$d \in R$: L'espace de recherche permis ;

x_{min}, x_{max} : Les bornes inférieures et supérieures de la variable x ;

l_d : La longueur de l'intervalle d

On doit alors diviser cet intervalle d en n_i sous-intervalles égaux afin de respecter la précision, avec :

$$n_i = l_d \cdot 10^{prec} \quad (III.21)$$

$prec$: représente la précision (chiffre après la virgule) avec laquelle on cherche x . Avec S l'entier naturel (nombre de bits) tel que :

$$n_i < 2^S \quad (III.22)$$

La transformation d'une chaîne binaire $A = a_0 a_1 \dots a_{S-1}$ en un nombre réel x peut alors s'exécuter en deux étapes [35] :

1. Conversion de la chaîne binaire A de la base 2 à la base 10 :

$$x' = \sum_{i=0}^{S-1} a_i 2^i \quad (III.23)$$

2. La recherche du nombre réel x correspondant :

$$x = x_{min} + x' \frac{l_d}{2^S - 1} \quad (III.24)$$

- **Evaluation :**

L'évaluation est une opération très importante, elle assure la survie d'un individu optimal, cela se fait par une fonction dite « Fitness ».

➤ **Fonction fitness :**

Appelée aussi fonction de qualité (ou fonction coût) ; elle donne, en valeur numérique positive (habituellement réelle), la qualité d'un individu. C'est selon cette valeur numérique qu'est calculée la chance de sélection de cet individu.

Les AGs étant une technique d'optimisation, ils cherchent la qualité maximale, donc l'optimisation de la fonction de qualité. [34]

➤ **Fonction objective :**

Elle donne les performances d'un individu, cette fonction peut être négative, nulle, ou à caractère minimal lorsque l'individu est optimal.

Les AGs recherchent la qualité maximale de la fonction caractérisant le système. La fonction « objectif » nécessite donc, parfois, un transfert en fonction positive qu'on cherche à maximiser (fonction fitness).

Cette transformation est assurée par une fonction g :

$$F(x) = g(f(x)) \quad (\text{III.25})$$

Avec : f : Fonction objectif.

F : Fonction fitness (coût), positive non nulle.

g : Fonction assurant le passage de la fonction objectif à la fonction fitness. [19]

- **Sélection :**

Cet opérateur est peut-être le plus important puisqu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. En règle générale, la probabilité de survie d'un individu sera directement reliée à son efficacité relative au sein de la population.

On trouve essentiellement quatre types de méthodes de sélection différentes :

- La méthode de la "loterie biaisée" (roulette wheel) de Goldberg :

Cette méthode est la plus connue et la plus utilisée.

Avec cette méthode chaque individu a une chance d'être sélectionné proportionnelle à sa performance, donc plus les individus sont adaptés au problème, plus ils ont de chances d'être sélectionnés.

Pour utiliser l'image de la "roue du forain", chaque individu se voit attribué un secteur dont l'angle est proportionnel à son adaptation, sa "fitness".

On fait tourner la roue et quand elle cesse de tourner on sélectionne l'individu correspondant au secteur désigné par une sorte de "curseur", curseur qui pointe sur un secteur particulier de celle-ci après qu'elle se soit arrêté de tourner

Cette méthode, bien que largement répandue, a pas mal d'inconvénients :

En effet, elle a une forte variance. Il n'est pas impossible que sur n sélections successives destinées à désigner les parents de la nouvelle génération P' , la quasi-totalité, voire pire la totalité des n individus sélectionnés soient des individus ayant un fitness vraiment mauvais et donc que pratiquement aucun individu voire aucun individu a forte fitness ne fasse partie des parents de la nouvelle génération. Ce

phénomène est bien sûr très dommageable car cela va complètement à l'encontre du principe des algorithmes génétiques qui veut que les meilleurs individus soient sélectionnés de manière à converger vers une solution la plus optimale possible

A l'inverse, on peut arriver à une domination écrasante d'un individu "localement supérieur". Ceci entraînant une grave perte de diversité. Imaginons par exemple qu'on ait un individu ayant un fitness très élevé par rapport au reste de la population, disons dix fois supérieure, il n'est pas impossible qu'après quelques générations successives on se retrouve avec une population ne contenant que des copies de cet individu. Le problème est que cet individu avait un fitness très élevé, mais que ces fitness étaient toute relative, elle était très élevée mais seulement en comparaison des autres individus. On se retrouve donc face à problème connu sous le nom de "convergence prématurée" ; l'évolution se met donc à stagner et on n'atteindra alors jamais l'optimum, on restera bloqué sur un optimum local.

➤ La méthode "élitiste :

Cette méthode consiste à sélectionner les n individus dont on a besoin pour la nouvelle génération P' en prenant les n meilleurs individus de la population P après l'avoir triée de manière décroissante selon le fitness de ses individus. Il est inutile de préciser que cette méthode est encore pire que celle de la loterie biaisée dans le sens où elle amènera à une convergence prématurée encore plus rapidement et surtout de manière encore plus sûre que la méthode de sélection de la loterie biaisée ; en effet, la pression de la sélection est trop forte, la variance nulle et la diversité inexistante, du moins le peu de diversité qu'il pourrait y avoir ne résultera pas de la sélection mais plutôt du croisement et des mutations. Là aussi il faut opter pour une autre méthode de sélection.

➤ La sélection par tournois :

Cette méthode est celle avec laquelle on obtient les résultats les plus satisfaisants. Le principe de cette méthode est le suivant : on effectue un tirage avec remise de deux individus de P , et on le fait "combattre". Celui qui a le fitness la plus élevée l'emporte avec une probabilité p comprise entre 0.5 et 1. On répète ce processus n fois de manière à obtenir les n individus de P' qui serviront de parents. La variance de cette méthode est élevée et le fait d'augmenter ou de diminuer la valeur de p permet respectivement de diminuer ou d'augmenter la pression de la sélection.

➤ La sélection universelle stochastique :

Cette méthode semble être très peu utilisée et qui plus est possède une variance faible, donc introduit peu de diversité, nous n'entrerons donc pas dans les détails, on se contentera d'exposer sa mise en œuvre : On prend l'image d'un segment découpé en autant de sous-segments qu'il y a d'individus. Les individus sélectionnés sont désignés par un ensemble de points équidistants. [33]

- **Croisement :**

L'opérateur de croisement permet la création de nouveaux individus selon un processus fort simple. Il permet donc l'échange d'information entre les chromosomes (individus). Tout d'abord, deux individus, qui forment alors un couple, sont tirés au sein de la nouvelle population issue de la sélection. Puis un (potentiellement plusieurs) site de croisement est tiré aléatoirement (chiffre entre 1 et $S - 1$).

Enfin, selon une probabilité p_c que le croisement s'effectue, les segments finaux (dans le cas d'un seul site de croisement) des deux parents sont alors échangés autour de ce site (voir figure (36))

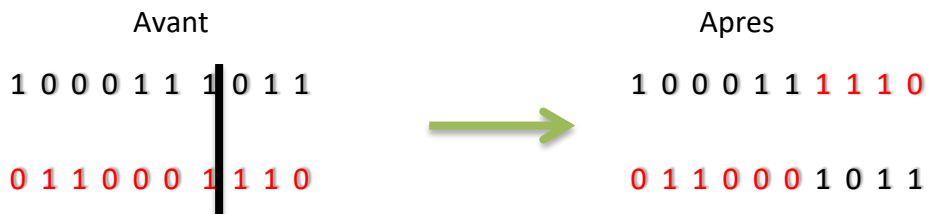


Figure 36 Exemple de croisement avec un seul site

Cet opérateur permet la création de deux nouveaux individus. Toutefois, un individu sélectionné lors de la reproduction ne subit pas nécessairement l'action d'un croisement. Ce dernier ne s'effectue qu'avec une certaine probabilité. Plus cette probabilité est élevée plus la population subira de changement.

On peut parfois sélectionner deux ou plusieurs sites de croisement, on parle alors de croisement multipoints. [19]

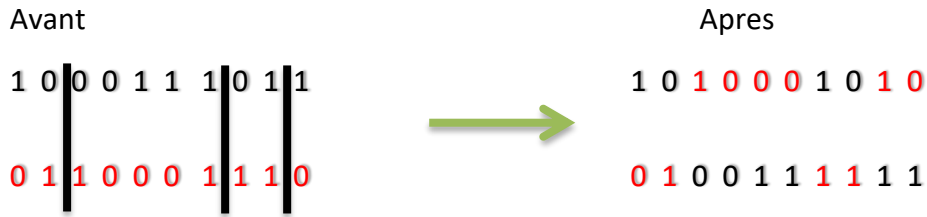


Figure 37 Exemple de croisement multipoints

- **Mutation :**

Dans cette étape, un composant d'un individu est modifié aléatoirement avec une certaine probabilité très faible p_m

Dans le cas du codage binaire, chaque bit $a_i \in \{0,1\}$ est remplacé selon une probabilité p_m par son inverse $\bar{a}_i = 1 - a_i$. C'est ce qu'illustre la Figure. Tout comme plusieurs lieux de croisement peuvent être possibles, nous pouvons très bien admettre qu'une même chaîne puisse subir plusieurs mutations. [19]



Figure 38 Exemple de mutation

- **Insertion :**

La population issue des opérations génétiques sera insérée dans l'ancienne population d'une manière à garder les individus ayant la fonction fitness la plus grande. [19]

- **Critere d'arrêt :**

Les opérations génétiques précédentes seront exécutées autant de fois que nécessaire et à chaque fois on obtient une nouvelle population ayant des individus de plus en plus adaptés.

Le critère d'arrêt peut être choisi par plusieurs façons, soit par le test de la fonction coût, soit par le nombre de générations, soit par le test de changements dans la population.

Si le nombre de générations est fixé on obtient un temps d'exécution fixe mais le programme peut ne pas s'arrêter à précision souhaitée. Si l'on connaît la valeur maximale de la fonction fitness, le programme s'arrête une fois il atteint cette valeur, on obtient la précision souhaitée mais cela peut exiger un temps de calcul non contrôlé. [19]

- **La différence fondamentale entre les AGs et les méthodes numériques classiques :**

- On utilise un codage des informations : on représente toutes les caractéristiques d'une solution par un ensemble de gènes, c'est-à-dire un chromosome, sous un certain codage (binaire, réel, code de Gray, etc ...), valeurs qu'on concatène pour obtenir une chaîne de caractères qui est spécifique à une solution bien particulière.
- Les AGs travaillent sur une population de points (d'individus) au lieu d'un point unique, cela introduit donc du parallélisme, ce qui offre l'avantage d'avoir un espace de recherche plus large et d'éviter la convergence vers un optimum local.
- Les AGs n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire.
- Ils utilisent des règles de transition probabilistes (inspirées de la nature), c'est l'interaction entre les différentes solutions pour arriver à une meilleure solution et la plus adaptée. [19]

- **Applications des AGs a la MPPT**

Dans l'algorithme développé les individus représentent le courant du générateur PV (GPV) et le nombre de bits donne la précision. Pour coder le courant en binaire on doit fixer sa valeur maximale qui est dans notre cas le courant de court-circuit, on peut donc écrire :

$$population(I) = \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad \text{avec } : I_{max} = I_{cc} = \overbrace{111\dots11}^{S \text{ bit}}$$

L'évaluation d'un individu se fait par le calcul de sa puissance, un courant est donc optimal si la puissance correspondante est la plus grande.

Le déroulement du programme détermine le courant optimal (correspondant à la puissance maximale) directement et une commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions « ou PWM ») conduit le panneau PV à fonctionner avec ce courant, donc à sa puissance maximale. [36] – [19]

Conclusion

La poursuite du point de puissance maximale est une stratégie très importante pour tirer le maximum de puissance du panneau PV et ainsi augmenter le rendement de l'installation 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 différents types des convertisseurs DC-DC s ont été présentées, ainsi les méthodes de MPPT les plus courantes.

Une nouvelle technique de poursuite plus rapide et plus stable est proposée dans ce chapitre, elle est basée sur les Algorithmes Génétiques, c'est pourquoi une présentation théorique des AGs est présentée dans ce chapitre, le prochain chapitre fera l'objet d'une étude par la simulation.

Chapitre IV

Résultats et discussions

Introduction

En raison de changement du point de fonctionnement de puissance maximale en fonction de l'éclairement et de la température (conditions climatiques) illustré dans les figures (9,10) une grande importance est donnée au suiveur du point de puissance maximum. Ainsi, les techniques heuristiques basées sur le concept de l'optimisation ont dans nos jours une grande importance en raison de leur adaptabilité avec les systèmes photovoltaïques.

Dans des conditions environnementales d'irradiation uniformes, la courbe caractéristique de la puissance et de la tension (P-V) de l'installation photovoltaïque est caractérisée par un seul point de puissance maximale (PPM) qui constitue un objectif simple pour l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Alors que dans le cas où les cellules ou les panneaux PV reçoivent différents niveaux d'irradiations comme dans le cas de l'ombrage partiel, des pics multiples ou des PPM sont introduits dans la courbe PV, ce qui rend difficile le suivi du PPM global.

L'objectif de ce chapitre est l'élaboration d'une structure de commande MPPT basé sur les AG (MPPT-AG), afin d'atteindre le PPM quels que soient les conditions climatiques en particulier l'ombrage partiel. On donne les observations, les interprétations des résultats et on termine par les conclusions qu'on peut tirer à partir de ces résultats.

IV.1 Courbes caractéristiques des panneaux photovoltaïques

Le champ photovoltaïque est généralement caractérisé par sa courbe courant-tension (I-V) et par sa courbe puissance-tension (P-V), pour cela dans ce qui suit, on va présenter les courbes caractéristiques dans les conditions standards STC (1000 W/m^2 , $25 \text{ }^\circ\text{C}$) :

Pour un panneau, pour trois panneaux identiques misent en séries.

Ainsi les courbes caractéristiques de ces trois derniers dans différents profils d'irradiation (patterns).

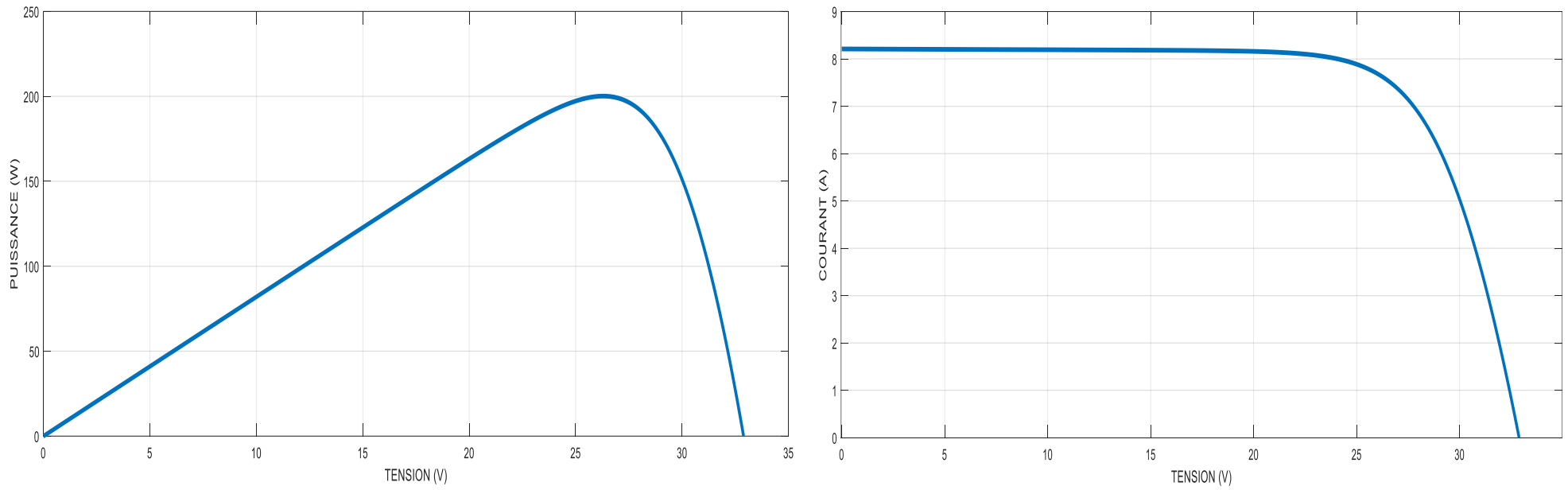


Figure 39 Courbe des caractéristiques P-V et I-V du panneau dans les STC

STC $E=1000 \text{ W/m}^2$ $E1=1000 \text{ W/m}^2$ $E2= 1000 \text{ W/m}^2$

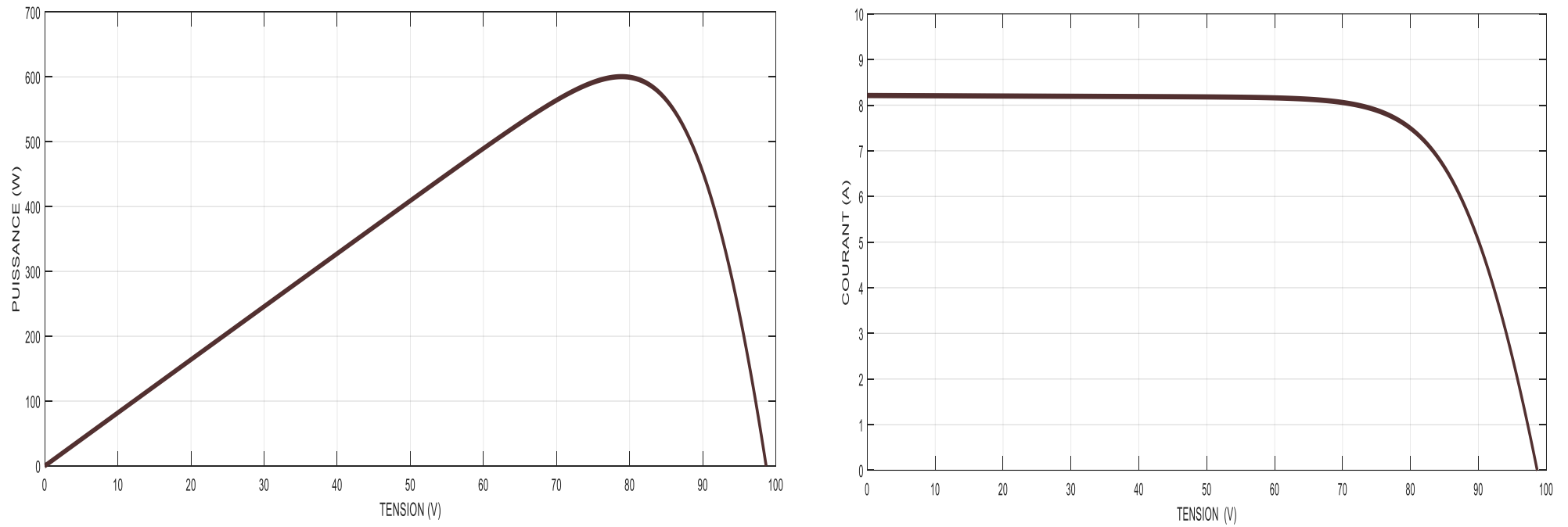


Figure 40 Courbe des caractéristiques P-V et I-V des trois panneaux identiques en série dans les STC

P1: $E=900 \text{ w/m}^2$ $E1=700 \text{ w/m}^2$ $E2=500 \text{ w/m}^2$

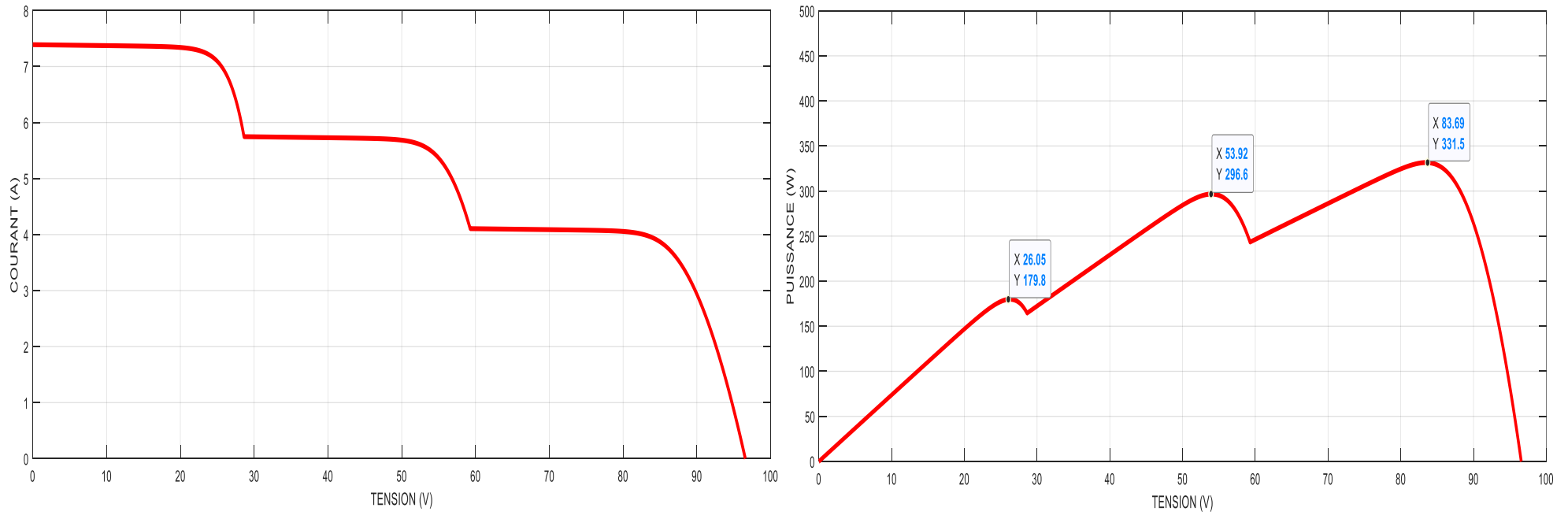


Figure 41 Courbe des caractéristiques P-V et I-V des trois panneaux identiques en série dans le profil d'ensoleillement P1

P2: $E=800 \text{ w/m}^2$ $E1=500 \text{ w/m}^2$ $E2=200 \text{ w/m}^2$

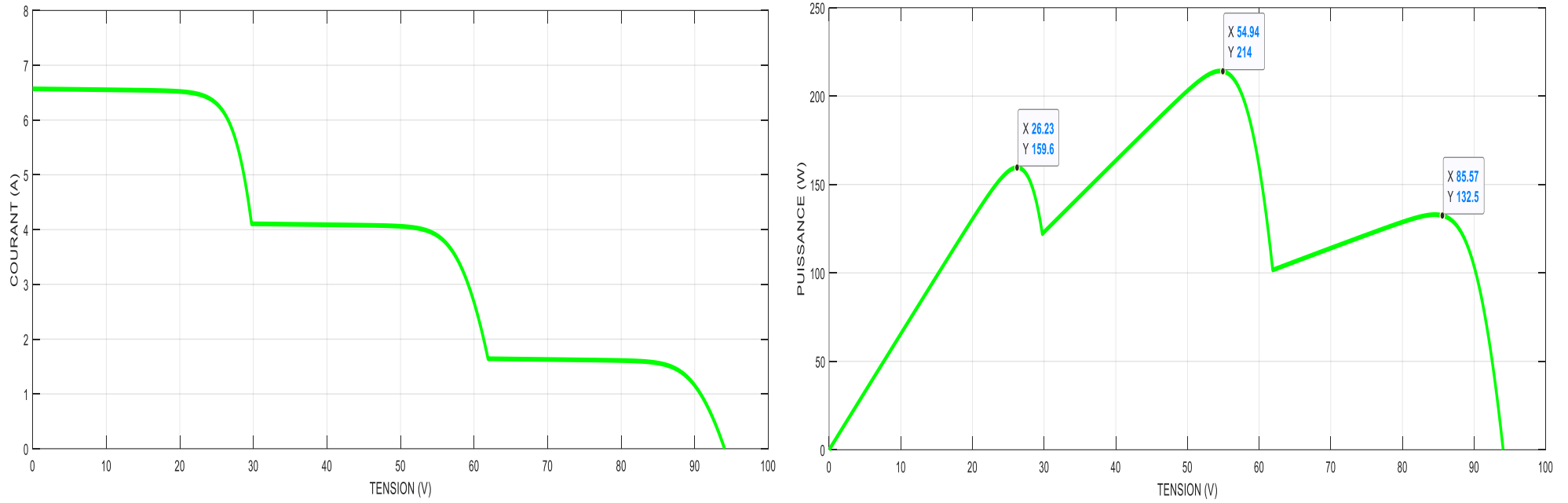


Figure 42 Courbe des caractéristiques P-V et I-V des trois panneaux identiques en série dans le profil d'ensoleillement P2

P3: $E=700 \text{ w/m}^2$ $E1=200 \text{ w/m}^2$ $E2=100 \text{ w/m}^2$

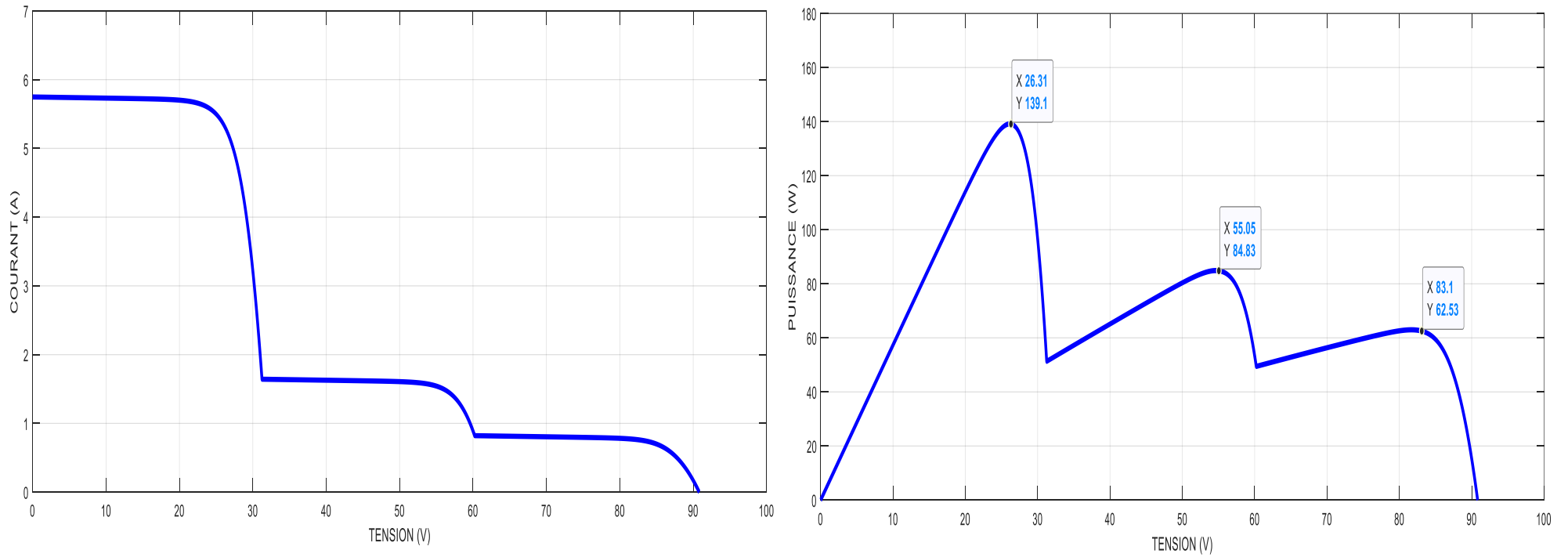


Figure 43 Courbe des caractéristiques P-V et I-V des trois panneaux identiques en séries dans le profil d'ensoleillement P3

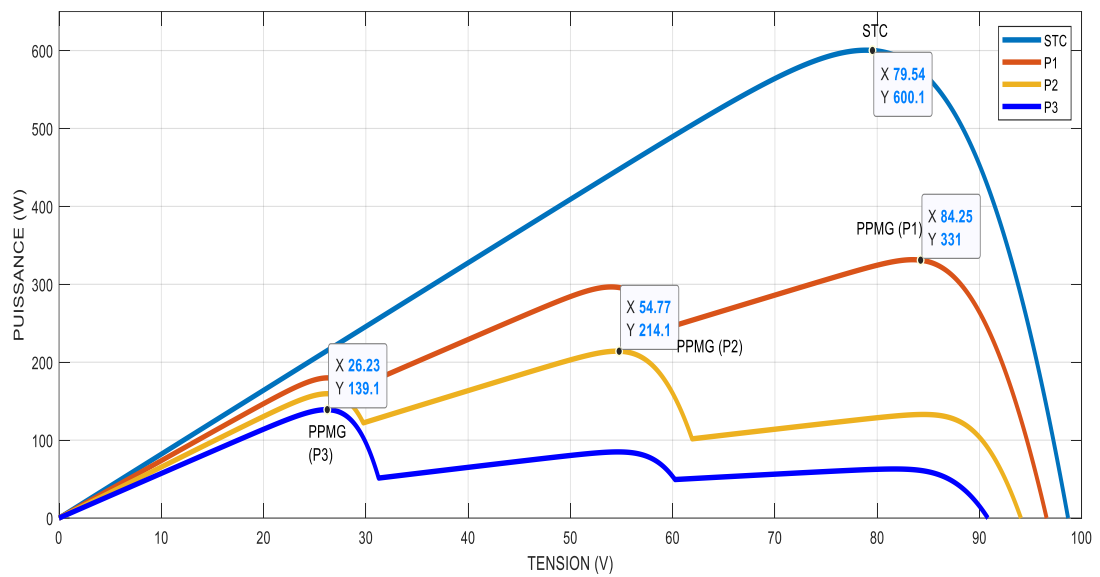


Figure 44 Courbe des caractéristiques P-V des trois panneaux identiques en séries dans les trois profils d'ensoleillement P1, P2, P3 et les STC

IV.2 le modèle du système photovoltaïque avec la méthode de MPPT proposé sur MATLAB

Les figures (45, 46, 47) représentent le schéma du modèle MATLAB/Simulink utilisé pour effectuer les différents tests. A l'entrée du panneau PV, on a les différentes valeurs de l'ensoleillement et de la température.

D'abord le modèle des trois panneaux utilisé est KYOCERA KC200GT, on aura les caractéristiques suivantes pour le système des trois panneaux identiques mis en séries :

Puissance maximale (P_{max})	600 W
Voltage at maximum power point (V_{ppm})	78.9 V
Current at maximum power point (I_{ppm})	7.61 A
Open circuit voltage (V_{co})	98.7 V
Short circuit current (I_{cc})	8.21 A

Tableau 4 Caractéristiques du système des trois panneaux identiques mis en séries utilisant le module Kyocera -KC200GT

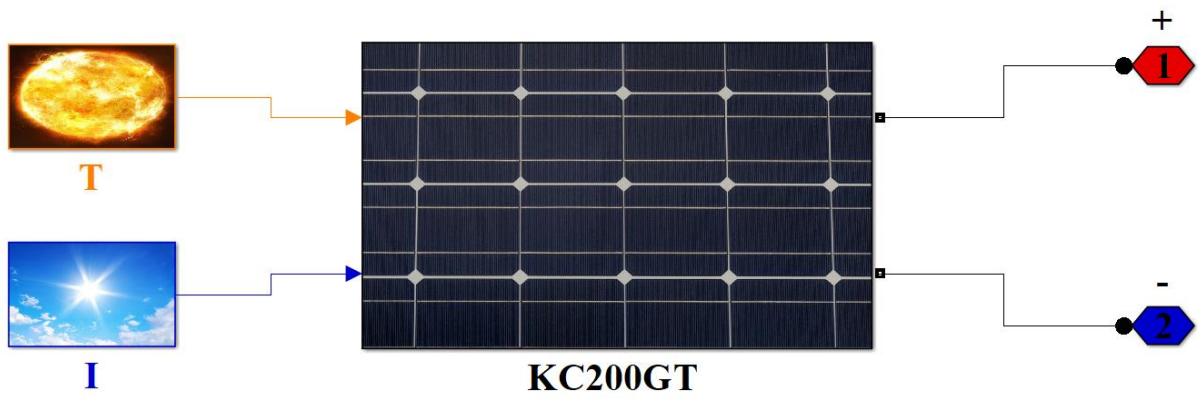


Figure 45 Schéma bloc d'un panneau photovoltaïque dans MATLAB/Simulink

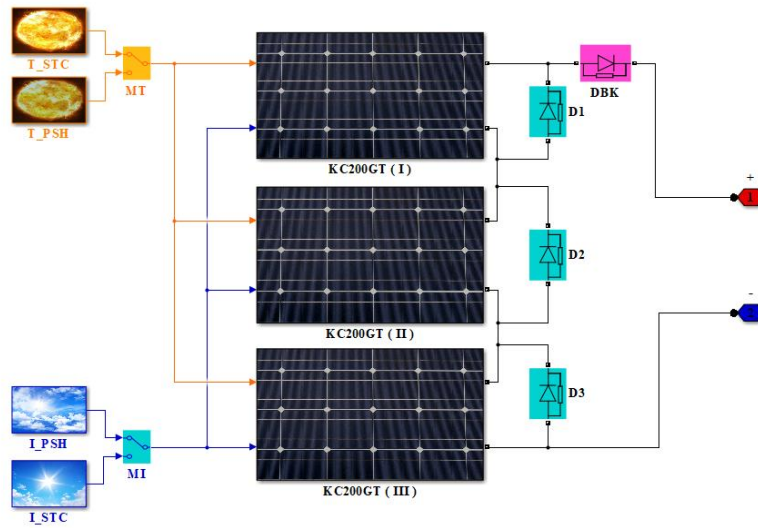


Figure 46 Schéma bloc des trois panneaux photovoltaïques misent en séries dans MATLAB/Simulink

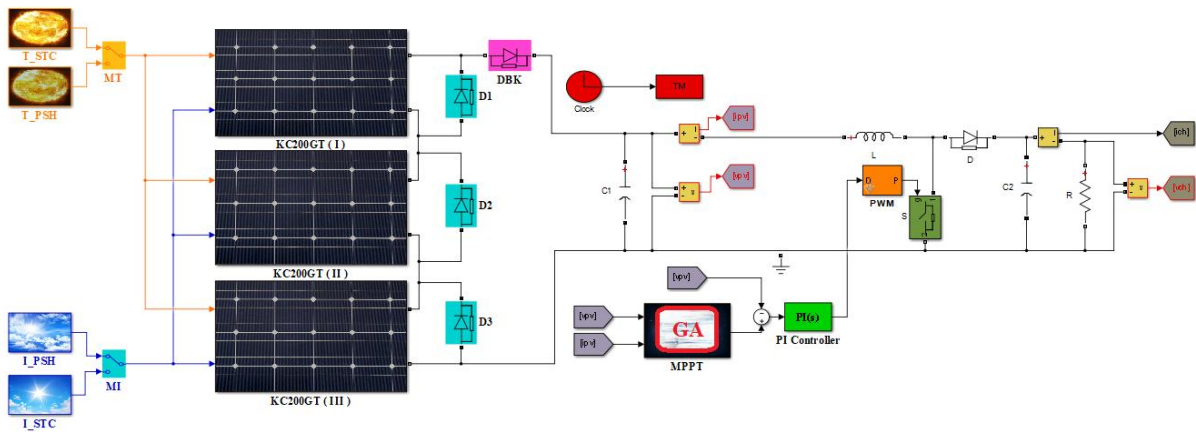


Figure 47 Schéma bloc d'un système photovoltaïque avec la commande basée sur les AGs dans MATLAB/Simulink

IV.3 Algorithme proposé

Dans la méthode proposée on utilise l'optimisation par AG pour déterminer la tension correspondante à la puissance maximale et ainsi ramener le GPV à travailler avec cette tension donc à sa puissance maximale.

L'individu dans notre cas est la tension du GPV et l'évaluation des individus est basée sur le modèle du GPV. On utilise l'équation de la puissance (IV.1) Cette équation est utilisée comme fonction fitness pour évaluer la puissance de chaque tension (la capacité d'adaptation de chaque individu).

$$P = V \left(I_{PV} - I_0 \left(e^{\left(\frac{V+3R_S I}{V_T} - 1 \right)} \right) - \frac{V+3R_S I}{R_p} \right) \quad (IV.1)$$

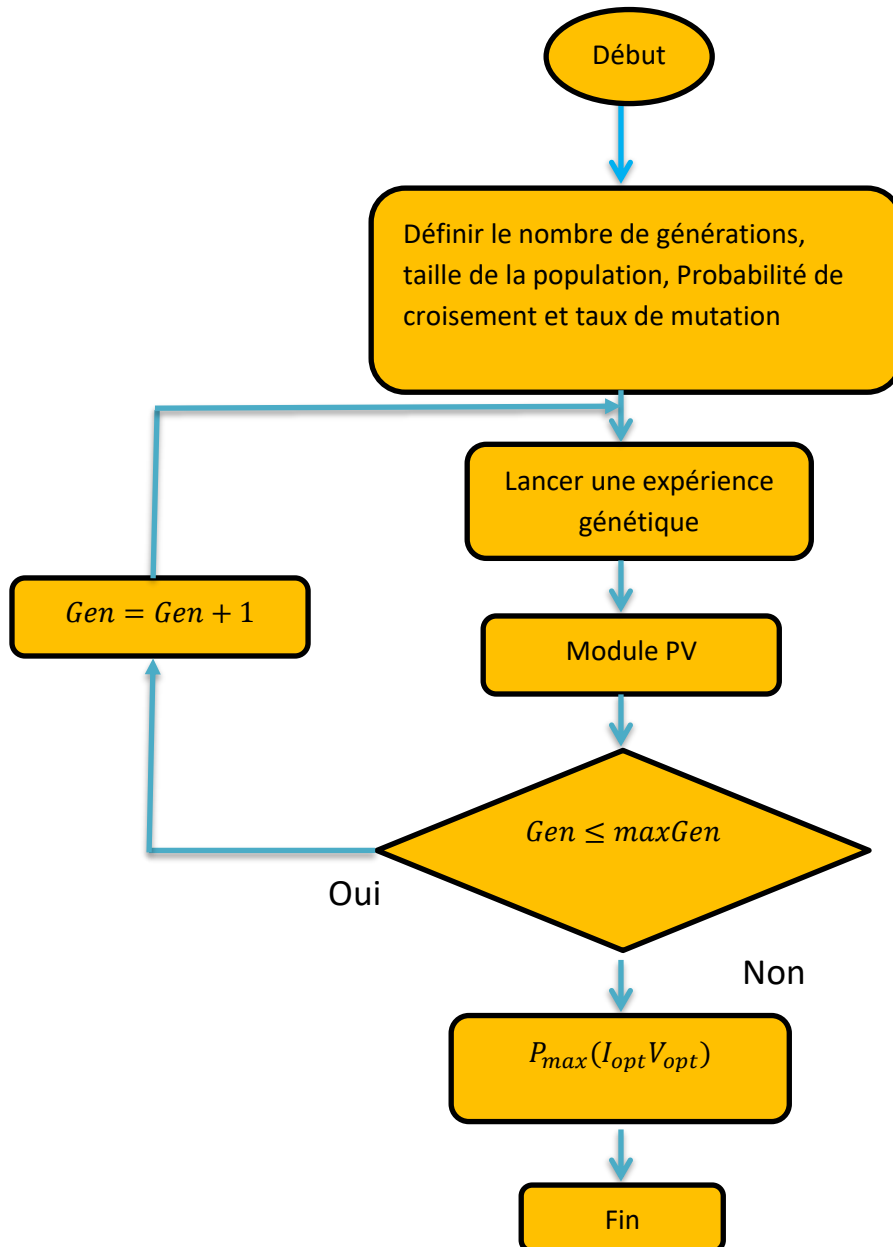


Figure 48 Organigramme de l'algorithme génétique appliqué sur l'MPPT

IV.4. RESULTATS DES SIMULATIONS ET DISCUSSION

Le système de production PV illustré dans le tableau (4), composé de trois panneaux PV en série avec des schémas d'irradiations sélectionnables, est associé à un convertisseur élévateur DC-DC. Les profils ont les caractéristiques indiquées dans le tableau (5) et illustrées dans les figures (41, 42, 43, 44), où différentes positions du point de puissance maximum globale

(PPMG) sont sélectionnées pour couvrir tous les cas possibles (gauche, centre, droite). Le profil d'ombrage partiel P1 expose le premier panneau photovoltaïque à 900 W/m², le deuxième à 700 W/m² et le troisième à 500 W/m². Le profil d'ombrage partiel P2 expose les trois panneaux PV aux valeurs (800 500 200) W/m² respectivement. Alors que P3 considère le profil (700 200 100) W/m² comme les valeurs d'irradiation des panneaux PV. La réponse du système de production d'énergie PV commandé par l'algorithme de MPPT proposé est présentée dans la figure (49) et le tableau (5).

L'algorithme génétique proposé a été testé dans les conditions standards STC ou il converge au point de puissance maximale PPM dont la valeur de la puissance est égale à 600 W.

Pour le cas de l'ombrage partiel montré par différents profils d'irradiations (P1, P2, P3), la stratégie de suivi proposée se caractérise par la convergence vers le PPMG soit il se situe à gauche, au centre ou à droite, dont autre technique de commande en particulier les techniques classiques (voir chapitre III) stagne en général dans les maximums locaux.

Profils	Irradiation (W/m ²)	Tension de PPM (V)	Courant de PPM (A)	Puissance de PPM (W)	Positions de PPMG
STC	(1000 1000 1000)	79,5	7,57	600	Centre
P1	(900 700 500)	83,5	4	331,5	Droite
P2	(800 500 200)	53,2	4	214	Centre
P3	(700 200 100)	27,1	5,08	138	Gauche

Tableau 5 Points de puissance maximale du réseau PV pour les scénarios de simulation.

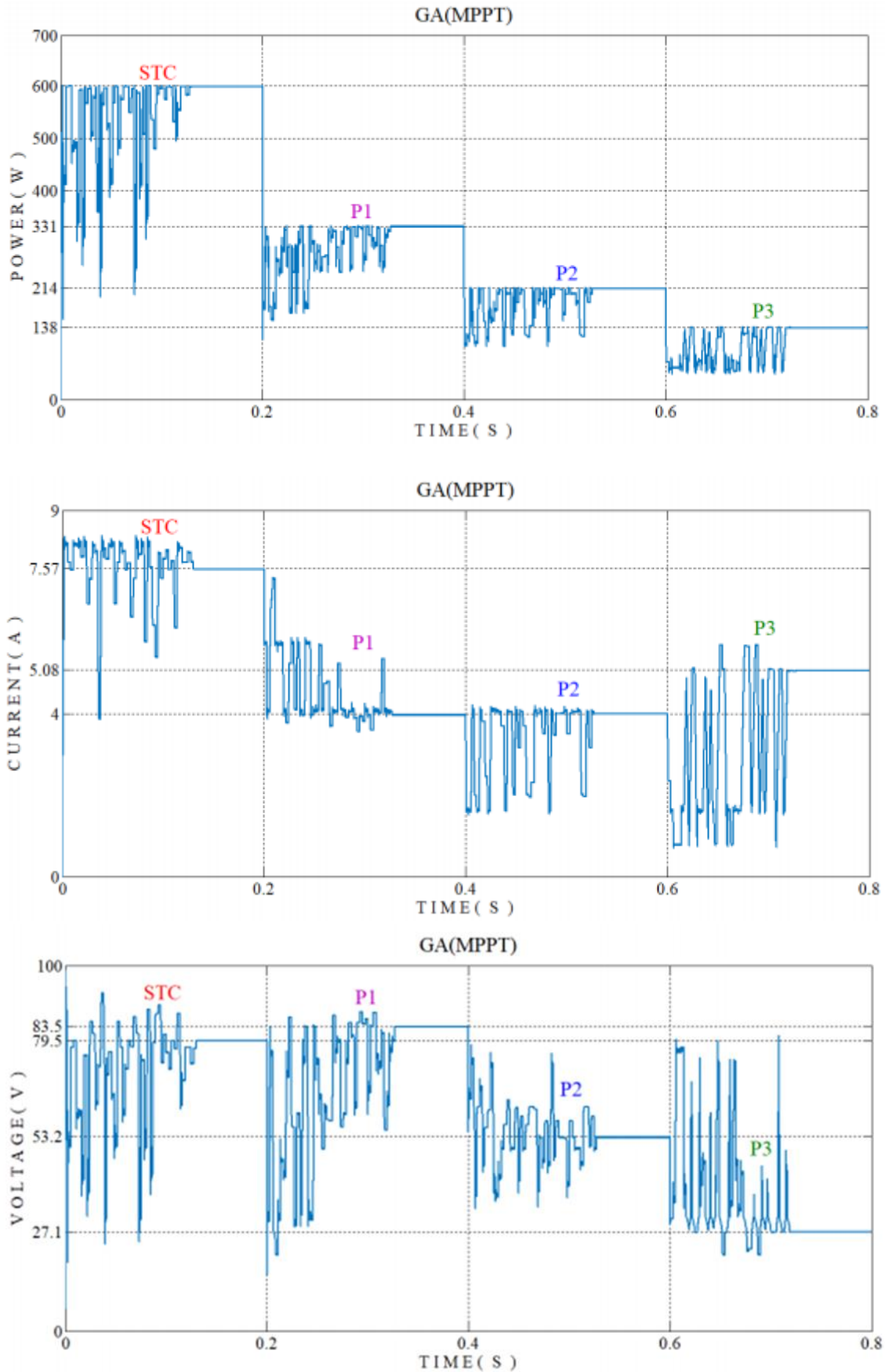


Figure 49 Réponse de la stratégie MPPT proposée à diverses conditions d'exploitation : tension du PV, courant du PV, puissance du PV

Conclusion

Dans ce chapitre une modélisation sur Matlab des composantes d'un système PV est présentée, ainsi celles des trois panneaux mise en séries suivie par simulation de l'algorithme proposé. Pour prouver les performances de la méthode MPPT à partir des AGs, une étude des trois profils d'ombrage différents pour trois panneaux identiques raccordés en série est effectuée. Les résultats de simulation ont démontré les avantages de l'algorithme génétique (technique évolutionnaire), que ce soit dans la robustesse ou dans la précision.

L'algorithme proposé peut alors être utilisé pour déterminer le point de puissance maximum globale PPMG dans les conditions climatiques les plus compliqués, en particulier dans le cas de l'ombrage partiel.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est de développer une technique MPPT robuste et précis. Les techniques précédentes souffrent de stagner dans les points de puissances maximums locaux (PPMLs) ce qui est bien évident dans le cas de l'ombrage partiel.

La méthode proposée est basée sur les AGs ; en bénéficiant d'une recherche globale (sur une population d'individus) d'un optimum on balaie tout l'intervalle de recherche et on se pointe directement sur le PPM. Même avec les méthodes évoluées (FLC...) la poursuite se fait au voisinage du point de recherche.

On a commencé à présenter le système PV puis les techniques MPPT avant de passer à la description théorique de l'algorithme et sa modélisation sur Matlab/Simulink.

Les résultats de simulation (chapitre 4) ont démontré que l'algorithme proposé peut être utilisé pour déterminer le PPMG dans les conditions climatiques les plus compliqués, en particulier dans le cas de l'ombrage partiel.

Le problème d'un bon choix du pas du rapport cyclique n'est pas rencontré, avec l'algorithme développé, car la valeur optimale du rapport cyclique n'est pas obtenue par son incrémentation mais plutôt par l'optimisation d'une population, par un protocole génétique, et le rapport optimal est obtenu directement par l'algorithme.

Bibliographie

- [1] « *International Energy Agency* ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.iea.org/>. [Consulté le : 21-mai-2018].
- [2] pveducation.org consulté le 05/2020
- [3] BOUAKKAZ, M S. (2016). Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER. Etude comparative de trois techniques de commande MPPT pour un système photovoltaïque, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA.
- [4] LAMRI, B. (2018). Analyse énergétique et intégration de la sûreté de fonctionnement dans un système photovoltaïque connecté au réseau électrique, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA.
- [5] BOUCHOUICHA, K. (2017). MODELISATION MULTISPECTRALE DES IMAGES SATELLITAIRE - Application : Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère. Thèse de Doctorat, Université Des Sciences et de La Technologie d'Oran Mouhamed Boudiaf, pp171.
- [6] Constantine, U., Des, F., & Exactes, S. (n.d.). Présenté pour obtenir le diplôme de Doctorat es-Science en Physique OPTION Cristallographie THEME Dispersion des nano-cristaux semi-conducteurs dans des matrices à large bande interdite : Etude des propriétés optiques par :
- [7] Ecole nationale supérieure d'ingénieurs de Limoges, Les semi-conducteurs -Jonction PN
- [8] KHENFER, R. (2015). Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques. 126.
- [9] ecosources.info Consulté le 06/2020
- [10] A.C. Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques", thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse 2005.
- [11] [calculeo.fr/Eco-travaux/Les-travaux-d'économies-d'énergie](http://calculeo.fr/Eco-travaux/Les-travaux-d'economies-d'energie) Energie-solaire-avantages-inconvenients consulté le 07/2020
- [12] <http://unblogsurlaterre.com/actualites-environnement-sur-la-terre/avantages-et-inconvenients-energie-solaire-011> Consulté le 06/2020
- [13] Yahya, a O. M., Mahmoud, a O., & Youm, I. (2008). Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque. *Revue Des Énergies Renouvelables*, 11, 473–483.
- [14] Pr, N., Belghachi, E., Cheknane, H., Ali, A., & Professeur, G. (2009). Année Universitaire : 2008 - 2009. 2008–2009.
- [15] Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Ruppert Filho, E. (2009). Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. 2009 Brazilian Power Electronics Conference, COBEP2009, 14(1), 1244–1254. <https://doi.org/10.1109/COBEP.2009.5347680>

- [16] BENDIB, B. (2017). "Une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes". THESE de Doctorat en Science. UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF 1.136pages .le 15 novembre 2017.
- [17] H.S.Rauschenbach. "Solar cell array design hand book", Van Nostrand Reinhold, 1980.
- [18] J.Hyvarinen and J.Karila. New analysis method for crystalline silicon cells. In Proc. 3rd World Conference. On Photovoltaic Energy Conversion, v.2, p .1521–1524, 2003.
- [19] LAMAMRA. (2018). Thèse Doctorat en Sciences. Pesticides in the Modern World – Pesticides Use and Management, 274–302.
- [20] C. Alonso : "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie". Mémoire En vue de l'obtention de L'habilitation à diriger les recherches. 2003
- [21] R. Andoulssi: "étude d'une classe de système photovoltaïques par une approche bond graph : modélisation, analyse et commande". Thèse de doctorat université de Lille 2001.
- [22] Algerienne, R., Et, D., La, E. T. D. E., & Scientifique, R. (2015). Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome Remerciements.
- [23] De, U. A. M. (2017). Étude d' un Système de Stockage par un Supercondensateur.
- [24] Introduction, I. I. (n.d.). Chapitre II : Dimensionnement et conception des hacheurs. 20–46.
- [25] H. Al-Atrash, I. Batarseh, K. Rustom, "Statistical modeling of DSP-based hill-climbing MPPT algorithms in noisy environments", Conference and Exposition in Twentieth Annual IEEE Conference in Applied Power Electronics, APEC 2005, vol. 3, pp. 1773–1777.
- [26] W. Xiao, W. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems", IEEE 35th annual Conference in Power electronics specialists, PESC 04. 2004, vol. 3, pp. 1957–1963.
- [27] Mohcene, B. (2018). Commandes non linéaires des systèmes photovoltaïques. Thèse de Doctorat de l'Université 8 MAI 1945 Guelma.
- [28] F.Slama, "Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique", mémoire Magister, département d'Electrotechnique, Université de Sétif 2012.
- [29] Savita Nema, "Matlab / simulink based study of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification," International journal of Energy and environment", 2010.
- [30] M.Hatti, "contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum MPPT d'un système photovoltaïque". JCGE'08 Lyon, 16 et 17 décembre 2008.
- [31] FONCTION D'ACTIVATION ANN (INTERNET]
- [32] Saymard, E. (2010). Mémoire De Fin D' Études Mémoire De Fin D' Études. 2013.

[33] Amédée, S., & François-Gérard, R. (2004). *Algorithmes genetiques*. 1–50.

[34] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, 1st éd. Boston, MA, USA : Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.

[35] Z. Michalewicz et Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 3e éd. Springer Science & Business Media, 1996

[36] Malika, S, & Saravanakumar, R. (2013). *Genetics Algorithm Based MPPT Controller for Photovoltaic System*. 4(4), 1159 – 1664.

Annexe

Programme principal de l'AG

```

function gaDat=ga(g)
%
% Basic Genetic Algorithm
%
% gaDat=ga(gaDat)
% gaDat : Data structure used by the algorithm.
%
% Data structure:
% Parameters that have to be defined by user
% gaDat.FieldD=[lb; ub]; % lower (lb) and upper (up) bounds of the
search space.
% % each dimension of the search space requires bounds
% gaDat.Objfun='costFunction'; % Name of the objective function to be
minimize
%
% Parameters that could be defined by user, in other case, there is a
default value
% gaDat.MAXGEN={gaDat.NVAR*20+10}; % Number of generation,
gaDat.NVAR*20+10 by default
% gaDat.NIND={gaDat.NVAR*50} ; % Size of the population, gaDat.NVAR*50
by default
% gaDat.alfa={0}; % Parameter for linear crossover, 0 by default
% gaDat.Pc={0.9}; % Crossover probability, 0.9 by default
% gaDat.Pm={0.1}; % Mutation probability, 0.1 by default
% gaDat.ObjfunPar={[]}; % Additional parameters of the objective
function
% % have to be packed in a structure, empty by default
% gaDat.indini={[]}; % Initialized members of the initial population,
empty
% % by default
%
if nargin==1
gaDat=g;
else
error('It is necessary to pass a data structure: gaDat.FieldD and
gaDat.Objfun')
end
% If the parameter doesn't exist in the data structure it is created
with the default value
if ~isfield(gaDat, 'NVAR')
gaDat.NVAR=size(gaDat.FieldD,2);
end

```

```

if ~isfield(gaDat, 'MAXGEN')
gaDat.MAXGEN=gaDat.NVAR*20+10;
end
if ~isfield(gaDat, 'NIND')
gaDat.NIND=gaDat.NVAR*50;
end
if ~isfield(gaDat, 'alfa')
gaDat.alfa=0;
end
if ~isfield(gaDat, 'Pc')
gaDat.Pc=0.9;
end
if ~isfield(gaDat, 'Pm')
gaDat.Pm=0.1;
end
if ~isfield(gaDat, 'ObjfunPar')
gaDat.ObjfunPar=[];
end
if ~isfield(gaDat, 'indini')
gaDat.indini=[];
end
% Internal parameters
gaDat.Chrom=[];
gaDat.ObjV=[];
gaDat.xmin=[];
gaDat.fxmin=-inf;
gaDat.xmingen=[];
gaDat.fxmingen=[];
gaDat.rf=(1:gaDat.NIND)';
gaDat.gen=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Main loop
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Generation counter
gen=0;
% Initial population -----
gaDat.Chrom=crtrp(gaDat.NIND,gaDat.FieldD); % Real codification
% Individuals of gaDat.indini are randomly added in the initial
population
if not isempty(gaDat.indini)
nind0=size(gaDat.indini,1);
posicion0=randperm(nind0);
gaDat.Chrom(posicion0,:)=gaDat.indini;
end
while (gaDat.gen<gaDat.MAXGEN),
gaDat.gen=gen;
gaDat=gaevolucion(gaDat);
% Increase generation counter -----
gaDat.xmingen(gen+1,:)=gaDat.xmin;

```

```
gaDat.fxmingen(gen+1,:)=gaDat.fxmin;
gen=gen+1;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% End main loop
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Present final results
gareults(gaDat)
%% Subfunction -----
%% -----
function chrom=crtrp(Nind,FieldDR
```

Les paramètres d'entrés de l'algorithme génétique :

Paramètres	Valeurs
Max de génération	6
Nombre d'individus	12
Pc	0.7
Pm	0.1