

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département ELECTROMECHANIQUE

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Energies renouvelables en électrotechnique

Par : - DJELLOUD Tarek

- BENDJEDDOU Amira

Sujet

Impact de l'ombre sur un système photovoltaïque

Soutenu publiquement, le 30/06/2025, devant le jury composé de :

Mr. AISSA OUALID	Grade : MCA	Univ-BBA	Président
Mr. FALEH ABDALLAH	Grade : MCB	Univ-BBA	Examinateur
Mr. SLAMA FATEH	Grade : MCB	Univ-BBA	Encadrant

Année Universitaire 2024/2025

Dédicaces

Avant tout, nous remercions Allah, le Tout-Puissant. Sans Lui, nous ne sommes rien, et notre vie serait sans direction ni but. Sa guidance et Sa miséricorde nous ont accompagnés à chaque étape de ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos parents, frères et sœurs, pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant et leur présence précieuse tout au long de notre vie et particulièrement durant cette période.

Nos remerciements vont à notre encadrant pour ses conseils, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce travail.

Enfin, Nous souhaitons également nous remercier mutuellement, en tant que partenaires dans la vie et dans ce projet. Malgré les difficultés et les défis rencontrés, nous avons su avancer ensemble avec respect, patience et complicité.

Remerciements

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Allah Tout-Puissant, qui m'a donné la force, la patience et la volonté d'accomplir ce travail.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements à Monsieur Slama Fateh mon encadrant, pour sa disponibilité, ses conseils précieux, son encadrement rigoureux ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce projet.

Mes remerciements vont également à l'ensemble du corps enseignant de notre parcours pour la qualité de l'enseignement reçu durant ces années de formation.

Je remercie chaleureusement mes parents, mes frères et sœurs, pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur amour inconditionnel, sans lesquels ce travail n'aurait pas été possible.

Enfin, merci à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Sommaire

Résumés.

Introduction générale.

Chapitre I : Etat de l'art sur les systemes photovoltaïques

I.1. Introduction.	1
I.2. Gisement énergétique.....	1
I.2.1. Gisement solaire en Algérie.....	1
I.2.2. Sphère céleste.....	2
I.2.3. Coordonnées géographiques.	2
I.2.4. Coordonnées horaires.	3
I.2.5. Coordonnées horizontales.....	4
I.2.6. Parametre du temps.	5
I.2.6.1. Temps solaires	5
I.3. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	7
I.3.1 Modèle mathématique d'une cellule solaire.	10
I.3.2 Modèle a une diode.	10
I.4. Caracteristiques d'un module pv.	11
I.5. Averages et inconvenients de l'énergie photovoltaïque.....	13
I.6 Conclusion.....	14

Chapitre II : Techniques d'integration d'un système photovoltaïque

II.1. Introduction.	15
II.2. Système solaire photovoltaïque autonome.....	15
II.2.1. Système autonome avec stockage (batterie).	16
II.2.2. Système autonome sans stockage.....	19
II.3. Mode connecté a un générateur électrogène.	20
II.4. Systèmes hybrides.	20
II.5. Système solaire photovoltaïque connecte au reseau.....	22

II.6. Conclusion.....	23
Chapitre III : Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque	
III.1. Introduction.	24
III.2 Etude et simulation d'une cellule photovoltaïque.	24
III.2.1. Cellule photovoltaïque.	24
III.3. Raccordement en série ou parallèle des cellules photovoltaïques.....	26
III.3.1. Raccordement en série des cellules photovoltaïques.	26
III.3.2. Raccordement en parallèle des cellules photovoltaïques.	28
III.4. Modélisation et simulation de générateur photovoltaïque.	29
III.5. Branchement des panneaux solaire en série ou en parallèle.	31
III.5.1. Branchement des panneaux solaire en série.	31
III.5.2. Branchement des panneaux solaire en parallèle.	33
III.6. Effet de la température et de l'éclairage sur les caractéristiques des panneaux photovoltaïques.	35
III.6.1. Influence de l'éclairement.	35
III.6.2. Influence de température.	37
III.7. Conclusion	39
Chapitre IV : Impact de l'ombre sur les panneaux solaires	
IV.1. Introduction.....	40
IV.2. Simulation de l'ombrage partiel sur une installation photovoltaïque.	41
IV.2.1. Cas d'ombrage sur un seul panneau photovoltaïque.	42
IV.3. Différents tests d'ombrage réalisés sur un champ photovoltaïque.	44
IV.3.1. Ombrage sur deux panneaux.	44
IV.3.2. Ombrage sur trois panneaux.....	46
IV.3.3. Ombrage sur quatre panneaux.	48
IV.4. Résultats et discussion.....	50
IV.5. Conclusion.	54
Conclusion générale.	

Liste de figures

Figure I.1: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.	1
Figure I.2: Sphère céleste.	2
Figure I.3: Coordonnées géographiques.....	3
Figure I.4: Coordonnées horaires.....	4
Figure I.5: Coordonnées horizontale.....	4
Figure I.6: Représentation graphique de l'équation du temps en fonction des mois 6	6
Figure I.7: Les rayons solaires sur un plan incliné	6
Figure I.8 : Inclinaison des panneaux solaires.	7
Figure I.9 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	8
Figure I.10 : Les cellules photovoltaïques en silicium.....	8
Figure I.11 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.	11
Figure I.12: Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule solaire	12
Figure II.1 : Système photovoltaïque autonome.....	16
Figure II.2 : Système autonome avec stockage (batterie).	16
Figure II.3 : Connexion des batteries.	17
Figure II.4 : Système autonome sans stockage.....	19
Figure II.4 : Système photovoltaïque raccordé a un générateur électrogène.	20
Figure II.5 : Système photovoltaïque hybride.	21
Figure II.6 : Système d'alimentation autonome hybride photovoltaïque.	21
Figure II.5 : Installation photovoltaïque raccordée au reseau.	22
Figure III.1 : Schéma bloc d'une cellule photovoltaïque.....	24
Figure III.2 : Caractéristique (P-V) d'une cellule photovoltaïque.....	25
Figure III.3 : Caractéristique (I-V) d'une cellule photovoltaïque.....	26
Figure III.4 : Schéma bloc de deux cellules photovoltaïques connecté en série.	26
Figure III.5 : Caractéristique (P-V) de deux cellules photovoltaïques connecté en série.	27
Figure III.6 : Caractéristique (I-V) de deux cellules photovoltaïques connecté en série.....	27

Figure III.7 : Schéma bloc de deux cellules photovoltaïques connecté en parallèle.	28
Figure III.8 : Caractéristique (P-V) de deux cellules photovoltaïques connecté en parallèle. ...	28
Figure III.9 : Caractéristique (I-V) de deux cellules photovoltaïques connecté en parallèle. ...	29
Figure III.10 : Schema bloc d'un panneau photovoltaïque.	29
Figure III.11 : Caractéristique (P-V) d'un panneau photovoltaïque.	30
Figure III.12 : Caractéristique (I-V) d'un panneau photovoltaïque.	31
Figure III.13 : Schéma bloc de deux panneau photovoltaïque connecté en serie.	32
Figure III.14 : Caractéristique (P-V) de deux panneau photovoltaïque connecté en série.	33
Figure III.15 : Caractéristique (I-V) de deux panneau photovoltaïque connecté en série.	33
Figure III.16 : Schéma bloc de deux panneau photovoltaïque connecté en parallèle.	34
Figure III.17 : Caractéristique (P-V) de deux panneau photovoltaïque connecté en parallèle. ...	34
Figure III.18 : Caractéristique (I-V) de deux panneau photovoltaïque connecté en parallèle. ...	35
Figure III.19 : Influence de l'eclairment sur la caractéristique (P-V) d'un pv.	36
Figure III.20 : Influence de l'eclairment sur la caractéristique (I-V) d'un pv.	36
Figure III.21 : Influence de la température sur la caractéristique (P-V) d'un pv.	38
Figure III.22 : Influence de la température sur la caractéristique (I-V) d'un pv.	38
Figure IV.1 : Déférent types d'ombrage.	41
Figure IV.2 : Schéma bloc d'une installation des panneaux photovoltaïques.	42
Figure IV.3 : Schéma bloc d'une installation des panneaux photovoltaïques avec un pv ombrage. ...	42
Figure IV.4 : Comparaison des caracteristique (P-V) d'une installation pv sans ombrage et la même installation avec une pv ombragé.	43
figure IV.5 : Schéma de simulation de l'ombrage applique par blocs gain sur les cellules solaires. ...	44
Figure IV.6 : Représentation matricielle de l'installation photovoltaïque (deux pv ombrage). ...	45
Figure IV.7 : Comparaison des caractéristique (P-V) de deux déférant cas d'ombrage partielle sur 2 pv.	46
Figure IV.8 : Représentation matricielle de l'installation photovoltaïque (trois pv ombrage). ...	47
Figure IV.9 : Comparaison des caractéristique (I-V) de trois déférant cas d'ombrage partielle sur 3 pv.	48
Figure IV.10 : Représentation matricielle de l'installation photovoltaïque (quatre pv ombrage).	49
Figure IV.11 : Comparaison des caractéristique (P-V) de cinq déférant cas d'ombrage partielle sur 4 pv.	50

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les différents types de cellule photovoltaïque	9
Tableau I.2 : Les avantages et les inconvénients du système photovoltaïque.	13
Tableau II.1. : Les caractéristiques de type des batteries.	17
Tableau III.1. : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	25
Tableau III.2 : Caractéristique d'un panneau photovoltaïque.	30
Tableau IV.1 : Caractéristiques électriques et paramètres de performance de l'installation pv. ...	51

Nomenclature

n : numéro du jour de l'année.

TSV : temps solaire vrai.

φ : Latitude du lieu.

ω : angle horaire.

δ : Déclinaison du soleil.

h : hauteur du soleil.

λ : la longitude traduite en heures (1 heure pour 15 degrés).

j : Numéro du jour de l'année

I_{ph} : Courant photonique.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

I_0 : Courant de saturation.

I_{rs} : Courant de saturation inverse de la diode.

I_{sh} : Courant shunt (courant circulant dans la résistance shunt).

V_{oc} : Tension a circuit ouvert.

T_{ref} : Température de référence.

q : la charge électrique.

n : Facteur de Nou idéalité de la jonction.

N : Nombres de cellule.

K : Constante de Boltzwane.

E_g : énergie de reinl.

K_i : Coefficient d' I_{cc} .

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt.

S : Surface de la cellule solaire en (m^2).

G : Eclairement (W/m^2).

Résumé :

Ce travail porte sur l'analyse du comportement des systèmes photovoltaïques à l'aide de la modélisation et de la simulation sous MATLAB/Simulink. Après une étude théorique sur le fonctionnement des cellules solaires, un générateur photovoltaïque a été modélisé en tenant compte de paramètres comme la température, l'irradiance et le type de raccordement. L'accent a été mis sur l'impact de l'ombrage partiel, à travers plusieurs scénarios simulés. Les résultats ont permis d'évaluer les pertes de puissance afin de minimiser les pertes de puissance, nous avons utilisé une connexion optimisée des panneaux où l'ombrage est réparti sur différentes chaînes, ce qui a montré une meilleure efficacité du système en conditions réelles.

Abstract:

This work focuses on analyzing the behavior of photovoltaic systems using modeling and simulation with MATLAB/Simulink. After a theoretical study on solar cell operation, a photovoltaic generator was modeled considering parameters such as temperature, irradiance, and connection type. Particular attention was given to the impact of partial shading through several simulated scenarios. The results allowed us to assess power losses in order to minimize power losses, we used an optimized connection of panels where the shading is distributed over different chains, which showed better system efficiency under real conditions.

الملخص:

في هذا العمل، درسنا أداء الأنظمة الكهروضوئية باستخدام النمذجة والمحاكاة عبر برنامج ماتلاب، مع التركيز على تأثير العوامل مثل الحرارة، الإشعاع الشمسي ونوع التوصيل الكهربائي. خصصنا جزءاً من الدراسة من خلال محاكاة عدة حالات لتحليل أثر التظليل الجزئي على الألواح الشمسية كونه المشكلة المطروحة. وقد ساعدتنا النتائج على فهم تأثير التظليل واقتراح حلول مثل ترتيب الألواح، مما يساهم في تحسين كفاءة الأنظمة الشمسية تحت ظروف مناخية متغيرة.

Introduction générale

Plusieurs travaux récents ont proposé des solutions innovantes pour atténuer les effets de l'ombrage partiel sur les systèmes photovoltaïques. Parmi elles, l'intégration de convertisseurs DC-DC (de type Buck) à l'échelle des modules ou des sous-modules permet d'optimiser localement la puissance délivrée, même en présence d'ombres [1]. Ce principe, utilisé dans des architectures dites « intelligentes », permet par exemple de maintenir jusqu'à 79,5 % de la production idéale selon certaines simulations. Toutefois, malgré ces performances prometteuses, ce type de solution reste encore limité par sa complexité, son coût, et une fiabilité qui peut poser problème en conditions réelles sur le long terme [2].

Dans ce mémoire, nous avons mené une étude approfondie sur le comportement des systèmes photovoltaïques en présence d'ombrage, en combinant une approche théorique, de modélisation et de simulation à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink. Le premier chapitre est consacré aux fondements théoriques de l'énergie solaire. Il présente le gisement solaire en Algérie, à travers l'étude de la sphère céleste, des coordonnées géographiques, horaires et horizontales, ainsi que des paramètres temporels tels que le temps solaire. Ce chapitre aborde également le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques électriques, ainsi que les avantages et inconvénients liés à cette technologie.

Le deuxième chapitre traite des différentes techniques d'intégration des systèmes photovoltaïques. Il présente les systèmes autonomes (avec ou sans stockage), les systèmes connectés à un générateur électrogène, les systèmes hybrides, ainsi que les systèmes connectés au réseau. Chaque configuration est analysée en fonction de son principe de fonctionnement et de ses domaines d'application.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation de systèmes photovoltaïques. Nous avons d'abord simulé une cellule photovoltaïque seule, puis en configurations série et parallèle. Ensuite, les mêmes types de simulations ont été appliqués à un générateur photovoltaïque (GPV), afin d'observer le comportement global du système. Dans les deux cas, nous avons analysé l'influence de l'irradiance et de la température sur la production de puissance.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous avons étudié en détail l'effet de l'ombrage partiel sur une installation photovoltaïque. Pour cela, nous avons modélisé une configuration de 16 panneaux

(4×4) avec l'intégration de diodes de dérivation entre les chaînes. Plusieurs scénarios de simulation ont été réalisés en faisant varier le nombre et la position des panneaux ombragés. L'analyse des résultats nous a permis d'observer l'impact direct de l'ombrage sur la puissance produite, et de proposer des solutions techniques telles que l'optimisation du câblage ou la répartition stratégique des panneaux dans les chaînes, afin de limiter les pertes.

L'objectif de ce travail est d'approfondir la compréhension du phénomène d'ombrage dans les systèmes photovoltaïques, et de proposer des pistes concrètes pour améliorer leur rendement dans des conditions d'ensoleillement non uniformes.

CHAPITRE I

Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie inépuisables. Elles proviennent d'éléments naturels tels que le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre ou encore la croissance des végétaux. On appelle gisement solaire l'ensemble des caractéristiques locales de la ressource en énergie solaire, notamment ses fluctuations temporelles. Par analogie, un gisement de pétrole représente une quantité de combustible prouvée ou estimée, que l'on peut extraire selon certains coûts. Le rythme d'extraction dépend des besoins et des conditions socio-économiques : c'est un gisement passif, un stock dont la décroissance est contrôlée par l'homme. Le gisement solaire, quant à lui, est fluctuant et instantané. Il est renouvelable, mais ce qui n'a pas été capté à un instant donné ne pourra plus l'être ensuite. Pour dimensionner un système énergétique solaire, il est nécessaire de définir, pour la région concernée, le profil des fluctuations du rayonnement solaire, en intensité et en quantité, à partir d'une étude statistique sur plusieurs années.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le gisement d'énergie solaire, expliquer le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, et analyser les avantages ainsi que les inconvénients du système photovoltaïque [3],[4],[5].

I.2. Gisement énergétique

I.2.1. Gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire correspond à un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible sur une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et pour dimensionner ce dernier de manière aussi précise que possible, en tenant compte de la demande à satisfaire. Grâce à sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire considérable, comme le montre la figure I.1 [4] :

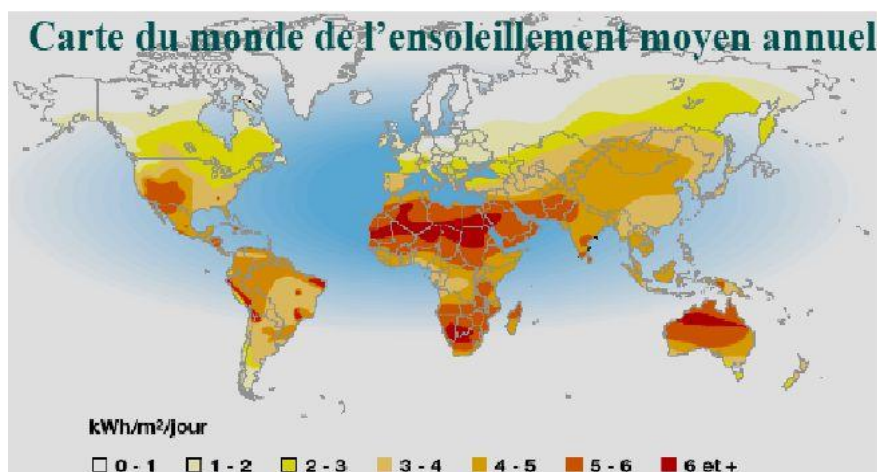


Figure I.1: carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [4]

I.2.2. Sphère céleste

La sphère céleste est une construction imaginaire représentant une sphère de rayon infini, centrée sur l'observateur terrestre. Elle sert de support au système de coordonnées célestes, permettant de localiser les astres dans le ciel. Elle est également utilisée comme référence pour la mesure de certains intervalles de temps astronomiques [3],[4].

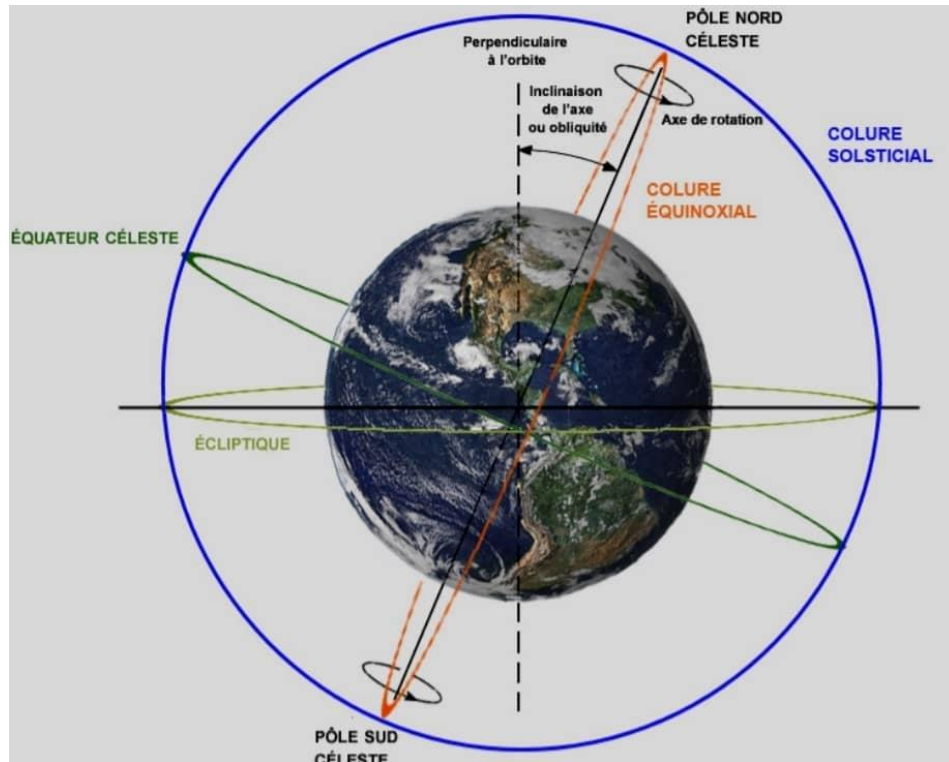


Figure I.2: sphère Céleste [4]

I.2.3. Coordonnées géographiques

Ce des coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre [3],[4],[6].

A. La latitude φ

C'est l'angle formé entre le plan de l'équateur et la ligne reliant le centre de la Terre au point considéré. L'équateur terrestre correspond à une latitude de 0° , le pôle Nord à une latitude de $+90^\circ$, et le pôle Sud à une latitude de -90° .

B. Longitude λ

La longitude d'un lieu est l'angle formé entre deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un correspondant au méridien de référence (méridien de Greenwich, 0°) et l'autre passant par le lieu considéré. La longitude peut varier de -180° à $+180^\circ$. À chaque écart de 1° de longitude correspond un décalage de 4 minutes en temps solaire. On attribue le signe (+) aux longitudes situées à l'Est du méridien de Greenwich, et le signe (-) à celles situées à l'Ouest.

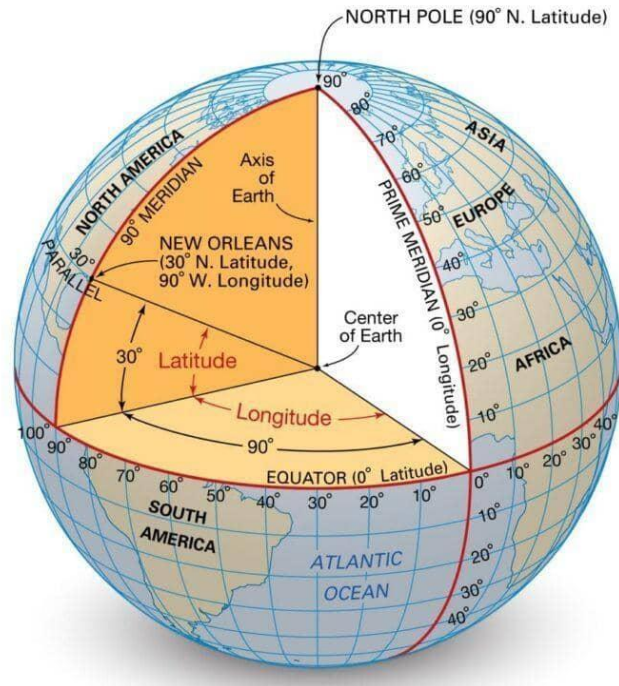


Figure I.3: coordonnées géographiques

I.2.4. Coordonnées horaires

A. Déclinaison du soleil δ

C'est l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial, elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $23,45^\circ$, elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximal au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation [3] :

$$\delta = 23,45^\circ \sin [0,980(n + 284)] \quad (I.1)$$

B. L'angle horaire du soleil ω

L'angle horaire représente l'arc (ou l'angle) compris entre le plan méridien du lieu et la direction du rayonnement solaire incident.

Sa valeur est nulle à midi solaire, négative le matin, positive l'après-midi, et elle augmente de 15° par heure [3].

$$\omega = 15 (TSV - 12) \quad (I.2)$$

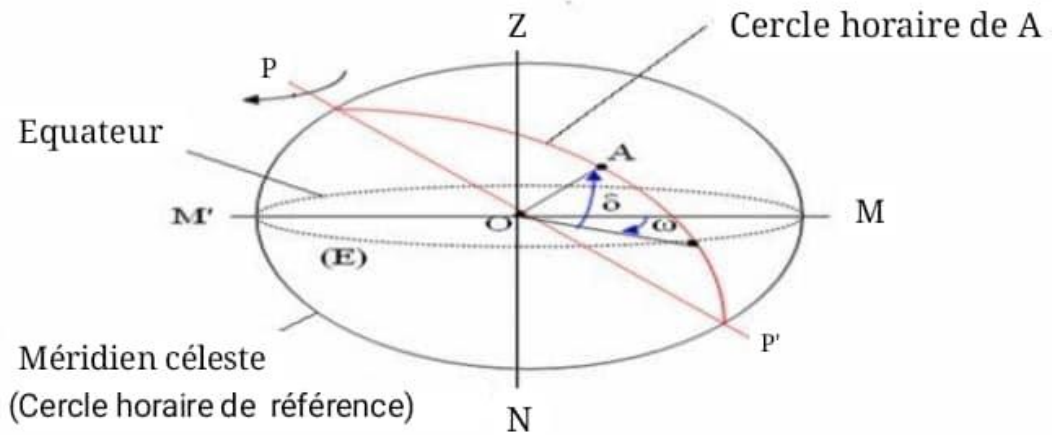


Figure I.4: coordonnées horaires [3]

I.2.5. Coordonnées horizontales

A. Hauteur angulaire du soleil h

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal [3].

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \sin(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (I.3)$$

B. Azimut a

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil, on peut le compter positivement de 0° à +180° vers l'ouest et négativement de 0° à -180° vers l'est [3] :

$$\sin(a) = \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) \cdot \cos(h) \quad (I.4)$$

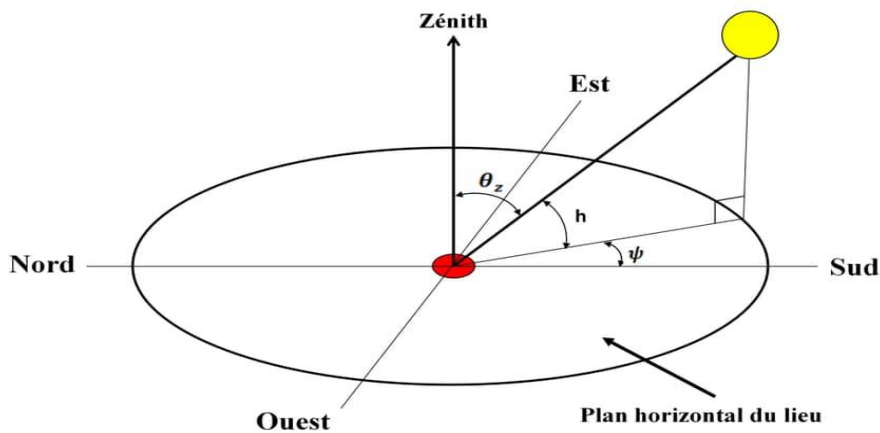


Figure I.5: coordonnées horizontales

C. Le Zénith

La distance au zénith est le complément de l'angle de la hauteur solaire s'appelle angle de zénith (ϕ_z), qui est donnée par [4] :

$$\phi_z = 90^\circ - h \quad (I.5)$$

Angle horaire au lever et au coucher du soleil :

$$\omega L = -\omega C = \arccos(-\tan(\psi) \cdot \tan(\delta)) \quad (I.6)$$

I.2.6. Les paramètres du temps

I.2.6.1. Temps solaires

Pour que les formules de $\sin(h)$ et $\sin(a)$ soient directement utilisables, il faut relier l'angle horaire ω au temps légal [4].

A. Le temps solaire vrai *TSV*

On appelle Le temps solaire vrai en un lieu et un instant donné, l'angle horaire du soleil en ce lieu et à cet instant [3] :

$$TSV = 12 + \omega/15 \quad (I.7)$$

B. Le temps solaire moyen *TSM*

C'est le temps qui correspond à une rotation uniforme de la terre autour du soleil. Il diffère peu du *TSV* (Écart maximal $ET = 16$ minutes) [3] :

$$TSM = TSV + ET \quad (I.8)$$

C. Le temps universel TU

On définit le temps universel TU comme le temps solaire du méridien fondamental (Méridien Greenwich) Pour un lieu de longitude λ [3] :

$$TU = TSM - \lambda \quad (I.9)$$

D. Équation du temps

Le temps solaire vrai (*TSV*) diffère du temps solaire moyen (*TSM*). Cette différence, appelée équation du temps (*ET*), varie au cours de l'année en fonction du jour. Elle résulte principalement de la variation de la vitesse de la Terre sur son orbite autour du Soleil.

L'équation du temps peut prendre des valeurs allant d'environ $-14,3$ minutes à $+16,4$ minutes. Elle permet de corriger le temps solaire moyen pour obtenir le temps solaire vrai.

Elle peut être estimée à l'aide d'une formule approchée (en minutes) [3],[4] :

$$ET = -10^{-4}[2 - 4797 \cos(\omega'j) + 32265 \cos(2\omega'j) + 903 \cos(3\omega'j) + 73509 \sin(\omega'j) + 93912 \sin(2\omega'j) + 3361 \sin(3\omega'j)] \quad (I.10)$$

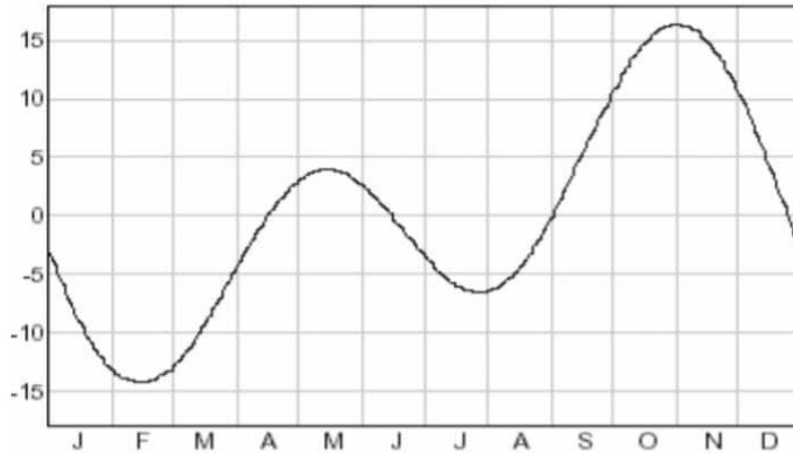


Figure I.6: Représentation graphique de l'équation du temps en fonction des mois [3]

E. Repérage de la position du soleil

Le repérage de la position du Soleil s'effectue par les deux angles l'azimut 'a' et la hauteur 'h' qui se calculent par les formules théoriques suivantes :

F. L'azimut a

Trois configurations peuvent être envisagées pour l'orientation des panneaux solaires :

1. Le panneau en position horizontale.
2. Le panneau incliné de manière fixe.
3. Le panneau orienté de façon à rester perpendiculaire aux rayons solaires tout au long de la journée. Dans le cadre de notre étude d'orientation et de simulation, nous avons choisi de maintenir le panneau perpendiculaire aux rayons solaires afin d'optimiser la captation de l'énergie. Les rayons solaires forment alors un angle d'incidence θ avec la normale au plan du panneau, comme illustré dans la figure suivante [3] :

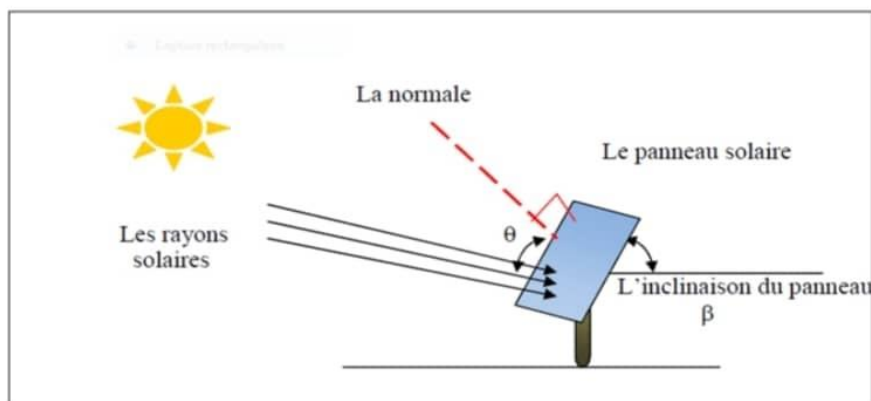


Figure I.7: les rayons solaires sur un plan incliné [3]

Le panneau est incliné d'un angle β , les rayons solaires arrivent avec une hauteur h , les deux angles doivent être complémentaires et former 90° . Nous devons incliner le panneau de telle sorte que les rayons solaires arrivent perpendiculairement sur la surface. Cela revient donc à annuler l'angle incident θ et à déterminer l'angle d'inclinaison du panneau. L'équation générale qui nous permet de calculer les angles (a , h) pour les différentes positions du panneau est [3],[4] :

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(L) \cdot \sin(\delta) \cdot \cos(\beta) - \cos(L) \cdot \sin(\delta) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(a) + \\ & \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\beta) + \sin(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(a) + \\ & \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(a) \end{aligned} \quad (I.11)$$

Cas d'un plan horizontal : l'inclinaison du panneau est nulle et l'équation devient :

$$\sin(h) = \cos(\theta) = \sin(L) \cdot \sin(\delta) + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (I.12)$$

Cas d'un plan perpendiculaire : l'équation 1.20 devient :

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & -\cos(L) \cdot \sin(\delta) \cdot \cos(a) + \sin(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(a) + \\ & \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) \cdot \sin(a) \end{aligned} \quad (I.13)$$

Pour une poursuite du soleil suivant deux axes, avec le panneau orienté en permanence face au soleil, sous une incidence normale l'angle incident θ doit être nul $\cos(\theta) = 1$.

L'inclinaison du panneau β : $\cos(\theta) = 1$.

L'inclinaison du panneau se détermine finalement par la relation :

$$\beta = 90 - h \quad (I.14)$$

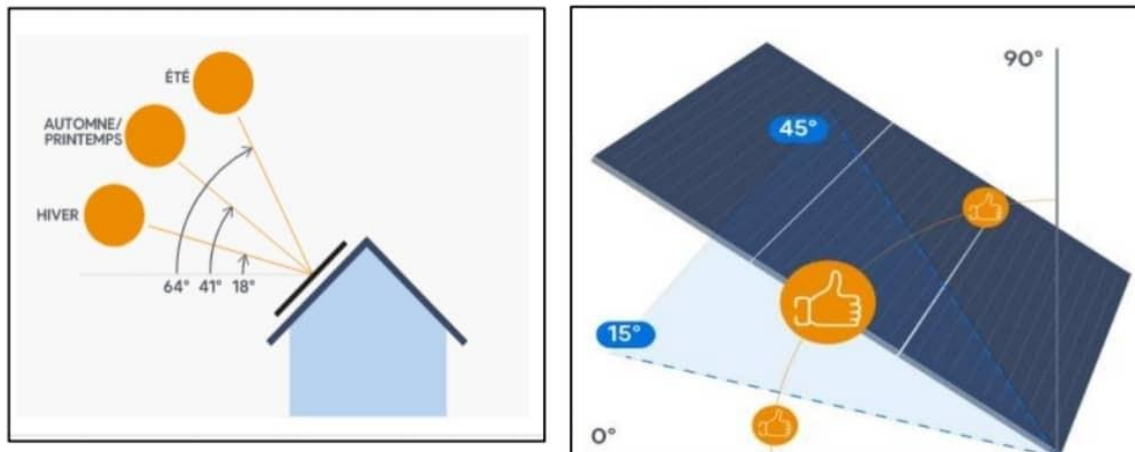


Figure I.8 : Inclinaison des panneaux solaires.

I.3. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Les photopiles, ou cellules photovoltaïques, sont des dispositifs optoélectroniques capables de convertir directement la lumière du Soleil en électricité.

Une cellule solaire est obtenue par la création d'une jonction entre deux zones semi-conductrices de types opposés (jonction PN). À proximité de cette jonction, un champ électrique interne se

forme en raison du déséquilibre des charges électriques, ce qui permet de séparer et diriger les électrons libérés par l'absorption de l'énergie des photons (particules de lumière).

Pour former un module photovoltaïque (PV), plusieurs cellules solaires sont connectées en série et en parallèle, puis encapsulées sous un verre protecteur afin d'assurer leur durabilité et leur efficacité [7].

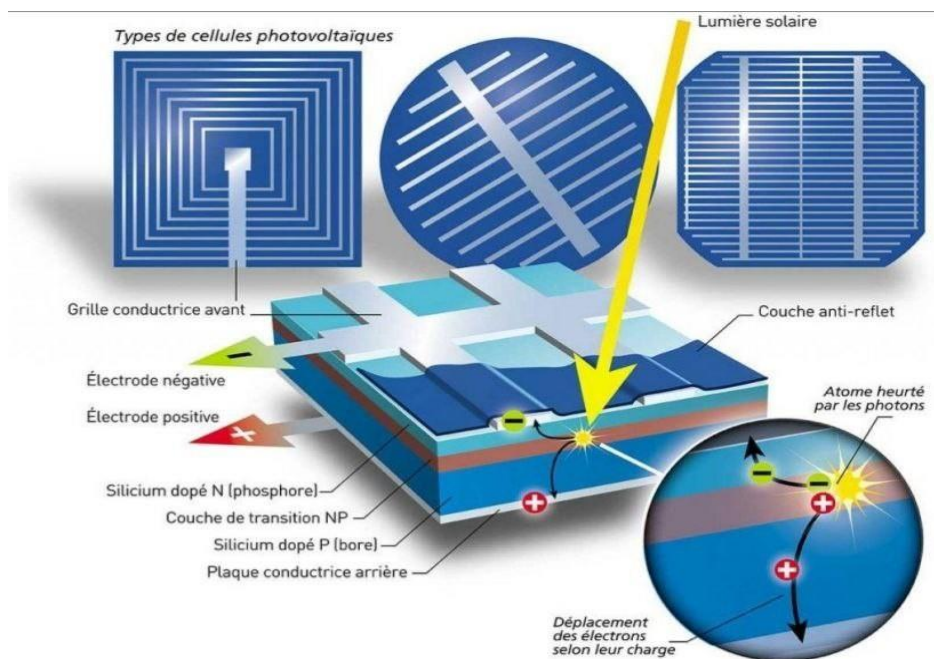


Figure I.9 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [9]

Le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïque est le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, polycristalline, ou monocristalline [7].

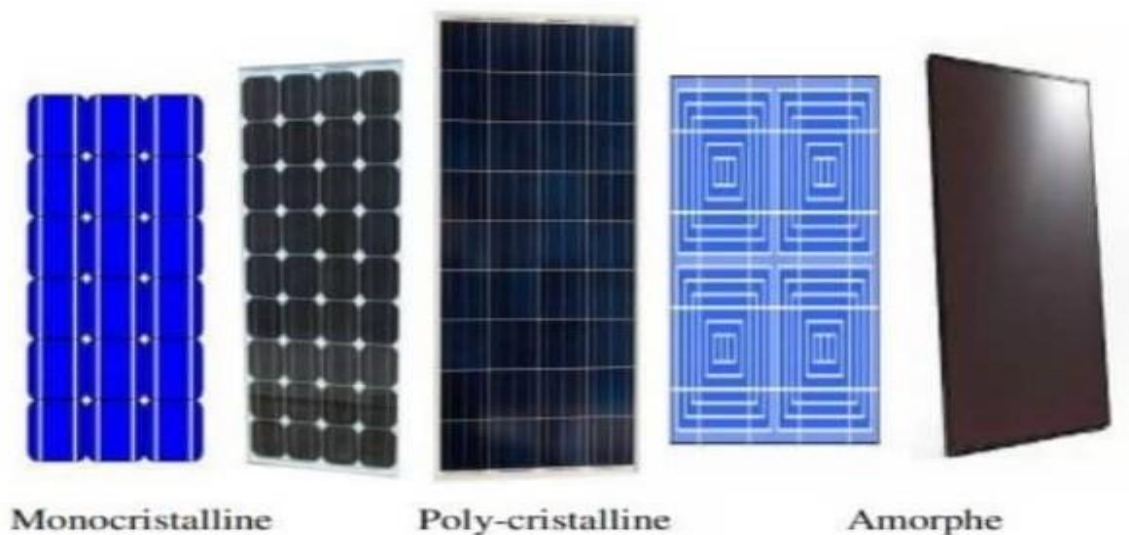


Figure I.10 : les cellules photovoltaïques en silicium [7]

Tableau I.1 : Les différents types de cellule photovoltaïque [7],[10]

Les cellules	Rendement maximal	Avantages	Inconvénients
<p>Cellules photovoltaïques en silicium amorphe.</p> 	<p>8 %</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Une technologie éprouvée et abordable. – Une utilisation sous forme souple ou rigide. – Fonctionne même avec une faible luminosité. – Une technologie éprouvée et abordable. – Une utilisation sous forme souple ou rigide. 	<ul style="list-style-type: none"> – Un rendement très faible. – Une technologie inopérante pour une production – Un rendement très faible. – Une technologie inopérante pour une production.
<p>Cellules photovoltaïques en silicium poly cristallin.</p> 	<p>18 %</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Meilleur rapport rendement/prix du marché. – Meilleur rapport rendement/prix du marché. 	<ul style="list-style-type: none"> – Un procédé de fabrication coûteux. – Nécessite une luminosité optimale.
<p>Cellules photovoltaïques en silicium mono cristallin.</p> 	<p>25 %</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Un excellent rendement. – Un aspect uniforme souvent jugé plus esthétique que le poly cristallin. 	<ul style="list-style-type: none"> – Un procédé de fabrication très coûteux. – Nécessite une luminosité optimale.

I.3.1 Modèle mathématique d'une cellule solaire

Le choix d'un modèle mathématique pour une cellule solaire dépend généralement de l'objectif de l'étude ainsi que des données disponibles pour l'identification des paramètres. Lorsque seules les informations fournies par le fabricant sont disponibles, il est en général possible de déterminer quatre paramètres seulement. Dans ce cas, il est courant d'utiliser un modèle simplifié à 4 paramètres, basé sur les données accessibles, à savoir [11] :

- Le courant photonique (ou courant de génération),
- Le courant de fuite de la jonction,
- Le coefficient d'imperfection (facteur d'idéalité) de la diode,
- La résistance série de la cellule.

I.3.2 Modèle a une diode

Le courant est donné par la relation suivants [7] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(v+I_{Rs})}{n.K.N_s.T} \right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (I.15)$$

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T - 298)]. \frac{G}{1000} \quad (I.16)$$

$$I_0 = I_{Rs} \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\frac{q.Eg \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}{n.K} \right] \quad (I.17)$$

$$I_{Rs} = \frac{I_{cc}}{\exp \left(\frac{q.V_{oc}}{n.N_s.K.T} \right) - 1} \quad (I.18)$$

$$I_{sh} = \frac{v+I_{Rs}}{R_{sh}} \quad (I.19)$$

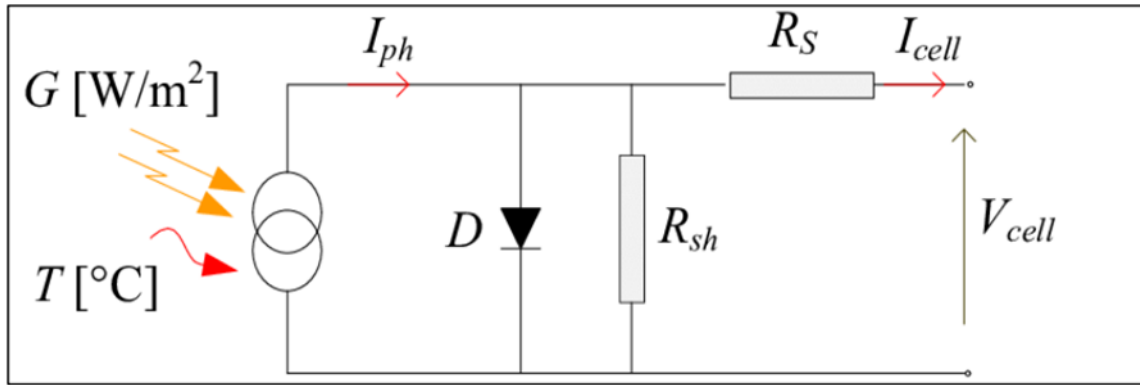


Figure I.11 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [11],[12]

I.4. Les caractéristiques d'un module PV

A. La tension en circuit ouvert

Lorsqu'une photopile est exposée à une source lumineuse constante sans qu'aucune charge ne soit connectée à ses bornes, elle génère une tension continue appelée tension en circuit ouvert (notée ou tension à vide). Cette tension est généralement de l'ordre de 0,6 V, mais elle peut varier légèrement en fonction de la température et de l'intensité lumineuse reçue.

B. Le courant de court-circuit

Contrairement au cas de la tension en circuit ouvert, lorsqu'une photopile est mise en court-circuit (c'est-à-dire lorsque ses bornes sont directement reliées sans charge externe), elle fournit un courant maximal sous tension nulle. Ce courant est appelé courant de court-circuit, noté. Comme mentionné précédemment, le photo-courant généré par la cellule est proportionnel à l'intensité lumineuse incidente ainsi qu'à la surface active du panneau. Ainsi, plus la luminosité et la surface exposée sont importantes, plus le courant généré sera élevé.

C. La puissance maximale

L'objectif principal d'un générateur photovoltaïque est d'atteindre une production d'énergie optimale, correspondant à la puissance maximale fournie par le module. Sous les conditions standardisées (25 °C et 1000 W/m²), cette puissance, appelée puissance crête, est exprimée en watts-crête (Wc) et s'obtient pour une tension et un courant spécifique [12].

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (I.20)$$

D. Le rendement

C'est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_{inc} . On appelle rendement rapport de la puissance maximale fournie P_{max} sur la puissance du rayonnement solaire incident P_{inc} [13] :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{S \times G} \quad (I.21)$$

E. Facteur de forme

Appelé aussi facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} et le produit du courant de court-circuit I_{cc} la tension de circuit ouvert V_{oc} (la puissance maximale d'une cellule idéale). Il indique la qualité de la cellule, il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes il diminue avec l'élévation de la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_{sh} [13] :

$$F_f = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (I.22)$$

Le rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert (Figure I.12).

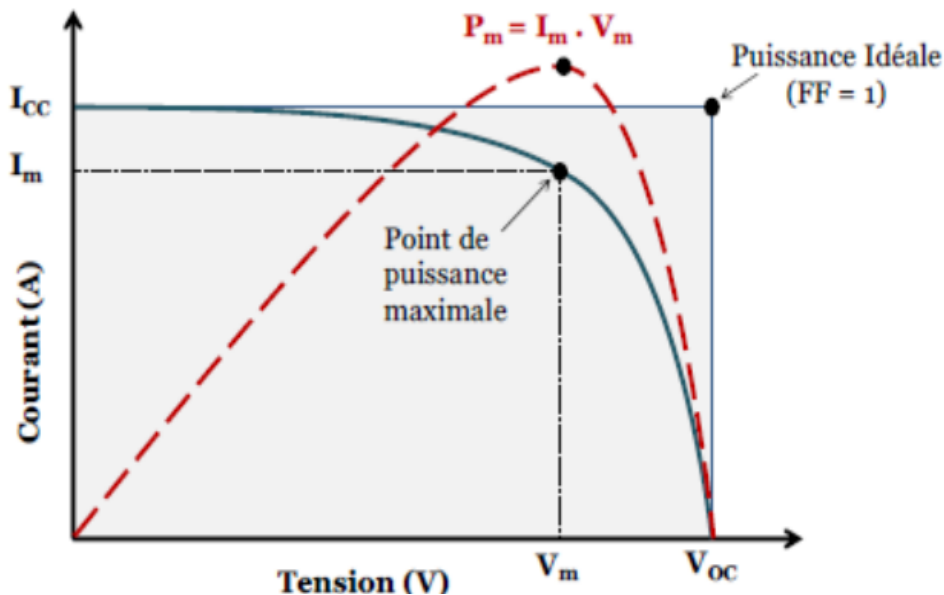


Figure I.12 : Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule solaire

I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque présente plusieurs avantages et inconvénients [14] :

Tableau I.2 : Les avantages et les inconvénients du système photovoltaïque

Avantages du système photovoltaïque	Inconvénients du système photovoltaïque
Source d'énergie durable et gratuite : Le Soleil fournit une énergie abondante, illimitée et accessible partout.	Investissement initial important : La fabrication des panneaux solaires repose sur des technologies avancées et requiert un investissement conséquent en recherche et développement.
Respectueuse de l'environnement : Aucun rejet de gaz à effet de serre ni de déchets nocifs pendant la production.	Rendement énergétique modéré : Les cellules photovoltaïques présentent un taux de conversion encore relativement faible, généralement compris entre 15 % et 20 %.
Indépendance énergétique : Permet de subvenir localement aux besoins en électricité, sans dépendre totalement du réseau.	Production variable : La quantité d'énergie produite dépend fortement des conditions climatiques et de l'ensoleillement, ce qui rend le système moins performant la nuit ou par temps nuageux.
Sécurité d'approvisionnement : Réduit les risques de coupures grâce à une production décentralisée.	Nécessité de stockage : Pour garantir une autonomie énergétique, l'intégration de batteries est souvent indispensable, ce qui augmente à la fois le coût et la complexité de l'installation.
Système évolutif : Les installations peuvent être dimensionnées ou agrandies selon les besoins spécifiques.	
Valorisation du surplus : L'électricité non consommée peut être revendue au réseau, contribuant au retour sur investissement.	
Faibles besoins d'entretien : Les panneaux sont robustes et nécessitent peu d'interventions techniques.	

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons plus étudié l'électricité photovoltaïque endossée par l'énergie solaire. Tout en représentant l'un des grands bassins mondiaux, sièges de l'énergie solaire, en l'occurrence l'Algérie. Nous avons découvert le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, ces appareils qui convertissent la lumière en énergie et produisent de l'électricité à travers un phénomène appelé effet : le photovoltaïque. Nous avons également discuté des avantages de l'électricité photovoltaïque, tels que la durabilité, l'efficacité écologique ainsi que la capacité de s'autonourrir. Mais là où existent les avantages, subsistent des lacunes, le coût élevé que très peu de pays pourraient se permettre. Ainsi, nous avons conclu que l'électricité photovoltaïque reste une solution très prometteuse pour l'avenir de l'énergie.

CHAPITRE II

Techniques d'intégration d'un système photovoltaïque

II.1. Introduction

Suivant la norme IEC (Commission Electrotechnique Internationale) Un système photovoltaïque (PV) est un ensemble d'équipements comprenant des panneaux solaires photovoltaïques (également appelés modules PV), des composants d'interconnexion tels que les câbles, les connecteurs et les dispositifs de montage, ainsi que des équipements de conversion de puissance tels que les onduleurs. Ces systèmes sont conçus pour capturer l'énergie solaire et la convertir en électricité utilisable. Ces systèmes peuvent être conçus soit pour fonctionner de manière autonome, soit pour être connectés au réseau électrique, selon les besoins et le contexte d'utilisation.

On distingue trois modes d'exploitation d'un panneau PV : autonome, connecté au réseau et hybride.

II.2. Système solaire photovoltaïque autonome

Les systèmes autonomes sont des unités de production d'électricité à partir de champs solaires, généralement de petite taille (ne dépassant pas 100 kW), et non raccordées à un réseau de distribution. En mode autonome, le système est généralement composé des éléments suivants [15] :

- a. Le champ de modules photovoltaïques (PV) : il produit de l'électricité en période d'ensoleillement et recharge la batterie.
- b. La batterie : elle stocke l'énergie électrique produite et alimente les charges en l'absence de soleil.
- c. Le régulateur de charge : il protège la batterie contre la surcharge due à la production excédentaire du champ PV. Il inclut également une protection contre les décharges profondes.
- d. Le convertisseur (ou onduleur) : il permet l'utilisation d'appareils fonctionnant en courant continu (DC) ou en courant alternatif (AC), selon les besoins.

On distingue deux types de systèmes autonomes :

- i. Les systèmes avec stockage (intégrant des batteries),
- ii. Les systèmes sans stockage, destinés à une utilisation directe de l'énergie produite.

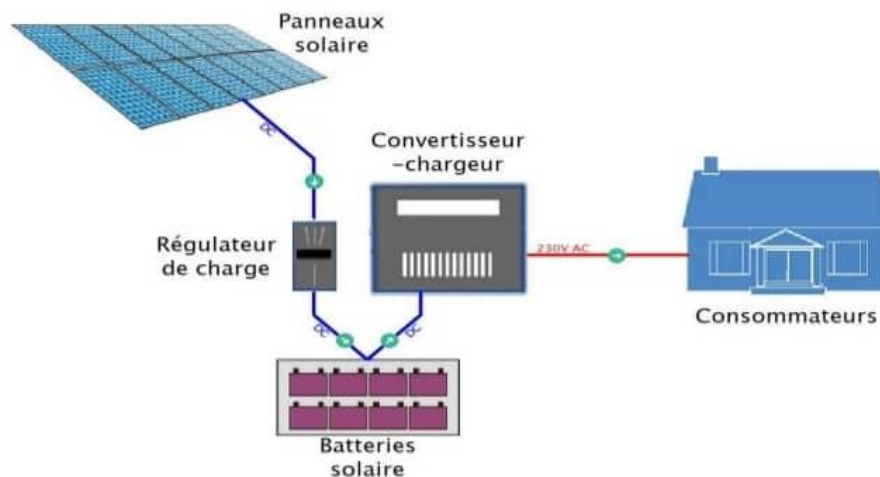


Figure II.1 : Système photovoltaïque autonome

II.2.1. Système autonome avec stockage (batterie)

Il s'agit du type de système photovoltaïque le plus répandu. Le générateur photovoltaïque (PV) permet de recharger la batterie. Ainsi, l'électricité stockée peut être utilisée à tout moment de la journée ou de la nuit. Ce type d'installation convient particulièrement à l'éclairage domestique, notamment lorsque l'électricité est requise après le coucher du soleil [16].

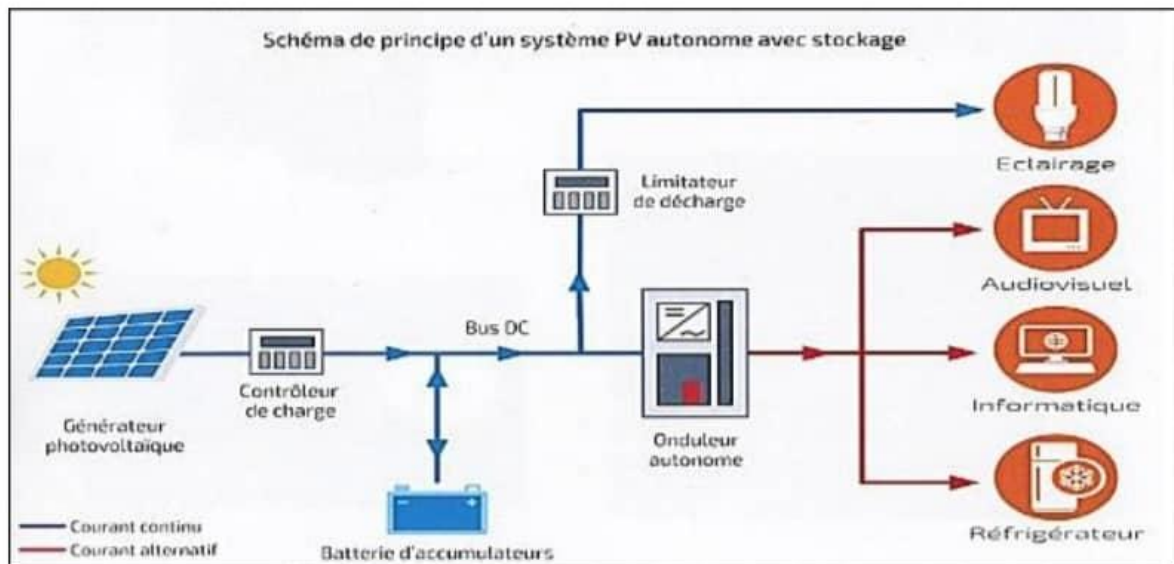


Figure II.2 : Système autonome avec stockage (batterie)

II.2.1.1 Les caractéristiques des batteries

a. La capacité

La capacité représente la quantité d'électricité qu'une batterie peut fournir dans un régime donné. Elle est exprimée en ampères-heures (Ah). Elle correspond à la quantité totale d'Ah disponible lorsque la batterie est déchargée, à un courant spécifique, depuis un état de charge de 100 % jusqu'à atteindre la tension limite de fin de décharge. Elle dépend du courant de décharge, de la température, de l'âge de la batterie, et du type de technologie utilisée [17].

b. Tension de la batterie

Tension électrique entre les bornes d'un élément ou d'une batterie pendant la décharge [17].

c. Tension en circuit ouvert

Tension électrique aux bornes d'un élément ou d'une batterie quand le courant de décharge est nul [17].

d. Profondeur de décharge

La quantité de charge, en pourcentage de la capacité initiale, qui peut être retirée d'une batterie sans réduire sa durée de vie [17].

e. Etat de charge

(Ou SOC pour « State of Charge » en anglais) est la quantité de charge, en pourcentage de la capacité initiale, qui reste accumulée dans la batterie [18].

f. Etat de santé

(Ou SOH pour « State of Health » en anglais) est facteur entre la capacité de charge actuelle d'une batterie par rapport à sa capacité initiale de charge. On reconnaît qu'une batterie a atteint sa durée de vie lorsque ce rapport est plus faible que 80% [17].

g. Durée de vie

Durée totale de la vie active d'un élément ou d'une batterie en fonctionnement [17].

h. Température

Température de l'électrolyte causant la réaction chimique [17].

i. Vie de tablette

Période de temps entre la fin de la fabrication et la mise en service [19].

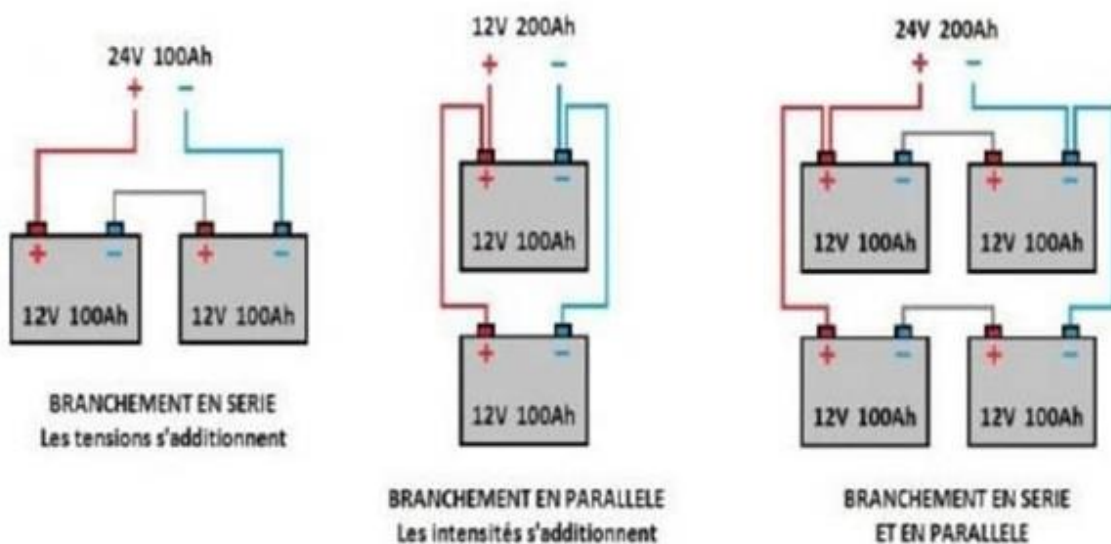
II.2.1.2. Charge et décharge

Le courant de charge est le courant électrique fourni à la batterie afin d'y être stocké.

À l'image d'un réservoir qui se remplit plus ou moins rapidement selon le débit du tuyau, une batterie se charge plus ou moins vite selon l'intensité du courant de charge.

Lorsqu'un appareil (ou une charge) est connecté à la batterie et consomme l'énergie qu'elle contient, la batterie entre en phase de décharge.

L'intensité du courant de décharge représente alors le débit de sortie de la batterie [20].



III.3 : Connexion des batteries

II.2.1.3. Les types de batteries

Tableau II.1. Les caractéristiques de type des batteries [14]

Type de batterie	Tension nominale	Durée de vie	Coût	Rendement
Batteries au Plomb-acide	2V par cellule	5 à 7 ans	Abordable	80%
Batterie au Nickel-cadmium	1.2V par cellule	12 à 15 ans	Modéré	70-90%
Batterie au Lithium-ion	3.6V par cellule	8 ans	Modéré à élevé	90-95%
Batteries au Sodium-ion	3.6V par cellule	15 ans	Moyen	97%

II.2.2. Système autonome sans stockage

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex : calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de charge n'est pas critique (ex : pompe à eau) [19].

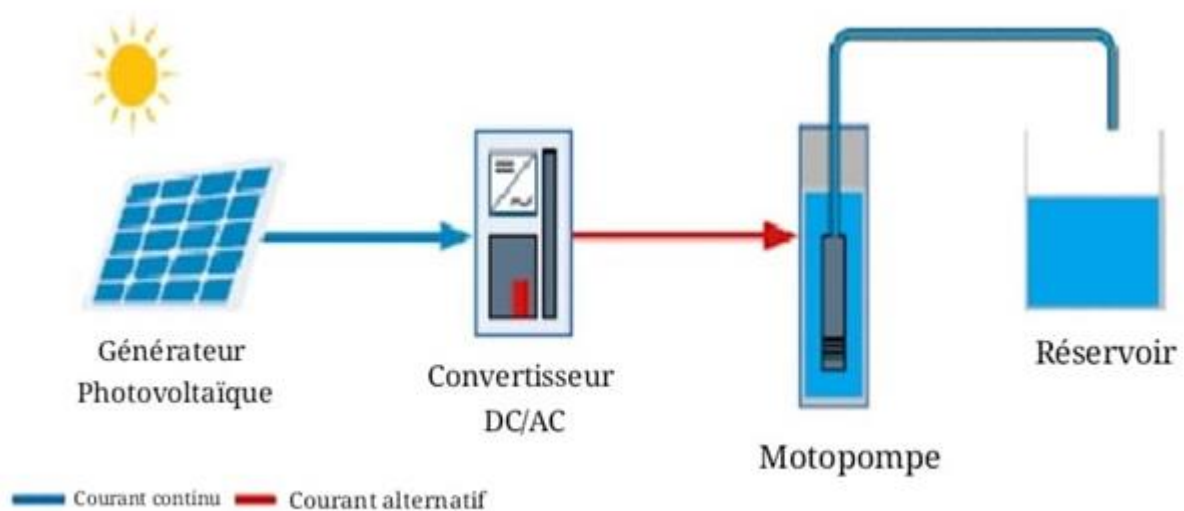


Figure II.4 : Système autonome sans stockage

II.3. Mode connecté à un générateur électrogène

Ce type de système est principalement utilisé dans les communautés rurales ou villages isolés, éloignés des réseaux électriques nationaux. Le générateur photovoltaïque (PV) est connecté en parallèle avec les générateurs diesel locaux du réseau villageois. Il fournit de l'électricité au réseau lorsque l'ensoleillement est suffisant. Ce couplage permet de réduire la consommation de carburant diesel, qui est souvent coûteux et difficile à approvisionner dans ces régions. Il contribue également à réduire les durées de fonctionnement des génératrices thermiques, prolongeant ainsi leur durée de vie et diminuant les coûts de maintenance. [16],[19]

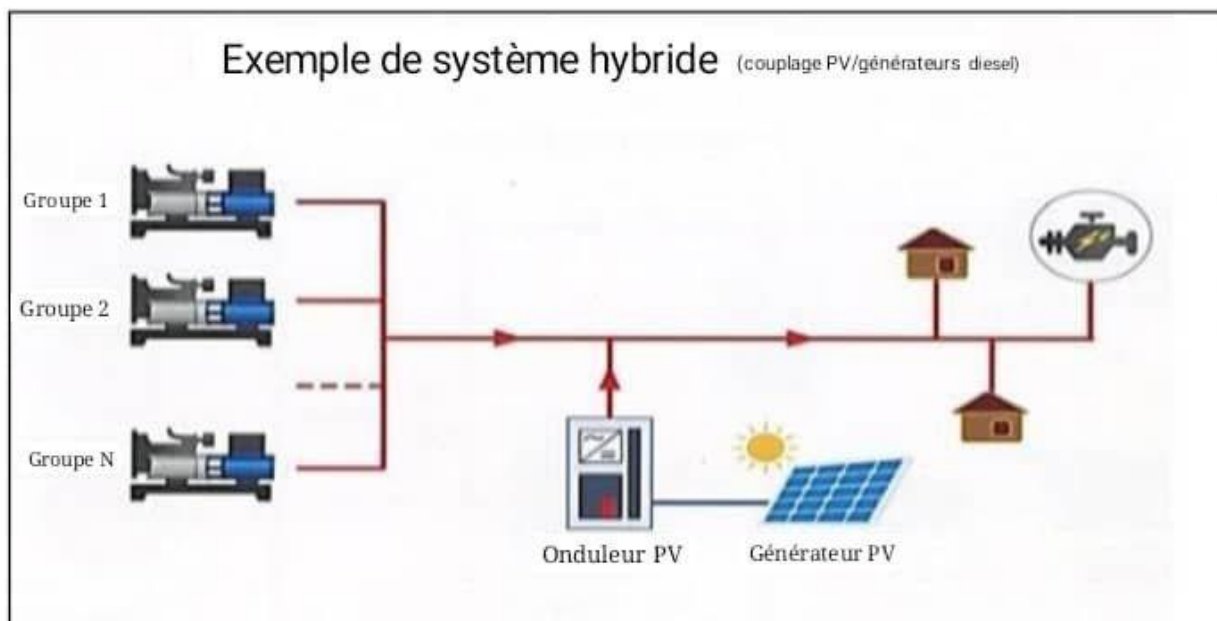


Figure II.4 : Système photovoltaïque raccordé à un générateur électrogène [13]

II.4. Les systèmes hybrides

Un système d'énergie hybride combine plusieurs sources de production d'électricité, telles que les panneaux photovoltaïques, les éoliennes, les cellules à combustible, les groupes électrogènes, ou encore les batteries de stockage. Il s'agit d'une association de technologies complémentaires permettant d'améliorer la disponibilité et la continuité de l'alimentation électrique. Les sources renouvelables comme le soleil et le vent ont un caractère intermittent, mais leur combinaison permet de compenser les variations de l'une par l'autre. Par exemple, dans de nombreuses régions, les journées ensoleillées s'accompagnent souvent de vents faibles, tandis que des vents plus forts surviennent généralement lors de nuits ou de journées nuageuses.

Cette complémentarité permet de garantir une production électrique plus régulière et fiable. [21][16]

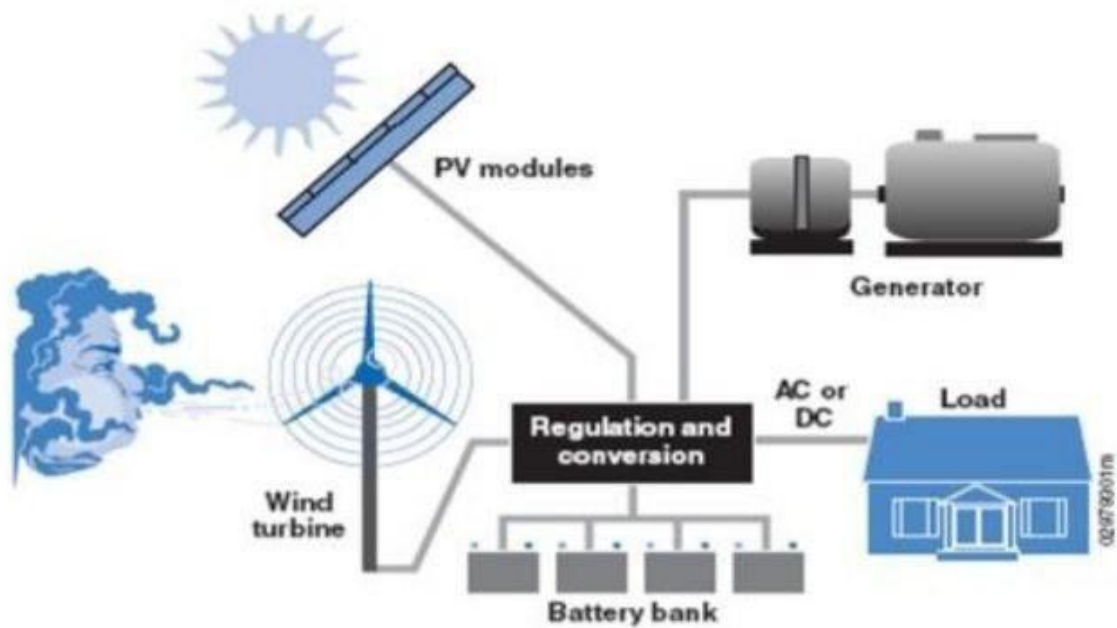


Figure II.5 : Système photovoltaïque hybride [19]

Le choix d'un système hybride se base essentiellement sur les caractéristiques météorologiques du site d'implantation.

Un exemple de système hybride est représenté sur la Figure II.6:



Figure II.6 : Systèmes d'alimentation autonome hybride Photovoltaïque [13]

II.5. Système solaire photovoltaïque connecté au réseau

Ce type de système est installé sur un site déjà raccordé au réseau électrique (comme celui de Sonelgaz en Algérie). Il est couramment utilisé dans les habitations ou entreprises souhaitant recourir à une énergie renouvelable, en particulier dans les régions bénéficiant d'un bon ensoleillement. Un générateur photovoltaïque connecté au réseau ne nécessite pas de stockage d'énergie, ce qui permet d'éliminer l'un des éléments les plus complexes et les plus coûteux du système : la batterie. Dans ce cas, c'est le réseau électrique lui-même qui joue le rôle de "réservoir" d'énergie. Il existe deux modes d'injection de l'électricité produite par les panneaux solaires :

1. Injection totale : l'ensemble de l'énergie produite est injecté dans le réseau.
2. Injection partielle (surplus) : seule l'énergie excédentaire, non consommée sur place, est injectée dans le réseau.

Un onduleur est indispensable pour convertir le courant continu (DC) des panneaux solaires en courant alternatif (AC) compatible avec le réseau. Cet onduleur doit être homologué par la compagnie d'électricité, afin de garantir une qualité de courant conforme (notamment une forme d'onde parfaitement sinusoïdale) [22].

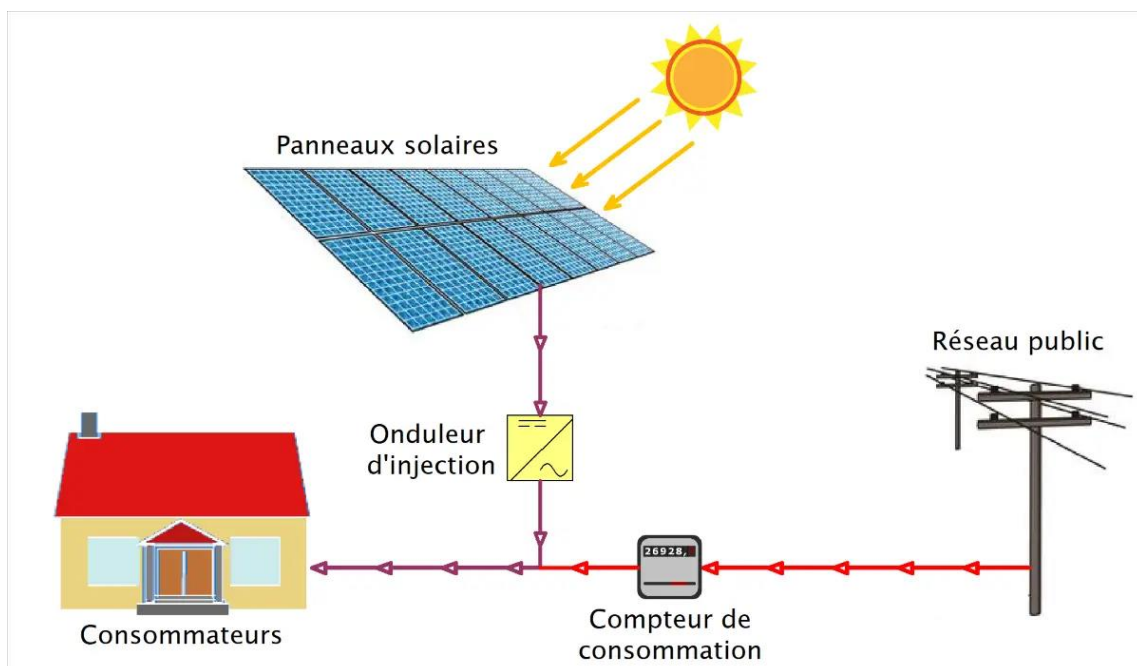


Figure II.5 : Installation photovoltaïque raccordée au réseau

II.6. Conclusion

En conclusion, l'intégration d'un système photovoltaïque dépend du contexte d'utilisation et des objectifs énergétiques. Les systèmes autonomes sont idéaux pour les zones isolées, offrant une indépendance énergétique, tandis que les systèmes connectés au réseau permettent d'optimiser la consommation et d'injecter l'excédent d'énergie produite. Chaque configuration présente des spécificités techniques qui sont essentiel de maîtriser pour assurer une installation fiable, performante et durable. Le choix entre ces deux types repose sur des critères techniques, économiques et environnementaux. Une bonne intégration photovoltaïque contribue ainsi efficacement à la transition énergétique et au développement des énergies renouvelables à l'échelle locale et globale.

CHAPITRE III

Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque

III.1. Introduction

L'énergie solaire est une forme d'énergie renouvelable qui convertit la lumière du soleil en électricité à l'aide de panneaux photovoltaïques. Elle est de plus en plus utilisée pour sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre et sa disponibilité quasi illimitée [22].

Dans le présent chapitre, nous allons traiter de la conversion photovoltaïque. Ainsi, nous commencerons par une brève introduction à propos de la structure et du fonctionnement des cellules photovoltaïques et des générateurs photovoltaïques ou bien des GPV sous l'environnement MATLAB/Simulink. Ensuite, nous verrons quelques paramètres météorologiques qui s'influencent et influencent également le comportement électrique d'une cellule solaire. Enfin, nous aborderons un exemple d'un modèle d'un GPV (le modèle simple à diode).

III.2 Etude et simulation d'une cellule photovoltaïque

III.2.1. Cellule photovoltaïque

Le schéma bloc d'une cellule photovoltaïque, réalisé à l'aide de MATLAB/Simulink, est présenté dans la Figure III.1

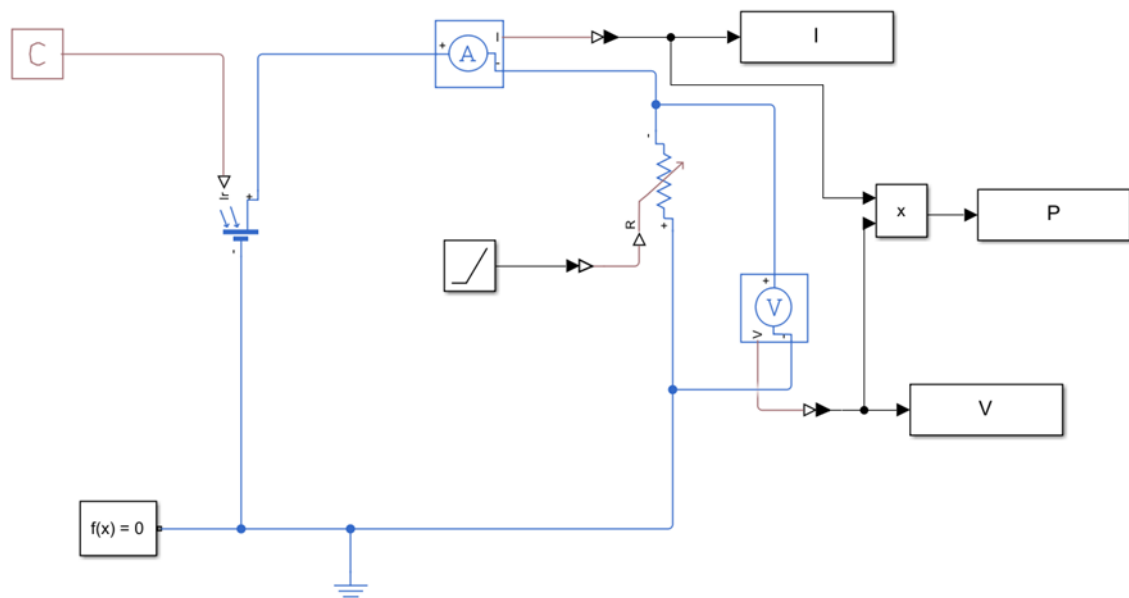


Figure III.1 : Schéma bloc d'une cellule photovoltaïque

L'étude est faite sur une cellule photovoltaïque de type monocristallin, avec les paramètres donnés dans le tableau III.1.

Cette cellule est extraite d'un module photovoltaïque nommé Excellent Glass/Glass 260M54 brillant frameless, fabriqué par l'entreprise Sonnenstromfabrik - CS Wismar [23].

Tableau III.1. : Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Puissance maximale (P_{max})	4.8 W
Tension circuit ouvert (V_{oc})	0.65481 V
Courant court-circuit (I_{sc})	9.530 A
Tension maximale (V_{mpp})	0.53166 V
Courant maximale (I_{mpp})	9.060 A

Les différentes caractéristiques sous les conditions standard ($T=25^{\circ}C$ et $E=1000W/m^2$) :

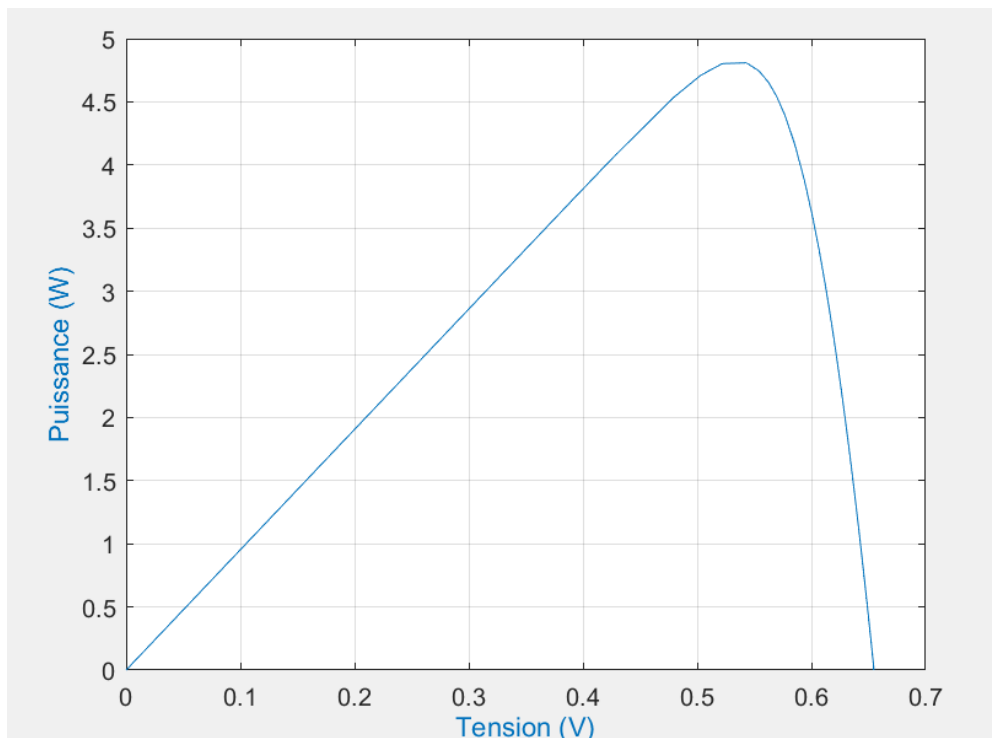


Figure III.2. : caractéristique (P-V) d'une cellule photovoltaïque

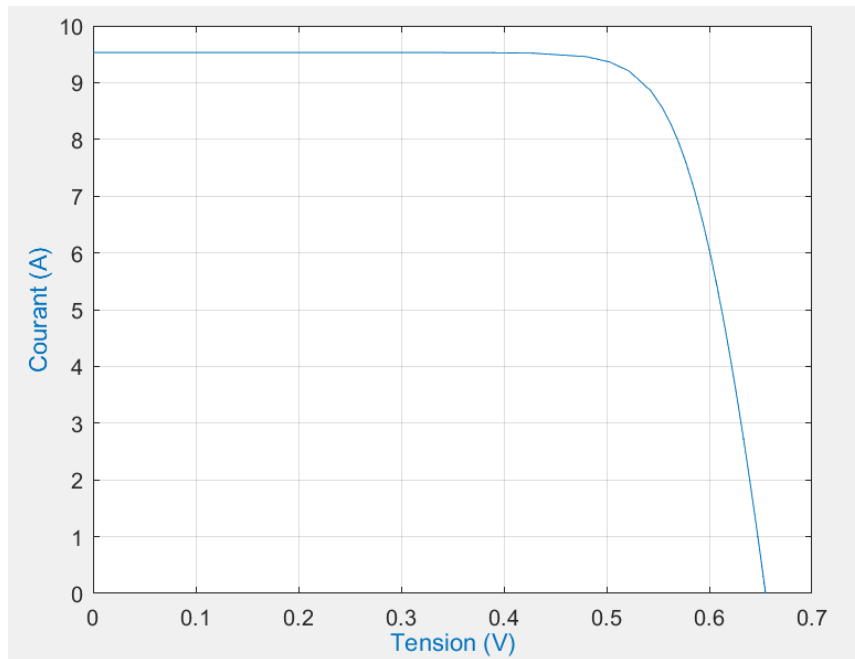


Figure III.3 : caractéristique (I-V) d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque présente un courant de court-circuit (I_{sc}) et une tension de circuit ouvert (V_{oc}). Le point de puissance maximale (P_{mpp}), défini par une tension $V_{mpp} < V_{oc}$, correspond à la production optimale d'énergie. Ce point, influencé par l'ensoleillement et la température, est essentiel pour le dimensionnement des cellules.

III.3. Raccordement en série ou parallèle des cellules photovoltaïques

III.3.1. Raccordement en série des cellules photovoltaïques

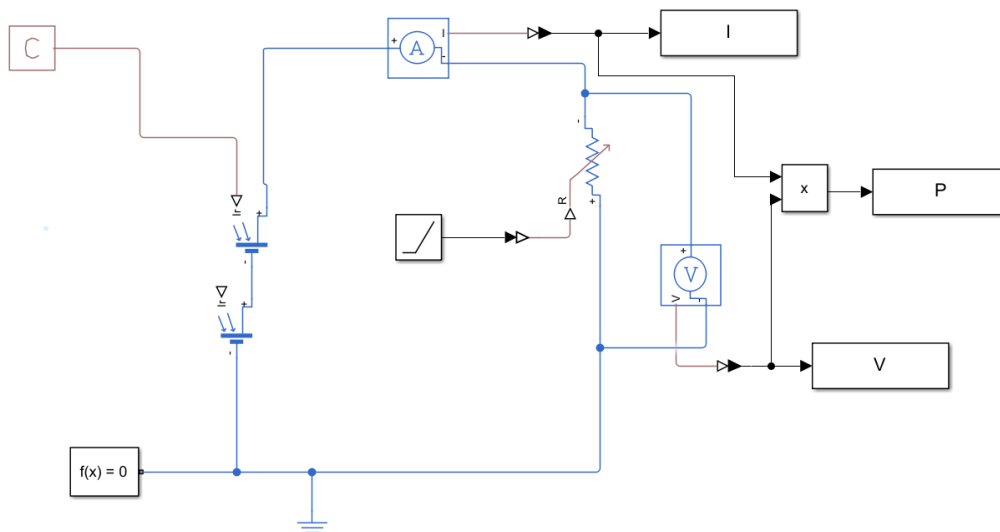


Figure III.4 : Schéma bloc de deux cellules photovoltaïques connecté en série

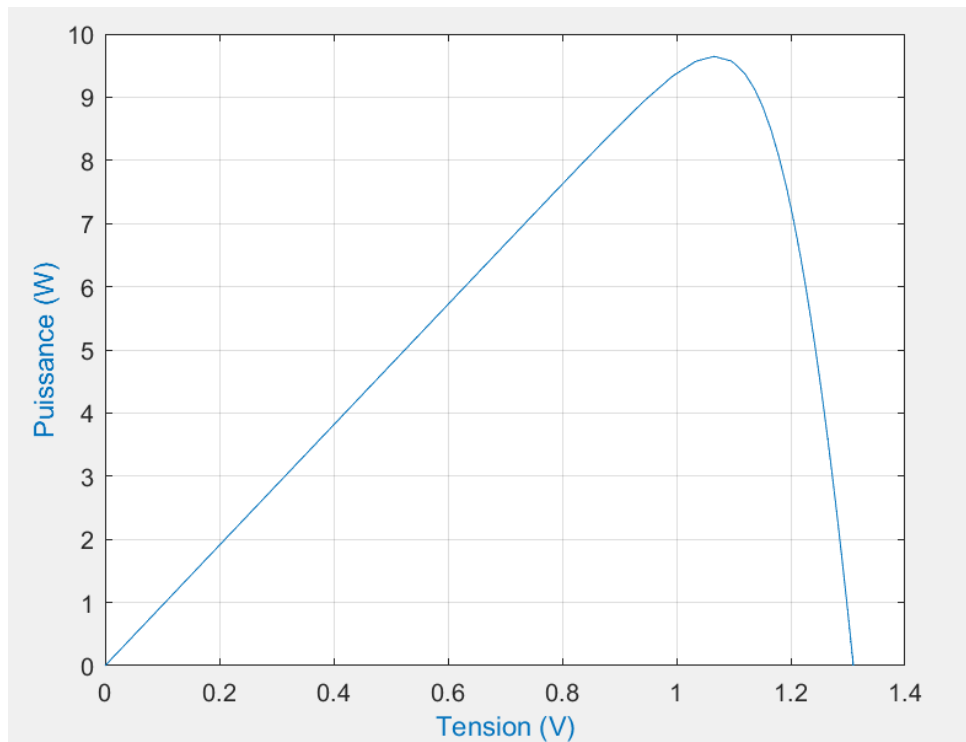


Figure III.5 : caractéristique (P-V) de deux cellules photovoltaïques connecté en série

Les différentes caractéristiques sous les conditions standard ($T=25^{\circ}C$ et $E=1000W/m^2$) :

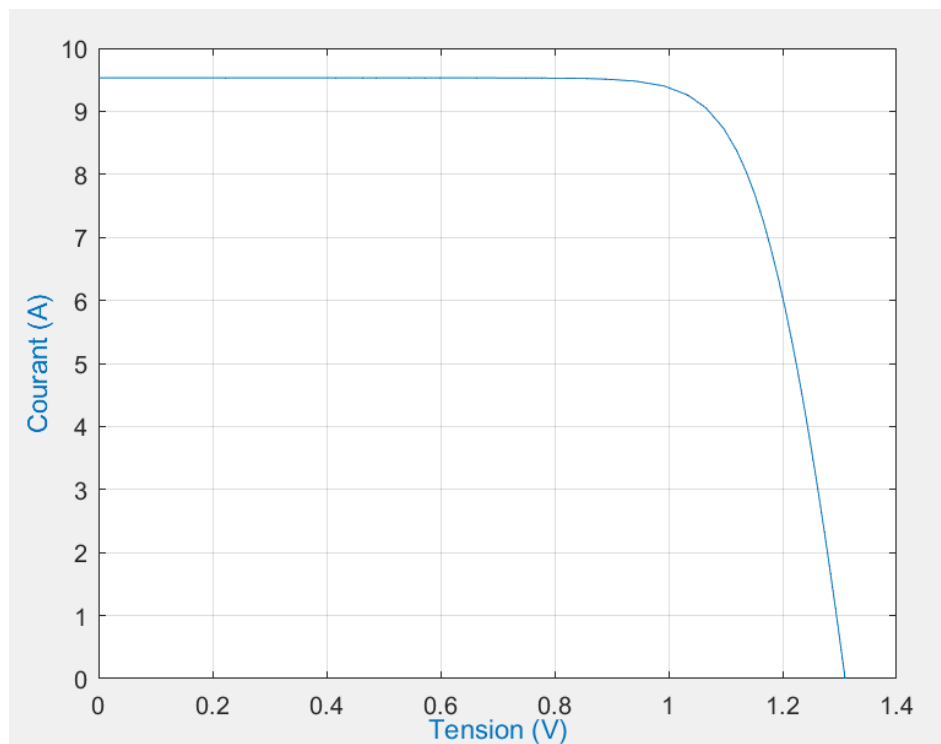


Figure III.6 : caractéristique (I-V) de deux cellules photovoltaïques connecté en série

Une association de (N_s) cellule en série (figure III.4) permet d'augmenter la tension du Générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule.

III.3.2. Raccordement en parallèle des cellules photovoltaïques

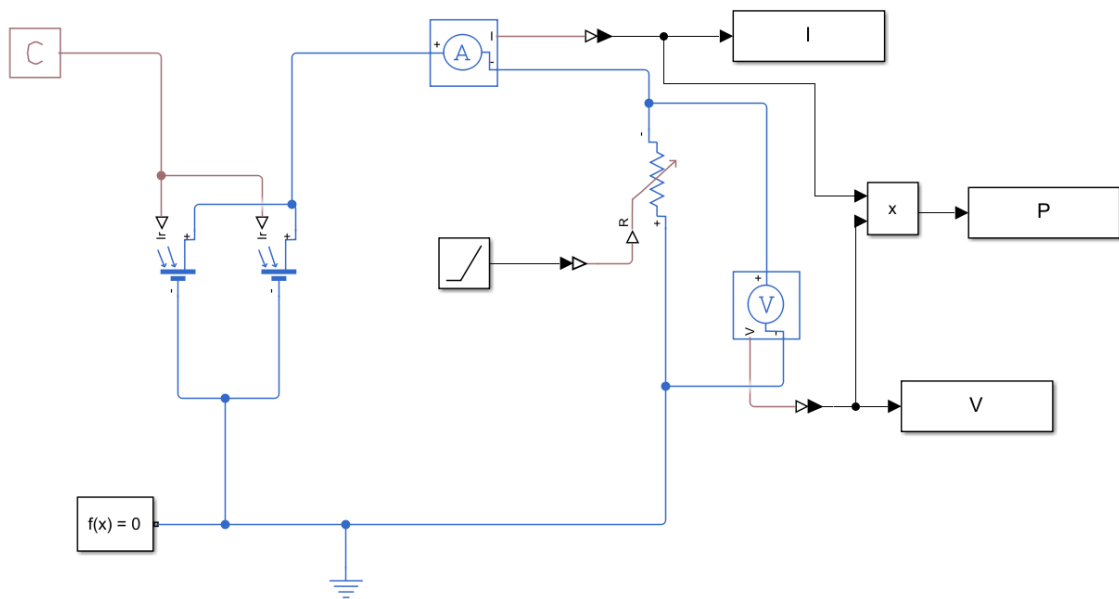


Figure III.7 : Schéma bloc de deux cellules photovoltaïques connecté en parallèle

Les différentes caractéristiques sous les conditions standard ($T=25^{\circ}C$ et $E=1000W/m^2$) :

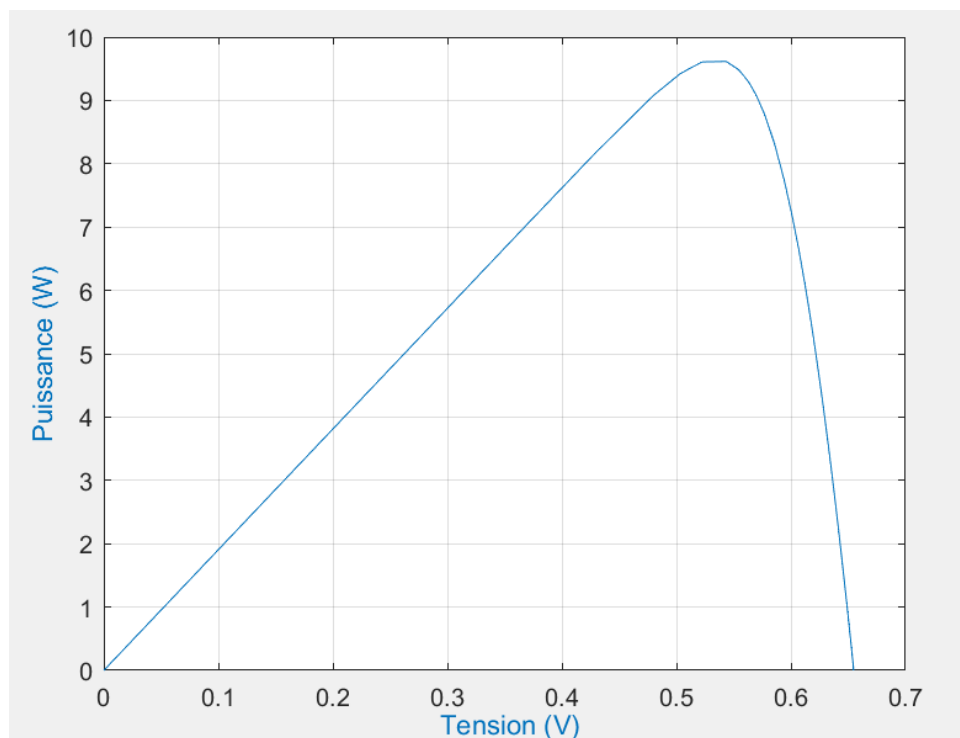


Figure III.8 : caractéristique (P-V) de deux cellules photovoltaïques connecté en parallèle

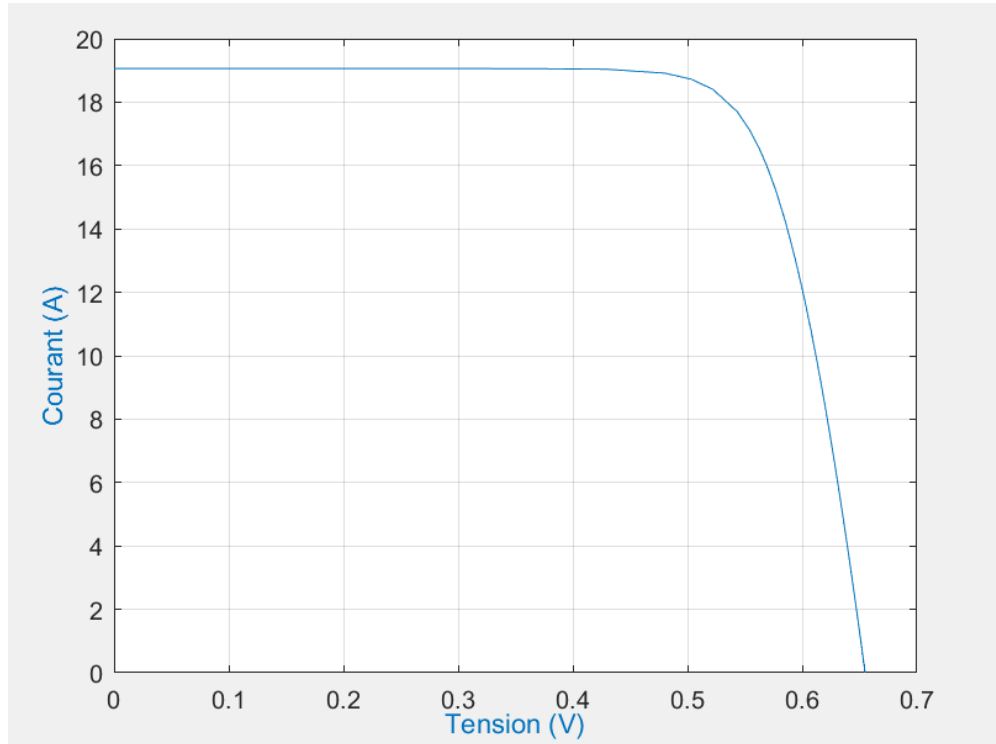


Figure III.9 : caractéristique (I-V) de deux cellules photovoltaïques connecté en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellule (figure III.7) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

III.4. Modélisation et simulation de générateur photovoltaïque

Le modèle de simulation d'un panneau photovoltaïque, développé sous MATLAB/Simulink est présenté à la figure ci-dessous :

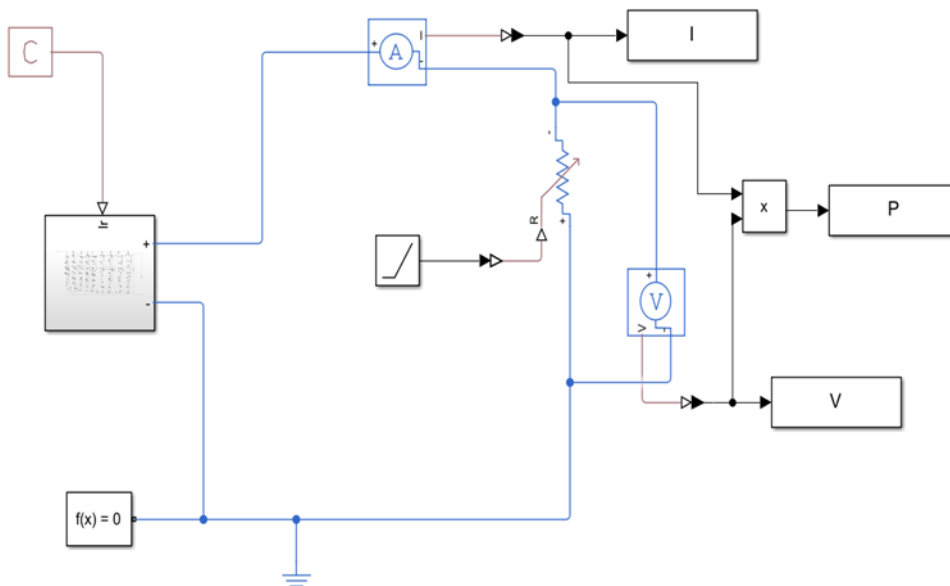


Figure III.10 : schéma bloc d'un Panneau photovoltaïque

L'étude est- faite sur un panneau photovoltaïque, composé de 54 cellules monocristalline connectées en série pour produire une puissance maximale de 260 W avec les paramètres donnés dans le tableau III.2 :

Tableau III.2 : Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque

Puissance maximale (P_{max})	260 W
Tension maximale (V_{mpp})	28.71 V
Courant maximale (I_{mpp})	9.060 A
Tension circuit ouvert (V_{oc})	35.36 V
Courant courte circuit (I_{sc})	9.530 A

Les résultats de simulation du panneau photovoltaïque représentés par les figures (III.11) et (III.12), représentent les caractéristique (V-P) et (V-I) photovoltaïques à $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$:

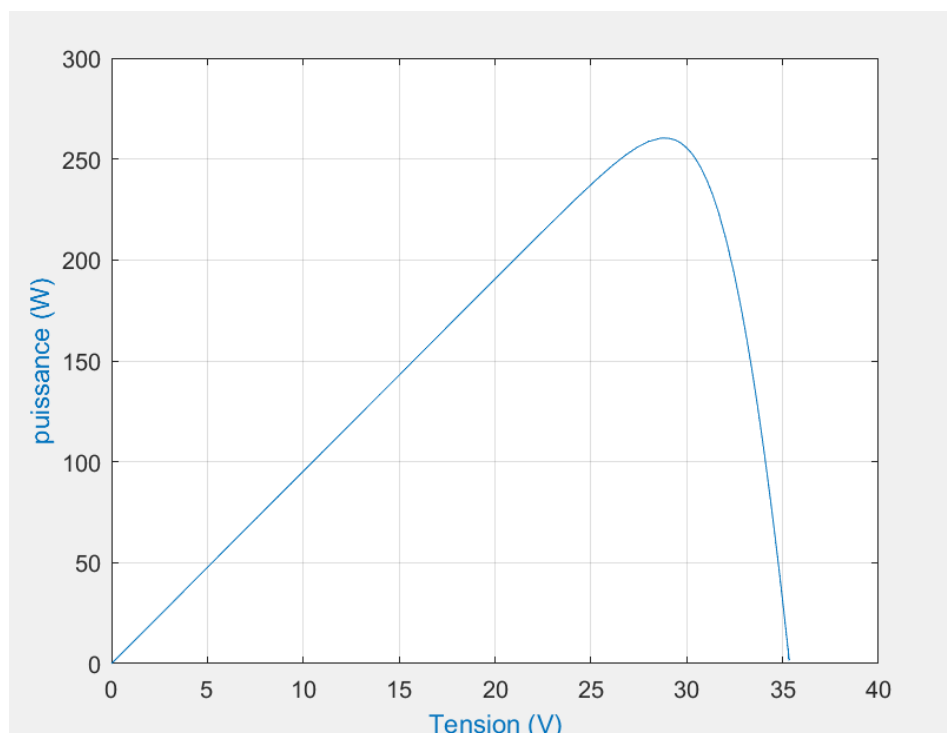


Figure III.11 : Caractéristique (P-V) d'un panneau photovoltaïque

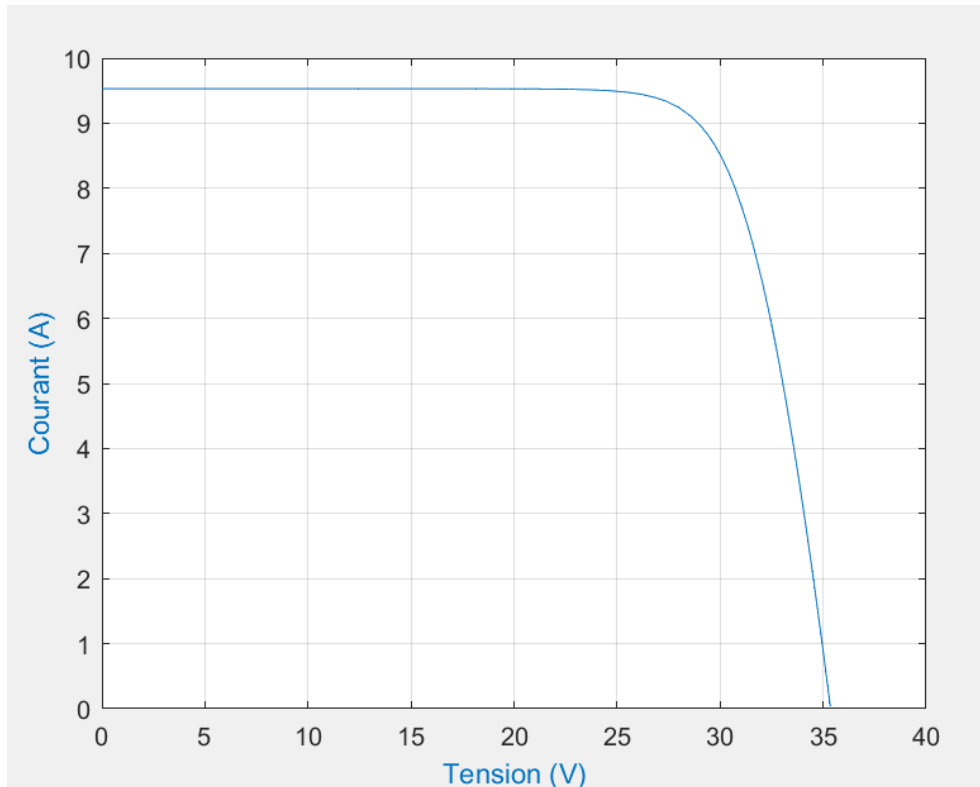


Figure III.12 : Caractéristique (I-V) d'un panneau photovoltaïque

L'objet de toute l'étude d'un système PV, en effet c'est le point où le panneau fournit le maximum de puissance. Tous les algorithmes MPPT dans leur fonctionnement cherchent à atteindre ce dernier quel que soit les variations météorologiques.

III.5. Branchement des panneaux solaire en série ou en parallèle

III.5.1. Branchement des panneaux solaire en série

Cette architecture (**Figure III.13**) représente l'assemblage de deux générateurs PV en série, les deux panneaux photovoltaïques sont connectés en série, avec une diode placée entre eux pour simuler une diode de dérivation. La tension totale est la somme des tensions de chaque panneau, tandis que le courant reste identique dans tout le circuit. Un voltmètre mesure la tension aux bornes du montage, et un ampèremètre placé en série mesure le courant global. Une source de tension contrôlée par rampe permet de faire varier la tension d'entrée et d'analyser les performances du générateur.

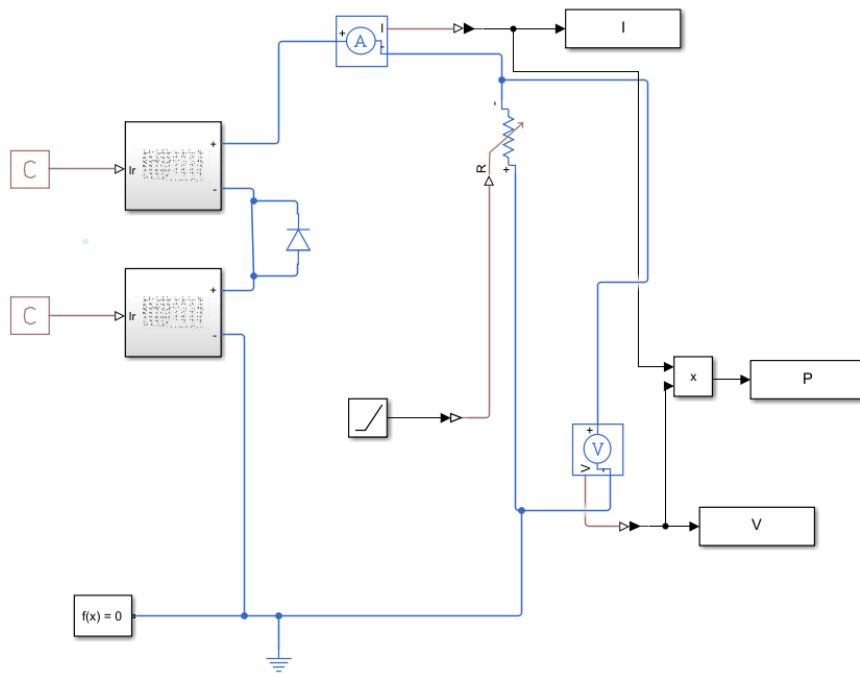


Figure III.13 : schéma bloc de deux panneau photovoltaïque connecté en série

Les résultats de simulation du panneau photovoltaïque représentés par les figures (III.14) et (III.15), représentent les caractéristique (P-V) et (I-V) photovoltaïques à $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$:

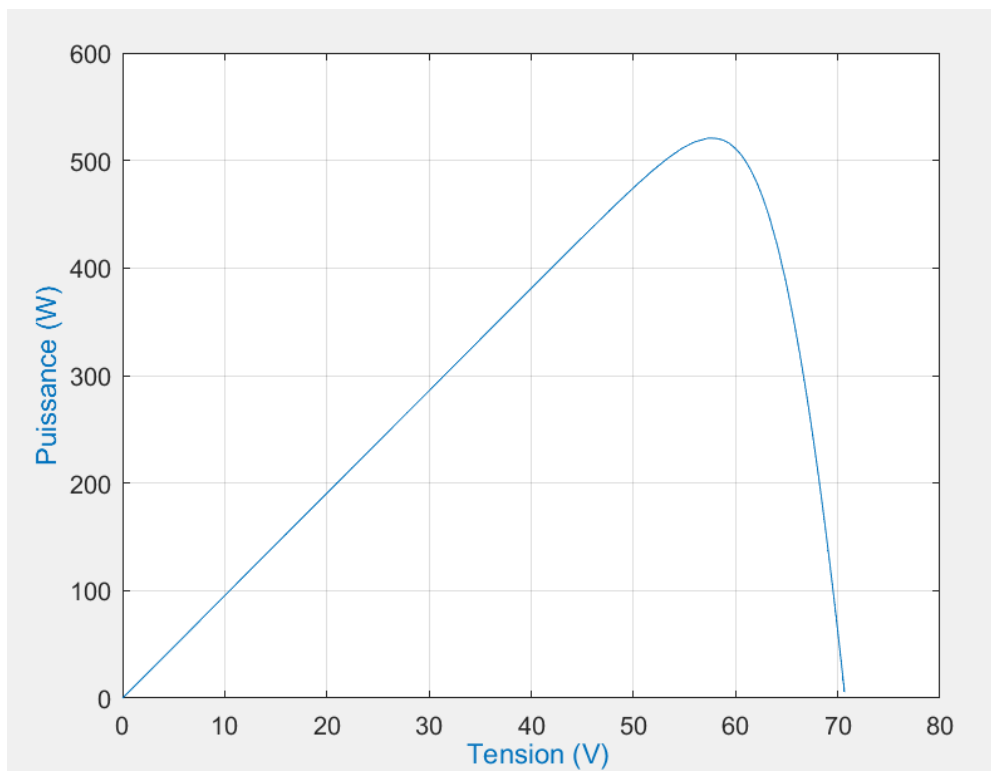


Figure III.14 : Caractéristique (P-V) de deux panneau photovoltaïque connecté en série

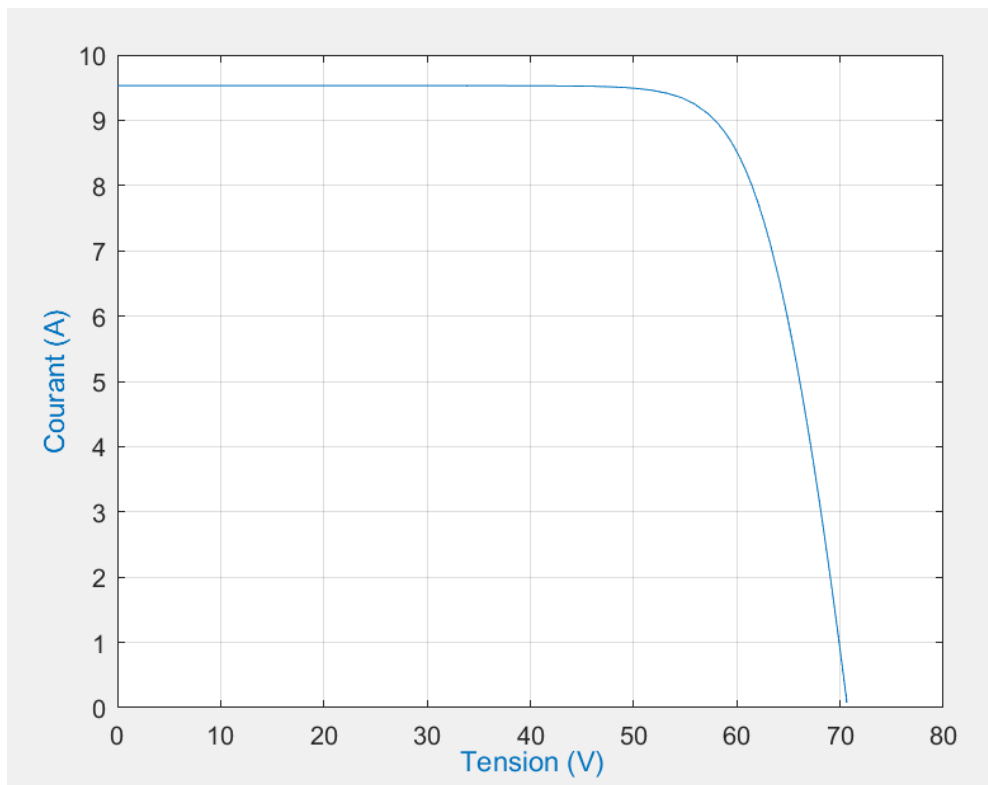


Figure III.15 : Caractéristique (I-V) de deux panneaux photovoltaïques connectés en série

Après avoir connecté deux panneaux solaires en série, on observe que la tension totale augmente et correspond à la somme des tensions de chaque panneau, tandis que le courant reste constant, égal à celui du panneau ayant le courant le plus faible (identique car les deux panneaux sont identiques). En conséquence, la puissance totale augmente, car elle est le produit de la tension totale par le courant constant. Cette configuration est particulièrement avantageuse lorsqu'on souhaite obtenir une tension plus élevée, notamment pour les systèmes nécessitant un onduleur ou un contrôleur de charge avec une entrée haute tension.

III.5.2. Branchement des panneaux solaires en parallèle

Cette architecture (**Figure III.16**) représente l'assemblage de deux générateurs PV en parallèle, les bornes positives des deux panneaux photovoltaïques sont reliées entre elles, tout comme les bornes négatives, formant ainsi une connexion en parallèle. Dans cette configuration, la tension aux bornes de l'ensemble reste identique à celle d'un seul module, tandis que le courant total correspond à la somme des courants produits par chaque panneau. Un voltmètre est placé aux bornes du montage pour mesurer la tension commune, tandis qu'un ampèremètre est inséré à la sortie pour mesurer le courant total. Ces deux grandeurs permettent ensuite de calculer la puissance générée. Par ailleurs, une source de tension contrôlée par rampe est utilisée pour faire varier la tension d'entrée et tracer la caractéristique courant-tension du générateur.

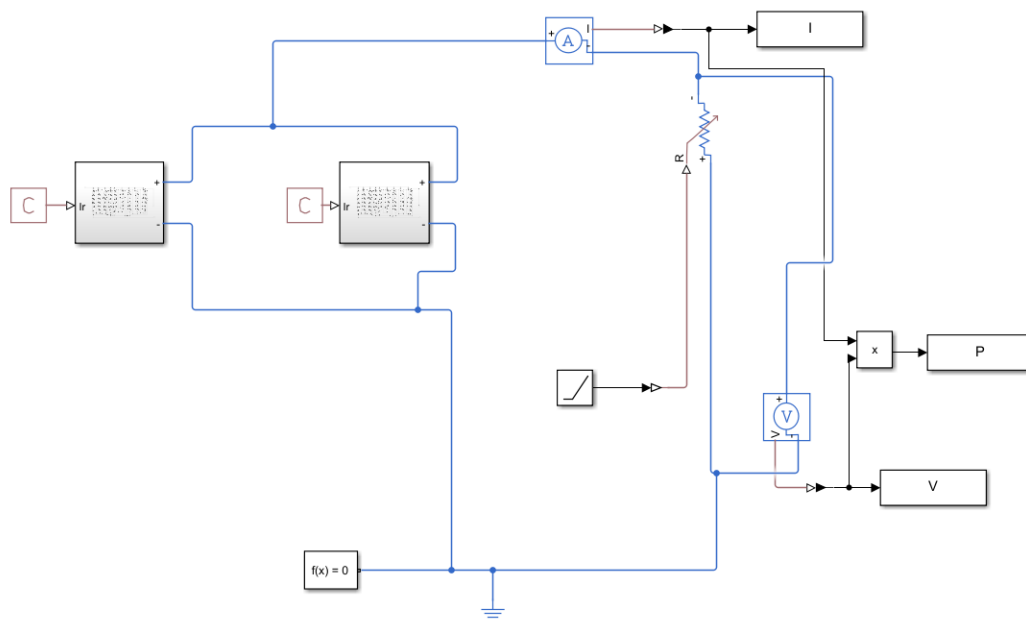


Figure III.16 : schéma bloc de deux panneau photovoltaïque connecté en parallèle

Les résultats de simulation du panneau photovoltaïque représentés par les figures (III.17) et (III.18), représentent les caractéristique (P-V) et (I-V) photovoltaïques à $T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$:

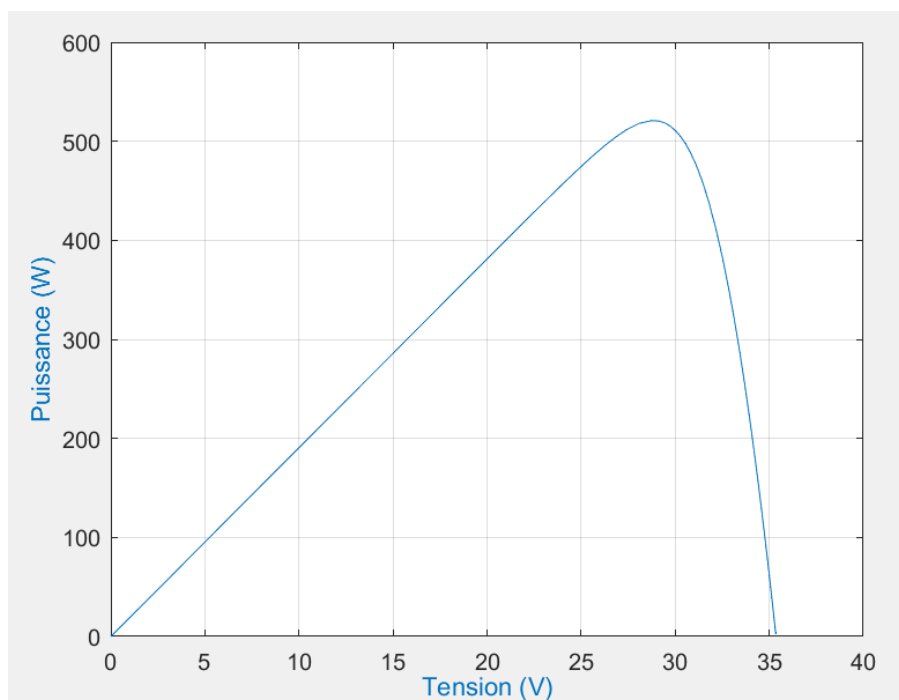


Figure III.17 : Caractéristique (P-V) de deux panneau photovoltaïque connecté en parallèle

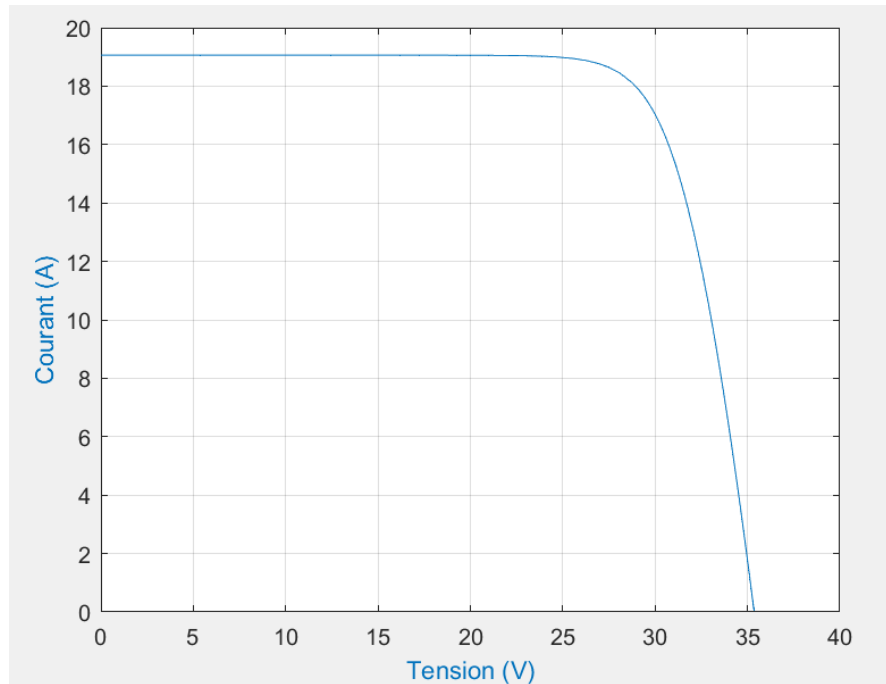


Figure III.18 : Caractéristique (I-V) de deux panneaux photovoltaïques connectés en parallèle

Après avoir connecté deux panneaux solaires en parallèle, on observe que la tension totale reste identique à celle d'un seul panneau, tandis que le courant total augmente, correspondant à la somme des courants de chaque panneau. Ainsi, la puissance totale produite augmente grâce à l'augmentation du courant, puisque la puissance est le produit de la tension constante par le courant total. Cette configuration est particulièrement avantageuse lorsqu'on souhaite obtenir un courant plus élevé, par exemple pour alimenter des charges nécessitant une intensité importante ou pour optimiser la recharge de batteries à faible tension.

III.6. Effet de la température et de l'éclairage sur les caractéristiques des panneaux photovoltaïques

III.6.1. Influence de l'éclairage

Nous avons utilisé le même modèle de panneau solaire afin d'étudier l'effet de la variation de l'éclairage sur les performances du système. Cette fois-ci, la variation n'a pas été effectuée au niveau des cellules internes, mais à l'aide du bloc externe appelé "Constant C", qui fournit la valeur d'irradiance. Ce bloc est directement connecté à l'entrée "Ir" du panneau, ce qui permet de simuler différentes conditions d'éclairage. En faisant varier progressivement la valeur de ce

bloc, nous avons pu observer l'impact de l'éclairement sur le courant de sortie ainsi que sur la puissance produite par le générateur photovoltaïque.

Les figures suivantes représentent la caractéristique (V-I) et (V-P) d'un panneau en fonction de la variation de l'éclairement ($E=500.750.1000W/m^2$) à température constant :

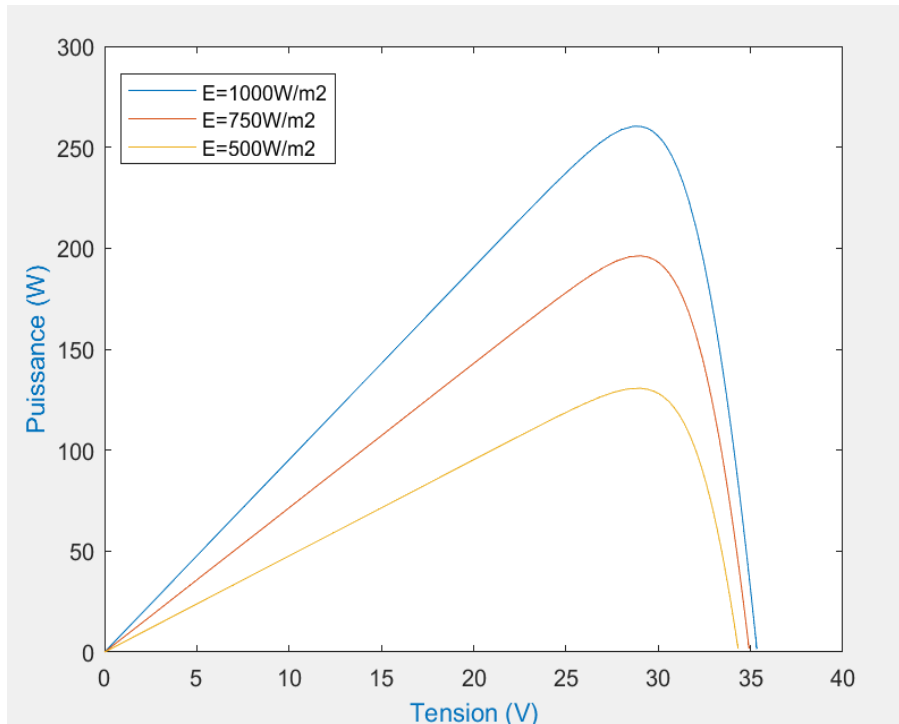


Figure III.19 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique (P-V) d'un PV

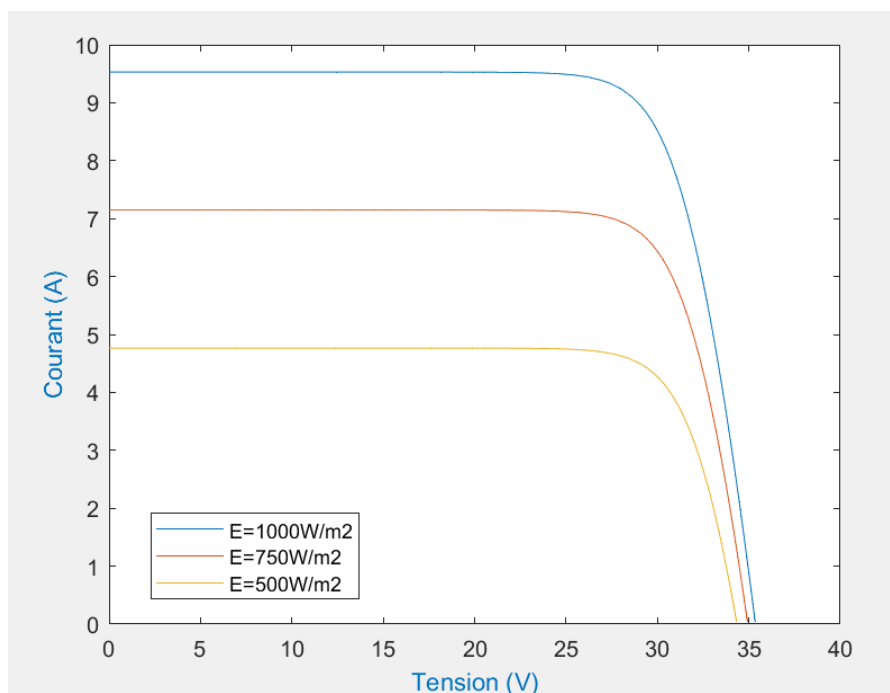


Figure III.20 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique (I-V) d'un PV

La figure III.19 illustre la variation de la puissance délivrée en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique (V-P). En remarque l'augmentation d'éclairement provoque l'augmentation de puissance.

Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident. Par contre, la tension de circuit-ouvert augmente rapidement pour de faibles.

Lorsque l'éclairement augmente, le courant généré par le panneau photovoltaïque augmente proportionnellement, tandis que la tension varie très peu. En effet, les cellules solaires produisent un courant électrique grâce à la lumière incidente ; plus cette lumière est intense, plus le nombre de photons est élevé, et donc plus d'électrons sont libérés, ce qui augmente le courant de sortie. En revanche, une baisse de l'éclairement, d'un ombrage partiel ou à des moments de faible ensoleillement (matin ou soir), entraîne une diminution du courant, et donc une réduction de la puissance produite [24].

III.6.2. Influence de température

La température a un impact significatif sur les performances des panneaux photovoltaïques, mais contrairement à l'éclairement, son effet est généralement négatif sur le rendement [24].

Nous avons utilisé le modèle précédent du panneau solaire pour étudier l'effet de la variation de température. La variation a été appliquée à l'aide du bloc "cellule", présent dans chacune des 54 cellules individuelles connectées en série à l'intérieur du panneau. Nous avons ensuite commencé à faire varier la température afin d'observer son influence sur les performances du panneau. Les figures suivantes représentent la caractéristique (V-I) et (V-P) d'un panneau en fonction de la variation de température ($T=25.50.75^{\circ}\text{C}$) à éclairement constants ($E=1000\text{W/m}^2$) :

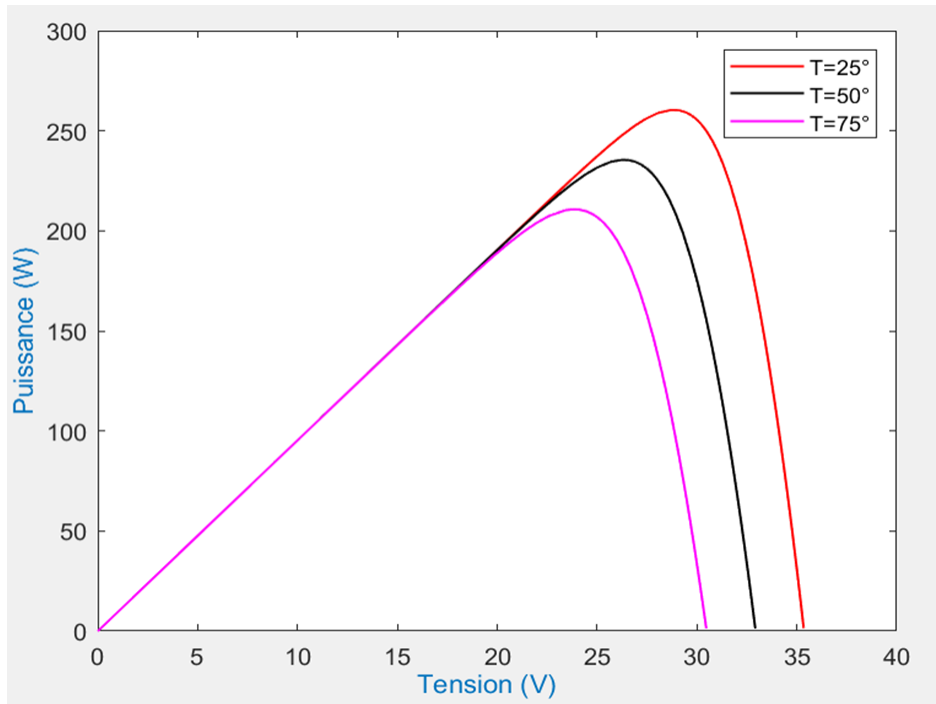


Figure III.21 : Influence de la température sur la caractéristique de (P-V) d'un PV

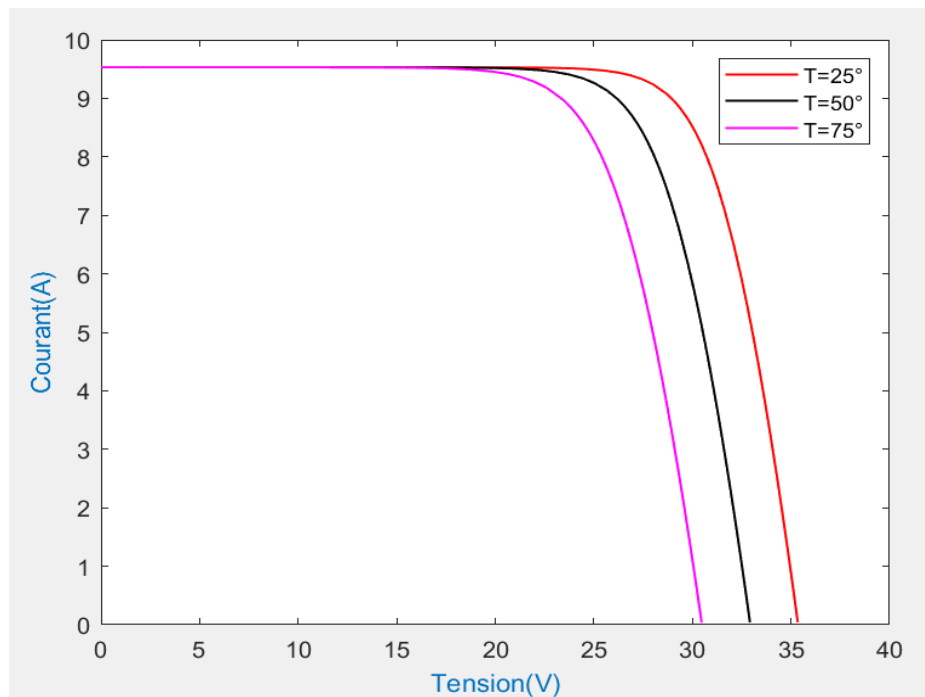


Figure III.22 : Influence de la température sur la caractéristique de (I-V) d'un PV

La tension de circuit ouvert est diminuée avec l'augmentation de la température, par contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température. Et la puissance maximale diminue. On constate que la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation et la simulation d'un générateur photovoltaïque en suivant une approche progressive. Nous avons tout d'abord étudié le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, puis analysé son comportement à travers des simulations. Les différentes configurations de raccordement en série et en parallèle ont été examinées afin de comprendre leur influence sur la tension, le courant et la puissance du système.

Nous avons ensuite modélisé un générateur photovoltaïque complet en tenant compte de l'assemblage des cellules en panneaux solaires, et nous avons simulé différentes topologies de branchement. L'impact de facteurs environnementaux tels que la température et l'irradiation lumineuse a également été étudié, mettant en évidence leur effet significatif sur les performances des cellules.

Les résultats obtenus montrent l'importance du choix des connexions et des conditions d'environnement dans la conception d'un système photovoltaïque efficace et fiable.

CHAPITRE IV

Impact de l'ombre sur les panneaux solaires

IV.1. Introduction

L'un des facteurs les plus importants pouvant affecter les performances des panneaux solaires est l'ombrage. Même une petite zone d'ombre peut réduire la production d'énergie d'une installation solaire. Plusieurs sources peuvent projeter de l'ombre sur les panneaux solaires, telles que les arbres et la végétation, les bâtiments voisins, ainsi que les structures présentes sur le toit (cheminées, événements et antennes). Il peut également y avoir des obstructions temporaires comme la neige, les feuilles, les fientes d'oiseaux ou encore l'ombrage causé par d'autres panneaux de l'installation (auto-ombrage). Les effets de l'ombrage solaire ne se limitent pas à une simple réduction de l'ensoleillement sur la zone concernée. Étant donné que les cellules solaires d'un panneau et les panneaux d'une installation sont interconnectés, l'ombrage peut entraîner une baisse de rendement global du système plus importante que celle attendue en fonction de la seule surface ombragée.

Il existe plusieurs types d'ombrage, parmi lesquels on peut citer :

A. Ombrage léger

L'ombrage léger se produit lorsqu'un objet bloque partiellement la lumière du soleil et en réduit l'intensité. Parmi les exemples courants, on trouve une couverture nuageuse légère, la pollution ou le brouillard atmosphérique, ainsi que les feuilles d'arbres. Dans la plupart des cas, ce type d'ombrage entraîne une baisse régulière de la production d'énergie sur les cellules ou panneaux concernés. [25]

B. Ombrage dur

Lorsque certaines parties d'un panneau solaire sont entièrement bloquées de la lumière du soleil, on parle d'ombrage dur. Cela peut être causé par des bâtiments voisins, des branches d'arbres denses ou des objets solides comme des antennes paraboliques ou des cheminées. Ce type d'ombrage peut avoir des conséquences graves, allant jusqu'à désactiver totalement des chaînes de panneaux ou de cellules. [25]

C. Ombrage dynamique

L'ombrage dynamique varie selon les saisons ou au cours de la journée, comme les ombres projetées par des nuages en mouvement, les variations saisonnières du feuillage des arbres, ou encore les ombres changeantes selon la position du soleil. Prévoir ce type d'ombrage est complexe et nécessite une conception et des technologies avancées. [25]

D. Ombrage en bordure

Souvent inévitable, l'ombrage en bordure peut toutefois être atténué par une bonne conception du système solaire. Il affecte les extrémités des champs photovoltaïques et est causé par les bords du toit, les acrotères, les structures de montage ou encore par l'auto-ombrage entre les rangées de panneaux dans les grandes installations. [25]

E. Ombrage uniforme

L'ombrage uniforme touche l'ensemble du champ solaire de manière égale. Il peut être dû à une couverture nuageuse épaisse, à l'accumulation de poussière ou de saletés, ou à une couverture de neige. Toutefois, l'ombrage uniforme ne provoque généralement pas les mêmes pertes de puissance disproportionnées que l'ombrage partiel. [25]



Figure IV.1 : Différents types d'ombrage

IV.2. Simulation de l'ombrage partiel sur une installation photovoltaïque

Nous allons simuler une installation des PV sous MATLAB Simulink dans deux conditions : sans ombrage (conditions normales) et avec ombrage.

Les paramètres des panneaux sont basés sur le modèle Excellent Glass/Glass 260M54 Brilliant Frameless, fabriqué par l'entreprise Sonnenstromfabrik – CS Wismar. Ce panneau contient 54 cellules, réparties en trois groupes de 18 cellules, chacun protégé par une diode bypass. [23]

L'installation étudiée est constituée de 16 panneaux solaires disposés en configuration 4x4, c'est-à-dire 4 chaînes de 4 panneaux connectés en série, avec une diode by-pass placée entre chaque

paire de panneaux. Cette configuration est conçue pour atténuer l'effet de l'ombrage localisé sur un panneau donné.

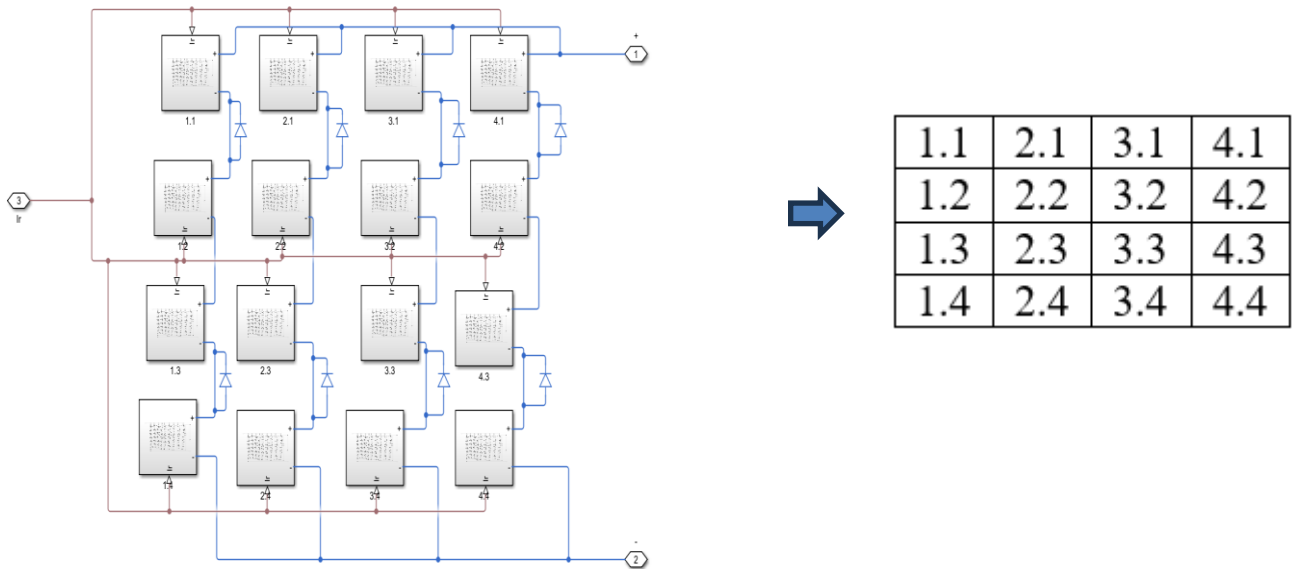


Figure IV.2 : Schéma bloc d'une installation des panneaux photovoltaïques

IV.2.1. Cas d'ombrage sur un seul panneau photovoltaïque

La figure IV.4 compare les courbes de puissance d'une installation PV en conditions STC, avec et sans ombrage partiel sur un panneau, afin d'évaluer l'impact sur le rendement.

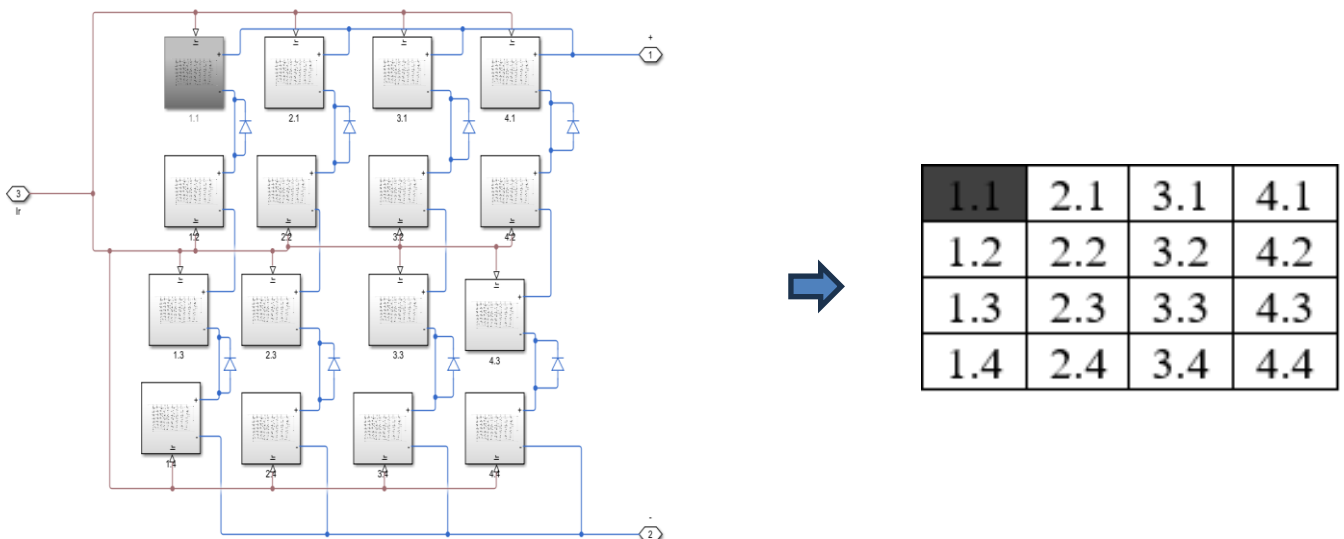


Figure IV.3 : Schéma bloc d'une installation des panneaux photovoltaïques avec un PV ombragé

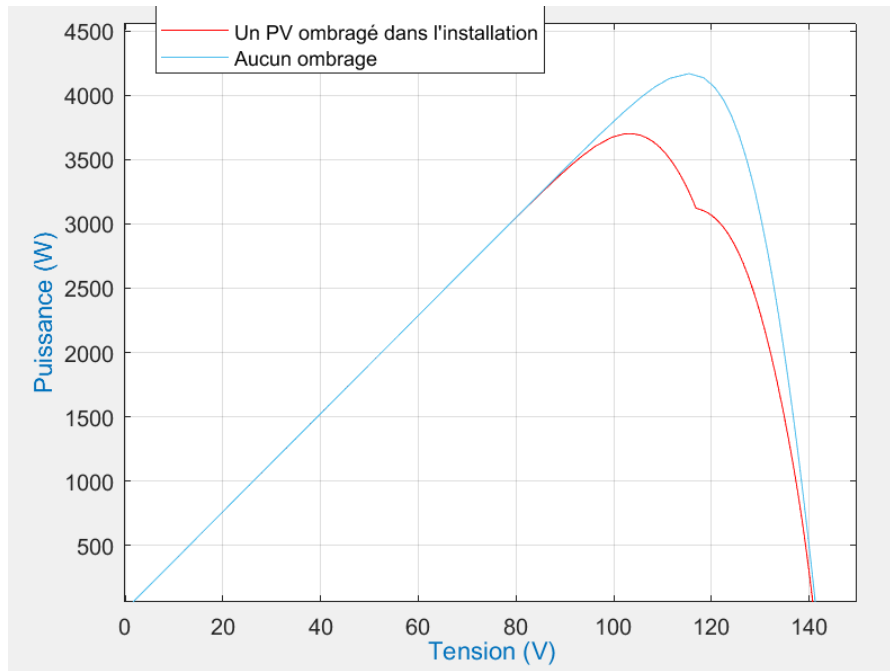


Figure IV.4 : Comparaison des caractéristique (P-V) d'une installation des PV sans ombrage et la même installation avec une PV ombragé

Le graphique bleu représente la simulation de l'installation photovoltaïque sans ombrage, tandis que le graphique rouge correspond au cas où un seul panneau est soumis à un ombrage partiel. On remarque clairement que la présence d'un ombrage partiel sur un seul panneau entraîne une baisse significative de la puissance générée par l'installation.

Lors de la simulation, nous avons observé que peu importe le panneau ombragé (que ce soit le premier panneau de la première chaîne ou un autre panneau ailleurs dans l'installation), l'impact sur la production globale reste similaire. Cela s'explique par la nature du raccordement en série : le courant est limité par le panneau le plus faible de la chaîne, et donc l'ombrage d'un seul panneau affecte toute la chaîne, malgré la présence des diodes by-pass, qui atténuent mais ne suppriment pas totalement les pertes.

IV.3. Différents tests d'ombrage réalisés sur un champ photovoltaïque

Afin de pouvoir appliquer l'ombrage sur n'importe quel panneau de l'installation, nous avons intégré un bloc appelé *Gain* dans chacune des 6 cellules solaires composant chaque panneau (Figure IV.5)

Ce bloc nous permet de contrôler individuellement l'irradiance reçue par chaque cellule, en ajustant sa valeur directement dans l'environnement MATLAB. Ainsi, nous pouvons simuler différents scénarios d'ombrage, qu'il s'agisse d'un ombrage partiel (en réduisant l'irradiance d'une cellule ou d'un groupe de cellules) ou d'un ombrage total (en annulant complètement l'irradiance).

Cette méthode offre une flexibilité optimale pour tester l'effet de l'ombrage sur des emplacements précis dans le champ photovoltaïque, tout en conservant une approche réaliste du comportement des cellules dans des conditions variables.

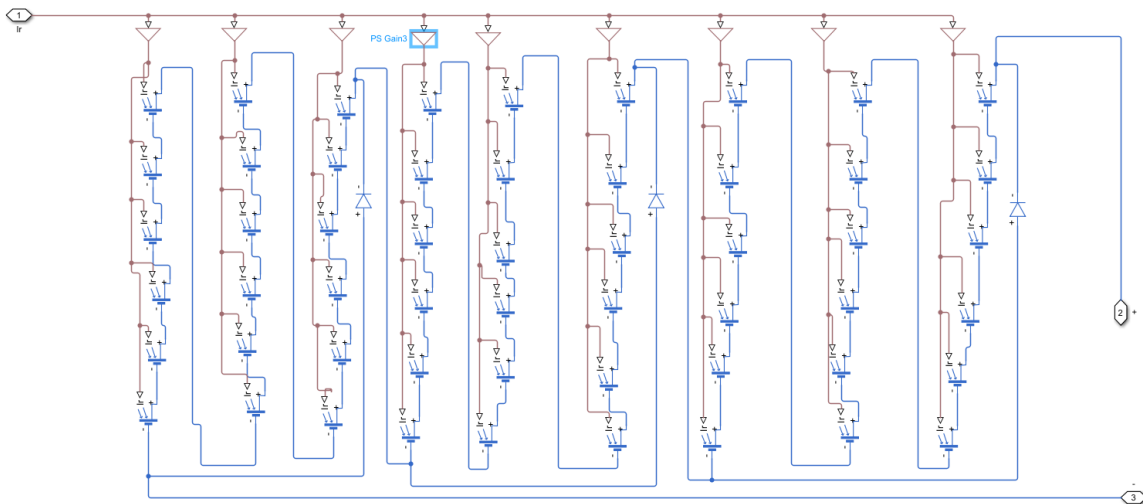


Figure IV.5 : Schéma de simulation de l'ombrage appliqué par blocs Gain sur les cellules solaires

IV.3.1. Ombrage sur deux panneaux

Dans ce test, nous allons effectuer deux scénarios différents :

L'ombrage de deux panneaux appartenant à une même chaîne, Puis l'ombrage de deux panneaux, chacun appartenant à une chaîne différente.

L'objectif est de comparer l'impact de chaque cas sur la production de puissance et de déterminer quelle configuration subit le moins de pertes en présence d'ombrage.

Pour une meilleure compréhension, nous avons ajouté une topologie d'interconnexion sous forme de matrice, indiquant clairement le numéro de chaque panneau photovoltaïque ainsi que la chaîne à laquelle il appartient. Cela permet de visualiser plus facilement la disposition des panneaux et les emplacements concernés par les tests d'ombrage.

➤ **Topologie d'interconnexion d'ombrage sur deux panneaux solaires**

1.1	2.1	3.1	4.1
1.2	2.2	3.2	4.2
1.3	2.3	3.3	4.3
1.4	2.4	3.4	4.4

Test 1

1.1	2.1	3.1	4.1
1.2	2.2	3.2	4.2
1.3	2.3	3.3	4.3
1.4	2.4	3.4	4.4

Test 2

Figure IV.6 : Représentation matricielle de l'installation photovoltaïque (deux PV ombragé)

Il convient de rappeler et de souligner que simuler l'ombrage sur deux panneaux photovoltaïques appartenant à la première, la deuxième, la troisième ou même la dernière chaîne donne des résultats similaires.

De la même manière, simuler l'ombrage sur deux panneaux provenant de chaînes différentes produit également les mêmes effets, quelle que soit leur position dans l'installation. Autrement dit, les panneaux photovoltaïques peuvent être situés n'importe où dans le champ, cela n'affecte pas la nature globale des résultats.

Après avoir effectué les simulations et comparé les résultats obtenus :

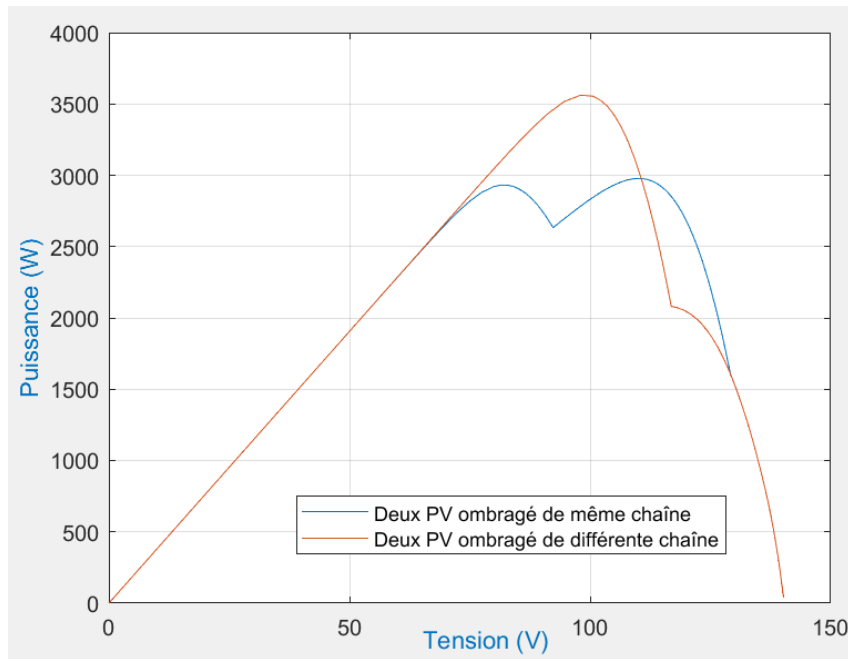


Figure IV.7 : Comparaison des caractéristique (P-V) de deux déférant cas d'ombrage partielle sur 2 PV

Après la simulation, on peut clairement observer que la puissance générée par deux panneaux partiellement ombragés appartenant à la même chaîne est nettement inférieure à celle produite par deux panneaux ombragés provenant de chaînes différentes. Cela s'explique par le fait que, dans une même chaîne, les panneaux sont connectés en série, ce qui signifie que l'ombre affectant un panneau réduit le courant de l'ensemble de la chaîne. En revanche, lorsque les panneaux ombragés sont répartis sur différentes chaînes, les effets de l'ombrage sont moins pénalisants grâce à la configuration parallèle des chaînes.

IV.3.2. Ombrage sur trois panneaux

Dans cette étape de la simulation, nous allons analyser trois configurations différentes d'ombrage partiel appliqué à trois panneaux photovoltaïques. La première configuration consiste à ombrager trois panneaux appartenant à une même chaîne. La seconde teste le cas où deux panneaux ombragés se trouvent sur la même chaîne tandis que le troisième est issu d'une chaîne différente. Enfin, la dernière configuration examine l'impact lorsque chaque panneau ombragé provient d'une chaîne distincte. Le but de cette étude est d'évaluer les différences de performance entre ces cas et d'identifier la disposition la moins sensible aux pertes dues à l'ombrage. Afin de mieux illustrer les emplacements des panneaux concernés, une représentation matricielle du générateur a été utilisée, précisant l'appartenance de chaque panneau à sa chaîne respective.

➤ **Topologie d'interconnexion d'ombrage sur deux panneaux solaires :**

1.1	2.1	3.1	4.1
1.2	2.2	3.2	4.2
1.3	2.3	3.3	4.3
1.4	2.4	3.4	4.4

Test 3

1.1	2.1	3.1	4.1
1.2	2.2	3.2	4.2
1.3	2.3	3.3	4.3
1.4	2.4	3.4	4.4

Test 4

1.1	2.1	3.1	4.1
1.2	2.2	3.2	4.2
1.3	2.3	3.3	4.3
1.4	2.4	3.4	4.4

Test 5

Figure IV.8 : Représentation matricielle de l'installation photovoltaïque (trois PV ombragé)

Il est important de préciser que le choix des panneaux ombragés n'influence pas les résultats, tant que la méthode de répartition reste identique.

Autrement dit, si l'on sélectionne d'autres panneaux selon la même logique (même chaîne ou chaînes différentes), les effets observés sur la production resteront les mêmes.

Après avoir réalisé les simulations pour les trois scénarios d'ombrage, la comparaison des résultats obtenus a permis de générer la figure suivante :

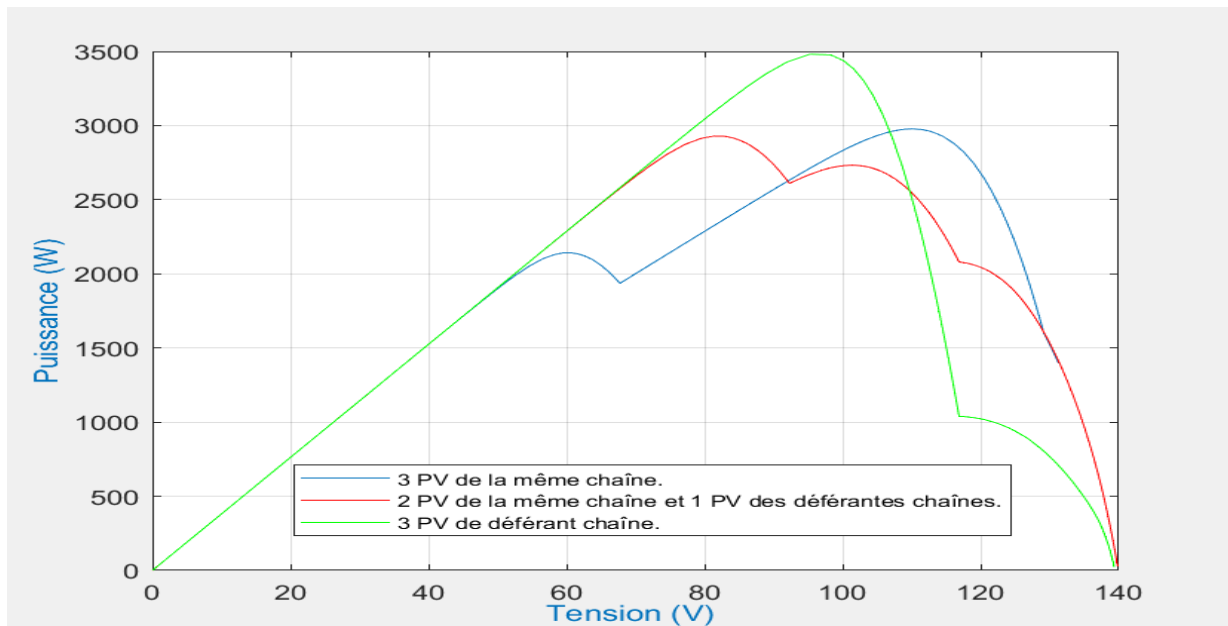


Figure IV.9 : Comparaison des caractéristique (P-V) de trois déferant cas d'ombrage partielle sur 3 PV

Suite à la simulation des trois scénarios d'ombrage, nous constatons que la configuration où les trois panneaux photovoltaïques ombragés appartiennent chacun à une chaîne différente permet d'obtenir la plus grande production de puissance. Vient ensuite le cas où les trois panneaux ombragés se trouvent dans une même chaîne, qui génère une puissance correcte mais avec un décalage vers des tensions plus élevées (production tardive). Enfin, la configuration la moins performante est celle où deux panneaux ombragés appartiennent à la même chaîne et le troisième à une chaîne différente. Ces résultats sont représentés clairement dans le graphique ci-dessous, qui illustre l'évolution de la puissance en fonction de la tension pour chaque configuration testée.

IV.3.3. Ombrage sur quatre panneaux

Dans cette partie, cinq scénarios d'ombrage ont été simulés en appliquant une réduction d'irradiation sur quatre panneaux photovoltaïques, répartis différemment selon les chaînes.

Le Test 6 consiste à ombrager quatre panneaux situés dans la même chaîne, c'est-à-dire appartenant à une seule et même chaîne.

Le Test 7 applique l'ombrage à trois panneaux de la première colonne et un panneau de la deuxième colonne, représentant un cas de distribution légèrement étendue entre deux chaînes.

Le Test 8 explore une répartition équilibrée, avec deux panneaux ombragés dans la première colonne et deux dans la deuxième.

Dans le Test 9, les panneaux ombragés sont répartis sur trois chaînes différentes : deux dans la première colonne, un dans la deuxième et un dans la troisième.

Enfin, le Test 10 représente le cas le plus distribué, où chaque panneau ombragé appartient à une colonne différente, soit une chaîne différente (colonne 1, 2, 3 et 4).

Ces configurations permettent d'évaluer l'influence de la répartition de l'ombrage sur plusieurs chaînes et d'identifier la stratégie la plus favorable pour limiter les pertes de puissance.

➤ **Topologie d'interconnexion d'ombrage sur quatre panneaux solaires :**

1.1	2.1	3.1	4.1
1.2	2.2	3.2	4.2
1.3	2.3	3.3	4.3
1.4	2.4	3.4	4.4

Test 6

1.1	2.1	3.1	4.1
1.2	2.2	3.2	4.2
1.3	2.3	3.3	4.3
1.4	2.4	3.4	4.4

Test 7

1.1	2.1	3.1	4.1
1.2	2.2	3.2	4.2
1.3	2.3	3.3	4.3
1.4	2.4	3.4	4.4

Test 8

1.1	2.1	3.1	4.1
1.2	2.2	3.2	4.2
1.3	2.3	3.3	4.3
1.4	2.4	3.4	4.4

Test 9

1.1	2.1	3.1	4.1
1.2	2.2	3.2	4.2
1.3	2.3	3.3	4.3
1.4	2.4	3.4	4.4

Test 10

Figure IV.10 : Représentation matricielle de l'installation photovoltaïque (quatre PV ombragé)

Après avoir réalisé les simulations pour les cinq scénarios d'ombrage, la comparaison des résultats obtenus a permis de générer la figure suivante

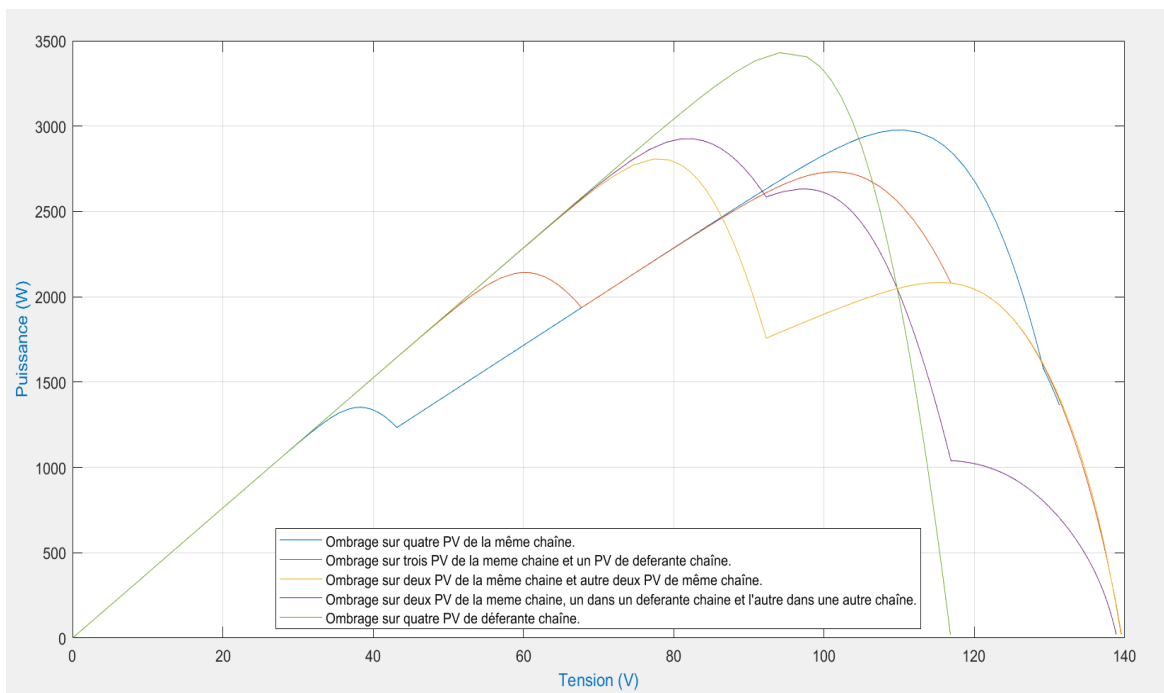


Figure IV.11 : Comparaison des caractéristiques (P-V) de cinq scénarios d'ombrage partielle sur 4 PV

À la suite des cinq simulations effectuées avec quatre panneaux photovoltaïques ombragés, la figure IV.11 met clairement en évidence les effets de la répartition de l'ombrage sur la puissance produite. On remarque que la configuration la plus performante est celle où les quatre panneaux ombragés appartiennent chacun à une chaîne différente. Cette répartition permet une meilleure tolérance à l'ombrage, car les pertes sont réparties sans compromettre complètement une seule chaîne. À l'inverse, lorsque les quatre panneaux sont concentrés sur une seule chaîne, la puissance chute de manière significative, démontrant la vulnérabilité d'une connexion en série à l'ombrage localisé. Les scénarios intermédiaires, où les panneaux sont partiellement répartis entre deux ou trois chaînes, montrent des performances variables : plus l'ombre est distribuée entre différentes chaînes, plus la puissance globale tend à s'améliorer. Ainsi, cette analyse confirme que la stratégie de répartition de l'ombrage joue un rôle crucial dans la stabilité et le rendement des générateurs photovoltaïques.

IV.4. Résultats et discussion

Après avoir mené l'ensemble des simulations sur les différentes configurations d'ombrage, il est désormais essentiel d'évaluer les performances électriques de chaque cas à l'aide d'indicateurs quantitatifs. Pour cela, nous allons calculer le facteur de qualité (Fill Factor - FF) ainsi que le rendement de chaque configuration. Ces deux paramètres permettent de mieux quantifier l'impact de l'ombrage partiel sur l'efficacité globale du générateur photovoltaïque. Le facteur de qualité donne une idée du niveau de dégradation de la courbe puissance-tension, tandis que le rendement reflète directement la capacité du système à convertir l'énergie solaire en énergie électrique utile. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau (Tableau IV.1), accompagnés d'une comparaison entre les différents cas testés :

Tableau IV.1 : Caractéristiques électriques et paramètres de performance de l'installation PV

Test	$P_{max}(W)$	$V_{max}(V)$	$I_{max}(A)$	Rendement η (%)	Facteur de forme F_f (%)
Test 1	2954	92.29	32	10.9	54.7
Test 2	3554	97.99	36.26	13.2	65.9
Test 3	2977	110	27.06	11	55.2
Test 4	2927	81.27	36.01	10.8	54.2
Test 5	3481	95.28	36.53	12.9	64.5
Test 6	2976	110.62	26.90	11	55.1
Test 7	2732	101.40	26.94	10.1	50.6
Test 8	2807	77.40	36.26	10.4	50
Test 9	2925	80.91	36.15	10.8	54.2
Test 10	3430	95.15	36.04	12.7	63.6

Après avoir complété le tableau avec les valeurs de puissance maximale, de rendement et de facteur de qualité pour chaque scénario d'ombrage simulé :

Les résultats obtenus, notamment en termes de puissance maximale, de rendement (η) dans l'équation (I.21) et de facteur de forme (FF) dans l'équation (I.22), montrent clairement que la manière dont l'ombrage est réparti a un impact direct sur la performance globale du système.

De manière générale, les configurations les plus défavorables sont celles où les panneaux ombragés sont concentrés dans une seule chaîne. Par exemple, dans les tests où trois ou quatre panneaux étaient tous situés dans la même colonne, on observe une chute significative de la puissance produite, un rendement réduit, et un facteur de qualité affaibli, traduisant une dégradation marquée de la courbe courant-tension.

En revanche, lorsque les panneaux ombragés sont répartis sur plusieurs chaînes, les pertes sont atténuées. C'est notamment le cas du test 10, où les quatre panneaux ombragés appartiennent chacun à une chaîne différente. Cette configuration, bien que toujours affectée par l'ombrage, permet de maintenir un meilleur équilibre dans la production, car aucune chaîne complète n'est bloquée par un courant limité.

On y voit une corrélation positive entre la puissance maximale produite et le rendement, ainsi qu'une tendance similaire pour le facteur de qualité. Permettent de mieux apprécier la progression ou la dégradation des performances selon les cas, en fonction du nombre de chaînes touchées par l'ombrage et de la répartition spatiale des panneaux affectés.

Enfin, il est important de noter que, même dans les meilleurs cas d'ombrage réparti, le rendement global du système reste relativement faible, ce qui est cohérent avec le contexte de simulations sous contraintes d'ombrage. De même, les valeurs de FF traduisent la difficulté du générateur à fonctionner à un point de puissance optimal dans ces conditions.

IV.5. Conclusion

Au terme de ce chapitre consacré à l'impact de l'ombre sur les systèmes photovoltaïques, nous avons pu démontrer, à travers une approche progressive et structurée, à quel point l'ombrage constitue un facteur déterminant dans le rendement d'une installation solaire.

Nous avons tout d'abord présenté les différents types d'ombrages susceptibles d'affecter les panneaux photovoltaïques, qu'ils soient fixes ou mobiles, partiels ou totaux. Cela nous a permis de mieux comprendre les phénomènes physiques liés à la réduction de l'irradiation incidente.

Dans un second temps, nous avons réalisé la modélisation et la simulation de l'ombrage partiel, d'abord sur un panneau solaire isolé, puis sur une installation complète composée de plusieurs modules interconnectés. Ces simulations ont permis de visualiser l'évolution des courbes caractéristiques et d'identifier les pertes engendrées par l'ombre.

Nous avons ensuite procédé à une série de tests ciblés sur un champ photovoltaïque, en variant le nombre et surtout la répartition des panneaux ombragés entre les différentes chaînes. Cette phase expérimentale, appuyée par des résultats chiffrés et des représentations graphiques, a montré que les pertes les plus importantes apparaissent lorsque les panneaux ombragés sont concentrés dans une seule chaîne, alors qu'une répartition plus homogène permet de limiter les effets négatifs.

Enfin, la discussion des résultats a mis en évidence l'importance de la configuration du champ photovoltaïque dans la résistance aux effets de l'ombrage. Les valeurs obtenues pour le rendement et le facteur de qualité ont confirmé que la disposition des modules joue un rôle essentiel dans la performance énergétique globale de l'installation. En conclusion, ce travail a permis de mieux cerner les enjeux liés à l'ombrage en photovoltaïque et d'identifier des stratégies d'optimisation pour minimiser son impact, notamment à travers une conception intelligente du câblage et de la répartition des panneaux dans les chaînes.

Conclusion Générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude et de la simulation des systèmes photovoltaïques, dans le but de mieux comprendre leur comportement et d'identifier les facteurs qui influencent leur performance, notamment dans des conditions réelles d'exploitation.

Dans un premier temps, nous avons présenté les principes de base des systèmes photovoltaïques à travers une étude de l'état de l'art. Cela nous a permis de revenir sur le fonctionnement d'une cellule solaire, les ressources énergétiques solaires disponibles, ainsi que les avantages et les limites de cette technologie.

Ensuite, nous avons abordé les différentes techniques d'intégration des systèmes photovoltaïques, qu'ils soient autonomes, connectés au réseau ou hybrides. Cette partie a permis de situer les différentes architectures possibles et leur adéquation avec les besoins énergétiques.

La phase suivante de notre travail s'est concentrée sur la modélisation et la simulation d'un générateur photovoltaïque à l'aide de MATLAB/Simulink. Nous avons modélisé une cellule solaire, puis étudié les effets des différents types de raccordement (série/parallèle) sur les caractéristiques de sortie. Nous avons également analysé l'impact de la température et de l'éclairement sur les performances du système.

Enfin, une attention particulière a été portée sur l'influence de l'ombrage partiel, souvent inévitable dans les installations réelles. Nous avons simulé plusieurs scénarios d'ombrage, à la fois au niveau d'un seul panneau et d'un champ photovoltaïque complet. Les résultats ont montré que l'arrangement des panneaux joue un rôle clé : lorsqu'un panneau ombragé est placé sur une chaîne distincte, la perte de puissance est significativement réduite. Cette observation ouvre la voie à des stratégies d'optimisation des connexions dans les installations soumises à des conditions d'ensoleillement variables.

Les simulations réalisées ont permis de visualiser et de quantifier les effets de chaque paramètre étudié. Ce travail met ainsi en évidence l'importance d'une conception réfléchie et d'une configuration adaptée pour garantir un bon rendement énergétique des systèmes photovoltaïques.

À l'avenir, ces approches pourraient être automatisées grâce à des systèmes intelligents capables de reconfigurer dynamiquement les connexions en fonction des conditions d'ombrage.

Références Bibliographiques

- [1] RAMLI, Mohd Zulkifli; SAAD, Z. "Analysis and experimental validation of partial shading mitigation in photovoltaic system using integrated dc-dc converter with maximum power point tracker", The Institution of Engineering and Technology Journals, pp. 2356–2365, 2019.
- [2] MIRBAGHERI GOLROODBARI, S. Z.; CHAUDHARY, A. "Improvement of Shade Resilience in Photovoltaic Modules Using Buck Converters in a Smart Module Architecture", Energies, pp.19 January 2018.
- [3] KOUDA, Iskandar, T. N. Énergie solaire photovoltaïque et système photovoltaïque autonome. Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar - Annaba, 2020/2021.
- [4] HAMIMID, S. Gisement solaire. Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2022/2023.
- [5] ISMAIL, K. Étude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques. Mémoire de Master académique, Université Kasdi Merbah - Ouargla, 2014.
- [6] GRIM, Samir ; AICHE, Mokrane. Commande d'un panneau solaire à l'aide d'une carte Arduino. Mémoire de Master professionnel, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017/2018.
- [7] HADJADJ, Dounia ; BOUGUERRA, O. Étude des caractéristiques d'un capteur solaire photovoltaïque et évaluation de ses performances sous différentes conditions climatiques. Mémoire de Master académique, Université 8 Mai 1945 - Guelma, 2022.
- [8] DJAIOU, Salem ; AOUALI, A. Utilisation des énergies photovoltaïques dans un laboratoire d'analyse médicale (Ghardaïa). Mémoire de Master, Université Saad Dahlab - Blida 1, 2021/2022.
- [9] BENHALLA, Omar. Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique. Thèse de Magister, Université Abou Bekr Belkaïd - Tlemcen, 2010/2011.
- [10] REYNAUD, J. Les cellules photovoltaïques : source inépuisable d'innovations [en ligne]. Choisir.com, 26 février 2021. [Consulté le : 28 juin 2025]. Disponible sur : <https://www.choisir.com/energie/articles/117006/les-cellules-photovoltaïques-source-inepuisable-dinnovations>
- [11] MERAHI, R. ; CHENNAOU, R. "Modélisation et simulation d'un module PV par Matlab", Journal of Scientific Research, n°0, vol. 1, pp. 223–227, 2010.
- [12] HOUARI, A. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque [en ligne]. [Consulté le : 28 juin 2025]. Disponible sur : https://www.researchgate.net/figure/Schema-electrique-equivalent-dune-cellule-photovoltaïque_fig9_324474604

- [13] ZROUG, Meriem ; BOUKHELOUA, K. L'effet de l'ombrage partiel sur la puissance produite par les panneaux photovoltaïques. Mémoire de Master académique, Université Badji Mokhtar - Annaba, 2023/2024.
- [14] MECHEHAT, Tamader ; AMRANI, M. Contribution à la gestion d'énergie d'un système renouvelable : panneau photovoltaïque / batterie. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah - Ouargla, 2022/2023.
- [15] DAHMANI, Hichem ; BOUGUERRA, M. Étude et dimensionnement d'un système photovoltaïque dédié à une habitation. Mémoire de Master académique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016/2017.
- [16] FELLOUAH, Sofiane ; MESBAHI, Siham. Étude d'un système photovoltaïque connecté au réseau. Mémoire de Master académique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [17] BENHAMIDA, Mohammed Tarek ; SEBAHI, T. Estimation de l'état de charge d'une batterie Li-ion utilisée dans un véhicule électrique. Mémoire de Master académique, Université Kasdi Merbah - Ouargla, 2021/2022.
- [18] MARCHILDON, J. Détermination de l'état de charge et l'état de santé d'une batterie plomb-acide par la méthode de deux impulsions. Thèse de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, 2014.
- [19] DJEMAI, Mohammed Ramzi ; SAYAH, M. Étude d'un système hybride « éolienne-photovoltaïque ». Mémoire de Master académique, Université Kasdi Merbah - Ouargla, 2023/2024.
- [20] BENMADDI, Azzedine ; MESSAOUDI, M. Dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque pour la FGEI et optimisation de la consommation. Mémoire de Master académique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [21] AMAMRA, Mohammed Salah ; DJELLAL, Y. Optimisation de la production d'un générateur photovoltaïque. Mémoire de Master académique, Université Kasdi Merbah - Ouargla, 2014/2015.
- [22] EDF. Comprendre la production solaire [en ligne]. [Consulté le : 28 juin 2025]. Disponible sur : <https://www.edf.fr/groupe-edf/comprendre/production/solaire>
- [23] PVsyst 7.4. « Application de base de données [en ligne].
- [24] BENBLIDIA, Housseem ; KESSAL, A. Étude de l'effet de l'ombrage sur un système photovoltaïque. Mémoire de Master académique, Université Saad Dahlab - Blida, 2014/2015.
- [25] SOLARSME. Shading effect on solar panels [en ligne]. [Consulté le : 28 juin 2025]. Disponible sur : <https://solarsme.com/shading-affect-on-solar/>

