

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Études De MASTER ACADÉMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : **ENERGIE RENOUVELABLE**

Présenté par

SAID LARBI

AMINE BOUAZIZ

Thème

ETUDE ET OPTIMISATION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

Mémoire soutenue le 05/10/ 2024. devant le jury composé de :

Mr Sibrahim Madjid

Maitre conference classe A, UMMTO, Président

Mr Hakim DJOUDI

Maitre assistant classe A, UMMTO, Encadreur

Mr Marouani Khoudir

Maitre assistant classe B, UMMTO, Examineur

Remerciements

Avant tout, nous remercions ALLAH, le tout puissant, de nous avoir donné la force, la patience et la volonté pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur Mr Hakim DJOUDI, pour son encadrement judicieux, ses conseils, ses encouragements sans

sans oublier ses qualités humaines.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres du jury. Tout particulièrement : Mr Madjid SIBRAHIM, maître de conférences classe A à l'UMMTO, pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury. Ainsi que Mr Khoudir MAROUANI, maître assistant classe B à l'UMMTO, pour avoir accepté d'être examinateur de ce travail.

Un grand remerciement à tous les enseignants du département de Génie électrique

(UMMTO) pour leurs disponibilités et leur gentillesse. Ainsi qu'à tous les

enseignants de notre parcours d'étude.

DÉDICACE

je dédie mon travail a:

- a mes chers parents,
- mes frères et soeurs,
- mon binôme said,
- Tous mes amis

DÉDICACE

je dédie mon travail a:

- a mes chers parents,
- mes frères et soeurs,
- mon binôme amine,
- Tous mes amis

Résumé

Les panneaux photovoltaïques captent les rayonnements solaires pour générer de l'électricité. Leur performance est grandement affectée par les fluctuations des conditions météorologiques, telles que la température et le niveau d'ensoleillement. De plus, en raison de leur nature non-linéaire, ces panneaux ne fonctionnent pas toujours à leur puissance optimale, ce qui entraîne des pertes énergétiques. Ce travail vise à optimiser la production de puissance d'un panneau solaire en mettant en œuvre la méthode MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui ajuste le cycle de fonctionnement du convertisseur BOOST en réponse aux variations climatiques. Une étude comparative de l'algorithme MPPT classique, Perturb and Observe (P&O), est effectuée à l'aide du logiciel Matlab .

Mots clés : Energie solaire, effet photovoltaïque, étage d'adaptation, Convertisseur BOOST, Commande MPPT.

Abstract

Photovoltaic panels capture solar radiation to generate electricity. Their performance is greatly affected by fluctuations in weather conditions, such as temperature and sunlight levels. Moreover, due to their non-linear nature, these panels do not always operate at their optimal power, leading to energy losses. This work aims to optimize the power production of a solar panel by implementing the MPPT (Maximum Power Point Tracking) method, which adjusts the operation cycle of the BOOST converter in response to climatic variations. A comparative study of the classical MPPT algorithm, Perturb and Observe (P&O), is conducted using Matlab software.

Keywords: Solar energy, photovoltaic effect, adaptation stage, BOOST converter, MPPT control.

liste des figures

chapitre I :

Figure I.1: Spectre du rayonnement solaire.....	6
Figure I.2: Dopage de type N et de type P des atomes de phosphore et de bore.....	9
Figure I.3: Illustration du processus de création d'un courant électrique par une cellule solaire.....	10
Figure I.4: caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'assemblages des cellules en série.....	13
Figure I.5: Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'assemblage des cellules parallèle.....	14
Figure I.6 : Système photovoltaïque hybride.....	16
Figure I.7 : Système photovoltaïque accordés au réseau.....	16
Figure I.8 : Système photovoltaïque autonome.....	17

chapitre II:

Figure II.1: schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.....	20
Figure II.2: schéma équivalent d' une cellule photovoltaïque.....	22
Figure II.3: panneau PV sous Matlab/Simulink.....	28
Figure II.4: courbe de puissance en fonction de la tension $P(V)$	29
Figure II.5: courbe de courant en fonction de la tension $I(V)$	30
Figure II.6: courbe de la puissance en fonction de la tension (éclairage variable et température constante).....	31
Figure II.7: courbe de courant en fonction de la tension (éclairage variable et température constante).....	32
Figure II.8: courbe de la puissance en fonction de la tension (éclairage constant et température variable).....	34
Figure II.9: courbe de courant en fonction de la tension (éclairage constant et température variable).....	35

chapitre III:

Figure III.1: étage d'adaptation entre un GPV et une charge DC.....	38
Figure III.2: Suivi du point de puissance maximale (MPP) par la méthode de Perturbation et Observation (P&O).....	40
Figure III.3: organigramme de l'algorithme perturb and observe PO.....	42
Figure III.4: schéma de base d'un convertisseur BOOST.....	44
Figure III.5: schéma équivalent d'un hacheur BOOST (K est fermé).....	45
Figure III.6: schéma équivalent d'un hacheur BOOST(K ouvert).....	46
Figure III.7: Forme d'ondes courant/tensions dans un hacheur boost.....	47

chapitre IV:

Figure IV.1: Schéma du Système PV autonome sous Matlab simulink.....	52
Figure IV.2: schéma bloc du convertisseur boost sous matlab simulink.....	53
Figure IV.3: schéma bloc de la MLI sous matlab simulink.....	54
Figure IV.4: Schéma bloc de la technique P&O.....	54
Figure IV. 5: Puissance du panneau aux conditions STC.....	55
Figure IV. 6: Tension du panneau aux conditions STC.....	56
Figure IV.7: Courant du panneau aux conditions STC.....	56
Figure IV.8: profile de l'éclairement.....	58
Figure IV. 9: puissance du panneau.....	58
Figure IV. 10: tension du panneau.....	59
Figure IV. 11: courant du panneau.....	59
Figure IV.12: profile de la température.....	62
Figure IV. 13: puissance du panneau.....	62
Figure IV. 14: tension du panneau.....	63
Figure IV. 15: courant du panneau.....	63

liste des tableaux

Tableau II.1: paramètres du UNISUN 80.12 M aux conditions standards.....	25
Tableau II.2: influence de l'éclairement sur le panneau PV.....	33
Tableau II.3: influence de température sur le panneau PV.....	36
Tableau III.1: Méthodologie de l'algorithme P&O.....	41
Tableau IV.1: Données du cahier de charge.....	52
Tableau IV.2: les caractéristiques a la sortie du panneau pour différentes valeurs de l'éclairement.....	61
Tableau IV.3: les caractéristiques a la sortie du panneau pour différentes valeurs de température.....	64

Notations

PV : photovoltaïque.

MPPT : Maximum Power Point Tracker (Poursuite de Point de Puissance Maximale).

CSP: Centrales solaires à concentration.

P&O : Perturbe and Observe (perturbation et observation).

FLC : Fuzzy Logic Controller (logique floue).

PPM : Point de Puissance Maximale (Maximum Power Point).

STC: Standard Test Condition (condition d'essai standard).

MLI: Modulation De Largeur d'Impulsion.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

DC /DC : Convertisseur (hacheur) Courant Continu/Courant Continu.

Liste des symboles

E : L'énergie.
m : La masse.
I_{pv} : Courant d'une cellule PV.
V_{pv} : Tension au borne d'une cellule ou panneaux PV.
P_{pv} : Puissance de cellule ou panneau PV.
I_d : Courant de la diode
I_o : Courant de saturation de la diode
V : tension.
R : Résistance.
R_s : Résistance en série.
R_{sh} : Résistance en parallèle.
I_{out} : Courant à la sortie du panneau.
i_d:courant qui passe dans la diode
I_{sh} :Courant qui passe dans R_{sh}.
N_s : Nombre de cellules en série.
N_p: Nombre de cellules en parallèle.
V_{oc} : Tension en court-circuit.
I_{sc} : Courant de court-circuit.
V_{oc,n} : Tension nominale en circuit ouvert.
I_{sc,n} : Courant de court-circuit nominal.
V_{mp} : Tension au point de puissance maximum.
I_{mp} : Courant au point de puissance maximum.
K_v : Coefficient de tension / température en circuit ouvert,
K_i : Coefficient de courant / température de court-circuit
P_{max,e} : Puissance de sortie maximale expérimentale.
G : Éclairement actuel.
G_{ref} : Éclairement de référence.
T_{ref} : Température de référence.
T : Température.
P : Puissance.
C : Capacité.
L : Inductance.
D: Diode.
K : Interrupteur commandable (Transistor mosfet).
R_{ch} : Charge.
 α : Rapport cyclique.
 ΔP : Variation de puissance.
 ΔI : Variation du courant.
I-V : Courant en fonction de la tension.
P-V : Puissance en fonction de la tension.
V_L : Tension ou borne de l'inductance.

i_L : Courant de l'inductance.

V_{pv} : Tension du panneau.

V_s : Tension de sortie.

I_s : Courant de sortie.

f_s : fréquence de hachage

f : Fréquence.

T : Période.

sommaire

Résumé	
Liste de figures	
Liste de tableaux	
Notation	
Liste des symboles	

Introduction générale	1
------------------------------------	---

chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 L'énergie solaire.....	5
I.1.1 Rayonnement solaire.....	5
I.1.2 Spectre solaire.....	6
I.1.3 Les domaines d'exploitation de l'énergie solaire.....	7
I.2 La cellule photovoltaïque	8
I.2.1 L'effet photovoltaïque.....	10
I.2.2 Les différents types de cellules photovoltaïques.....	11
I.2.2.1 Cellules photovoltaïques en silicium polycristallin.....	11
I.2.2.2 Cellules photovoltaïques en silicium monocristallin	12
I.2.2.3 Cellules photovoltaïques amorphes.....	12
I.2.2.4 Autres types de cellules photovoltaïques.....	12
I.2.3 Association des cellules solaires.....	13
I.2.3.1 Connexion en série.....	13
I.2.3.2 Connexion en parallèle.....	14
I.2.3.3 Association série-parallèle.....	14
I.3 Le panneau photovoltaïque.....	15
I.3.1.1 Systèmes Photovoltaïques Hybrides.....	15
I.3.1.2 Systèmes Photovoltaïques raccordés au Réseau.....	16
I.3.1.3 Systèmes Photovoltaïques Autonomes.....	17
I.4 Avantages et inconvénients du photovoltaïque.....	17
I.4.1 Avantages des Panneaux Photovoltaïques.....	17
I.4.2 Inconvénients des Panneaux Photovoltaïques.....	18

chapitre II:Modélisation du panneau photovoltaïque

II.1 La cellule photovoltaïque idéale.....	19
II.2 La cellule photovoltaïque réelle.....	22
II.3 Modélisation et simulation d'un module photovoltaïque.....	25
II.4 Détermination de la résistance série et la résistance shunte (R_s , R_p)	25
II.5 Principe de fonctionnement de l'algorithme de villalva.....	26
II.6 Simulation du panneau photovoltaïque sous Matlab Simulink.....	28

II.6.1 L'influence de l'éclairément.....	30
II.6.1.1 L'influence de l'éclairément sur la puissance (éclairage variable et température constante).....	31
II.6.1.2 L'influence de l'éclairément sur le courant (éclairage variable et température constante).....	32
II.6.2 L'influence de la température.....	34
II.6.2.1 L'influence de la température sur la puissance (éclairage constant et température variable).....	34
II.6.2.2 L'influence de la température sur le courant (éclairage constant et température variable).....	35

chapitre III:Optimisation du système photovoltaïque

III.1 Étage d'adaptation DC/DC.....	37
III.2 les techniques de recherche du point de puissance maximal.....	38
III.2.1 Logique Floue (Fuzzy Logic Control - FLC).....	38
III.2.2 Réseaux Neuronaux Artificiels (Artificial Neural Networks - ANN).....	38
III.2.3 Méthode de Balayage du Courant ou de la Tension.....	39
III.2.4 Perturbation et Observation (P&O).....	39
III.3 Algorithme perturbation et observation(P&O).....	39
III.4 La commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).....	43
III.5 Convertisseur DC/DC(hacheur BOOST).....	43
III.5.1 Principe de fonctionnement.....	44
III.5.2 Modélisation du hacheur BOOST.....	48
III.5.2.1 Calcul de l'inductance L.....	48
III.5.2.2 Expression de la résistance R.....	49
III.5.2.3 Expression du courant traversant l'inductance I.....	49
III.5.2.4 Expression de la capacité C.....	50

chapitre IV:Simulation, résultats et discussions

IV.1 Description du système.....	51
IV.2 Résultats de simulation de l'algorithme P&O.....	55
IV.3 interprétation des résultats obtenue avec des conditions STC.....	57
IV.4 Réponse des techniques MPPT P&O aux changements brusque de l'ensoleillement avec température fixe(25°C).....	58
IV.5 interprétation des résultats obtenu aux changement brusque de l'éclairément avec température fixe(25°C).....	60
IV.5.1 Influence de l'éclairément sur le courant (I).....	60
IV.5.2 Influence de l'éclairément sur la tension (V).....	60

IV.5.3 Influence de l'éclairement sur la puissance (P).....	60
IV.5.4 l'influence de l'éclairement sur le fonctionnement de la technique de suivi du point de puissance optimal (PO).....	61
IV.6 Réponse des techniques MPPT au changement brusque de température avec un éclairement fixe(1000W/m2).....	62
IV.7 Interprétation des résultats obtenus aux changement de la température sur le panneau..	64
IV.7.1 courant (I).....	64
IV.7.2 La tension (V).....	64
IV.7.3 La puissance (P).....	64
IV.7.4 l'influence de la température sur le fonctionnement de la technique de suivi du point de puissance optimal (PO).....	65
IV.8 Adaptabilité de l'Algorithme PO aux Variations Environnementales.....	65
Conclusion générale	67

Introduction générale

Introduction générale:

Face à la demande croissante et aux besoins illimités en énergie électrique, il est devenu impératif de produire de l'énergie de manière continue afin de répondre au déficit mondial qui s'aggrave chaque jour. La croissance démographique et le développement rapide de l'industrie ont presque épuisé les réserves naturelles d'énergies primaires, telles que l'uranium et les sources fossiles (pétrole, gaz, charbon). Ces ressources sont limitées et leurs émissions ont un impact néfaste sur les espèces vivantes et l'environnement, entraînant pollution, maladies diverses, changement climatique et détérioration de la couche d'ozone. De plus, le coût élevé de la mise en place d'un réseau de transport d'énergie constitue un obstacle supplémentaire. Cette situation a donc conduit à explorer des alternatives plus éthiques et durables, notamment les énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables représentent l'avenir de notre planète. Elles sont considérées comme des ressources inépuisables qui n'engendrent pas de pollution, favorisant ainsi une coexistence harmonieuse avec l'environnement. Parmi ces sources d'énergie, on trouve l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et marine. Bien que ces énergies renouvelables présentent de nombreux avantages, elles comportent également des inconvénients. Par exemple, l'énergie éolienne n'est pas adaptée aux zones urbaines en raison du bruit qu'elle génère, tandis que l'énergie hydraulique nécessite des barrages situés à des altitudes élevées pour maximiser la production d'énergie. L'énergie solaire, bien que intermittente et parfois difficile d'accès, est considérée comme la meilleure option renouvelable, en particulier en Algérie, qui bénéficie d'un potentiel solaire exceptionnel avec une durée d'insolation pouvant atteindre 3900 heures par an, soit dix fois la consommation mondiale.[1]

L'énergie solaire se décline principalement en deux formes : l'énergie thermique, qui exploite la chaleur, et l'énergie photovoltaïque, qui convertit une partie du rayonnement solaire en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Initialement réservée aux applications spatiales, cette technologie s'est progressivement étendue aux zones terrestres, en particulier celles non connectées au réseau électrique.

Pour produire de l'énergie électrique à partir de systèmes photovoltaïques, des panneaux sont assemblés en série et en parallèle pour former un champ photovoltaïque capable de

Introduction generale

générer la quantité d'énergie requise. Cependant, l'installation de modules photovoltaïques ne suffit pas ; il est nécessaire de mettre en place un système complet comprenant des convertisseurs, des régulateurs et des batteries pour garantir une fourniture d'énergie optimale et instantanée, qu'elle soit continue ou alternative.

La production d'électricité des modules photovoltaïques est influencée par des conditions atmosphériques variables (ensoleillement, température) qui changent au cours de la journée et des saisons. Ces systèmes non linéaires ne fonctionnent pas toujours à leur point de puissance maximum, ce qui entraîne des pertes d'énergie. De nombreuses recherches ont été menées pour améliorer la productivité et l'efficacité des panneaux, en utilisant une technique appelée suivi du point de puissance maximum (MPPT - Maximum Power Point Tracking). Cette méthode repose sur l'ajustement automatique du rapport cyclique, qui contrôle l'interrupteur d'un hacheur (souvent un hacheur BOOST dans les systèmes photovoltaïques) pour maximiser la puissance de sortie du panneau. Plusieurs algorithmes de commande MPPT ont été développés, notamment la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit, l'incrément de conductance (INC), la perturbation et l'observation (P&O), ainsi que la commande par logique floue (FLC - Fuzzy Logic Controller).[2]

Dans ce mémoire, nous nous intéresserons aux techniques d'optimisation de la puissance d'un panneau photovoltaïque destiné à alimenter un site isolé considéré comme une charge résistive continue. Après cette introduction, le premier chapitre présentera des généralités sur l'énergie photovoltaïque, en expliquant le principe de conversion de l'énergie lumineuse en électricité, l'association de cellules et de panneaux, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude d'une cellule photovoltaïque à une seule diode, avec le développement d'un modèle de panneau permettant de déterminer les caractéristiques tension-courant et tension-puissance, ainsi que l'influence des paramètres (température, ensoleillement) sur ces caractéristiques.

Dans le troisième chapitre, nous aborderons le régulateur MPPT et les techniques susceptibles d'optimiser la puissance des panneaux, telles que P&O . Nous expliquerons également le rôle du convertisseur BOOST dans l'élévation de la tension.

Introduction generale

Dans le quatrième chapitre, nous examinerons les résultats des simulations effectuées avec la méthode P&O sous différentes conditions.

Ce mémoire met en lumière l'efficacité de notre système en analysant comment il réagit à divers paramètres et scénarios. Nous testerons également la fiabilité de notre approche en évaluant sa performance et sa robustesse face à des variables changeantes, ce qui nous permettra de valider les hypothèses posées et d'identifier les points d'amélioration potentiels.

Enfin, nous conclurons ce travail par une synthèse des points abordés et des perspectives pour des projets futurs.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Introduction :

Depuis toujours, l'être humain a cherché à comprendre et à exploiter les ressources de son environnement, en particulier celles issues du soleil, dont l'énergie semble inépuisable. Aujourd'hui, cette quête prend une dimension critique face aux enjeux énergétiques et environnementaux mondiaux. Alors que la consommation d'énergie ne cesse d'augmenter, alimentée par la croissance démographique et économique, les ressources fossiles, telles que le pétrole, le gaz et le charbon, montrent leurs limites. Non seulement elles sont épuisables, mais leur utilisation massive engendre des conséquences environnementales désastreuses, notamment à travers les émissions de gaz à effet de serre.

Dans ce contexte, la transition vers des énergies renouvelables s'impose comme une nécessité. Parmi ces énergies, le solaire occupe une place de choix. Le soleil, force immuable et omniprésente, offre une source d'énergie abondante, propre et silencieuse. Le développement des systèmes photovoltaïques, qui permettent de convertir directement la lumière du soleil en électricité, représente une véritable révolution dans le paysage énergétique moderne. Cependant, cette technologie complexe reste sujette à des défis et des mystères que la recherche s'efforce encore de résoudre.

Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur les généralités sur les systèmes photovoltaïques. Nous explorerons le processus par lequel la lumière est transformée en électricité à travers les cellules solaires, le principe de leur fonctionnement, ainsi que les différents types de systèmes photovoltaïques existants, nous avons mis en lumière aussi les avantages et les limites de cette technologie.

I.1 L'énergie solaire :

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur Terre, représentant un potentiel considérable pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux. Chaque année, la Terre reçoit plus de 3000 heures de lumière solaire, avec une moyenne d'ensoleillement de 5 à 7 kWh/m²/jour.[3]

La constante solaire, qui est la densité d'énergie solaire atteignant la frontière externe de l'atmosphère, est d'environ 1360 W/m². Cependant, au niveau du sol, cette densité est réduite à environ 1000 W/m² en raison de l'absorption atmosphérique.[3]

Albert Einstein, à travers ses travaux sur l'effet photoélectrique, a démontré que la lumière possède une nature particulière, et que l'énergie d'un photon est donnée par la relation:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

- E est l'énergie du photon (en joules),
- h est la constante de Planck (6.626×10^{-34} Kg m²/s),
- c est la vitesse de la lumière,
- λ est la longueur d'onde (en mètres).

I.1.1 Rayonnement solaire :

Le soleil, avec un diamètre d'environ 1,39 million de kilomètres, est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'autres éléments. Il génère son énergie par fusion nucléaire, transformant chaque seconde environ 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium. Cette réaction se produit à des températures atteignant environ 25 millions de degrés Celsius dans le noyau du soleil.[4]

À chaque seconde, le soleil perd environ 4 millions de tonnes de masse sous forme de rayonnement. La lumière du soleil voyage à une vitesse de 300 000 km/s et met environ 8 minutes pour atteindre la Terre, qui est située à une distance moyenne de 150 millions de kilomètres[4].

I.1.2 Spectre solaire :

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique composé de particules de lumière appelées photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à sa longueur d'onde, avec 98 % de l'énergie située entre $\lambda = 0,25 \mu\text{m}$ et $\lambda = 4 \mu\text{m}$, tandis que le reste se divise en 1 % au-dessus et 1 % en dessous de cet intervalle[5]. La répartition spectrale de l'énergie est approximativement la suivante :

- **Ultraviolets ($0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$)** : 6,4%
- **Visible ($0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$)** : 48%
- **Infrarouges ($0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$)** : 45,6%

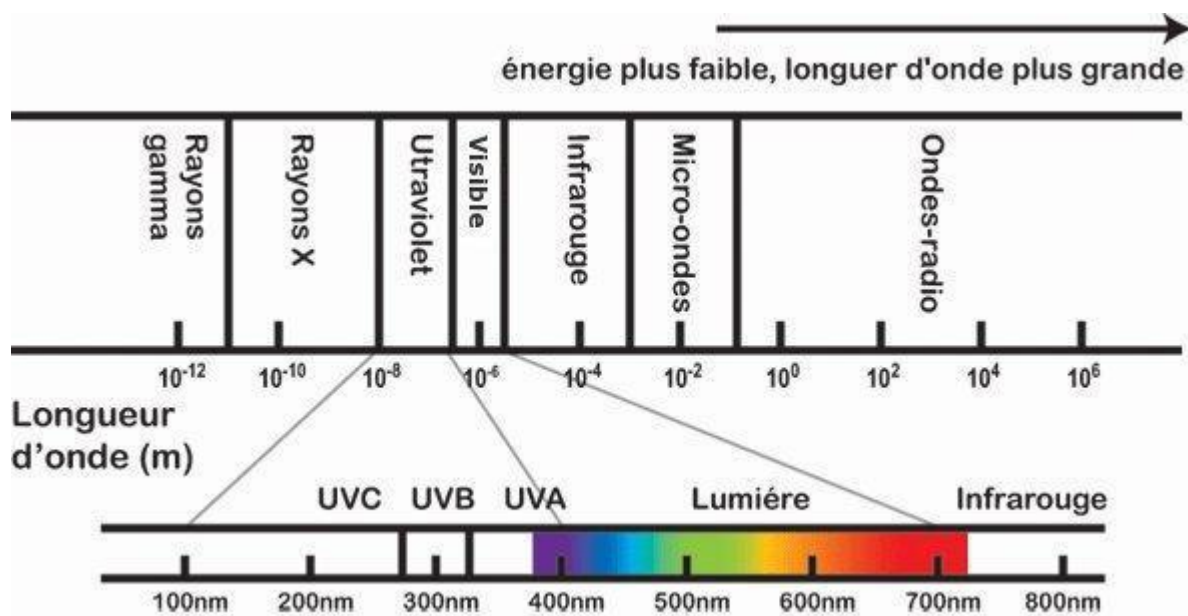


Figure I.1: Spectre du rayonnement solaire[6]

I.1.3 Les domaines d'exploitation de l'énergie solaire:

L'énergie solaire, en tant que ressource renouvelable, offre une multitude de domaines d'exploitation. Voici quelques-uns :

- **Solaire thermique** : Ce domaine utilise des capteurs solaires pour capter la chaleur du soleil, qui est ensuite utilisée pour chauffer de l'eau ou des espaces.
- **Centrales solaires à concentration (CSP)** : Ces installations utilisent des miroirs ou des lentilles pour concentrer la lumière du soleil sur un petit point afin de produire de la chaleur. Cette chaleur est ensuite utilisée pour générer de l'électricité via des turbines à vapeur. Les CSP peuvent également inclure des systèmes de stockage thermique, permettant de produire de l'électricité même lorsque le soleil ne brille pas.[7]
- **Applications industrielles** : L'énergie solaire peut alimenter des processus industriels, comme le séchage, la distillation ou la désalinisation de l'eau. Par exemple, des fours solaires peuvent être utilisés pour des applications de cuisson ou de fusion de matériaux, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles.[7]
- **Véhicules solaires** : L'intégration de panneaux solaires dans des véhicules, qu'il s'agisse de voitures, de bateaux ou d'avions, permet de réduire la consommation de carburant et d'augmenter l'autonomie. Les avancées dans les cellules solaires légères et flexibles ouvrent des perspectives intéressantes pour cette application.[8]
- **Systèmes photovoltaïques (PV)** : Ces systèmes convertissent directement la lumière du soleil en électricité à l'aide de cellules solaires, principalement en silicium. Ils peuvent être installés sur des toits résidentiels, des bâtiments commerciaux ou dans des centrales solaires à grande échelle. Les avancées technologiques, comme les cellules solaires bifaciales et les modules à haute efficacité, permettent d'augmenter le rendement et de réduire les coûts.[9]

Avec l'évolution constante des technologies solaires, les systèmes photovoltaïques se positionnent comme une solution clé pour répondre à la demande énergétique croissante tout en respectant l'environnement. Dans ce contexte, il est essentiel d'explorer plus en détail les cellules solaires, qui sont au cœur de cette transformation énergétique, en examinant leur fonctionnement, leurs types et les innovations qui les rendent de plus en plus efficaces.

I.2 La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui convertit l'énergie lumineuse en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Ce phénomène a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839 et a été approfondi par Albert Einstein en 1912.[10]

Une cellule photovoltaïque fonctionne grâce à des principes fondamentaux liés aux semi-conducteurs, en particulier le dopage et la formation de la jonction PN. Les semi-conducteurs, comme le silicium, sont des matériaux dont la conductivité électrique se situe entre celle des conducteurs (comme les métaux) et celle des isolants. Leur capacité à conduire l'électricité peut être modifiée par un processus appelé dopage.

Le dopage de **type P** consiste à introduire des impuretés qui créent des "trous" dans la structure cristalline du semi-conducteur. Ces impuretés, souvent des éléments comme le bore, ont moins d'électrons de valence que le silicium. En ajoutant ces atomes de bore, on crée des sites où des électrons peuvent manquer, ce qui génère des trous. Ces trous se comportent comme des charges positives et facilitent le transport des charges à travers le matériau. Dans un semi-conducteur de type P, la concentration de trous est supérieure à celle des électrons, ce qui permet une conduction électrique efficace. À l'inverse, le dopage de **type N** implique l'ajout d'éléments ayant plus d'électrons de valence que le silicium, comme le phosphore. Ces atomes supplémentaires fournissent des électrons libres qui augmentent la densité d'électrons dans le matériau.[11][12]

Dans un semi-conducteur de type N, les électrons sont la principale charge porteuse, ce qui facilite également la conduction électrique.

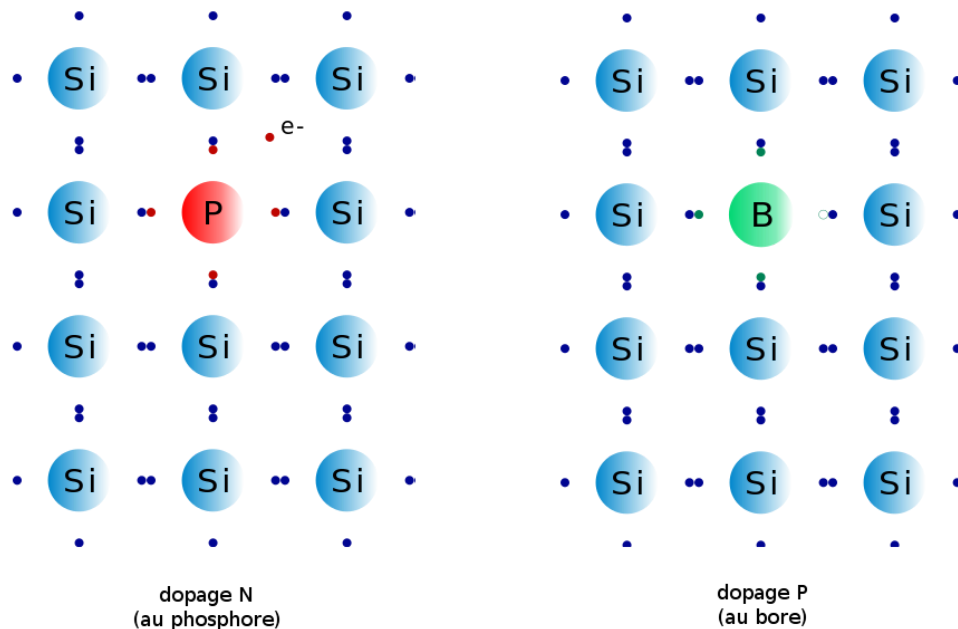


Figure I.2: Dopage de type N et de type P des atomes de phosphore et de bore[13]

Lorsque ces deux types de dopage sont combinés, ils forment une jonction PN. À la jonction, un champ électrique est créé en raison de la diffusion des électrons de la zone N vers la zone P, où ils recombinaient avec des trous. Ce champ électrique est crucial car il sépare les charges générées par l'absorption de lumière. Lorsqu'un photon excède l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur, il peut exciter un électron de la bande de valence vers la bande de conduction, créant ainsi une paire électron-trou. Le champ électrique à la jonction PN attire les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P, générant ainsi un courant électrique.

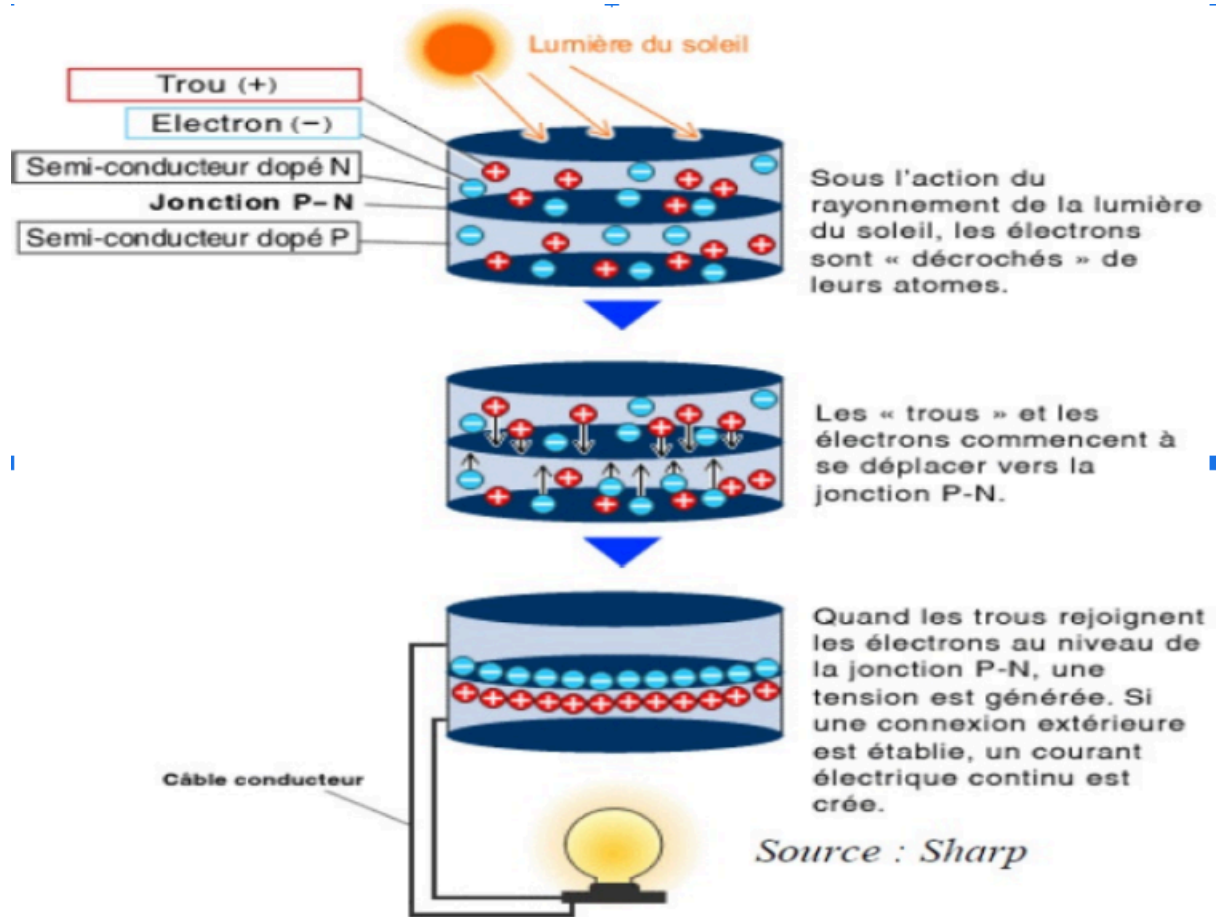


Figure I.3: Illustration du processus de création d'un courant électrique par une cellule solaire[14]

I.2.1 L'effet photovoltaïque:

Le mécanisme de l'effet photovoltaïque se déroule en plusieurs étapes clés :

- **Absorption de la lumière :** La lumière est absorbée par le matériau semi-conducteur, ce qui excite les électrons et génère des paires électron-trou.

- **Dissociation des excitons** : Dans les matériaux organiques, les excitons (paires électron-trou liées) doivent se dissocier pour que les charges puissent être séparées. Cela se produit généralement à l'interface entre les matériaux de type P et N dans une cellule photovoltaïque.
- **Transport des charges** : Les électrons et les trous doivent se déplacer vers leurs électrodes respectives. Les électrons se dirigent vers l'électrode négative (cathode), tandis que les trous se déplacent vers l'électrode positive (anode).
- **Collecte des charges** : Finalement, les charges collectées aux électrodes créent un courant électrique, qui peut être utilisé pour alimenter des appareils ou être stocké dans des batteries.

L'efficacité de la conversion photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs, notamment la qualité du matériau semi-conducteur, la structure de la cellule, et la capacité à absorber une large gamme de longueurs d'onde de la lumière. Les matériaux semi-conducteurs, en particulier ceux avec une bande interdite appropriée, sont cruciaux pour maximiser cette conversion, car ils permettent une absorption efficace des photons et la génération d'électrons libres.

I.2.2 Les différents types de cellules photovoltaïques:

I.2.2.1 Cellules photovoltaïques en silicium polycristallin :

Les cellules photovoltaïques en silicium polycristallin sont fabriquées en refroidissant le silicium fondu pour former plusieurs cristaux. Celles-ci sont facilement identifiables par leur bleu non uniforme, créé par les différents cristaux. Les avantages de ces cellules incluent un bon rendement (environ 100 Wc/m²), une durée de vie importante (plus de 30 ans), et un coût de fabrication moins élevé que les cellules en silicium monocristallin. Cependant, leur rendement peut être faible sous un faible éclairage.[15]

I.2.2.2 Cellules photovoltaïques en silicium monocristallin :

Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont fabriquées en refroidissant le silicium fondu pour former un seul cristal de grande dimension. Ces cellules sont généralement d'un bleu uniforme. Les avantages de ces cellules incluent un meilleur rendement que les cellules polycristallines (environ 150 Wc/m²), une durée de vie importante (plus de 30 ans), mais un coût de fabrication plus élevé que les cellules polycristallines. Cependant, leur rendement peut être faible sous un faible éclaircissement.[15]

I.2.2.3 Cellules photovoltaïques amorphes :

Les cellules photovoltaïques amorphes sont fabriquées à partir de couches minces de matériaux semi-conducteurs. Ces cellules ont des propriétés électriques différentes des cellules cristallines et polycristallines. Les avantages de ces cellules incluent une faible disponibilité de matériau, ce qui réduit les coûts de fabrication, et des rendements en constante augmentation grâce aux recherches intensives. Cependant, leur durée de vie et leur stabilité sont encore des sujets de recherche.[15]

I.2.2.4 Autres types de cellules photovoltaïques :

D'autres types de cellules photovoltaïques incluent les cellules à base de cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS), les cellules à très haut rendement (GaAs), et les cellules à colorant. Les cellules CIGS sont fabriquées sur des supports en plastique, verre, ou feuilles métalliques et ont des propriétés électriques similaires aux cellules cristallines. Les cellules GaAs ont des propriétés électriques différentes des cellules cristallines et polycristallines, mais leur durée de vie et leur stabilité sont encore des sujets de recherche. Les cellules à colorant s'inspirent du mécanisme de la photosynthèse et ont des rendements énergétiques élevés, mais leur durée de vie et leur stabilité sont encore des sujets de recherche.[15]

Les différents types de cellules photovoltaïques ont des caractéristiques électriques et des avantages et inconvénients distincts. Pour optimiser un système photovoltaïque, il est essentiel de comprendre les performances et les choix de chaque type de cellule photovoltaïque.

I.2.3 Association des cellules solaire :

L'association des cellules solaires est essentielle pour augmenter la puissance de sortie d'un système photovoltaïque, car une seule cellule ne produit généralement pas suffisamment d'énergie pour des applications pratiques.

I.2.3.1 Connexion en série :

La connexion en série des cellules photovoltaïques permet d'augmenter la tension tout en maintenant le même courant. Dans ce type d'association, chaque cellule est traversée par le même courant, et la tension totale est la somme des tensions individuelles de chaque cellule. Cependant, cette configuration présente des risques, notamment en cas de dysfonctionnement. Par exemple, si une cellule est partiellement ombragée, elle peut surchauffer et subir des dommages, ce qui peut entraîner un circuit ouvert. Pour prévenir ce problème, des diodes bypass sont intégrées en antiparallèle. Ces diodes permettent de court-circuiter les cellules ombragées, garantissant ainsi que la chaîne de cellules continue de fonctionner efficacement, évitant ainsi les points chauds qui pourraient endommager les cellules.

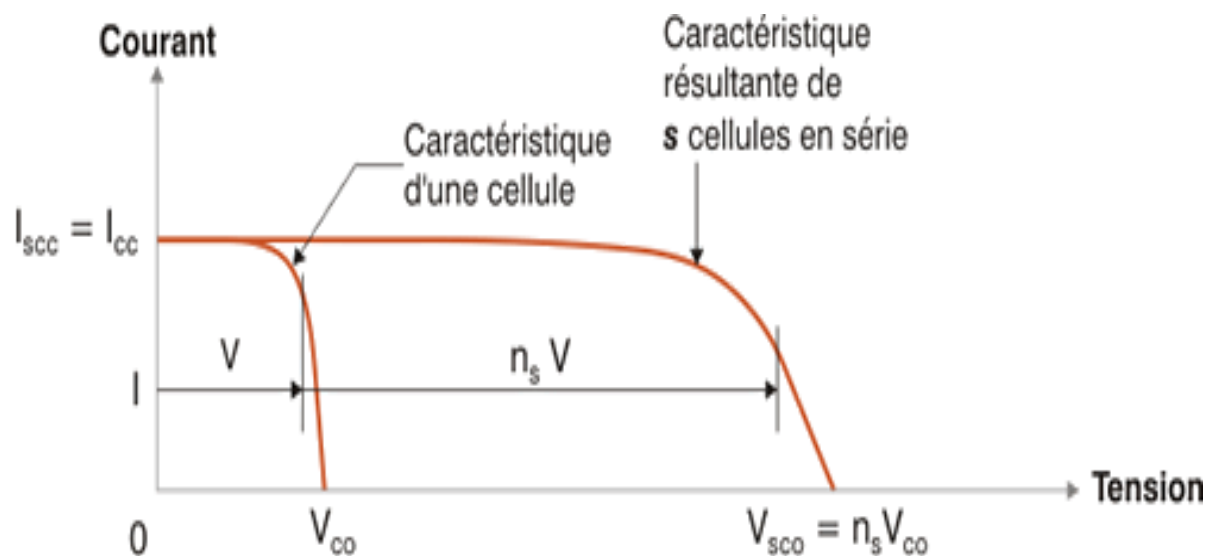


Figure I.4: caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'assemblages des cellules en série

I.2.3.2 Connexion en parallèle :

L'association en parallèle, quant à elle, augmente le courant tout en maintenant la même tension. Dans ce cas, chaque cellule est soumise à la même tension, et le courant total est la somme des courants générés par chaque cellule. Pour protéger les cellules dans cette configuration, des diodes anti-retour sont utilisées. Ces diodes empêchent les courants inverses, assurant ainsi que le courant ne circule pas dans le sens opposé, ce qui pourrait endommager les cellules.

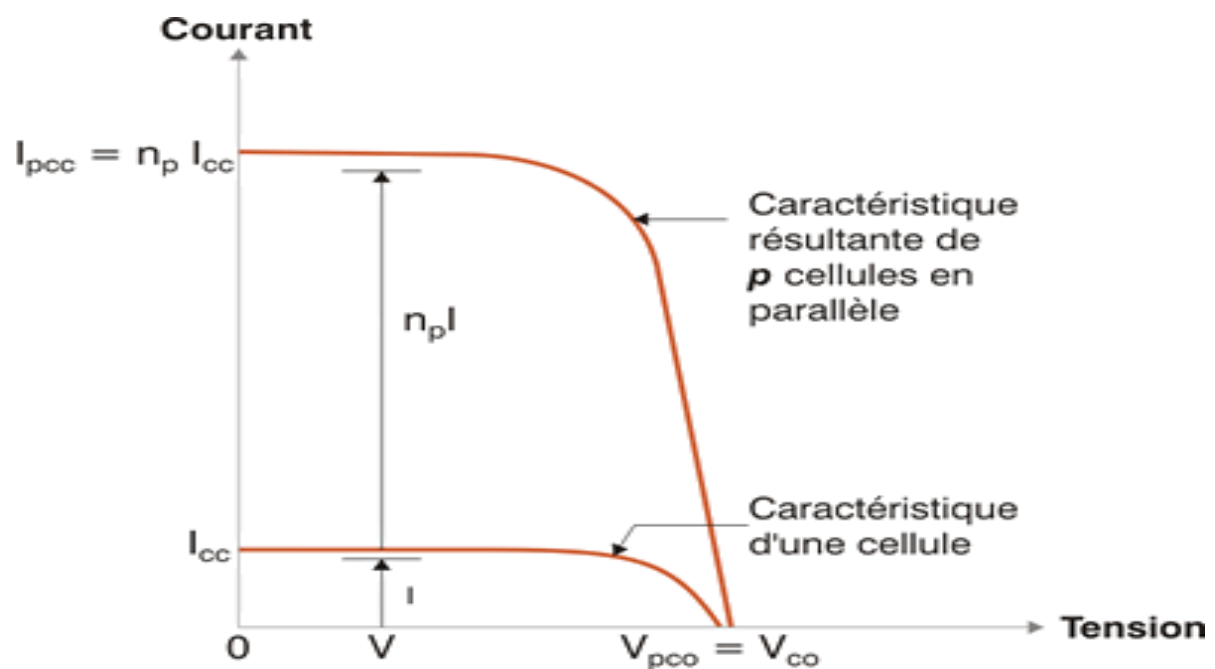


Figure I.5: Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ d'assemblage des cellules parallèle

I.2.3.3 Association série-parallèle :

Pour maximiser à la fois la tension et le courant, une configuration série-parallèle est souvent employée. Cette méthode combine les avantages des deux associations précédentes, permettant d'obtenir une puissance significative. En utilisant un agencement de cellules en série et en parallèle, il est possible de concevoir des modules photovoltaïques qui répondent aux besoins spécifiques des applications, tout en optimisant la performance et la fiabilité du système.

Ainsi, l'association des cellules solaires, qu'elle soit en série, en parallèle ou en série-parallèle, est cruciale pour la conception de systèmes photovoltaïques efficaces et durables.

I.3 Le panneau photovoltaïque :

Un panneau photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques. Ces cellules, généralement faites de silicium cristallin, sont interconnectées entre elles pour former un module. Ce module est ensuite encapsulé entre une plaque de verre et une couche de polymère, souvent de l'éthylène-acétate de vinyle (EVA), afin de le protéger des conditions climatiques et des chocs mécaniques.

L'assemblage des cellules se fait par un processus de laminage, où les différentes couches sont fusionnées pour assurer une bonne adhésion et une protection efficace. Ce laminage est crucial pour garantir la durabilité et l'efficacité du panneau. Les cellules sont souvent disposées en série et en parallèle, permettant ainsi de former un champ photovoltaïque, qui est un ensemble de plusieurs modules interconnectés.

Sur le marché, il existe divers types de panneaux photovoltaïques, différenciés par la technologie des cellules utilisées, comme les cellules monocristallines, multicristallines et à couche mince. Chacune de ces technologies présente des caractéristiques spécifiques en termes de rendement, coût et application. Les panneaux sont également montés sur des structures adaptées, permettant un suivi de la lumière solaire avec une orientation et un angle d'inclinaison optimal pour maximiser la captation de l'énergie solaire.

I.3.1 Les différents systèmes photovoltaïques :

I.3.1.1 Systèmes Photovoltaïques Hybrides :

Les systèmes hybrides combinent les panneaux solaires avec d'autres sources d'énergie complémentaires, telles que l'éolien, l'hydraulique ou des groupes électrogènes. Ils permettent de pallier les limites de production des seuls panneaux photovoltaïques et d'assurer une alimentation électrique stable et fiable. Ces systèmes intègrent également des batteries pour le stockage de l'énergie.

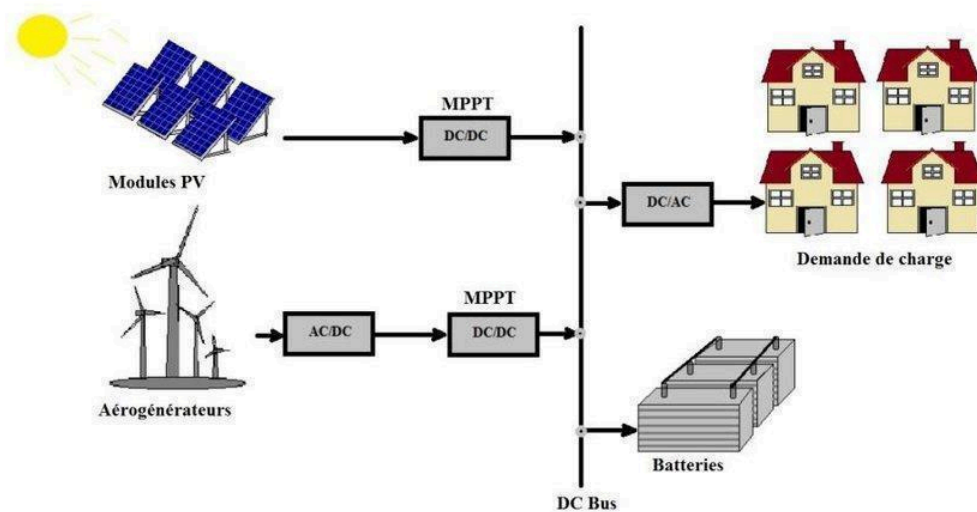


Figure I.6 : Système photovoltaïque hybride[16]

I.3.1.2 Systèmes Photovoltaïques accordés au Réseau :

Les systèmes raccordés au réseau injectent l'électricité produite par les panneaux solaires directement dans le réseau électrique public. Lorsque la production excède les besoins, le surplus est injecté sur le réseau, permettant au propriétaire de bénéficier de compensations financières. En cas de besoin, l'électricité peut être prélevée du réseau pour compléter la production solaire.

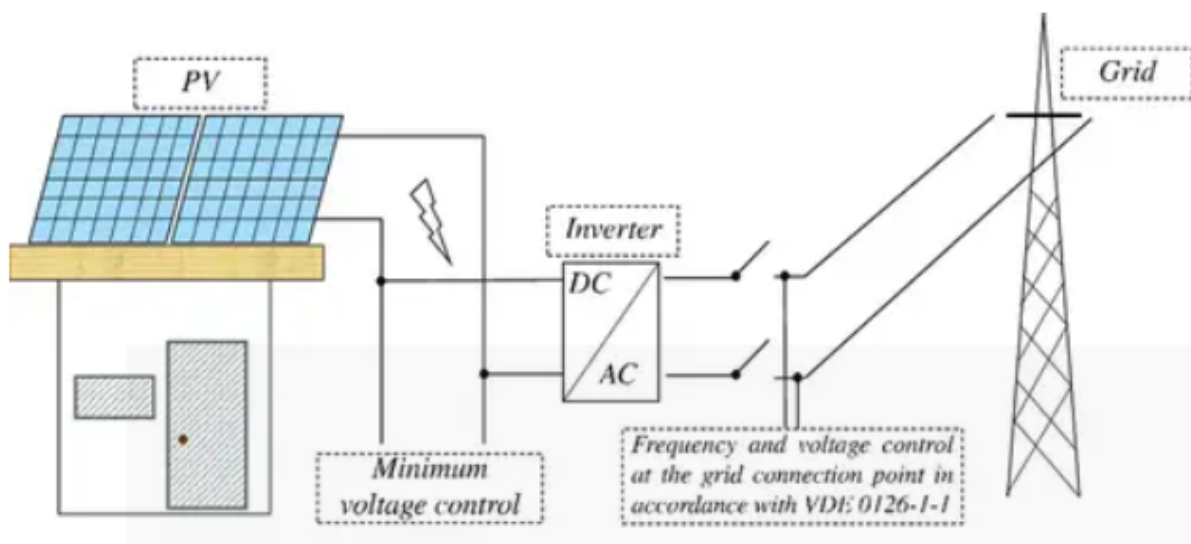


Figure I.7 : Système photovoltaïque accordés au réseau[17]

I.3.1.3 Systèmes Photovoltaïques Autonomes :

Les systèmes autonomes reposent uniquement sur la production d'électricité par les panneaux solaires, sans connexion au réseau électrique public. Ils sont particulièrement adaptés pour alimenter des sites isolés, comme des habitations éloignées des infrastructures électriques. L'énergie générée est principalement consommée sur place, avec un stockage partiel dans des batteries pour assurer une alimentation continue, même en l'absence de soleil.

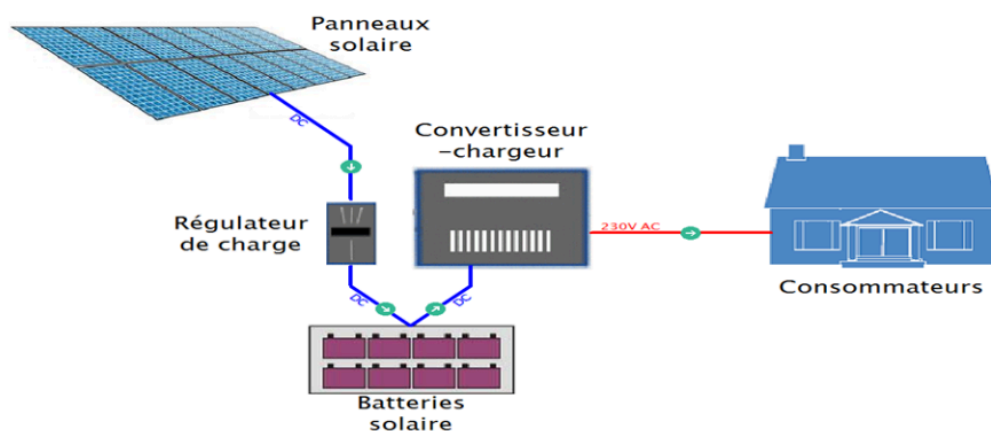


Figure I.8 : Système photovoltaïque autonome[18]

Ces trois catégories de systèmes photovoltaïques offrent des solutions adaptées aux différents contextes et besoins en électricité, alliant production d'énergie renouvelable, flexibilité et fiabilité d'approvisionnement. Parmi les solutions énergétiques innovantes, les systèmes autonomes se distinguent par leur capacité à fonctionner sans aucune dépendance au réseau électrique, offrant ainsi une alternative idéale pour les régions reculées ou les applications nécessitant une autonomie énergétique totale. Dans le cadre de notre mémoire, on a examiné plus particulièrement les systèmes autonomes isolés, en approfondissant leur conception, leur fonctionnement et les stratégies d'optimisation pour améliorer leur efficacité.

I.4 Avantages et inconvénients du photovoltaïque :

I.4.1 Avantages des Panneaux Photovoltaïques :

Énergie renouvelable et écologique : Utilisation de la lumière du soleil, réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

- **Réduction des coûts énergétiques** : Diminution des factures d'électricité et possibilité de compenser les surplus injectés dans le réseau.
- **Autonomie Énergétique** : Production d'électricité indépendante des fournisseurs, réduisant la dépendance énergétique.
- **Faible entretien** : Peu de maintenance requise après installation, réduisant les coûts d'exploitation.
- **Durabilité** : Longue durée de vie (souvent plus de 25 ans) et recyclabilité des composants.
- **Valorisation de la propriété** : Augmentation potentielle de la valeur immobilière grâce à l'installation de panneaux.

I.4.2 Inconvénients des Panneaux Photovoltaïques :

- **Coût Initial Élevé** : Investissement initial conséquent qui peut être un frein pour certains utilisateurs.
- **Dépendance aux conditions météorologiques** : Production d'énergie variable selon l'ensoleillement, pouvant affecter l'efficacité.
- **Besoins en Espace** : Nécessité d'une surface importante pour installer un nombre suffisant de panneaux.
- **Esthétique** : Apparence des panneaux pouvant ne pas convenir à tous les utilisateurs.
- **Nécessité de stockage** : Besoin potentiel de systèmes de stockage (comme des batteries) pour maximiser l'utilisation de l'énergie produite.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré les fondamentaux de l'énergie photovoltaïque. Nous avons expliqué comment la lumière est convertie en électricité grâce aux cellules solaires, ainsi que les différentes configurations de ces cellules pour optimiser la production d'énergie. Nous avons également examiné les divers types de systèmes photovoltaïques disponibles. Enfin, nous avons discuté des avantages et des inconvénients associés à cette technologie. La modélisation des panneaux photovoltaïques sera abordée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II:

Modélisation du panneau photovoltaïque

Introduction:

La découverte du photovoltaïque a profondément transformé le paysage énergétique mondial, marquant le début d'une ère d'innovation continue dans la conception et l'utilisation des cellules photovoltaïques (PV).

Le succès des cellules PV repose en grande partie sur leur capacité à convertir l'énergie solaire en électricité, un processus qui est fortement influencé par des facteurs météorologiques tels que l'ensoleillement et la température. Pour comprendre ces influences, il est crucial de procéder à une modélisation précise des panneaux photovoltaïques.

Cette modélisation implique l'élaboration d'un modèle spécifique qui prend en compte divers paramètres, permettant ainsi d'optimiser la performance des systèmes photovoltaïques dans des conditions variées.

Dans ce chapitre, nous examinerons les principales caractéristiques d'un panneau photovoltaïque, en détaillant la simulation des grandeurs électriques telles que l'intensité (I_{pv}) en fonction de la tension (V_{pv}) et la puissance (P_{pv}) en fonction de la tension (V_{pv}). Nous analyserons également l'influence des conditions météorologiques sur le comportement de PV. Ces simulations seront réalisées pour des conditions standards ainsi que pour des scénarios variables, offrant ainsi une compréhension approfondie du comportement des panneaux photovoltaïques face aux fluctuations environnementales. Cette approche permettra d'identifier les meilleures pratiques pour maximiser l'efficacité énergétique des systèmes photovoltaïques dans divers contextes d'utilisation.

II.1 La cellule photovoltaïque idéale:

Une cellule photovoltaïque est toujours associée à une diode en raison de la nature même de son fonctionnement, qui repose sur la formation d'une jonction P-N[17].il existe plusieurs modèles qui prennent en compte les imperfections et les caractéristiques réelles des cellules photovoltaïques. Voici un aperçu des modèles les plus courants : Modèle à une diode, Modèle à deux diodes, Modèle polynomial, Modèle pratique.

Une cellule photovoltaïque idéale est souvent modélisée par un modèle à une diode en raison de sa simplicité et de son efficacité à représenter le comportement d'une cellule solaire[19]. Ce modèle se compose d'une source de courant qui simule l'effet photovoltaïque, associée à une diode qui représente la jonction P-N formée par le dopage de matériaux semi-conducteurs.

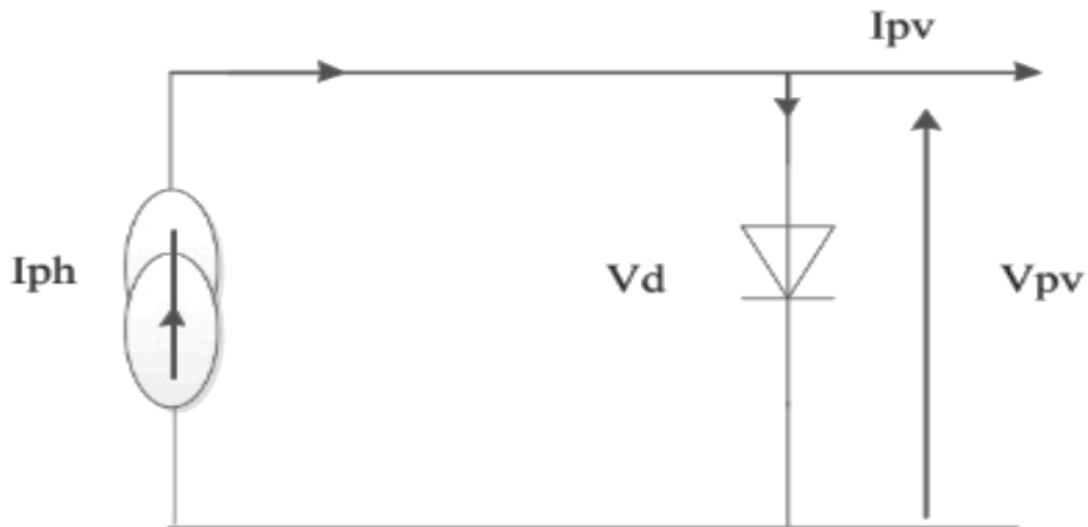


Figure II.1: schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

Le modèle électrique de la cellule photovoltaïque idéale se compose d'une source de courant contrôlée (représentant I_{ph}) en parallèle avec une diode (représentant l'effet de la jonction PN).

L'équation régissant le circuit est donnée par :

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

Le courant photonique dépend de l'éclairement et de la température, et est calculé par l'équation :

$$I_{ph} = I_{cc}(1 + K_i(T - T_{ref})) \frac{G}{1000} \quad (\text{II.2})$$

Où :

- I_{ph} : Courant photonique, en [A], dépend de la température et l'ensoleillement, calculé dans les conditions nominales (25°C et 1000 W/m²)
- I_{cc} : Courant de court-circuit (valeur fournie par la fiche technique du module).

- K_i : Coefficient de température (en A/K), typiquement 0.006 A/K
- T : Température de fonctionnement (en °C).
- T_{ref} : Température de référence (25 °C).
- G : Éclairement reçu (en W/m²).

Courant à travers la diode I_d :

Le courant à travers la diode est donné par l'équation :

$$I_d = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{akTN}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

Où :

- I_0 : Courant de saturation de la diode.
- q : Charge de l'électron (1.602×10^{-19} C).
- V : Tension aux bornes de la diode.
- a : Facteur d'idéalité de la diode (typiquement 1.3 pour les cellules polycristallines).
- k : Constante de Boltzmann (1.3805×10^{-23} J K).
- T : Température de la jonction (en K).
- N_s : Nombre de cellules en série.

Courant de saturation I_0 :

Le courant de saturation est exprimé par :

$$I_0 = I_{cc} \left(1 + K_i(T - T_{ref}) \right) \frac{G}{1000} \exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT_{ref}}\right) \quad (\text{II.4})$$

Où :

- V_{oc} : Tension à vide de la cellule photovoltaïque.
- K_i : Coefficient de courant par rapport à la température.

La cellule photovoltaïque idéale, en tant que modèle, fournit une base solide pour comprendre le fonctionnement des cellules solaires. Les équations décrites permettent de quantifier le courant généré et les pertes associées, ce qui est essentiel pour l'optimisation des performances des systèmes photovoltaïques.

II.2 La cellule photovoltaïque réelle:

Ce modèle comprend une diode qui caractérise la jonction p-n, une source de courant I_{ph} qui représente le courant photo-généré, ainsi que deux résistances : une résistance série R_s et une résistance parallèle R_{sh} . En intégrant ces éléments dans le modèle, on peut mieux comprendre et prédire le fonctionnement des cellules dans des conditions variées d'ensoleillement et de température.

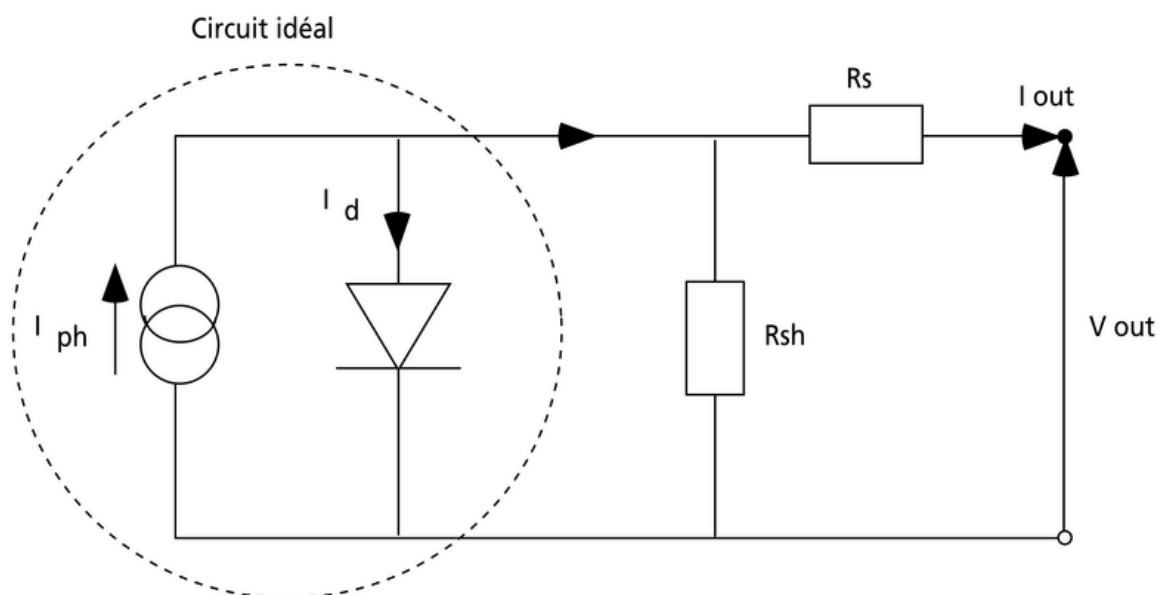


figure II.2: schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le courant généré par la cellule photovoltaïque peut être exprimé par l'équation :

$$I_{out} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.5})$$

où I_d est le courant de la diode et I_{sh} est le courant de fuite.

$$I_{sh} = \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.6})$$

Chapitre II

Modélisation du panneau photovoltaïque

Le modèle à une diode, bien que simplifié, permet de comprendre les pertes internes et les limitations de la cellule. En tenant compte des effets résistifs, le courant peut également être formulé comme suit :

$$I_{out} = I_{ph} - \left(I_0 \left(e^{\frac{q(V+I R_s)}{\alpha k T N_s}} - 1 \right) - \frac{V+I R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.7})$$

où I_0 est le courant de saturation de la diode, q est la charge de l'électron, α est le facteur de qualité de la diode, N_s nombre de cellule en série, k est la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K), et T est la température de la cellule en Kelvin.

L'équation qui décrit le courant généré par la lumière incidente. Il est directement proportionnel à l'irradiation solaire, comme exprimé dans l'équation suivante :

$$I_{ph} = (I_{ph,n} + K_i \Delta t) \frac{G}{G_{ref}} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- $I_{pv,n}$: Courant nominal donné dans les conditions standards (STC) : $T_{ref}=25^\circ\text{C}$ et $G_{ref}=1000\text{W/m}^2$.
- K_i : Coefficient courant/température de court-circuit
- Δt avec : T et T_{ref} sont respectivement la température actuelle et la température de référence.
- G et G_{ref} : Éclairement actuel et de référence.

Le courant de saturation de la cellule I_0 est déterminé de manière indirecte à partir des données expérimentales en évaluant la condition nominale en circuit ouvert.

Avec : $V=V_{ocn}$, $I=0$ et $I_{ph}=I_{scn}$

$$I_0 = \frac{I_{scn} + K_i \Delta_t}{e^{\frac{V_{ocn} + K_v \Delta_t}{\left(\frac{N_s K T}{\alpha_s}\right) - 1}}} \quad (\text{II.9})$$

Tension de circuit ouvert Voc : Il s'agit de la tension mesurée lorsque aucun courant ne circule ($I = 0$). Elle représente la tension de la cellule en l'absence de flux de lumière:

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_{out}} - 1\right) \quad (\text{II.10})$$

- I_{cc} : C'est le courant produit par la cellule, mesuré lorsque aucune tension n'est appliquée ($V = 0$). Dans cette condition, la résistance série R_s est nulle et la résistance parallèle R_p est infinie.
- K_v : Coefficient de tension / température en circuit ouvert

La performance de la cellule photovoltaïque est également influencée par des paramètres externes tels que l'irradiation solaire et la température. Le courant photo-généré I_{ph} est proportionnel à l'éclairement reçu, ce qui signifie que des conditions d'ensoleillement optimales sont essentielles pour maximiser la production d'énergie. En outre, le rendement énergétique, défini comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, est un indicateur clé de l'efficacité du système photovoltaïque.

En résumé, la modélisation d'une cellule photovoltaïque réelle nécessite une approche qui prend en compte les différents aspects de son fonctionnement, y compris les effets résistifs et les conditions environnementales, afin d'optimiser son rendement dans des applications pratiques.

En se basant sur les équations du modèle de la cellule photovoltaïque réelle établies précédemment, une simulation sous Matlab d'un module PV de référence UNISUN 80.12 M est réalisée dans les conditions d'essai standards, à savoir une irradiance de 1000 W/m² et une température de cellule de 25°C. Le tableau suivant présente les spécifications techniques de ce module photovoltaïque :

Nombre de cellule en serie (Ns)	36
Tension à puissance maximale(Vmp)	17.5 [V]
Intensité à puissance maximale(Imp)	4.57 [A]
Puissance maximale (Pmax)	Vmp*Imp [W]
Courant de court-circuit nominal Iscn	4.95 [A]
Tension circuit ouvert Vocn	21.9 [V]
Coefficient de température de Vco	-0.35/100*Vocn [V/K]
Coefficient de température de Icc	0.060/100*Iscn [A/K]

Tableau II.1: paramètres du UNISUN 80.12 M aux conditions standards.[20]

II.4 Détermination de la résistance série et la résistance shunte (Rs, Rsh) :

Pour déterminer les résistances série (Rs) et parallèle (Rsh) d'un panneau photovoltaïque, plusieurs étapes spécifiques doivent être suivies.

Tout d'abord, il est essentiel de comprendre que R_s est la somme des résistances structurelles du modèle, tandis que R_{sh} est principalement influencée par le courant de fuite de la jonction p-n. L'algorithme proposé par Villalva peut être utilisé pour faciliter ce processus et garantir des résultats précis[21]. La première étape consiste à établir une paire de valeurs $\{R_s, R_{sh}\}$ qui garantit que la puissance maximale calculée ($P_{max,m}$) soit égale à la puissance maximale expérimentale ($P_{max,e}$), ce qui peut être exprimé par l'équation :

$$P_{max,m} = P_{max,e} = V_{mp} \times I_{mp} \tag{II.11}$$

$$P_{max,m} = P_{max,e} = V_{mp} \left(I_{ph} - I_0 \exp\left(\frac{qV_{mp} + R_s I_{mp}}{KT\alpha N_s}\right) - 1 \right) - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_{sh}} \tag{II.12}$$

Ensuite, on initialise R_s à 0 et R_{sh} à une valeur très élevée, puis on incrémente lentement R_s tout en surveillant les variations de la puissance maximale jusqu'à atteindre le point maximal (V_{mp}, I_{mp}). Cette itération doit être répétée plusieurs fois pour ajuster les valeurs jusqu'à ce que l'égalité $P_{max,m} = P_{max,e}$ soit atteinte.

L'utilisation des équations mathématiques appropriées, ainsi que des paramètres de la fiche technique du panneau, est cruciale à chaque étape. Après avoir ajusté R_s , la résistance parallèle R_{sh} peut être calculée en tenant compte du courant de fuite, permettant ainsi d'optimiser la modélisation du panneau photovoltaïque.

II.5 Principe de fonctionnement de l'algorithme de villalva:

L'algorithme de Villalva pour modéliser un panneau photovoltaïque (PV) dans MATLAB repose sur une approche itérative visant à déterminer les résistances série (R_s) et parallèle (R_{sh}). Voici un aperçu détaillé de son fonctionnement :

L'algorithme commence par charger les données de la fiche technique du panneau photovoltaïque, y compris les valeurs de tension et de courant à des conditions nominales (V_{ocn} , I_{scn} , V_{mp} , I_{mp}). Il définit également des paramètres tels que l'irradiance nominale (G_n), la température nominale (T_n), ainsi que des valeurs d'incrémentations pour R_s (R_{sinc}) et une tolérance d'erreur de puissance (tol).

Les valeurs initiales pour R_s et R_{sh} sont estimées. R_s est initialisé à zéro, tandis que R_{sh} est calculé à partir des valeurs de tension et de courant nominales. Ces estimations sont cruciales pour le bon démarrage de l'algorithme.[21]

L'algorithme entre ensuite dans une boucle itérative qui se poursuit jusqu'à ce que l'erreur de puissance soit inférieure à la tolérance définie ou jusqu'à ce que R_{sh} devienne négatif ou que le nombre d'itérations dépasse un maximum prédéfini. À chaque itération :

- **Calcul du courant généré** : Le courant généré par le panneau (I_{pv}) est ajusté en fonction de la température et de l'irradiance, en tenant compte des coefficients de température (K_i) et des variations de température (dT).
- **Mise à jour de R_s et R_{sh}** : R_s est incrémenté par R_{sinc} , et R_{sh} est recalculé à partir des valeurs de tension et de courant en utilisant les équations du modèle à deux diodes.
- **Résolution de l'équation I-V** : Pour chaque point de tension, l'algorithme résout l'équation I-V à l'aide de la méthode de Newton-Raphson, qui permet de trouver le courant I correspondant à chaque tension V .
- **Calcul de la puissance** : La puissance (P) est calculée pour chaque paire (V , I), et la puissance maximale (P_{max_m}) est déterminée.
- **Évaluation de l'erreur** : L'erreur de puissance ($perror$) est calculée comme la différence entre P_{max_m} et la puissance expérimentale (P_{max_e}).

Une fois que l'algorithme a convergé, les valeurs finales de R_s et R_{sh} , ainsi que d'autres paramètres importants, sont affichées. Des graphiques des courbes I-V et P-V sont également générés pour visualiser les performances du panneau photovoltaïque.

$R_s = 0.355 \Omega$

$R_{sh} = 154.9379 \Omega$

II.6 Simulation du panneau photovoltaïque sous Matlab Simulink :

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, telles que la tension, le courant et la puissance, dépendent fortement de certaines grandeurs internes, notamment la résistance série R_s , la résistance parallèle R_{sh} et le facteur d'idéalité α . De plus, ces caractéristiques sont également influencées par des facteurs externes, tels que l'ensoleillement et la température. La figure suivante montre un bloc de panneau photovoltaïque (PV) sous matlab simulink avec comme entrées l'éclairement et la température, et en sorties la tension et le courant photovoltaïque:

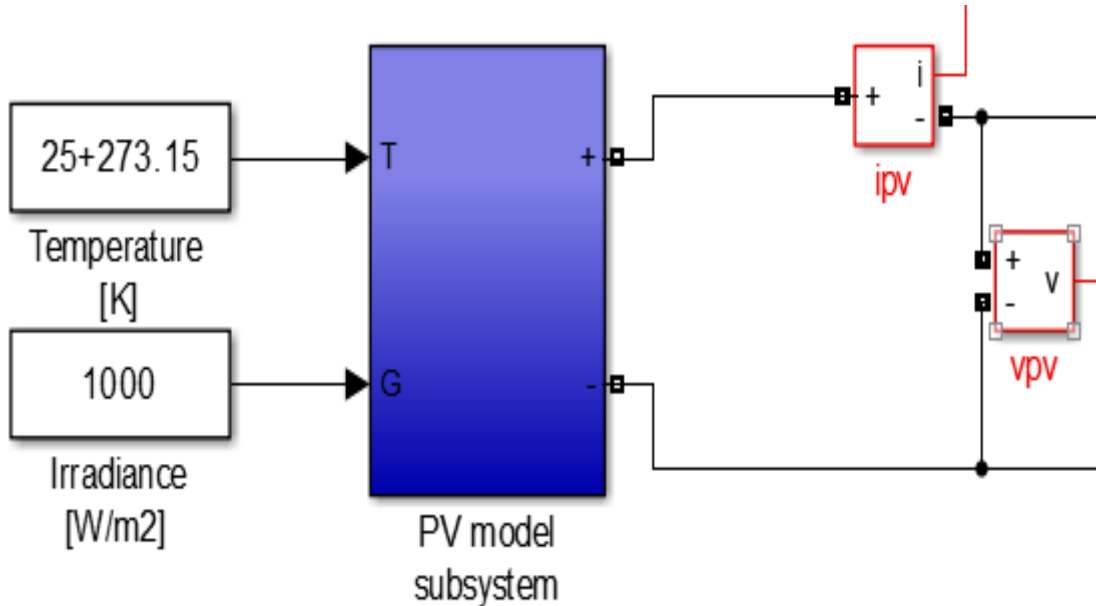


Figure II.3: panneau PV sous Matlab/Simulink.

Pour analyser l'impact de ces paramètres, une simulation du panneau photovoltaïque a été réalisée à l'aide de Matlab/Simulink.

La figure suivante présente les résultats de simulation :

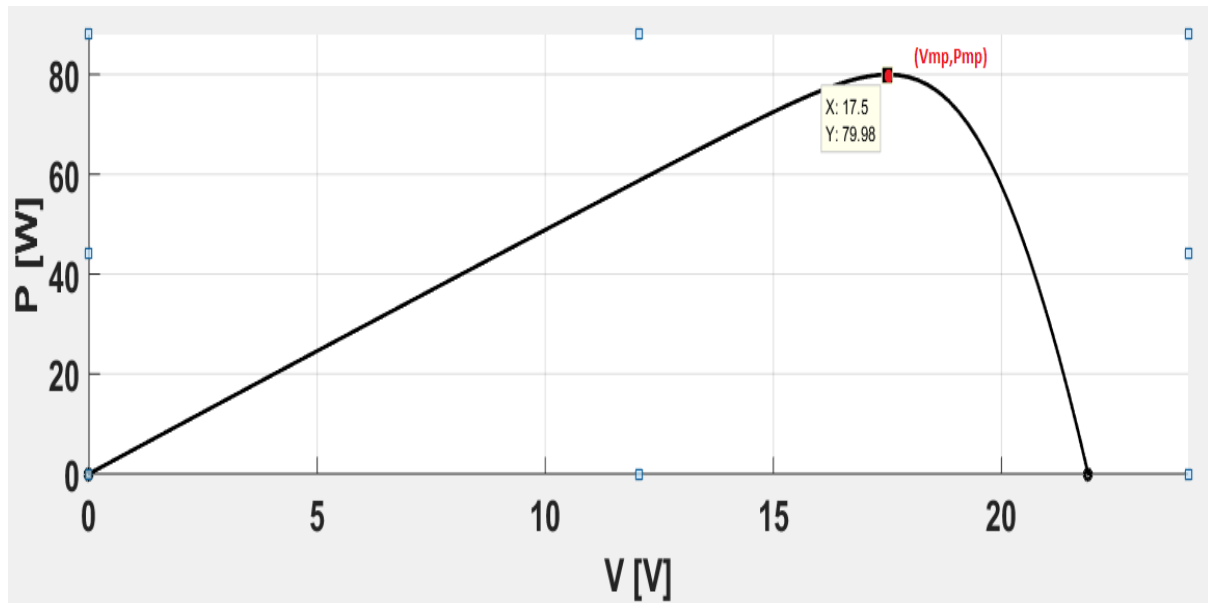


Figure II.4: courbe de puissance en fonction de la tension $P(V)$

La puissance du panneau photovoltaïque augmente jusqu'à atteindre la puissance maximale, notée P_{max} , qui est le produit de la tension à puissance maximale (V_{mp}) et du courant à puissance maximale (I_{mp}). Après avoir atteint ce pic, la puissance diminue progressivement jusqu'à s'annuler à la tension nominale en circuit ouvert.

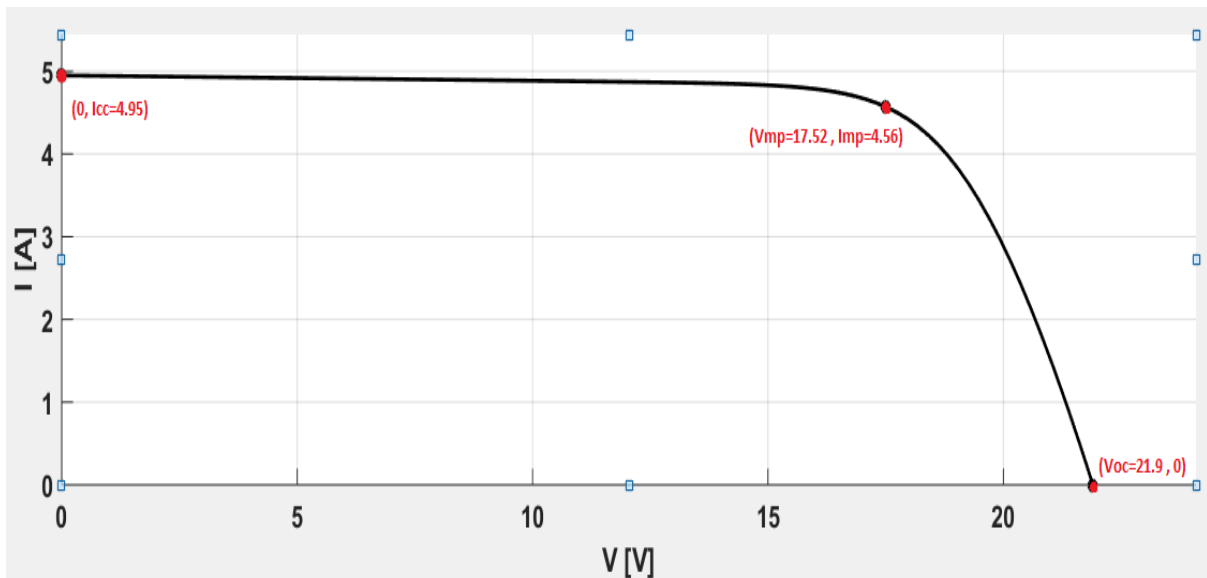


Figure II.5: courbe de courant en fonction de la tension $I(V)$

Le courant d'un panneau photovoltaïque atteint son maximum lors d'un court-circuit. Ensuite, il subit une légère diminution jusqu'à atteindre le point de puissance maximale. Par la suite, le courant continue de diminuer jusqu'à disparaître à la tension de circuit ouvert.

II.6.1 L'influence de l'éclairement :

Les deux graphiques de l'image montrent l'influence de l'éclairement sur la puissance et le courant dans un panneau photovoltaïque. L'axe des abscisses représente la tension (en volts) et l'axe des ordonnées représente le courant (en ampères) et la puissance (en watta). Chaque courbe correspond à un niveau d'éclairement différent, indiqué en watts par mètre carré (W/m^2).

II.6.1.1 L'influence de l'éclairement sur la puissance (éclairage variable et température constante):

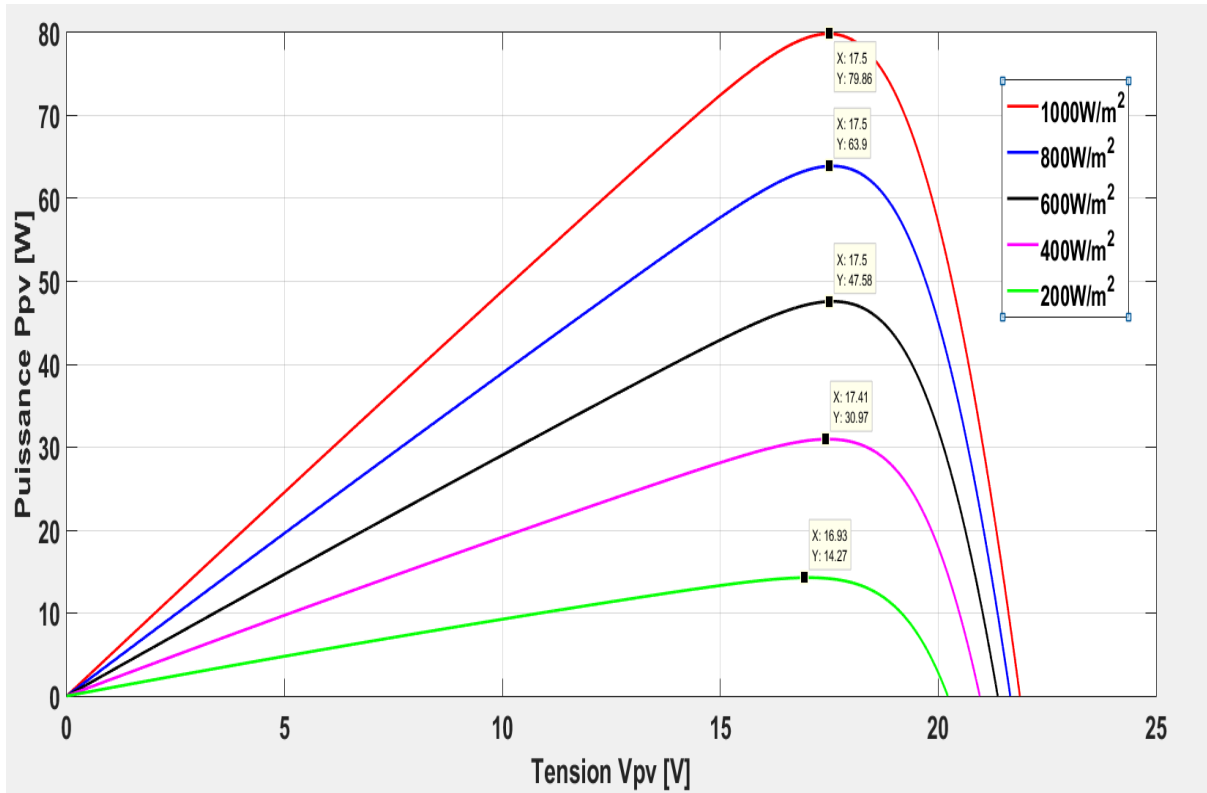


Figure II.6: courbe de la puissance en fonction de la tension (éclairage variable et température constante)

On peut observer que la puissance maximale produite par le panneau augmente avec l'éclairement. Cela s'explique par le fait qu'une plus grande quantité de lumière solaire génère plus de porteurs de charge dans le panneau, ce qui permet de produire plus de courant. On peut également observer que la puissance maximale est produite pour une tension particulière, appelée tension de point de puissance maximale (MPP).

II.6.1.2 L'influence de l'éclairement sur le courant (éclairement variable et température constante):

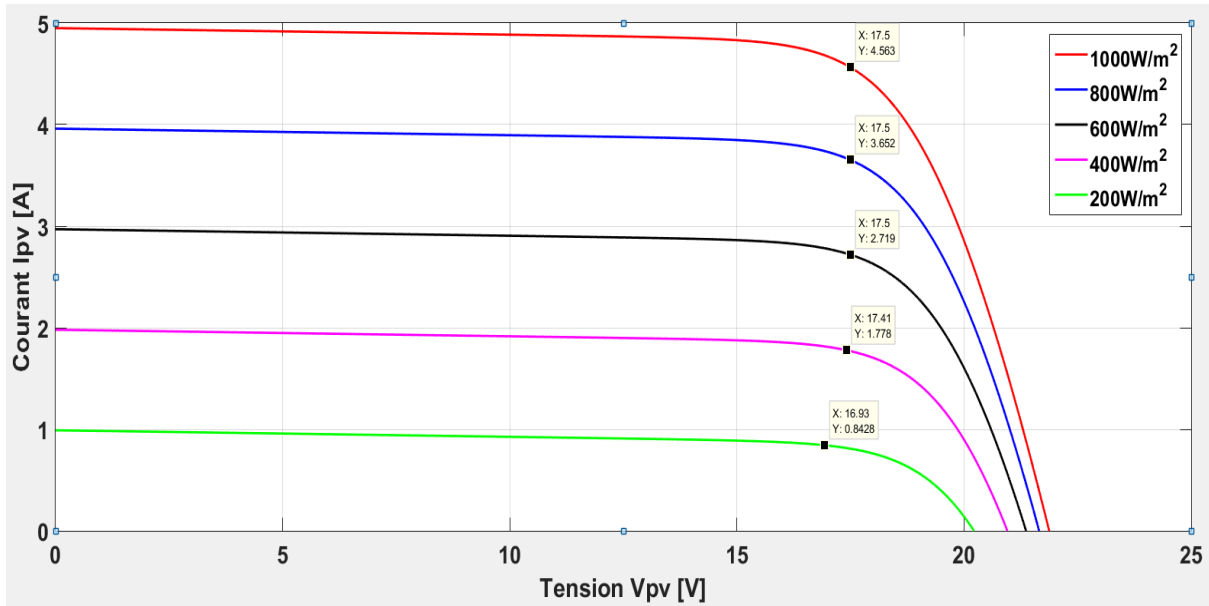


Figure II.7: courbe de courant en fonction de la tension (éclairement variable et température constante)

On peut observer que le courant produit par le panneau augmente proportionnellement à l'éclairement. Cela s'explique par le fait qu'une plus grande quantité de lumière solaire génère plus de porteurs de charge dans le panneau, ce qui permet de produire plus de courant. On peut également observer que le courant de court-circuit (I_{cc}) augmente avec l'éclairement. Le I_{cc} est le courant produit par le panneau lorsqu'il est court-circuité (c'est-à-dire que ses bornes sont reliées entre elles).

Eclairement (W/m ²)	I _{cc} (A)	V _{oc} (V)	I _{mp} (A)	V _{mp} (V)	P _{mp} (W)
G= 1000 W/m ²	4.95	21.88	4.56	17.5	79.86
G=800 W/m ²	3.96	21.65	3.65	17.5	63.9
G=600 W/m ²	2.97	21.36	2.71	17.5	47.58
G=400 W/m ²	1.98	20.96	1.77	17.41	30.97
G=200 W/m ²	0.99	20.22	0.84	16.93	14.27

Tableau II.2:influence de l'éclairement sur le panneau PV

Le courant est directement proportionnel à l'intensité du rayonnement : une augmentation de l'ensoleillement entraîne une augmentation significative du courant I_{sc} ainsi que du courant I_{pv}. Cela s'explique par le fait que l'augmentation de l'éclairement intensifie la création de paires électron-trou, favorisant ainsi la circulation du courant. En revanche, la tension en circuit ouvert V_{oc} augmente légèrement, restant donc pratiquement inchangée. Par conséquent, la puissance du panneau est directement proportionnelle à l'ensoleillement : une augmentation de l'éclairement entraîne une hausse de la puissance, donc une élévation du point de puissance maximale . Bien que les tensions des points de puissance maximale restent presque constantes, les courants I_{mp} augmentent avec l'éclairement G , ce qui accroît la puissance. Ainsi, le rendement du panneau augmente considérablement avec l'irradiation.

II.6.2 L'influence de la température:

II.6.2.1 L'influence de la température sur la puissance (éclairage constant et température variable)

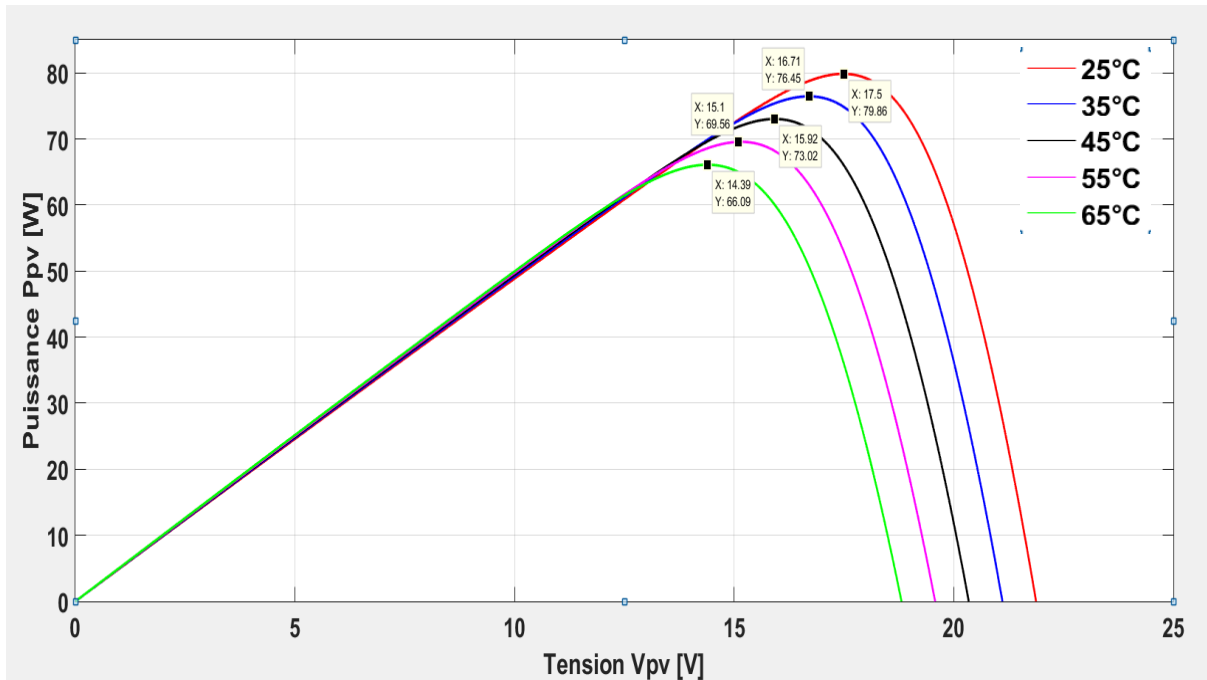


Figure II.8: courbe de la puissance en fonction de la tension (éclairage constant et température variable)

On peut observer que la puissance maximale produite par le panneau diminue lorsque la température augmente. Cela s'explique par le fait que la température augmente la résistance interne du panneau, ce qui diminue le flux de courant et donc la puissance produite.

II.6.2.2 L'influence de la température sur le courant (éclairage constant et température variable)

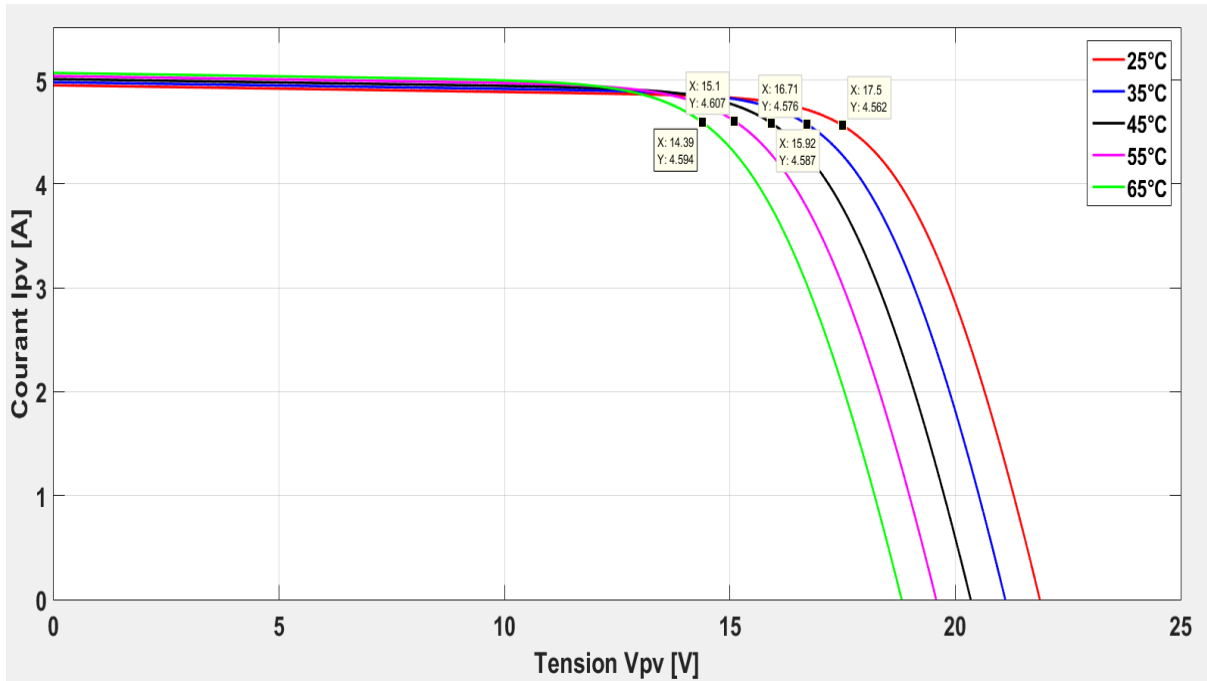


Figure II.9: courbe de courant en fonction de la tension (éclairage constant et température variable)

On peut observer que le courant produit par le panneau diminue légèrement lorsque la température augmente. Cela s'explique par le fait que la température augmente la résistance interne du panneau, ce qui diminue le flux de courant. On peut également observer que le I_{cc} diminue légèrement lorsque la température augmente.

T(°C)	I _{cc} (A)	V _{oc} (V)	I _{mp} (A)	V _{mp} (V)	P _{mp} (W)
T=25	4.95	21.88	4.56	17.5	79.86
T=35	4.98	21.11	4.57	16.71	76.45
T=45	5.009	20.34	4.58	15.92	73.02
T=55	5.039	19.58	4.6	15.1	69.56
T=65	5.069	18.81	4.59	14.39	66.09

Tableau II.3: influence de température sur le panneau PV

La tension à vide V_{oc} est inversement proportionnelle à la température : elle diminue avec l'augmentation de la température. En revanche, le courant pv et le courant de court-circuit I_{sc} augmentent légèrement avec la hausse de température, mais restent globalement constants. Ainsi, l'élévation de la température entraîne une diminution de la puissance, et donc du point de puissance maximale . Bien que les courants I_{mp} au point de puissance maximale restent presque inchangés, les tensions V_{mp} diminuent avec l'augmentation de la température, ce qui réduit la puissance générée. Par conséquent, la température a un impact négatif sur le rendement du panneau photovoltaïque.

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre le modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque, en nous basant sur un schéma électrique équivalent simplifié à une seule diode. Nous avons également détaillé la méthode de calcul des paramètres d'un panneau photovoltaïque. Enfin, nous avons analysé l'impact des variations d'éclairement et de température sur les performances des modules solaires. Dans le chapitre suivant, nous aborderons les méthodes d'optimisation de la puissance extraite des panneaux photovoltaïques.

CHAPITRE III:

Optimisation du systeme photovoltaïque

Introduction:

La production d'énergie des panneaux photovoltaïques est soumise à une caractéristique non linéaire, fortement influencée par les conditions climatiques. Cela rend difficile d'obtenir une puissance optimale en sortie. Pour maximiser cette production et garantir un transfert efficace de l'énergie vers la charge, un étage d'adaptation est nécessaire. Cet étage comprend un convertisseur DC/DC associé à un régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking). Ce régulateur utilise des techniques avancées pour déterminer le rapport cyclique optimal, qui commande l'interrupteur du hacheur et contraint le panneau à fonctionner à son point de puissance maximale.

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques méthodes à utiliser pour maximiser la puissance mais nous nous intéresserons sur la méthode couramment utilisée pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) : la méthode de perturbation et observation (P&O) .

De plus, nous expliquerons le fonctionnement du convertisseur BOOST, ainsi que le rôle de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) dans le contrôle du rapport cyclique.

III.1 Étage d'adaptation DC/DC:

Un étage d'adaptation DC/DC est un dispositif électronique composé d'un convertisseur DC/DC, également appelé hacheur, qui est contrôlé par un régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking). Ce système a pour objectif d'ajuster dynamiquement les paramètres de fonctionnement du panneau photovoltaïque afin de l'amener à produire une puissance optimale, en fonction des conditions environnementales. comme le montre la figure suivante:

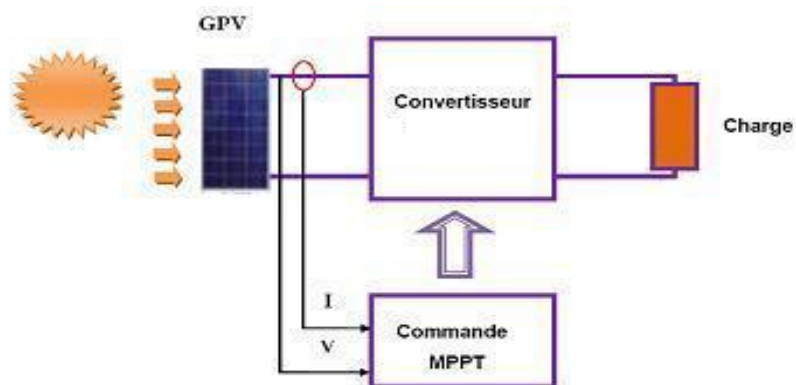


Figure III.1: étage d'adaptation entre un GPV et une charge DC[22]

III.2 les technique de recherche du point de puissance maximal:

Les techniques de recherche du point de puissance maximale (MPPT - Maximum Power Point Tracking) sont des méthodes utilisées pour optimiser l'extraction d'énergie des panneaux photovoltaïques. Les panneaux solaires ont un point de puissance maximale (MPP) qui dépend de la température et de l'irradiation solaire. Les techniques MPPT ajustent les paramètres du système pour que le panneau fonctionne constamment à ce point. Voici les principales techniques :

III.2.1 Logique Floue (Fuzzy Logic Control - FLC) :

Cette méthode utilise des règles floues pour prendre des décisions basées sur des entrées imprécises. Les variations de la puissance et de la tension sont les entrées du contrôleur flou, qui décide comment ajuster le système pour atteindre la MPP.[23]

III.2.2 Réseaux Neuronaux Artificiels (Artificial Neural Networks - ANN) :

L'algorithme utilise un modèle basé sur des réseaux neuronaux pour prédire le MPP en fonction des paramètres du système, tels que la température et l'irradiation. Ce modèle est entraîné à partir de données réelles ou simulées.[23]

III.2.3 Méthode de Balayage du Courant ou de la Tension :

Cette méthode balaie les valeurs de courant ou de tension, mesure la puissance produite, et détermine le point où cette puissance est maximale. Ensuite, le système se fixe sur ce point.[24]

III.2.4 Perturbation et Observation (P&O) :

Cette méthode consiste à perturber légèrement la tension ou le courant du panneau, puis à observer l'effet sur la puissance produite. Si une augmentation de la tension entraîne une augmentation de la puissance, la perturbation continue dans la même direction. Sinon, la perturbation est inversée.[25]

Dans ce qui suit, nous allons proposer et s'intéresser sur la dernière technique qui est perturbation et observation(P&O). Ce qui rend cette méthode attrayante, c'est qu'elle nécessite peu de calculs et est facile à implémenter, tout en étant suffisamment robuste pour s'adapter à des variations d'ensoleillement et de température.

III.3 Algorithme perturbation et observation(P&O):

L'algorithme **Perturb and Observe (P&O)** est une méthode largement utilisée pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques, grâce à sa simplicité et son efficacité. Son fonctionnement repose sur une approche itérative consistant à perturber la tension de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque (GPV),[26] en augmentant ou en diminuant cette tension, ce qui influence directement la puissance de sortie. À chaque instant "k", l'algorithme calcule la puissance fournie par le panneau et la compare à celle de l'instant précédent "k-1", suivant un pas constant, ce qui en fait une méthode déterministe.[20][25]

Lorsqu'une perturbation est appliquée, l'algorithme observe l'effet de cette variation sur la puissance produite. Si l'augmentation de la tension entraîne une hausse de la puissance, cela indique que le point de puissance maximale (MPP) se situe à droite du point de fonctionnement actuel, et l'algorithme continue dans cette direction. Inversement, si la

puissance diminue, le point de fonctionnement doit être déplacé vers la gauche. Une fois le PPM atteint, le point de fonctionnement oscille autour de celui-ci. Ce processus, basé sur des comparaisons successives des valeurs de puissance à chaque étape, permet d'ajuster le rapport cyclique α du convertisseur DC/DC de manière optimale, garantissant ainsi l'extraction maximale de l'énergie disponible à partir du panneau solaire.

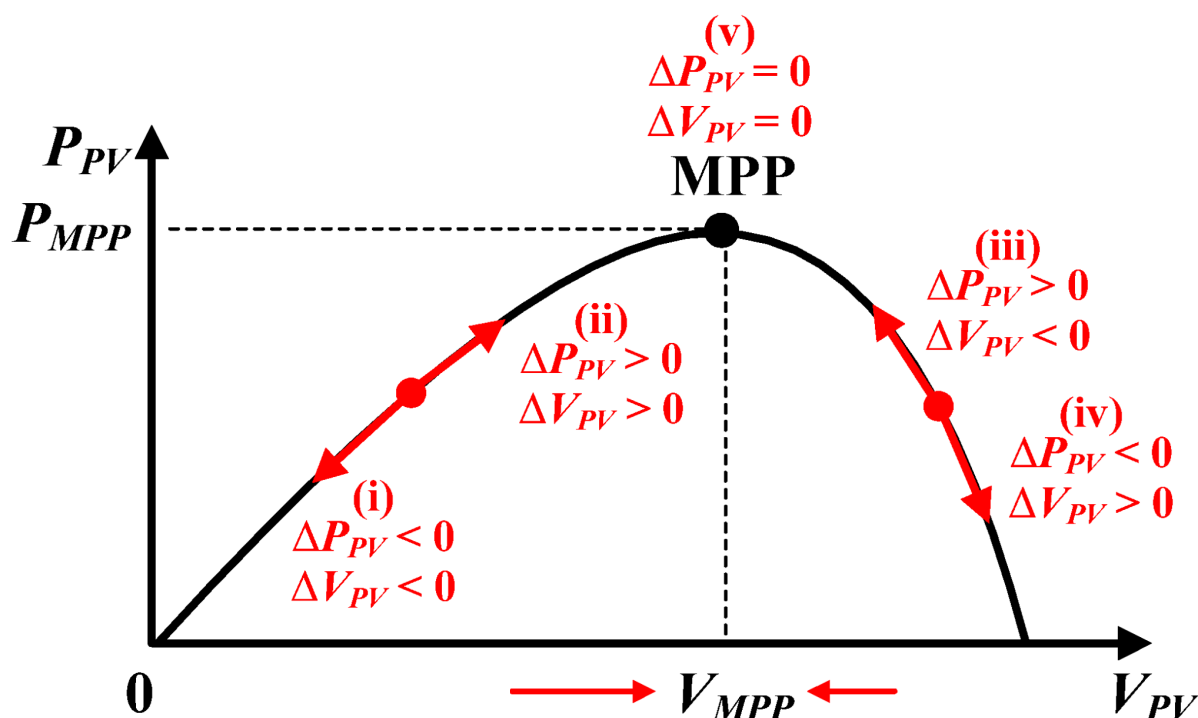


Figure III.2: Suivi du point de puissance maximale (MPP) par la méthode de Perturbation et Observation (P&O)

Voici le tableau III.1 qui explique comment cela fonctionne:

conditions	actions
(i) $\Delta P_{pv} < 0$ et $\Delta V_{pv} < 0$	alpha augmente
(ii) $\Delta P_{pv} > 0$ et $\Delta V_{pv} > 0$	alpha augmente
(iii) $\Delta P_{pv} > 0$ et $\Delta V_{pv} < 0$	alpha diminue
(iv) $\Delta P_{pv} < 0$ et $\Delta V_{pv} > 0$	alpha diminue
(v) $\Delta P_{pv} = 0$ et $\Delta V_{pv} = 0$	pas d'action

Tableau III.1: Méthodologie de l'algorithme P&O

La figure III.3 illustre l'organigramme de l'algorithme de la méthode Perturbation et Observation (P&O) tel qu'il doit être intégré dans le microprocesseur de contrôle. Selon cette figure, la tension (V) et le courant (I) du générateur photovoltaïque (GPV) sont mesurés pour calculer la puissance de sortie actuelle $P(k)$. Cette puissance est ensuite comparée à la puissance précédente $P(k-1)$. Si la puissance a augmenté par rapport à la mesure précédente, la perturbation continue dans la même direction ; en revanche, si la puissance a diminué, la direction de la perturbation de la tension est inversée. Après chaque perturbation de tension, l'évolution de la puissance est analysée pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur. Lorsqu'un point de puissance maximale (MPP) est atteint, la tension oscille autour de cette valeur optimale.

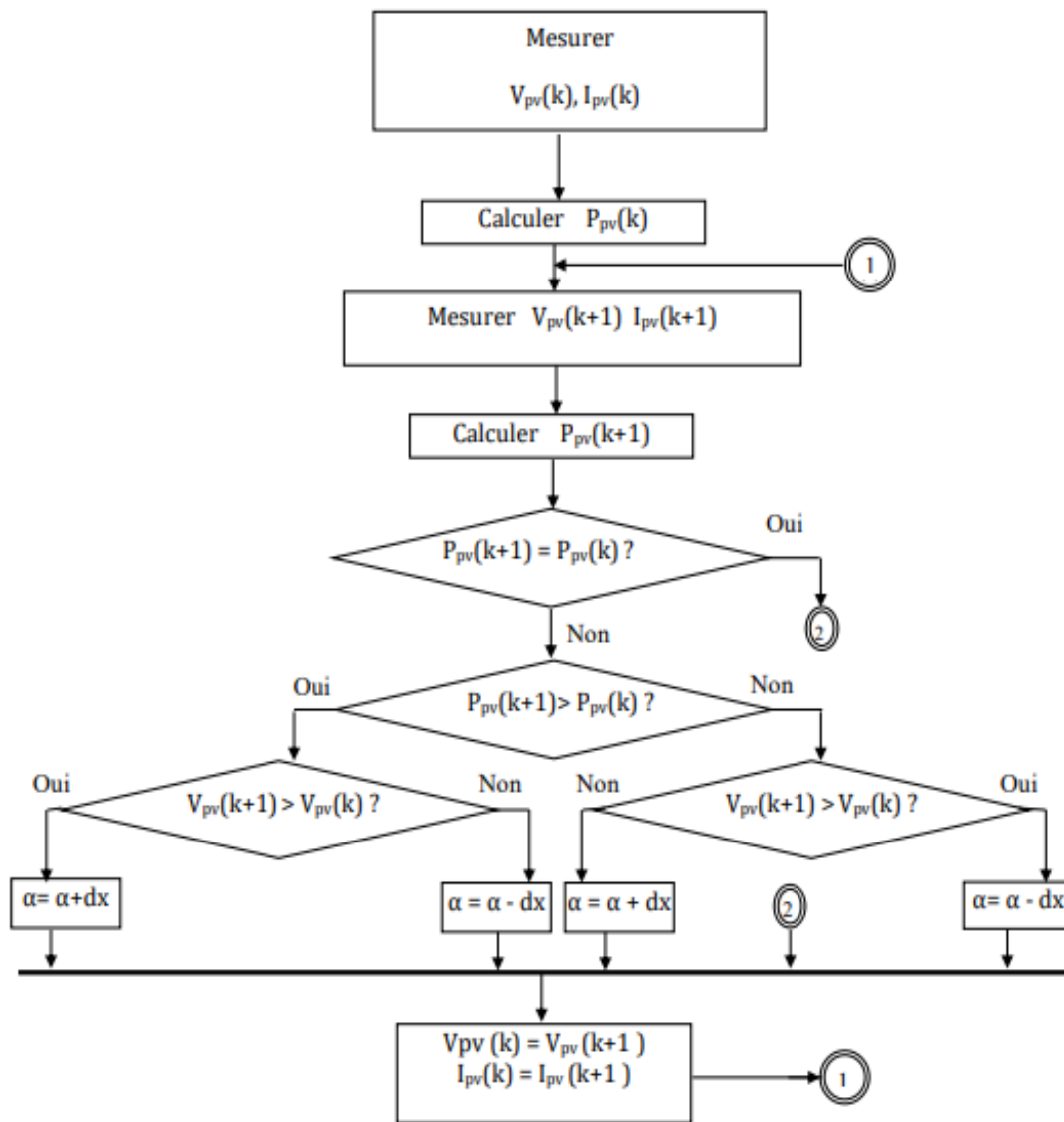


Figure III.3: organigramme de l’algorithme perturb and observe PO

Le rapport cyclique généré par la méthode MPPT de Perturbe and Observe (P&O), après traitement par la modulation de largeur d’impulsion (MLI), régule l’ouverture et la fermeture de l’interrupteur commandable du convertisseur DC/DC.

III.4 La commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) :

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) consiste à comparer un signal de référence, appelé modulateur, à un signal porteur. La modulateur représente le rapport cyclique généré par les techniques MPPT.

La MLI produit un signal de valeur 1 lorsque le signal modulateur est supérieur au signal porteur, ce qui indique la fermeture de l'interrupteur commandable. À l'inverse, elle génère un signal de valeur 0 lorsque le signal modulateur est inférieur au signal porteur, ce qui correspond à l'ouverture de l'interrupteur commandable. Ainsi, à la sortie de la MLI, le signal est binaire, soit 0, soit 1.

Cette sortie binaire peut ensuite être utilisée pour piloter un hacheur boost, un convertisseur qui permet d'augmenter la tension d'entrée.

III.5 Convertisseur DC/DC(hacheur BOOST):

Les hacheurs, ou convertisseurs DC/DC, sont des dispositifs essentiels qui permettent de transformer une tension continue fixe en une tension continue variable. Ils jouent un rôle crucial dans de nombreuses applications, notamment dans les systèmes d'alimentation et les énergies renouvelables. Parmi les différents types de hacheurs, comme les hacheurs BUCK, BOOST et BUCK-BOOST, chacun présente des caractéristiques adaptées à des besoins spécifiques.

Parmi ces dispositifs, le hacheur BOOST se distingue par sa capacité à fournir une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée. Son principe repose sur le transfert d'énergie entre une source de courant continu et une source de tension continue, en alternant l'état d'un interrupteur contrôlable. Lorsque l'interrupteur est fermé, l'énergie est stockée dans une inductance, puis, lorsqu'il s'ouvre, cette énergie est transférée à la charge via une diode, augmentant ainsi la tension de sortie. Ce système est composé d'un interrupteur, d'une diode, d'une inductance de lissage, et d'une capacité qui réduit l'ondulation de la tension de sortie.

Le hacheur BOOST est particulièrement apprécié pour sa capacité à optimiser l'utilisation de l'énergie solaire, en assurant un fonctionnement efficace même avec des variations de tension d'entrée. Le schéma électrique du hacheur BOOST illustre clairement ces composants et leur fonctionnement complémentaire.

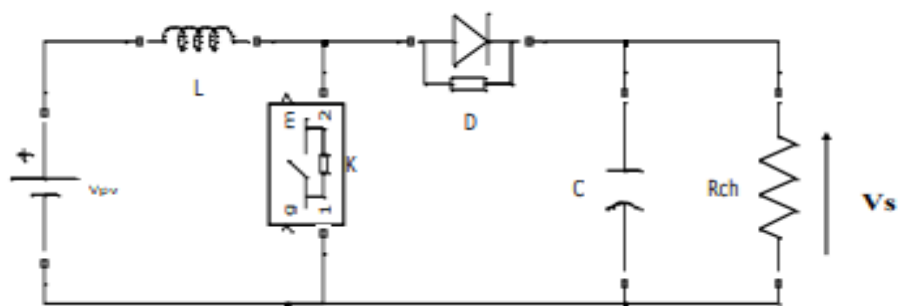


figure III.4: schéma de base d'un convertisseur BOOST

III.5.1 Principe de fonctionnement :

Le hacheur boost fonctionne en stockant de l'énergie dans une inductance pendant un certain temps, puis en libérant cette énergie à une tension plus élevée. Voici les étapes de fonctionnement :

1. **Étape de stockage $[0, \alpha T]$** : Un interrupteur (souvent un transistor MOSFET) est fermé, et la diode D reste bloquée, cela permettant à un courant de circuler dans l'inductance. L'énergie est stockée sous forme de champ magnétique

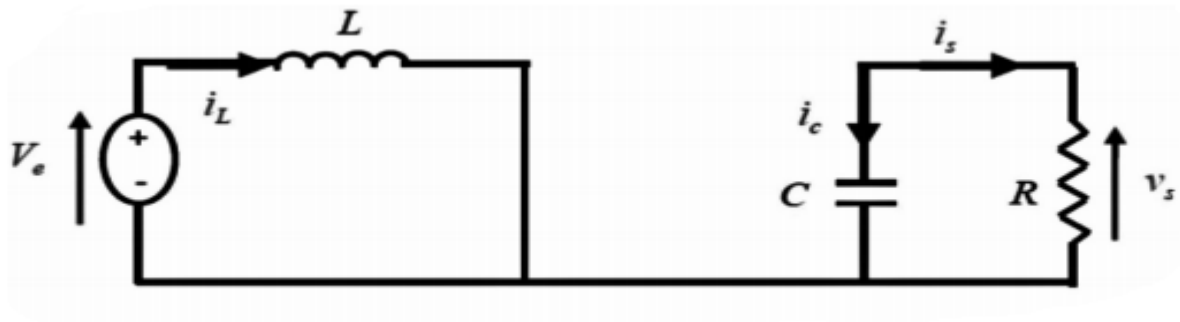


Figure III.5:schéma équivalent d'un hacheur BOOST (K est fermé)[27]

$$V_l = V_e = L \frac{di}{dt} \quad (\text{III.1})$$

La résolution de l'équation différentielle donne :

$$i_L(t) = \int_0^t \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_{pv}}{L} t + I_{lmin} \quad (\text{III.2})$$

2. **Étape de transfert (phase de roue libre) [αT , T]:** L'interrupteur s'ouvre , l'énergie stockée dans l'inductance se combine à la tension d'entrée pour fournir une tension plus élevée à la sortie, via une diode qui bloque le retour du courant.

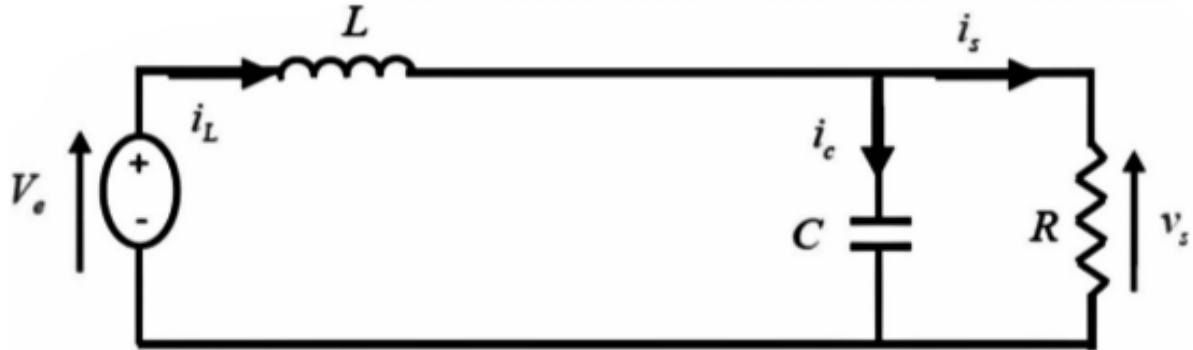


Figure III.6: schéma équivalent d'un hacheur BOOST(K ouvert)[27]

$$V_l = V_e - V_s = L \frac{di}{dt} \quad (III.3)$$

En intégrant, on obtient l'expression de l'évolution du courant traversant l'inductance :

$$i_L(t) = \int_{\alpha T}^T \frac{V_l}{L} dt = \frac{V_e - V_s}{L} (T - \alpha T) + I_{Lmax} \quad (III.4)$$

Expression de \$V_l\$ moyenne:

$$\langle V_l \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_l dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V_{pv} dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T (V_e - V_s) dt \quad (III.5)$$

On sait que, en régime permanent, la valeur moyenne aux bornes de l'inductance est nulle.

Donc :

$$\langle V_l \rangle = \alpha V_e + (V_e - V_s)(1 - \alpha) = 0 \quad (III.6)$$

En simplifiant cette relation, on obtient finalement la valeur moyenne de la tension de sortie :

$$V_s = \langle V_s(t) \rangle = \frac{V_e}{1-\alpha} \tag{III.7}$$

Étant donné que le rapport cyclique se situe entre 0 et 1, la valeur de la tension moyenne de sortie V_s est supérieure à la tension d'entrée V_e .

Pour déterminer la valeur moyenne du courant de sortie, on utilise la relation suivante :

$$I_s = \langle i_s(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T I_e \cdot dt \tag{III.8}$$

Dans l'intervalle $[0, \alpha T]$, le transistor est en conduction, ce qui donne une tension de sortie $V_s=0$. Nous allons donc calculer sa valeur moyenne sur l'intervalle $[\alpha T, T]$:

$$I_s = \langle i_s(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T I_e \cdot dt = I_e(1 - \alpha) \tag{III.9}$$

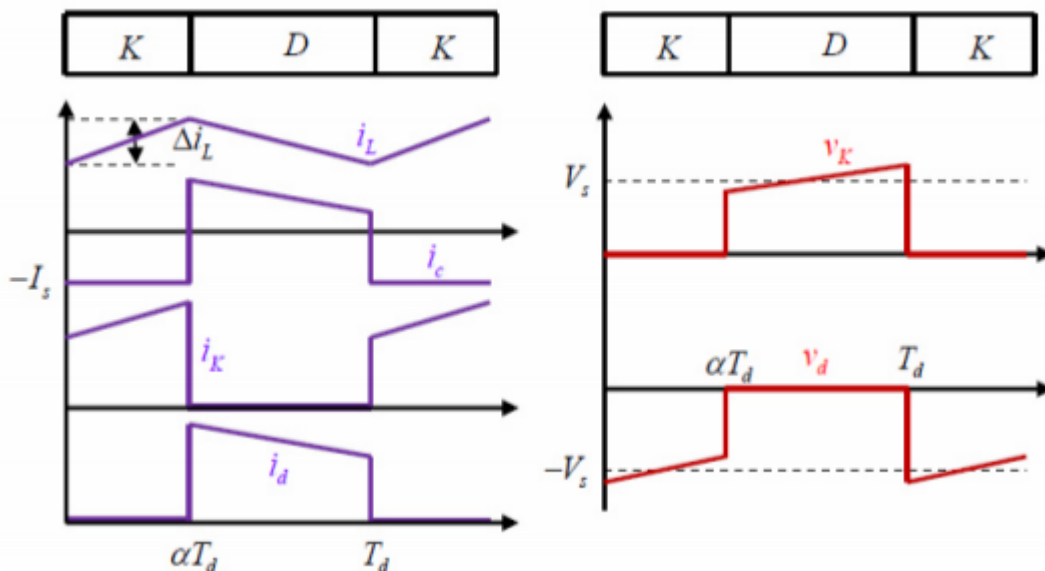


Figure: Forme d'ondes courant/tensions dans un hacheur boost.[24]

D'après cette relation, on peut en conclure que le hacheur boost abaisseur de courant.

Le dimensionnement de chaque élément a été déterminé par le choix de faire fonctionner le convertisseur élévateur en mode de conduction continue, sur la plage de fonctionnement la plus étendue possible. Dans ce mode, l'énergie stockée dans l'inductance « L » est partiellement transférée, et le courant qui y circule ne s'annule jamais.

III.5.2 Dimensionnement du hacheur BOOST:

III.5.2.1 Calcul de l'inductance L:

L'ondulation du courant dans l'inductance est calculée en prenant en compte la tension de sortie continue, c'est-à-dire en négligeant l'ondulation de la tension par rapport à sa valeur moyenne.

pour $t \in [0, \alpha T]$:

$$i_L(t) = \int_0^t \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_e}{L}t + I_{Lmin} \quad (III.10)$$

pour $t \in [\alpha T, T]$:

$$i_L(t) = \int_{\alpha T}^t \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_e - V_s}{L}(t - \alpha T) + I_{Lmax} \quad (III.11)$$

à $t = \alpha T$:

$$\Delta_{iL} = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_e}{L}\alpha T = \frac{\alpha(1-\alpha)V_s}{Lf} \quad (III.12)$$

$$I_{Lmax} = \frac{V_e}{L}\alpha T + I_{Lmin} \quad (III.13)$$

on peut déduire l'expression de l'inductance L a partire de l'équation:

$$L = \frac{Ve\alpha T}{\Delta i_L} = \frac{Ve\alpha}{\Delta i_L f} \quad (\text{III.14})$$

avec:

$$T = \frac{1}{f} \quad (\text{III.15})$$

III.5.2.2 Expression de la résistance R :

$$P_s = \frac{V_s^2}{R} = V_s I_s \quad (\text{III.16})$$

$$R = \frac{V_s}{I_s} = \frac{V_s^2}{P_s} \quad (\text{III.17})$$

III.5.2.3 Expression du courant traversant l'inductance I_L :

$$P_e = V_e I_e = V_e I_L = P_s \quad (\text{III.18})$$

$$V_e I_L = \frac{V_s^2}{R} = \frac{V_e^2}{R(1-\alpha)^2} \quad (\text{III.19})$$

avec:

$$V_s = \frac{V_e}{(1-\alpha)} \quad (\text{III.20})$$

donc:

$$I_l = \frac{V_e}{R(1-\alpha)^2} = \frac{V_s^2}{V_e R} = \frac{V_s I_s}{V_e} \quad (\text{III.21})$$

III.5.2.4 Expression de la capacité C :

pour $t \in [0, \alpha t]$:

$$V_s = -\frac{I_s}{C}t + V_{smax} \quad (\text{III.22})$$

à $t = \alpha t$:

$$V_s(\alpha t) = V_{smin} = -\frac{I_s}{C}\alpha t + V_{smax} \quad (\text{III.23})$$

avec:

$$\Delta V_s = V_{smax} - V_{smin} = \frac{I_s}{C}\alpha t = \frac{\alpha V_s}{RCf} \quad (\text{III.24})$$

donc:

$$C = \frac{\alpha V_s}{Rf\Delta V_s} = \frac{\alpha}{Rf\left(\frac{\Delta V_s}{V_s}\right)} \quad (\text{III.25})$$

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'importance d'un étage d'adaptation dans une installation photovoltaïque, constitué d'un convertisseur BOOST couplé à un TRACKER MPPT. Nous avons ensuite détaillé la méthode MPPT P&O, en exposant ses avantages et ses inconvénients. De plus, nous avons expliqué le dimensionnement du convertisseur BOOST, reconnu pour sa robustesse et sa capacité à augmenter la tension. Le prochain chapitre sera consacré aux simulations, qui viendront appuyer les concepts théoriques abordés précédemment.

CHAPITRE IV:

Simulation, résultats et discussions

Introduction:

Le réseau de distribution d'électricité constitue la principale source d'énergie pour la majorité des consommateurs (habitations, usines, etc.). Il est largement déployé et fournit de l'énergie en continu et en grande quantité. Cependant, il ne dessert pas les sites isolés, rendant son raccordement dans ces zones (rurales, montagneuses, désertiques, etc.) relativement coûteux.

Pour les sites bien exposés au soleil, la meilleure option est de recourir à l'énergie solaire, via des panneaux photovoltaïques (PV). La puissance produite par ces systèmes dépend des conditions météorologiques. Pour acheminer cette énergie vers la charge, une installation spécifique est nécessaire afin de garantir la production de la quantité d'électricité requise.

Un système photovoltaïque autonome se compose généralement de panneaux PV, de convertisseurs, d'un dispositif de commande MPPT (pour maximiser la production d'énergie) et d'un système de stockage pour pallier les conditions défavorables. Dans notre étude, nous nous sommes concentrés sur un système alimentant une charge résistive en courant continu.

Ce chapitre est consacré à la comparaison des résultats obtenus avec la méthode P&O en utilisant différents pas, en fonction des variations d'éclairement et de températures. Ce travail a été réalisé sous l'environnement Matlab/Simulink.

IV.1 Description du système :

Notre système est un modèle d'un site isolé, comme le montre la figure (IV.1). Une charge résistive en courant continu est alimentée par trois panneaux photovoltaïque connectés en série de type UNISUN 80.12M. Ce champ PV est connecté à un convertisseur élévateur de tension qui permet de transférer l'énergie vers la charge et d'obtenir une tension de sortie d'environ 112V. Le hacheur boost est piloté par un algorithme de suivi du point de puissance maximale (P&O)

Le cahier des charges spécifie les informations présentées dans le tableau ci-dessous :

Tension des trois panneau connecte en série (Ve)	52.5 V
Puissance (crête) fournit (P)	240 W
Nombre de panneau en série (Nss)	3
Tension de sortie du convertisseur (Vs)	112 V
Fréquence de hachage (f)	15 KHz
Ondulation de la tension ($\Delta V_s/V_s$)	2%
Ondulation du courant(Δi_l)	5%

Tableau IV.1: Données du cahier de charge

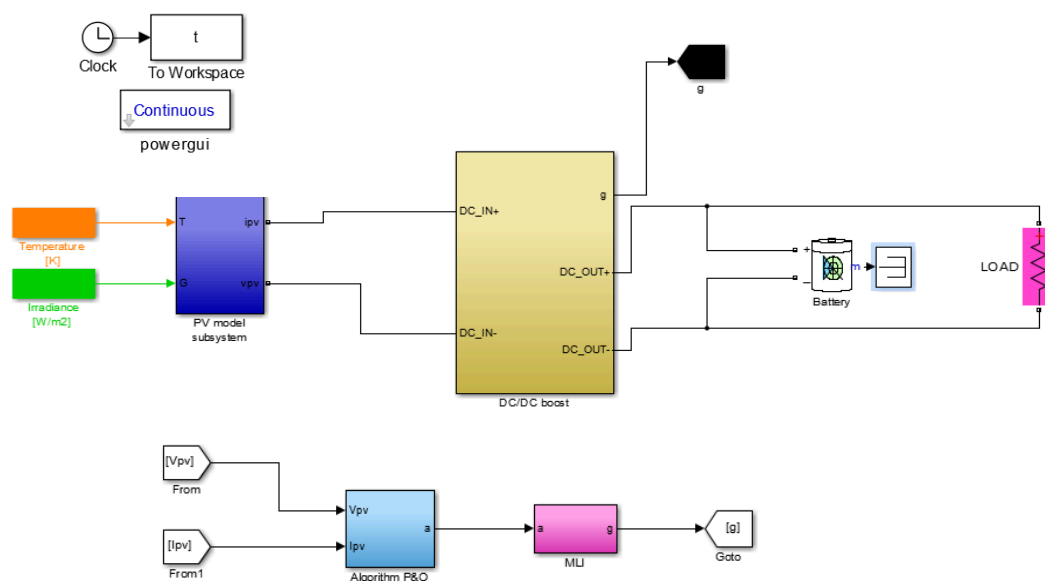


Figure IV.1: Schéma du Système PV autonome sous Matlab simulink

Le système est composé de :

Panneau photovoltaïque: Il alimente la charge résistive et recharge la batterie pendant la journée. Le modèle utilisé dans cette étude est un UNISUN 80.12M

Système de stockage (batteries) : Les batteries sont constituées d'un ensemble de cellules électrochimiques (accumulateurs) connectées en série, qui transforment l'énergie chimique en énergie électrique pendant la charge, et l'inverse lors de la décharge.

Dans notre système, neuf batteries de type Acide Plomb (Lead Acid) de 12V sont disposées en série, afin de maintenir la tension à la sortie du hacheur Boost autour de 112V et de permettre le stockage d'énergie.

Convertisseur DC-DC : Le convertisseur utilisé est un hacheur élévateur de tension. Pour déterminer les valeurs exactes de ses composants, une étude approfondie est nécessaire, prenant en compte les paramètres fournis par le panneau photovoltaïque, ainsi que la tension de sortie, la fréquence, et les ondulations du courant et de la tension.

Capacité (µF)	Inductance (mH)
1000	12

Le schéma bloc du convertisseur boost et de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) dans l'environnement Matlab Simulink est présenté respectivement dans les figures IV.2 et IV.3:

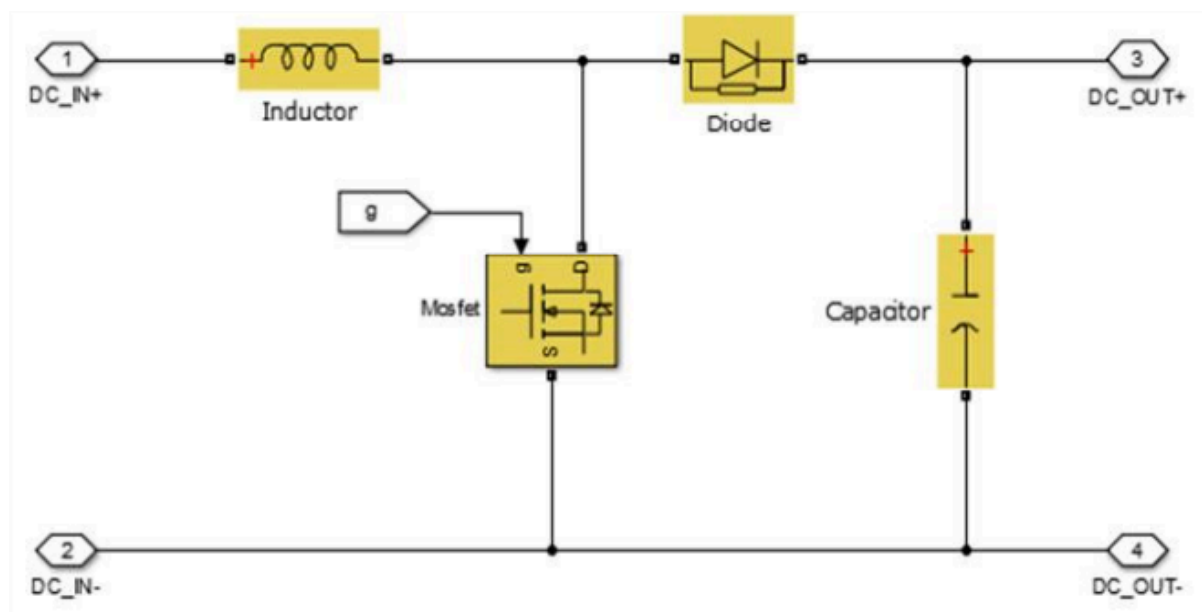


Figure IV.2: schéma bloc du convertisseur boost sous matlab simulink

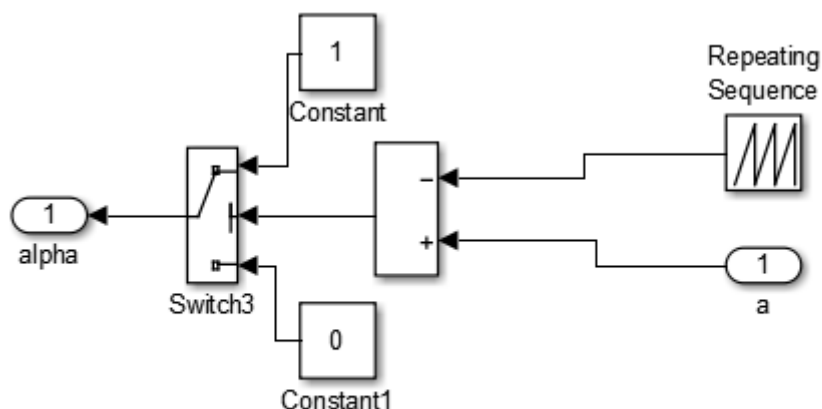


Figure IV.3: schéma bloc de la MLI sous matlab simulink

charge: Dans un système photovoltaïque (PV), la charge désigne l'appareil ou le système qui consomme l'énergie produite par les panneaux solaires. Cela peut inclure divers éléments tels que des appareils électriques, comme des lumières, réfrigérateurs et climatiseurs, ainsi que des systèmes de stockage, tels que des batteries, qui permettent de conserver l'énergie pour une utilisation ultérieure. De plus, la charge peut également concerner des équipements industriels nécessitant une alimentation continue. La charge joue un rôle crucial dans le fonctionnement du système, car elle détermine la quantité d'énergie que le système doit produire pour répondre aux besoins énergétiques.

L'algorithme de recherche de point de puissance maximal (P&O): l'algorithme de suivie de point de puissance maximale mppt P&O et utilisé pour le contrôle de cycle de travail afin d'obtenir une tension de référence pour le point de puissance maximale

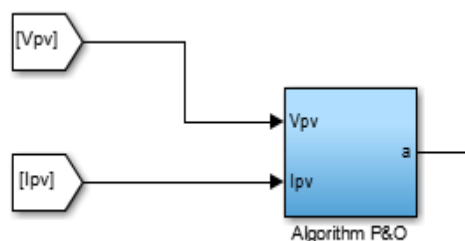


Figure IV.4: Schéma bloc de la technique P&O.

La recherche du point de puissance maximale (PPM) avec cet algorithme utilise un pas fixe, déterminé après plusieurs essais. Pour illustrer l'impact de ce pas, nous avons réalisé des simulations avec un pas de 0,000001 et un pas de 0,00002.

IV.2 Résultats de simulation de l'algorithmes P&O:

Réponse des techniques MPPT aux conditions standards (ensoleillement $G=1000\text{W/m}^2$ et température $T=25^\circ\text{C}$) avec deux pas différents:

Pas1=0.000001

Pas2=0.00002

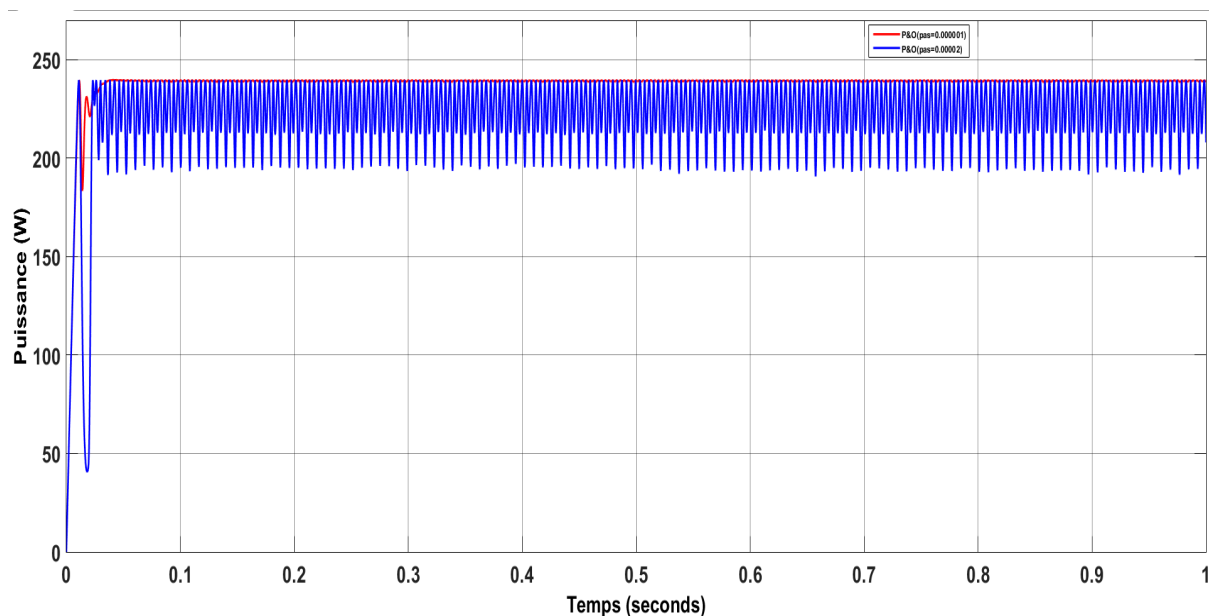


Figure IV. 5: Puissance du panneau aux conditions STC.

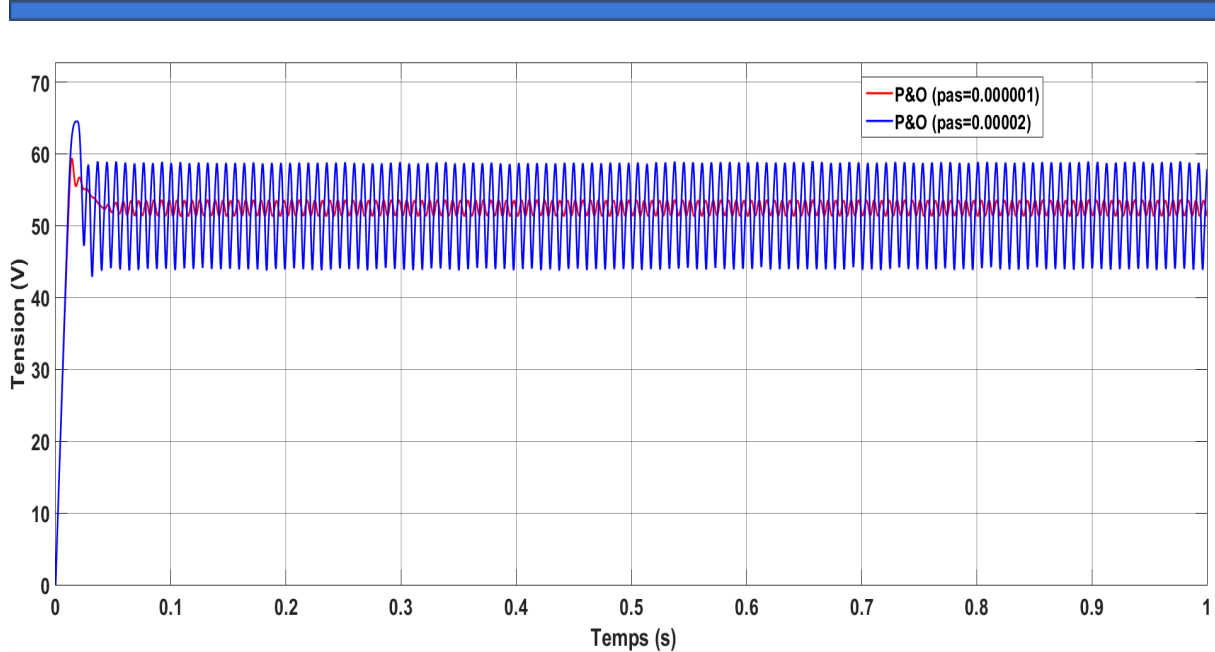


Figure IV. 6: Tension du panneau aux conditions STC.

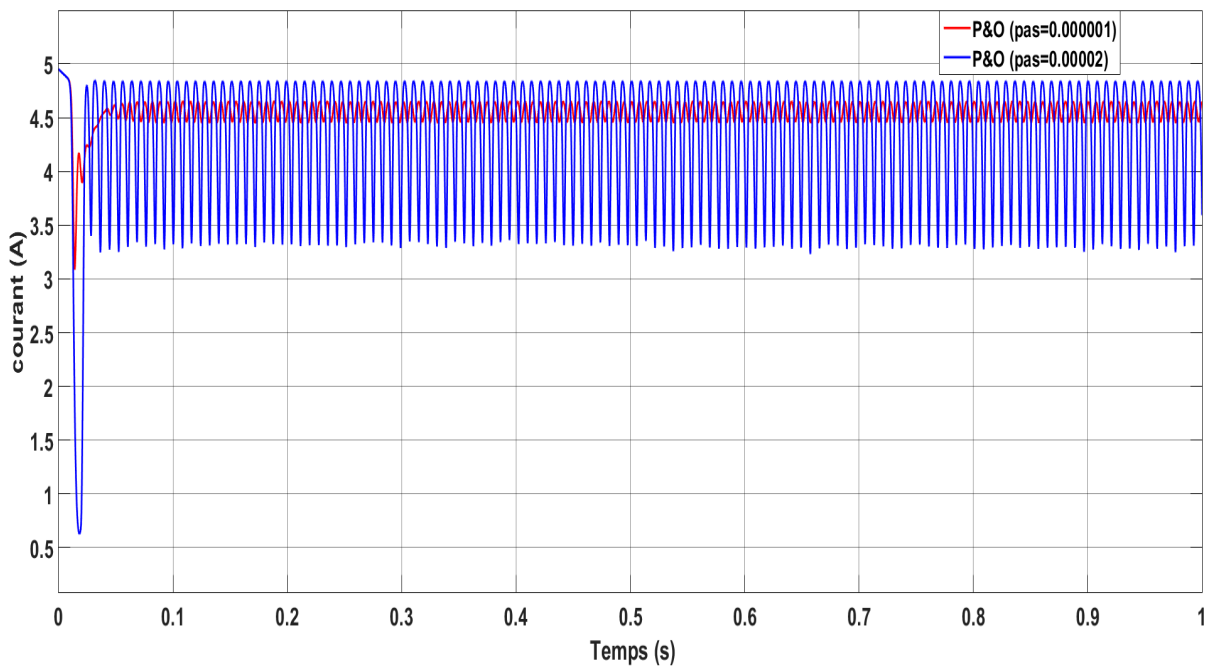


Figure IV.7 : Courant du panneau aux conditions STC.

IV.3 interprétation des résultats obtenue avec des condition STC:

D'après les observations, la tension du panneau photovoltaïque augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale, puis diminue légèrement pour se stabiliser autour d'une valeur optimale. En parallèle, le courant commence à un niveau élevé, puis baisse progressivement jusqu'à se stabiliser près de sa valeur nominale. Quant à la puissance produite, elle augmente progressivement jusqu'à atteindre son maximum, appelé point de puissance maximale.

En ce qui concerne l'algorithme MPPT P&O (Perturb and Observe), on remarque que lorsque l'on utilise un petit pas, il met plus de temps à atteindre le point de puissance maximale. À l'inverse, avec un pas plus grand, l'algorithme converge plus rapidement vers une situation stable.

Cependant, avec un petit pas, l'ondulation de la puissance une fois à l'état stationnaire est plus faible, ce qui signifie que la courbe de puissance est plus stable. Avec un grand pas, l'ondulation est plus importante, ce qui rend la puissance légèrement moins stable.

En ce qui concerne les performances dynamiques, l'algorithme avec un grand pas permet d'avoir une meilleure réponse transitoire, c'est-à-dire qu'il s'adapte plus rapidement aux changements. Cependant, si l'on augmente encore la taille du pas, cela pourrait améliorer davantage cette réponse, mais au prix d'une augmentation des pertes de puissance en régime permanent, ce qui n'est pas idéal à long terme.

IV.4 Réponse de la techniques MPPT P&O aux changements brusque de l'ensoleillement avec une température fixe (25°C):

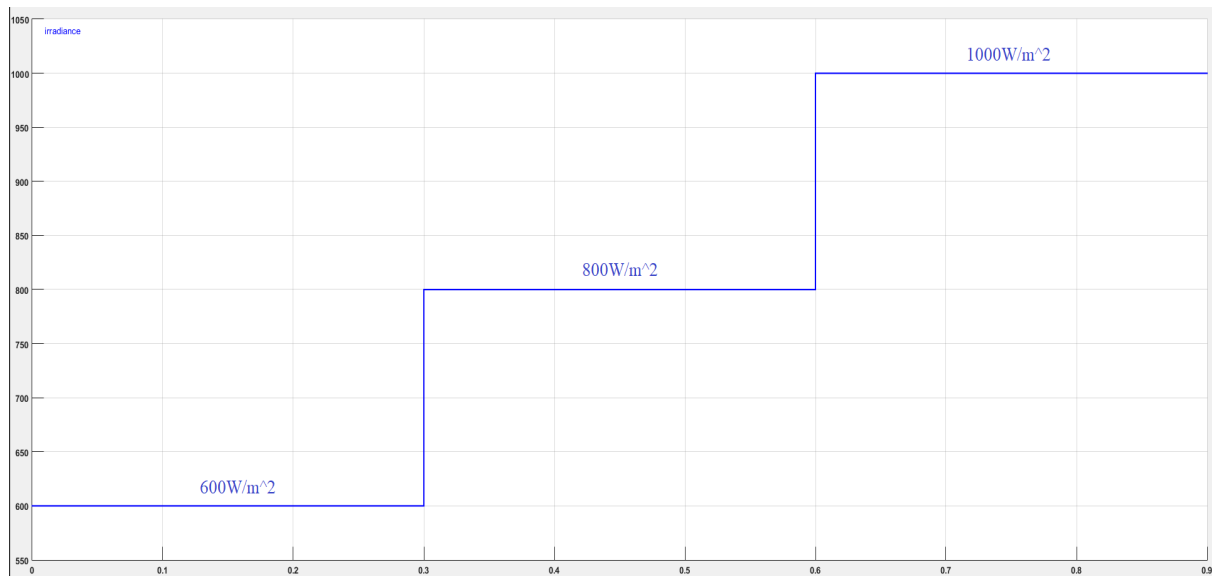


Figure IV.8: profile de l'éclairement

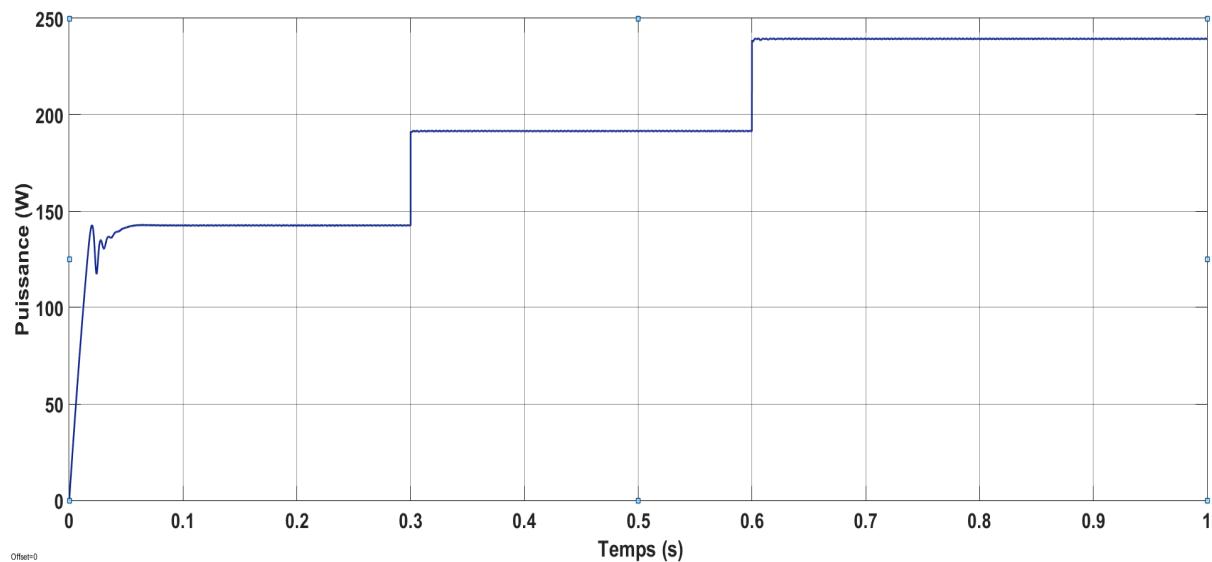


Figure IV. 9: puissance du panneau.

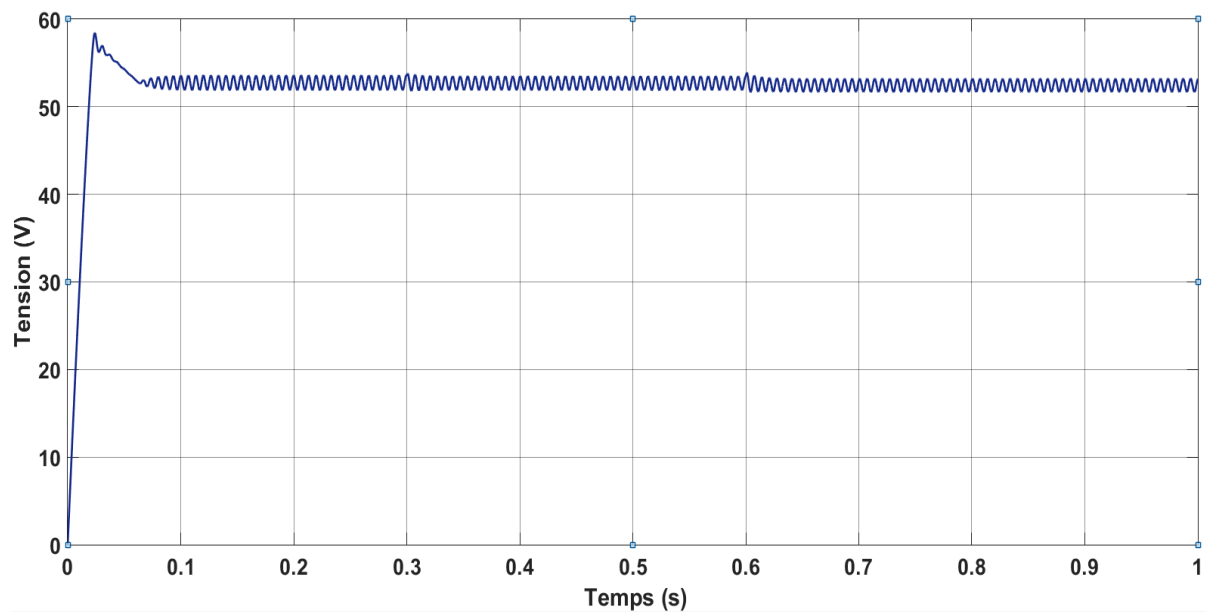


Figure IV. 10: tension du panneau.

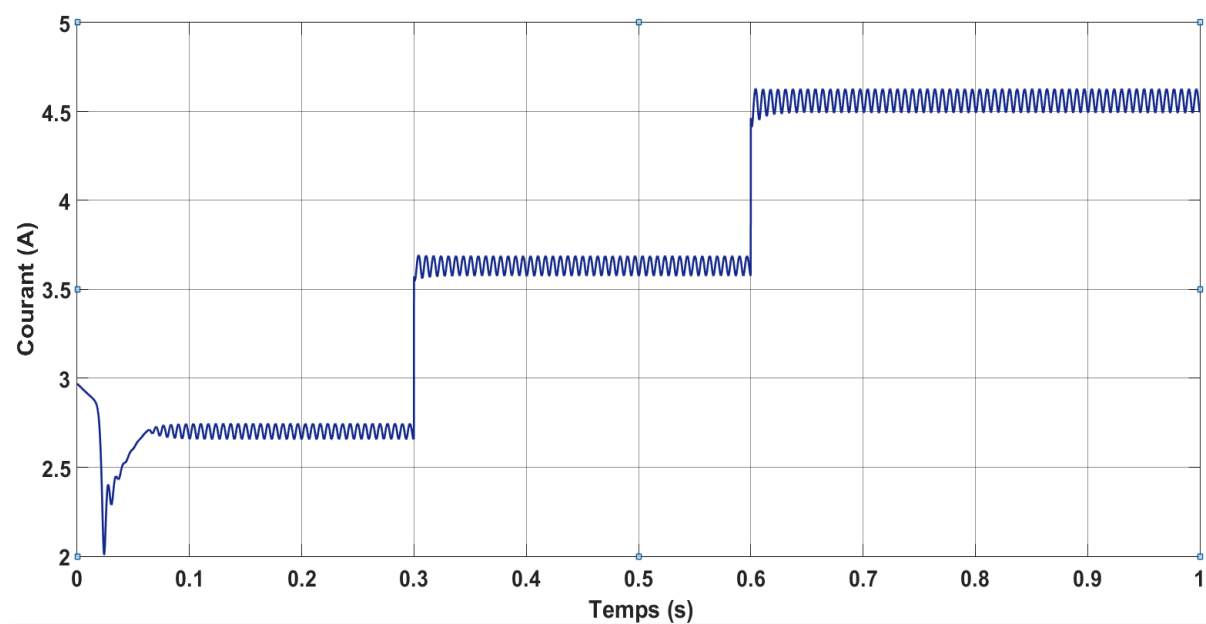


Figure IV. 11: courant du panneau.

IV.5 Interprétation des résultats obtenu aux changement brusque de l'éclairement avec une température fixe (25°C):

L'éclairement, c'est-à-dire la quantité de lumière solaire reçue par un panneau photovoltaïque, a une influence directe sur ses performances, notamment sur le courant, la tension et la puissance générée.

IV.5.1 Influence de l'éclairement sur le courant (I):

Le courant produit par un panneau photovoltaïque est proportionnel à l'éclairement. Cela signifie que plus l'éclairement est important, plus le courant augmente. En effet, chaque photon de lumière qui frappe la cellule photovoltaïque génère un courant en créant une paire électron-trou. Donc, si l'éclairement augmente, le nombre de photons reçus augmente aussi, ce qui produit plus de courant. Par exemple, si l'éclairement double, le courant du panneau double également, toutes choses égales par ailleurs.

IV.5.2 Influence de l'éclairement sur la tension (V):

La tension est moins influencée par l'éclairement que le courant. En général, la tension augmente légèrement avec l'éclairement, mais ce changement n'est pas aussi marqué que celui du courant. En effet, la tension dépend principalement des propriétés des matériaux semi-conducteurs qui composent la cellule, et non directement du nombre de photons reçus. Cependant, une diminution de l'éclairement peut entraîner une légère baisse de la tension, mais celle-ci reste relativement stable par rapport au courant.

IV.5.3 Influence de l'éclairement sur la puissance (P):

La puissance d'un panneau photovoltaïque est le produit du courant et de la tension. Puisque le courant augmente proportionnellement à l'éclairement et que la tension reste relativement stable, la puissance augmente significativement avec l'éclairement. Lorsqu'un panneau fonctionne sous un éclairement maximal, il atteint sa puissance de sortie maximale. À l'inverse, sous un éclairement faible, même si la tension est toujours présente, la réduction du courant entraîne une baisse significative de la puissance totale.

l'éclairément joue un rôle crucial dans le fonctionnement et l'efficacité d'un panneau photovoltaïque.

le tableau IV.2 illustre les différentes valeurs de paramètre du panneau au changement d'éclairément

Eclairément G	Puissance (W)	courant (A)	tension (V)
G=600	142.6	2.6	52.7
G=800	191.2	3.6	52.7
G=1000	239.5	4.5	52.7

Tableau IV.2: les caractéristiques a la sortie du panneau pour différentes valeurs de l'éclairément.

IV.5.4 l'influence de l'éclairément sur le fonctionnement de la technique de suivi du point de puissance optimal (PO):

La méthode de suivi du point de puissance maximale (MPPT) par perturbation et observation (P&O) se manifeste de manière significative lors d'une augmentation soudaine de l'ensoleillement, ce qui entraîne une élévation de la puissance générée par le panneau solaire. Dans cette situation, l'algorithme précédent interprète cette hausse comme une conséquence de la perturbation antérieure et continue d'ajuster ses paramètres dans la même direction. Cette réaction peut être problématique, car elle risque d'éloigner le système du véritable point de puissance maximale (MPP).

Ce phénomène persiste jusqu'à ce que les conditions d'ensoleillement se stabilisent, moment auquel l'algorithme peut alors corriger sa trajectoire et revenir vers le MPP réel. Cependant, cette approche peut entraîner des oscillations indésirables et une inefficacité dans l'extraction de la puissance, particulièrement dans des environnements où l'ensoleillement varie rapidement.

IV.6 Réponse des techniques MPPT au changements brusque de température avec un éclairement fixe (1000W/m²)

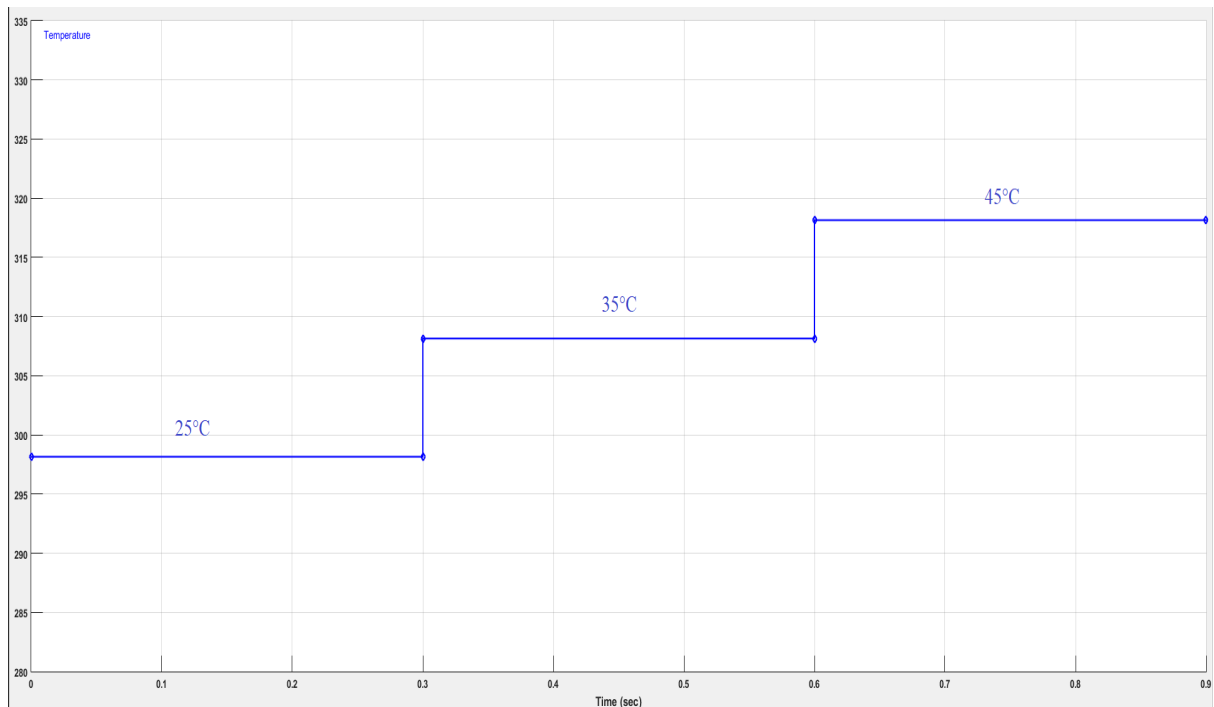


Figure IV.12: profile de la température

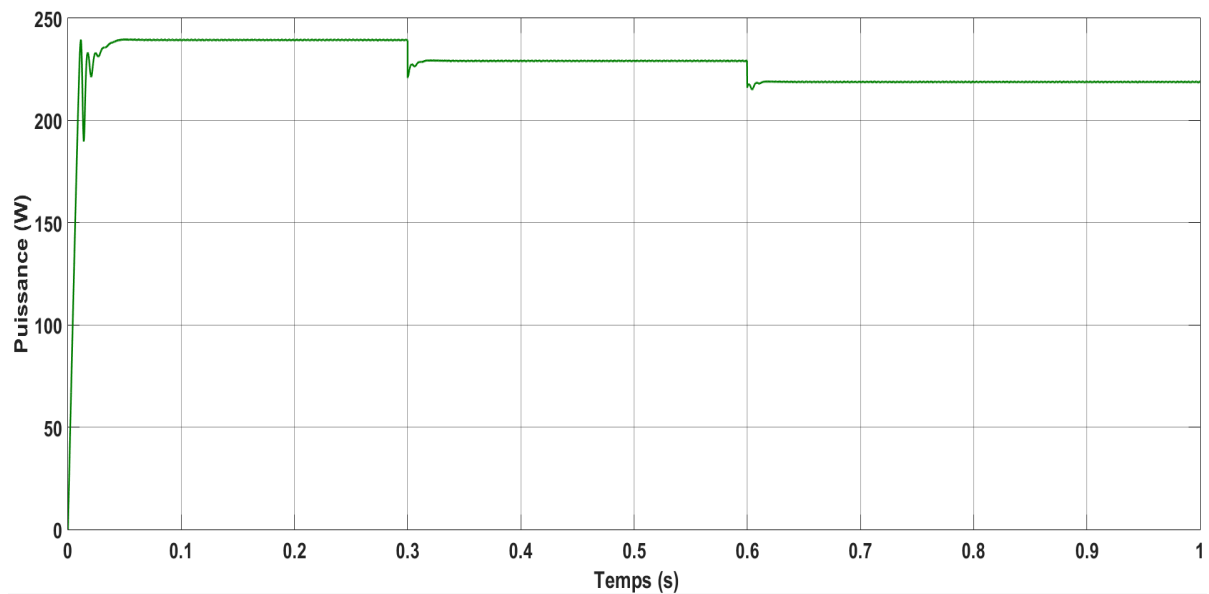


Figure IV. 13: puissance du panneau.

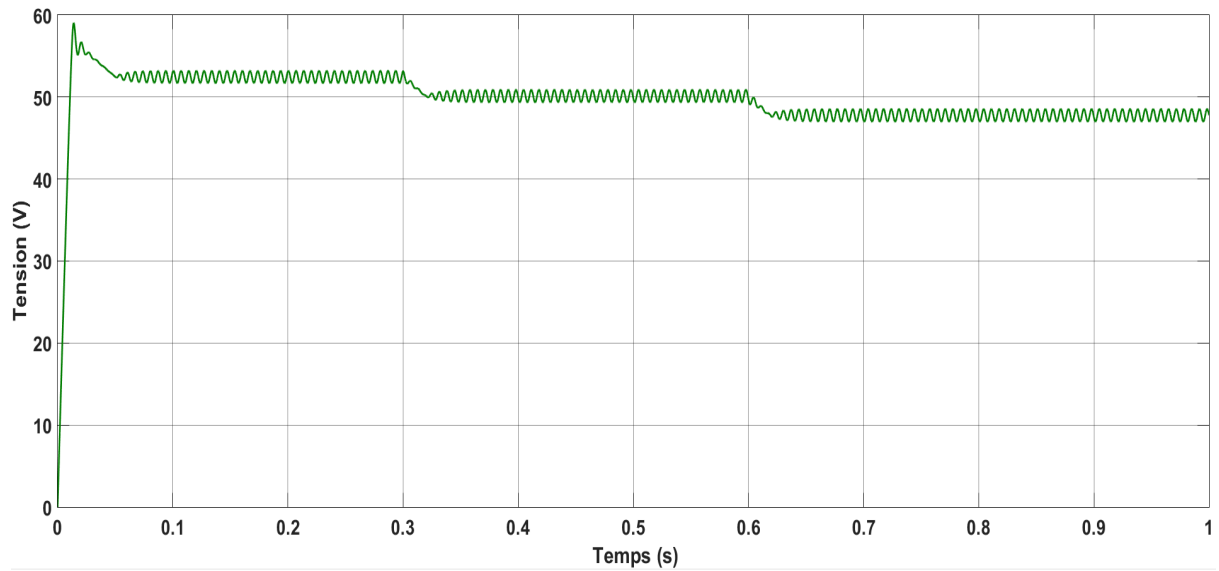


Figure IV. 14:tension du panneau.

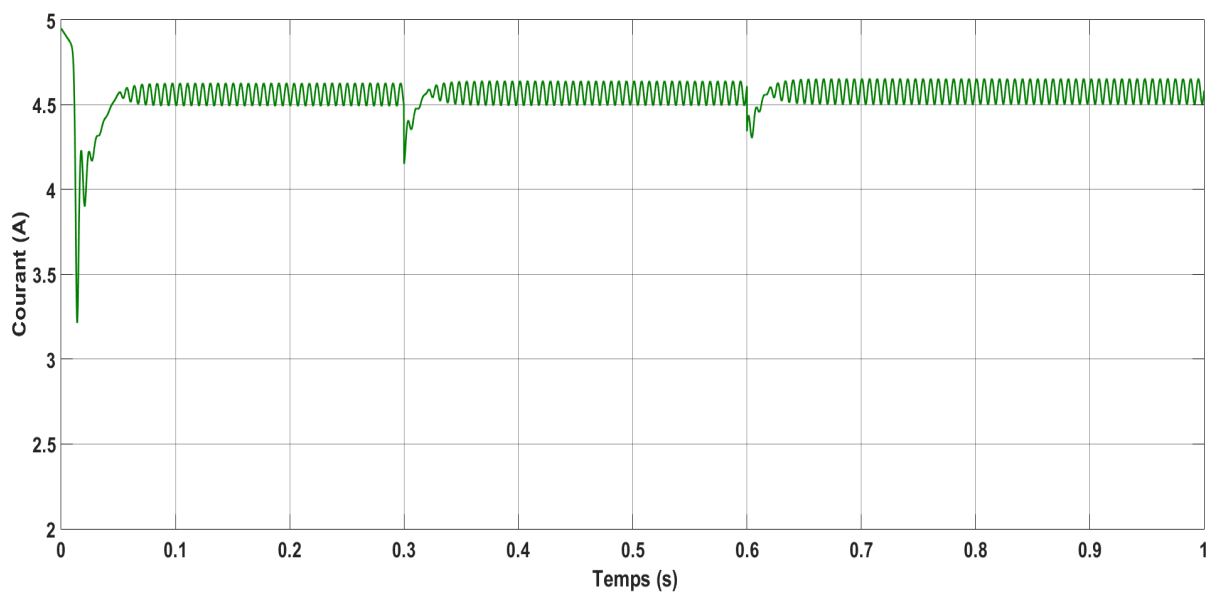


Figure IV. 15: courant du panneau.

IV.7 Interpretation des résultats obtenus au changement de la température sur le panneau:

La température influence de manière significative les performances d'un panneau photovoltaïque.

IV.7.1 courant (I) : Lorsque la température augmente, le courant généré par le panneau augmente légèrement. Cela est dû à l'augmentation de l'énergie des électrons dans le matériau du panneau. Cependant, cette augmentation reste modeste et n'a pas un grand impact positif.

IV.7.2 La tension (V) : Contrairement au courant, la tension diminue à mesure que la température augmente. Les électrons, plus excités par la chaleur, ont du mal à maintenir une différence de potentiel élevée entre les bornes du panneau. Plus la température est élevée, plus la tension chute. Cette diminution est plus marquée que l'augmentation du courant.

IV.7.3 La puissance (P) : La puissance, définie comme le produit du courant et de la tension ($P = I \times V$), diminue avec la température. Bien que le courant augmente légèrement, la baisse de tension est bien plus significative, ce qui entraîne une réduction de la puissance totale produite par le panneau.

Température T(°C)	Puissance (W)	Courant (A)	Tension (V)
T=25	239.5	4.5	52.7
T=35	229.3	4.5	50
T=45	218.7	4.5	47.7

Tableau IV.3: les caractéristiques à la sortie du panneau pour différentes valeurs de température.

IV.7.4 l'influence de la température sur le fonctionnement de la technique de suivi du point de puissance optimal (PO):

Le changement brusque de température a un impact significatif sur le fonctionnement de la technique de suivi du point de puissance maximale (MPPT) par perturbation et observation (P&O). Lorsque la température des panneaux photovoltaïques (PV) varie rapidement, cela affecte directement leur tension et leur courant, modifiant ainsi le point de puissance maximale (MPP).

Effets de la température sur la technique P&O :

Diminution de la tension : Une augmentation rapide de la température entraîne une réduction de la tension générée par les cellules photovoltaïques. Cela peut induire l'algorithme P&O à ajuster ses paramètres dans une direction qui ne correspond plus au MPP, entraînant une perte d'efficacité.

Réaction retardée : L'algorithme P&O, basé sur des mesures antérieures, peut réagir lentement aux changements brusques de température. Pendant cette période d'adaptation, le système peut osciller autour du MPP sans jamais l'atteindre efficacement, ce qui engendre des pertes d'énergie.

Oscillations autour du MPP : En raison des variations thermiques rapides, l'algorithme peut être confus et continuer à ajuster le point de fonctionnement dans une direction incorrecte. Cela se traduit par des oscillations autour du MPP, ce qui réduit l'efficacité globale du système.

En conclusion : l'augmentation de la température réduit l'efficacité globale du panneau solaire. La légère augmentation du courant ne compense pas la chute importante de la tension, ce qui réduit la puissance produite.

IV.8 Adaptabilité de l'Algorithme PO aux Variations Environnementales:

Dans l'ensemble, l'algorithme PO démontre une efficacité remarquable face aux variations brusques de température et d'éclairement. En effet, il parvient à s'adapter rapidement à ces changements, ce qui est essentiel pour garantir des résultats fiables dans des environnements fluctuants. Les analyses montrent que l'algorithme maintient une performance optimale, même lorsque les conditions environnementales évoluent de manière

significative. Cela souligne non seulement sa robustesse, mais aussi sa capacité à intégrer des données en temps réel pour ajuster ses prédictions, renforçant ainsi sa pertinence dans des applications pratiques.

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode de gestion autonome de l'énergie pour alimenter une petite maison à l'aide d'un système photovoltaïque. Afin d'optimiser la production d'énergie, nous avons utilisé la méthode MPPT pour identifier le point de puissance maximale en temps réel.

Nous avons d'abord appliqué la méthode conventionnelle "Perturbe et Observe" (P&O), qui s'est avérée efficace en cas de variations rapides de l'irradiance. Toutefois, sa simplicité nous a permis de l'exploiter pour des améliorations, notamment en ajustant le pas de variation.

Conclusion générale

Conclusion générale:

Ce travail présente une étude approfondie sur l'optimisation des performances d'un système photovoltaïque en utilisant la méthode MPPT basée sur l'algorithme de Perturbation et Observation (P&O). L'objectif principal était d'extraire la puissance maximale du panneau solaire tout en s'adaptant aux variations des conditions climatiques telles que l'ensoleillement et la température.

Une modélisation mathématique détaillée d'une cellule photovoltaïque a été réalisée et validée par simulation sous Matlab/Simulink en utilisant un modèle de panneau UNISUN 80.12M. Cette simulation a permis d'étudier en profondeur l'effet du changement des conditions climatiques sur les caractéristiques électriques $I(V)$ et $P(V)$ du panneau. Les résultats ont clairement montré la nature non-linéaire du système qui présente un seul point de puissance maximum. De plus, il a été observé que la puissance augmente de manière significative avec l'augmentation de l'ensoleillement ou la diminution de la température.

L'algorithme MPPT P&O a été intégré dans un système composé d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur survolteur "boost" et d'une charge continue résistive. Les résultats de simulation ont démontré que la méthode P&O atteint avec succès le point de puissance maximum sous les conditions STC (Standard Test Conditions). Nous avons également testé l'algorithme avec différents pas de calcul ainsi que sous divers niveaux d'éclairement et de température.

L'algorithme P&O présente plusieurs avantages notables : sa simplicité d'implémentation nécessitant peu de composants matériels, son efficacité dans des conditions variables en suivant efficacement les changements rapides des conditions d'ensoleillement et de température. Son fonctionnement repose sur un processus itératif de perturbation et d'observation permettant au système de converger vers le point de puissance maximum, même en cas de changement brusque des conditions climatiques.

Dans notre système, nous avons intégré également des batteries au plomb pour le stockage d'énergie. Celles-ci fonctionnent de manière autonome, soutenant le panneau lorsque l'énergie est insuffisante, notamment dans des conditions défavorables.

D'après les résultats de simulation, nous pouvons conclure qu'avec l'algorithme P&O, le panneau photovoltaïque est capable de fournir la puissance maximale de manière efficace. Cette méthode présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et peu coûteuse, ce qui en

Conclusion generale

fait un choix populaire pour de nombreux systèmes. De plus, l'algorithme P&O s'adapte aux variations des conditions d'ensoleillement et de température, permettant ainsi d'atteindre le point de puissance maximum de manière satisfaisante.

Bien qu'il puisse présenter certains défis liés aux oscillations autour du MPP et à sa réactivité lors des changements brusques d'éclairement, il reste une solution intéressante pour l'optimisation des systèmes photovoltaïques grâce à sa simplicité d'implémentation et son faible coût.

Parmi les perspectives envisagées, on peut citer l'application de l'algorithme P&O sur plusieurs panneaux solaires en parallèle, l'exploration d'autres techniques d'optimisation tout en se concentrant sur l'utilisation continue de l'algorithme P&O classique, ainsi que l'implémentation matérielle des techniques MPPT simulées afin de valider les résultats obtenus par simulation dans des conditions réelles.

Bibliographie:

- [1]:Cherifi, S., & Haddad, M. L'énergie solaire : un moteur du développement durable en Algérie. *Les Cahiers du Cread*, 35(3), 95-102. (2020)
- [2]:Hussein, K. H., Muta, I., Hoshino, T., & Osakada, M. Maximum power point tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *IEEE Proceedings on Generation, Transmission, and Distribution*, 142(1), 59-64. (1995)
- [3]:Abdelmalek Bouden, « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de magistère, Université de Constantine, Algérie 2008.
- [4]:Tyson, Neil deGrasse. *Astrophysics for People in a Hurry*. 2 juin 2017.
- [5]:M. Andrew E. H. *Introduction to Modern Astrophysics*.2017 page 34.
- [6]:Santé Canada "Qu'est-ce que le rayonnement ultraviolet?" *Canada.ca*, Gouvernement du Canada.,2021
- [7]:Peake, Stephen, et Godfrey Boyle. *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. Oxford University Press, 2018
- [8]:World Economic Forum. "Can you solar charge your electric vehicle? Yes, say experts." *World Economic Forum*, 2021
- [9]:National Renewable Energy Laboratory. "Solar Photovoltaic Technology Basics."
- [10]:A. E. Becquerel, "Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires", *Annalen der Physik und Chemie*, vol. 54, pp. 35-42, 1841.
- [11]:Nave, Rod. "Doping of Semiconductors." *HyperPhysics*, Georgia State University,
- [12]:"Chapter 6: Diodes." *Fundamentals of Electrical Engineering*. 2nd ed. New York, New York: Oxford UP, 1996. 352-54
- [13]:Couleur Science. "C'est quoi un semi-conducteur?" *Couleur Science*
- [14]:Mathieuco. "Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque." *BCLT Énergie*, 26 mai 2017.
- [15]:Elsevier."Solar Energy Materials and Solar Cells".
- [16]:Khenfous, Soumia, et Abdelhamid Kaabeche. "Optimisation du dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/éolien par des méthodes méta-heuristiques." *Juin 2017*.
- [17]:Planas, Oriol. "Installation photovoltaïque raccordée au réseau électrique." *L'énergie solaire*, 21 mars 2017
- [18]:Solaire Offgrid. "Devenir autonome en électricité grâce au solaire photovoltaïque."15 octobre 2019

- [19]:Zerfaoui, Hana. "Etude, analyse et optimisation des propriétés des matériaux à couches minces pour les applications photovoltaïques." Thèse de doctorat, Université de Larbi Tébessi–Tébessa, 2020.
- [20]:Djoudi, H., Benyahia, N., Badji, A., Bousbaine, A., Moualek, R., Aissou, S., & Benamrouche, N. Simulation and Experimental Investigation into a Photovoltaic and Fuel Cell Hybrid Integration Power System for a Typical Small House Application. *Electric Power Components and Systems*, 48(14-15), 1598-1613. (2020)
- [21]:Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198–1208. (2009)
- [22]:Electronique1. "Ensemble panneau-batterie." *Electronique1*, 5 mars 2011.
- [23]:Derbeli, M., Napole, C., & Barambones, O. "A Fuzzy Logic Control for Maximum Power Point Tracking Algorithm Validated in a Commercial PV System." *Renewable Energy*, 206, 509-520. (2023)
- [24]:Sheikh, Ahmed. "What is Maximum Power Point Tracking, and how does it work?" *CircuitBread*, July 31, 2023
- [25]:Elmelegi A, Emad A Study of different PV systems configurations case study: Aswan utility study of different PV systems configurations case study: Aswan Utility Company. In: 17th international middle east power systems conference. (2015)
- [26]:Abbes, H., Abid, H., Loukil, K., Toumi, A & Abid, M. Étude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque. *Revue des Energies Renouvelables*, 17(3), 435-445.(2014)
- [27]:BEN YAHOUBOUB, Yazid & AOURAR, Oussama. *Modélisation et simulation d'un hacheur entrelacé par multi-modèle flous*. Mémoire de Master, Université de Biskra