

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB -BLIDA1



INSTITUT D'AERONAUTIQUE ET LES ETUDES SPATIALES



Mémoire de Fin d'Etude Master Académique

Spécialité : Télécommunications spatiales

Intitulé :

**Extraction des paramètres d'une cellule Photovoltaïque d'un
engin spatiale à l'aide d'un algorithme d'optimisation.**

Présenté par :

BENDIFALLAH GHOZLANE REYANE

Proposé par :

Dr SOFIANE TAHRAOUI

Dr RABEH BENKERCHA

Soutenu le : 20/09/2022 devant le Jury Composé par :

Pr. Lagha Mohand President IAES

Dr Krim Mohamed Examineur IAES

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force, le courage et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je voudrais dire toute ma gratitude et mes sincères remerciement à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire notamment :

Dr S.TAHRAOUI professeur à l'université de Blida et chef de département des études spatiale, de m'avoir accueilli et encadré tout au long de ce travail, et mon Co-promoteur **Dr R.BENKERCHA** pour ses conseils judicieux, ses orientations et sa grande assistance.

Je remercie les membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger mon mémoire.

Je remercie tous mes enseignants de l'institut d'aéronautique et les études spatiales en particulier ceux de la filière Télécommunication spatiale pour leur orientation pendant ma formation.

Un très grand, chaleureux et spécial merci à mes parents, et à toute ma famille. Que toutes les personnes et tous mes amis qui m'ont soutenu moralement soient assurés de l'expression de ma reconnaissance.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À mes parents pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.

À ma sœur MIRA et mes deux frères KARIM et ZAYN,

À tous mes proches et mes amies,

Mes chères FADOUA, IMEN, SOUAAD, WIAM

Qui m'ont motivé et partagé tous les moments de fatigue, de tristesse et de joie.

Ainsi qu'à toutes les personnes qui m'a aidé à la réalisation de ce travail.

G.BENDIFALLAH

Résumé

Le système d'alimentation électrique (Electrical Power System EPS) est responsable de la production et du stockage de l'énergie nécessaire aux sous-systèmes et aux charges utiles dans les engins spatiales. La cellule Photovoltaïque est un élément indispensable pour ce système. Pour cela, ce sujet a été proposé pour permettre de découvrir les propriétés d'une cellule photovoltaïque. De plus, cette étude permet d'évaluer les performances du système électrique pour un Nano-satellite. Dans ce cadre, il est nécessaire de modéliser la cellule PV (modèle une seule diode et modèle double diode) utilisant le logiciel MATLAB. Par la suite, choisir un algorithme d'optimisation afin d'identifier les paramètres inconnus de ces modèles de cellule PV.

Mots Clés :

Nano-satellite.

Cellule PV.

Modélisation.

Algorithme d'optimisation.

Abstract

The Electrical Power System (EPS) is responsible for generating and storing the energy required for subsystems and payloads in spacecraft. The photovoltaic cell is an essential element for this system. For this, this subject has been proposed to help discover the properties of a photovoltaic cell. In addition, this study makes it possible to evaluate the performance of the electrical system for a Nano-satellite. In this context, it is necessary to model the PV cell (single diode model and double diode model) using MATLAB software. Thereafter, choose an optimization algorithm in order to identify the unknown parameters of the PV cell models.

Keywords:

Nano-satellite

PV cell

Modelization

Optimization algorithm

نظام الطاقة الكهربائية مسؤول عن توليد وتخزين الطاقة المطلوبة للأنظمة الفرعية والحمولات في المركبات الفضائية. تعتبر الخلية الكهروضوئية عنصرًا أساسيًا لهذا النظام. لهذا ، تم اقتراح هذا الموضوع للمساعدة في اكتشاف خصائص الخلية الكهروضوئية. بالإضافة إلى ذلك ، تتيح هذه الدراسة تقييم أداء النظام الكهربائي للقرم الصناعي. في هذا السياق ، من الضروري برمجة الخلية الكهروضوئية (نموذج الصمام الثنائي المزدوج و نموذج الصمام الثنائي المفرد) باستخدام برنامج MATLAB.

بعد ذلك ، اختيار خوارزمية التحسين من أجل تحديد المعلمات الغير المعروفة لنماذج الخلية الكهروضوئية.

الكلمات المفتاحية :

الأقمار الصناعية

خلية كهروضوئية

البرمجة

خوارزمية التحسين

Sommaire

Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	i
Sommaire	iv
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xii
Liste des symboles	xiii
Liste des Abréviations	xvii
Introduction générale	1

Chapitre I

Généralité sur le système PV spatiale.

I.1 Introduction	5
I.2 L'environnement spatial	6
I.3 L'Energie solaire	7
I.3.1 L'énergie solaire thermique	8
I.3.2 L'énergie solaire photovoltaïque	8
I.4 L'effet photovoltaïque	9
I.5 Les panneaux solaires d'un satellite	10

I.6 Les cellules photovoltaïques	11
I.6.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	13
I.6.2 Les différents types de cellules photovoltaïques	13
• Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe	13
• Les cellules photovoltaïques en silicium Polycristallin	14
• Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin	15
• Les cellules photovoltaïques organiques	15
• Les cellules photovoltaïques à pérovskites	16
I.6.3 Caractéristiques des cellules et des modules photovoltaïques	18
• Le rendement	18
• capacité de production	19
• La tension et le courant	19
• La puissance	20
• La durée de vie du panneau solaire photovoltaïque	20
I.7 Regroupement des cellules solaires	20
I.7.1 Regroupement en série	21
I.7.2 Regroupement en parallèle	22
I.7.3 Regroupement Mixte (série & parallèle)	24
I.8 L'effet de température sur la cellule PV	26
I.9 Influence de l'éclairement	27
I.10 Le système PV autonome	29

I.10.1 Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage	30
I.10.2 Systèmes photovoltaïques autonomes sans stockage	30
I.11 Conclusion	31

Chapitre II :

Modélisation de système PV.

II.1 Introduction	33
II.2 Modélisation de module PV	33
II.2.1 Modèle à une Seule Diode (MSD)	33
II.2.2 Modèle à double diode (MDD)	35
II.2.3 Modèle Bishop	36
II.2.4 Modèle SANDIA	38
II.3 Fonction de coût	40
II.3.1 Fonction de coût pour le modèle MSD	41
II.3.2 Fonction de coût pour le modèle MDD	41
II.4 Algorithme de Pollinisation des Fleurs (FPA)	41
II.4.1 FPA dans le contexte de l'optimisation	42
II.4.1.1 Pollinisation biotique/croisée	42
II.4.1.2 Pollinisation abiotique/ autopollinisation	43
II.4.1.3 Constance de la fleur	43

II.4.2 Les lois fondamentales du FPA	45
II.4.2.1 Recherche globale de FPA (Biotique)	46
II.4.2.2 Recherche locale de FPA (Abiotique)	47
II.4.2.3 Probabilité de commutation en FPA	47
II.5 Conclusion	50

Chapitre III :

Extraction des paramètres d'une cellule PV.

III.1 Introduction	52
III.2 Mesure de caractéristique I-V	52
III.3 L'identification des paramètres des modèles	56
• Firefly Algorithm	57
• Simulated Annealing Algorithm	58
III.3.1 Modèle à une seule diode (MSD)	58
III.3.2 Modèle à double diode (MDD)	62
III.4 a variation des erreurs	65
III.5 Conclusion	66
Conclusion générale	67
Références	70

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 Satellite de Télécommunication.	5
Figure I.2 L'environnement spatial	7
Figure I.3 L'énergie solaire PV	9
Figure I.4 L'effet photovoltaïque	10
Figure I.5 Les panneaux solaires d'un satellite	11
Figure I.6 La composition d'un panneau solaire	11
Figure I.7 Une cellule photovoltaïque	12
Figure I.8 Composition d'une cellule photovoltaïque	12
Figure I.9 Cellules photovoltaïques en silicium amorphe	14
Figure I.10 Les cellules en silicium polycristallin	14
Figure I.11 Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin	15
Figure I.12 Les cellules photovoltaïques organiques	16
Figure I.13 Les cellules photovoltaïques à pérovskites	16
Figure I.14 Courbe courant-tension (I-V) d'une cellule PV	19
Figure 1.15 Caractéristique courant tension de Ns cellule en série	21
Figure I.16 Schéma de groupement des cellules en série	22
Figure 1.17 Caractéristique courant tension de Np cellules en parallèles	23

Figure 1.18 Schéma de groupement des cellules en parallèle	23
Figure 1.19 Sous-station photovoltaïque formée d'un groupement de Nms modules série et de Nbp branches parallèles	25
Figure 1.20 Caractéristique résultante du regroupement mixte	25
Figure 1.21 Effet de la température sur la courbe I(V) d'une cellule PV	26
Figure 1.22 Effet de la température sur la courbe P(V) d'une cellule PV	27
Figure 1.23 Effet de l'éclairement sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV	28
Figure 1.24 Effet de l'éclairement sur la courbe $P_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV	28
Figure 1.25 Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque	29
Figure 1.26 Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage	30
Figure 1.27 Schéma de principe d'un système PV autonome sans stockage	31

Chapitre II

Figure II.1 Circuit électrique équivalent d'un modèle à une Seule Diode (MSD) pour une cellule PV	34
Figure II.2 Circuit électrique équivalent du modèle à double diode pour une cellule PV	35
Figure II.3 Schéma équivalent du modèle de Bishop	37
Figure II.4 Caractéristique I-V d'une cellule PV simulée à base du modèle de Bishop	38
Figure II.5 L'organigramme de l'algorithme FPA	48

Chapitre III

Figure III.1 Schéma synoptique pour l'acquisition de données des caractéristiques I-V	53
Figure III.2 Schéma synoptique du processus d'optimisation	54
Figure III.3 Données mesurées et simulées avec MSD pour cellule de type ISOFOTON 106.	60
Figure III.4 Données mesurées et simulées avec MSD pour cellule de type CONDOR 250P	60
Figure III.5 Données mesurées et simulées avec MSD pour cellule de type KYOCERA 125	61
Figure III.6 Données mesurées et simulées avec MDD pour cellule de type ISOFOTON 106	63
Figure III.7 Données mesurées et simulées avec MDD pour cellule de type CONDOR 250P	64
Figure III.8 Données mesurées et simulées avec MDD pour cellule de type KYOCERA 125	64
Figure III.9 Les courbes de la variation des erreurs obtenues par SA utilisant le MSD	65
Figure III.10 Les courbes de la variation des erreurs obtenues par FA utilisant le MSD	65
Figure III.11 Les courbes de la variation des erreurs obtenues par FPA utilisant le MSD	66

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Classification de différents types de cellules photovoltaïques	17
--	----

Chapitre II

Tableau II.1 Pollinisation et ses composants d'optimisation	44
---	----

Chapitre III

Tableau III.1 Paramètres de l'algorithme FPA	54
--	----

Tableau III.2 L'espace de recherche des paramètres	55
--	----

Tableau III.3 Les paramètres électriques aux conditions d'essai normalisées (STC) pour les modules PV utilisés	56
--	----

Tableau III.4 Les résultats obtenus par les trois algorithmes appliqués sur le MSD	59
--	----

Tableau III.5 Les résultats obtenus par les trois algorithmes dans le cas de MDD	62
--	----

Liste des symboles

E_{ph} : Energie de photon.

η_{STC} : Le rendement de la cellule photovoltaïque ;

P_m : La puissance produite par le générateur PV ;

E_{STC} : L'éclairement absorbé par la cellule ;

$S_{cellule}$: La surface de la cellule.

V_{co} : La tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

I_{cc} : Courant court-circuit généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.

V_{opt} : tension optimale.

I_{opt} : courant optimal.

N_s : cellules montées en série.

V_{co} : tension fournie par une cellule.

V_s : la tension de sortie.

I_{ccNs} : La somme des tensions en circuit ouvert de $cccc$ cellules en série.

I_{cc} : Courant de court-circuit de N_s cellules en série.

N_p : cellules montées en parallèle.

I_{cc} : courant fourni par une cellule.

I_s : le courant de sortie.

V_{coNp} : Tension de circuit ouvert de N_p cellule en parallèle.

I : le courant produit par la cellule PV.

I_{ph} : le courant photo-généré.

I_d : le courant de diode.

I_{sh} : le courant de court-circuit (shunt).

K : la constante de Boltzmann.

q : la charge.

T_c : la température de la cellule.

n : le facteur d'idéalité de la diode.

I_0 : le courant de saturation dû à la diffusion et à la recombinaison.

I_{01} et I_{02} : les courants de saturation.

n_1 et n_2 : les facteurs d'idéalité de la première et la deuxième diode respectivement.

P_{mssp} : Puissance crête disponible aux bornes de la sous-station photovoltaïque.

V_{mssp} : La tension maximale.

I_{mssp} : Le courant maximal.

R_{mssp} : La résistance de charge optimale.

I : Courant de la cellule.

V : Tension de la cellule.

I_{ph} : Courant équivalent proportionnel à l'ensoleillement reçu par la cellule.

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

V_t = Tension thermique de la diode.

Q : la charge.

R_s : Résistance série de la cellule.

R_{sh} : Résistance shunt de la cellule.

K : Coefficient de réglage de Bishop.

n : Coefficient de réglage de Bishop.

V_b : Tension de claquage de la cellule.

φ : Rayonnement incident.

T_c : Température de la cellule.

AM : Nombre d'air-masse.

β : Angle d'incidence entre le rayonnement direct du soleil et la normale au plan du module PV.

$\varphi_{réf}$: Rayonnement de référence.

T_{ref} : Température de référence de la cellule.

f_1 : Fonction du nombre d'air-masse.

f_2 : Fonction de l'angle d'incidence du rayonnement sur le module PV.

I_{SCr} : Courant de court-circuit de référence.

V_{ocr} : Tension de circuit-ouvert de référence.

V_{MP_r} : Tension du point de puissance maximal de référence

I_{MP_r} : Courant du point de puissance maximal de référence

μ_{isc} : Coefficient de dépendance en température du courant de court-circuit

$\mu_{V_{oc}}$: Coefficient de dépendance en température du de la tension de circuit-ouvert

$\mu_{V_{mp}}$: Coefficient de dépendance en température de la tension de puissance maximale

μ_{Imp} : Coefficient de dépendance en température du courant de puissance maximal

C_0, C_1, C_2, C_3 : Coefficients déterminés expérimentalement.

Liste des Abréviations

MPP : (maximal power point) point de puissance maximale obtenue pour une tension et un courant optimaux.

RMSE : l'erreur quadratique moyenne.

MEAN : la valeur moyenne de toutes les erreurs obtenue

GPV : Générateur photovoltaïque

STD : L'écart type

MSD : modèle à seule diode.

MDD : modèle à double diode.

FPA : Algorithme de Pollinisation des Fleurs.

FA: Firefly Algorithm.

SA: Simulated Annealing Algorithm.

CDER : Centre de développement des Energies Renouvelables.

GEWA : Algorithme de marcheur évolutif généralisé

Introduction Générale.

Introduction générale

L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non polluante, et son utilisation offre un approvisionnement en énergie inépuisable [1]. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette transformation, qui est réalisé par le biais d'une cellule photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. L'énergie solaire est obtenue en convertissant la lumière solaire en énergie électrique à travers des cellules photovoltaïques ; Ces cellules sont caractérisées par des paramètres électriques selon le modèle choisi. Un générateur photovoltaïque est un module photovoltaïque qui fonctionne comme un générateur électrique de courant continu constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques montées entre elles électriquement soit en série ou en parallèles afin d'obtenir des caractéristiques tel que la tension, le courant et la puissance. Le photovoltaïque se présente donc comme l'alternative possible aux énergies développées jusqu'alors pour les sites isolés.

La modélisation photovoltaïque passe nécessairement par un choix judicieux de circuits équivalents pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque [2]. La modélisation des cellules solaires implique principalement la formulation de la relation courant tension (IV). La détermination des paramètres, de cette dernière, joue un rôle important dans la modélisation précise des cellules solaires. Plusieurs travaux de recherche ont été consacrés à la modélisation et à l'extraction des paramètres des modules PV.

L'optimisation joue un rôle important dans la recherche opérationnelle, dans les mathématiques appliquées, en analyse et en statistique pour l'estimation du maximum de vraisemblance d'une distribution, pour la recherche de stratégies dans le cadre de la théorie des jeux, ou encore en théorie du contrôle et de la commande [3]. L'optimisation détermine la solution la mieux adaptée à un problème donné circonstancié.

Dans ce manuscrit, nous avons tout d'abord présenté dans **le premier chapitre** des généralités et des notions sur l'énergie solaire et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ainsi que les différents types de Cellule, ensuite les caractéristiques de ces cellules et leurs regroupements. Nous avons étudié aussi l'influence de la température, l'éclairement, la résistance série et la résistance parallèle sur l'énergie produite par la cellule PV, ainsi que l'influence de l'association de cellule (série, parallèle et série / parallèle) sur l'énergie produite.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation photovoltaïque, nous avons également abordé les principes de la conversion électrique (modèle réel, modèle idéal, modèle à diode unique, modèles à deux diodes) et nous avons ajouté d'autres modèles. Enfin nous avons abordé l'Algorithme de Pollinisation des Fleurs, ces types et les lois fondamentales de cet algorithme.

Le troisième chapitre dépend de la stratégie de contrôle utilisant l'algorithme. Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour simuler caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque puis Identification des paramètres des modèles.

Chapitre I

Généralité sur le système PV spatiale.

I.1 Introduction

Le système d'alimentation est l'un des sous-systèmes du satellite. Les engins spatiaux utilisent des panneaux solaires pour produire de l'énergie. Ils sont montés sur les satellites de différentes manières : soit directement sur le corps du satellite, soit à l'extérieur sous forme de volets directionnels ; ces panneaux sont constitués de cellules photovoltaïques. L'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner l'équipement sur un satellite provient principalement de cellules solaires, qui convertissent la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les systèmes de génération et de contrôle d'énergie sur un satellite représentent une grande partie de son poids, souvent 10 à 20% du poids sec total [4].



Figure I.1 Satellite de Télécommunication.

Ce chapitre donne des notions sur l'énergie solaire. Les principes du photovoltaïque, la chaîne photovoltaïque et ses éléments, et les différents types de systèmes photovoltaïques sont introduits.

I.2 L'environnement spatial

On pense généralement que l'espace est entièrement vide. Les larges distances qui séparent les étoiles et les planètes sont remplies d'énormes quantités de gaz et de poussière diffuses. Même les parties les plus vides de l'espace contiennent au moins quelques centaines d'atomes ou de molécules par mètre cube. L'espace est aussi rempli de nombreuses formes de rayonnements. La majeure partie de ces rayonnements infrarouges et ultra-violetts provient du Soleil.

La météo spatiale fait référence aux conditions environnementales de la magnétosphère, de l'ionosphère et de la thermosphère terrestres dues au Soleil et au vent solaire qui peuvent influencer sur le fonctionnement et la fiabilité des systèmes et services spatiaux et terrestres ou menacer les biens ou la santé humaine. Les effets des conditions météorologiques spatiales sur le sol peuvent inclure des dommages et une perturbation des réseaux de distribution d'énergie, et une dégradation des communications radio.

Environnement auquel est soumis un engin spatial dans l'espace extra-atmosphérique et qui est caractérisée principalement par l'impesanteur, le vide poussé, des échanges thermiques essentiellement radiatifs et la présence de rayonnements particuliers.



Figure I.2 L'environnement spatial.

I.3 L'Énergie solaire

Par définition, l'énergie solaire est l'énergie du soleil. C'est gratuit, inépuisable, inépuisable et disponible dans le monde entier. Synonyme d'écologie, cette source d'énergie est plus propre, c'est-à-dire qu'elle n'émet aucun gaz à effet de serre. Depuis l'Antiquité, l'énergie du soleil a été utilisée pour fournir aux maisons de la chaleur et autant de lumière naturelle que possible. Tout simplement, la technologie prend en compte la structure, l'orientation et les matériaux du bâtiment afin d'être chauffé et éclairé par l'énergie solaire passive.

Le rayonnement solaire est une source d'énergie renouvelable essentielle ; une partie de ce rayonnement peut être utilisée pour produire de la chaleur (énergie thermique) ou de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque.

I.3.1 L'énergie solaire thermique

Ce type d'énergie est produit par des panneaux solaires thermiques placés sur le toit de la maison pour capter la chaleur du soleil, les panneaux solaires thermiques contiennent des fluides caloporteurs. Une fois chauffés par le soleil, ceux-ci chauffent à leur tour le ballon d'eau chaude. L'énergie solaire thermique ainsi obtenue peut être utilisée de différentes manières : chauffage solaire, chauffe-eau, cuisinières, etc.

I.3.2 L'énergie solaire photovoltaïque

Si l'énergie solaire thermique est obtenue à partir de la chaleur du soleil, l'énergie solaire photovoltaïque est obtenue à partir de l'énergie du rayonnement solaire. En d'autres termes, les panneaux photovoltaïques, généralement installés sur les toits, collectent les photons du soleil et les convertissent en électricité. Ces panneaux photovoltaïques sont constitués de couches de cellules empilées, l'une chargée négativement et l'autre chargée positivement. Une fois qu'un photon traverse ces couches, il génère une tension. Il ne reste plus qu'à connecter un fil à la borne négative et l'autre à la borne positive pour utiliser l'électricité générée. Fondamentalement, le solaire photovoltaïque fonctionne comme une batterie.

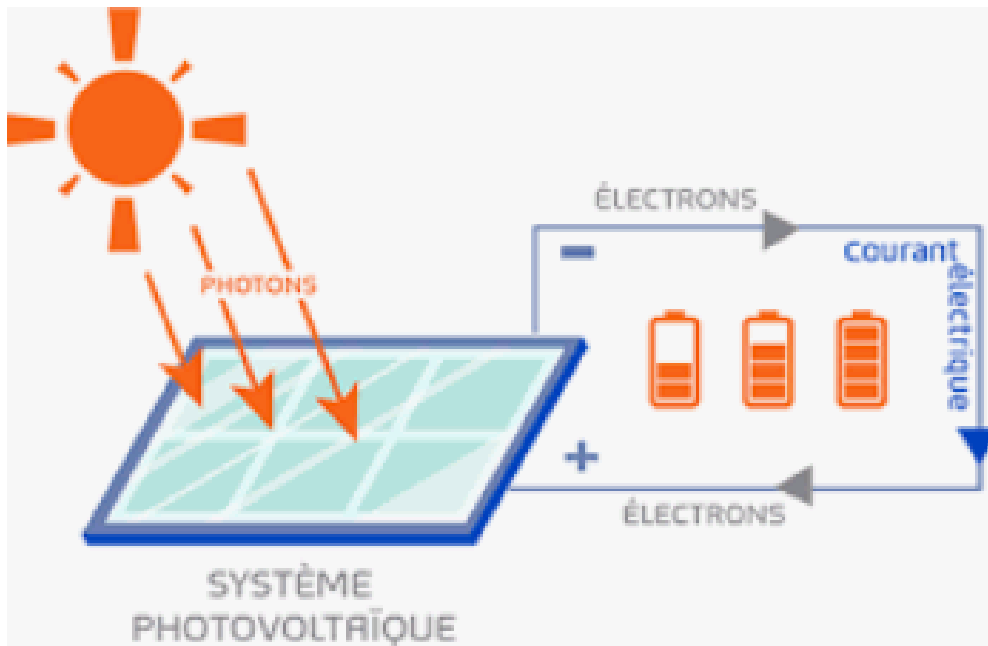


Figure I.3 L'énergie solaire PV [5].

I.4 L'effet photovoltaïque

Découvert par le Français Edmond Becquerel en 1839, l'effet photovoltaïque fait référence à la capacité de certains matériaux, notamment les semi-conducteurs, à convertir les différents composants de la lumière solaire (mais pas sa chaleur) directement en électricité [6].

Il a été montré que le rayonnement solaire est constitué de photons, chacun porteur d'une énergie E_{ph} , qui répond elle-même à la relation [7] :

$$E_{ph} = h \times (c/\lambda) \quad (1.1)$$

L'effet photovoltaïque représente donc la seule alternative existante à la production d'énergie mécanique, car toutes les autres technologies, renouvelables ou non, utilisent des générateurs tournants (alternateurs ou génératrices) qui peuvent être actionnés de diverses manières : Vapeur, vent, eau, courants marins, etc... [6].

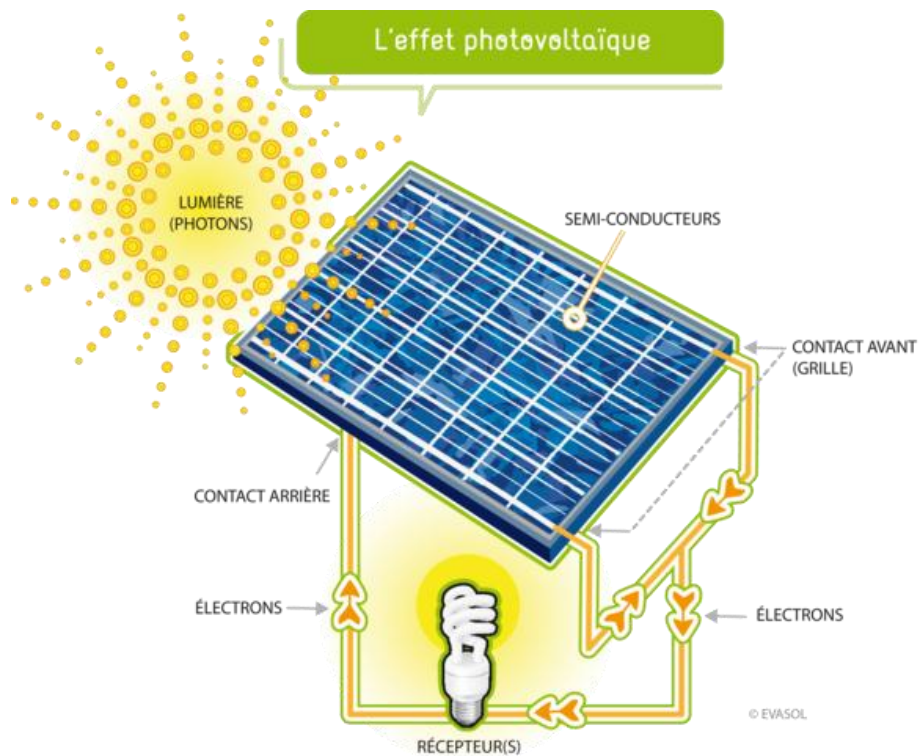


Figure I.4 L'effet photovoltaïque [8].

I.5 Les panneaux solaires d'un satellite

De nombreux satellites possèdent des panneaux solaires photovoltaïques leur permettant de convertir l'énergie solaire en électricité. Le panneau solaire photovoltaïque est utile pour devenir autonome en électricité puisqu'il est capable de produire de l'électricité. Les cellules photovoltaïques convertissent les rayons du soleil en électricité en captant les photons présents dans la lumière.

La composition du panneau solaire comprend plusieurs parties. La partie mécanique est un ensemble de cellules photovoltaïques encapsulées dans de l'EVA, un châssis en aluminium, une coque arrière en Tedlar, une plaque de verre côté soleil. Une partie électrique permet de connecter le panneau solaire à l'installation.



Figure I.5 Les panneaux solaires d'un satellite.

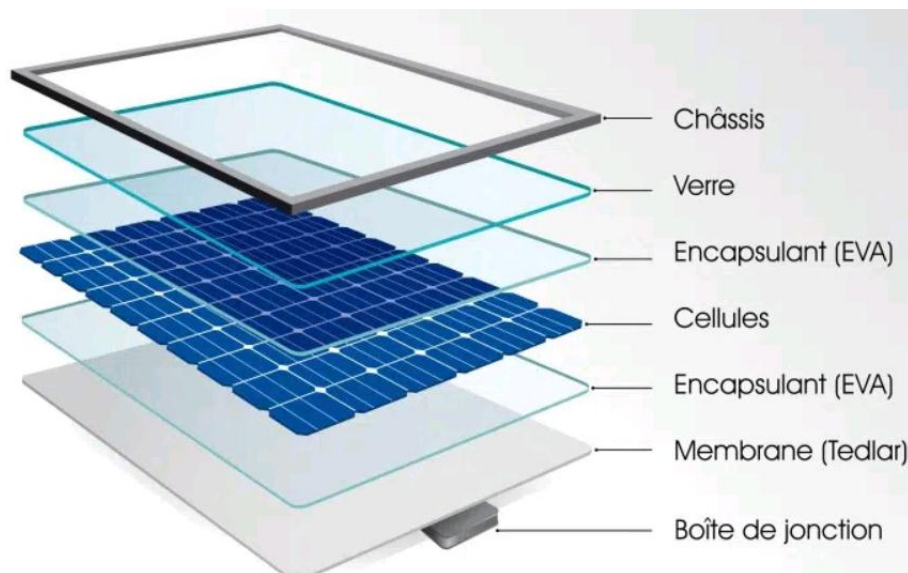


Figure I.6 La composition d'un panneau solaire.

I.6 Les cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des composants électroniques qui utilisent la lumière du soleil pour produire de l'électricité.

« Elles sont très fines (environ 200 μm), il y a 60 à 72 cellules photovoltaïques sur chaque panneau solaire » [9].

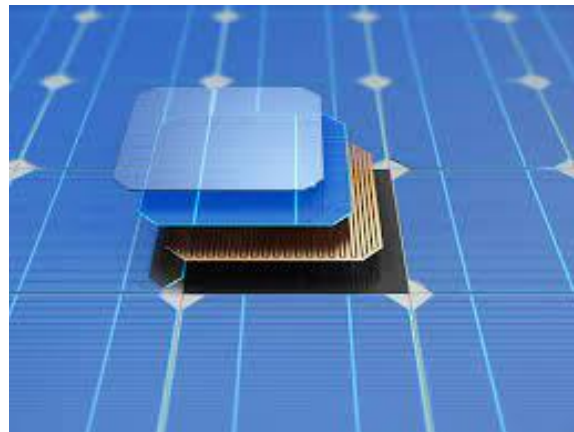


Figure I.7 Une cellule photovoltaïque.

La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans **la figure I.8** ci-dessous.

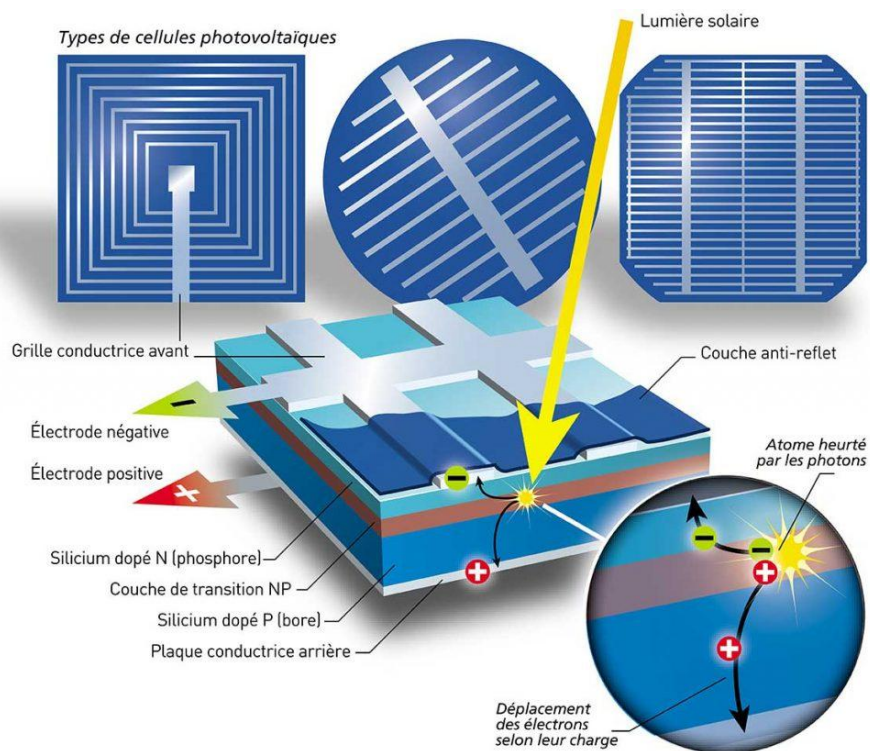


Figure I.8 Composition d'une cellule photovoltaïque [10].

I.6.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les semi-conducteurs avec des côtés négatifs et positifs, tels que le silicium, sont exposés. En frappant des atomes de silicium, les photons mettent en mouvement des électrons, et ces électrons se déplacent dans des directions différentes en fonction de leur charge. C'est ce mouvement d'électrons qui produit le courant.

Lorsqu'un photon traverse la jonction, il dépose son énergie et provoque le transfert d'électrons d'une région négative appelée n vers une région positive appelée p. Le courant électrique est obtenu en connectant chacune des deux faces du sandwich à un fil. [11]

En raison de ce système positif et négatif, les électrons se déplacent naturellement entre les deux pour rééquilibrer la charge. Cela génère du courant.

I.6.2 Les différents types de cellules photovoltaïques

Différents types de cellules photovoltaïques ont été mis au point. Elles fonctionnent globalement de la même manière, elles ont chacune leurs propres particularités.

- **Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe :**

Ces cellules photovoltaïques génèrent de l'électricité même sous un éclairage faible, produisent des tensions de circuit supérieures au silicium cristallin et sont les moins chères à fabriquer.

C'est une technologie utilisée depuis longtemps, sous forme souple ou rigide. Mais leur production reste faible.



Figure I.9 Cellules photovoltaïques en silicium amorphe [12].

- **Les cellules photovoltaïques en silicium Polycristallin :**

Les cellules de silicium polycristallin sont constituées de cristaux d'orientations différentes et sont principalement utilisées pour fabriquer des panneaux solaires photovoltaïques pour les grandes centrales solaires ou les petits appareils électroménagers. Elles offrent un rendement correct.

La durée de vie des cellules photovoltaïques en silicium polycristallin peut atteindre des décennies, mais leurs performances déclinent considérablement après 25 ans d'utilisation. [10]



Figure I.10 Les cellules en silicium polycristallin [9].

- **Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin :**

Les cellules en silicium monocristallin sont formées d'un seul tenant. Le silicium se forme en un seul gros cristal, qui est ensuite tranché en fines tranches pour obtenir des cellules photovoltaïques bleues uniformes. La fabrication de ces cellules est la plus difficile.

En revanche, le photovoltaïque monocristallin offre de meilleurs rendements que le polycristallin, jusqu'à 25%, mais nécessite également une bonne exposition au soleil. Leur espérance de vie est d'environ 40 ans. [10]



Figure I.11 Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin [13].

- **Les cellules photovoltaïques organiques :**

Les cellules organiques ne sont pas des minéraux semi-conducteurs comme le silicium. Au lieu de cela, elles sont basées sur des molécules ou des polymères de chimie organique. [9]

Il s'agit simplement d'utiliser des composés organiques pour fabriquer des cellules solaires peu coûteuses, légères, flexibles ou rigides. La résistance de ces

Batteries en plastique à la lumière et à l'humidité semble également peu concluante.

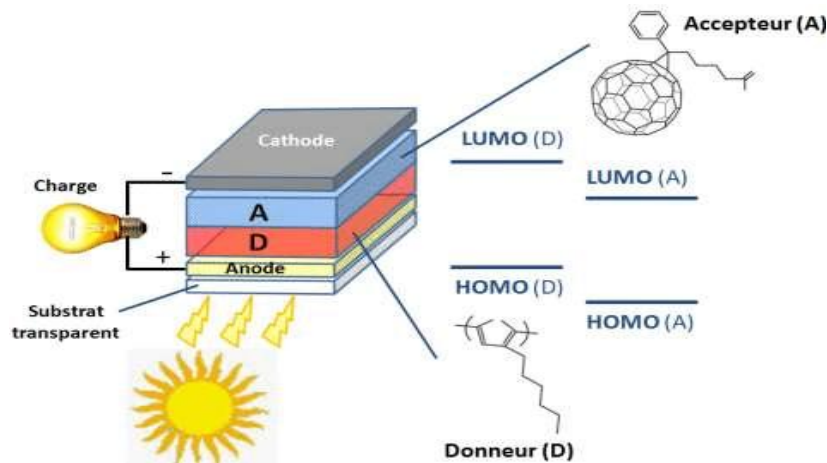


Figure I.12 Les cellules photovoltaïques organiques [12].

- **Les cellules photovoltaïques à pérovskites :**

Le développement des cellules photovoltaïques en pérovskite a commencé à la fin des années 2000, un nouveau type de cellule basé sur un matériau hybride : une partie est organique et l'autre partie est inorganique. Ces cellules présentent un intérêt croissant car elles peuvent être combinées avec des cellules au silicium existantes dans l'architecture pour atteindre des rendements plus élevés. [7]

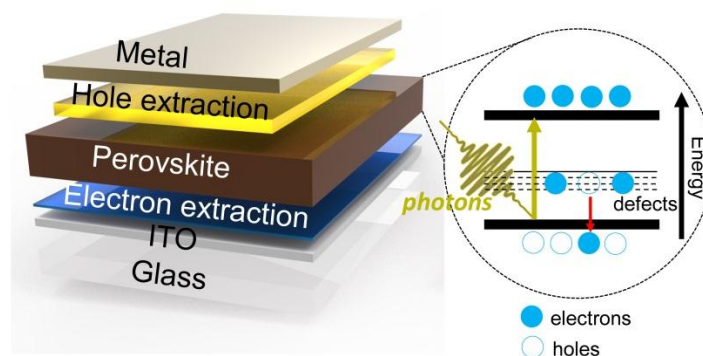


Figure I.13 Les cellules photovoltaïques à pérovskites [14].

Le tableau ci-dessous résume les avantages des différents types de cellules photovoltaïques et le rendement de chaque type.

Cellules PV	Rendement	Avantages
Cellules photovoltaïques en silicium amorphe	Entre 6 % et 9 %.	<ul style="list-style-type: none"> _ Une technologie éprouvée et abordable. – Une utilisation sous forme souple ou rigide. – Fonctionne même avec une faible luminosité
Cellules photovoltaïques en silicium polycristallin	Entre 13 % et 18 %	Meilleur rapport rendement/prix du marché
Cellules photovoltaïques en silicium monocristallin	Entre 16 % et 24 %	<ul style="list-style-type: none"> – Un excellent rendement. – Un aspect uniforme souvent jugé plus esthétique que le polycristallin.
Cellules photovoltaïques organiques	MAX 25 % (en laboratoire)	<ul style="list-style-type: none"> – Une technologie potentiellement peu coûteuse. – Des matériaux de fabrication légers et largement disponibles.
Cellules photovoltaïques à pérovskites	MAX 25 % (en laboratoire)	<ul style="list-style-type: none"> – Un rendement prometteur. – Un coût de fabrication abordable.

Tableau I-1 : Classification de différents types de cellules photovoltaïques.

I.6.3 Caractéristiques des cellules et des modules photovoltaïques

Les caractéristiques des panneaux solaires photovoltaïques varient selon les panneaux monocristallins, polycristallins ou amorphes.

- **Le rendement**

Le rendement d'une cellule photovoltaïque correspond au rapport entre la quantité d'énergie lumineuse convertie en énergie électrique et la quantité d'énergie captée par le système. C'est donc un pourcentage qui permet d'évaluer l'efficacité des cellules photovoltaïques. Plus ce pourcentage est élevé, plus la batterie peut produire de puissance.

Le rendement dépend plusieurs facteurs [15] :

- Réflexion à la surface.
- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

$$\eta_{STC} = \frac{P_m}{E_{STC} \times S_{cellule}} \quad (1.2)$$

- η_{STC} : Le rendement de la cellule photovoltaïque ;
- P_m : La puissance produite par le générateur PV ;
- E_{STC} : L'éclairement absorbé par la cellule ;
- $S_{cellule}$: La surface de la cellule [m²].

- **capacité de production**

La principale caractéristique d'un panneau solaire, se calcule en fonction du type de panneau. Elle se mesure en puissance de production d'énergie électrique.

- **La tension et le courant**

Les cellules photovoltaïques sont caractérisées par la courbe courant-tension (I-V) qui représente toutes les configurations électriques que peut prendre la cellule.

- V_{co} : La tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- I_{cc} : Courant court-circuit généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- MPP : (maximal power point) point de puissance maximal obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} .

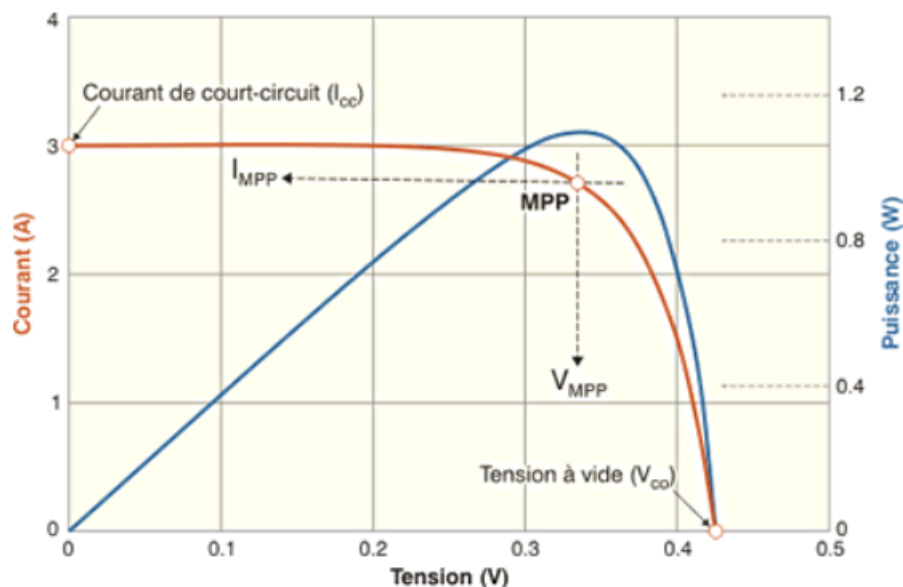


Figure I.14 Courbe courant-tension (I-V) d'une cellule PV [16].

- **La puissance**

La puissance des panneaux solaires photovoltaïques d'un fabricant est le résultat d'essais en laboratoire. Dans des conditions de test standard, ils sont "STC". Ils ont supposé une irradiance solaire de 1000 watts/mètre carré à 25°C [17].

- **La durée de vie du panneau solaire photovoltaïque**

La durée de vie consensuelle d'un panneau solaire est d'environ 30 ans. Durant cette période, le potentiel des installations solaires à produire de l'électricité a chuté de 100 % à 80 %. La caractéristique la plus fiable des panneaux solaires est cette longévité [17].

I.7 Regroupement des cellules solaires

Le générateur photovoltaïque GPV est composé d'un ou plusieurs modules photovoltaïques ; ces modules sont formés d'un assemblage série /parallèle de cellules PV. Le groupement série NS permet d'augmenter la tension de sortie ainsi que le groupement en parallèle NP permet d'augmenter le courant de sortie.

La relation entre le courant et la tension dans les modules PV, y compris Plusieurs cellules en série et en parallèle sont données par L'équation suivante : [18]

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q \left(\frac{V_{pv}}{N_s} + \frac{R_s I_{pv}}{N_p} \right)}{A K T} \right) - 1 \right] - \frac{\frac{N_{pv}}{N_s} V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (1.3)$$

I.7.1 Regroupement en série

L'association de (N_s) cellules dans (1.4) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Le même courant est ensuite passé à travers les cellules et les propriétés résultantes du groupement en série sont obtenues en additionnant la tension de base de chaque cellule. Cette équation résume les caractéristiques électriques d'une combinaison en série de cellules (N_s).

$$\left. \begin{aligned} V_s &= N_s \times V_{co} \\ I_{cc} N_s &= I_{cc} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

N_s : cellules montées en série

V_{co} : tension fournie par une cellule [V].

V_s : la tension de sortie [V].

$I_{cc} N_s$: La somme des tensions en circuit ouvert de ccc cellules en série [A].

I_{cc} : Courant de court-circuit de N_s cellules en série [A].

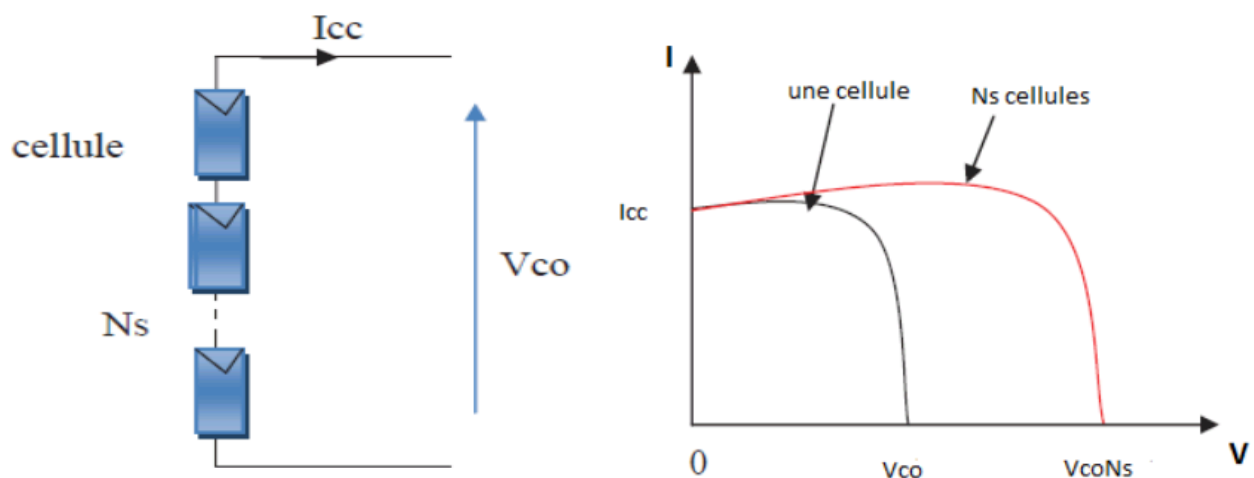


Figure 1.15 Caractéristique courant tension de N_s cellule en série [19].

La Figure I.15 montre les caractéristiques courant-tension d'une série de cellules photovoltaïques en série. Cette propriété du groupe est obtenue en multipliant le même courant, tension par N_s point par point, le groupe série fera passer courant à tension. Chacune des N_s cellules produit ce courant et cette tension.

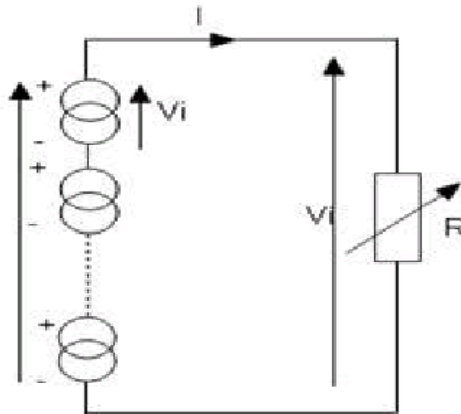


Figure I.16 Schéma de groupement des cellules en série [20].

La figure I.16 représente le Schéma électrique de groupement des cellules en série. Ce type de regroupement également permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque.

I.7.2 Regroupement en parallèle

Dans un groupe de cellules identiques en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et les caractéristiques finales du groupe sont obtenues par addition de courant. Le courant fourni à la charge peut être augmenté en connectant ou en plaçant plusieurs cellules en parallèle avec le module PV.

$$\left. \begin{aligned} I_s &= N_p \times I_{cc} \\ V_{coN_p} &= V_{co} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

N_p : cellules montées en parallèle

I_{cc} : courant fourni par une cellule

I_s : le courant de sortie

V_{coNp} : Tension de circuit ouvert de N_p cellule en parallèle

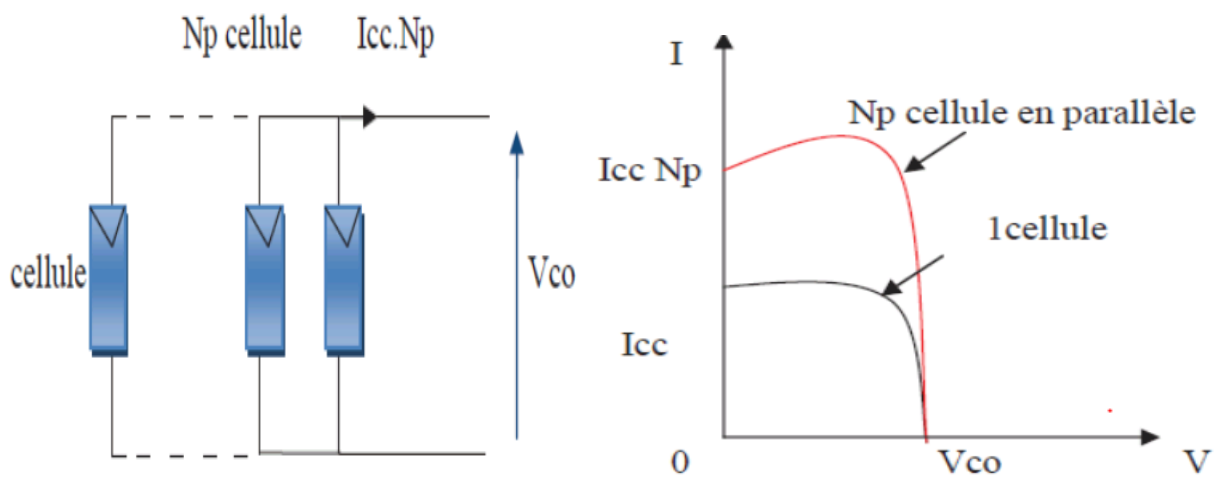


Figure 1.17 Caractéristique courant tension de N_p cellules en parallèles [19].

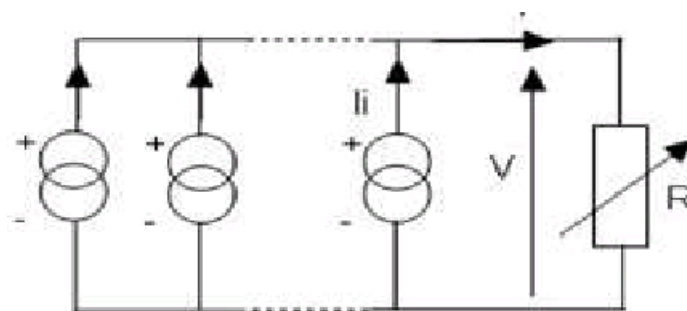


Figure 1.18 Schéma de groupement des cellules en parallèle [20].

I.7.3 Regroupement Mixte (série & parallèle)

Les générateurs photovoltaïques sont constitués d'un réseau série-parallèle de plusieurs modules photovoltaïques regroupés par des panneaux photovoltaïques. La combinaison de plusieurs modules sur le même plan s'appelle un panneau, et un champ photovoltaïque est un groupe de panneaux photovoltaïques installés en série et en parallèle pour obtenir une tension et un courant plus élevés.

Les caractéristiques de la sous-station sont : [21]

- Puissance crête disponible aux bornes de la sous-station photovoltaïque
P_{mssp}

$$P_{mssp} = N_{ms} \times N_{bp} \times P_m \quad (1.6)$$

- La tension maximale V_{mssp}

$$V_{mssp} = N_{ms} \times V_m \quad (1.7)$$

- Le courant maximal I_{mssp}

$$I_{mssp} = N_{bp} \times I_m \quad (1.8)$$

- La résistance de charge optimale R_{mssp}

(1.9)

$$R_{mssp} = \left(\frac{N_{ms}}{N_{bp}} \right) \times R_m$$

La figure I.19 représente un groupement de N_{ms} en série dans une branche et N_{bp} branche en parallèle.

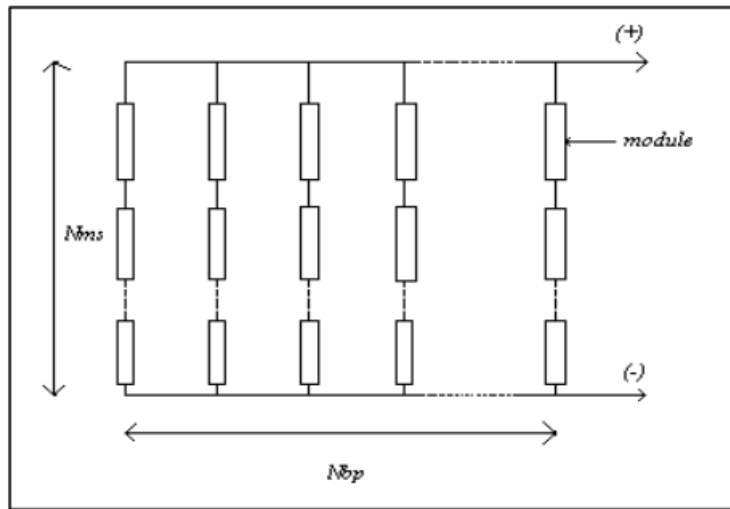


Figure 1.19 Sous-station photovoltaïque formée d'un groupement de N_{ms} modules série et de N_{bp} branches parallèles [21].

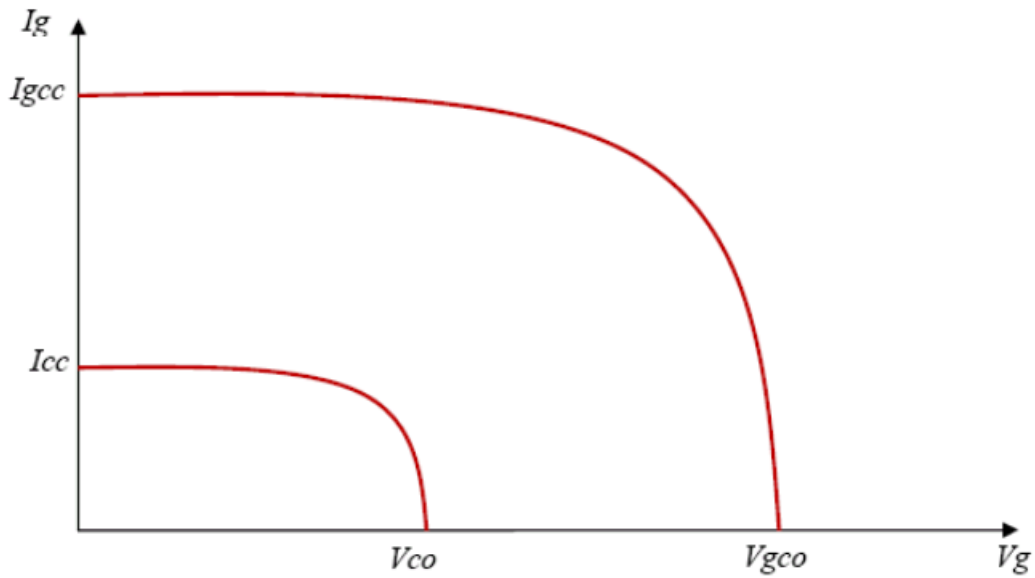


Figure 1.20 Caractéristique résultante du regroupement mixte [19].

I.8 L'effet de température sur la cellule PV

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires lorsqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. Les paramètres caractéristiques des cellules solaires, sont tous affectés par la température.

Afin de pouvoir étudier l'effet de la température sur les paramètres de sortie des panneaux photovoltaïques, nous avons fixé l'éclairement à ($G=1000 \text{ W/m}^2$) et tracé les courbes pour des différentes températures (25°C , 50°C , 75°C , 100°C). Les paramètres de la cellule considérés sont : [18]

[$R_s= 0.01\Omega$; $R_p= 4 \Omega$; $I_{cc} =2.55 \text{ A}$; $V_{co}= 0.6 \text{ V}$; $A= 1.6$]

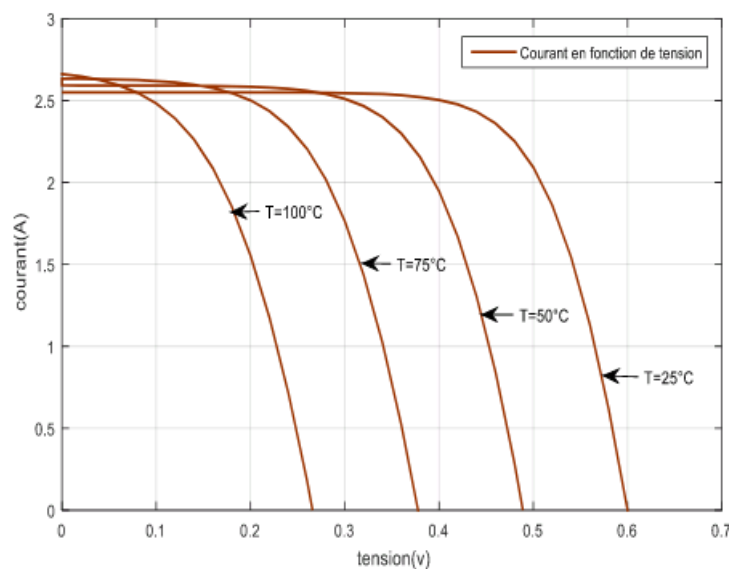


Figure 1.21 Effet de la température sur la courbe I(V) d'une cellule PV [18].

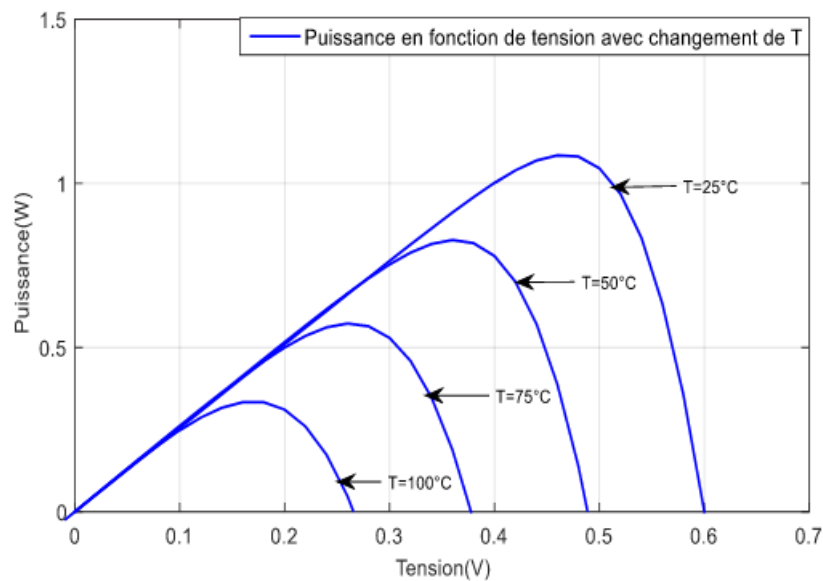


Figure 1.22 Effet de la température sur la courbe P(V) d'une cellule PV [18].

On peut voir qu'une augmentation de la température entraînera un courant de court-circuit, et on observe que la température a un effet négatif sur la tension en circuit ouvert.

I.9 Influence de l'éclairement

L'éclairement a un effet particulier sur le rendement électrique : à une température donnée, les caractéristiques courant-tension des cellules photovoltaïques varient avec l'éclairement énergétique, l'augmentation de l'éclairement est proportionnelle à l'intensité du courant de court-circuit.

On a maintenu une température constante de 25°C pour différents éclairements :

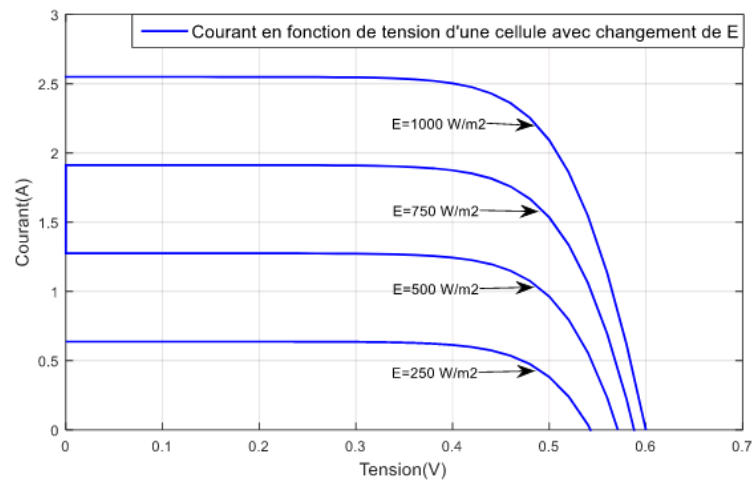


Figure 1.23 Effet de l'éclairement sur la courbe $I_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV [18].

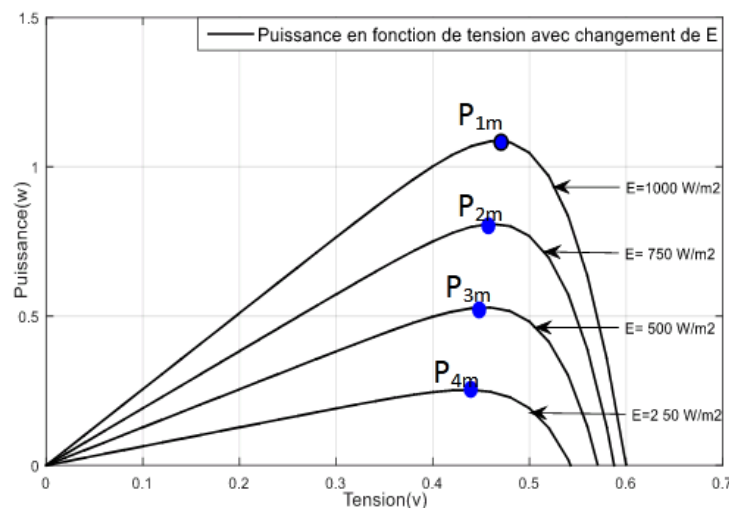


Figure 1.24 Effet de l'éclairement sur la courbe $P_{pv}(V_{pv})$ d'une cellule PV [18].

Évidemment, le courant varie beaucoup plus, plus l'éclairement baisse, plus le courant baisse, et comme la puissance est proportionnelle au courant, plus l'éclairement baisse, plus la détérioration est évidente ; cependant, la tension change légèrement.

I.10 Le système PV autonome

Appelé aussi "kit solaire pour habitat isolé", Dans les systèmes solaires photovoltaïques non connectés au réseau, on peut distinguer les systèmes autonomes qui fonctionnent sans autre source d'énergie que le photovoltaïque, et les systèmes hybrides qui utilisent une ou plusieurs sources d'énergie complémentaires. Les systèmes photovoltaïques autonomes sont utilisés pour alimenter les entreprises isolées ; ils sont utiles dans plusieurs domaines ; lorsque les batteries sont chargées à leur capacité maximale, la puissance produite doit être évacuée par délestage pour éviter tout dommage.

Un système PV autonome est composé de : [22]

- Générateur photovoltaïque.
- Moyen de stockage.
- Convertisseur continu/continu CC.
- Transformateur.
- Module de contrôle pour la charge des batteries et l'acquisition des différentes grandeurs physiques du système.

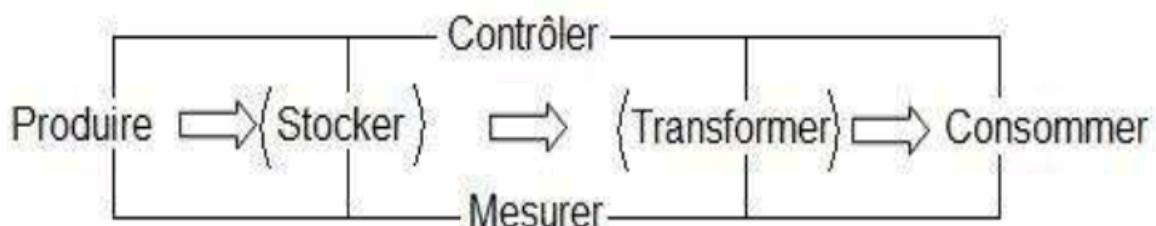


Figure 1.25 Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque [22].

On peut distinguer les systèmes fonctionnant sans stockage et les systèmes avec stockage par :

I.10.1 Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage

Le système le plus répandu, Les composants de stockage peuvent stocker de l'énergie et la restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (durant la nuit). La nuit, le récepteur est alimenté par des piles. Le limiteur de décharge protège la batterie lors d'une décharge profonde. En présence d'un récepteur fonctionnant en courant alternatif, l'onduleur autonome convertit la tension continue en tension alternative lui permettant de fournir de l'énergie.

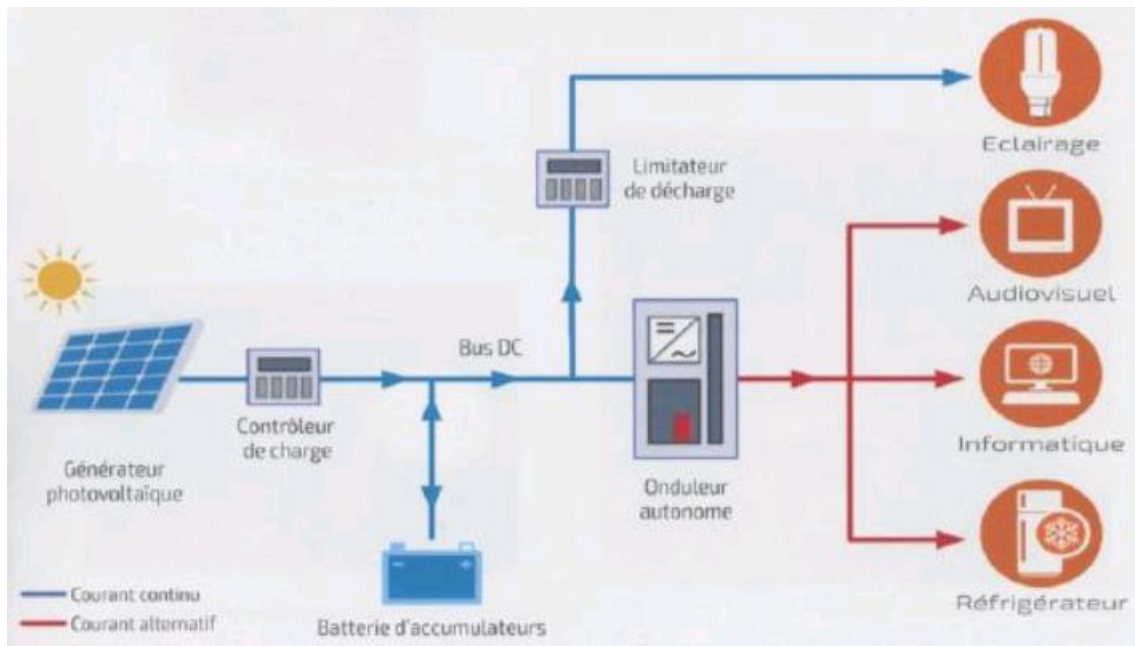


Figure 1.26 Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage [23]

I.10.2 Systèmes photovoltaïques autonomes sans stockage

Les principales applications photovoltaïques fonctionnant au soleil sont : le pompage, la ventilation, la production de froid, le dessalement, etc. Les générateurs photovoltaïques fournissent de l'énergie pour une utilisation soit directement, soit via un convertisseur DC/DC. Courant continu (DC/DC) ou

Courant DC/AC. La puissance fournie lors de l'utilisation dépend de l'ensoleillement. Pendant la nuit, il n'est plus disponible et est donc fermé.

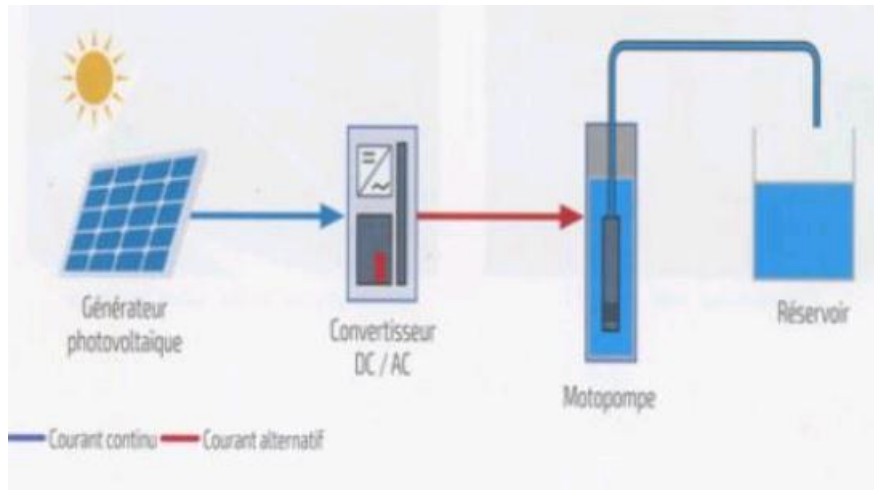


Figure 1.27 Schéma de principe d'un système PV autonome sans stockage [23]

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons couvert des informations générales sur l'énergie solaire photovoltaïque (lumière du soleil, effet photovoltaïque, cellules PV et ces propriétés, et les différentes technologies de cellules photovoltaïques, et à travers l'étude des types de groupement de cellules, nous avons montré comment augmenter le courant ou la tension, nous avons conclu l'impact de ce chapitre L'effet de la température et de l'éclairement sur l'efficacité du générateur ainsi que le système PV autonome.

Chapitre II

Modélisation de système PV.

II.1 Introduction

La modélisation d'un panneau photovoltaïque est l'étude des caractéristiques (tension-courant) et (tension- puissance) en fonction de la température et de l'irradiation. La modélisation des différents éléments d'un système PV est une étape indispensable qui doit précéder toute phase de dimensionnement, d'identification ou de simulation.

II.2 Modélisation de module PV

Il existe plusieurs modèles équivalents de cellule photovoltaïque [24], Pour un diagnostic de panne fiable au niveau du générateur photovoltaïque (GPV), un modèle décrivant le comportement de cellule photovoltaïque réelle devra meilleur score. Dans cette section on va étudier 4 types de modèle de cellule PV.

II.2.1 Modèle à une Seule Diode (MSD)

Le modèle simple/unique ou à une seule diode (MSD) donne une représentation simple de la réalité des cellules solaires. Comme le montre la figure (II.1), le circuit équivalent comprend une source de courant dont l'intensité est proportionnelle au rayonnement incident, une diode est connectée en parallèle et la résistance shunt R_{sh} représente le courant de fuite à la terre. En raison du flux de courant et des pertes internes, l'interconnexion entre les cellules est modulée par la résistance série R_s [25].

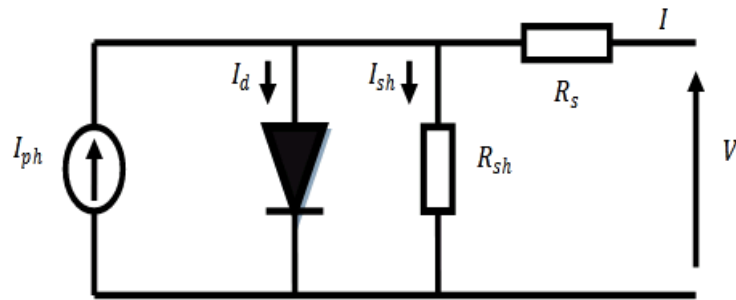


Figure II.1 Circuit électrique équivalent d'un modèle à une Seule Diode (MSD) pour une cellule PV.

Selon ce modèle électrique, les cellules solaires ont une caractéristique I-V non linéaire, qui représente le courant fourni par la cellule en fonction de la tension, comme décrit dans l'équation (2.1).

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nKT_c}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

I : le courant produit par la cellule PV

I_{ph} : le courant photo-généré

I_d : le courant de diode

I_{sh} : le courant de court-circuit (shunt)

K : la constante de Boltzmann

q : la charge

T_c : la température de la cellule

n : le facteur d'idéalité de la diode

I_0 : le courant de saturation dû à la diffusion et à la recombinaison

I_{ph} , I_0 , R_s , R_{sh} et n sont des paramètres inconnus (à identifier).

Sachant que :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.2)$$

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nKT_c}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

Le modèle à une seule diode ignore l'effet de recombinaison de la diode. Par conséquent, il fonctionne bien pour la simulation, mais n'est pas le modèle le plus précis. C'est pour ça nous préférons utiliser le modèle à deux diodes pour étudier les caractéristiques des cellules solaires aux points critiques.

II.2.2 Modèle à double diode (MDD)

Nous présenterons un modèle à deux diodes pour analyser l'effet de l'ombrage partiel sur la production d'énergie des panneaux photovoltaïques (PV) [26]. À cette fin, un modèle d'étude complet pour toutes les configurations de modules PV disponibles est présenté ci-dessous :

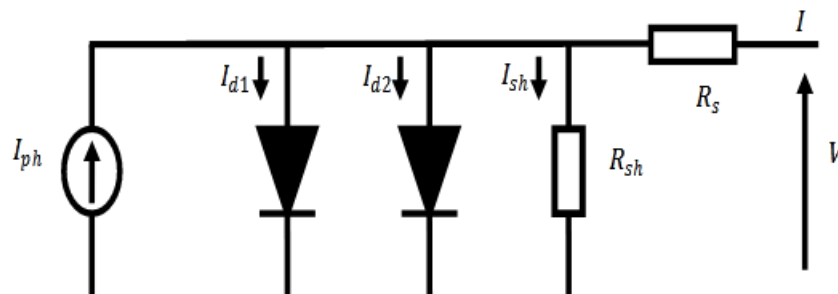


Figure II.2 Circuit électrique équivalent du modèle à double diode pour une cellule PV.

I_{01} et I_{02} : les courants de saturation.

n_1 et n_2 : les facteurs d'idéalité de la première et la deuxième diode respectivement.

I_{ph} , I_{01} , I_{02} , n_1 , n_2 , R_s et R_{sh} : des paramètres inconnus.

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{n_1 K T_c}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{n_2 K T_c}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

Le modèle à deux-diodes est représenté par une équation implicite du courant qui ne peut être résolue qu'à l'aide de méthodes itératives [23]. Le modèle à deux diodes est dérivé du même circuit équivalent que le modèle à une seule diode, la principale différence étant que le courant de recombinaison est divisé en I_{01} et I_{02} , qui représentent respectivement la recombinaison de surface et de masse.

II.2.3 Modèle Bishop

Le modèle Bishop est un modèle qui prend en compte l'effet d'avalanche de la cellule en ajoutant une diode au modèle, un multiplicateur non linéaire $M(V_1)$ en série avec la résistance shunt [25] comme indiqué dans la Figure II.3.

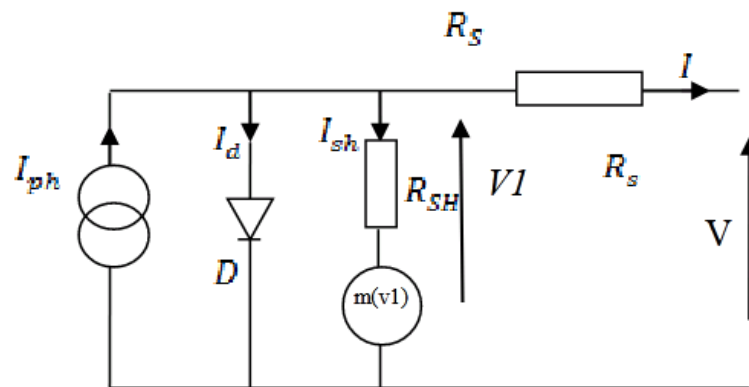


Figure II.3 Schéma équivalent du modèle de Bishop.

Ce dernier correspond au dernier terme de l'équation (2.6), qui donne la relation entre le courant (I) et la tension (V) de la cellule PV.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \left[1 + k \left(1 - \frac{V + R_s I}{V_b} \right)^{-n} \right] \quad (2.6)$$

Avec :

I : Courant de la cellule

V : Tension de la cellule

I_{ph} : Courant équivalent proportionnel à l'ensoleillement reçu par la cellule

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode

$V_t = a k_b T_c / q$: Tension thermique de la diode qui dépend de température de la Cellule T_c . Tandis que a , k_b et q sont respectivement le facteur d'idéalité de diode (1 à 2), la constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$) et la charge de l'électron ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

R_s : Résistance série de la cellule

R_{sh} : Résistance shunt de la cellule

K : Coefficient de réglage de Bishop (3,4 à 4)

n : Coefficient de réglage de Bishop (~ 0.1)

V_b : Tension de claquage de la cellule (-10 V à -30 V)

L'analyse de l'équation (2.6) est effectuée en utilisant la méthode de Newton Raphson. La figure II.4 montre les caractéristiques I-V de la batterie P-V obtenue à partir du modèle ci-dessus, dont la précision est vérifiée par comparaison avec les résultats des travaux dans le même cadre [28].

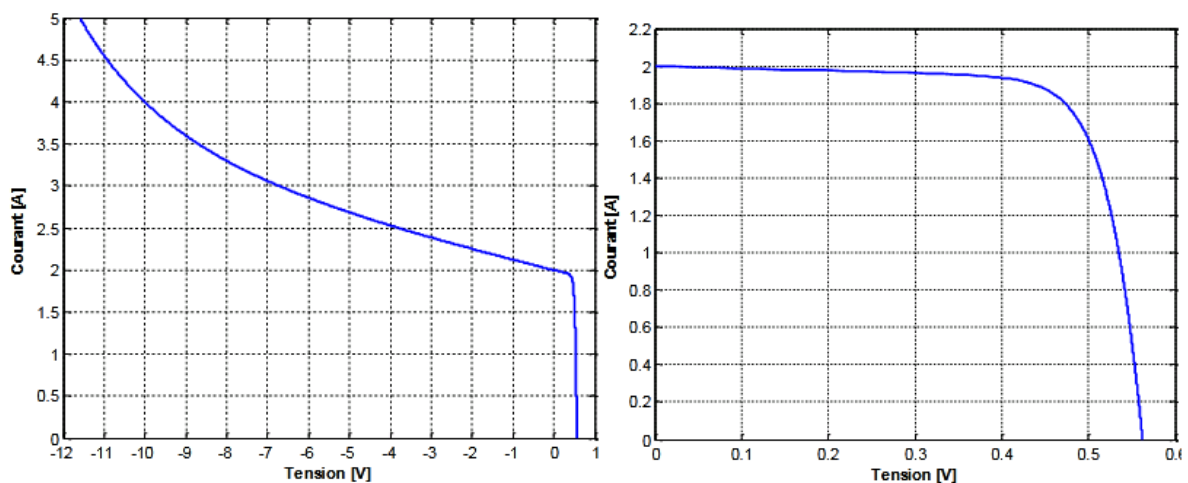


Figure II.4 Caractéristique I-V d'une cellule PV simulée à base du modèle de Bishop.

II.2.4 Modèle SANDIA

Ce modèle est largement utilisé dans la littérature pour intégrer les propriétés électriques, thermiques et optiques des modules photovoltaïques en raison de sa polyvalence et de sa précision. Développé par la division de

technologie solaire de Sandia Corporation. Principalement, les avantages de ce modèle sont les suivants [29] [30] :

- Le modèle Sandia permet des performances exceptionnelles Grâce à une comparaison en temps réel des performances du système PV avec les performances attendues.
- Ce modèle permet de prendre en compte les différentes pertes électriques évoquées ci-dessus. Cependant, cela nécessite que le capteur soit mesuré après l'installation.
- Il tient compte de l'évolution du spectre solaire en fonction de la position du soleil dans le ciel et de son impact sur la production d'énergie photovoltaïque.

Les équations déterminantes sont les suivantes [31] :

$$I_{SC} = \frac{\varphi}{\varphi_{ref}} f_1(AM) f_2(\beta) (I_{SC,r} + \mu_{I_{SC}}(T_c - T_{ref})) \quad (2.7)$$

$$I_{MP} = C_0 + \frac{I_{SC}}{I_{SC,r}} (I_{MP,r} + \mu_{I_{MP}}(T_c - T_{ref})) \quad (2.8)$$

$$V_{oc} = V_{oc,r} + C_1 \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_{SC,r}} \right) + \mu_{V_{oc}}(T_c - T_{ref}) \quad (2.9)$$

$$V_{MP} = V_{MP,r} + C_2 \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_{SC,r}} \right) + C_3 \left[\ln \left(\frac{I_{SC}}{I_{SC,r}} \right) \right]^2 \quad (2.10)$$

Avec :

φ : Rayonnement incident [W/m²];

T_c : Température de la **cellule** [K] ;

AM : Nombre d'air-masse ;

β : Angle d'incidence entre le rayonnement direct du soleil et la normale au plan du module PV ;

$\phi_{réf}$: Rayonnement de référence [W/m^2];

T_{ref} : Température de référence de la cellule [K] ;

f_1 : Fonction du nombre d'air-masse ;

f_2 : Fonction de l'angle d'incidence du rayonnement sur le module PV ;

I_{SCr} : Courant de court-circuit de référence [A] ;

V_{ocr} : Tension de circuit-ouvert de référence [V] ;

V_{MP_r} : Tension du point de puissance maximal de référence [V] ;

I_{MP_r} : Courant du point de puissance maximal de référence [A].

μ_{Isc} : Coefficient de dépendance en température du courant de court-circuit [A/K].

$\mu_{V_{oc}}$: Coefficient de dépendance en température du de la tension de circuit-ouvert [V/K].

$\mu_{V_{mp}}$: Coefficient de dépendance en température de la tension de puissance maximale [V/K].

$\mu_{I_{mp}}$: Coefficient de dépendance en température du courant de puissance maximal [A/K].

C_0, C_1, C_2, C_3 : Coefficients déterminés expérimentalement.

II.3 Fonction de coût

La fonction de coût est une fonction qui représente le comportement souhaité du système contrôlé et sera définie en considérant la variable de référence, l'état futur de la variable contrôlée et sa valeur optimale future. La minimisation de cette fonction nous permet de choisir le meilleur contrôle pour l'application du contrôleur prédictif. Par conséquent, le contrôleur applique uniquement

l'élément de contrôle optimal pour lequel la fonction de coût est minimisée dans la période d'échantillonnage [32].

En outre, l'erreur utilisée dans ce cas est l'erreur quadratique moyenne (RMSE) donnée par l'expression (2.11) représentant la fonction objective. L'erreur entre les données mesurées et le modèle MSD est calculée à partir de l'équation (2.12) et l'erreur entre les données mesurées et le modèle MDD est calculée à partir de l'équation (2.13).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k f(I_m, V_m, X)^2} \quad (2.11)$$

II.3.1 Fonction de coût pour le modèle MSD

La fonction de coût du modèle MSD est donnée par l'équation :

$$f(I_m, V_m, X) = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_m + R_s I_m)}{nKT_c}\right) - 1 \right] - \frac{V_m + R_s I_m}{R_{sh}} - I_m \quad (2.12)$$

II.3.2 Fonction de coût pour le modèle MDD

La fonction de coût du modèle MDD est donnée par l'équation :

$$f(I_m, V_m, X) = I_{ph} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{q(V_m + R_s I_m)}{n_1 KT_c}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{q(V_m + R_s I_m)}{n_2 KT_c}\right) - 1 \right] - \frac{V_m + R_s I_m}{R_{sh}} - I_m \quad (2.13)$$

II.4 Algorithme de Pollinisation des Fleurs (FPA)

La nature a des phénomènes qui peuvent être utilisés pour résoudre une variété de problèmes. Un phénomène est la stratégie de reproduction des plantes à fleurs par pollinisation, qui a inspiré un nouvel algorithme appelé algorithme de pollinisation des fleurs (FPA) proposé par Yang en 2012 [34].

L'APF est une technologie d'optimisation basée sur l'essaim, par ses caractéristiques, elle a attiré l'attention de nombreux chercheurs dans de nombreux domaines d'optimisation; De nombreux phénomènes dans la nature ont des propriétés uniques qui peuvent être utilisées pour se convertir en modèles mathématiques ou même en algorithmes pour résoudre des problèmes réel. Contrairement à d'autres algorithmes méta heuristiques qui sont coûteux en calcul, la principale caractéristique de cet algorithme est sa complexité quasi-linéaire [33] [34].

II.4.1 FPA dans le contexte de l'optimisation

En considérant la version discrète de l'algorithme de pollinisation des fleurs, l'AG donne les mêmes résultats dans certains cas. Cependant, les algorithmes discrets de pollinisation des fleurs ont surpassé les algorithmes génétiques dans plus de la moitié des cas. En termes de temps de calcul, les résultats obtenus par l'algorithme génétique surpassent les trois autres méthodes dans tous les cas [35].

Avant de décrire en détail l'algorithme de pollinisation des fleurs, passons brièvement en revue les formes de base de la pollinisation des angiospermes. Il existe deux formes fondamentales de pollinisation : biotique ou abiotique [34].

II.4.1.1 Pollinisation biotique/croisée

La principale forme de pollinisation est la pollinisation biotique, également appelée pollinisation croisée. Cette pollinisation peut être considérée comme pollinisation globale, et les pollinisateurs se déplacent suivant le vol de Levy [33] ; Elle est assurée par des animaux [36]. Ce phénomène crée souvent une forme de relation entre la plante et le milieu qui contrôle en partie

l'évolution de l'un et de l'autre. Contrairement à la pollinisation abiotique, la pollinisation biotique est directionnelle et ciblée.

Elle est donc naturellement plus efficace et améliorée dans le temps grâce à la coévolution des plantes à fleurs et de leurs pollinisateurs associés. Près de 90% des plantes à fleurs utilisent cette méthode de pollinisation. Au fur et à mesure que les pollinisateurs se déplacent et même en volant à différentes vitesses, les mouvements de pollen peuvent être très longs ; Si le pollen est codé comme un vecteur de la solution, cette action peut être équivalente à la recherche globale [34].

II.4.1.2 Pollinisation abiotique/ autopollinisation

La pollinisation abiotique, également appelée autopollinisation. La pollinisation abiotique repose sur un phénomène purement physique et donc un phénomène non directionnel. En conséquence, la chance a souvent un impact majeur, entraînant une efficacité moindre et des rendements très faibles [36]. Il existe deux types de pollinisation abiotiques : la pollinisation anémophile et la pollinisation hydrophile, respectivement médiée par le vent et par l'eau.

On estime qu'environ 10% des plantes à fleurs sont pollinisées de cette façon [34]. Étant donné que la pollinisation a tendance à être locale et à autopollinisation. La distance parcourue par ce mouvement local est généralement courte, cette action peut donc être considérée comme une recherche locale [37].

II.4.1.3 Constance de la fleur

Il est avantageux pour des plantes telles que les colibris de s'associer à des pollinisateurs pour économiser de l'énergie et garantir le succès.

Ainsi, la constance des fleurs a évolué. Dans ce cas, les pollinisateurs ne visitent qu'un ensemble fixe de types de fleurs et ne gaspillent pas d'énergie à explorer de nouveaux types de fleurs, tandis que les plantes à fleurs évolué pour fournir suffisamment de récompenses de nectar aux pollinisateurs pour encourager les visites fréquentes des pollinisateurs, maximisant ainsi leur succès reproducteur.

En utilisant les caractéristiques ci-dessus, un algorithme d'optimisation est conçu, appelé l'algorithme de pollinisation des fleurs (APF). Les principales caractéristiques et les composants de l'algorithme APF peuvent être résumés dans le tableau (II.1).

Pollinisation des fleurs	Composants d'optimisation en (APF)
Pollinisateurs (insectes, papillons, oiseaux)	Déplacements / modification de variables
Biotique	Recherche globale
Abiotique	Recherche locale
Vols de Lévy	Tailles de pas (obéissant à une loi de puissance)
Pollen / fleurs	Vecteurs de solution
Constance des fleurs	Similitude dans les vecteurs de solution
Evolution des fleurs	Evolution itérative des solutions
Reproduction optimale des fleurs	Ensemble de solutions optimales

Tableau II.1 Pollinisation et ses composants d'optimisation.

Le Tableau (II.1) montre la relation ou l'équivalence entre les termes d'optimisation et la fleur. Contexte Avec ces composants et caractéristiques, nous pouvons maintenant décrire en détail l'algorithme standard de pollinisation des fleurs.

II.4.2 Les lois fondamentales du FPA

FPA est un algorithme inspiré de la nature qui imite le comportement de pollinisation primaire des plantes à fleurs. Yang a utilisé quatre règles de base pour développer l'algorithme FPA en 2012 [34] [38]. Ils peuvent être résumés comme suit :

- **Règle 1** : La pollinisation globale implique biotiques et pollinisation croisée où les pollinisateurs transportent le pollen issu des vols de Lévy.
- **Règle 2** : L'autopollinisation et l'autofécondation peuvent être supposées comme une pollinisation locale.
- **Règle 3** : Constance de fleur peut être considérée comme une probabilité de reproduction qui est proportionnelle à la similitude entre les deux fleurs.
- **Règle 4** : Probabilité de commutation $p \in [0,1]$ peut contrôler l'échange entre la pollinisation locale et la pollinisation globale. La pollinisation locale a un rapport p important dans l'ensemble des activités du processus de la pollinisation.

Pour illustrer le mécanisme APF basé sur ces quatre règles, trois étapes principales peuvent être décrites dans les trois sous-sections suivantes :

II.4.2.1 Recherche globale de FPA (Biotique)

Les pollinisateurs tels que les oiseaux et les chauves-souris peuvent propager le pollen sur de longues distances lors de la pollinisation biologique, cela garantit une diversité et une pollinisation optimales pour la reproduction. Par conséquent, la première (règle 1) et la troisième (règle 3) de l'algorithme FPA peuvent être formulées mathématiquement comme suit:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + L (x_i^t - g_*) \quad (2.14)$$

x_i^t est le vecteur de pollen ou de solution à l'itération t et g_* est la meilleure solution trouvée parmi toutes les solutions à l'itération actuelle. L est l'intensité de la pollinisation, qui est essentiellement une taille de pas, les pollinisateurs se déplaçant sur de longues distances à différents intervalles de distance (différentes tailles de pas). Le vol Lévy peut être un simulateur efficace de cette fonctionnalité. L peut être dérivé de la distribution de Lévy [39], définie comme suit :

$$L \sim \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}} (s \gg s_0 > 0) \quad (2.15)$$

Où $\Gamma(\lambda)$ désigne la fonction gamma standard et cette distribution est valable pour les grands pas $s > 0$. Il est recommandé d'utiliser $\lambda = 1,5$ [30].

II.4.2.2 Recherche locale de FPA (Abiotique)

La pollinisation locale est considérée comme abiotique et autogame [40]; Elle se produit par le vent, la gravité, l'eau ou par diffusion sans l'aide des pollinisateurs. **Règle 2** (la pollinisation locale) et **règle 3** (la constance des fleurs) peuvent être représentées comme :

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \epsilon (x_j^t - x_k^t) \quad (2.16)$$

Où x_i et x_k sont les pollens des différentes fleurs de la même plante. Cette équation modélise essentiellement la constance des fleurs dans un voisinage délimité. Mathématiquement, si x_i et x_k sont du même genre qui peut être sélectionné dans la même population, Si nous tirons ϵ de la distribution uniforme en $[0, 1]$, l'équation devient une marche aléatoire locale et le nouveau vecteur de solution résultant ne s'écarte pas de solutions existantes. La pollinisation locale et la pollinisation globale sont contrôlées par une probabilité de commutation $p \in [0:1]$ [41].

II.4.2.3 Probabilité de commutation en FPA

Bien que nous ayons simulé des pollinisations biotiques et abiotiques, nous n'avons pas considéré le pourcentage et la fréquence de chaque pollinisation. Pour imiter cette caractéristique, nous avons utilisé des probabilités de transition (règle 4), où la valeur de p détermine la modification de la solution après pollinisation locale ou globale. Bien qu'une valeur naïve de $p = 0,5$ puisse être utilisée, une valeur plus réaliste et valide de $p = 0,7$ offre de meilleures performances pour la plupart des applications.

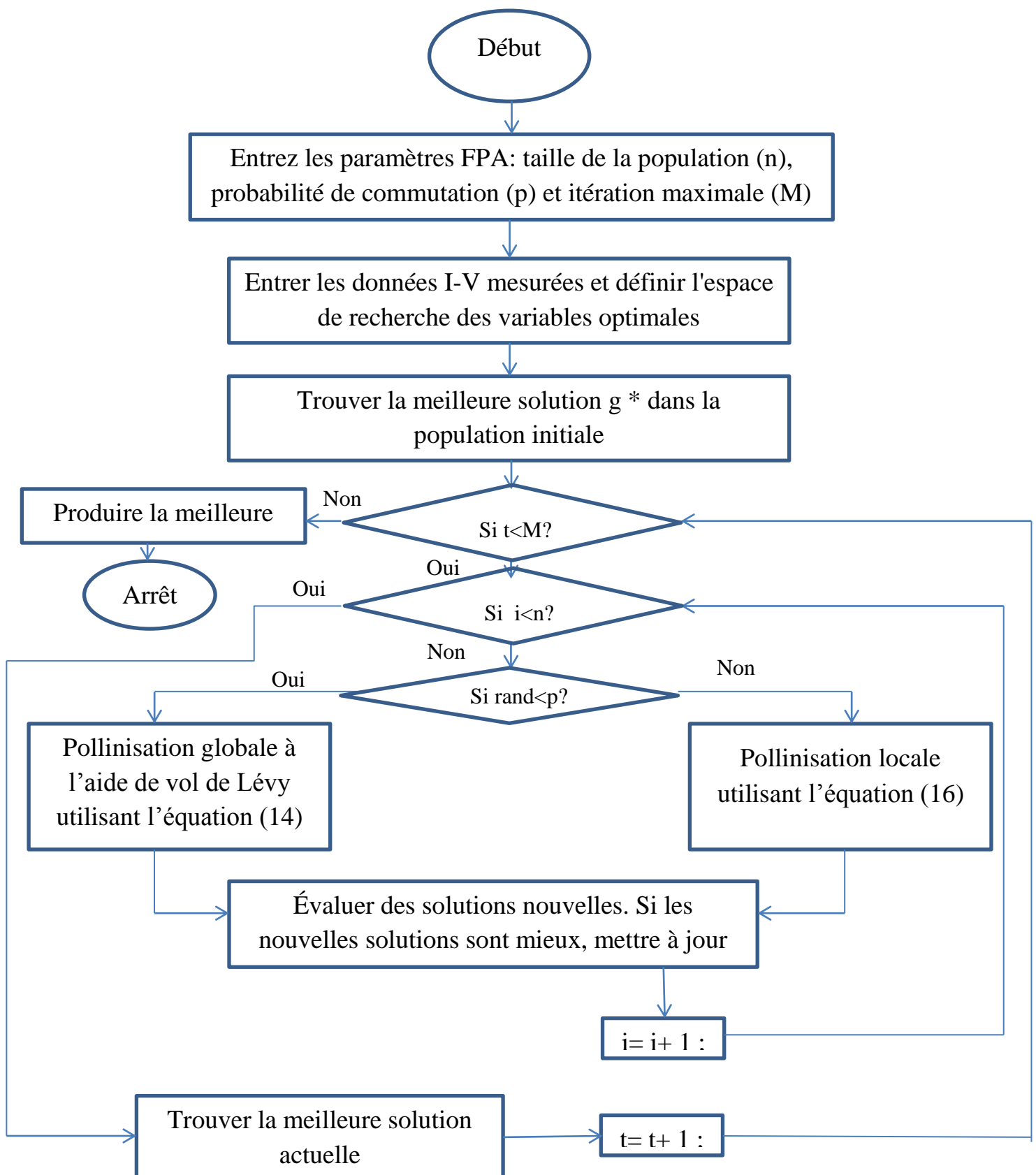


Figure II.5 L'organigramme de l'algorithme FPA.

La figure II.5 présente l'organigramme de l'APF. Trois étapes clés peuvent être résumées dans le pseudo-code APF présenté dans l'algorithme suivant :

1 : **Entrées** : Les agents de fleur Totale N, Nombre d'itérations Maximal M,
Probabilité de commutation P

2 : **Sorties** : la meilleure solution (g^*) et sa valeur de remise en forme.

3 : Initialiser la population de fleurs N au hasard.

4 : Choisir la meilleure solution (g^*).

5 : **Tant que** les critères d'arrêts ne répondent pas **Faire ou Refaire**

6 : **Pour toutes** les fleurs dans l'ensemble de la solution **Faire ou Refaire**

7 : **Si** $\text{rand} < p$

8 : Concevoir le vecteur de dimensions L basé sur la distribution de Lèvy.

9 : Employer la pollinisation globale sur j solution dans l'équation (2.14).

10 : **Sinon**

11 : **Fin Si**

12 : Evaluer la nouvelle solution.

13 : **Si** la nouvelle solution est meilleure que celle en cours

14 : Remplacer la solution actuelle j par la nouvelle solution.

15 : **Fin Si**

16 : **Fin pour**

17 : Mise à niveau de la g^* de la solution optimale.

18 : **Fin tant que**

19 : Choisir la solution optimale.

II.5 Conclusion

La modélisation des cellules PV comprend principalement la formulation de la relation courant-tension (I-V), et la détermination de ses paramètres joue un rôle important dans la modélisation précise des cellules solaires. Nous présentons dans ce chapitre la modélisation mathématique des cellules photovoltaïques à l'aide de deux modèles PV (modèles à une diode et à deux diodes) et ces équations. À l'aide d'un nouvel algorithme méta-heuristique inspiré de la nature, appelé Algorithm of Flower Pollination (APF), nous avons étudié comment optimiser le problème après avoir évalué ses performances et étudié ses propriétés.

Chapitre III

Extraction des paramètres d'une cellule PV.

III.1 Introduction

Le comportement du module photovoltaïque est généralement décrit par sa caractéristique courant-tension, dans laquelle leur forme dépend de la valeur des cinq paramètres et de la dépendance à la lumière solaire et à la température du module [42]. Divers modèles aient été développés dans la littérature pour décrire le comportement des cellules solaires et le module photovoltaïque, le modèle à une seule diode est couramment utilisé [43]. La modélisation photovoltaïque passe nécessairement par un choix judicieux de circuits équivalents pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque.

Il existe plusieurs méthodes d'extraction et estimation des paramètres d'une cellule solaire ; Dans ce chapitre on présente les différents modèles utilisé pour la Simulation et les résultats obtenus et cela en utilisant le logiciel MATLAB. La simulation est basée sur l'élaboration des modèles mathématiques, qui nous permet d'avoir une approche globale des performances du système.

III.2 Mesure de caractéristique I-V

Le système d'acquisition est utilisé pour acquérir des données caractéristiques I-V mesurées en externe. Le système est installé au Centre de développement des Energies Renouvelables (CDER) [57]. Utilisant l'instrument PVPM pour créer une courbe I-V pour un ou plusieurs modules PV (chaînes PV) qui ont été sélectionnés. L'instrument est installé sur le lieu d'installation des modules photovoltaïques [44].

Chaque courbe I-V contient 101 échantillons en 30 secondes [51]. Ces données permettent de tracer de vraies courbes I-V. Le schéma fonctionnel du système d'acquisition est présenté à la figure III.1.

La figure III.2 résume les diagrammes d'identification des paramètres pour les deux modèles proposés. L'espace de recherche des paramètres est l'une des conditions nécessaires pour effectuer le processus d'optimisation.

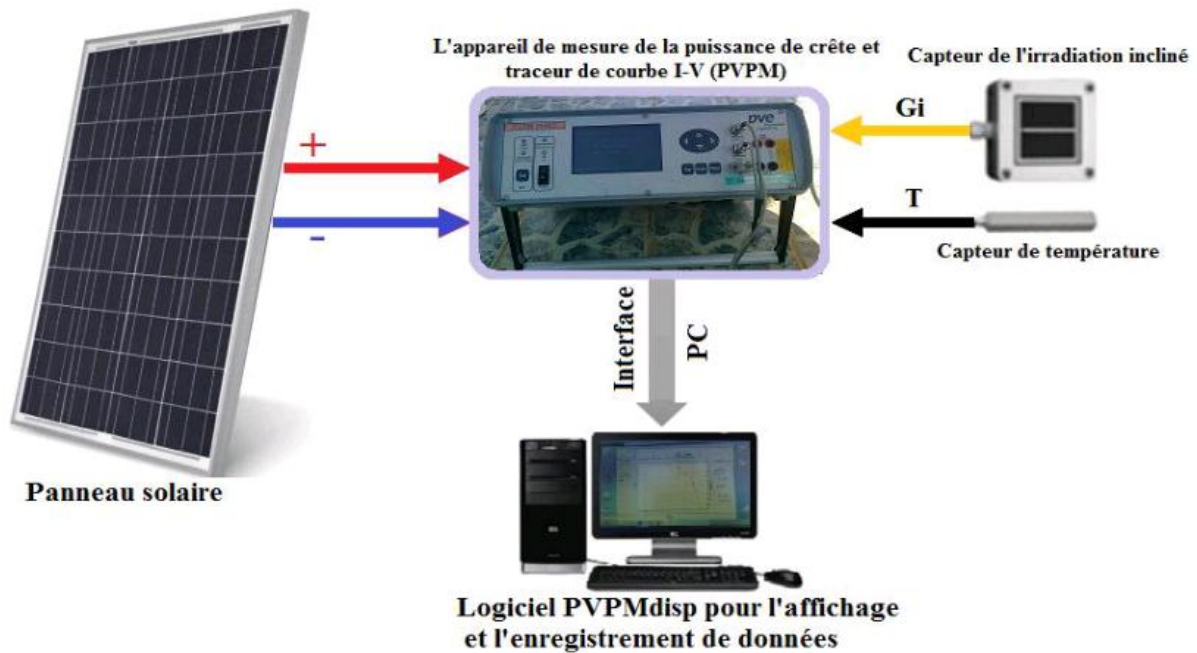


Figure III.1 Schéma synoptique pour l'acquisition de données des caractéristiques I-V.

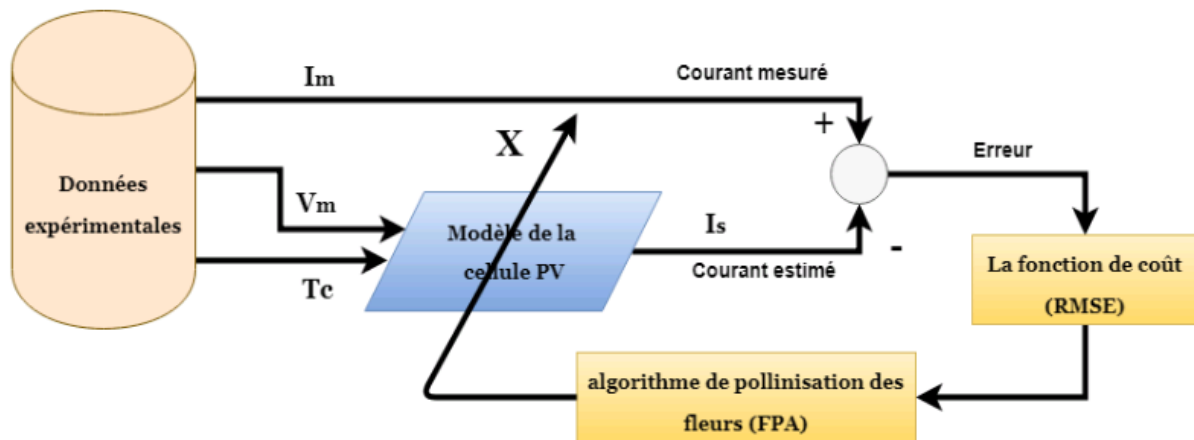


Figure III.2 Schéma synoptique du processus d'optimisation.

Le tableau III.1 ci-dessous montre les valeurs des paramètres réglables pour exécuter le processus d'optimisation par le FPA. Et le tableau III.2 montre les valeurs de limites inférieures et supérieures de l'espace de recherche. Les valeurs des meilleurs paramètres optimaux obtenus doivent appartenir à ce domaine.

Paramètres de l'algorithme FPA	Valeur
Taille de la population (n)	25
Probabilité de commutation (p)	0.7
Maximum nombre d'itération (M)	1000

Tableau III.1 Paramètres de l'algorithme FPA

Paramètre	Limite inférieure	Limite supérieure
$I(A)$	0	20
$R_s(\Omega)$	0	0.5
$R_{sh}(\Omega)$	0	400
(μA)	0	0.01
(μA)	0	0.01
$n1$	0	120
$n2$	0	120

Tableau III.2 L'espace de recherche des paramètres.

Les données sont recueillies à partir d'expériences extérieures pour déterminer la tension, la température et le niveau de rayonnement. Ces données sont ensuite enregistrées dans un appareil. Un module Poly-Si a plusieurs couches de silicium avec des propriétés électriques variables. Un module monocristallin contient une couche de silicium. Le tableau III.3 contient des données pour les propriétés électriques spécifiques de chaque module. En conséquence, les entreprises impliquées dans la fabrication de modules PV ont été touchées.

Module PV	ISOFOTON	CONDOR	KYOCERA
	106	250P	125
$V_{oc}(V)$	17,4	37,24	21,7
$I_{sc}(A)$	6,54	9,01	8
$V_{mp}(V)$	21,6	31,19	17,4
$I_{mp}(A)$	6,10	8,37	7,2
$P_{mp}(W)$	106	250	125
$\beta V_{oc}(\%/^{\circ}C)$	-0,36	-0,36	X
$\alpha I_{sc}(\%/^{\circ}C)$	0,06	0,06	X

Tableau III.3 Les paramètres électriques aux conditions d'essai normalisées (STC) pour les modules PV utilisés.

III.3 L'identification des paramètres des modèles

Les cellules photovoltaïques sont le cœur de la chaîne de production d'électricité. La concurrence sur l'optimisation et l'augmentation de l'efficacité des cellules photovoltaïques, conduit les chercheurs à trouver des méthodes pour déterminer les paramètres intrinsèques de ces cellules [54].

Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été proposées pour l'extraction des paramètres [55], chacune de ces méthodes, présente des inconvénients, soit au niveau de la complexité de l'utilisation et la précision, soit au niveau de la convergence et la rapidité [56]. L'algorithme de pollinisation de fleurs, récemment proposé pour les problèmes d'optimisation continus.

Cet algorithme se distingue principalement par sa complexité quasi-linéaire contrairement aux autres méta-heuristiques où le temps de calcul est élevé. Il existe différents types de cellules en fonction de la nature et des caractéristiques des matériaux utilisés.

Dans cette section, les deux modèles électriques MSD et MDD sont identifiées sur la base de l'algorithme FPA en utilisant les données I-V d'un panneau PV choisi. De plus, des cellules PV de deux types différents sont mesurées. Le tableau III.3 répertorie les données mesurées. L'étude a collecté des données de deux autres algorithmes. L'un est l'algorithme Firefly, ou FA [46], et l'autre est le recuit simulé, ou SA [47]. Après avoir recueilli des données dans diverses conditions météorologiques, une comparaison est effectuée entre ces trois algorithmes.

- **Firefly Algorithm**

Afin de mieux comprendre le fonctionnement des lucioles, un algorithme méta heuristique nommé Firefly Algorithm a été créé par le chercheur Yang. L'algorithme utilise les lumières des lucioles pour imiter le comportement d'un essaim. L'algorithme d'attraction des lucioles utilise la luminosité des lucioles comme mesure de leur attractivité. Toute luciole peut être attirée par n'importe quelle autre; par conséquent, n'importe quelle luciole peut être attirée par n'importe quelle autre [48].

L'algorithme suppose également que toutes les lucioles sont unisexes. Lorsqu'ils se rapprochent d'une autre luciole plus brillante, les lucioles sont attirées par elle. De plus, la luminosité de la luciole diminue à mesure qu'elle s'éloigne selon la loi du carré inverse [46]. L'étude fournit un test de FA pour plusieurs fabrications PV avec diverses conditions météorologiques.

Où, les données de deux modules PV en silicium amorphe, trois en silicium polycristallin et trois en silicium monocristallin sont utilisées pour le test. Par ailleurs, une comparaison avec trois autres algorithmes à savoir : Algorithme de marcheur évolutif généralisé (GEWA) [49].

- **Simulated Annealing Algorithm**

L'algorithme de recuit simulé est un processus qui utilise une température et un temps bas pour réchauffer lentement les métaux. Il est utilisé pour modifier lentement les propriétés d'un matériau. Les métaux se refroidissent lentement en mettant en œuvre une optimisation qui réduit les mouvements atomiques et la densité des défauts.

Ceci est similaire à l'optimisation qui simule lentement la haute température des métaux. Au niveau d'énergie le plus bas possible, le réticulaire s'éteint. L'algorithme simule le recuit qui commence avec la solution initiale et la température initiale. Au fil du temps, la température diminue à chaque itération jusqu'à ce que l'algorithme atteigne un état stable [50].

III.3.1 Modèle à une seule diode (MSD)

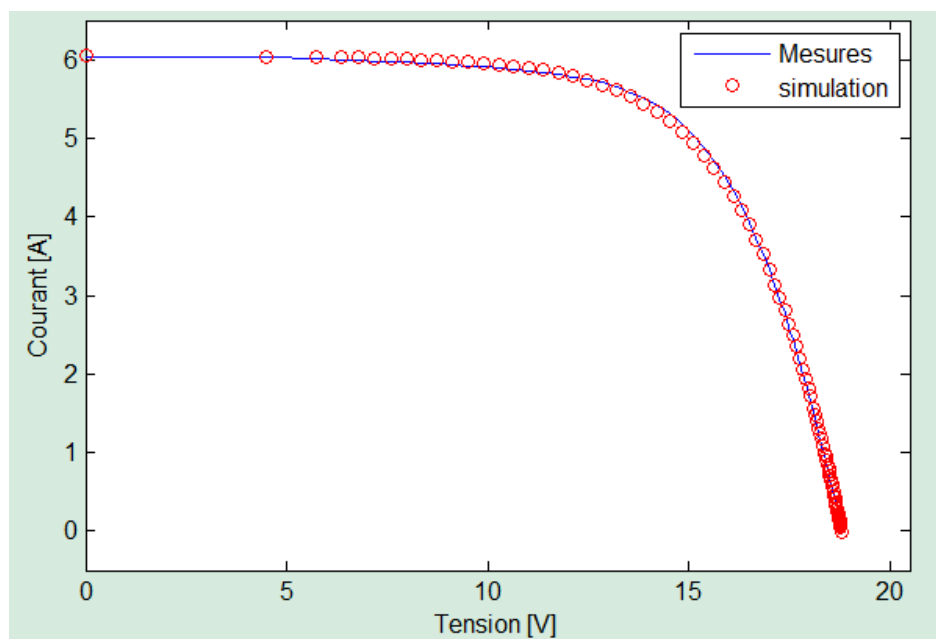
Pour les trois algorithmes, dix tests d'efficacité de convergence ont été exécutés dans les mêmes conditions initiales. Les courbes I-V expérimentales du module ISOFOTON ont été obtenues à température $T=50,77^{\circ}\text{C}$ et irradiation $G=890,56\text{ W/m}^2$.

Le tableau III.4 résume les résultats de comparaison entre les trois algorithmes y compris : l'écart type STD, l'erreur quadratique moyenne RMSE et la valeur moyenne de toutes les erreurs obtenues MEAN.

Paramètre	FPA	FA	SA
$R_s(\Omega)$	0,075	0,0819	0,064
$R_{sh}(\Omega)$	326,170	175,337	348,805
$I_{ph}(A)$	6,060	4,7853	4,841
$I_0(A)$	3,413.10 ⁻⁶	0,000169	0,0002
n	68,929	67,866	71,172
RMSE	0.047	0.050	0.193
MEAN	0.0579	0,066	0,087
STD	0,0047	0,003	0,037

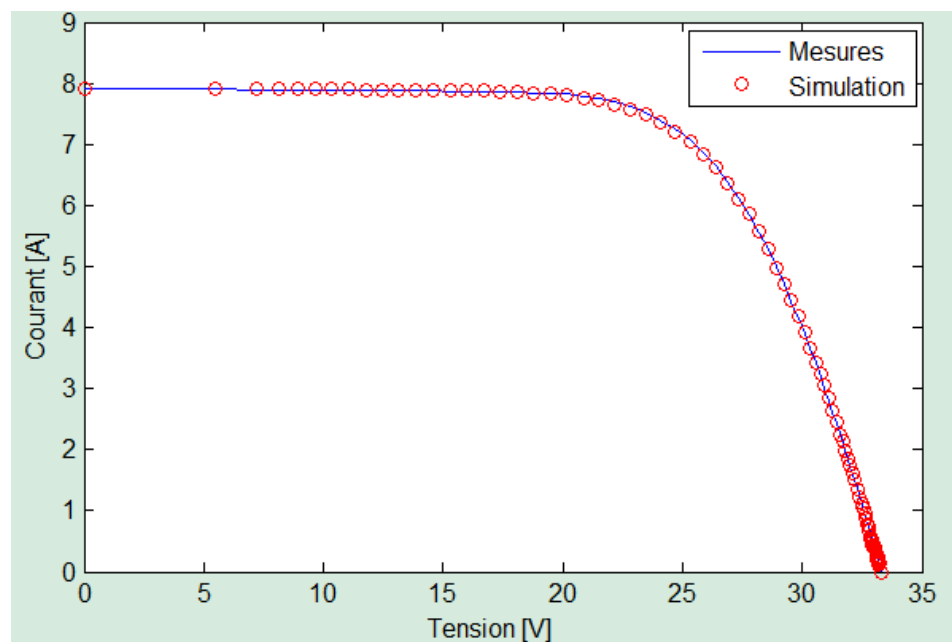
Tableau III.4 Les résultats obtenus par les trois algorithmes appliqués sur le MSD.

Il est évident que FPA fournit de meilleurs résultats par rapport aux algorithmes SA et FA. De plus, le facteur le plus puissant de l'algorithme FPA est la vitesse avec laquelle il converge vers la solution optimale, le temps de convergence de FPA vers la solution optimale est de 11.670894 secondes, tandis que le temps d'itération des deux autres algorithmes devient de plus en plus long.



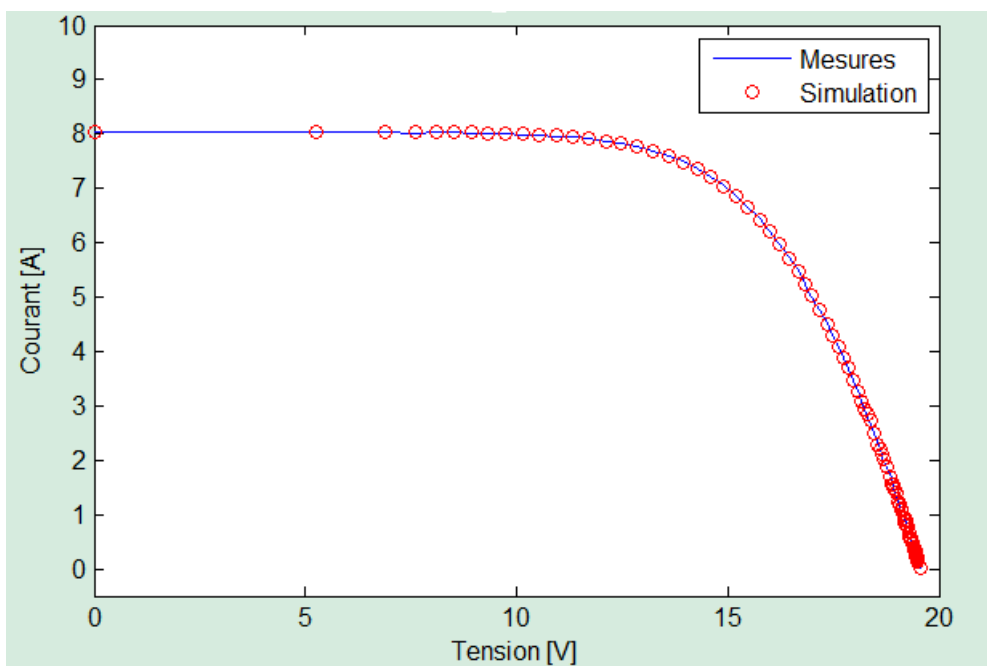
$$T=50,77^{\circ}\text{C}, G=890,56 \text{ W/m}^2$$

Figure III.3 Données mesurées et simulées avec MSD pour cellule de type ISO FOTON 106.

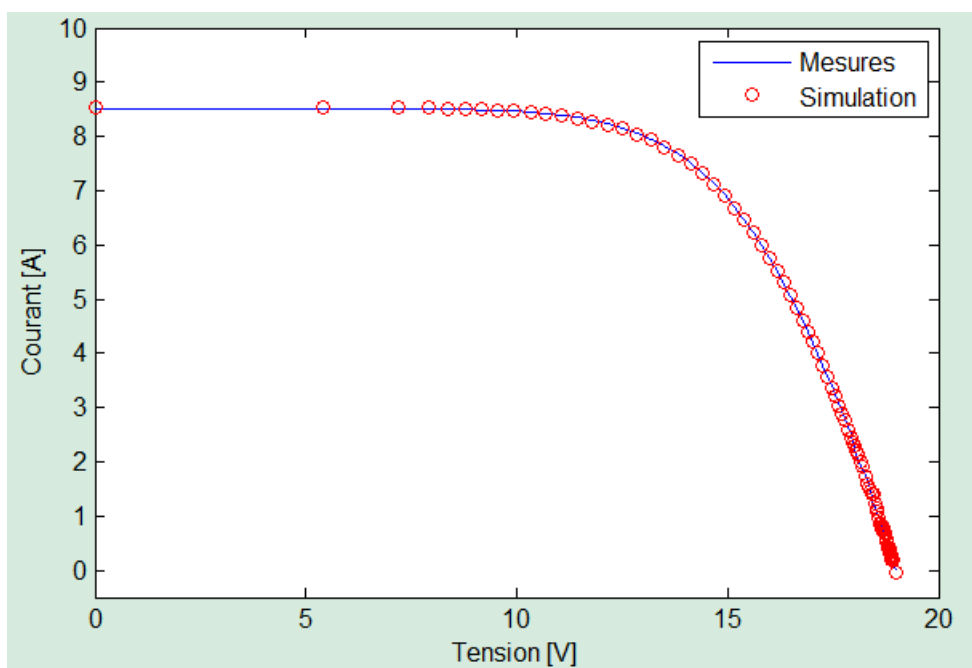


$$T=45,89^{\circ}\text{C}, G=833,50 \text{ W/m}^2$$

Figure III.4 Données mesurées et simulées avec MSD pour cellule de type CONDOR 250P.



T=59.43°C, G=942.93 W/m



T=63.61°C, G=996.80 W/m²

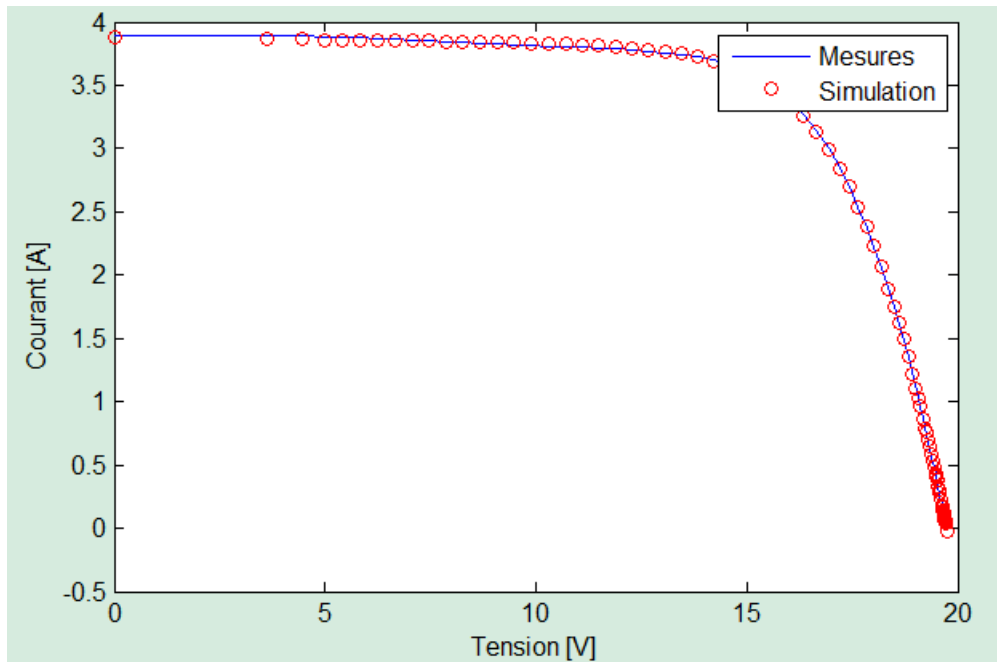
Figure III.5 Données mesurées et simulées avec MSD pour cellule de type KYOCERA 125.

Les figures III.4 et III.5 montrent la comparaison entre les courbes mesurées et simulées des différents modules PV sous différentes conditions météorologiques (température et irradiation). Les courbes montrent clairement l'efficacité du FPA dans l'identification des paramètres de ces modules PV.

III.3.2 Modèle à double diode (MDD)

Paramètre	FPA	FA	SA
<i>Rs</i> (Ω)	0,230	0,0131	0,022
<i>Rsh</i> (Ω)	232,774	104,538	259,958
<i>I_{ph}</i> (A)	3,885	4,7765	4,775
<i>I₀₁</i> (A)	$1,8989 \cdot 10^{-6}$	$2,290 \cdot 10^{-5}$	0,0001
<i>I₀₂</i> (A)	$8,055 \cdot 10^{-5}$	$6,1228 \cdot 10^{-5}$	0,0017
<i>n₁</i>	50,919	67,4652	73,155
<i>n₂</i>	117,920	107,710	106,507
<i>RMSE</i>	0,019	0.0504	0,062
<i>MEAN</i>	0,0246	0,0547	0,099
<i>STD</i>	0,005948	0,0021	0,037

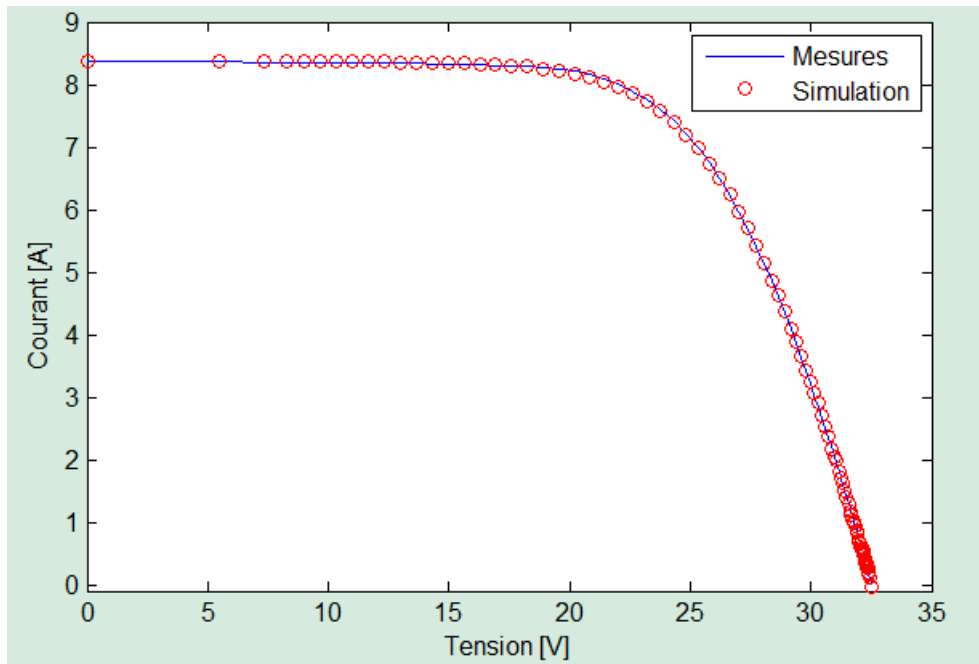
Tableau III.5 Les résultats obtenus par les trois algorithmes dans le cas de MDD.



$$T=37.18^{\circ}\text{C}; G=590.56 \text{ W/m}^2$$

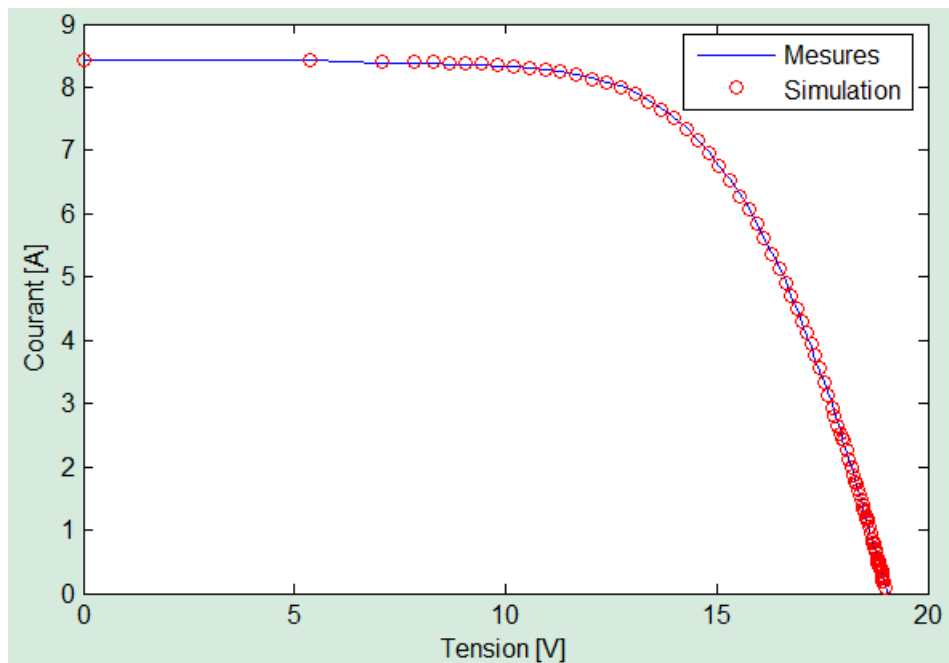
Figure III.6 Données mesurées et simulées avec MDD pour cellule de type ISOFOTON 106.

L’FPA a été testé dans un autre modèle plus complexe, l’algorithme a été appliqué à MDD en suivant les mêmes étapes que MSD pour identifier 7 paramètres au lieu de 5 paramètres pour garantir l’efficacité de la convergence. Les itérations FPA prennent 122 secondes, tandis que les deux autres algorithmes prennent plus de temps et nécessitent donc plus d’itérations.



T=64.19°C, G=880.07 W/m²

Figure III.7 Données mesurées et simulées avec MDD pour cellule de type CONDOR 250P.



T=63.04°C, G=993.29 W/m²

Figure III.8 Données mesurées et simulées avec MDD pour cellule de type KYOCERA 125.

III.4 La variation des erreurs

Les figures III.9, III.10 et III.11 représentent la variation de l'erreur au cours du processus d'optimisation de SA, FA et FPA ; elles montrent que pour MSD, FPA converge vers l'erreur minimale plus rapidement que les deux autres algorithmes.

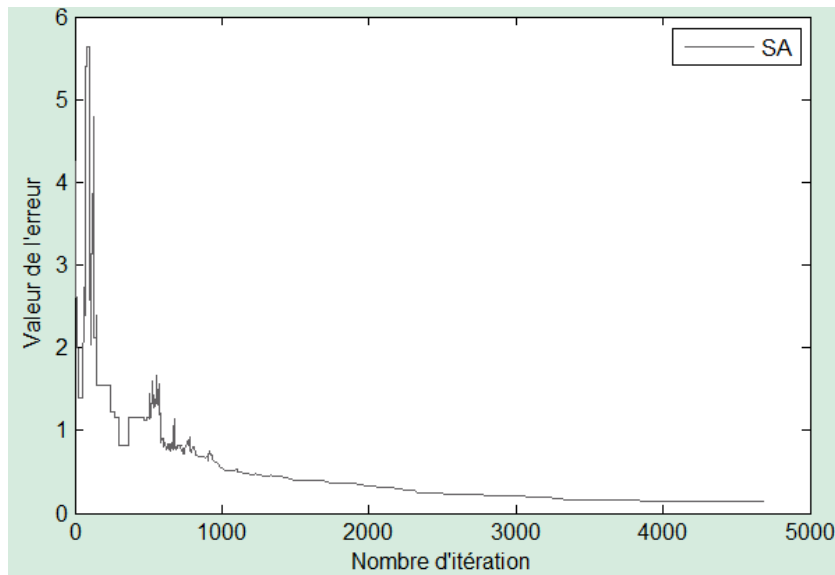


Figure III.9 Les courbes de la variation des erreurs obtenues par SA utilisant le MSD.

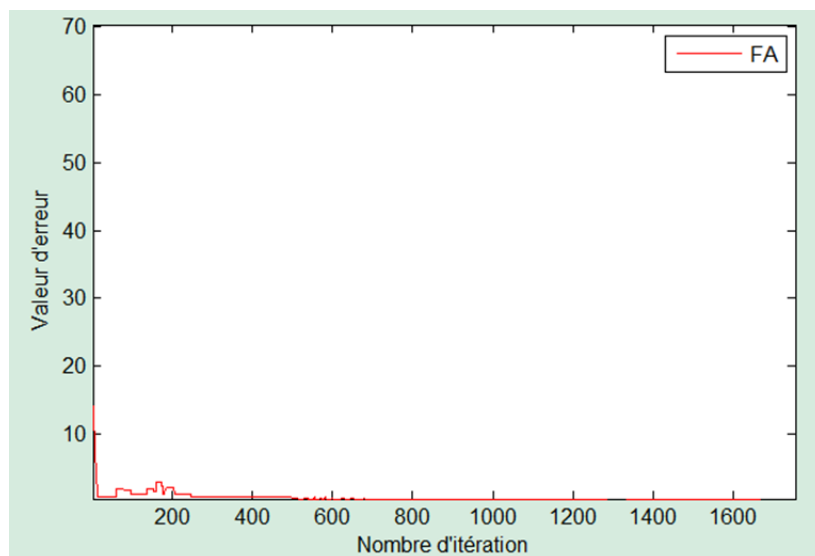


Figure III.10 Les courbes de la variation des erreurs obtenues par FA utilisant le MSD.

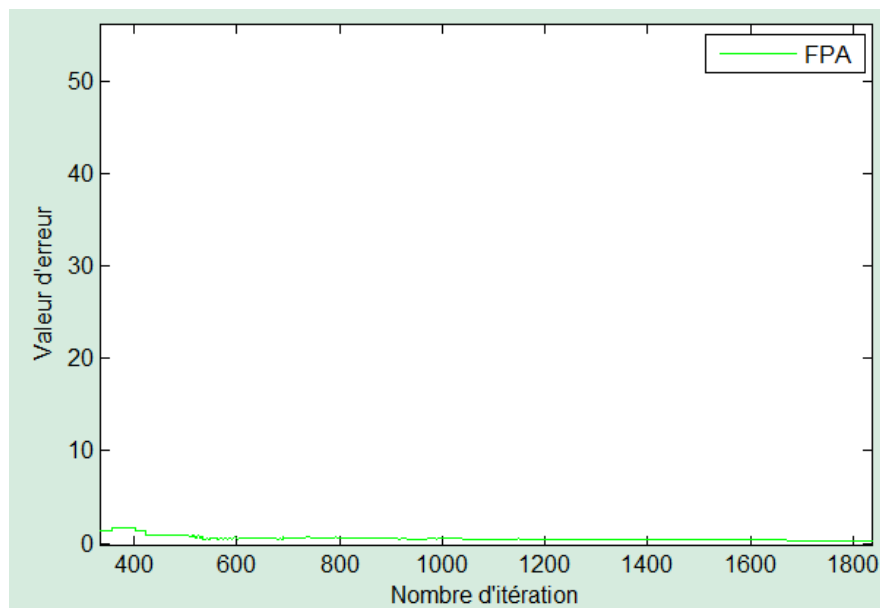


Figure III.11 Les courbes de la variation des erreurs obtenues par FPA utilisant le MSD.

III.5 Conclusion

Un algorithme de pollinisation des fleurs a été proposé pour extraire les paramètres du modèle à simple et double diode. Dans ce chapitre nous comparons le résultat obtenu par le FPA avec deux autres algorithmes tels que l'algorithme Firefly et l'algorithme de recuit simulé, plus que, plusieurs courbes I-V de données expérimentales sont comparées avec cet algorithme.

Le meilleur résultat entre ces trois algorithmes est donné par le FPA proposé, par conséquent, il est clair que le FPA est plus efficace que les autres pour extraire les paramètres optimaux des modules PV. De plus, les paramètres extraits par FPA sont utilisés pour estimer le point de puissance maximale et les résultats ont été comparés avec le MPP mesuré du système photovoltaïque connecté au réseau.

Conclusion Générale.

Conclusion générale

En général, les satellites utilisent des panneaux solaires pour produire de l'énergie. Les besoins en énergie des satellites sont fonction de leur taille et de leur mission, les satellites de télécommunication [58], qui émettent en permanence sont ceux qui nécessitent le plus d'énergie. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. La cellule solaire, est un dispositif semi-conducteur qui convertit des photons (la lumière) en électricité. Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable. Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés.

La modélisation de ces cellules solaires implique principalement la formulation de la relation courant tension (IV). La détermination des paramètres, de cette dernière, joue un rôle important dans la modélisation précise des cellules photovoltaïques. Ce mémoire se concentre sur la modélisation, le contrôle et la simulation des systèmes solaires photovoltaïques sous MATLAB à travers la modélisation du panneau photovoltaïque, où chaque modèle contient un circuit électrique équivalent (simple diode et double diode) en détaillant les différentes méthodes retrouvées dans la littérature scientifique, donc la modélisation est une étape essentielle qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constitutants.

Ce travail présente une application à l'aide d'un algorithme pour identifier les paramètres d'une cellule solaire. Pour simuler le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque soumise aux différentes conditions d'ensoleillement et de température. Les performances d'un module PV ou cellule PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, essentiellement l'éclairement solaire et la température.

Une technique d'optimisation par un algorithme inspiré de la nature APF (algorithme de pollinisation des fleurs), sont des alternatives pour éviter les limitations des techniques d'optimisation traditionnelles.

L'algorithme de pollinisation des fleurs peut être utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation à objectif unique ou multi-objectif. Des études indiquent que l'APF réduit le temps, améliore les résultats et améliore les performances par rapport à d'autres techniques d'optimisation. Cet algorithme a une bonne capacité robuste à résoudre des problèmes d'optimisation continue, et cette capacité a été testée pour des problèmes d'optimisation discrets.

L'FPA a été proposé pour extraire les paramètres du modèle à simple et double diode et cet algorithme est utilisé pour identifier les paramètres de nombreux modules PV, ces modules sont divisés en trois technologies de cellules PV à base de tranche de silicium respectivement monocristallin, polycristallin et amorphe.

Références.

Bibliographie

- [1] Hamidat, A., A. Hadj Arab, and M. T. Boukadoum. "Performances et coûts des systèmes de pompage PV en Algérie." *Rev. Energ. Ren* 8 (2005): 157-166.
- [2] Helali, Kamelia. "Modélisation d'une cellule photovoltaïque: étude comparative." PhD diss., Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [3] ABBES, Dhaker. "Optimisation: principes et applications aux systèmes énergétiques."
- [4] Faure, Fabien. "Suspension magnétique pour volant d'inertie." PhD diss., Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2003.
- [7] F. Hananou et A. Rouabah, 'Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque', master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique 2014
- [15] B. Mohammed, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome," Centre Universitaire De Bechar Mémoire de Magister, 2007-2008.
- [18] Bahri, A. "Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink Etude pratique site Oued Nechou à Ghardaïa." *Magazine ELWAHAT des recherches scientifiques* (2017).
- [19] ABDELGHANI, M. BESSEM. "Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque." PhD diss, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2018.
- [20] TURKIYA, LEBOUAZDA, and REDAOUI SIHEM. "Conception d'un testeur intelligent de panneaux photovoltaïques." PhD diss., UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2019.

Références

- [21] A. Ricaud, Photopiles solaires, 1ère édition, presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1997.
- [22] Singo, Akassewa Tchapo. "Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome." PhD diss., Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2010.
- [23] Busquet, Séverine. "Etude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible: réalisation d'un banc d'essai et modélisation." PhD diss., École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2003.
- [24] Aoun, Nouar. "Evaluation et validation de la performance des modèles de circuits équivalents de la cellule photovoltaïque." (2016).
- [25] Abdesslam, Belaout, Fateh Krim, Abderrazak Arabi, and Mouloud Ayad. "Comparaison entre les Modèles à une Seule Diode et de Bishop de la Cellule Solaire." (2016).
- [26] DOUNIA, SAHOUR, and GUESSAB BORHANE. "Etude et modélisation d'un panneau photovoltaïque." Projet fin d'étude MASTER (2021).
- [27] Notton, Gilles, Ionut Caluianu, Iolanda Colda, and Sorin Caluianu. "Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin." *Journal of Renewable Energies* 13, no. 1 (2010): 49-62.
- [28] ANDRIANAJAINA, Todizara, Eric Jean Roy SAMBATRA, Charles Bernard ANDRIANIRINA, and Nicolas HERAUD. "DETECTION DE DEFAUT DANS UN SYSTEME DE PRODUCTION D'ENERGIE A SOURCE SOLAIRE PAR LA METHODE DES MOINDRES CARREES."

- [29] Khentache, Kamal, S. Berrah, and Nassim Kehoul. "Etude comparative des modèles d'une cellule photovoltaïque." PhD diss., Université abderrahmane mira béjaia, 2012.
- [30] NELEM, A. TOLOK, R. ONANENA, N. MBELE, S. PERABI, P. ELE, and PAS NDIAYE. "Contribution à l'évaluation des caractéristiques techniques des PV en conditions de fonctionnement dans la région Centre du Cameroun."
- [31] D.L. King, J.A. Kratochvil, W.E. Boyson, and W.I. Bower. "Field experience with a new performance characterization procedure for photovoltaic arrays". Sandia National Laboratories, USA, 2004.
- [32] RAMZI ,HALOUAJI ,NOUREDINE ,FARES, and GHARMOULI. "Commande et modélisation de l'énergie photovoltaïque interconnecté au réseau électrique." (2022).
- [33] BENSOUYAD, Meriem. "Université Abdelhamid Mehri." (2015).
- [34] BENNADJI, Djihane. "L'algorithme de Pollinisation des Fleurs."
- [35] Yallas, Hadil El-Hana. "Solving the Generalized Cubic Cell Formation Problem Using Genetic Algorithm." PhD diss., University of Jijel, 2020.
- [36] Michez, Pr Denis, Maryse Vanderplanck, and Martin Bégou. "Faculté des sciences Laboratoire de zoologie."
- [37] KEVAN, PG, and VA WOJCIK. "Services des pollinisateurs."
- [38] Gahgah, Hadjer. "Problème d'emploi de temps: proposition un algorithme bio-inspiré." PhD diss., FACULTE DES MATHEMATIQUES ET DE L'INFORMATIQUE DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE, 2018.

- [39] MAIZI, NOR EL HOUDA. "Coordination bio-inspirée d'un essaim de robots: application au problème de recherche et de sauvetage." (2020).
- [40] BOUCENNA, Mohammed Housseyn. "Détection des apprenants en situation d'échec dans un réseau social éducatif." (2019).
- [41] Chitour, Halima Saadia "Introduction à l'optimisation par des Algorithmes Inspirés de la Nature." (2019).
- [42] Ahlam, B. A. A. D. J. I., and C. H. E. R. G. U. I. Imane. "Extraction des Paramètres du Module Photovoltaïque." PhD diss., UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2019.
- [43] E. Garoudja, K. Kara, A. Chouder and S. Silvestre, "Parameters Extraction of Photovoltaic Module for Long-Term Prediction Using Artificial Bee Colony Optimization," 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT), 2015, Tlemcen, Algeria, 25-27 May, 2015.
- [44] R. Benkercha, S. Moulahoum, I. Colak, B. Taghezouit, PV module parameters extraction with maximum power point estimation based on flower pollination algorithm, in: Proc. - 2016 IEEE Int. Power Electron. Motion Control Conf. PEMC 2016, 2016, pp. 442e449
- [45] Tahraoui, Sofiane, and Mounira Ouarzeddine. "Adaptive Complex Flower Pollination Algorithm for Interferometric Coherence optimisation." In 2018 international conference on applied smart systems (ICASS), pp. 1-6. IEEE,2018.
- [46] X. S. Yang. Firefly algorithm, Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms (2008) 79–90

- [47] Xiang Y, Gubian S, Suomela B, Hoeng Generalized simulated annealing for global optimization: the gensa package. *R Journal*. 5(1). 2013. 13–28.
- [48] Amine, BEGHOURA Mohamed. "Segmentation multi sources des Images Satellitaires parl'algorithme Firefly." PhD diss., Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologi, 2012.
- [49] X. S. Yang. *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms Second Edition*. University of Cambridge, United Kingdom. Luniver Press (2010).
- [51] Wagner, Andreas. "Peak-power and internal series resistance measurement under natural ambient conditions." In *Proceedings EuroSun*, vol. 5. 2000.
- [52] Oleksiy, Nichiporuk. "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités." *Institut national des sciences appliquée de Lyon* (2005).
- [53] ABBES, Dhaker. "Optimisation: principes et applications aux systèmes énergétiques."
- [54] Abdessamad Malaoui, EL Mahdi BARRAH, and Jilali ANTARI, 'Implementation of a new approach for modelling and determining the electrical parameters of solar cells,' *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 15, no. 2, pp. 329–338, April 2016
- [55] A. Ortiz-Conde, Y. Ma, J. Thomson, E. Santos, J.J. Liou, F.J. García Sánchez, M. Lei, J. Finol, and P. Layman, 'Direct Extraction of Semiconductor Device Parameters Using Lateral Optimization Method', *Solid-State Electron.*, Vol. 43, N° , pp. 845 – 848, 1999.

[56] IRKETTOU, Redwane, Amine MOULAY TAJ, E. L. Chahid, Abdelmoula ABOUHILAL, and Abdessama MALAOUI. "Nouvelle méthode d'extraction des paramètres électriques d'une cellule solaire." REVUE DE L'ENTREPRENEURIAT ET DE L'INNOVATION 1, no. 3 (2017).

[57] Hneini, Mema Babe. "Etude de la centrale photovoltaïque de Skhouna (Saida)." PhD diss., UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2019.

[58] Lounes, Ourahmoune. "Système de télécommunication satellite." PhD diss., Université Mouloud Mammeri, 2011.

Webographie

[5] <https://www.asca.com/actualites/zoom-sur/energie-solaire-definition-et-fonctionnement/>

[6] <https://www.photovoltaique.info/fr/info-ou-intox/lenergie-solaire/de-la-lumiere-a-lelectricite/>

[8] <https://www.timetoast.com/timelines/les-panneaux-solaires>

[9] <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/types-cellules-solaires.net>

[10] <https://www.choisir.com/energie/articles/117006/les-cellules-photovoltaïques-source-inepuisable-dinnovations>

[11] <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/renouvelables/essentiel-sur-cellules-photovoltaïques.aspx>

[12] <https://www.researchgate.net>

[13] https://www.researchgate.net/figure/Cellule-en-silicium-mono-cristallin6_fig10_301487491

Références

- [14] <https://www.oist.jp/news-center/photos/schematic-perovskite-solar-cell>
- [16] <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/>
- [17] <https://www.jade-technologie.com/caracteristiques-dun-panneau-solaire/>
- [50] <https://complex-systems-ai.com/algorithmes-bases-sur-la-physique/recuit-simule/>