

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université 20 Aout 1955-Skikda



Faculté de Technologie

Département de génie électrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention de diplôme de

Master

Spécialité: Electrotechnique industrielle

THEME

**simulation d'un système
photovoltaïque résidentiel connecté au
réseau**

Réalisé par :

- BOUGHAMSA Yahia

- BOURGHIDA Hichem

Président : Pr. Ammar MADOUD

Université du 20 Aout 1955-Skikda

Encadreur : Dr. Bilel AYACHI

Université du 20 Aout 1955-Skikda

Examineur : Dr. Nabil MEZHOUD

Université du 20 Aout 1955-Skikda

Année universitaire : 2025/2026

Remerciement

En premier lieu, il nous paraît capital de citer le nom de dieu Le miséricordieux, le tout puissant, lui qui nous a armé de courage et d'abnégation, deux qualités nécessaires pour pouvoir parachever avec brio notre cursus universitaire, puisse-t-il nous accompagner dans toutes les étapes de notre vie future. Nous tenons également à remercier nos parents, piliers de nos existences, phares étincelants lorsque le doute prenait vie, ils nous ont toujours tenu la main et nous ont toujours encouragé à aller de l'avant, sans eux rien n'aurait été possible. Ce travail vient également concrétiser 5 ans de dur labeur partagé avec des êtres exceptionnels, nos camarades tout d'abord, nos amis ensuite. Tous nous ont aidé à surmonter les défis qui paraissaient découler de la fatalité, grâce à eux tous, nous avons grandi et nous avons appris, qu'ils retrouvent ici les traces de notre affection et de notre gratitude.

Ce travail est tout autant le nôtre que celui de notre encadreur de projet, Mr AYACHI BILAL, durant toute la durée de réalisation de cette œuvre, il s'est toujours montré prévenant et disponible, nous ouvrant des portes et actionnant des manivelles qui nous étaient jusqu'à alors inconnues, et comme le veut l'adage qui veut qu'on rende à César ce qui est à César .

Nous tenons également à adresser nos sincères remerciements à Monsieur le Président du jury, M. Ammar MADOUD, pour l'honneur qu'il nous a fait en présidant ce jury et pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail.

Nos remerciements s'adressent aussi à Monsieur l'Examineur, M. Nabil MEZHOUD, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire ainsi que pour ses remarques pertinentes, ses observations et le temps qu'il nous a consacré.

Si nous en sommes là au jour d'aujourd'hui, c'est aussi le fait d'un encadrement pédagogique de qualité et d'une présence d'esprit remarquable que d'aucuns pourraient immédiatement déceler auprès des différents enseignants qui ont assuré notre formation, Merci à eux tous (toutes).

ملخص :

يقدم هذا العمل دراسة حول الأنظمة الكهروضوئية التي تعتمد بشكل أساسي على الأنظمة السكنية المتصلة بالشبكة. تتضمن دراسة هذا النظام عمومية النظام المدروس، مع النمذجة والمحاكاة وعرض النتائج. أجرينا دراسة حول تشغيل المولد الكهروضوئي بأقصى طاقته باستخدام أمر التحكم (MPPT (P&O)، بهدف تحسين كفاءة طاقة النظام ومن ثم التحقق من أنه عندما يتجاوز إنتاج الألواح الشمسية الاستهلاك، يتم حقن الطاقة الزائدة تلقائيًا في شبكة الطاقة. وعلى العكس من ذلك، إذا لم يكن هناك ما يكفي من ضوء الشمس لتلبية الطلب المتزايد، تتولى الشبكة مسؤولية ضمان استمرار إمدادات الطاقة. تسمح هذه الإدارة التلقائية وثنائية الاتجاه للنظام بتحقيق أهدافه المتعلقة بالطاقة السكنية بشكل كامل.

الكلمات المفتاحية: الأنظمة الكهروضوئية، أمر التحكم (MPPT (P&O)، المردودية .

Résume :

Ce travail présente une étude sur les systèmes photovoltaïques on se basant essentiellement sur les systèmes résidentielle connecté au réseau. L'étude de ce système comprend une généralité sur le système étudié, avec la modélisation et la simulation et présentation des résultats. Nous avons effectué l'étude du fonctionnement du générateur photovoltaïque à sa puissance maximale avec la command commande MPPT (P&O) dans le but d'améliorer le rendement de puissance du système , puis en vérifier que lorsque la production des panneaux solaires dépasse la consommation, l'énergie excédentaire est automatiquement injectée dans le réseau électrique. Inversement, si l'ensoleillement est insuffisant pour répondre à la demande accrue, le réseau prend le relais afin de garantir une alimentation électrique continue. Cette gestion automatique et bidirectionnelle permet au système d'atteindre pleinement ses objectifs énergétiques résidentiels.

Mots clés : systèmes photovoltaïques, résidentielle , MPPT (P&O) , le rendement .

Abstract :

This work presents a study on photovoltaic systems based mainly on residential photovoltaic systems connected to the grid. The study of this system includes a generality on the studied system, with modeling and simulation and presentation of results. We conducted a study of the operation of the photovoltaic generator at its maximum power using the MPPT (P&O) control algorithm with the aim of improving the system's power efficiency and then verifying that when the solar panel production exceeds consumption, excess energy is automatically injected into the power grid. Conversely, if there is insufficient sunlight to meet the increased demand, the grid takes over to ensure continuous power supply. This automatic and bidirectional management allows the system to fully achieve its residential energy objectives.

Keywords : photovoltaic systems , residential , grid, MPPT (P&O), power efficiency .

Sommaire

Chapitre I Généralités sur l'énergie photovoltaïque

I-1 Introduction :	14
I-2 Historique sur les PV	14
I-3 Conversion photovoltaïque :	15
I-3-1 Energie solaire :	15
I-3-2 Rayonnement solaire :	16
I-4 Différents types de systèmes photovoltaïques :	18
I-4-1 Système photovoltaïque autonome :	18
I-4-2 Système photovoltaïque résidentiel raccordé au réseau :	19
I-4-3 Systèmes hybrides :	20
I-5 Méthode de connexion des panneaux solaire :	20
I-5-1 Connexion en série :	21
I-5-2 Connexion en parallèle :	22
I-5-3 Connexion Hybride (série-parallèle) :	23
I-6 Câblage du panneau solaire & Efficacité:	24
I-6-1 Étude de cas 1: Système de 5 kW lié au réseau résidentiel (Câblage de la série) :	24
I-6-2 Étude de cas 2: Configuration de la cabine hors réseau (Câblage parallèle pour la charge de batterie 12V) :	25
I-6-3 Étude de cas 3: Système hybride à grande échelle (Câblage parallèle en série à usage commercial) :	25
I-7 Potentiel solaire en Algérie:	26
I-7-1 Ressources solaires et ensoleillement :	26
I-7-2 Projets et infrastructures solaires :	28
I-7-3 Défis et obstacles au développement du solaire :	30
I-8 Conclusion :	31

Chapitre II : Système photovoltaïque

II-1 Introduction :	33
II- Effet photovoltaïque:	33
II-3 Système photovoltaïque :	35
II-3-1 Cellule PV :	35
II-3-2 Principales technologies solaires photovoltaïques	37
II-3-3 Modélisation de panneau photovoltaïque :	38
II-4 Caractéristique électrique :	42

Sommaire

II-4-1 Raccordement des cellules photovoltaïques :	43
II-4-2 Diodes de by-pass :	45
II-5 Paramètres photovoltaïques :	46
II-6 Influence de la l'éclairement	48
II-7 Influence la température	48
II-9 Résistance série (R_s) :	49
II-10 Résistance shunt (R_{sh}) :	50
II-11 Conclusion :	50
<i>Chapitre III : simulation d'un système PV résidentielle connecté au réseau</i>	
III-1 Introduction :	52
III- 3 Système photovoltaïque résidentielle connecté au réseau proposé :	53
III-4-1 Générateur photovoltaïque :	54
III-4-2 Structure de commande de l'onduleur :	54
III-4-2-1 Commande MPPT basée sur la méthode P&O :	56
III-4-3 H-Bridge:	59
III-4-4 Filtre :	60
III-4-5 Charge:	61
III-4-6 Réseaux électrique :	61
III-5 Analyse du fonctionnement énergétique du système photovoltaïque connecté au réseau :	62
III-5-1 Cas 1 : Production photovoltaïque est supérieure à la consommation $P_{pv} > P_{charge}$	62
III-5-2 Cas 2 : Production photovoltaïque est inférieure à la consommation $P_{pv} < P_{charge}$	65

Liste des Figures

Chapitre I :

Figure (I- 1) : Rayonnement solaire.....	16
Figure (I- 2) : Analyse spectrale du rayonnement solaire.	17
Figure (I- 3) : Système photovoltaïque autonome.....	18
Figure (I- 4) : photovoltaïque résidentiel raccordé au réseau.....	19
Figure (I- 5) : Systèmes hybrides	20
Figure (I- 6) : Connexion en série	21
Figure (I- 7) : Connexion en parallèle	22
Figure (I- 8) : Connexion Hybride	23
Figure (I- 9) : Système de 5 kW lié à la réseau résidentielle	24
Figure (I- 10) : Configuration de la cabine hors réseau	25
Figure (I- 11) : Système hybride à grande échelle	26
Figure (I- 12) : Irradiation solaire globale reçue par l'Algérie moyenne annuelle	27
Figure (I- 13) : Aperçu de projets solaires emblématiques et initiatives en Algérie.....	30

Chapitre II :

Figure (II- 1) : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique dans une cellule photovoltaïque.	34
Figure (II- 2) : le système photovoltaïque.....	35
Figure (II- 3) : Structure interne et fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	36
Figure (II- 4) : Classification des technologies de cellules photovoltaïques [13].....	37
Figure (II- 5) : Modèle réel d'une cellule PV à une diode.....	38
Figure (II- 6) : Modèle idéal d'une cellule PV à une diode	39
Figure (II- 7) : Modèle réel d'une cellule PV à deux diodes	40
Figure (II- 8) : Modèle idéal d'une cellule PV à deux diodes	41
Figure (II- 9) : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque. [15].....	42
Figure (II- 10) : Association en série	44
Figure (II- 11) : Association en parallèle	44
Figure (II- 12) : association série/parallèle	44

Liste des Figures

Figure (II- 13) : Schéma d'un module photovoltaïque avec diodes de dérivation (by-pass).. Figure (II- 14) : Caractéristique courant–tension ($I-V$) d'un générateur photovoltaïque réel avec effet des diodes de dérivation.....	45 46
Figure (II- 15) : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.....	46
Figure (II- 16) : Evolution de la caractéristique $I(V)$ (a) et $P(V)$ (b) en fonction de l'irradiation.. ..	48
Figure (II- 17) : Evolution de la caractéristique $I(V)$ (a) et $P(V)$ (b) pour différentes températures.	48
Figure (II- 18) : Facteur de forme pour une cellule PV.	49
Figure (II- 19): Influence des résistances R_s et R_{sh} sur la caractéristique $I-V$ d'une	50

Chapitre III :

Figure (III- 1) : Schéma de simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique	53
Figure (III- 2) : Structure interne du contrôleur de l'onduleur sous MATLAB/Simulink	55
Figure (III- 3) : Organigramme de la méthode P&O [18]	56
Figure (III- 4) : Évolution du courant du générateur PV ($I-PV$) sans commande MPPT.....	57
Figure (III- 5) : Évolution de la tension du générateur PV ($V-PV$) sans commande MPPT..	57
Figure (III- 6) : Évolution du courant du générateur PV ($I-PV$) avec commande MPPT.	58
Figure (III- 7) : Évolution de la tension du générateur PV ($V-PV$) avec commande MPPT.	59
Figure (III- 8) : Le schéma block d'un filtre RL sur Matlab Simulink	60
Figure (III- 9) : Le schéma block d'un filtre RL sur Matlab Simulink	60
Figure (III- 10) : Le schéma de la charge sur Matlab Simulink	61
Figure (III- 11) : Le schéma block de réseau électrique de distribution sur Matlab Simulink	62
Figure (III- 12) : Tension et courant en sortie de l'onduleur.....	63
Figure (III- 13) : Courant absorbé par la charge.....	63
Figure (III- 14) : Courant du réseau électrique	64
Figure (III- 15) : Courant absorbé par la charge dans cas 2	65
Figure (III- 16) : Courant du réseau électrique dans cas 2	66

Liste des Tableaux

Tableau (I. 1) : Avantages et les inconvénients du Connexion en série	21
Tableau (I. 2) : Avantages et les inconvénients du Connexion en parallèle	22
Tableau (I. 3) : Comparaison entre les types de câblage	23
Tableau (I. 4) : Différents ensoleillements des régions Algériennes	28

acronymes

φ : La latitude

λ : La longitude

δ : Déclinaison solaire

ω : L'angle horaire

h : Hauteur angulaire

TU : Le temps universel

GMT : Greenwich

Et: l'équation du temps

j : Numéro du jour de l'année

ws : L'angle horaire du soleil à son coucher

F : la densité de flux énergétique

α : l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale

Eg : énergies de gap

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur photovoltaïque.

DC : Courant Continu.

AC : Courant alternatif.

FF : Facteur de forme.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

P & O : Perturb and Observe.

THT : taux d'harmonique de courant injecté

PPM : Point de puissance maximale.

N : Facteur d'idéalité .

μ : Le rendement .

Liste des symboles

R_s : résistance série

R_{sh} : La résistance shunt

I : est le courant délivré par le module

PV. I_{ph} : est le photo-courant.

I_d : est le courant de la diode.

V_d : la tension au borne de diode

$V_t = KT/q$: est la tension thermique.

I_{sh} : le courant circulant dans la résistance R_{sh}

I_{sc} : Le courant de court circuit .

I_{rs} : courant de saturation réversible .

Symboles k_i : coefficient de température de court circuit .

G = l'éclairement solaire .

T : la température de fonctionnement de la cellule.

T_n : la température référence de la cellule.

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

E_g : énergie de seuil .

N_s : nombre de cellule en série .

N_p : nombre de cellule en parallele .

Acronymes K : est la constante de Boltzmann ($1,381.10^{-23}$ joule/Kelvin).

q : est la charge d'électron= $1,602.10^{-19}$ C.

T : est la température du module PV en kelvin.

n : est le facteur d'idéalité de la jonction

E : l'éclairement incident (W/m^2).

V_{oc} : tension de circuit ouvert

P_c : La puissance de crête .

P_{max} : puissance maximum

U_{max} : tension maximum

I_{max} :courant maximum

PIN : la puissance lumineuse incidente.

Introduction générale

Introduction générale

À notre époque, il est difficile d'imaginer la vie quotidienne sans électricité. Celle-ci est devenue indispensable dans tous les domaines de la vie moderne. Il est donc essentiel de produire l'énergie électrique de manière efficace, continue et fiable. Pour répondre à la demande croissante en électricité, il a été nécessaire de concevoir et de construire des centrales électriques capables de produire de grandes quantités d'énergie.

Une fois l'énergie électrique produite, elle doit être acheminée jusqu'aux consommateurs. Dans chaque pays, les réseaux de transport et de distribution assurent le transit de l'énergie électrique entre les sites de production et les points de consommation.

Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire occupe une place importante dans la transition énergétique vers des systèmes plus durables et plus résilients. Les centrales solaires exploitent cette ressource naturelle abondante afin de produire une électricité propre et renouvelable. Reliées au réseau électrique, les installations photovoltaïques constituent une solution efficace pour répondre à la demande énergétique croissante tout en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles et en limitant les effets du changement climatique.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur l'énergie photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, nous étudions le système photovoltaïque en commençant par l'effet photovoltaïque, ses applications ainsi que les caractéristiques électriques du système. Nous abordons également la description des installations photovoltaïques, les différents types d'utilisation, la modélisation du système photovoltaïque ainsi que son raccordement au réseau électrique.

Dans le troisième chapitre, nous présentons la simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique, suivie d'une analyse et d'une discussion des résultats obtenus. Enfin, ce travail est clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie photovoltaïque

I-1 Introduction :

Aujourd'hui, le monde fait face à une augmentation importante des besoins en énergie ainsi qu'à des problèmes environnementaux causés par l'utilisation des énergies fossiles. Pour répondre à ces défis, les énergies renouvelables apparaissent comme une solution durable et respectueuse de l'environnement. Elles proviennent de sources naturelles comme le soleil, le vent et l'eau, et ont l'avantage d'être inépuisables et moins polluantes.

De nombreux pays, comme l'Algérie, commencent à investir dans ces énergies afin de réduire la pollution et préserver les ressources naturelles. Parmi elles, l'énergie solaire est particulièrement importante, surtout dans les régions très ensoleillées.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique, l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmont Becquerel en 1839.

Selon les estimations l'énergie rayonnée par le soleil représenterait chaque année 40 000 fois les besoins énergétiques que l'humanité consomme sous forme d'énergies fossiles. Malgré cela, l'énergie solaire reste un domaine assez peu exploitée. Néanmoins la prise de conscience collective en fait une énergie douce d'avenir (même si elle est connue et utilisée depuis des millénaires).

Aujourd'hui le solaire photovoltaïque est en plein développement, on obtient un cumul de 436 MWc en la fin de 2023 pour l'Algérie et 260 GWc pour l'Union européenne .

Dans ce chapitre, nous examinerons minutieusement l'énergie solaire, les panneaux solaires et les systèmes solaires, en explorant chaque aspect en profondeur.

I-2 Historique sur les PV

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie [1]

I-3 Conversion photovoltaïque :

La possibilité de transformer directement l'énergie lumineuse, et en particulier le rayonnement solaire en énergie électrique est apparue en 1954 avec la découverte de l'effet photovoltaïque. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière permettant la transformation de l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire, la photopile, est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque. [2]

I-3-1 Energie solaire :

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure et pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à 1367 W/m^2 [3]. La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air (AM). Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, et

perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 . [3]

I-3-2 Rayonnement solaire :

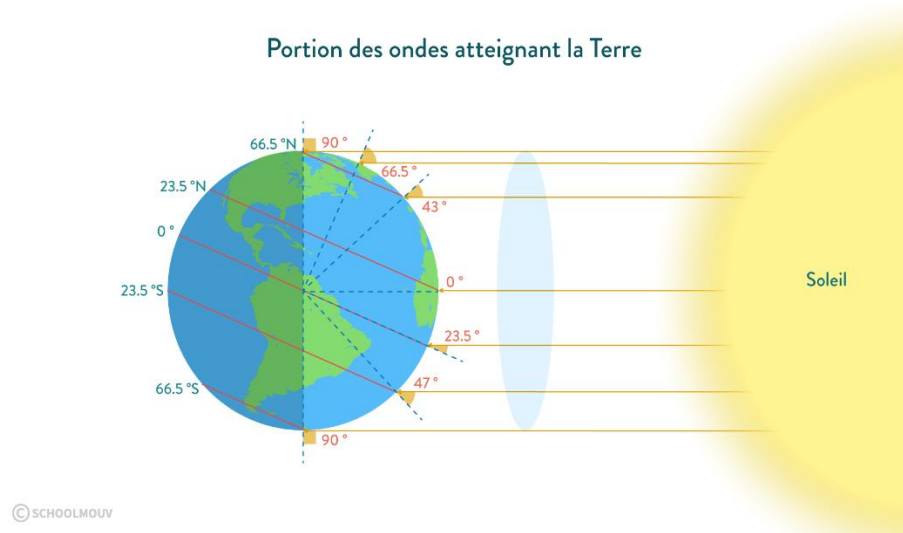


Figure (I- 1) : Rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de $0,22 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$. La figure (I-2) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement a : – 9% dans la bande des ultraviolets ($0,8 \mu\text{m}$).

– 47% dans la bande visible ($0,4$ à $0,8 \mu\text{m}$),

– 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de $1,37$ kilowatt au mètre carré (kW/m^2), à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1200 W/m^2 . La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon l'altitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus.

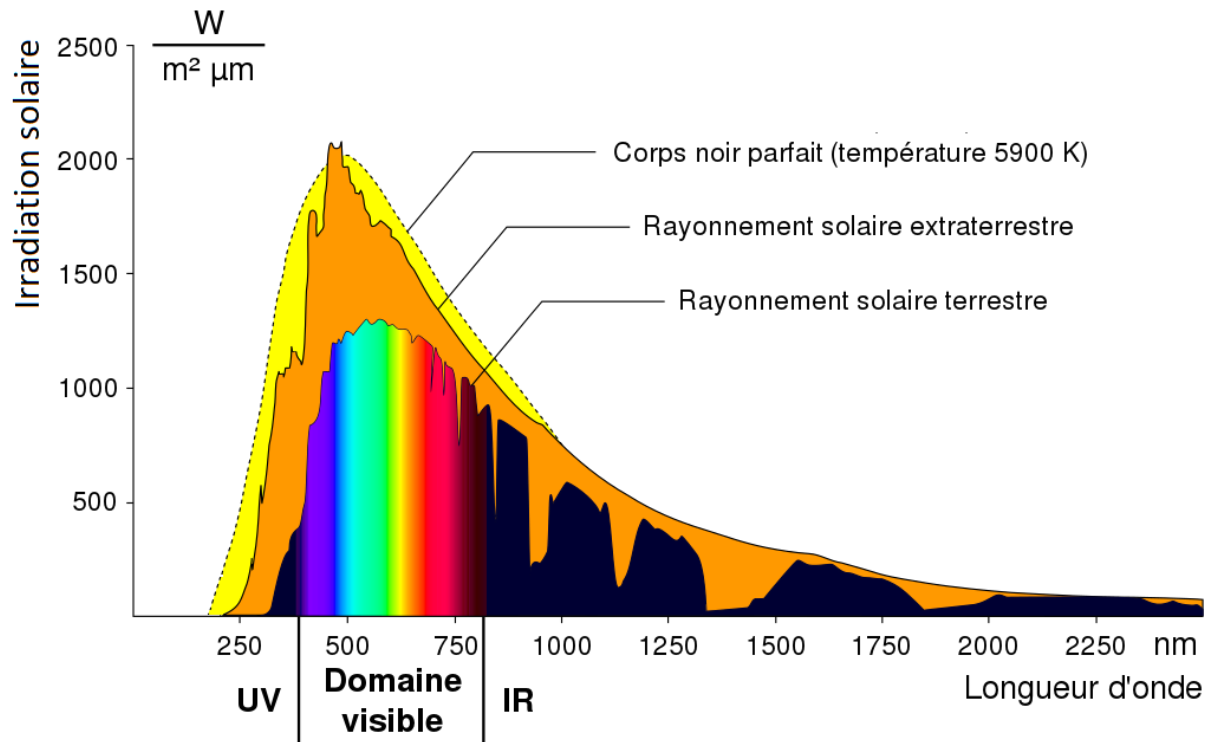


Figure (I- 2) : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

L'utilisation du rayonnement solaire comme source d'énergie pose un problème bien particulier. En effet, le rayonnement solaire n'est pas toujours disponible, on ne peut ni l'emmagasiner ni le transporter. Le concepteur d'un système qui emploie le rayonnement solaire comme source d'énergie doit donc déterminer la quantité d'énergie solaire disponible à l'endroit visé ainsi que le moment où cette énergie est disponible [4]

Il y a quatre types de rayonnement :

1) Rayonnement direct : c'est le rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.

2) Rayonnement diffus : c'est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère ainsi qu'à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

3) Rayonnement solaire réfléchi (Albédo du sol) : c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

4) Rayonnement global : c'est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

I-4 Différents types de systèmes photovoltaïques :

Il existe différents types de systèmes photovoltaïques (PV), qui varient en fonction de leur application, de leur configuration et de leur technologie. Voici quelques uns des types les plus courants.

I-4-1 Système photovoltaïque autonome :

c'est un type d'installation photovoltaïque qui n'est pas connecté au réseau électrique national, mais qui est connecté à un système autonome de stockage d'énergie – batteries électriques – qui stockent l'électricité produite par l'installation et la restituent aux utilisateurs au moment où ils en ont besoin. [5]

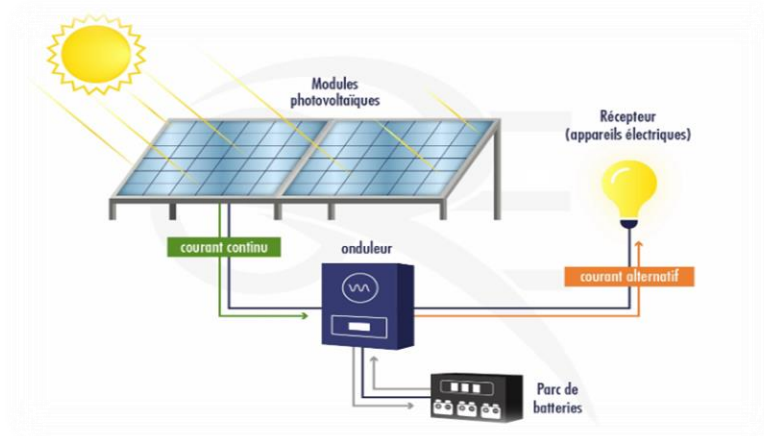


Figure (I- 3) : Système photovoltaïque autonome

Avantages d'une installation photovoltaïque autonome :

Avec la réduction des coûts des composants et la diffusion de la technologie au lithium, les installations photovoltaïques autonomes sont de plus en plus compétitives par rapport aux systèmes utilisant des combustibles fossiles.

Ce type de système apporte en effet de nombreux avantages à l'environnement et à l'utilisateur final :

- **zéro émission** : les utilisateurs consomment l'électricité produite et ne génèrent pas de gaz polluants ;

- **coût de l'énergie constant pendant la durée de vie de l'installation** : le coût de l'énergie ne subit pas les fluctuations du prix de l'énergie liées au coût du pétrole et du gaz ;
- **grande flexibilité** : l'installation est entièrement évolutive tout comme l'étendue du système de stockage électrique.

I-4-2 Système photovoltaïque résidentiel raccordé au réseau :

Dans ce type d'installation, le réseau électrique national devient un réservoir infini de stockage dans lequel l'énergie provenant de sources renouvelables est injectée lorsque l'installation produit et que l'utilisateur ne consomme pas et depuis lequel l'électricité est prélevée au moment du besoin, lorsque l'installation ne produit pas (la nuit). [6]

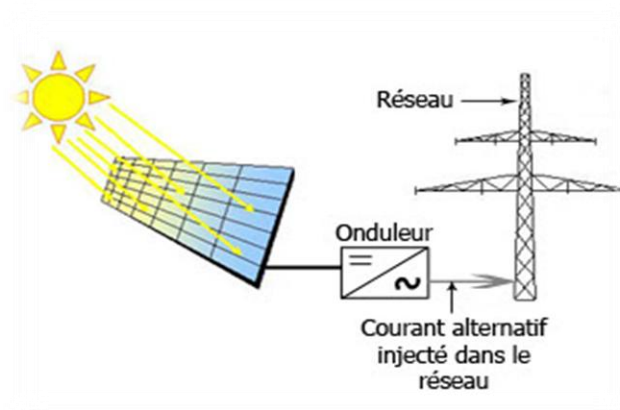


Figure (I- 4) : Photovoltaïque résidentiel raccordé au réseau

Avantages des systèmes photovoltaïque résidentiel raccordé au réseau :

Notamment, les avantages principaux sont les suivants :

- Réduction du coût des factures ;
- Réduction des émissions polluantes ;
- Possibilité de monétiser l'énergie produite.

I-4-3 Systèmes hybrides :

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène... et même parfois le réseau public d'électricité.

En général, un système de batteries stocke l'énergie et permet ainsi de ne pas perdre l'énergie des sources aléatoires telles que le solaire ou l'éolien .

La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimiser, étant entendu que les sources thermiques (gazoil, gaz...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours. [7]

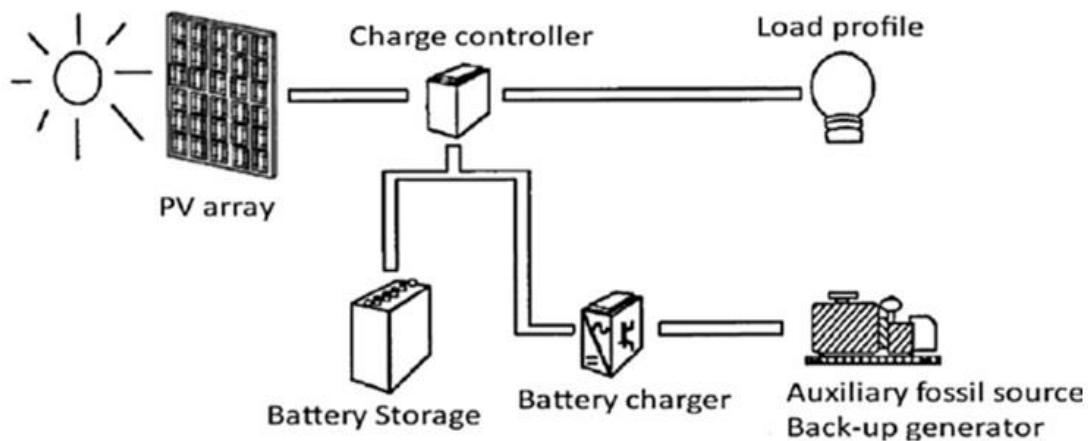


Figure (I- 5) : Systèmes hybrides

Avantages des Systèmes hybrides :

- **Fiabilité et stabilité** : La combinaison de plusieurs sources
- **Indépendance énergétique** : Idéal pour les sites isolés ou pour réduire la dépendance au réseau public
- **Respect de l'environnement** : Utilisation d'énergies propres et inépuisables, réduisant l'empreinte carbone et la dépendance aux combustibles fossiles.

I-5 Méthode de connexion des panneaux solaire :

Un câblage efficace du panneau solaire est très essentiel pour une production d'énergie maximale, système d'énergie solaire stabilité et prévention de la perte de puissance. Il existe

principalement trois configurations de câblage différentes, qui sont des séries, parallèle, et connexions hybrides.

I-5-1 Connexion en série :

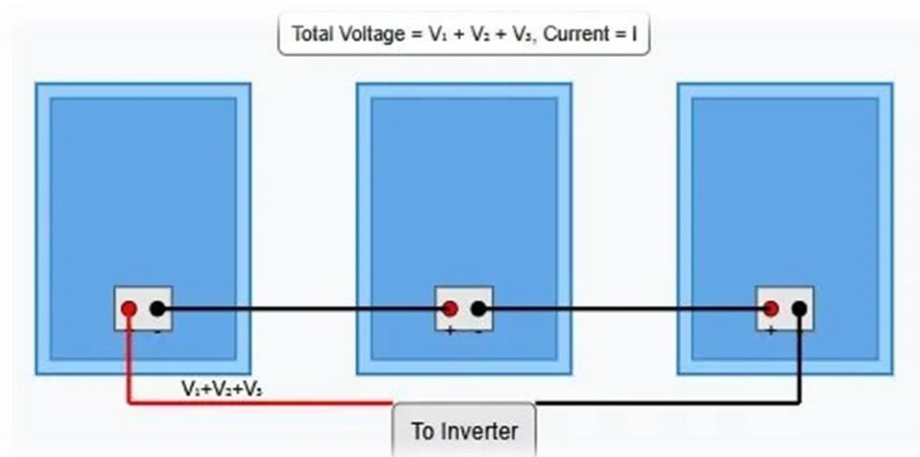


Figure (I- 6) : Connexion en série

Dans le câblage des panneaux solaires en série, Chaque panneau de la série augmentera la tension tandis que le courant restera le même. Le câblage des séries est bon pour les grandes fermes solaires ou les systèmes dans lesquels la puissance doit parcourir de longues distances et atteindre la perte minimale de transfert d'énergie.

Par exemple, six panneaux solaires de 100 W avec 18V et 5.5 A chacun peut être connecté en série. Un total de 108 V ($18V \times 6$) peut être acquis par un courant de 5.5 A. Ce type de configuration sera bon pour les systèmes liés au réseau avec des onduleurs à haute tension. [8]

Tableau (I. 1) : Avantages et les inconvénients du Connexion en série

Avantage	Inconvénient
Augmente la tension pour la transmission	Production réduite si un panneau est ombré
Utilise plus mince, Câblage moins cher	Nécessite des contrôleurs de charge à haute tension
Fonctionne bien avec les onduleurs MPPT	Nécessite des batteries de stockage haute tension

I-5-2 Connexion en parallèle :

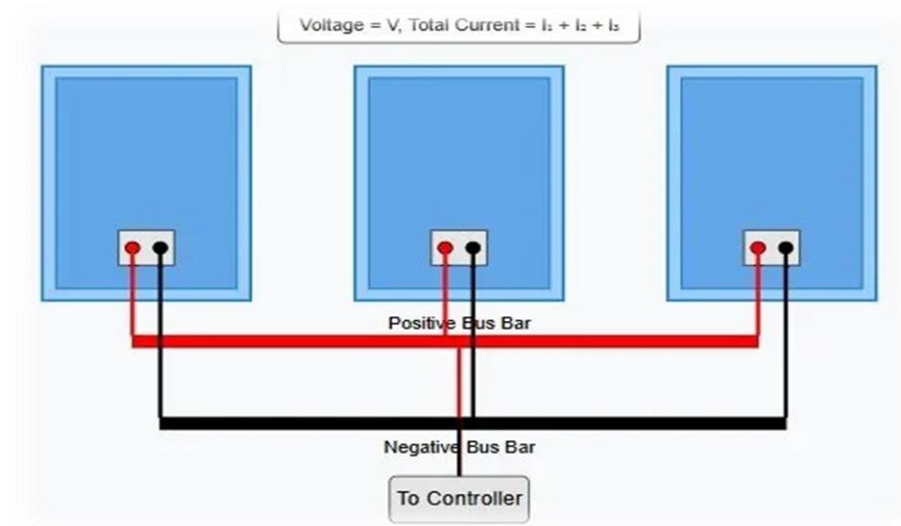


Figure (I- 7) : Connexion en parallèle

La connexion des panneaux solaires en parallèle augmente le courant mais maintient la tension constante. C'est la meilleure configuration pour Systèmes solaires à base de batterie hors réseau car il a tendance à charger les batteries de manière stable. [8]

Par exemple, Si vous connectez quatre panneaux solaires de 150W avec les détails suivants (24V, 6.25A) en parallèle, Vous obtiendrez un total de 25A ($6.25A \times 4$), et la tension reste 24V. Pour une banque de batterie 24 V, il nécessite une entrée élevée.

Tableau (I. 2) : Avantages et les inconvénients du Connexion en parallèle

Avantage	Inconvénient
Fonctionne mieux pour; Charge de batterie et systèmes hors réseau	Un courant plus élevé nécessite un câblage plus épais
Percer mieux dans des conditions d'ombrage même partielles	Augmentation de la chaleur et de la pe de puissance dans les câbles
Fonctionne avec les contrôleurs de charge PWM	Transmission de puissance à longue distance limitée

I-5-3 Connexion Hybride (série-parallèle) :

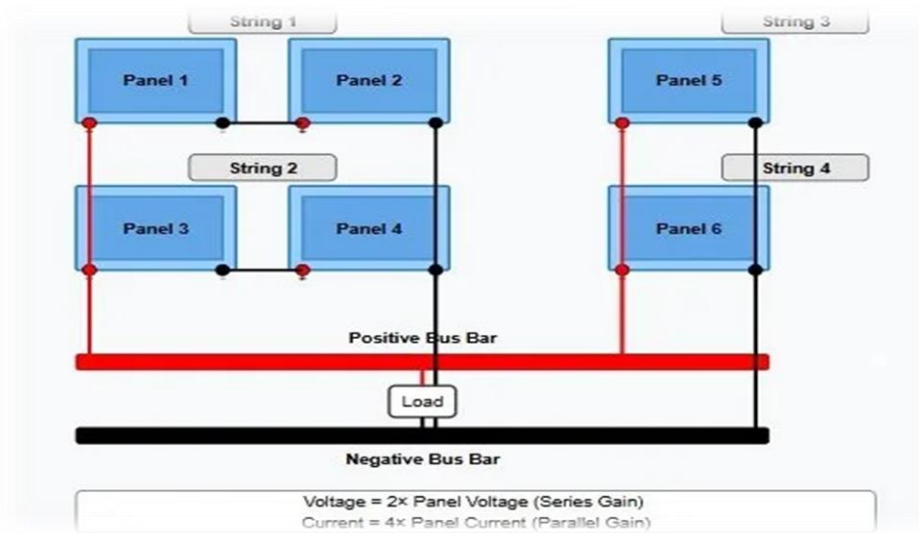


Figure (I- 8) : Connexion Hybride

Le câblage du tableau solaire peut fonctionner à la fois des séries et en parallèle pour donner une connexion parallèle en série dans le câblage de la baie solaire. C'est une pratique courante dans plusieurs installations solaires massives ou à grande échelle et la gaine hors réseau tout en travaillant dans un système hybride.

Nous pouvons prendre l'exemple d'un système à 12 panneaux (chacun des 24 V, 10 A), Et il est en quatre cordes parallèles et trois panneaux en série. Garder la tension de chargement comme 72 V et courant comme 40 A (72 V x 10 A), tandis que la connexion parallèle en série évite le problème de travailler contre une alimentation efficace, diminuer les pertes électriques dans le câblage.

Tableau (I. 3) : Comparaison entre les types de câblage

Type de câblage	Changement de tension	Changement actuel	Meilleur cas d'utilisation
Série	Augmentation	Constante	- lié à la réseau - Transmission à longue distance
Parallèle	Constante	Augmentation	- Stockage de batterie hors réseau
Hybride	Equilibré	Equilibré	- systèmes solaires à grande échelle

I-6 Câblage du panneau solaire & Efficacité:

Des exemples du monde réel peuvent démontrer comment les différentes manières de câblage en tant que séries ou circuits parallèles fournissent une tension variable, puissance et courant aux appareils connectés au panneau solaire.

I-6-1 Étude de cas 1: Système de 5 kW lié au réseau résidentiel (Câblage de la série) :

Si on souhaite installer un système de 5 kW raccordé au réseau pour sa maison en utilisant dix panneaux solaires de 500 W. Chaque panneau possède des caractéristiques nominales de 50 V et 10 A. Les panneaux solaires sont configurés en série, ce qui permet d'obtenir une tension totale de 500 V tandis que le courant global du système reste fixé à 10 A. Cette configuration génère une haute tension, ce qui réduit considérablement les pertes par effet Joule lors de la transmission et améliore l'efficacité de l'onduleur. La puissance est injectée directement dans le réseau électrique national. Ce système alimente directement la maison en mode d'autoconsommation et ne nécessite pas de parc de batteries dédié.



Figure (I- 9) : Système de 5 kW lié à la réseau résidentiel

1-6-2 Étude de cas 2: Configuration de la cabine hors réseau (Câblage parallèle pour la charge de batterie 12V) :

Une cabine isolée (hors réseau) nécessite un système solaire autonome de 12 V pour son alimentation. La configuration retenue comprend six panneaux solaires de 200 W chacun. Comme chaque panneau solaire délivre une tension de 18 V et un courant de 11 A, l'installateur a choisi un raccordement en parallèle. Cet agencement permet de maintenir la tension de sortie à 18 V tout en cumulant les courants pour atteindre un total de 66 A . Cette configuration fournit une puissance suffisante pour alimenter efficacement un parc de batteries de 12 V à charge rapide. Ce système autonome permet de couvrir sans interruption les besoins électriques essentiels de la cabine.



Figure (I- 10) : Configuration de la cabine hors réseau

1-6-3 Étude de cas 3: Système hybride à grande échelle (Câblage parallèle en série à usage commercial) :

Les centrales solaires commerciales exploitent fréquemment une configuration de câblage hybride (série-parallèle) pour interconnecter un grand nombre de modules. Dans cet exemple,

l'installation est composée de 200 panneaux photovoltaïques, chacun affichant des caractéristiques nominales de 48 V et 8 A. Les modules sont structurés en 10 branches connectées en parallèle, chaque branche étant constituée de 20 panneaux raccordés en série. Ce groupement mixte est idéalement conçu pour équilibrer la tension globale à 960 V et le courant total à 80 A, permettant ainsi le transport de puissances élevées. Cette architecture optimise le rendement global du système de conversion en limitant les pertes en ligne.



Figure (I- 11) : Système hybride à grande échelle

I-7 Potentiel solaire en Algérie:

I-7-1 Ressources solaires et ensoleillement :

L'Algérie est considérée comme l'un des pays les plus riches en énergie solaire au monde et dans le bassin méditerranéen, en raison de son climat désertique. Elle bénéficie d'une moyenne annuelle de plus de 3 000 heures d'ensoleillement, pouvant atteindre 3 900 heures dans certaines régions sahariennes. Ce rayonnement représente l'un des indices d'irradiation solaire les plus élevés à l'échelle mondiale, avec une moyenne d'environ 6,57 kWh/m²/jour.

Ce potentiel est particulièrement lié à l'étendue du Sahara, qui couvre près de 86 % du territoire national. Ces conditions sont idéales pour le déploiement de Centrales Solaires à Concentration (CSP) et de systèmes photovoltaïques. Les zones les plus ensoleillées, telles qu'Adrar, Tamanrasset et Ghardaïa, sont particulièrement adaptées à des projets solaires de grande envergure.

Ce gisement solaire exceptionnel représente une opportunité majeure pour le développement économique et social du pays. Son exploitation permettrait de réduire la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles, de générer des emplois et d'attirer des investissements dans le secteur de l'énergie renouvelable. En outre, la position géographique stratégique de l'Algérie offre la possibilité d'exporter de l'électricité verte vers l'Europe, ce qui renforcerait sa place économique et énergétique dans la région. Le pays participe notamment à l'Initiative industrielle Desertec, qui vise à exploiter les ressources solaires et éoliennes du Sahara pour couvrir jusqu'à 15% de la consommation électrique européenne d'ici 2050. Enfin, le premier Atlas

Algérien du gisement solaire, élaboré par le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), met en évidence l'ampleur de ce potentiel et constitue un outil essentiel pour la planification des projets solaires à l'échelle nationale

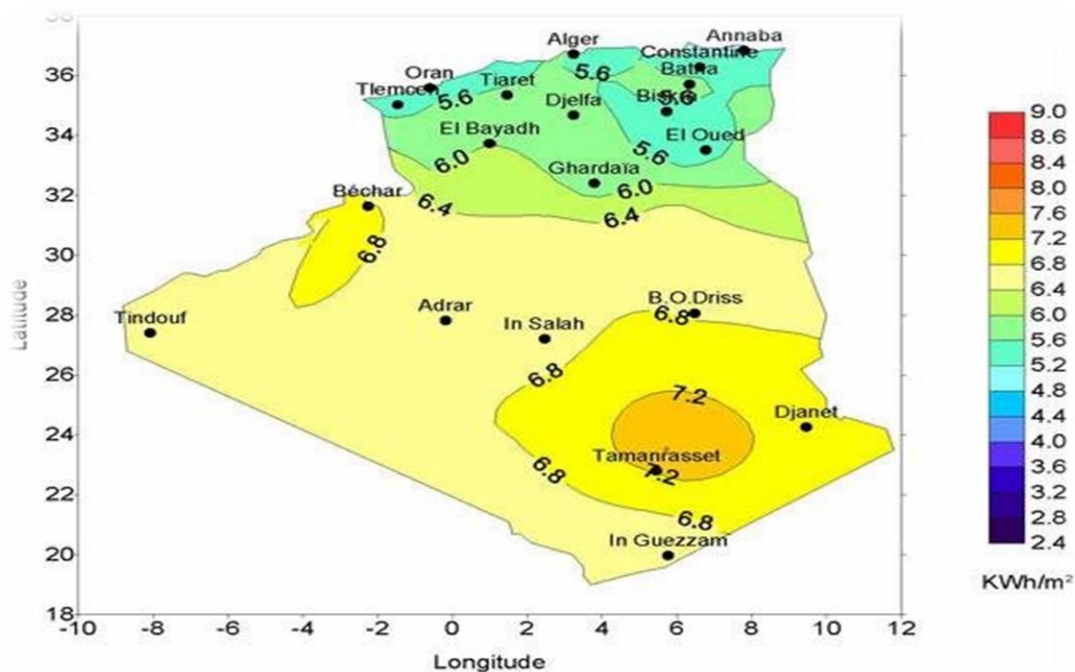


Figure (I- 12) : Irradiation solaire globale reçue par l'Algérie moyenne annuelle .

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale 1 m^2 est de l'ordre de 6.75 KWh . Sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m^2 an au Nord et 2263 kwh/m^2 au Sud du pays.

Tableau (I. 4) : Différents ensoleillements des régions Algériennes

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue ($\text{Kwh/m}^2/\text{an}$)	1700	1900	2650

I-7-2 Projets et infrastructures solaires :

Plusieurs initiatives solaires à grande échelle ont été mises en place par l'Algérie afin d'exploiter son potentiel solaire remarquable. On peut mentionner parmi ces projets les centrales solaires de Hassi R'Mel et Boughezoul, sans oublier d'autres sites actuellement en phase de développement. L'objectif fixé par le gouvernement algérien est de générer $15\,000 \text{ MW}$ d'énergie solaire avant 2035. Afin de réaliser cet objectif, Sonelgaz, la société d'État responsable de la production et de la distribution d'électricité en Algérie, a lancé plusieurs appels d'offres.

En février 2023, un appel d'offres initial a été initié pour un projet de $2\,000 \text{ MW}$, complété par une seconde sollicitation pour un projet de $1\,000 \text{ MW}$, touchant plusieurs wilayas. Ces initiatives comprennent la mise en place de centrales solaires photovoltaïques localisées dans diverses régions du pays. En 2023, le consortium Sonelgaz a conclu 14 accords avec 8 soumissionnaires pour l'établissement de 15 centrales solaires photovoltaïques dotées d'une puissance globale de $2\,000 \text{ MW}$. Ces centrales seront distribuées sur 12 wilayas, chacune ayant une capacité individuelle de 80 à 220 MW . [9]

L'Algérie a lancé plusieurs projets solaires majeurs pour concrétiser sa stratégie de transition énergétique tels que:

1. Cinq centrales solaires produisant 780 MW

Le projet majeur englobe cinq centrales solaires, mises en œuvre par un consortium chinois. Voici la répartition de ces installations :

- Batna : 220 MW
- Laghouat (Guelt El Sidi Saad): 200 MW
- Oued (Douar El Maa) : 200 MW
- Béchar (Al Abadla) : 80 MW
- Ouled Djellal : 80 MW

2. Centrale de Hassi Dallaa située à Laghouat, d'une capacité de 362 MW

Le second projet, qui se trouve à Hassi Dallaa dans la wilaya de Laghouat, est mené à bien par la société turque Özgün. Avec une puissance de 362 MW, c'est l'une des plus importantes installations solaires actuellement en développement en Algérie. Les travaux, initiés en mars de cette année, avancent vite et l'entrée en opération est attendue pour fin 2025 ou début 2026.

3. Centrale d'El Oued

Une centrale de 300 MW, construite par la société chinoise, est aussi située dans la région d'El Oued. Ce projet vient compléter une autre centrale de 200 MW actuellement en développement dans la wilaya proche d'El Meghaïer, soulignant l'importance essentielle de cette région pour la stratégie solaire du pays.

4. Centrale de Ouargla

À Ouargla, la construction d'une centrale de 300 MW a été confiée au groupe public algérien Cosider, avec un délai de réalisation estimé entre 12 et 14 mois. Ce projet permettra de satisfaire la demande énergétique grandissante dans cette zone clé

5. Centrale Biskra

En définitive, à Biskra, la société chinoise Power China met en œuvre une centrale de 220 MW. Une fois mise en service, cette installation devrait générer 400 millions de kilowattheures d'énergie propre, ce qui représente un apport considérable pour l'économie locale et nationale.

6. Projet Solar 1000 MW

Ce projet vise à construire plusieurs centrales solaires photovoltaïques d'une capacité globale de 1 000 MW, réparties sur cinq wilayas : Béchar, Ouargla, El Oued, Touggourt et Laghouat. La construction des centrales se fera par tranches de 50 à 300 MW .

I-7-3 Défis et obstacles au développement du solaire :

Bien que l'Algérie bénéficie d'un potentiel solaire remarquable, elle est confrontée à divers obstacles pour la mise en œuvre de l'énergie solaire. Ces enjeux englobent des dimensions économiques, technologiques, environnementales et politiques.

1. Coût et financement des installations

Le développement de l'énergie solaire en Algérie, bien que prometteur, se heurte à plusieurs obstacles économiques, notamment en ce qui concerne le coût initial des installations et l'accès au financement.

- **Coût de départ élevé :** Le coût initial des systèmes solaires est toujours considéré comme élevé, requérant des investissements conséquents pour mettre en route les projets. Malgré la diminution des prix des panneaux solaires ces dernières



(a) Batna – 220 MW



(b) EL Oued – 200 MW



(c) Biskra – 220 MW



(d) Projet Solar – 1000 MW

Figure (I- 13) : Aperçu de projets solaires emblématiques et initiatives en Algérie [9]

I-8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions générales relatives à l'énergie photovoltaïque. Après un aperçu historique du développement de cette technologie, nous avons expliqué le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, ainsi que les principales caractéristiques du rayonnement solaire.

Nous avons examiné les différents types de systèmes photovoltaïques, notamment les systèmes autonomes, raccordés au réseau et hybrides, en soulignant leurs applications et leurs avantages. Différentes méthodes de connexion des panneaux photovoltaïques (série, parallèle et hybride) ont également été présentées afin d'illustrer leur impact sur les performances du système.

Après avoir présenté ces généralités, le deuxième chapitre sera consacré à l'étude du système photovoltaïque, traitant du fonctionnement de la cellule photovoltaïque, de ses caractéristiques électriques et de sa modélisation.

Chapitre II

Système photovoltaïque

II-1 Introduction :

Le système photovoltaïque constitue l'un des moyens les plus efficaces pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique de manière propre et renouvelable. Son fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque, qui permet à certains matériaux semi-conducteurs de produire un courant électrique sous l'action du rayonnement solaire.

Afin de comprendre le comportement et les performances d'un système photovoltaïque, il est essentiel d'étudier le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que ses principales caractéristiques électriques. Ces caractéristiques, notamment la relation courant-tension et la puissance délivrée, varient en fonction des conditions climatiques telles que l'irradiation solaire et la température.

Par ailleurs, la modélisation mathématique d'une cellule photovoltaïque représente une étape importante pour analyser son comportement électrique et prévoir ses performances dans différentes conditions de fonctionnement. L'utilisation des outils de simulation, tels que MATLAB/Simulink, permet de reproduire ce comportement et d'évaluer l'influence des paramètres environnementaux sur le rendement du module photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous présentons le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, puis ses caractéristiques électriques. Ensuite, nous abordons la modélisation du module photovoltaïque ainsi que sa simulation sous MATLAB afin d'analyser ses performances dans différentes conditions d'exploitation.

II- Effet photovoltaïque:

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semi-conducteurs qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière.

Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui par 90% des panneaux produits dans le monde, mais il existe de nombreuses autres technologies déjà industrialisées, comme les couches minces, ou en phase de recherche.



Figure (II- 1) : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique dans une cellule photovoltaïque.

- 1 - Les "grains de lumière"- les photons - heurtent la surface du matériau photovoltaïque disposé en cellules ou en couche mince.
- 2 - Ils transfèrent leur énergie aux électrons qui gravitent autour des atomes dont est formé le matériau. C'est l'effet photoélectrique. Du fait de l'énergie qu'ils gagnent, les électrons "s'excitent". Ils reviennent généralement à l'état d'équilibre - leur niveau initial - en libérant l'énergie des photons sous forme de chaleur : le matériau chauffe au soleil.
- 3 - Mais il est aussi possible de récupérer cette énergie sous forme électrique. L'électron excité forme avec le « trou » qu'il laisse au niveau inférieur une paire « électron-trou ». Les électrons et les trous sont des charges de signes opposés ($-q$; $+q$). Les cellules photovoltaïques sont des jonctions PN, faites en associant un semi-conducteur de type n avec un semi-conducteur de type p, comme le silicium dopé phosphore et le silicium dopé bore. Soumises à un champ électrique dans une jonction PN branchée sur un circuit extérieur, les paires électrons-trou vont se séparer et les électrons excités vont se mettre en mouvement dans une direction particulière : un courant électrique est créé.
- 4 - Le courant électrique continu qui se crée est alors recueilli par des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres et acheminé à la cellule suivante.
- 5 - Le courant s'additionne en passant d'une cellule à l'autre jusqu'aux bornes de connexion du panneau et il peut ensuite s'additionner à celui des autres panneaux raccordés en "champs". [10]

II-3 Système photovoltaïque :

Le système photovoltaïque est contrôlé par la commande MPPT comme le montre la Figure (II-2).

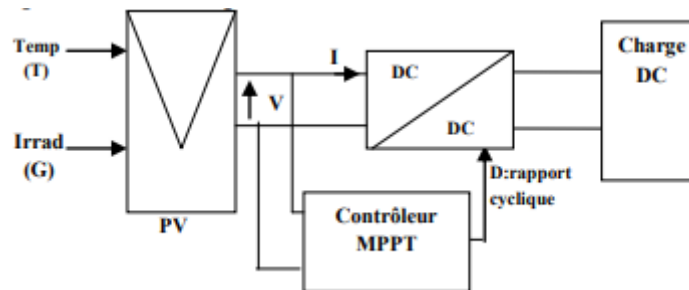


Figure (II- 2) : le système photovoltaïque

Un système photovoltaïque se compose de quatre blocs, le premier bloc représente la source d'énergie (panneau photovoltaïque) dont le rôle est de convertir l'éclairement en courant continu, le second bloc est un convertisseur statique continu-continu qui permet de faire une adaptation d'impédance de sorte que le panneau délivre le maximum d'énergie., le troisième bloc représente le système de contrôle MPPT basé sur un algorithme qui permet d'agir sur le rapport cyclique pour extraire en permanence la puissance maximale. Le quatrième bloc représente la charge [11]

II-3-1 Cellule PV :

Les technologies cristallines à base de silicium (multicristallin et monocristallin) sont de loin les plus utilisées aujourd'hui mais les technologies "couches minces", en particulier CIS et CdTe se développent sur certains marchés spécifiques. D'autres filières basées sur l'utilisation de colorants ou de matériaux organiques, encore à leur balbutiements, promettent un bel avenir à l'énergie photovoltaïque.

La cellule solaire, élément unitaire d'un module photovoltaïque, est aussi l'élément actif dans lequel se produit l'effet photovoltaïque. Celui-ci permet au matériau de cellule de capter l'énergie lumineuse (photons) et de la transformer en énergie électrique caractérisée par un déplacement de charges, positives et négatives.

La caractéristique commune à toutes les technologies photovoltaïques est la mise en présence dans le matériau de la cellule d'un donneur et d'un accepteur d'électrons pour

permettre ce déplacement de charges. Une fois transféré dans un circuit électrique extérieur, celui-ci prend la forme d'un courant électrique continu. [12]

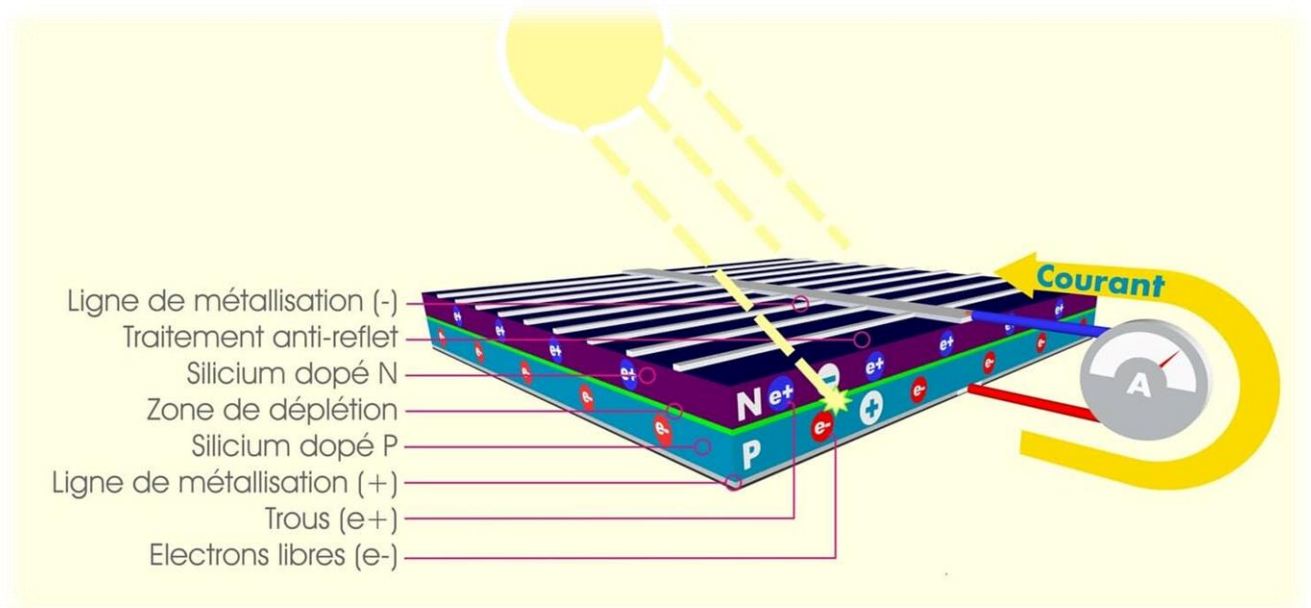


Figure (II- 3) : Structure interne et fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

De manière générale, les cellules photovoltaïques peuvent être vues comme un empilement de matériaux :

La couche active ou l'absorbeur constituée d'un premier matériau accepteur d'électrons et d'un second matériau donneur d'électrons, formant une jonction donneur-accepteur ;

Les contacts métalliques avant et arrière constituant les électrodes positive (+) et négative (-) chargées de collecter le courant généré ;

Des couches supplémentaires comme un anti-reflet ou une couche plus fortement dopée permettant d'améliorer les performances de la cellule : meilleure absorption de la lumière, meilleure diffusion des porteurs de charges dans le matériau etc.

Ainsi, ce qui différencie une technologie solaire d'une autre, c'est principalement la nature de l'absorbeur. De ses propriétés physico-chimiques dépendent les procédés de dépôt utilisés, la nature et les caractéristiques des autres composants de la cellule (anti-reflet, électrodes...) ainsi que son architecture globale : type de substrat, épaisseur, positionnement des électrodes etc.

II-3-2 Principales technologies solaires photovoltaïques

On peut distinguer trois grandes familles de cellules solaires :

Les cellules au silicium cristallin, pour lesquelles l'élément actif est le silicium dopé dans la masse. Bien que plus ancienne, cette technologie représente 95 % des parts de marché du fait de sa robustesse et de ses performances (rendement modules allant de 17 à 23 % pour une durée de vie de 30 ans environ) ainsi que des investissements importants qui lui ont été destinés, que ce soit pour la transformation du silicium, l'élaboration des cellules ou l'assemblage des modules.

Les cellules à base de couches minces qui ont en commun le procédé de dépôt du matériau semiconducteur à faible épaisseur sur des substrats variés et donnant un aspect uni, produisant des modules de rendement légèrement inférieur (de 11 à 19%). La part de marché pour l'ensemble de ces technologies est d'environ 5 % et a baissé depuis 2009 (elles représentaient 17% de la production mondiale en 2009) : ces filières ont perdu l'avantage de leur moindre coût de production avec les investissements massifs consentis dans le silicium au début des années 2000.

Les cellules à base de photovoltaïque organique, segment sur lequel la recherche s'intensifie dans la perspective de produire des cellules à très bas coût pour des applications nouvelles. Leur principe de fonctionnement est basé sur les cellules à colorant de Michaël Grätzel avec des variations sur le type de matériaux utilisés. Avec des rendements de l'ordre de 15 %, leur point faible reste aujourd'hui encore leur durée de vie limitée.

Enfin, la famille des hybrides présentée sur l'illustration ci-dessous rassemble les cellules mettant en présence des technologies de natures différentes pour atteindre des rendements optimisés.

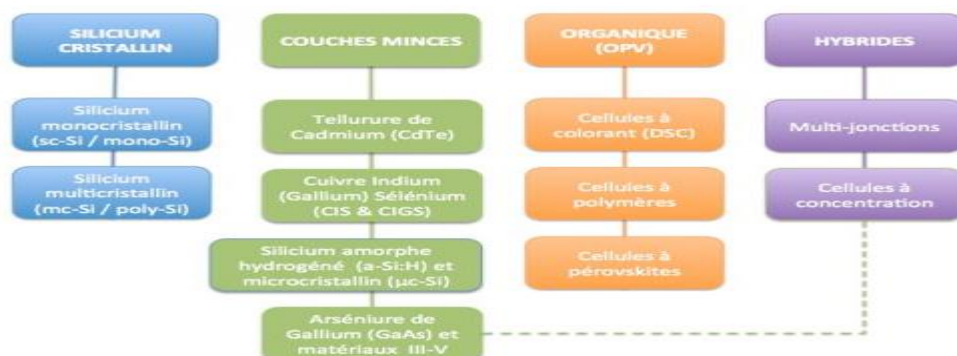


Figure (II- 4) : Classification des technologies de cellules photovoltaïques [13]

II-3-3 Modélisation de panneau photovoltaïque :

Dans cette partie, on présente l'analyse deux modèles types largement utilisés. Il s'agit de modéliser la cellule photovoltaïque à une et à deux diodes. Pour chaque cas, les modèles représentant les cas idéal et réel sont développés.

A. Modèle de la Cellule à Une Diode :

Cas Réel: Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle est illustré par la Figure (II-5)

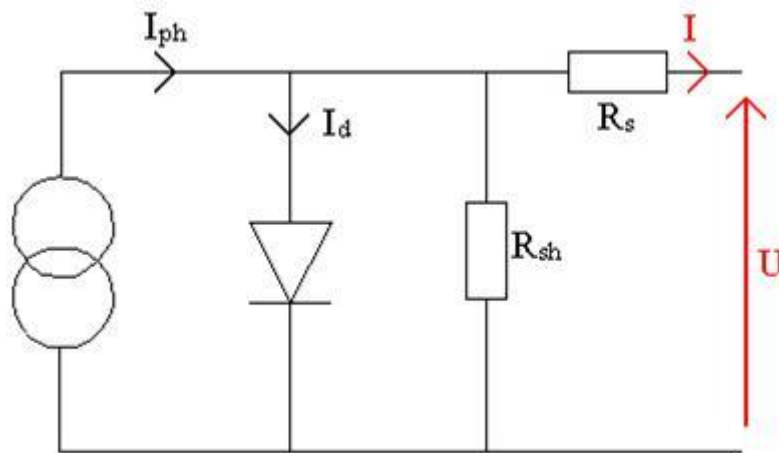


Figure (II- 5) : Modèle réel d'une cellule PV à une diode

Il est principalement constitué d'une source de courant photoélectrique (I_{ph}), une diode (D), une résistance parallèle (R_{sh}) et une résistance série (R_s). A partir du schéma et en appliquant la loi de Kirchhoff le courant produit par la cellule sera donné par la relation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (II-1)$$

Où,

$$I_{ph} = \left(I_{cc} + K_{cc}(T_f - T_s) \right) \frac{G_f}{G_s} \quad (II-2)$$

Le courant de court-circuit correspond aux conditions de la température et l'irradiation standards: $T=25^\circ\text{C}$ et $E= 1000 \text{ W/m}^2$. Les autres paramètres sont définis dans la nomenclature. Le courant (I_d) qui traverse la diode est exprimé par la relation suivante :

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{pv} + R_s I_{pv})}{F K_B T_f} \right) - 1 \right] \quad (\text{II-3})$$

Où q est la charge élémentaire égale à $1.602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb, $K_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K est la constante Boltzmann, le courant de saturation (I_0) de la diode dépend de la température de fonctionnement selon l'équation ci-dessus :

$$I_0(T_f) = I_{0s} \left(\frac{T_f}{T_s} \right)^3 \exp \left(\frac{T_f - T_s}{T_f} \frac{E_g}{U_t} \right) \quad (\text{II-4})$$

Où, I_{0s} représente le courant de saturation de la diode dans les conditions standards. La tension thermique (U_t) et le courant à travers la résistance montée en parallèle (I_p) sont définis, respectivement, par les expressions (5) et (6).

$$U_t = \frac{F K_B T_f}{q} \quad (\text{II-5})$$

$$I_p = \frac{U_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (\text{II-6})$$

Cas Idéal: Le cas idéal est obtenu en considérant que la résistance série est négligeable ($R_s \approx 0$) soit les pertes nulles et que la résistance parallèle est infiniment grande ($R_p = \infty$). En tenant compte de ces considérations **Figure (II-6)** illustre le modèle idéal d'une cellule PV à une diode.

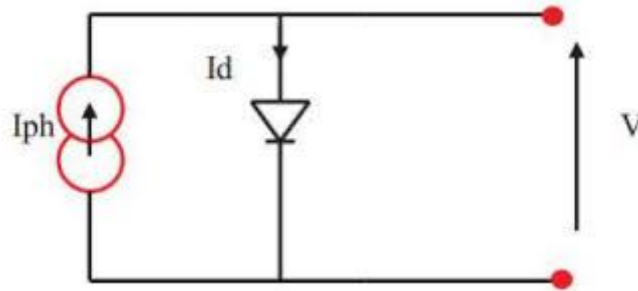


Figure (II- 6) : Modèle idéal d'une cellule PV à une diode

En appliquant la loi de Kirchhoff, on obtient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II-7})$$

Où, I_{ph} est identique à celle de cas du modèle réel et I_d est exprimé, ainsi:

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{qU_{pv}}{F K_B T_s} \right) - 1 \right] \quad (\text{II-8})$$

La même relation de la tension thermique (U_t) et la variation du courant de saturation de la diode en fonction de la température ambiante ($I_0(T_f)$), restent identiques au cas précédent.

B. Modèle d'une Cellule à Deux Diodes :

Cas Réel: La cellule photovoltaïque à deux diodes, présente une meilleure description. Elle est illustrée par la **Figure (II-7)**

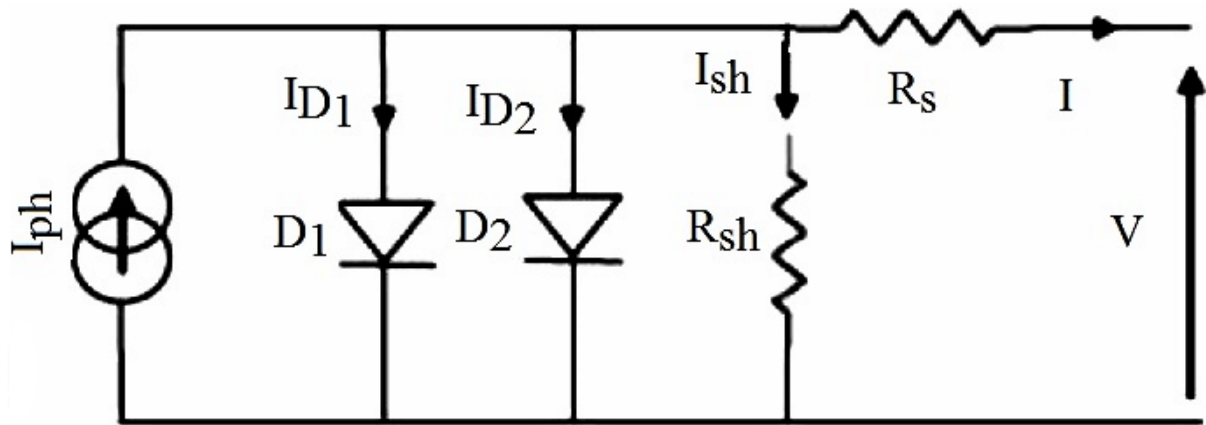


Figure (II- 7) : Modèle réel d'une cellule PV à deux diodes

Selon la loi de Kirchhoff, on a:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_p \quad (\text{II-9})$$

Où,

$$I_{d1} = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{pv} + R_s I_{pv})}{F_1 K_B T_f} \right) - 1 \right] \quad (\text{II-10})$$

$$I_{d2} = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{pv} + R_s I_{pv})}{F_2 K_B T_f} \right) - 1 \right] \quad (\text{II-11})$$

Les équations utilisées pour la présentation des courant I_{ph} et I_p dans le cas d'une seule diode restent identiques.

Cas Idéale: Concernant le modèle idéal d'une cellule à deux diodes qu'on obtient en considérant les mêmes hypothèses décrites dans la section précédente. Cependant, **Figure (II-8)** présente le schéma du modèle idéal.

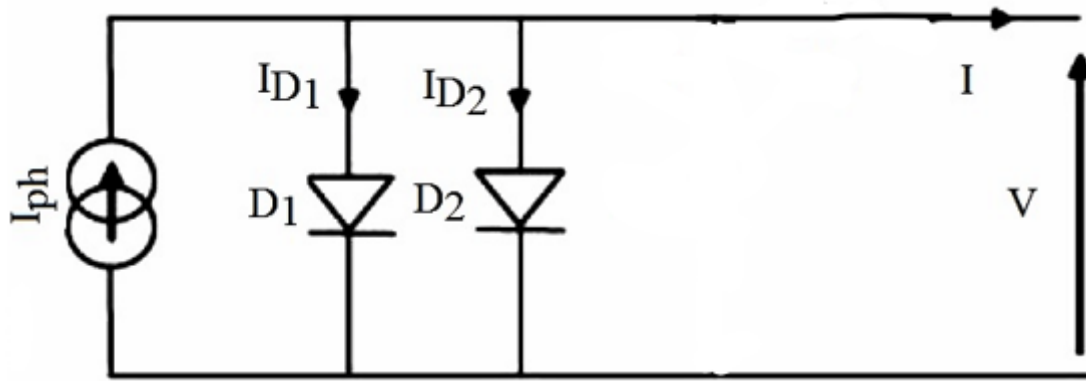


Figure (II- 8) : Modèle idéal d'une cellule PV à deux diodes

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} \quad (II-12)$$

Où I_{ph} reste toujours identique à celle exprimées dans les sections précédentes et les courants à travers les deux diodes sont :

$$I_{D1} = I_0 \left[\exp \left(\frac{qU_{pv}}{F_1 K_B T_f} \right) - 1 \right] \quad (II-13)$$

$$I_{D2} = I_0 \left[\exp \left(\frac{qU_{pv}}{F_2 K_B T_f} \right) - 1 \right] \quad (II-14)$$

Concernant les relations de U_t et $I_0(T_f)$, on les garde comme il a été défini précédemment.

C. Modélisation d'un module photovoltaïque:

Dans cette section, on considère un module photovoltaïque (panneau solaire). Pour cela, le branchement des cellules se fait généralement en série afin d'augmenter la tension. Ainsi le courant (I_{pv}) à la sortie est donné par la relation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - \frac{U_{pv} + R_s I_{pv} N C_s}{R_p N C_s} \quad (\text{II-15})$$

Où, I_{ph} et I_d restent identiques aux précédents. [14]

II-4 Caractéristique électrique :

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe :

- Sa tension à vide : V_{co} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit : I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal : MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimal : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}).

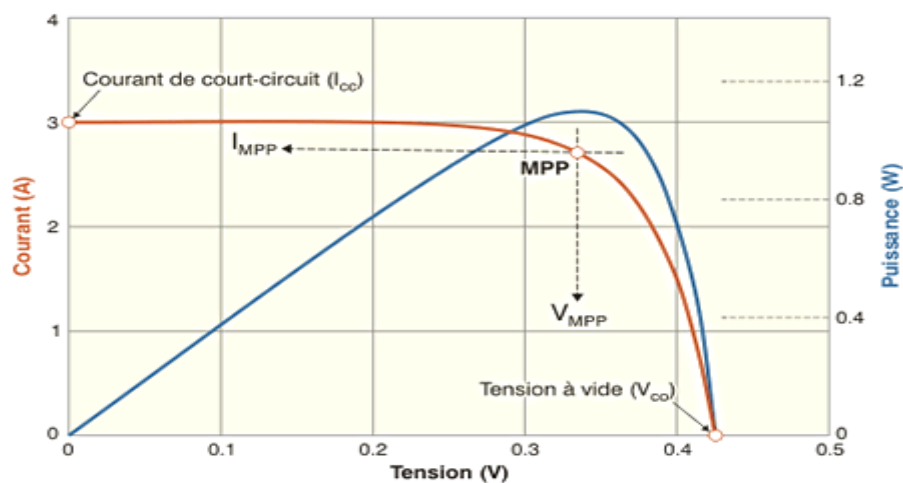


Figure (II- 9) : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque. [15]

Remarque : Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces caractéristiques dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : émission lumineuse de $1\,000\text{ W/m}^2$, température de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, conditions spectrales Air Mass 1.5 (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de 41.8° par rapport à l'horizontale).

Actuellement, les cellules présentent des valeurs de l'ordre de 0.5V-3.5A-2.1 Wc.

II-4-1 Raccordement des cellules photovoltaïques :

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm^2 (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique.

Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable.

Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions-courants désirés.

a-Association en série :

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

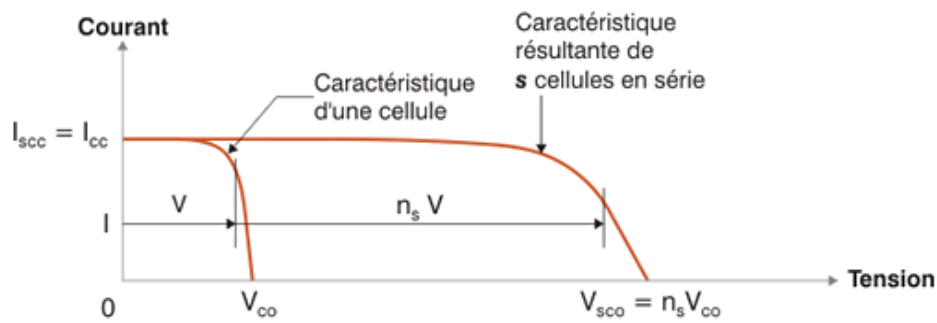


Figure (II- 10) : Association en série

b-Association en parallèle :

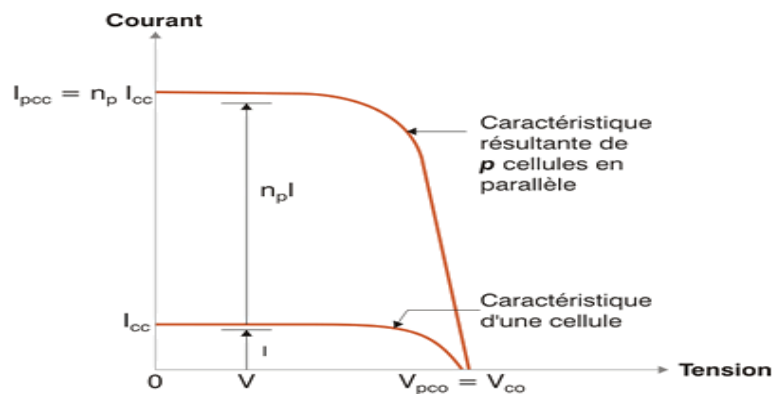


Figure (II- 11) : Association en parallèle

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.[16]

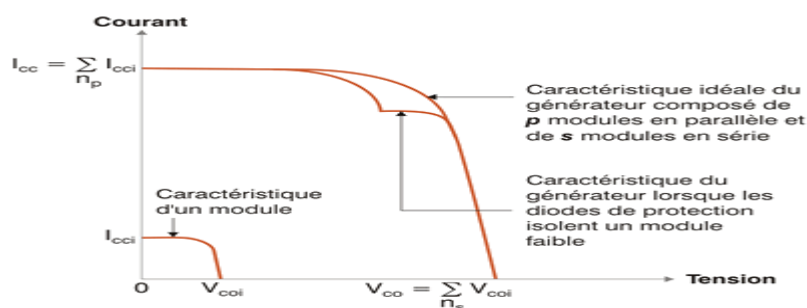


Figure (II- 12) : association série/parallèle

II-4-2 Diodes de by-pass :

Il arrive fréquemment que les cellules élémentaires qui composent le module ne présentent pas toutes la même courbe caractéristique au même moment. Les raisons peuvent être multiples : variété inévitable de fabrication, défaillance, différence d'éclairement ou de température (dus par exemple à un ombrage non uniforme du module, un encrassement,...).

Sous certaines conditions, la cellule la plus faible peut alors se comporter comme une cellule réceptrice, dissipant la puissance générée par la cellule la plus forte. Celle-ci peut même être détruite si la contrainte ou la température devient trop importante.

Pour éviter ce phénomène, on place des diodes de by-pass (empêchant tout courant ou tension inverses). Les diodes de by-pass sont connectées en parallèle (antiparallèle) aux bornes des groupements de cellules en série afin de dériver le courant en cas d'ombrage.

Les modules aujourd'hui commercialisés comprennent généralement des diodes de protection situées en parallèle des différents strings qui le composent.

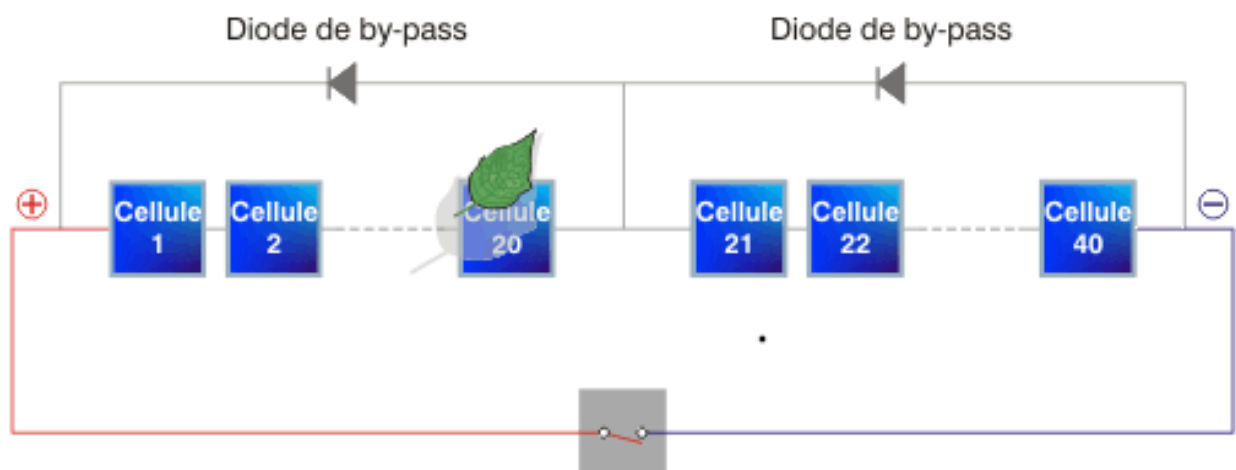


Figure (II- 13) : Schéma d'un module photovoltaïque avec diodes de dérivation (by-pass)

L'utilisation de ces by-pass induit néanmoins des perturbations de la courbe caractéristique, modifiant le point de puissance maximal du module :

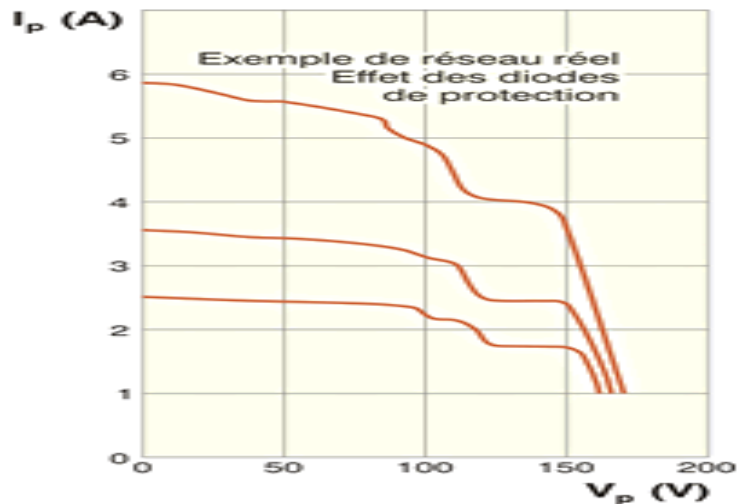


Figure (II- 14) : Caractéristique courant–tension (I – V) d'un générateur photovoltaïque réel avec effet des diodes de dérivation

II-5 Paramètres photovoltaïques :

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$. **Figure (II-15)** représente une caractéristique courant-tension $I(V)$ dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) du composant [17]

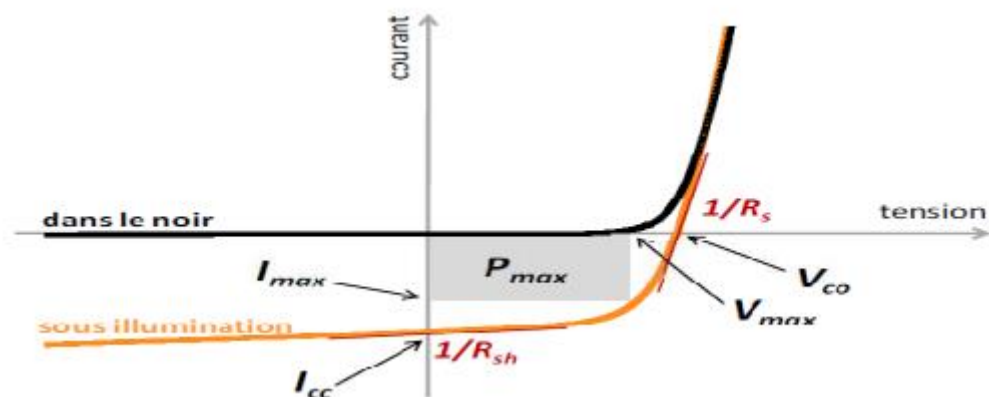


Figure (II- 15) : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.

a-Tension en circuit ouvert V_{co}

C'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge. Sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'irradiation. Elle est obtenue quand le courant de la cellule est nul

b-Courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit I_{cc} correspond à la valeur du courant lorsque la cellule est en condition de court-circuit. Le courant de court-circuit est très proche du photo-courant I_{ph} .

c-Puissance maximale P_{max}

La puissance maximale P_{max} délivrée par une cellule photovoltaïque correspond au maximum du produit de la tension maximale appliquée par le courant maximale mesuré aux bornes de la cellule.

La puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC Standard Test Condition), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de 1000 W/m^2 et à la température de 25°C .

d-Rendement

Le rendement énergétique (η) d'une cellule est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale générée P_{max} et la puissance du rayonnement solaire, qui arrive sur la cellule photovoltaïque :

$$\eta = \frac{P_{max}}{E.S} \quad (\text{II-16})$$

Où,

η : Rendement énergétique.

E : Éclairement (W/m^2)

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

P_{max} : Puissance maximale (W).

II-6 Influence de la l'éclairement

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température. Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C , **Figure (II-16)**, montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux Points de Puissance Maximale P_{max} . Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{co} (à vide) varie très peu.

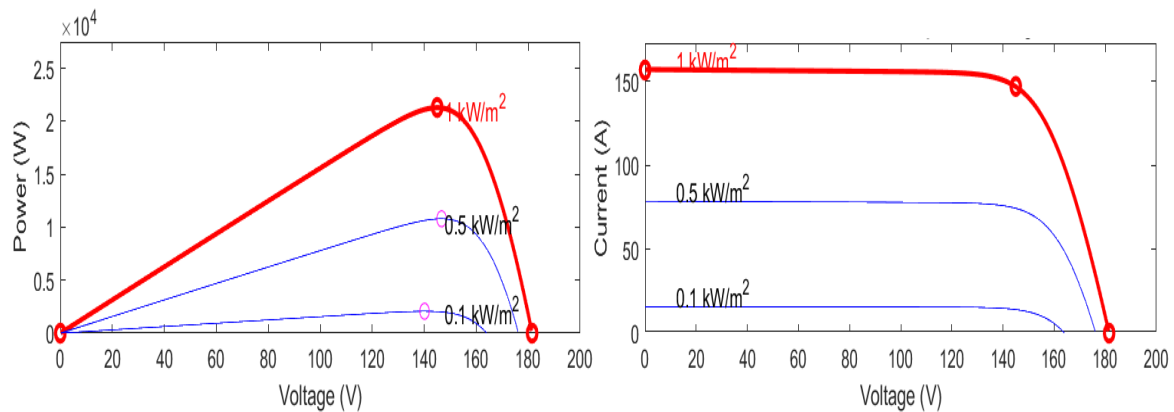


Figure (II- 16) : Evolution de la caractéristique $I(V)$ (a) et $P(V)$ (b) en fonction de l'irradiation..

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. **Figure (II-17)** présente la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction de la température à un éclairement donné. L'éclairement est ici fixé à 1000 W.m^2

II-7 Influence la température

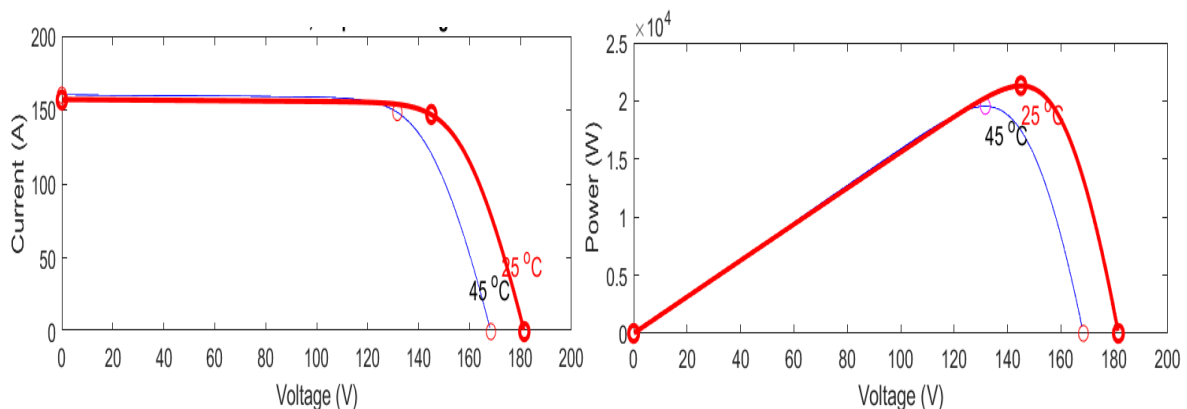


Figure (II- 17) : Evolution de la caractéristique $I(V)$ (a) et $P(V)$ (b) pour différentes températures.

Par contre, si la température croît à irradiation constante, la tension à vide V_{co} décroît avec la température. Plus la température est élevée plus V_{co} est faible et le courant de court-circuit I_{cc} augmente avec la température. Cette hausse est nettement moins importante que la baisse de tension. L'influence de la température sur I_{cc} peut être négligée dans la majorité des cas.

La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'un générateur PV. Ces deux paramètres devront donc être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation PV.

II-8 Influence de Facteur de forme :

Il représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{co}$ comme le montre la Figure (II-18).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (II-17)$$

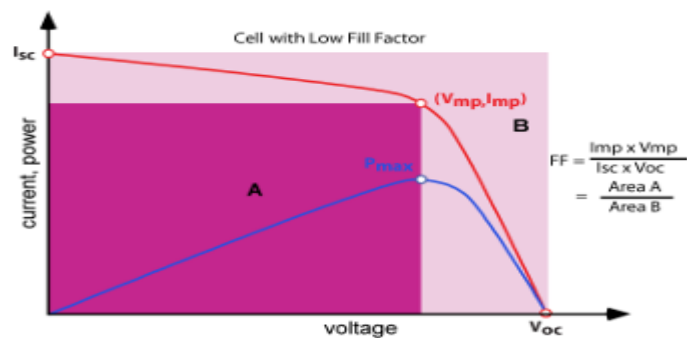


Figure (II- 18) : Facteur de forme pour une cellule PV.

II-9 Résistance série (Rs) :

La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

Ce modèle tient compte de la résistivité du matériau et des pertes ohmiques dues aux niveaux des contacts, ce qui permet une meilleure représentation du comportement électrique de la cellule par rapport au modèle idéal. Ces pertes sont représentées par une résistance série R_s dans le circuit équivalent représenté ci-dessous :

II-10 Résistance shunt (Rsh) :

La résistance shunt (Rsh) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

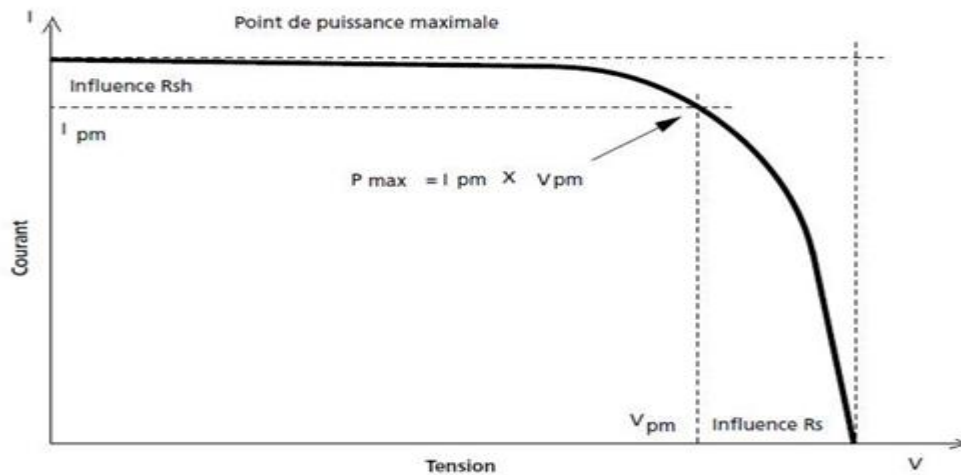


Figure (II- 19):Influence des résistances Rs et Rsh sur la caractéristique I-V d'une

II-11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le système photovoltaïque ainsi que les différents éléments qui le composent. Nous avons commencé par expliquer le principe de l'effet photovoltaïque et le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Nous avons présenté les principales technologies photovoltaïques ainsi que les modèles de représentation d'une cellule photovoltaïque à une diode et à deux diodes. Ces modèles permettent d'étudier le comportement électrique du générateur photovoltaïque dans différentes conditions de fonctionnement.

Les notions présentées dans ce chapitre constituent une base importante pour la suite de notre travail. Dans le chapitre suivant, nous allons réaliser la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque résidentiel connecté au réseau sous MATLAB/Simulink afin d'évaluer ses performances.

Chapitre III

Simulation d'un système photovoltaïque résidentielle connecté au réseau

III-1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons une étude de simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique, piloté par une commande MPPT numérique basée sur la méthode de perturbation et observation (P&O).

Ce système comprend un générateur photovoltaïque, un onduleur monophasé assurant l'adaptation de puissance, une commande MPPT ainsi qu'un réseau électrique.

Le contrôle de la puissance ainsi que les simulations ont été réalisés à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink.

III-2 Outil Matlab/Simulink :

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Blocksets).
- Ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

Simulink, est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal.

III- 3 Système photovoltaïque résidentielle connecté au réseau proposé :

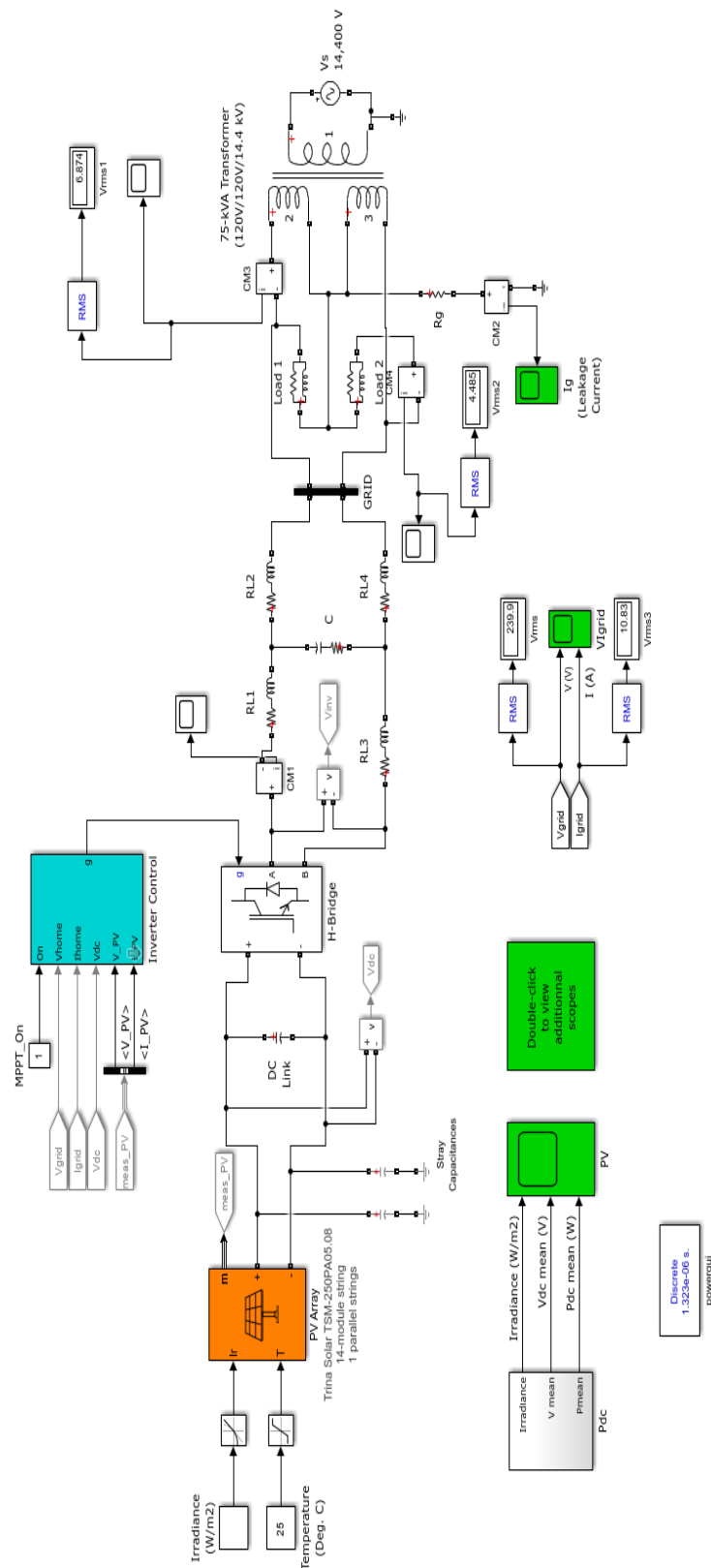


Figure (III- 1) : Schéma de simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique

III-4-1 Générateur photovoltaïque :

Nous avons étudié l'influence des paramètres extérieurs, l'éclairement et la température sur les caractéristiques (courant-tension, puissance-tension).

Dans notre étude on a utilisé un panneau photovoltaïque " **TSM-250PA05.08** " sont caractéristiques données par le tableau suivant :

Tableau (III- 1) : Caractéristiques électriques du panneau TSM-250PA05.08

Caractéristiques électrique	Valeurs
Puissance nominal	250 W
Tension à puissance maximale (Vmp)	30.3 V
Courant à puissance maximale (Imp)	8.27 A
Tension en circuit ouvert(Voc)	37.6 V
Courant de court-circuit (Isc)	8.85 A
Nombre de modules en série (Ns)	14
Nombre total de cellules en parallèle (Np)	1

La simulation d'un générateur PV sous les conditions standard ($E=1000 \text{ w/m}^2$ et $T=25^\circ$), et à éclairement et température variable a donné les courbes présentés dans le Chapitre II, avec les résultats et les remarques.

III-4-2 Structure de commande de l'onduleur :

La commande de l'onduleur constitue un élément essentiel du système photovoltaïque connecté au réseau, permet d'assurer l'extraction optimale de la puissance disponible du générateur photovoltaïque, la régulation du bus continu ainsi que l'injection d'un courant synchronisé avec le réseau électrique. La figure III-2 présente l'architecture interne du contrôleur de l'onduleur utilisée dans le modèle proposé.

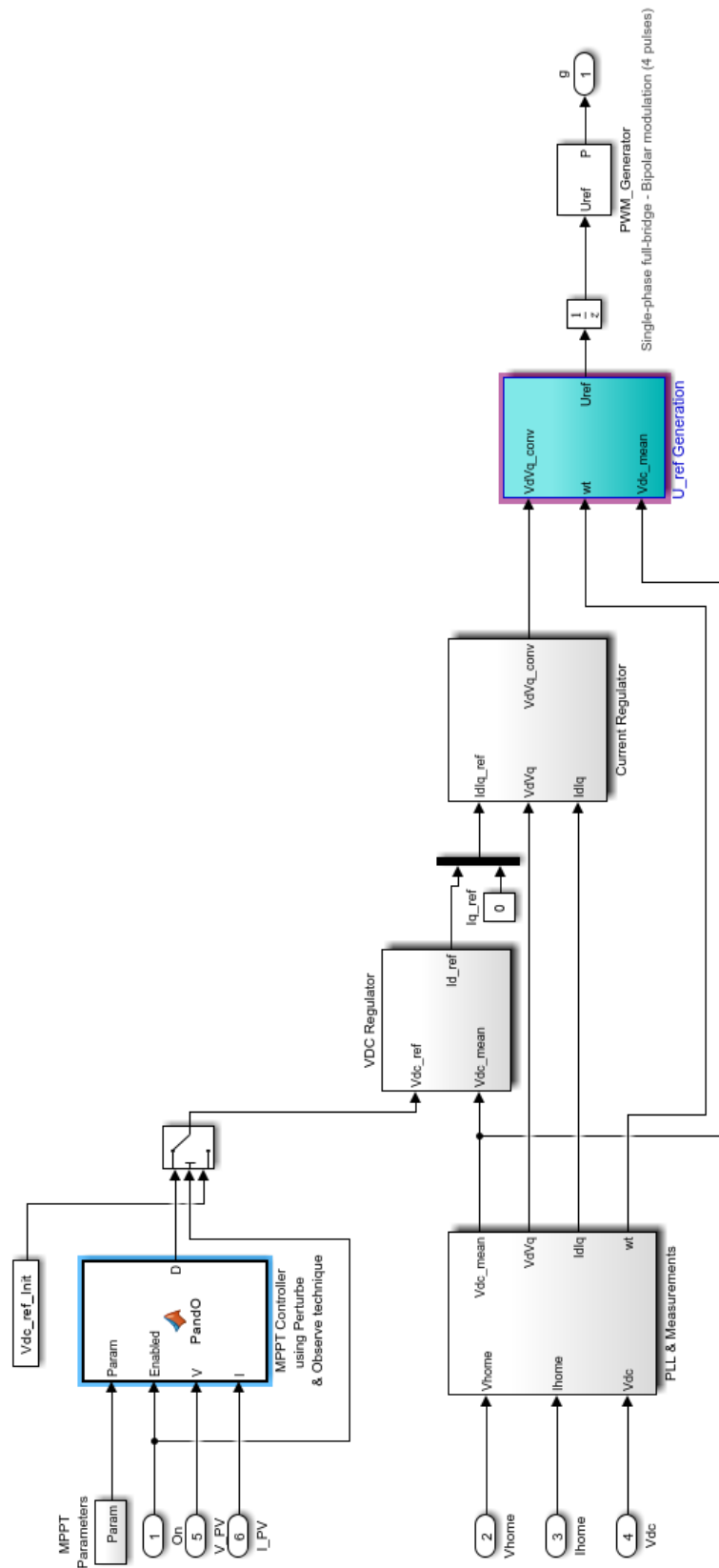


Figure (III- 2) : Structure interne du contrôleur de l'onduleur sous MATLAB/Simulink

La structure de commande implémentée sous MATLAB/Simulink repose sur plusieurs blocs fonctionnels assurant chacun une tâche spécifique, notamment : un algorithme MPPT basé sur la méthode Perturbation et Observation (P&O), une boucle de régulation de la tension du bus continu (DC-Link), un système de synchronisation par PLL (Phase Locked Loop), une boucle de contrôle du courant ainsi qu'un générateur de modulation PWM destiné à commander l'onduleur monophasé en pont complet (H-Bridge).

Le fonctionnement global de cette structure consiste à mesurer les grandeurs électriques du système, notamment la tension et le courant du générateur photovoltaïque, la tension du bus continu ainsi que les signaux du réseau électrique. Ces informations sont ensuite traitées par différentes boucles de commande afin de produire des impulsions de commutation adaptées aux interrupteurs de l'onduleur et assurer une injection stable de l'énergie photovoltaïque vers le réseau.

III-4-2-1 Commande MPPT basée sur la méthode P&O :

Afin d'exploiter la puissance maximale disponible du générateur photovoltaïque, une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) basée sur la méthode Perturbation et Observation (P&O) a été intégrée au système de commande. Cette technique permet de suivre dynamiquement le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque.

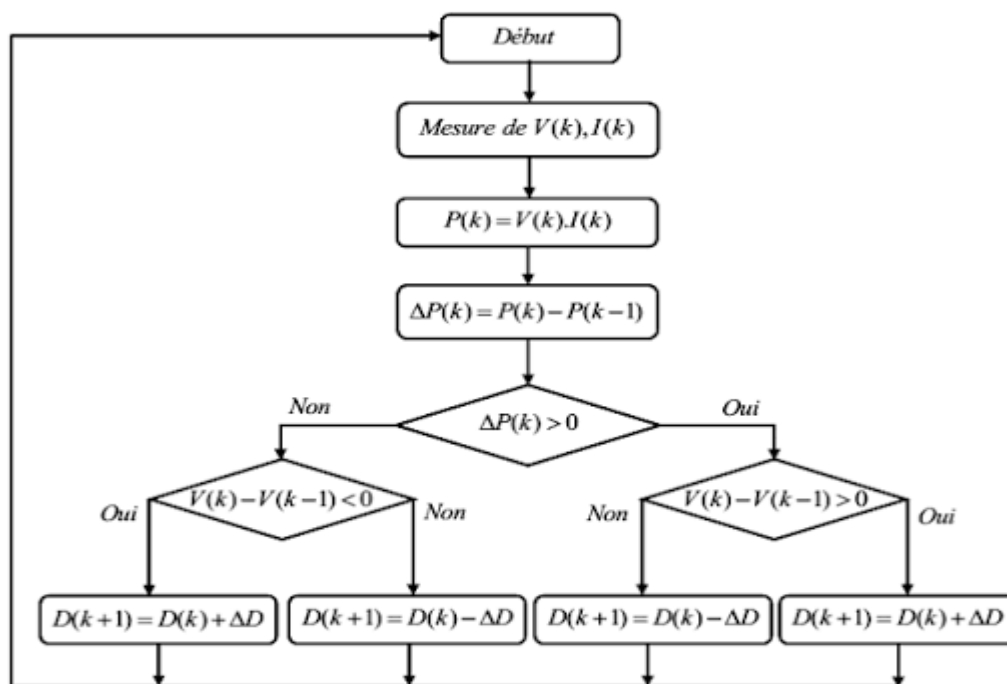


Figure (III- 3) : Organigramme de la méthode P&O [18]

III-4-2-1-1 Comparaison du fonctionnement avec et sans commande MPPT :

L'intégration d'une commande MPPT est cruciale pour optimiser la production d'énergie photovoltaïque (PV). Cette section compare les performances d'un système PV selon deux configurations

Cas 1 : Fonctionnement sans MPPT

Lorsque la commande MPPT est désactivée, le bloc de contrôle n'ajuste pas dynamiquement le point de fonctionnement des panneaux solaires. Le système est forcé de travailler à une tension fixe.

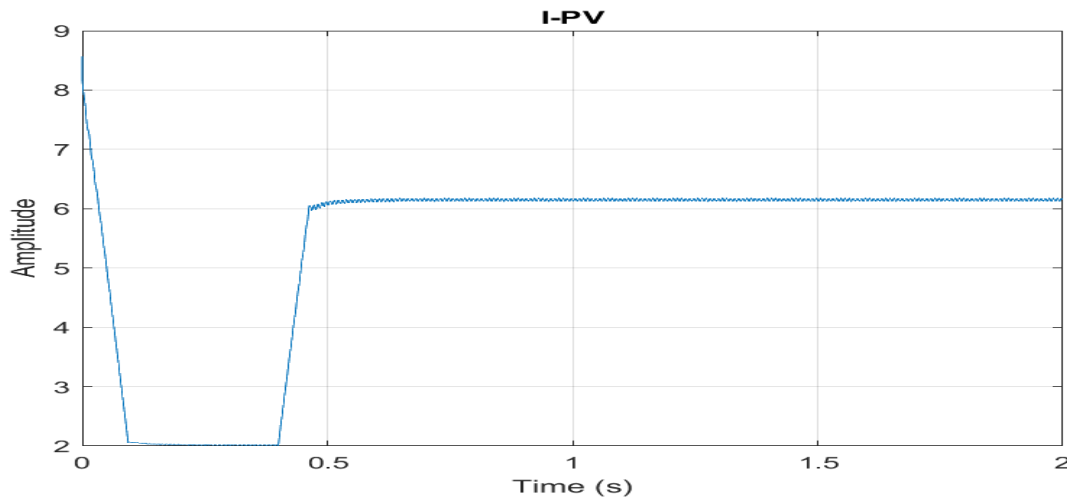


Figure (III- 4) : Évolution du courant du générateur PV (I-PV) sans commande MPPT.

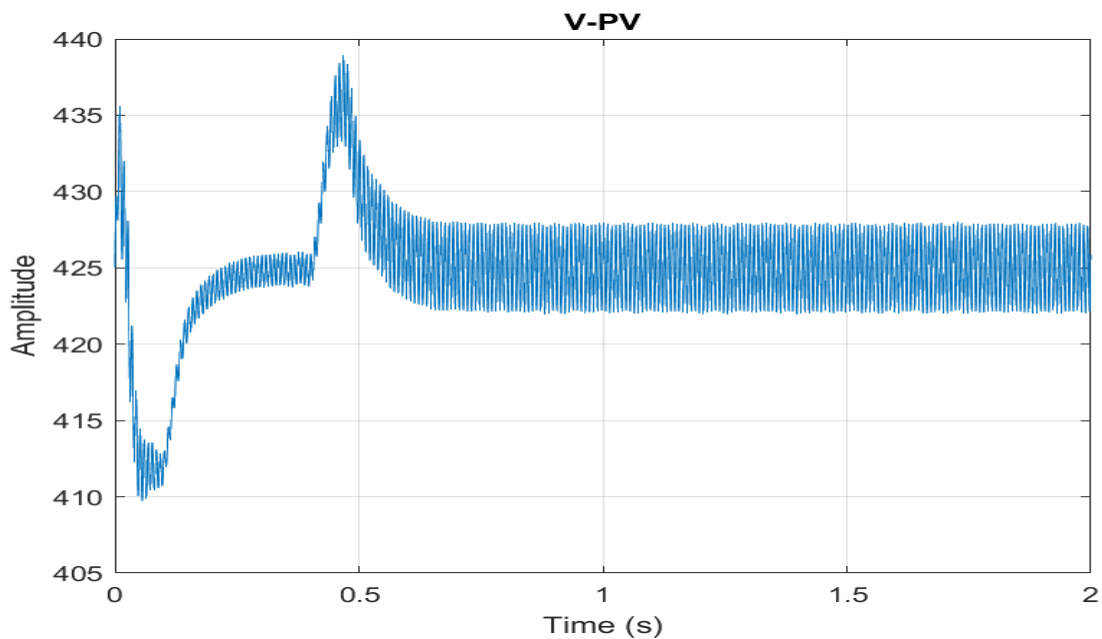


Figure (III- 5) : Évolution de la tension du générateur PV (V-PV) sans commande MPPT.

Allure de la tension V-PV :

Après une phase transitoire initiale au démarrage la tension se stabilise à une valeur fixe de (425 V). En régime permanent, la tension présente une ondulation stable autour d'une valeur moyenne de 425 V, en raison de la dynamique de commutation de l'onduleur monophasé.

Extraction de puissance :

La tension restant constante à 425 V sans adaptation aux caractéristiques optimales du panneau, la puissance générée (P_{dc}) est limitée à environ 2 400 W. Le système subit une perte d'efficacité car il fonctionne en dessous de son point de puissance maximale.

Cas 2 : Fonctionnement avec commande MPPT

Lorsque la commande MPPT est activée, l'algorithme prend le contrôle du système pour rechercher et suivre activement le point de puissance maximale réel des cellules.

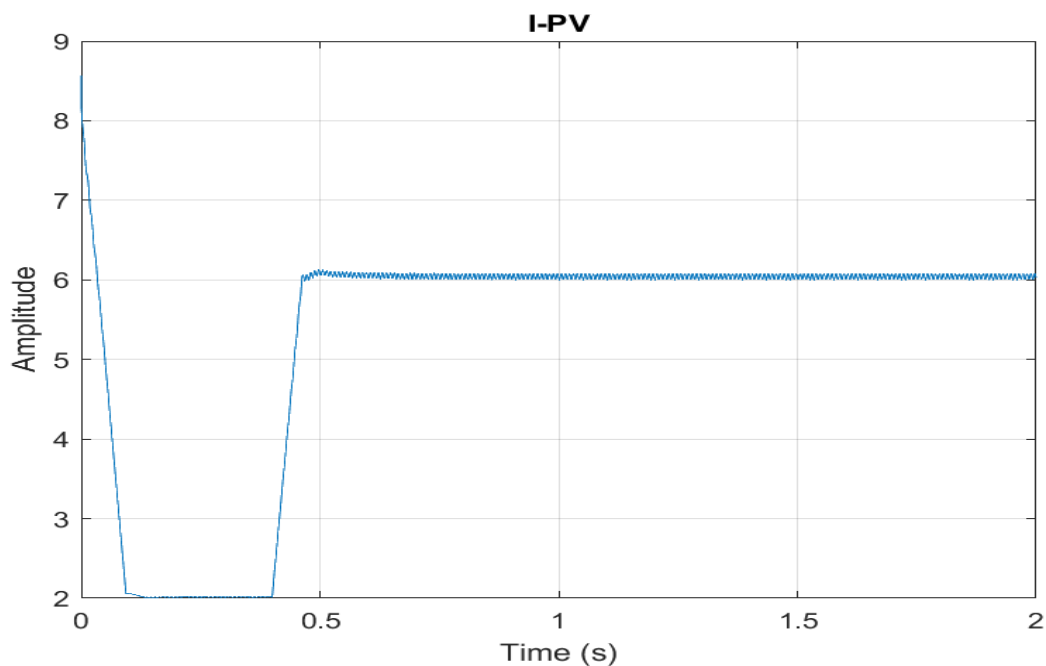


Figure (III- 6) : Évolution du courant du générateur PV (I-PV) avec commande MPPT.

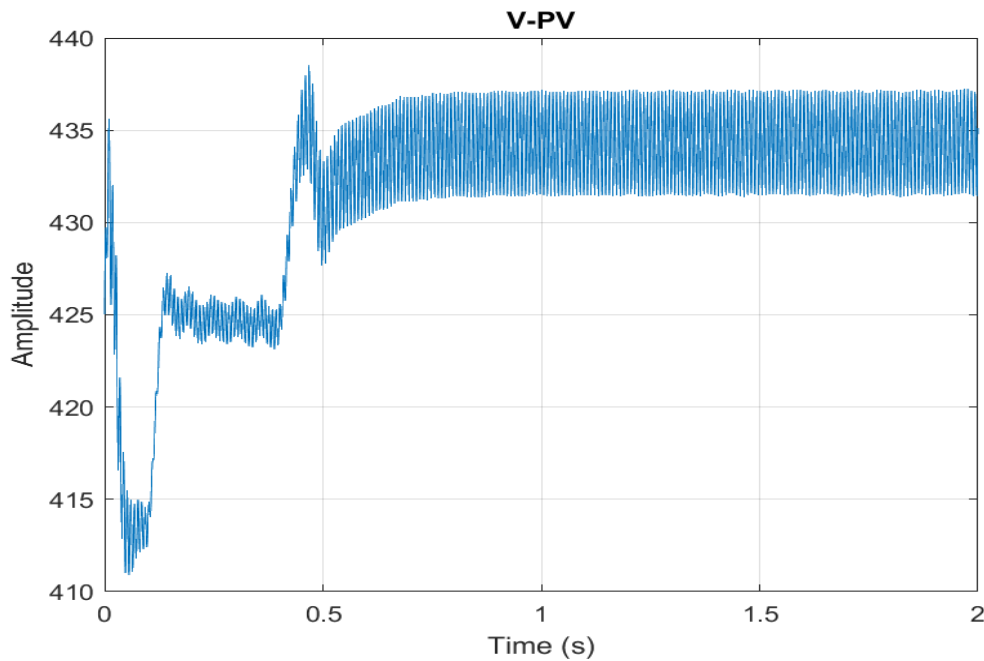


Figure (III- 7) : Évolution de la tension du générateur PV (V-PV) avec commande MPPT.

Allure de la tension V-PV

Le système détecte que le point de fonctionnement actuel n'est pas idéal, il force donc la tension à augmenter pour se stabiliser à une valeur moyenne plus élevée de 434 V.

Extraction de puissance :

En ajustant la tension à 434 V, le système extrait la puissance maximale possible des panneaux. Il en résulte une puissance de sortie mesurée d'environ 2 600 W.

III-4-3 H-Bridge:

L'une des applications typiques des ponts en H est la conversion du courant continu (CC) en courant alternatif (CA) dans les alimentations. Le fonctionnement du pont en H repose sur la stratégie de commande de ses deux branches parallèles, chacune équipée d'un interrupteur. L'entrée et la sortie du pont en H sont des tensions continues, mais leur amplitude et leur polarité sont contrôlables. On peut ainsi générer une tension de sortie carrée en fermant simultanément les interrupteurs S1 et S2 tout en maintenant S3 et S4 ouverts, puis en ouvrant S1 et S2 tout en fermant S3 et S4. Si le rapport cyclique de ces paires d'interrupteurs est de 50 % et que leur commutation est simultanée, la tension pulsée sera une onde carrée parfaite, de polarité positive et négative, par rapport à la tension d'entrée CC. En conservant le même rapport cyclique pour chaque paire d'interrupteurs, mais avec une valeur différente de 50 %, on obtient un train

d'impulsions dont la valeur n'est pas égale à $+V_{cc}$ pendant la moitié du cycle et à $-V_{cc}$ pendant l'autre moitié. En modifiant le rapport cyclique d'une ou des deux paires d'interrupteurs, on obtient différentes formes d'onde de sortie à trois niveaux, la tension de sortie étant nulle pendant une partie du cycle. On peut également y parvenir en commutant S1 et S3 simultanément, et S2 et S4 également. En pratique, les interrupteurs d'une même branche (S1/S4, S2/S3) ne sont généralement pas activés et désactivés simultanément afin d'éviter un court-circuit potentiellement dommageable de l'entrée, aussi appelé « passage à travers ». Pour prévenir ce risque, un court délai, appelé « temps mort », est introduit afin de retarder l'activation des interrupteurs opposés.

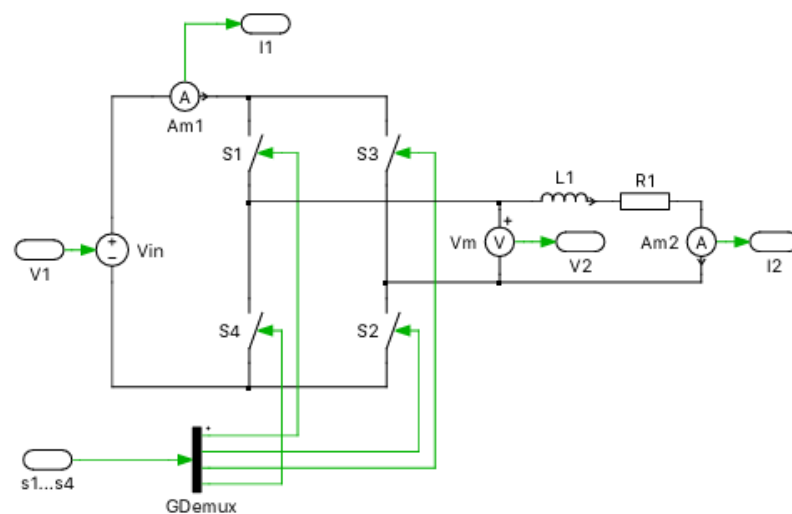


Figure (III- 8) : Schéma block d'un filtre RL sur Matlab Simulink

III-4-4 Filtre :

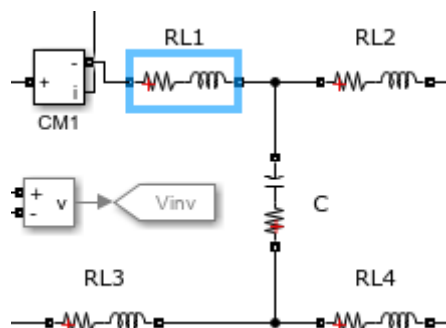


Figure (III- 9) : Schéma block d'un filtre RL sur Matlab Simulink

Le filtre élimine les harmoniques de découpage presque parfaitement et son comportement est quasiment idéal lorsqu'on travaille à vide (courant de sortie nul) et avec des signaux de fréquences voisines de la fréquence fondamentale.

III-4-5 Charge:

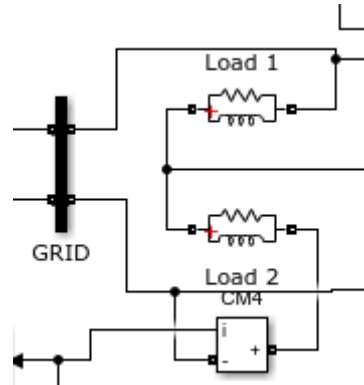


Figure (III- 10) : Schéma de la charge sur Matlab/Simulink

La configuration illustrée représente deux charges électriques distinctes, appelées Load 1 et Load 2, connectées en parallèle à un point de connexion commun.

Le choix d'une structure RL parallèle est essentiel pour l'analyse des réseaux électriques, car il permet une reproduction précise du comportement de la majorité des consommateurs réels :

- Composante purement résistive (R) : Elle absorbe la puissance active (P), convertie en travail utile ou en chaleur (chauffage, éclairage, etc.).
- Composante inductive (L) : Elle absorbe la puissance réactive (Q), nécessaire à la magnétisation et au fonctionnement des équipements inductifs (moteurs électriques, transformateurs, ballasts).

III-4-6 Réseaux électrique :

Le point final de la chaîne de conversion d'énergie modélisée sous MATLAB/Simulink correspond au raccordement au réseau de distribution électrique. Cet étage, illustré par la figure (III-10), assure l'élévation de la tension, l'isolement électrique et la stabilisation du système face au réseau d'alimentation.

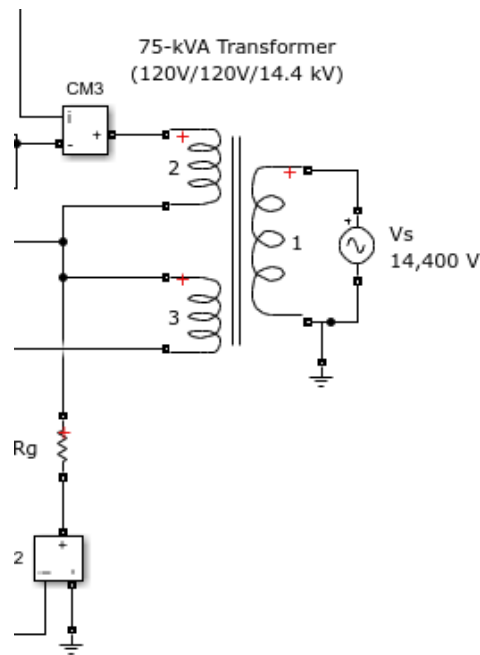
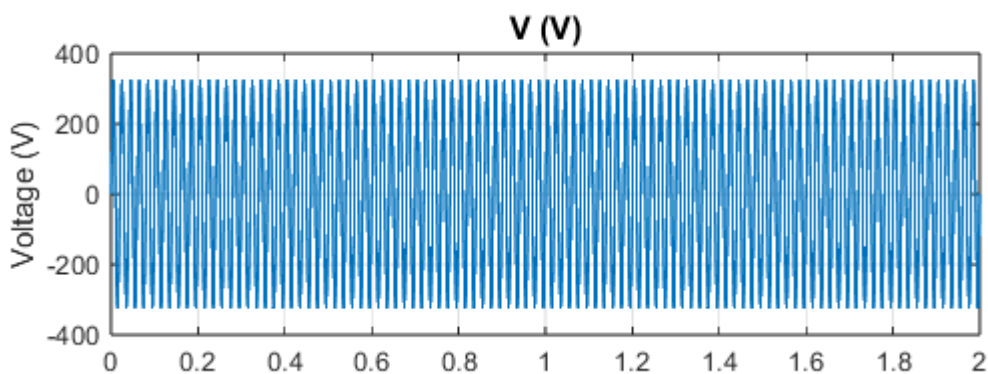


Figure (III- 11) : Schéma block du réseau électrique de distribution sur Matlab/Simulink

III-5 Analyse du fonctionnement énergétique du système photovoltaïque connecté au réseau :

III-5-1 Cas 1 : Production photovoltaïque est supérieure à la consommation $P_{pv} > P_{charge}$

Dans ce cas, la puissance produite par le générateur photovoltaïque excède la puissance requise par la charge. Une fois les besoins locaux satisfaits, le surplus d'énergie est injecté dans le réseau électrique.



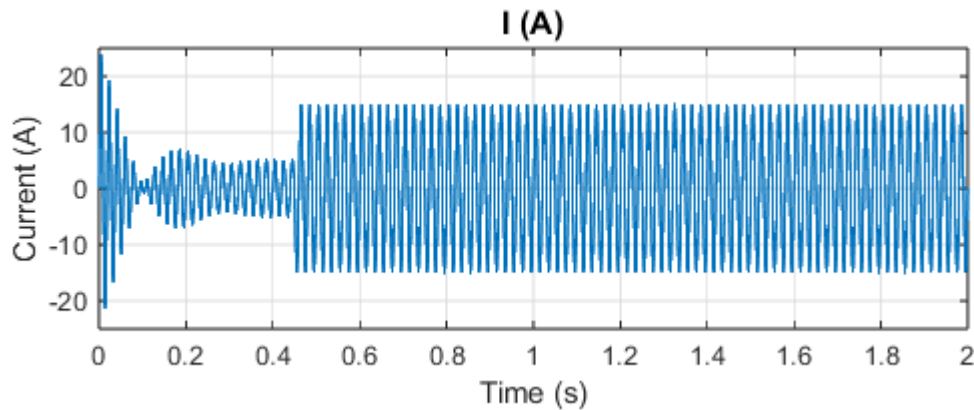


Figure (III- 12) : Tension et courant en sortie de l'onduleur

Cette figure présente la tension (V) et le courant (I) alternatifs mesurés juste après le bloc onduleur.

La tension reste parfaitement stable à une valeur de crête de 325V (230 V_{RMS}), ce qui indique une synchronisation parfaite du système avec le réseau. Le courant augmente significativement à $t = 0,45$ (s), passant de 5A à un maximum de 16,2A. Cette hausse substantielle démontre l'activation réussie de l'algorithme de suivi du point de puissance maximale permettant d'extraire la puissance maximale disponible des panneaux solaires.

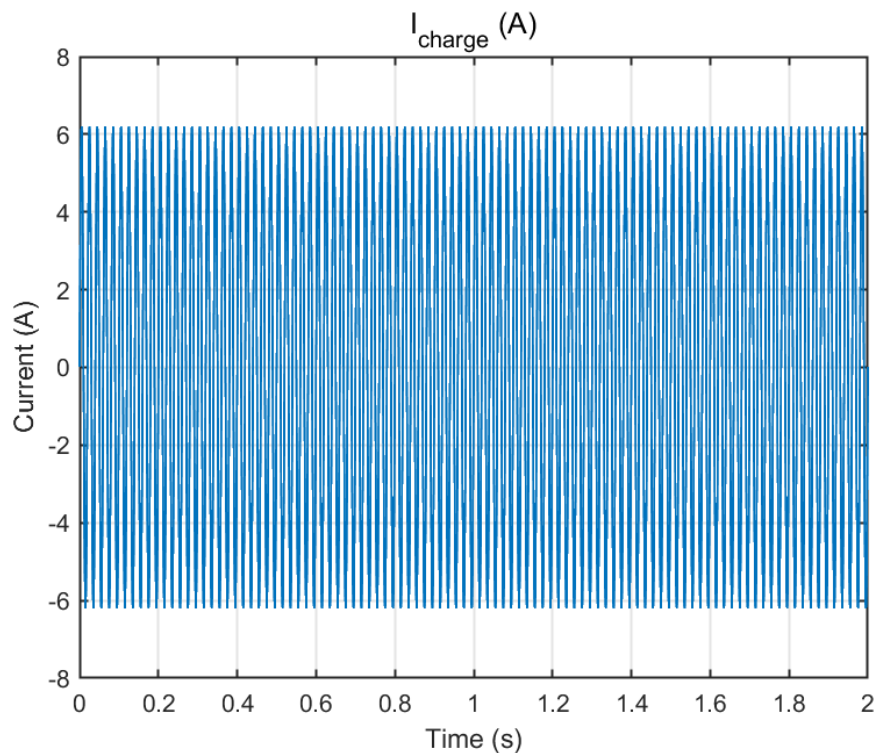


Figure (III- 13) : Courant absorbé par la charge

Cette figure représente l'intensité du courant consommé par les appareils électriques de la maison.

Le courant de charge conserve une forme sinusoïdale parfaitement stable tout au long de la simulation, avec un courant de crête constant de 6,2A (environ 4,4A RMS). Ce signal régulier confirme que le fonctionnement de la charge domestique n'est pas affecté par les variations ou fluctuations transitoires du système photovoltaïque.

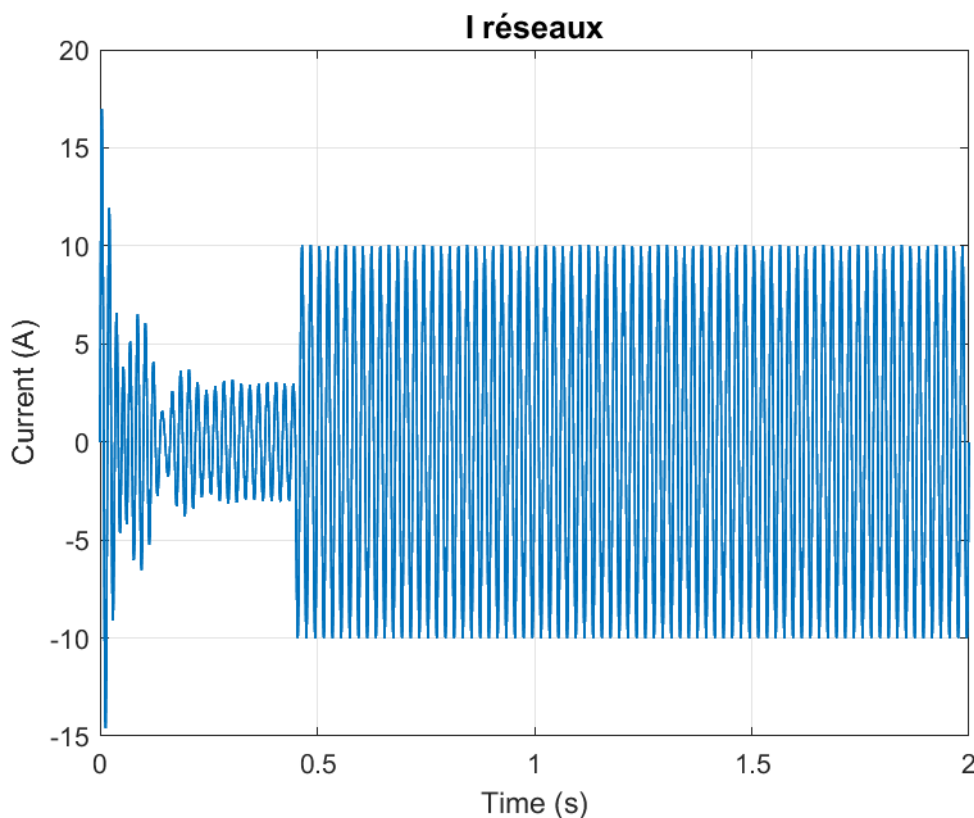


Figure (III- 14) : Courant du réseau électrique

Cette courbe illustre le comportement actuel au point de connexion au réseau de distribution public.

Cette courbe montre que le courant du réseau augmente immédiatement dès l'activation de la commande MPPT à $t = 0,45(s)$, atteignant une intensité constante de 10A. Ce signal représente un excédent de puissance. La charge ne nécessitant est 6,2A et les panneaux solaires produisant davantage d'énergie, le surplus est directement injecté dans le réseau électrique.

Résultat final et synthèse :

L'analyse combinée de ces trois figures confirme sans équivoque que le système fonctionne en mode d'autoconsommation avec vente du surplus.

$$P_{pv} = P_{charge} + P_{résaux}$$

En résumé les panneaux solaires couvrent initialement la totalité de la consommation électrique, et l'énergie excédentaire produite est automatiquement injectée dans le réseau électrique. Le système atteint ainsi pleinement ses objectifs techniques et énergétiques.

III-5-2 Cas 2 : Production photovoltaïque est inférieure à la consommation $P_{pv} < P_{charge}$

Dans ce second scénario, la consommation d'énergie de notre charge dépasse la capacité de production maximale du système photovoltaïque. Le réseau électrique public intervient alors pour combler le déficit énergétique. La figure (III-14) montre l'intensité du courant consommé par la charge résidentielle connectée au système.

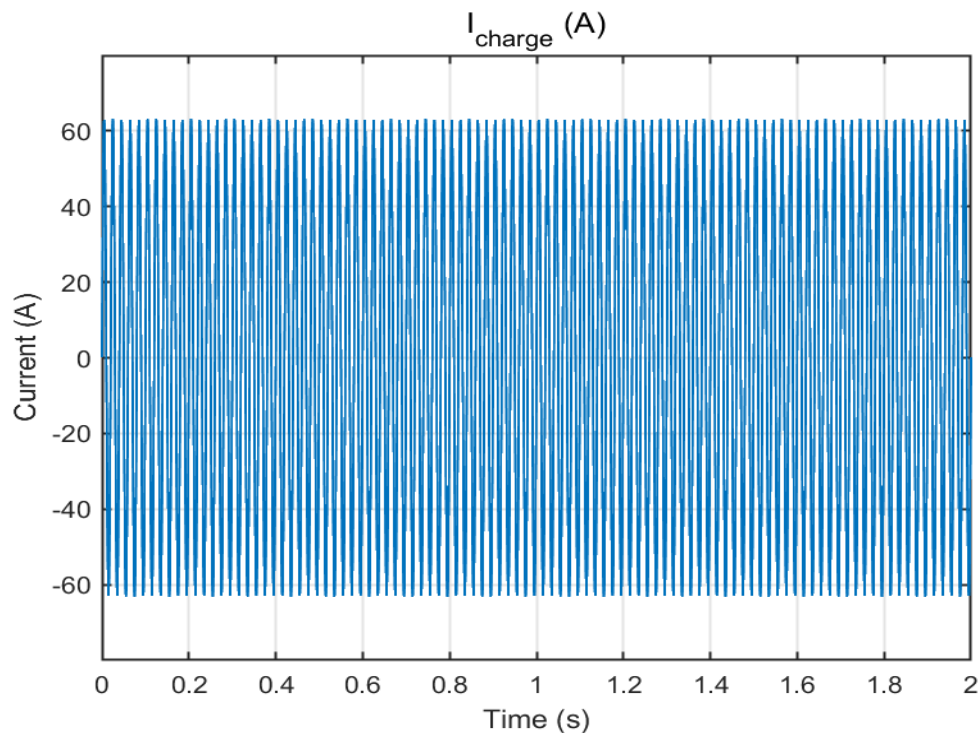


Figure (III- 15) : Courant absorbé par la charge dans cas 2

Nous constatons une demande en énergie extrêmement élevée, caractérisée par un courant sinusoïdal constant d'une capacité maximale de 63A (environ 44,5 RMS). Cette consommation demeure constante durant toute la période.

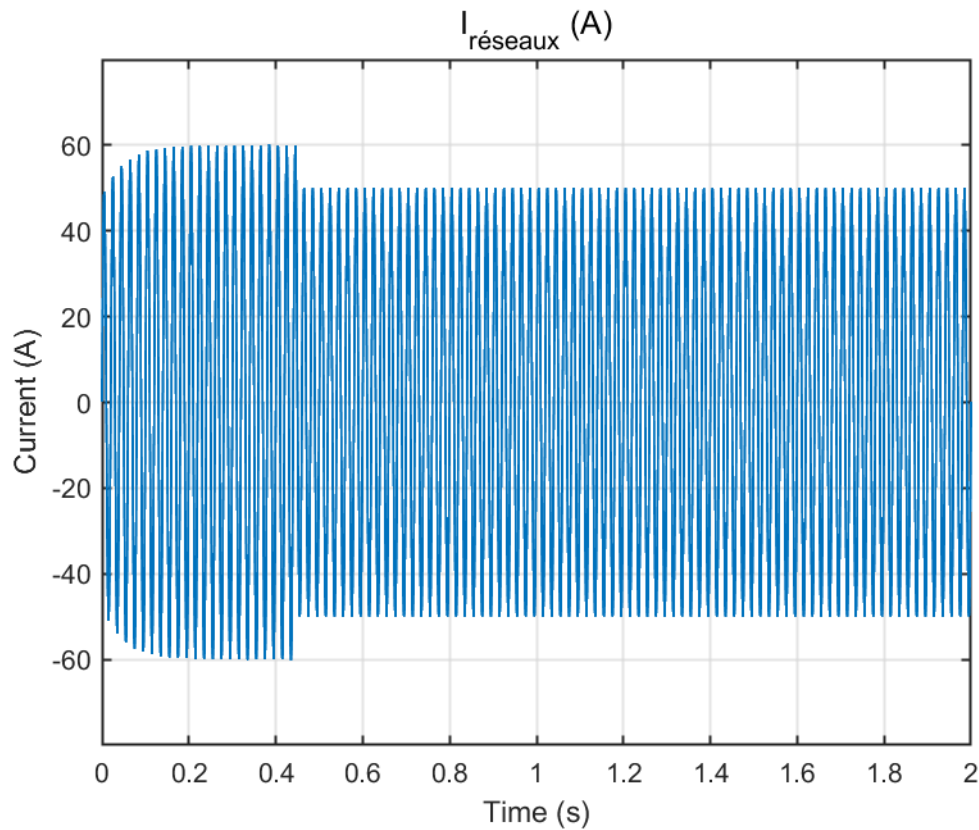


Figure (III- 16) : Courant du réseau électrique dans cas 2

Cette courbe met en évidence le comportement actuel de l'intensité fournie par le réseau de distribution public. Avant $t = 0,45$ (s), le réseau fournit la totalité de la puissance requise par la charge. Le courant du réseau atteint une capacité d'environ 60A. À partir de $t = 0,45$ (s), et après l'activation MPPT, l'intensité du courant du réseau diminue et se stabilise autour de 50A. Cette diminution indique que les panneaux photovoltaïques ont commencé à contribuer à la charge. Le réseau continue de fournir une partie de la puissance requise pour compléter l'énergie produite par les panneaux solaires. La forme d'onde sinusoïdale du courant reste stable après cette transition, confirmant le bon fonctionnement du système raccordé au réseau.

Résultat final et synthèse :

L'analyse comparative de ces trois courbes confirme mathématiquement la validité du principe de bilan énergétique en mode de soutien au réseau.

$$P_{charge} = P_{pv} + P_{réseaux}$$

En résumé lorsque la production des panneaux solaires est insuffisante pour couvrir les besoins énergétiques élevés de la charge est automatiquement puisée sur le réseau électrique.

Ce dernier joue ainsi un rôle crucial de secours pour garantir une alimentation électrique continue au domicile.

III-6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque résidentiel connecté au réseau électrique sous MATLAB/Simulink. Le système étudié comprend un générateur photovoltaïque, une commande MPPT de type Perturbation et Observation (P&O), un onduleur monophasé ainsi qu'un filtre de raccordement au réseau.

Les résultats de simulation obtenus pour les différents cas de fonctionnement ont permis de mettre en évidence le comportement du système lorsque la puissance photovoltaïque est supérieure ou inférieure à la puissance demandée par la charge. Lorsque la production photovoltaïque est suffisante, le surplus d'énergie est injecté vers le réseau. En revanche, lorsque la puissance produite devient insuffisante, le réseau assure l'alimentation complémentaire afin de satisfaire les besoins de la charge.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique, constitué essentiellement d'un générateur photovoltaïque (GPV), d'un convertisseur DC-DC, d'un onduleur monophasé en pont en H (H-Bridge), d'une structure de commande intégrant l'algorithme MPPT, d'un filtre de lissage, d'une charge locale ainsi que d'un transformateur élévateur raccordé au réseau de distribution électrique.

Ce système a été modélisé et simulé sous l'environnement MATLAB/Simulink. La commande MPPT permet d'assurer une adaptation optimale entre le générateur photovoltaïque et le réseau électrique, en aidant le système à fonctionner en permanence au point de puissance maximale.

À travers ce travail, nous avons apporté une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire, à l'analyse des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique, ainsi qu'à l'étude des techniques de commande MPPT.

Les résultats obtenus montrent que lorsque la production des panneaux photovoltaïques dépasse la consommation de la charge locale, l'énergie excédentaire est automatiquement injectée dans le réseau électrique. En revanche, lorsque l'ensoleillement devient insuffisant pour satisfaire la demande énergétique, le réseau assure l'alimentation complémentaire afin de garantir une fourniture continue d'électricité.

Cette gestion d et automatique des flux d'énergie permet au système photovoltaïque raccordé au réseau d'atteindre efficacement ses objectifs en matière de production et de gestion énergétique.

- [1] Bouvier, Y., & Pehlivanian, S. (2017). Une histoire à écrire : le photovoltaïque. Sciences.
- [2] Cabal, C. (2008). Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque (Thèse de doctorat). Université Paul Sabatier – Toulouse III.
- [3] Lincot, D. (2007). La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire. Découverte.
- [4] Tourasse, G. (2016). Mesure et analyse statistique tout temps du spectre du rayonnement solaire (Thèse de doctorat). Université de Lyon.
- [5] Singo, A. T. (2010). Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome (Thèse de doctorat). Université Henri Poincaré – Nancy 1.
- [6] Mechalikh, M. N., & Hamada, C. E. (2013). Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau (Mémoire)
- [7] Salim, A., & Toudert, D. (2017). Étude d'un système photovoltaïque (Mémoire de master). Université Mouloud Mammeri.
- [8] Rich Solar. (s.d.). Wiring your solar panel: Series, parallel and series-parallel. <https://richsolar.com/blogs/news/wiring-your-solar-panel-series-parallel-and-series-parallel>
- [9] Kamli, M. T., Djelloul Bencherif, A. A., & Bentaieb, S. (2025). Système de gestion énergétique intelligent par l'intégration de panneaux solaires pour une consommation optimisée et durable (Mémoire).
- [10] Petibon, S. (2009). Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques (Thèse de doctorat). Université Paul Sabatier – Toulouse III.
- [11] Essakhi, H., & Farhat, S. (s.d.). Étude sur les systèmes photovoltaïques. LASIME, ESTA, Université Ibn Zohr.
- [12] Jade Technologie. (s.d.). Découvrir et comprendre les cellules photovoltaïques. <https://www.jade-technologie.com/decouvrir-et-comprendre-les-cellules-photovoltaïques/>
- [13] Photovoltaïque.info. (s.d.). Les cellules photovoltaïques. <https://www.photovoltaïque.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des->

panneaux-photovoltaïques/technologies-de-cellules-solaires-photovoltaïques/les-cellules-photovoltaïques/

- [14] Layate, Z., Bahi, T., Bouzeria, H., & Lekhchine, S. (s.d.). Étude des systèmes photovoltaïques. Laboratoire d'Électrotechnique, Université Badji Mokhtar Annaba.
- [15] ResearchGate. (s.d.). Caractéristique courant-tension (I-V) et courbe de puissance d'une cellule photovoltaïque. https://www.researchgate.net/figure/Caracteristique-courant-tension-IV-et-courbe-de-puissance-dune-cellule-photovoltaïque_fig4_346394208
- [16] Vighetti, S. (2010). Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion (Thèse de doctorat). Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [17] Boucharef, M. (2010). Réalisation et caractérisation optoélectronique de cellules solaires hybrides à colorants à base de ZnO (Thèse de doctorat). Université Mentouri Constantine.
- [18] Boukezata, B., et al. (2014). Système solaire photovoltaïque connecté au réseau électrique et associé à un filtre actif parallèle. Symposium de Génie Électrique.
- [19] Mechalikh, M. N., & Hamada, C. E. (2013). Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau (Mémoire).
- [20] Boitier, V., & Alonso, C. (2005). Dimensionnement d'un système photovoltaïque, 25–27.
- [21] Nichiporuk, O. (2005). Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.