

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

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

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electromécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

Par

ZOUGHAM TAKI EDDINE

Intitulé

Etude et Commande MPPT d'un système photovoltaïque

Soutenu le : 28/06/2026

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>KHENFER Riad</i>	<i>Pr</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>MEDJMADJ Slimane</i>	<i>Pr</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>SLAMA Fateh</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année universitaire 2025/2026

Remerciements

*Avant tout, je remercie Dieu Tout-Puissant qui a éclairé mon chemin
et m'a donné la force et la volonté nécessaires pour réaliser ce
travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, le
Professeur MEDJMADJ Slimane, pour son encadrement, ses précieux
conseils et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce
mémoire. Je lui adresse mes sincères remerciements ainsi que
l'expression de mon profond respect.*

*Je remercie également tous les enseignants qui ont contribué à ma
formation, ainsi que les membres du jury qui ont accepté d'examiner
et d'évaluer ce travail.*

*Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes
qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.*

Dédicaces

Je dédie ce travail à tous les membres de ma famille, en particulier à mon père, à ma mère, à mes frères ainsi qu'à toute la famille ZOUGHAM.

Je dédie également ce travail à tous mes amis qui m'ont accompagné et soutenu tout au long de mon parcours universitaire.

Nomenclatures

IR	Rayonnement infrarouge
UV	Rayonnement ultraviolet
ZCE	La zone de charge d'espace
FF	Facteur de forme
MPPT	Maximum Power Point Tracking
CA	Courant alternatif
CC	Courant continu
I	Courant fourni par la cellule
V	Tension à la borne de la cellule
D	Diode matérialisant
I_{ph}	Le photo-courant
I_s	Le courant de saturation de diode
R_s	Résistance série
R_{sh}	Résistance shunt
V_t	Tension thermique de la diode
$T(K)$	La température
N	Le facteur d'idéalité de diode
Kb	La constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$)
q	La charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
I	Le courant fourni par la cellule
V	La tension aux bornes de la cellule
I_{s1}	Courant de saturation de la diode1
I_{s2}	Courant de saturation de la diode2
n_1	Le facteur de non idéalité de la jonction de la diode1
n_2	Le facteur de non idéalité de la jonction de la diode2
V_i	La tension d'entrée
V_s	La tension de sortie
D	Le rapport cyclique du convertisseur

I_L	Courant de l'inductance
V_L	Tension aux bornes de l'inductance
L	Inductance
C	Capacité du condensateur
I_s	Courant de sortie
R_{ch}	Résistance de charge
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PPM	Point de Puissance Maximale
η_{MPPT}	Rendement de la commande MPPT
P_{eff}	Puissance effective délivrée par le générateur photovoltaïque
P_{max}	Puissance maximale du générateur photovoltaïque
P_{in}	Puissance d'entrée du générateur photovoltaïque
GPV	Générateur Photovoltaïque
PV	Photovoltaïque
V_{coN_s}	La somme des tensions en circuit ouvert
N_s	Cellules en série
I_{ccN_s}	Le courant de court-circuit de N_s cellules en série
I_{ccN_p}	La somme des courants de court-circuit
N_p	Cellule en parallèle
V_{coN_p}	La tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle
P&O	Perturbation et observation
INC	Incrément des conductances
V_{PV}	Tension du générateur photovoltaïque
I_{PV}	Le courant du générateur photovoltaïque
V_{co}	La tension du circuit ouvert
V_{opt}	La tension optimale
I_{opt}	Le courant optimal
I_{cc}	Le courant de court-circuit

Liste des figures

Figure 1. 1	Production solaire photovoltaïque.....	4
Figure 1. 2	Rayonnement solaire et ses composantes.....	5
Figure 1. 3	Processus de fabrication d'une cellule photovoltaïque en silicium.....	6
Figure 1. 4	Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin	7
Figure 1. 5	Principe de la conversion photovoltaïque	8
Figure 1. 6	Types de cellules photovoltaïques.....	9
Figure 1. 7	Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes	10
Figure 1. 8	Configuration du système hybride à bus continu	11
Figure 1. 9	Système Photovoltaïque Raccordé au Réseau.....	12
Figure 1. 10	Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à une diode	13
Figure 1. 11	Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à deux diodes.....	15
Figure 1. 12	Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'un panneau PV : (a) Courant-tension ; (b) Puissance-tension	16
Figure 1. 13	Influence de la température sur les caractéristiques électriques d'un panneau PV : (a) Courant-tension ; (b) Puissance-tension	17
Figure 1. 14	Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_S cellules en série	18
Figure 1. 15	Caractéristique $I(V)$ pour l'association série sous MATLAB Simulink.....	19
Figure 1. 16	Branchement en série des panneaux PV	19
Figure 1. 17	Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle	20
Figure 1. 18	Caractéristique $I(V)$ pour l'association parallèle sous MATLAB Simulink..	20
Figure 1. 19	Branchement parallèle des panneaux PV	20
Figure 1. 20	Caractéristique correspondants à l'association / série parallèle de modules pour l'association parallèle sous MATLAB Simulink	21
Figure 1. 21	Branchement série parallèle des panneaux PV	22
Figure 2. 1	Schéma de base d'un convertisseur Buck	26
Figure 2. 2	Schéma du Buck (K fermé)	26
Figure 2. 3	Schémas de base d'un convertisseur Boost.....	27

Figure 2. 4 Schéma du Boost (S fermé).Schéma du Boost (S fermé)	28
Figure 2. 5 Schéma du Boost (K ouvert)	28
Figure 2. 6 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.....	29
Figure 2. 7 La courbe de puissance-tension du panneau solaire.....	31
Figure 2. 8 Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation.....	32
Figure 2. 9 Caractéristique P(V) du module photovoltaïque	34
Figure 2. 10 Organigramme de la méthode InCond	35
Figure 2. 11 Organigramme de la méthode de mesure du VCO	37
Figure 2. 12 Organigramme de la méthode de mesure l'Icc.....	38
Figure 2. 13 Schéma de Simulation de la méthode P&O sous MATLAB Simulink.....	39
Figure 2. 14 Évolution des grandeurs électriques (Courant, Tension et Puissance) d'un générateur photovoltaïque sous commande MPPT P&O	40
Figure 2. 15 Eclairement du panneau photovoltaïque	41
Figure 2. 16 Évolution des grandeurs électriques du générateur photovoltaïque sous MPPT P&O lors d'une variation de l'éclairement.....	42
Figure 2. 17 Température du panneau photovoltaïque	43
Figure 2. 18 Évolution des grandeurs électriques du générateur photovoltaïque sous MPPT P&O lors d'une variation de la température	44
 Figure 3. 1 Exemple d'ombrage partiel d'un générateur photovoltaïque causé par un arbre	47
Figure 3. 2 l'impact de l'ombrage partiel sur la production d'un panneau photovoltaïque.	48
Figure 3. 3 Caractéristique I-V du module PV TSM250-PA05.08 sous conditions standards d'essai	50
Figure 3. 4 Caractéristique I-V d'un champ de modules PV TSM250-PA05.08 avec variation d'irradiation	51
Figure 3. 5 Caractéristique I-V d'un champ de modules TSM250-PA05.08 avec variation de température	51
Figure 3. 6 Schéma de circuit du convertisseur DC/DC BOOST	52
Figure 3. 7 Schéma Simulink du système PV étudié.....	53
Figure 3. 8 Température et Eclairement du panneau photovoltaïque PV2	54
Figure 3. 9 Évolution des grandeurs photovoltaïques sous la commande MPPT P&O dans des conditions normales de fonctionnement.....	55

Figure 3. 10 Température et Eclairement du panneau photovoltaïque PV2	56
Figure 3. 11 Évolution du générateur photovoltaïque sous la commande MPPT P&O en présence d'un ombrage partiel de 50 %.....	57
Figure 3. 12 Schéma de simulation de la commande MPPT P&O sous ombrage partiel ..	59
Figure 3. 13 Schéma block d'évolution de l'irradiance du panneau solaire 2.....	59
Figure 3. 14 Évolution de l'éclairement du panneau photovoltaïque PV2.....	59
Figure 3. 15 Évolution des grandeurs photovoltaïques sous la commande MPPT P&O en conditions d'ombrage partiel	60

Liste des tableaux

Tableau 3. 1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque Trina Solar TSM-250PA05.08	49
Tableau 3. 2 Spécifications électriques du module TSM-250PA05.08 dans des conditions de test standard	49
Tableau 3. 3 Caractéristiques électriques du module TSM-250PA05.08 à la température nominale de fonctionnement	49
Tableau 3. 4 Coefficients de température du module TSM-250PA05.08	50
Tableau 3. 5 Paramètres des composants du convertisseur BOOST	52

Table des matières

Remerciements
Dédicaces
Nomenclature
Liste des figures
Liste des tableaux
Sommaire

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

Chapitre 01 Généralités sur les systèmes photovoltaïques

1.1. Introduction.....	3
1.2. Historique de l'effet photovoltaïque	3
1.3. Généralités sur l'énergie solaire.....	4
1.3.1. Définition de l'énergie solaire.....	4
1.3.2. Le rayonnement solaire	4
1.4. Cellule solaire photovoltaïque	6
1.4.1. Technologie des cellules solaires	6
1.4.2. Fabrication des cellules photovoltaïques.....	6
1.4.3. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque	7
1.4.4. Les différents types de cellules solaires	8
1.4.4.1. Cellules monocristallines	8
1.4.4.2. Cellules polycristallines	9
1.4.4.3. Cellules amorphes	9
1.5. Différents types de systèmes photovoltaïques	9
1.5.1. Les systèmes autonomes	10
1.5.2. Les systèmes hybrides.....	11
1.5.3. Les systèmes raccordés aux réseaux	12
1.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	12
1.6.1. Modèle à une seule diode	13
1.6.2. Modèle à deux diodes.....	14
1.7. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques électriques	16
1.7.1. Influence de l'éclairement solaire	16
1.7.2. Influence de la température	17
1.8. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	18
1.8.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Série.....	18
1.8.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle	19

1.8.3.	Association hybride (en série et en parallèle)	21
1.9.	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	22
1.9.1.	Les avantages de l'énergie photovoltaïque	22
1.9.2.	Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque	22
1.10.	Conclusion	23

Chapitre 02 Convertisseurs DC-DC et commande MPPT dans les systèmes photovoltaïques

2.1.	Introduction.....	24
2.2.	Convertisseur DC/DC	24
2.2.1.	Convertisseur abaisseur (Buck).....	25
2.2.1.1.	Principe de fonctionnement du convertisseur abaisseur (Buck)	26
2.2.2.	Convertisseur élévateur (Boost)	27
2.2.2.1.	Principe de fonctionnement du convertisseur élévateur (Boost).....	27
2.3.	La commande MPPT	28
2.4.	Principe de fonctionnement de la commande MPPT	29
2.5.	Critères d'évaluation d'une commande MPPT	29
2.6.	Les techniques de recherche du point de puissance maximale les plus utilisées... 30	
2.6.1.	La méthode Perturbation et Observation (P&O).....	30
2.6.1.1.	Avantages et inconvénients de l'algorithme P&O.....	33
2.6.2.	La méthode Incrément des conductances (INC)	33
2.6.2.1.	Avantages et inconvénients de l'algorithme INC	36
2.6.3.	La méthode basée sur la mesure de la tension du circuit ouvert.....	36
2.6.3.1.	Avantages et inconvénients de de l'algorithme VCO	37
2.6.4.	La méthode à base de la mesure du courant de court-circuit	38
2.6.4.1.	Avantages et inconvénients de de l'algorithme ICC.....	38
2.7.	Résultats de simulation	39
2.7.1.	Influence de l'éclairement sur les performances du système photovoltaïque avec MPPT P&O	41
2.7.2.	Influence de la température sur les performances du système photovoltaïque avec MPPT P&O	43
2.8.	Conclusion	45

Chapitre 03 Analyse et simulation des performances d'un système photovoltaïque sous ombrage partiel avec la technique MPPT P&O

3.1.	Introduction.....	46
3.2.	Généralités sur l'ombrage partiel dans les systèmes photovoltaïques	46
3.2.1.	Définition de l'ombrage partiel	46
3.2.2.	Impact de l'ombrage	47
3.2.3.	Moyens de réduction des effets de l'ombrage.....	48
3.3.	Caractéristiques du champ PV	48
3.4.	Paramètres du convertisseur Boost	52
3.5.	Résultats de simulation	53
3.5.1.	Évaluation des performances de la commande MPPT P&O dans des conditions normales.....	53
3.5.2.	Étude du comportement de la commande MPPT P&O sous un ombrage partiel de 50 % ($G_{pv2} = 500 \text{ W/m}^2$)	56
3.5.3.	Étude de la commande MPPT P&O sous ombrage partiel et retour aux conditions normales.....	58
3.6.	Conclusion	61
	Conclusion générale	63

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie constitue un facteur essentiel du développement économique et social. La croissance démographique, l'industrialisation et l'augmentation du niveau de vie ont entraîné une hausse importante de la demande énergétique. Cependant, l'épuisement progressif des ressources fossiles et leurs effets néfastes sur l'environnement, notamment les émissions de gaz à effet de serre, encouragent le recours aux énergies renouvelables.

Parmi ces énergies, l'énergie solaire photovoltaïque occupe une place importante grâce à sa disponibilité, son caractère inépuisable et son faible impact environnemental. Elle repose sur la conversion directe du rayonnement solaire en énergie électrique à l'aide de cellules photovoltaïques. Cette technologie est particulièrement adaptée à l'Algérie, qui bénéficie d'un fort potentiel solaire.

Ce mémoire de fin d'études porte sur l'étude et la modélisation d'un système photovoltaïque associé à un convertisseur DC/DC de type Boost. Afin d'optimiser l'énergie produite par le générateur photovoltaïque, une commande de suivi du point de puissance maximale (MPPT) a été mise en œuvre. Cette technique permet d'extraire en permanence la puissance maximale disponible malgré les variations des conditions climatiques.

Dans ce travail, plusieurs méthodes MPPT ont été étudiées sur le plan théorique, tandis que la méthode Perturbation et Observation (P&O) a été retenue pour notre étude en simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente les notions fondamentales des systèmes photovoltaïques. Il aborde le principe de l'effet photovoltaïque, les différentes technologies des cellules photovoltaïques, leur modélisation électrique ainsi que l'influence de l'irradiance et de la température sur leurs performances.

- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la commande MPPT des systèmes photovoltaïques. Les convertisseurs DC/DC, notamment les structures Buck et Boost, sont présentés, ainsi que les principales méthodes de recherche du point de puissance maximale telles que les techniques P&O, INC, la méthode de la tension de circuit ouvert et celle du courant de court-circuit. De plus, une étude de l'influence des variations de la température et de l'irradiance sur le fonctionnement de la commande MPPT P&O a été réalisée afin d'analyser leurs effets sur la performance et la stabilité du système photovoltaïque.
- Le troisième chapitre traite de l'impact de l'ombrage partiel sur les performances d'un système photovoltaïque. Après une présentation des effets de l'ombrage partiel et des moyens de les atténuer, une modélisation du système photovoltaïque associé à la commande MPPT P&O est réalisée sous MATLAB/Simulink. Plusieurs scénarios de fonctionnement sont ensuite simulés afin d'évaluer les performances de la commande dans différentes conditions d'irradiance.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale qui récapitule les principaux résultats obtenus et présente quelques perspectives pour des travaux futurs.

Chapitre 01

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Chapitre 01

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

1.1. Introduction

La chaîne de conversion de l'énergie solaire photovoltaïque repose sur la transformation directe d'une partie du rayonnement lumineux en énergie électrique, sous forme de tension et de courant. Ce processus est assuré par des cellules photovoltaïques, qui exploitent le phénomène physique appelé effet PV, grâce auquel une force électromotrice apparaît lorsqu'elles sont exposées à la lumière [1]

Un système photovoltaïque est généralement constitué de plusieurs éléments, notamment des modules photovoltaïques, un convertisseur élévateur (régulateur), une batterie de stockage, ainsi qu'un hacheur lorsque la charge est en courant continue. Dans le cas d'une alimentation en courant alternatif triphasé, un onduleur est également intégré afin d'assurer la conversion de l'énergie électrique.

1.2. Historique de l'effet photovoltaïque

En 1839, Antoine-César Becquerel met en évidence les effets électriques produits par les rayons solaires dans une cellule électrochimique, marquant ainsi les premiers travaux liés au phénomène photovoltaïque. En 1905, Einstein explique l'effet photoélectrique en introduisant la notion de quanta de lumière, dont l'énergie est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique. L'utilisation des cellules solaires débute réellement dans les années 1940, notamment en raison des besoins du domaine spatial en sources d'énergie autonomes, sans combustible embarqué, ce qui intensifie les recherches sur le photovoltaïque. En 1954, les laboratoires Bell réalisent la première cellule photovoltaïque au silicium avec un rendement d'environ 4 %. À cette époque, l'espace devient le principal banc d'essai de cette technologie. Toutefois, les coûts de fabrication élevés et les rendements encore faibles limitent son développement à grande échelle. Ce n'est qu'à partir des années 1970 que les gouvernements et les industriels commencent à investir significativement dans la technologie photovoltaïque [2].

1.3. Généralités sur l'énergie solaire

1.3.1. Définition de l'énergie solaire

L'énergie solaire provient des réactions de fusion nucléaire qui se produisent en continu au cœur du Soleil, au cours desquelles l'hydrogène est transformé en hélium, libérant ainsi d'importantes quantités d'énergie. Cette énergie, propre et renouvelable, est disponible en permanence et nous parvient sous deux formes principales : l'énergie lumineuse et l'énergie thermique.

L'être humain a développé de nombreuses applications pour exploiter au mieux cette ressource, afin de répondre à la demande croissante en énergie.

Elle est notamment utilisée pour la production d'électricité, constituant une alternative sûre et respectueuse de l'environnement par rapport aux sources d'énergie conventionnelles [3].

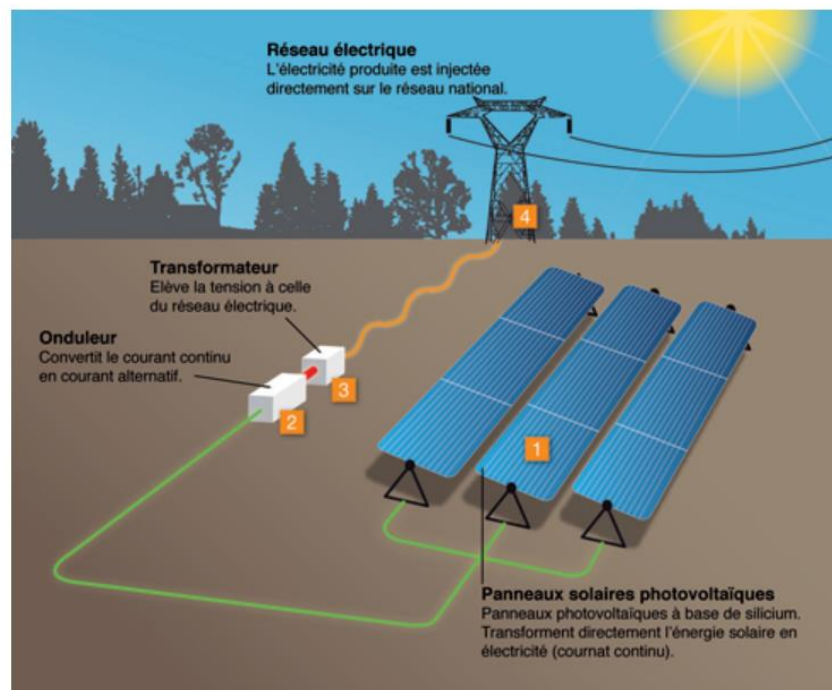


Figure 1. 1 Production solaire photovoltaïque

1.3.2. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire correspond à l'énergie émise par le Soleil sous forme d'ondes électromagnétiques, qui se propagent dans toutes les directions de l'espace. Une partie de ce rayonnement atteint la surface de la Terre directement après un trajet d'environ 8 minutes et 19 secondes. L'intensité de ce rayonnement est mesurée à l'aide d'un pyranomètre. Ce dernier consiste essentiellement en:

- Une lumière visible d'une longueur d'onde comprise entre 400 nm et 800 nm.

- Un rayonnement infrarouge (IR) d'une longueur d'onde supérieure à 800 nm.
- Un rayonnement ultraviolet (UV) d'une longueur d'onde inférieure à 400 nm.

L'atmosphère absorbe une grande partie du rayonnement infrarouge et ultraviolet IR. Plus près des pôles, les rayons sont plus inclinés : la même quantité d'énergie est répartie sur une plus grande surface. Pour cette raison, le rayonnement solaire diminue par unité de surface reçue de l'équateur vers les pôles (c'est à l'origine du phénomène des saisons avec l'inclinaison de l'axe de la terre).

- En changeant les jours et les nuits.
- En raison de la couverture nuageuse (cela réduit l'énergie solaire à 50%)
- Selon les fluctuations saisonnières.

Il existe plusieurs types de rayonnement

- Rayonnement direct : celui qui atteint la surface de la terre directement à partir du soleil qui tombe directement sans avoir aucune barrière la surface de la terre. Cela est basé sur l'épaisseur de l'atmosphère et de l'inclinaison des rayons vers le sol.
- Rayonnement diffus : Ce type de rayonnement présente le reste du rayonnement solaire absorbé et diffusé par l'atmosphère et les nuages.
- Rayonnement réfléchi : Ces rayons sont produits par la réflexion de la lumière sur les différents sols (eau, neige.) (figure 1.2) [4].

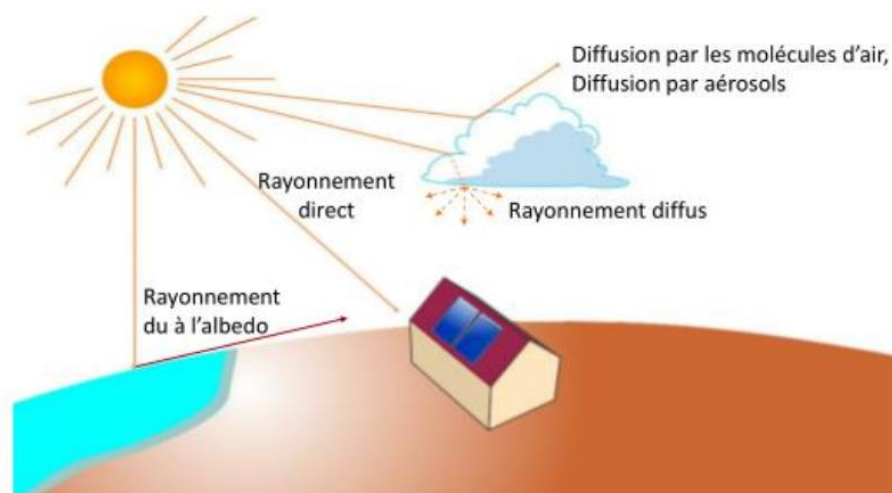


Figure 1. 2 Rayonnement solaire et ses composantes

1.4. Cellule solaire photovoltaïque

1.4.1. Technologie des cellules solaires

Le Silicium, l'un des minéraux les plus répandus sur Terre, se trouve sous forme de sable. Cependant, pour le transformer en cellule photovoltaïque, un niveau de pureté élevé est demandé et ce processus est onéreux. En fonction des technologies utilisées, le Silicium monocristallin affiche un rendement variant de 16 à 18%, le Silicium poly cristallin propose une efficacité de 13 à 15%, alors que l'efficacité du silicium amorphe se situe entre 5 et 10%. Des matériaux alternatifs comme l'arséniure de gallium (GaAs) et le tellure de cadmium (CdTe), déjà utilisés dans certaines applications industrielles, montrent une efficacité de 38% [5].

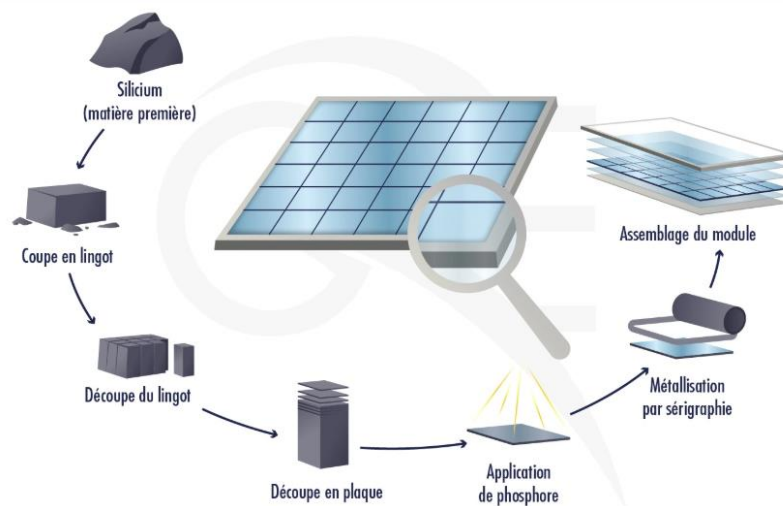


Figure 1. 3 Processus de fabrication d'une cellule photovoltaïque en silicium

1.4.2. Fabrication des cellules photovoltaïques

Le silicium est aujourd'hui le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques. Il est obtenu par réduction de la silice, qui est l'un des éléments les plus abondants dans la croûte terrestre, notamment présente dans le sable et le quartz.

La première étape consiste à produire du silicium dit métallurgique, d'une pureté d'environ 98 %, à partir de morceaux de quartz issus de galets. Ensuite, pour obtenir du silicium de qualité photovoltaïque, il est nécessaire de le purifier davantage jusqu'à atteindre une pureté supérieure à 99,999 %. Cette purification se fait par transformation du silicium en un composé chimique, qui est ensuite distillé avant d'être reconverti en silicium pur.

Le matériau obtenu est alors coulé sous forme de lingots, de section ronde ou carrée. Ces lingots sont découpés en fines plaques d'environ 200 micromètres d'épaisseur, appelées

wafers. Ces wafers subissent ensuite un dopage permettant d'obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N.

Enfin, une étape de métallisation est réalisée : des contacts métalliques sont déposés sur la surface afin d'assurer la circulation du courant électrique. Une fois cette étape terminée, les wafers deviennent des cellules photovoltaïques prêtes à être utilisées [5].



Figure 1. 4 Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

1.4.3. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur l'effet photovoltaïque, découvert par A. Becquerel en 1835 et expliqué par A. Einstein en 1905. Ce phénomène correspond à l'absorption de photons par un matériau, permettant la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Dans le cas des cellules photovoltaïques, le matériau utilisé est un semi-conducteur, généralement le silicium, et la source d'énergie est le rayonnement solaire.

L'absorption des photons entraîne la création de paires électron-trou. Les porteurs de charge ainsi générés sont ensuite séparés puis collectés afin de produire un courant électrique dans un circuit externe. Cette séparation est assurée par la jonction p-n, obtenue en juxtaposant deux régions de silicium dopées différemment : une région de type p, présentant un excès de trous grâce à un dopage par des éléments du groupe III (comme le bore), et une région de type n, caractérisée par un excès d'électrons dû à un dopage par des éléments du groupe V (comme le phosphore).

En général, la région de type p constitue la base de la cellule et est faiblement dopée (de l'ordre de 10^{16} cm^{-3}), tandis que la région de type n, plus mince, est fortement dopée (supérieure à 10^{20} cm^{-3}) et forme l'émetteur.

La jonction des deux zones crée un champ électrique interne ainsi qu'une zone de déplétion appelée zone de charge d'espace (ZCE), dépourvue de porteurs libres.

Lorsque la lumière est absorbée, un électron de la bande de valence est excité vers la bande de conduction, laissant un trou derrière lui. Les paires électron-trou générées en dehors de la ZCE diffusent dans le matériau jusqu'à atteindre cette zone ou se recombiner. Celles atteignant la ZCE sont séparées par le champ électrique interne : les électrons sont dirigés vers la région n et les trous vers la région p.

Les charges ainsi séparées sont collectées par des contacts métalliques situés sur les faces de la cellule, ce qui permet la circulation d'un courant électrique. Ainsi, la cellule photovoltaïque transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique [6].

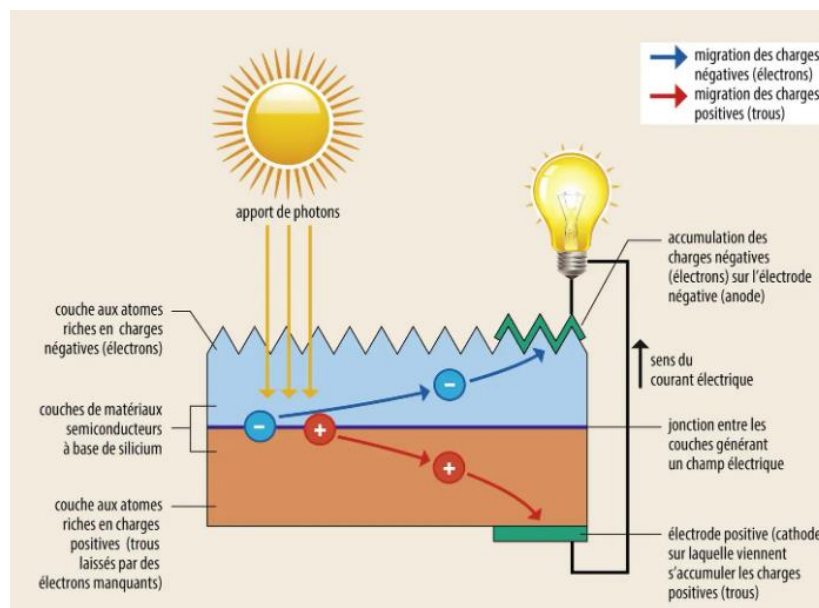


Figure 1. 5 Principe de la conversion photovoltaïque

1.4.4. Les différents types de cellules solaires

On distingue plusieurs types de cellules photovoltaïques, chacun présentant des caractéristiques distinctes en termes de rendement et de coût.

Cependant, peu importe la technologie employée, leur performance globale demeure assez restreinte par rapport à l'énergie solaire captée. On identifie principalement trois principales catégories de cellules photovoltaïques [7]:

1.4.4.1. Cellules monocristallines

Ces cellules présentent généralement un rendement plus élevé mais un coût élevé due à leur fabrication complexe.

- Un taux de rendement excellent (16-18%) (23% en Laboratoire).
- Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur [7].

1.4.4.2. Cellules polycristallines

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible.

- Coût de production moins élevé.
- Procédé nécessitant moins d'énergie.
- Rendement 13-15% (18% en Labo) [7].

1.4.4.3. Cellules amorphes

Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé.

- Rendement plus bas : 5-10% (13% en labo).
- Durée de vie plus faible [6].

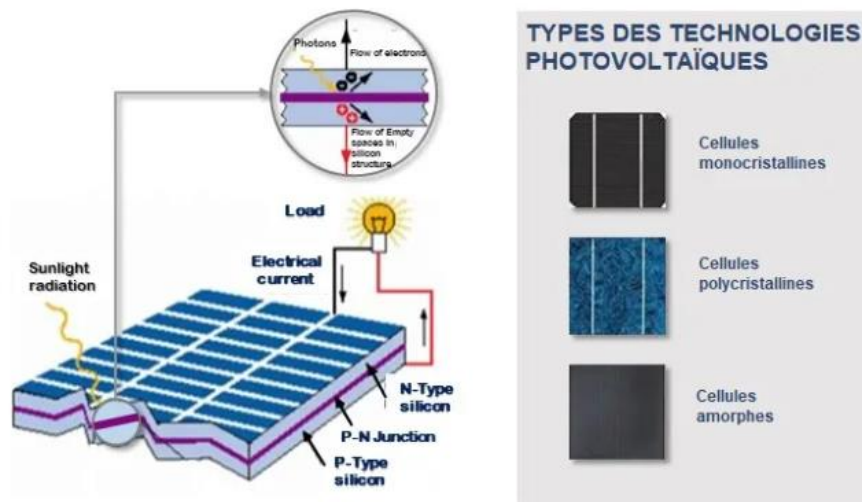


Figure 1. 6 Types de cellules photovoltaïques

1.5. Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées [5].

1.5.1. Les systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la figure (1.7) qui traduit les différentes possibilités offertes : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique [5].

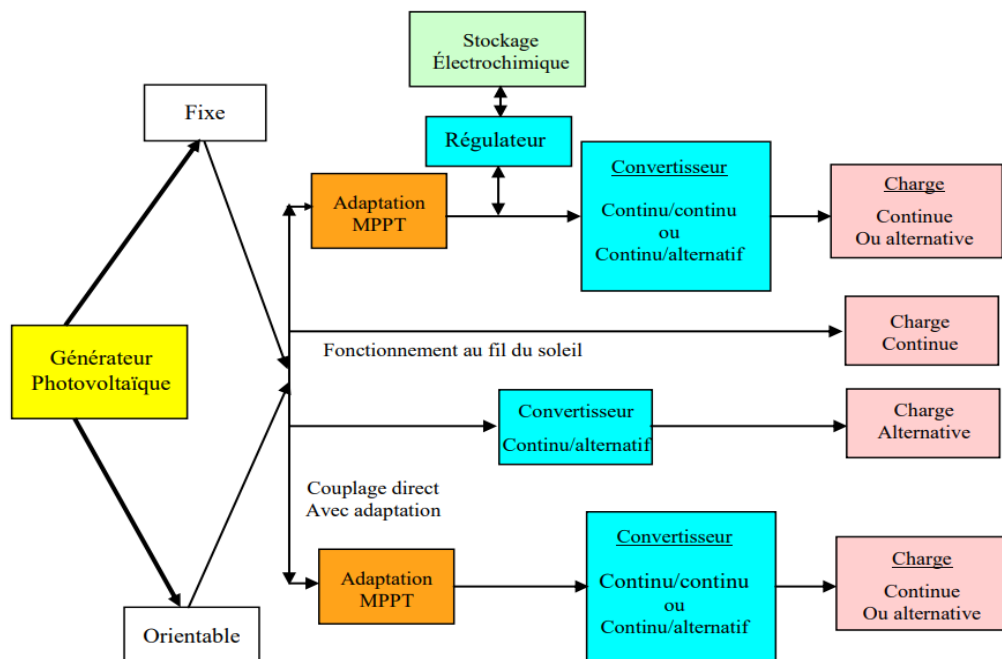


Figure 1. 7 Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes

Le couplage direct implique un fonctionnement au fil du soleil, donc à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Les charges typiques à courant continu qui peuvent satisfaire le critère (tension constante à puissance variable) sont les accumulateurs électrochimiques. Parmi les charges alimentées en courant alternatif figurent les pompes à eau, c'est le pompage au fil du soleil, le stockage est néanmoins présent sous la forme d'eau emmagasinée (dans un réservoir)

Dans la plus part des cas une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale [5].

1.5.2. Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybrides associent au moins deux sources d'énergie renouvelables, ainsi qu'une ou plusieurs sources d'énergie conventionnelles.

Les sources renouvelables, telles que le photovoltaïque et l'éolien, ne fournissent pas une puissance constante. Toutefois, grâce à leur complémentarité, leur association permet d'assurer une production électrique plus stable et continue.

Ces systèmes sont généralement autonomes vis-à-vis des grands réseaux électriques interconnectés et sont souvent utilisés dans les zones isolées.

Les différentes sources d'un système hybride peuvent être reliées selon deux architectures principales : une architecture à bus continu et une architecture à bus alternatif [5].

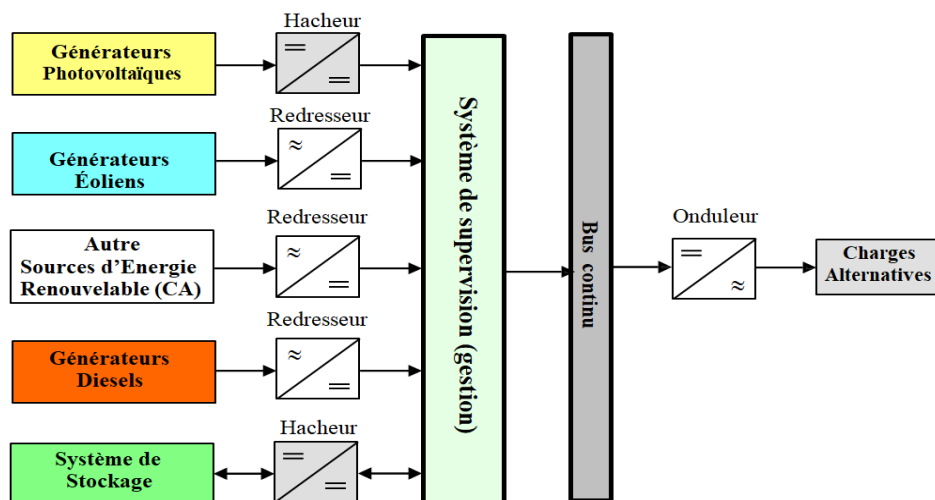


Figure 1. 8 Configuration du système hybride à bus continu

Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont raccordés au bus continu puis l'onduleur alimente les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence.

La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage.

L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative [5].

1.5.3. Les systèmes raccordés aux réseaux

Dans les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau, le générateur PV est directement couplé au réseau électrique. Ce type de système est équipé de convertisseurs de puissance permettant d'adapter l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques aux caractéristiques du réseau.

Ces convertisseurs comprennent généralement un hacheur associé à un dispositif MPPT, un filtre, un onduleur, ainsi qu'une électronique de commande appropriée. L'ensemble assure l'adaptation en amplitude et en fréquence entre l'énergie produite par le champ photovoltaïque et celle du réseau électrique.

La structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau est illustrée par la figure suivante [10].

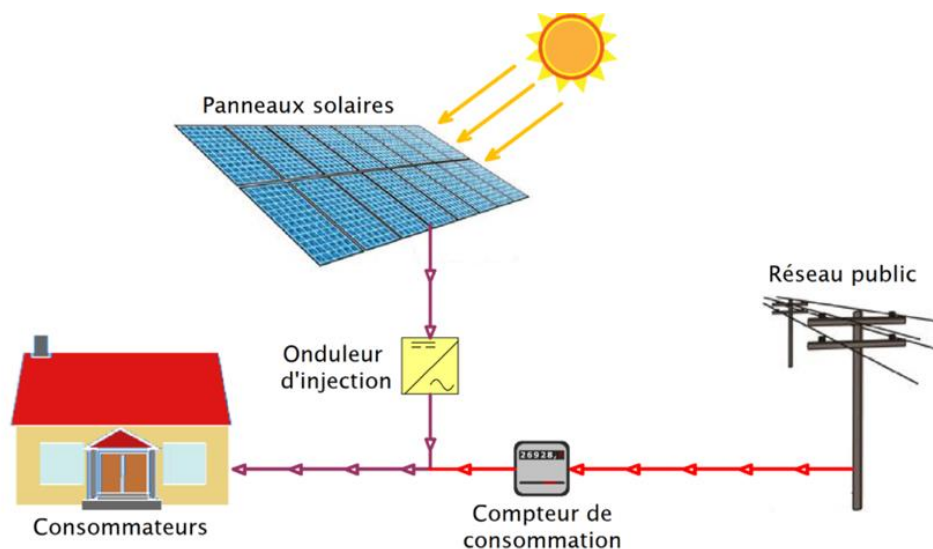


Figure 1. 9 Système Photovoltaïque Raccordé au Réseau

1.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Le modèle idéal d'une cellule est une source de courant en parallèle avec une diode.

Pour tenir compte des effets dissipatifs, deux résistances ont été introduites : la résistance série et la résistance shunt.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails.

Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures [11].

1.6.1. Modèle à une seule diode

C'est le modèle le plus cité dans la littérature, le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, la résistance parallèle R_{sh} modélise les courants de fuite de la cellule photovoltaïque, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contact et de connexions, une diode en parallèle qui modélise jonction PN [12].

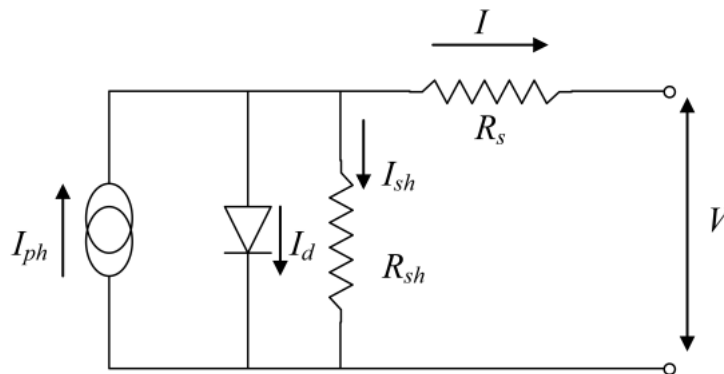


Figure 1. 10 Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à une diode

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1.1)$$

$$I = I_{ph} - I_s \times \left[\exp \left(\frac{V + R_s \times I}{V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \times I}{R_{sh}} \quad (1.2)$$

- I : Courant fourni par la cellule [A].
- V : Tension à la borne de la cellule [V].
- D : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens
- I_{ph} : Le photo-courant, proportionnel à l'irradiance.
- I_s : Le courant de saturation de la diode.
- R_s : Résistance série [ohm].
- R_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient Entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule
- $V_t = ((n \times K_b \times T)/q)$: Tension thermique de la diode.
 - $T(K)$ est la température.
 - n est le facteur d'idéalité de diode.
 - K_b la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$)
 - q la charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) [12].

1.6.2. Modèle à deux diodes

Actuellement, le modèle à deux diodes est considéré comme le plus représentatif du comportement réel d'une cellule solaire, car il prend en compte les mécanismes de transport des charges électriques au sein de la cellule. Ce modèle intègre deux diodes.

Il est constitué de deux termes exponentiels : le premier représente le phénomène de diffusion des porteurs de charge, tandis que le second correspond au phénomène de recombinaison dans la région de déplétion.

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent à deux diodes ci-dessous figure (1.11).

Il consiste à la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} , les facteurs de diode n_1 et

n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} , qui dépend de l'éclairement solaire .

La résistance série R_s rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur-Métal. La résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit R_{sh} traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut [9].

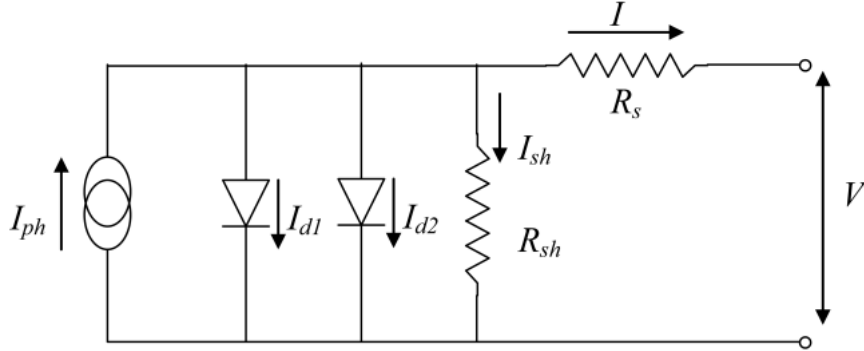


Figure 1. 11 Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à deux diodes

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_p \quad (1.3)$$

$$I = I_{ph} - I_{s1} \times [\exp(\frac{q(V+R_s \times I)}{n_1 \times k_b \times T}) - 1] - I_{s2} \times [\exp(\frac{q(V+R_s \times I)}{n_2 \times k_b \times T}) - 1] - \frac{V+R_s \times I}{R_{sh}} \quad (1.4)$$

Avec :

- I (A), le courant fourni par la cellule.
- V (V), la tension aux bornes de la cellule.
- R_{sh} (Ω), la résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction.
- R_s (Ω), la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de Connexions.
- I_{s1} (A) correspondant au courant de saturation de la diode1.
- I_{s2} (A) correspondant au courant de saturation de la diode2.

- Kb (1.381×10^{-23} J/K), la constante de Boltzmann.
- T (K), la température effective de la cellule.
- q (1.602×10^{-19} C), la charge de l'électron.
- n_1 , le facteur de non idéalité de la jonction de la diode1.
- n_2 , le facteur de non idéalité de la jonction de la diode2 [13].

1.7. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques électriques

1.7.1. Influence de l'éclairement solaire

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

La figure suivante présente la variation des caractéristiques d'un panneau PV à différents niveaux d'éclairement :

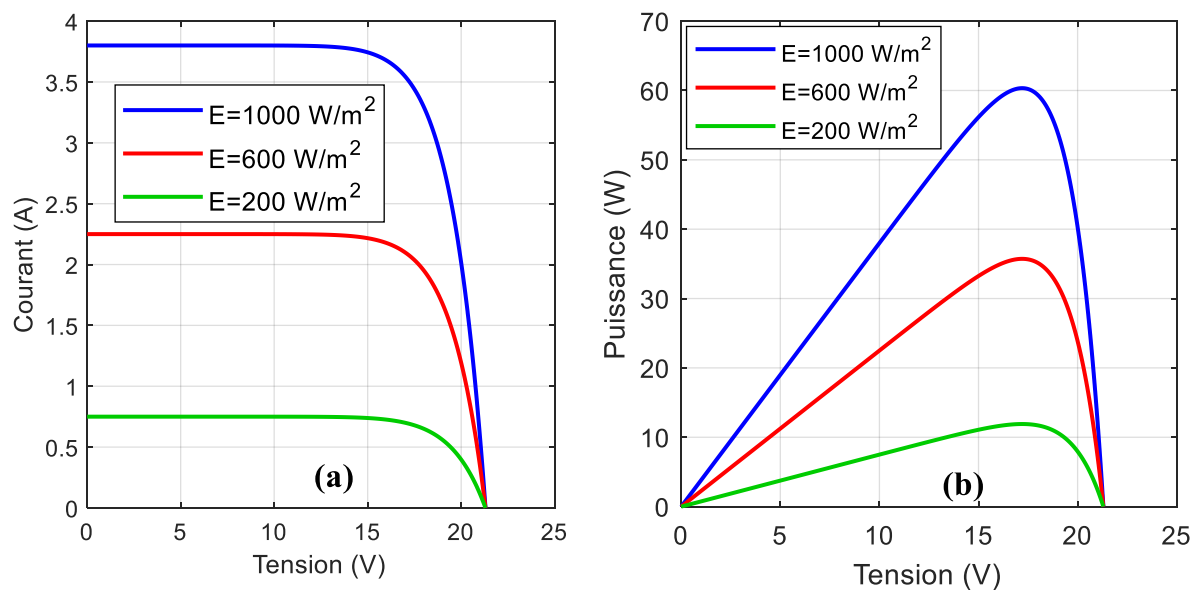


Figure 1. 12 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'un panneau PV : (a) Courant-tension ; (b) Puissance-tension

Il est observable que l'intensité du courant est proportionnelle à l'éclairement. En revanche, la tension ne subit pas une grande dégradation lorsque l'éclairement diminue ; elle ne dépend pas de la surface, mais uniquement du matériau. La puissance maximale du module dépend principalement du niveau d'éclairement. Ainsi, si l'irradiation (l'éclairement) diminue, le facteur de forme s'élargit et ainsi la courbe prend une forme carrée [8].

1.7.2. Influence de la température

La température est également un paramètre essentiel qui influence directement la puissance électrique produite par les panneaux photovoltaïques. En effet, une augmentation de la température entraîne généralement une diminution de la tension de sortie, ce qui se traduit par une réduction de la puissance délivrée par le panneau.

La figure suivante illustre le comportement d'un panneau photovoltaïque sous un éclairement de 1000 W/m^2 et pour des températures variant de 25°C à 65°C :

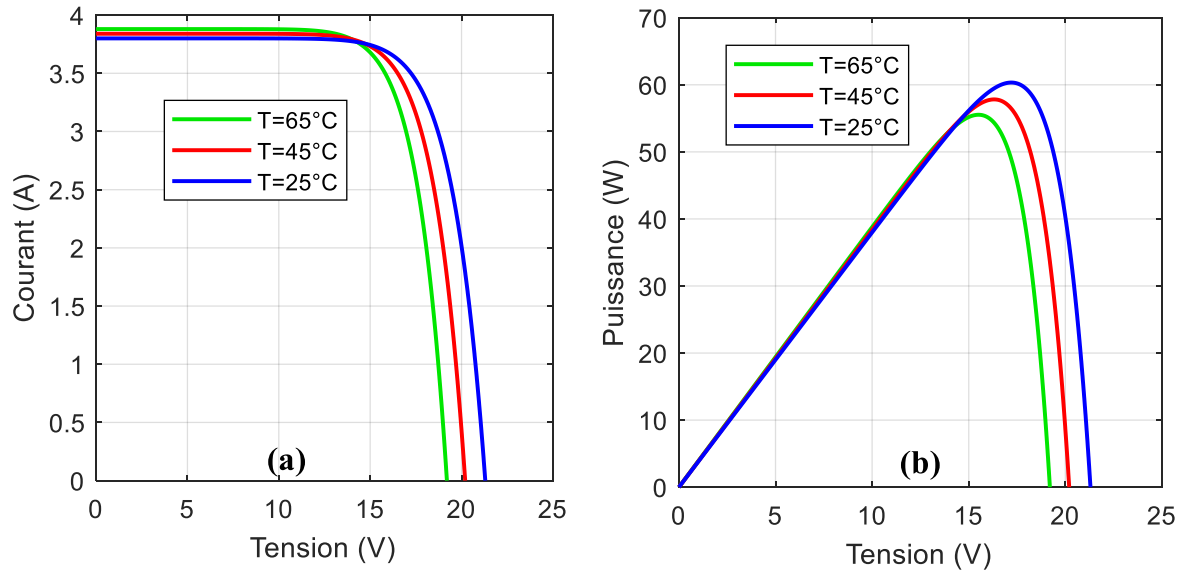


Figure 1.13 Influence de la température sur les caractéristiques électriques d'un panneau PV : (a) Courant-tension ; (b) Puissance-tension

D'après la figure (1.13), l'augmentation de la température entraîne, d'une part, une légère augmentation du photo courant et, d'autre part, une diminution de la tension de circuit ouvert. Cela s'explique principalement par la réduction de la largeur de la bande interdite du matériau semi-conducteur lorsque la température augmente.

Par conséquent, cette élévation de température provoque une diminution de la puissance maximale disponible ainsi que de la tension (environ $0,06 \%$ par $^\circ\text{C}$), tandis que le courant augmente légèrement (environ $0,4 \%$ par $^\circ\text{C}$). Elle entraîne également une dégradation du rendement global de la cellule ainsi qu'une diminution du facteur de forme (FF) [8].

1.8. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est le courant qui augmentera comme représenté sur les figures suivantes [9].

1.8.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Série

Une association de (N_s) cellule en série, figure 1.16, permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque.

Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule.

L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules.

$$V_{coN_s} = N_s \times V_{co} \quad (1.5)$$

Où V_{coN_s} est la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série et I_{ccN_s} est le courant de court-circuit de N_s cellules en série [9].

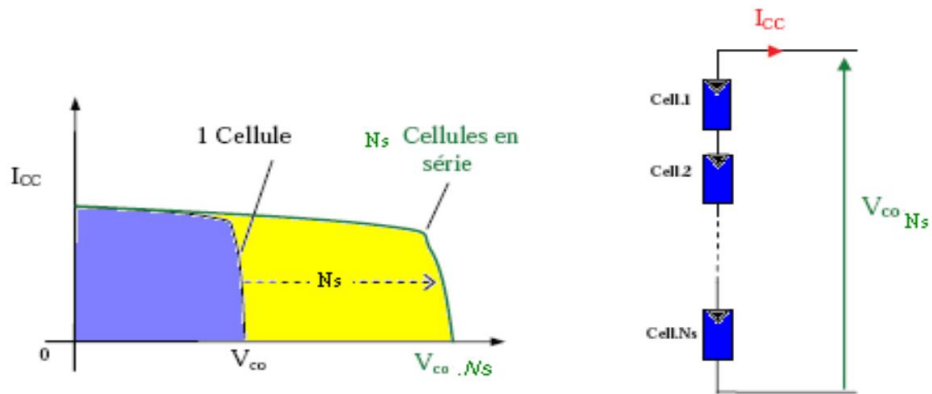


Figure 1. 14 Caractéristiques résultantes d'un groupement de NS cellules en série

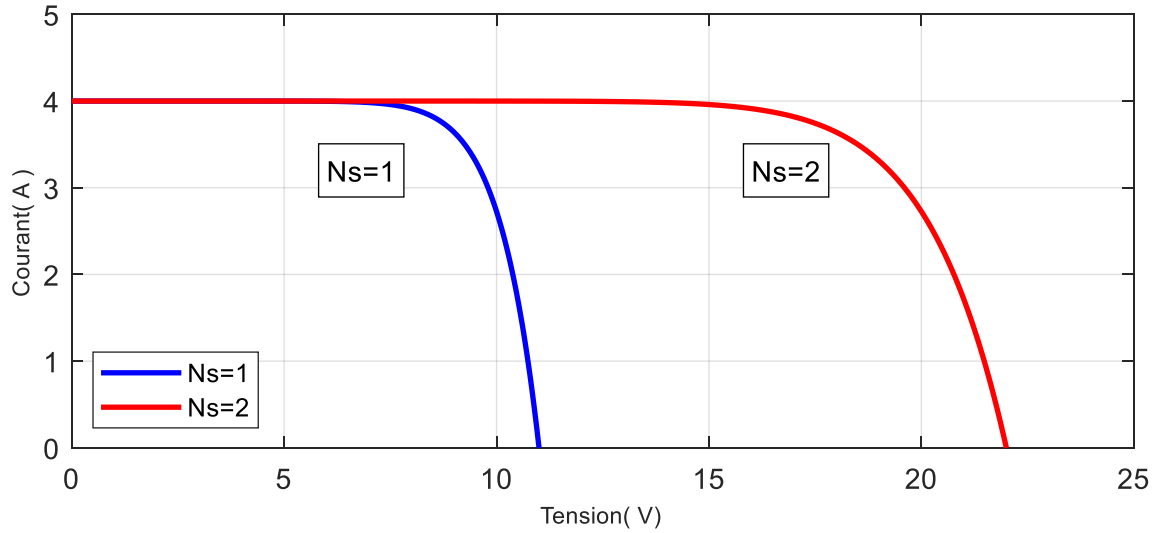


Figure 1. 15 Caractéristique I(V) pour l'association série sous MATLAB Simulink

La figure 1.16 montre un exemple de branchement des panneaux solaires en série.

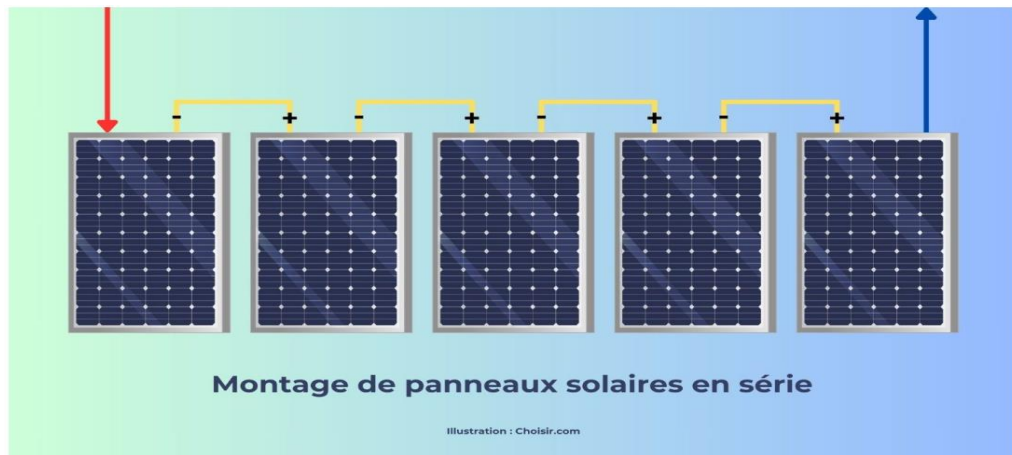


Figure 1. 16 Branchement en série des panneaux PV

1.8.2. Association des Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellules, figure 1.19, est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

$$I_{ccN_p} = N_p \times I_{cc} \quad (1.6)$$

$$V_{co} = V_{coN_p} \quad (1.7)$$

Où I_{ccN_p} est la somme des courants de court-circuit de (N_p) cellule en parallèle et V_{coN_p} est la tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle [9].

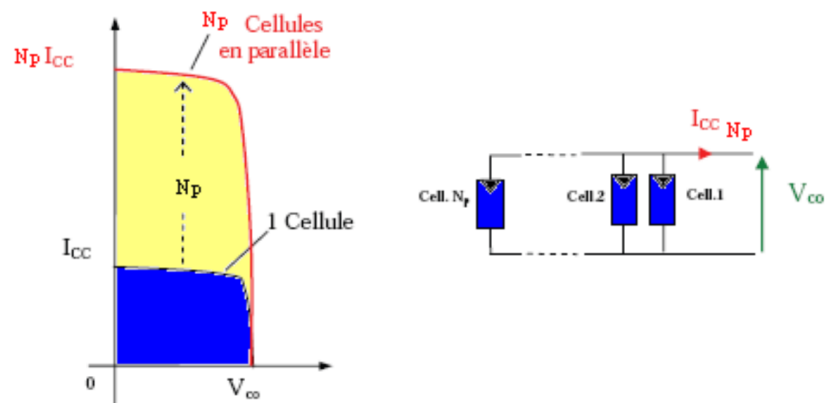


Figure 1. 17 Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle

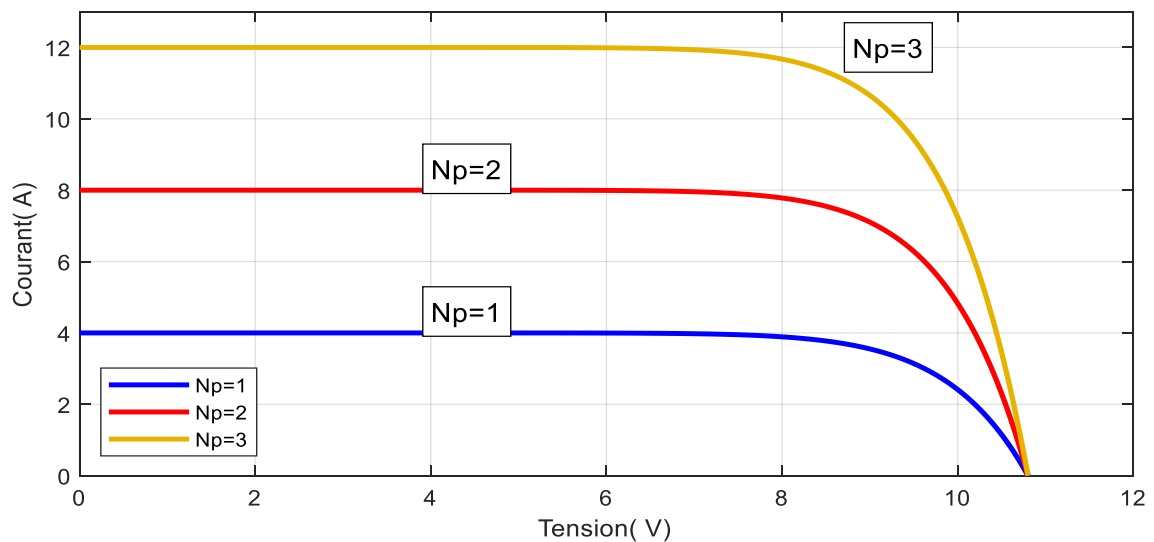


Figure 1. 18 Caractéristique $I(V)$ pour l'association parallèle sous MATLAB Simulink

La figure 1.19 montre un exemple de branchement des panneaux solaires en parallèle.

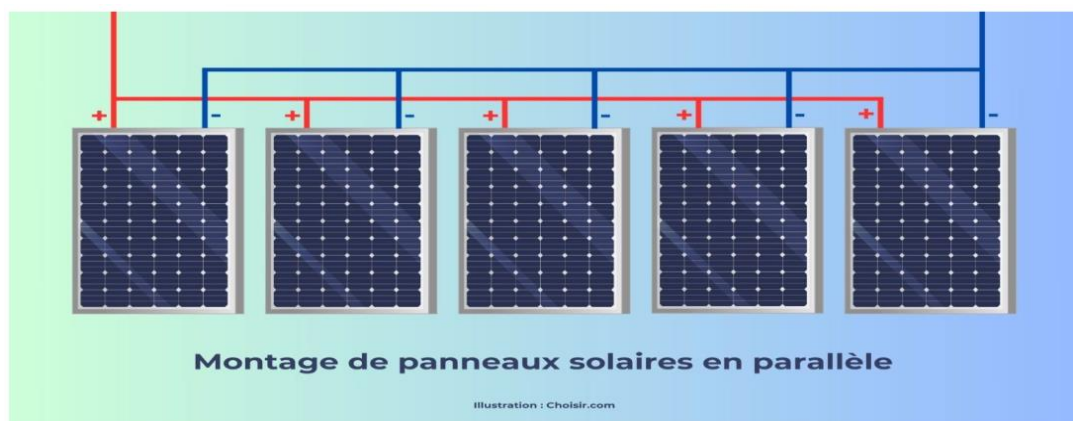


Figure 1. 19 Branchement parallèle des panneaux PV

1.8.3. Association hybride (en série et en parallèle)

La caractéristique globale courant/tension d'un générateur photovoltaïque se déduit théoriquement de la combinaison série-parallèle ou parallèle-série des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par le rapport N_s parallèlement à l'axe des tensions et du rapport N_p parallèlement à l'axe des courants. Ainsi que l'illustre la figure 1.20, N_s et N_p étant respectivement le nombre de cellules en série et en parallèle.

Les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations [9]:

$$I_{cc}^t = N_p \times I_{cc} \quad (1.8)$$

$$V_{co}^t = N_s \times V_{co} \quad (1.9)$$

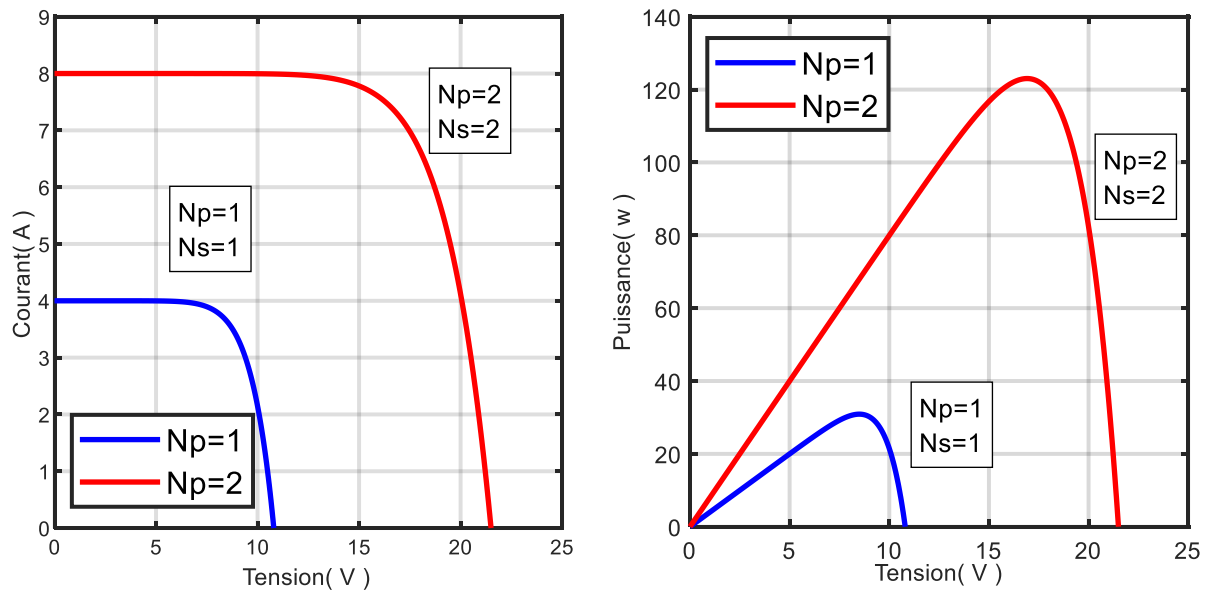


Figure 1. 20 Caractéristique correspondants à l'association / série parallèle de modules pour l'association parallèle sous MATLAB Simulink

La figure 1.21 montre un exemple de branchement des panneaux solaires en série parallèle.

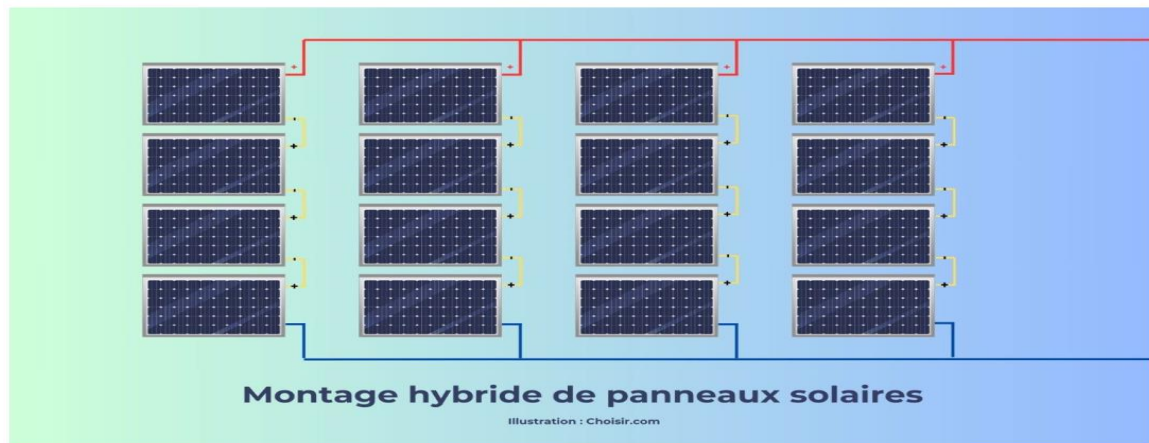


Figure 1. 21 Branchement série parallèle des panneaux PV

1.9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

1.9.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages :

- La production de cette électricité renouvelable est propre et ne génère pas de substances toxiques.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, grâce à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montage dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïque est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans [14].

1.9.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries.
- Impacts environnementaux liés à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient être atténués, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [14].

1.10. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le cadre général des systèmes photovoltaïques en rappelant les principes fondamentaux de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Les principaux aspects relatifs à la cellule photovoltaïque, à ses différentes et à sa modélisation ont été abordés de manière synthétique.

L'analyse des différentes configurations des systèmes photovoltaïques ainsi que de la structure d'un générateur photovoltaïque a mis en évidence les notions fondamentales nécessaires à la compréhension de leur fonctionnement global. Par ailleurs, l'étude de l'influence des paramètres météorologiques a confirmé l'impact direct des conditions environnementales sur les performances électriques du système.

Ainsi, les éléments présentés dans ce chapitre constituent les fondements théoriques indispensables à l'étude, à l'exploitation et à l'analyse des systèmes photovoltaïques.

Chapitre 02

Convertisseurs DC-DC et commande MPPT dans les systèmes photovoltaïques

Chapitre 02

Convertisseurs DC-DC et commande MPPT

dans les systèmes photovoltaïques

2.1. Introduction

Le rendement d'un système photovoltaïque dépend fortement de sa capacité à extraire la puissance maximale disponible dans des conditions climatiques variables. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'associer au générateur photovoltaïque des convertisseurs électroniques de puissance ainsi que des techniques de commande adaptées permettant d'optimiser le transfert de l'énergie vers la charge.

Dans ce chapitre, nous présentons les convertisseurs statiques DC/DC couramment utilisés dans les systèmes photovoltaïques, en particulier les structures Buck et Boost, ainsi que leurs principes de fonctionnement. Nous abordons ensuite la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), son rôle dans l'optimisation de la puissance photovoltaïque. Les principes de dimensionnement et d'orientation des panneaux photovoltaïques sont également présentés afin d'assurer une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Enfin, les principales techniques de recherche du point de puissance maximale sont étudiées et comparées afin de mettre en évidence leurs performances, leurs avantages et leurs limites dans les applications photovoltaïques, en mettant l'accent sur l'influence des variations de la température et de l'irradiance sur l'algorithme MPPT P&O

2.2. Convertisseur DC/DC

Les convertisseurs DC-DC permettent de transformer un niveau de tension électrique continu en un autre niveau adapté aux besoins du système. Ils sont largement utilisés en raison de leur compacité et de leur rendement élevé, comparé aux régulateurs linéaires.

Ces convertisseurs trouvent de nombreuses applications dans les systèmes électroniques modernes, notamment les ordinateurs, les équipements informatiques et divers dispositifs électroniques, afin de fournir des tensions d'alimentation adaptées.

Il existe plusieurs topologies de convertisseurs DC-DC, allant des structures simples à un seul interrupteur semi-conducteur, telles que les convertisseurs abaisseur (Buck), élévateur (Boost) et abaisseur-élévateur (Buck-Boost), jusqu'à des structures plus complexes comportant deux ou quatre interrupteurs. Ces dernières peuvent utiliser des techniques de commutation douce ou de résonance afin de réduire les pertes et d'améliorer l'efficacité.

La conception d'un système de contrôle pour un tel convertisseur nécessite une bonne connaissance de son comportement dynamique. Cela implique généralement l'établissement d'un modèle mathématique reliant les entrées du système, ses variables d'état et ses sorties. Cette représentation mathématique du comportement du système est appelée modèle du système [15].

2.2.1. Convertisseur abaisseur (Buck)

Le convertisseur abaisseur (Buck) (figure 2.1) peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom d'hacheur Buck ou hacheur série. Ce dernier qui est un interrupteur ne peut relier que deux sources de type différent courant/tension ou l'inverse.

L'utilisation du Buck dans les systèmes de conversion photovoltaïque est tout à fait adéquate, étant donné que le générateur photovoltaïque est une source de courant continu, tandis que le récepteur qui est généralement la batterie, a la nature d'une source de tension.

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion $M=V_o/V_i$ change avec le rapport cyclique du commutateur [16].

On peut exprimer sa tension d'entrée comme suit :

$$V_i = \frac{V_s}{D} \quad (2.1)$$

Où :

V_i : la tension d'entrée.

V_s : la tension de sortie.

D : le rapport cyclique du convertisseur.

2.2.1.1. Principe de fonctionnement du convertisseur abaisseur (Buck)

Ce type de composant est utilisé pour transformer la tension des batteries en une Tension DC différente pour alimenter un appareil spécial : chargeur téléphone portable, Radio, ordinateur portable [16].

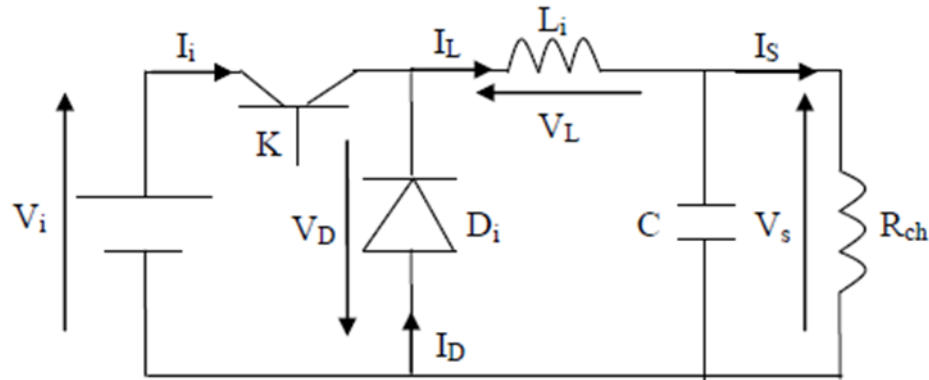


Figure 2. 1 Schéma de base d'un convertisseur Buck

- **l'état passant**

Dans l'état passant, l'interrupteur (K) est fermé. Dans ce cas, la tension aux bornes de l'inductance est donnée par :

$$V_L = V_i - V_s \quad (2.2)$$

- **l'état bloqué**

Dans l'état bloqué, l'interrupteur (K) est ouvert (figure 2.2). Dans ce cas, la diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension de sortie est alors donnée par :

$$V_s = -V_L \quad (2.3)$$

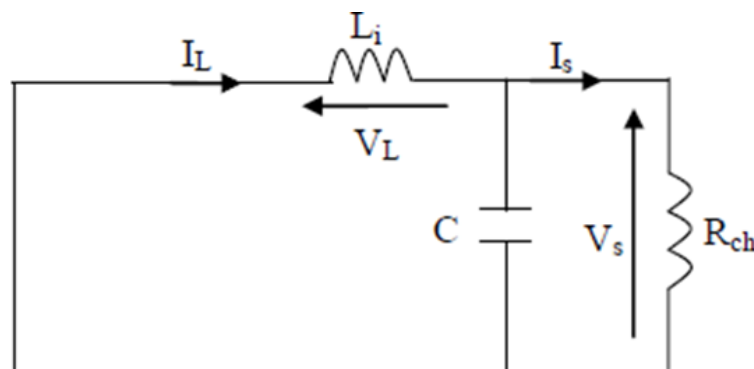


Figure 2. 2 Schéma du Buck (K fermé)

2.2.2. Convertisseur élévateur (Boost)

Un convertisseur Boost, ou hacheur élévateur, permet de transformer une tension continue en une tension continue de valeur supérieure. Il est constitué principalement de deux interrupteurs (un MOSFET et une diode) fonctionnant de manière complémentaire au cours d'une période de commutation, ainsi que d'un filtre LC et d'une charge résistive.

Ce convertisseur peut fonctionner selon deux modes de conduction : le mode de conduction continue (CCM) et le mode de conduction discontinue (DCM), en fonction des conditions de fonctionnement. La figure 2.3 présente le schéma électrique du convertisseur Boost étudié [17].

Le rapport entre les tensions d'entrée et de sortie peut être exprimé par :

$$V_i = \frac{V_o}{1-D} \quad (2.4)$$

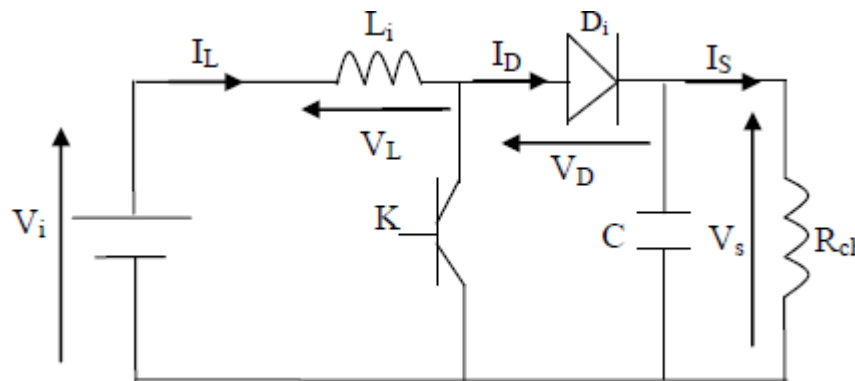


Figure 2. 3 Schémas de base d'un convertisseur Boost

2.2.2.1. Principe de fonctionnement du convertisseur élévateur (Boost)

Le circuit étant alimenté par une source de tension V_i , le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur K.

- **L'état passant**

Lorsque l'interrupteur est fermé ($0 < t < DT$) (Figure 2.4), le courant dans l'inductance augmente et l'énergie est emmagasinée sous forme d'énergie magnétique. La diode D_i est alors bloquée et la charge est, par conséquent déconnectée de l'alimentation [17].

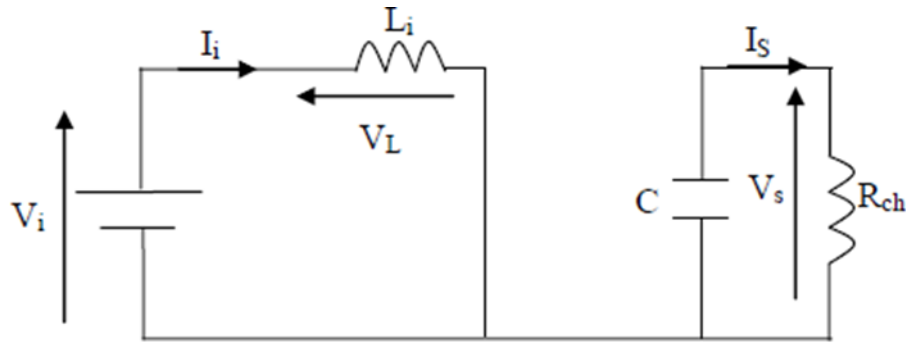


Figure 2. 4 Schéma du Boost (S fermé).Schéma du Boost (S fermé)

- **l'état bloqué**

A l'instant $t = DT$, l'interrupteur K s'ouvre (figure 2.5), la f.é.m. de l'inductance s'ajoute à celle du générateur, conséquence du placement en série de l'inductance avec le générateur (effet élévateur de tension). La diode est alors passante, le courant traverse l'inductance, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée vers le condensateur.

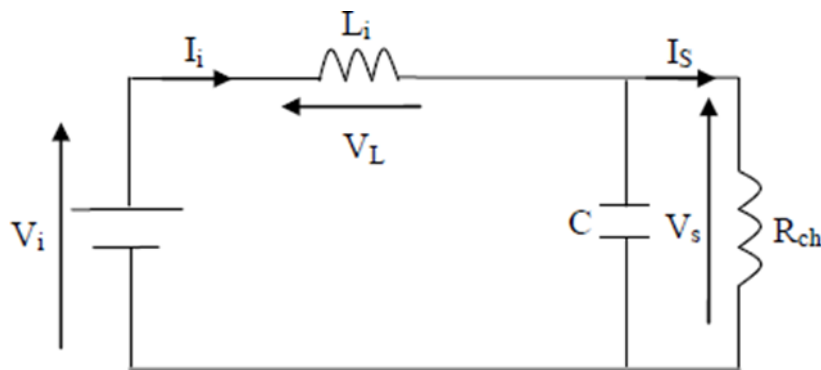


Figure 2. 5 Schéma du Boost (K ouvert)

2.3. La commande MPPT

Le suivi du point de puissance maximale (MPP) d'un générateur photovoltaïque constitue une étape essentielle dans tout système photovoltaïque. De nombreuses méthodes de MPPT ont été développées, et plusieurs variantes de chaque technique ont été proposées afin de remédier à certains inconvénients spécifiques.

La grande diversité des méthodes disponibles rend parfois difficile le choix de la technique la plus appropriée lors de la conception d'un système photovoltaïque. En effet, ces méthodes diffèrent selon plusieurs critères, notamment la complexité de mise en œuvre, le nombre de capteurs nécessaires, le type d'implémentation (analogique ou numérique), la rapidité de

convergence, la capacité de suivi du point de puissance maximale ainsi que le coût global du système.

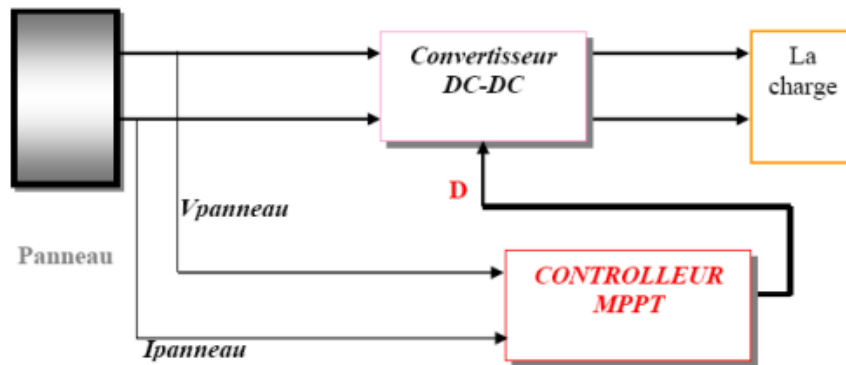


Figure 2. 6 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.

2.4. Principe de fonctionnement de la commande MPPT

Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV [19].

2.5. Critères d'évaluation d'une commande MPPT

On peut évaluer la qualité d'une commande MPPT par rapport à la position du point de fonctionnement du système par rapport au PPM. L'efficacité de la commande est mesurée à partir du rendement η_{MPPT} calculé entre la puissance P_{in} délivrée par le GPV et la puissance maximale P_{max} que ce dernier devrait fournir ce qui nous permettra de trouver le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire [20].

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{eff}}{P_{max}} \quad (2.5)$$

- **Simplicité et coût :**

L'insertion d'un étage d'adaptation avec une commande MPPT doit avoir un gain du point de vue énergétique pour éviter le surcout d'où il faut connaître voir minimiser le niveau de la complexité de l'algorithme qui peut amener des problèmes d'implémentation entraînant ainsi et des pertes dues au nombre de calculs nécessaires [20].

- **Réponse dynamique :**

Le temps de réponse d'une commande MPPT est un paramètre primordial pour évaluer son dynamisme, afin de garantir un bon pilotage du convertisseur et de réduire au maximum le temps nécessaire à la recherche du nouveau point de puissance maximale suite aux variations météorologiques [20].

- **Flexibilité :**

La précision et la stabilité doivent être bonnes pour une commande MPPT quelles que soient ses conditions d'utilisation. Cette dernière doit être conçue pour être la plus universelle possible donc capable de fonctionner avec des panneaux de différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse [20].

- **Compétitivité sur une large gamme de puissance :**

Lorsqu'une commande MPPT atteint le PPM avec une erreur statique faible correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM sur une large gamme de puissance, on parlera de la compétitivité du MPPT [20].

2.6. Les techniques de recherche du point de puissance maximale les plus utilisées

2.6.1. La méthode Perturbation et Observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O) constitue l'une des techniques les plus utilisées pour la recherche du point de puissance maximale (MPPT), en raison de sa simplicité de mise en œuvre et du faible nombre de grandeurs à mesurer, à savoir la tension V_{pv} et le courant I_{pv} du générateur photovoltaïque. Cette méthode est capable de localiser le point de puissance maximale même en présence de variations de l'irradiation et de la température.

Le principe de cet algorithme repose sur l'introduction d'une perturbation au niveau de la tension (ou du courant) du panneau photovoltaïque. Après chaque perturbation, la puissance instantanée $P_{pv}(k)$ est calculée puis comparée à la puissance mesurée à l'instant précédent $P_{pv}(k-1)$. En fonction du sens de variation de la puissance, la commande ajuste la perturbation afin de se rapprocher du point de puissance maximale.

La figure (2.7) illustre la variation de la puissance en fonction de la tension du module photovoltaïque, mettant en évidence la position du point de puissance maximale [21].

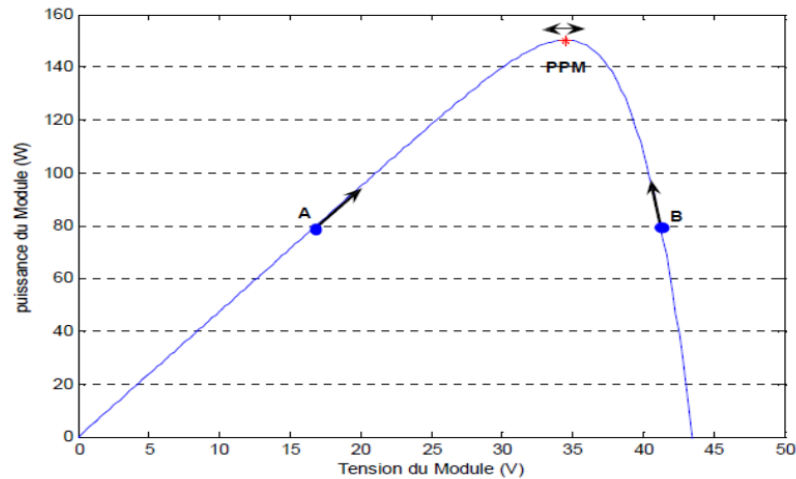


Figure 2. 7 La courbe de puissance-tension du panneau solaire

Lorsque la puissance de sortie augmente suite à une perturbation, la tension V_{pv} est ajustée dans le même sens que lors de l'itération précédente. En revanche, si la puissance diminue, la perturbation est inversée afin de corriger la trajectoire vers le point de puissance maximale.

Une fois ce point atteint, la tension V_{pv} oscille autour de la valeur optimale V_{op} . Ces oscillations entraînent des pertes de puissance dont l'importance dépend du pas de perturbation utilisée.

En effet, un pas d'incrémentaire élevé permet une réponse rapide de l'algorithme face aux variations brusques des conditions de fonctionnement. Cependant, il engendre des oscillations plus importantes autour du point optimal, ce qui augmente les pertes énergétiques. À l'inverse, un pas de perturbation faible réduit les oscillations et améliore le rendement en régime stable, mais ralentit la réponse du système lors de variations rapides de l'irradiation ou de la température.

Ainsi, le choix du pas de perturbation représente un compromis entre rapidité de réponse et précision de suivi, et il est généralement déterminé de manière expérimentale en fonction des exigences du système [21].

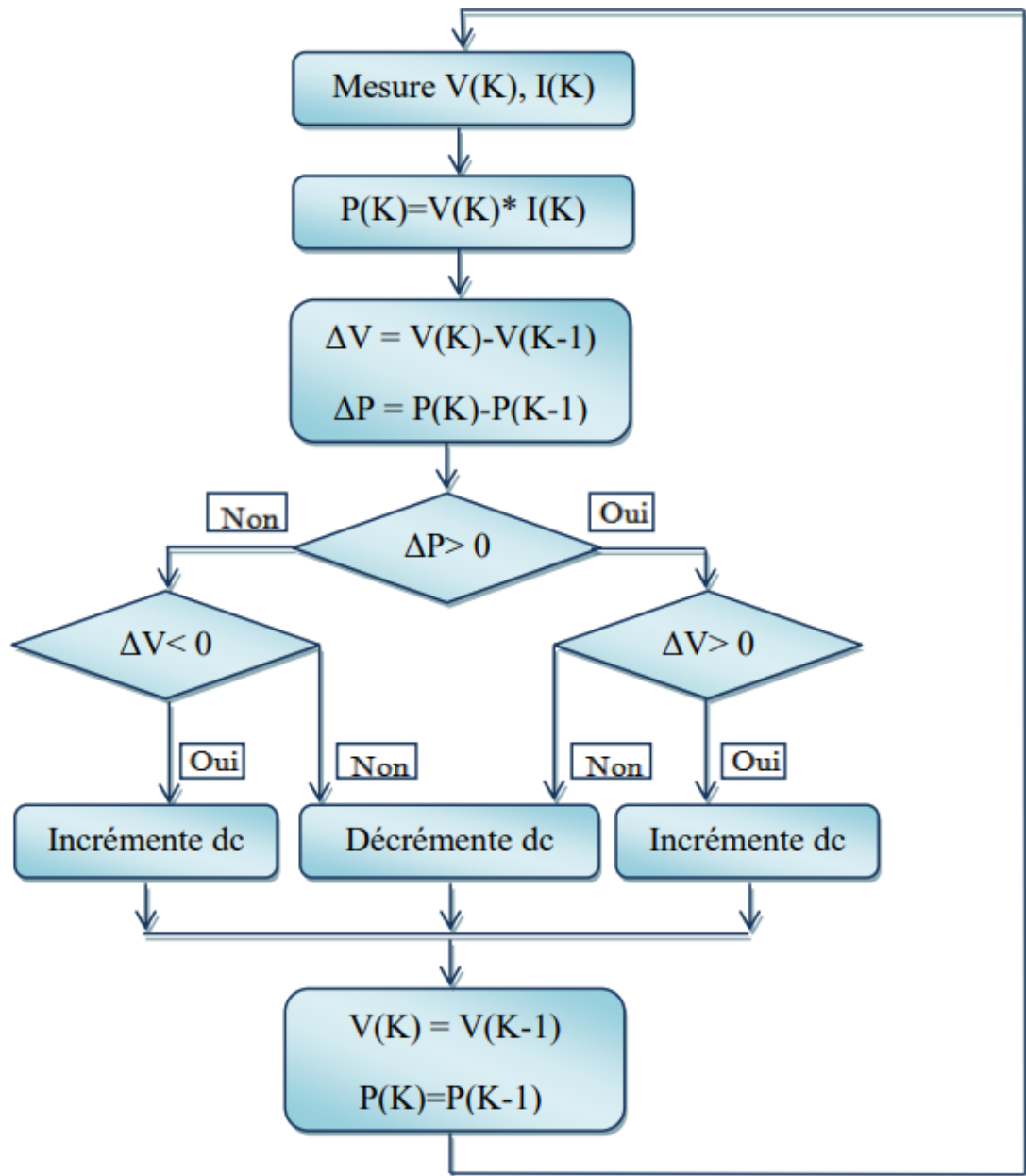


Figure 2. 8 Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation

2.6.1.1. Avantages et inconvénients de l'algorithme P&O

1. Avantages

- **Efficacité** : Malgré sa simplicité, l'algorithme est capable de suivre le point de puissance maximum avec de bons résultats, en particulier dans des conditions d'irradiance stables [22].
- **Simplicité** : L'algorithme est facile à mettre en oeuvre tant au niveau du logiciel que du matériel, ce qui le rend populaire pour les applications à faible coût [22].
- **Souplesse** : Il peut être appliqué à un large éventail d'applications photovoltaïques [22].

2. Inconvénients

- **Performances réduites dans des conditions variables** : Lorsque les conditions d'irradiance changent rapidement (par exemple, en raison des nuages), l'algorithme peut ne pas être assez rapide pour suivre le nouveau point de puissance maximale.
- **Oscillations autour du MPPT** : En raison de la nature itérative de l'algorithme, le système ne converge pas exactement sur le MPP mais oscille autour de celui-ci. Cela peut réduire légèrement l'efficacité globale du système.
- **Erreur de convergence** : Dans certaines situations, surtout lorsque le changement de puissance est faible, l'algorithme peut ne pas déterminer correctement la direction optimale de la perturbation.

2.6.2. La méthode Incrément des conductances (INC)

Ainsi, tout comme la méthode P&O, la méthode de l'incrément de conductance (en anglais Incremental Conductance, « InCond ») est largement utilisée pour la recherche du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques [22].

La technique de la conductance incrémentale (INC) a été développée afin de remédier aux problèmes rencontrés avec la méthode P&O [23].

Cette technique repose sur l'analyse de la pente de la dérivée de la puissance par rapport à la tension de la caractéristique $P(V)$. En effet, cette pente est nulle au point de puissance maximale (MPP), positive à gauche de ce point et négative à droite.

Pour appliquer cette méthode, il est nécessaire de connaître la conductance du générateur photovoltaïque. La conductance d'un module photovoltaïque est définie comme le rapport entre le courant et la tension du générateur photovoltaïque (GPV), comme indiqué ci-dessous [22] :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (2.6)$$

et une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$\Delta G = \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad (2.7)$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du module (P_{pv}) par rapport à la tension (V_{pv}) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM.

- Si la dérivée $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ donc, le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
- Si la dérivée $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ donc, le point de fonctionnement est sur le PPM.
- Si la dérivée $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ donc, le point de fonctionnement est à droite du PPM.

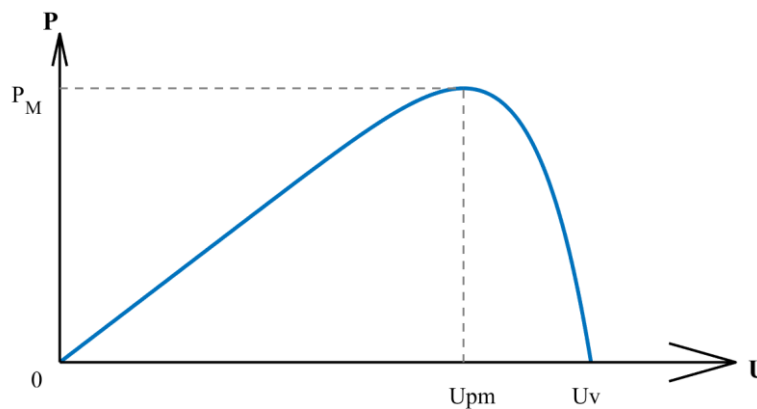


Figure 2. 9 Caractéristique $P(V)$ du module photovoltaïque

Le MPP est donc recherché par la comparaison entre la conductance G (I/V) et l'incrément de la conductance dG (dI/dV) instantanées. Une fois le MPP trouvé, on ne change plus la tension jusqu'à une variation du courant. Dans ce cas, l'algorithme commence de nouveau la recherche du nouveau MPP.

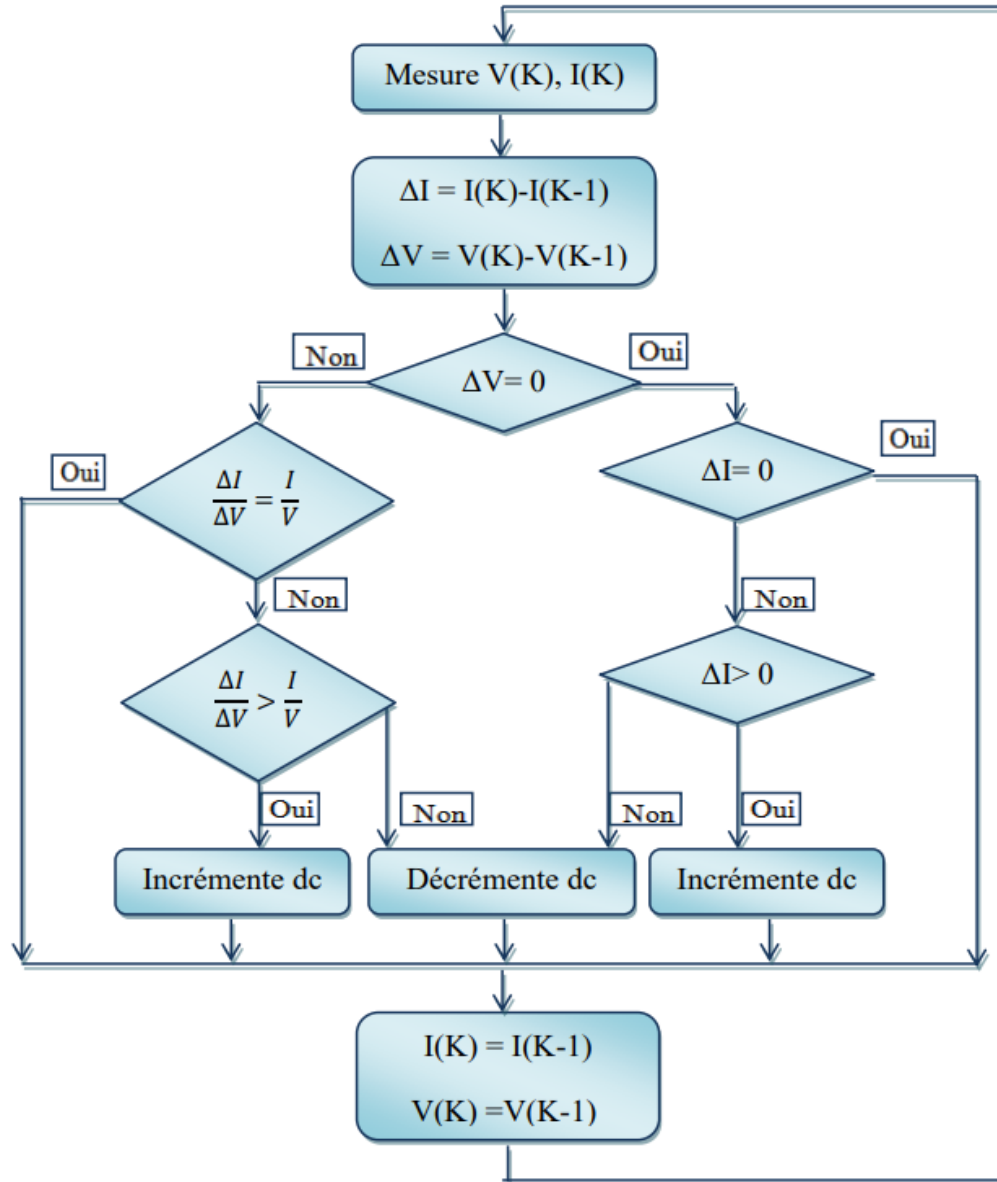


Figure 2. 10 Organigramme de la méthode InCond

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du PPM car il est difficile de remplir la condition $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long [22].

2.6.2.1. Avantages et inconvénients de l'algorithme INC

1. Avantages

- **Efficacité à diverses conditions** : L'algorithme peut être plus efficace dans des conditions météorologiques changeantes ou fluctuantes [24].
- **Précision** : l'approche est théoriquement plus précise que Perturb and Observe car elle vise directement le MPP en utilisant les propriétés électriques du système PV [24].
- **Rapidité de réponse** : Elle peut réagir plus rapidement aux changements des conditions environnementales, car elle ajuste la tension de fonctionnement en fonction des calculs dérivés plutôt que par des perturbations aléatoires [24].

2. Inconvénients

- **Complexité** : Bien que relativement simple à implémenter, l'algorithme de la conductance incrémentale nécessite le calcul de dérivées approximées en temps réel, ce qui peut légèrement augmenter la charge de calcul par rapport à la méthode Perturbe and Observe [24].
- **Coût** : L'algorithme ne requiert pas nécessairement un matériel plus performant que les autres méthodes classiques [24].

2.6.3. La méthode basée sur la mesure de la tension du circuit ouvert

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante :

$$V_{opt} = k1 * V_{co} \quad (2.8)$$

Où (k) est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule photovoltaïque et variant généralement entre 0,73 et 0,8. Afin de déterminer la tension optimale, il est nécessaire de mesurer la tension de circuit ouvert (V_{co}).

Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu à proximité du point de puissance maximale en ajustant sa tension à la valeur optimale calculée. Ce procédé permet d'agir de manière cyclique sur le rapport cyclique du convertisseur afin d'atteindre et de maintenir la tension optimale [25].

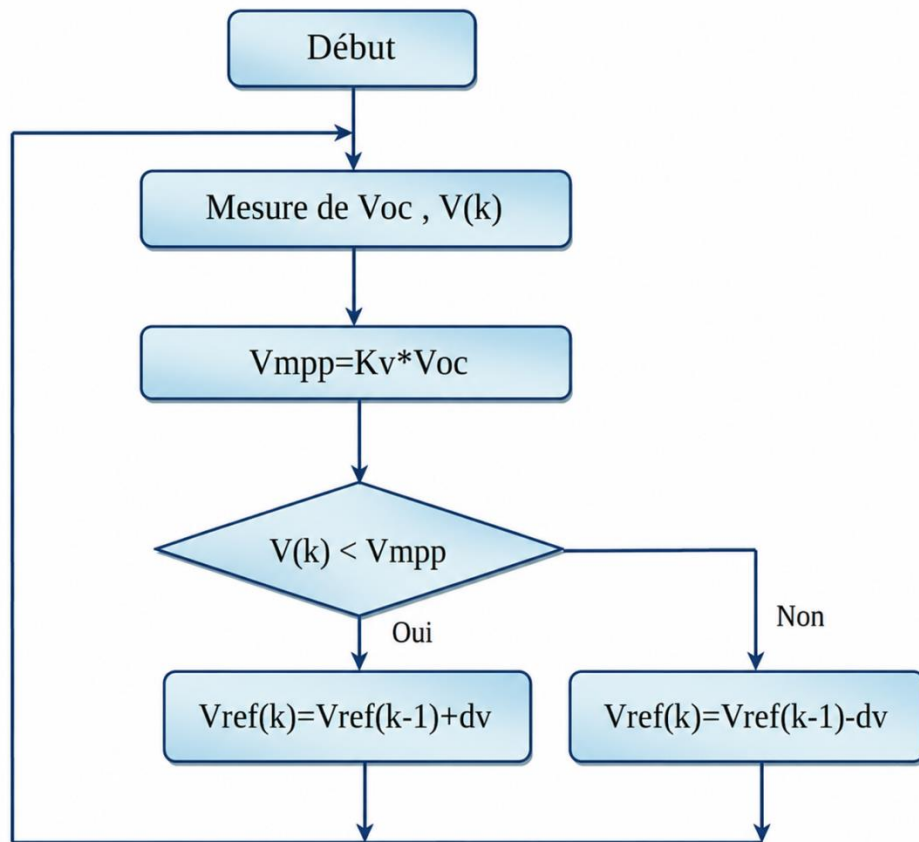


Figure 2. 11 Organigramme de la méthode de mesure du VCO

2.6.3.1. Avantages et inconvénients de de l'algorithme VCO

1. Avantages

- Technique très simple à mettre en œuvre
- Nécessite uniquement la mesure de la tension du panneau photovoltaïque.
- Faible complexité de calcul.
- Facile à implémenter dans les systèmes photovoltaïques [26].

2. Inconvénients

- Nécessité de mesurer périodiquement VOC
- Déconnexion temporaire de la charge et pertes de puissance.
- Précision limitée du suivi du MPP [26].

2.6.4. La méthode à base de la mesure du courant de court-circuit

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante :

$$I_{opt} = k2 * I_{cc} \quad (2.9)$$

Où k est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92 [25].

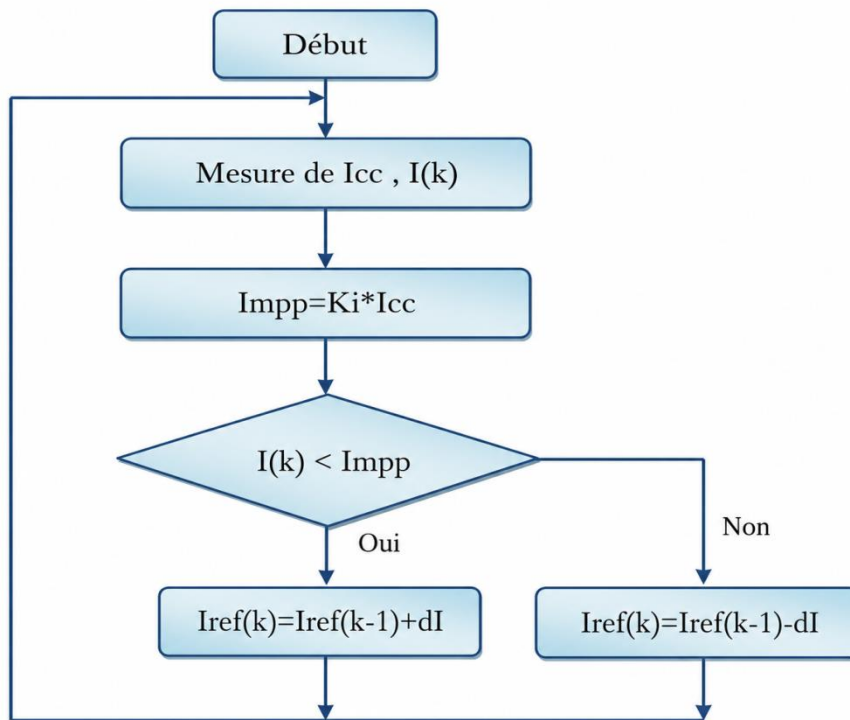


Figure 2. 12 Organigramme de la méthode de mesure l'Icc

Le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal .Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale [25].

2.6.4.1. Avantages et inconvénients de de l'algorithme ICC

1. Avantages

- Utilisation d'un seul capteur de courant.
- Mise en œuvre simple.
- Faible coût de réalisation.

- Structure de commande simple.
- Bonne robustesse [26].

2. Inconvénients

- Faible précision du suivi du point de puissance maximale (MPP).
- Temps de réaction relativement lent.
- Pertes énergétiques dues aux opérations de mesure.
- Rendement MPPT limité (environ 88,1 %).
- Rendement inférieur à celui des méthodes P&O et Incrémentale Conductance (INC) [26]

2.7. Résultats de simulation

Pour étudier les performances de l'algorithme P&O proposé, nous l'avons testé, par simulation dans l'environnement Matlab. La figure 2.13 représente le schéma Simulink de la méthode perturbation et observation (P&O) utilisée pour la recherche du point de puissance maximale (MPPT) de notre système photovoltaïque.

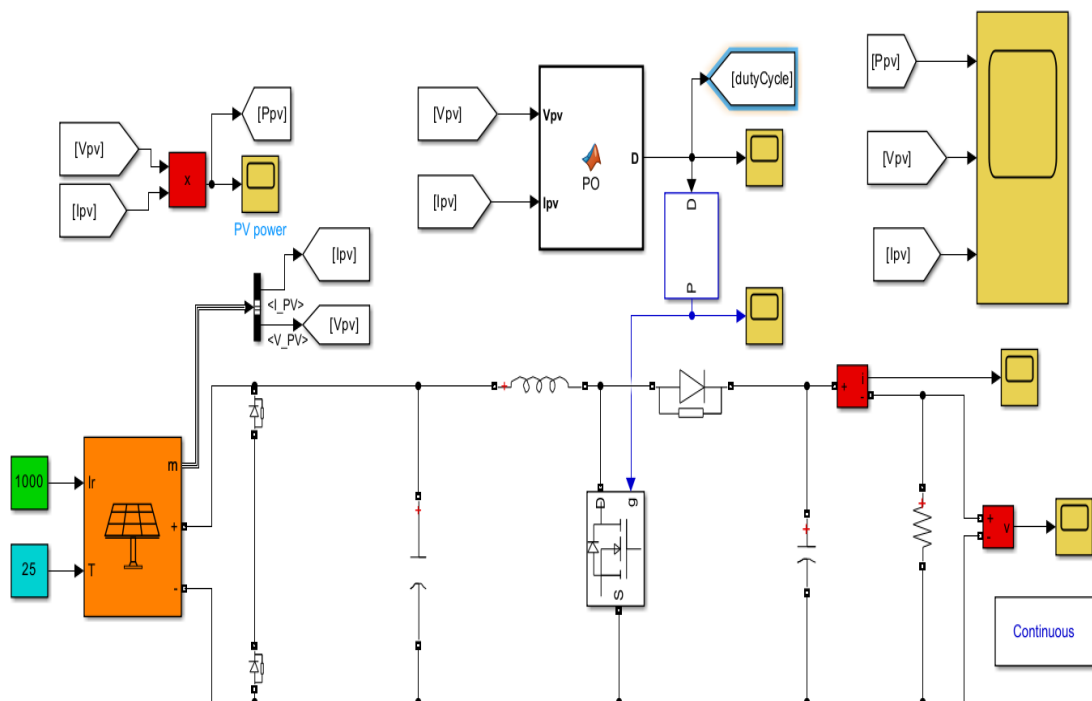


Figure 2. 13 Schéma de Simulation de la méthode P&O sous MATLAB Simulink

La Figure 2.14, présente respectivement l'évolution de la tension V_{pv} , du courant I_{pv} et de la puissance P_{pv} du générateur photovoltaïque sous des conditions normales de fonctionnement ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

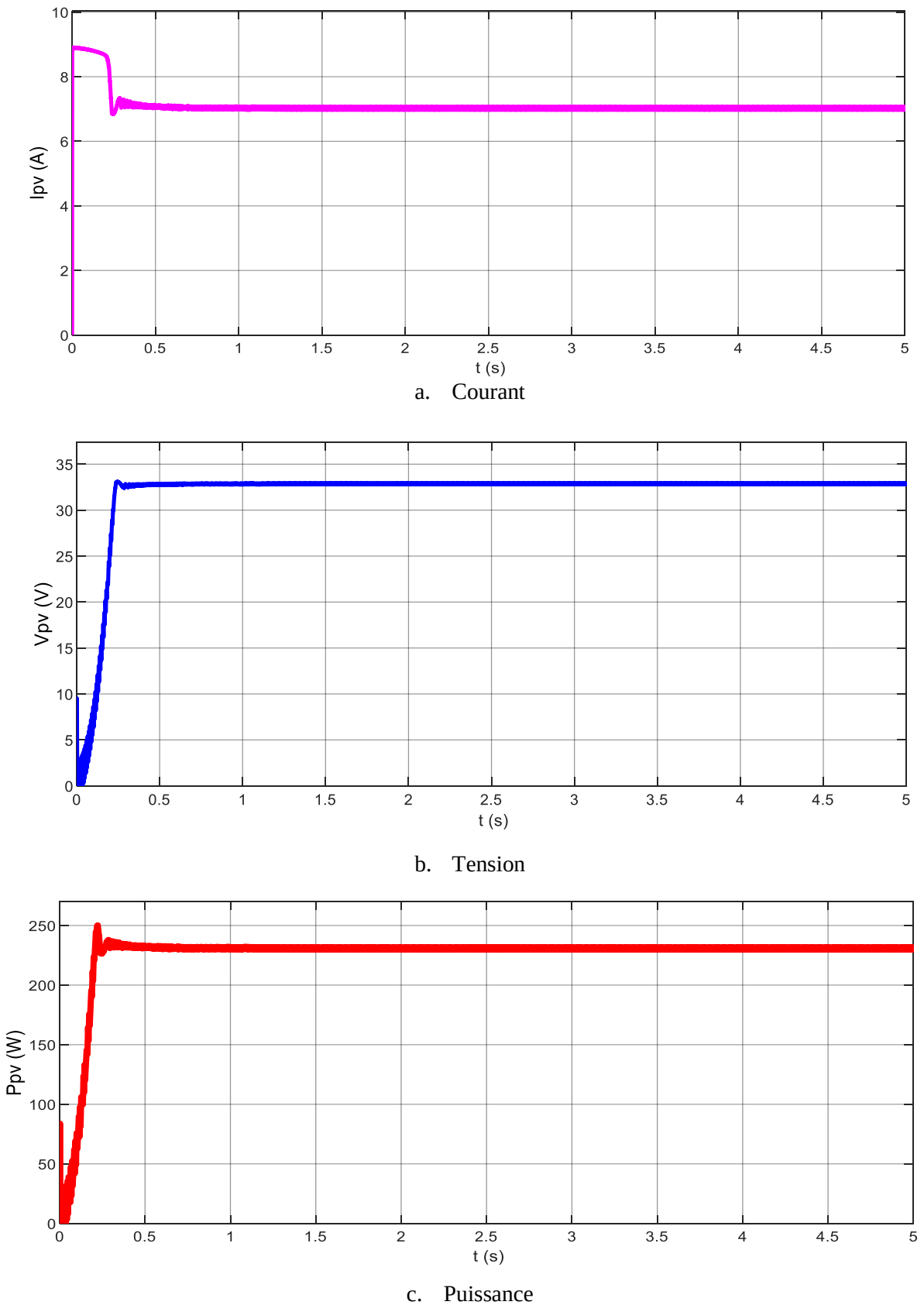


Figure 2. 14 Évolution des grandeurs électriques (**Courant, Tension et Puissance**) d'un générateur photovoltaïque sous commande MPPT P&O

Les résultats de simulation montrent que la tension photovoltaïque augmente rapidement avant de se stabiliser autour de 33 V après environ 0,25 s. De même, le courant atteint rapidement une valeur proche de 7 A et se stabilise avec de faibles oscillations transitoires.

Concernant la puissance, celle-ci croît progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale d'environ 230 W. Le point de fonctionnement optimal est atteint vers $t = 0,429$ s, puis la puissance demeure pratiquement constante autour de cette valeur. Cette stabilisation confirme l'efficacité de l'algorithme MPPT de type P&O dans la recherche et le suivi du point de puissance maximale (MPP).

Les résultats obtenus montrent que la commande MPPT basée sur l'algorithme P&O permet d'atteindre le MPP en un temps inférieur à 0,5 s. La tension, le courant et la puissance se stabilisent rapidement avec de faibles oscillations, ce qui témoigne d'une bonne rapidité de convergence et d'une performance satisfaisante de la méthode dans des conditions de fonctionnement normales.

2.7.1. Influence de l'éclairement sur les performances du système photovoltaïque avec MPPT P&O

Dans cette étude, nous analysons l'influence de la variation de l'éclairement solaire sur les performances de la commande MPPT basée sur l'algorithme de Perturbation et Observation (P&O). L'irradiance a été modifiée à $t = 1$ s, passant de 1000 W/m² à 500 W/m², tandis que la température est restée constante.

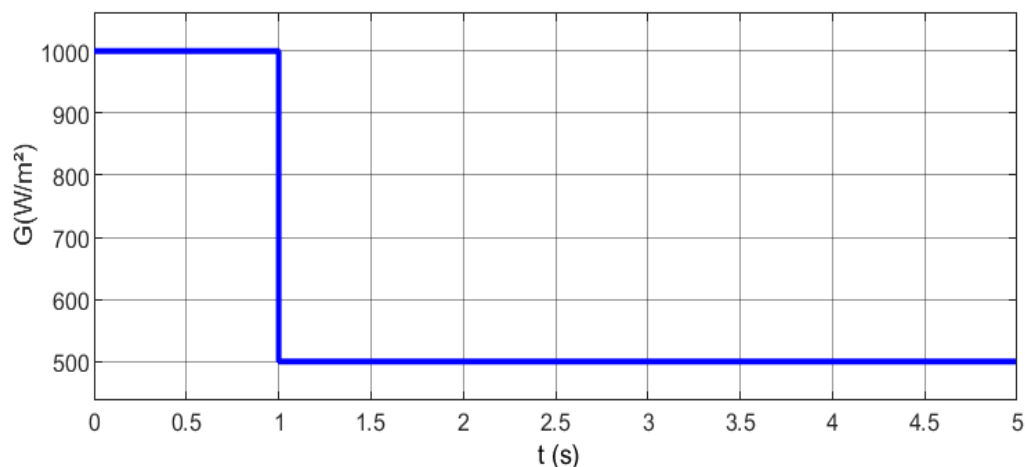
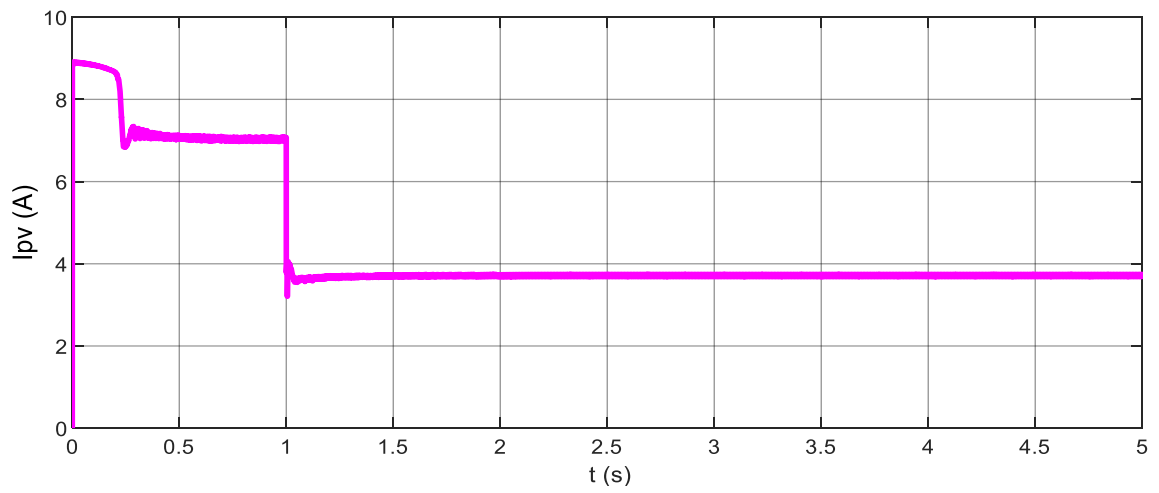
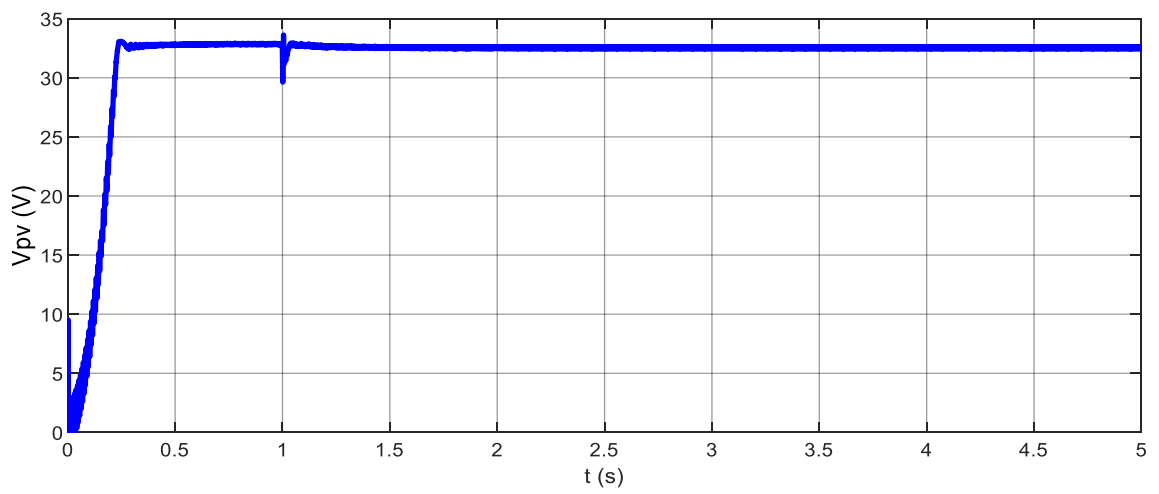


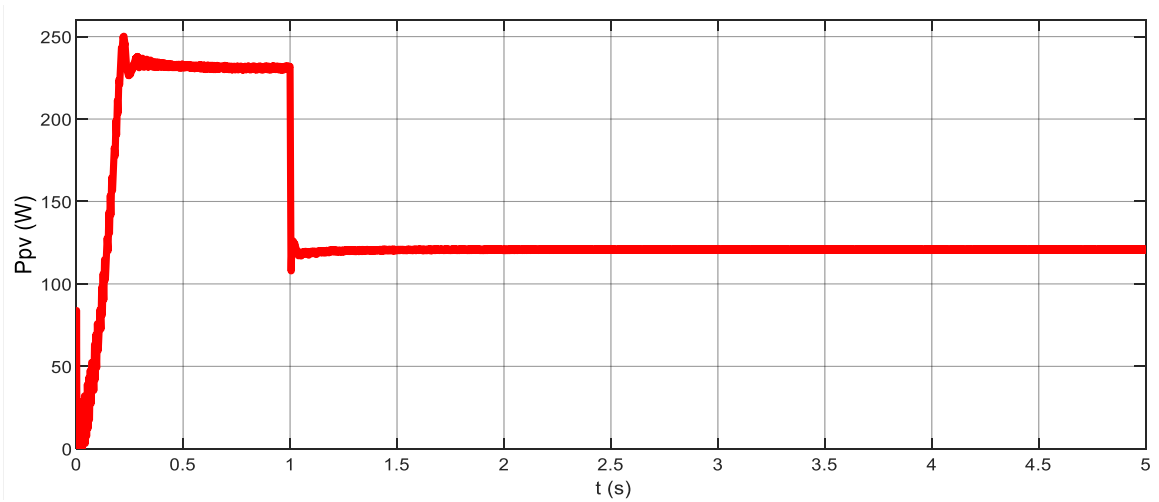
Figure 2. 15 Eclairement du panneau photovoltaïque



a. Courant



b. Tension



c. Puissance

Figure 2. 16 Évolution des grandeurs électriques du générateur photovoltaïque sous MPPT P&O lors d'une variation de l'éclairement

D'après les résultats obtenus, on observe une diminution significative du courant photovoltaïque, qui passe d'environ 7 A à 3,7 A. Par conséquent, la puissance maximale extraite diminue d'environ 230 W à 120 W. En revanche, la tension photovoltaïque reste pratiquement constante autour de 32 V.

Ces résultats montrent que la puissance produite par le système photovoltaïque dépend fortement du niveau d'éclairement, tandis que la commande MPPT P&O s'adapte rapidement aux variations des conditions d'ensoleillement afin d'assurer le suivi du nouveau point de puissance maximale.

2.7.2. Influence de la température sur les performances du système photovoltaïque avec MPPT P&O

Dans cette étude, nous analysons l'influence de la variation de la température sur les performances d'un système photovoltaïque commandé par l'algorithme MPPT P&O. À $t = 1$ s, la température a été modifiée de 25 °C à -10 °C, tandis que l'éclairement est resté constant.

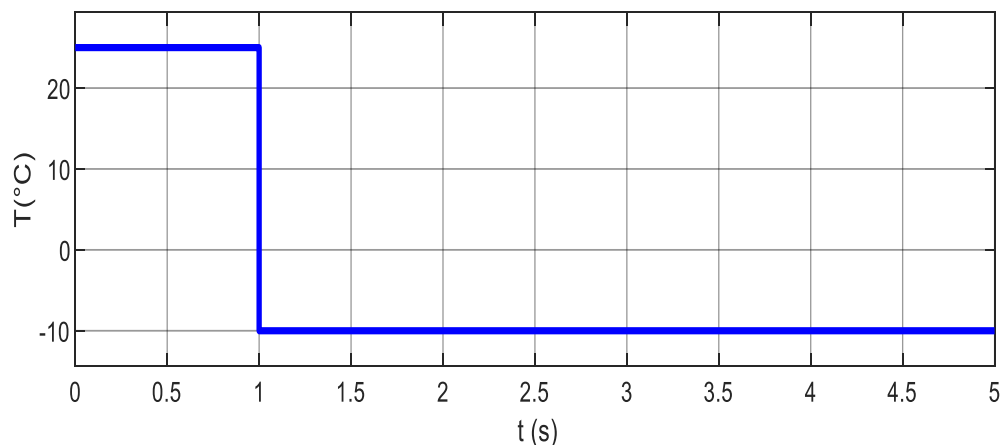
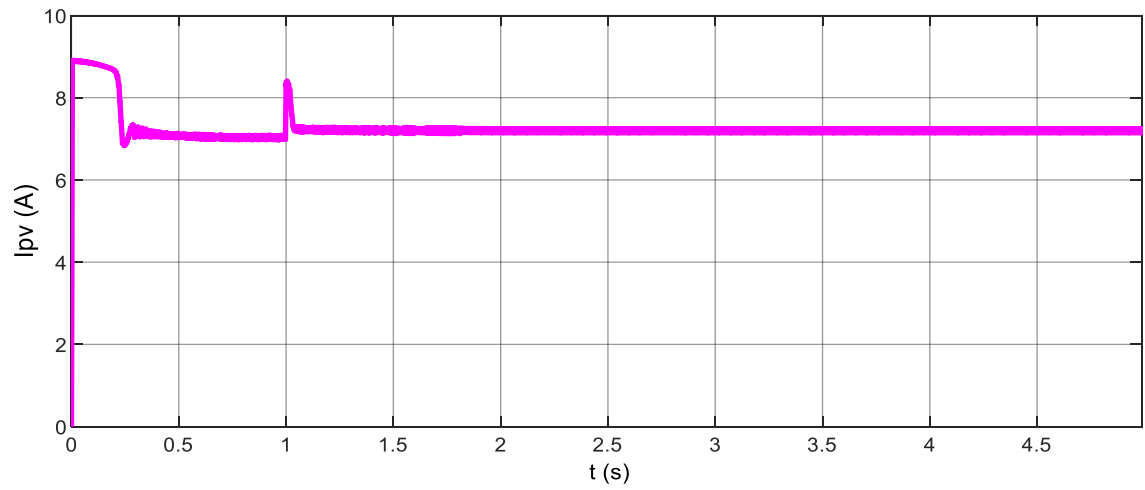
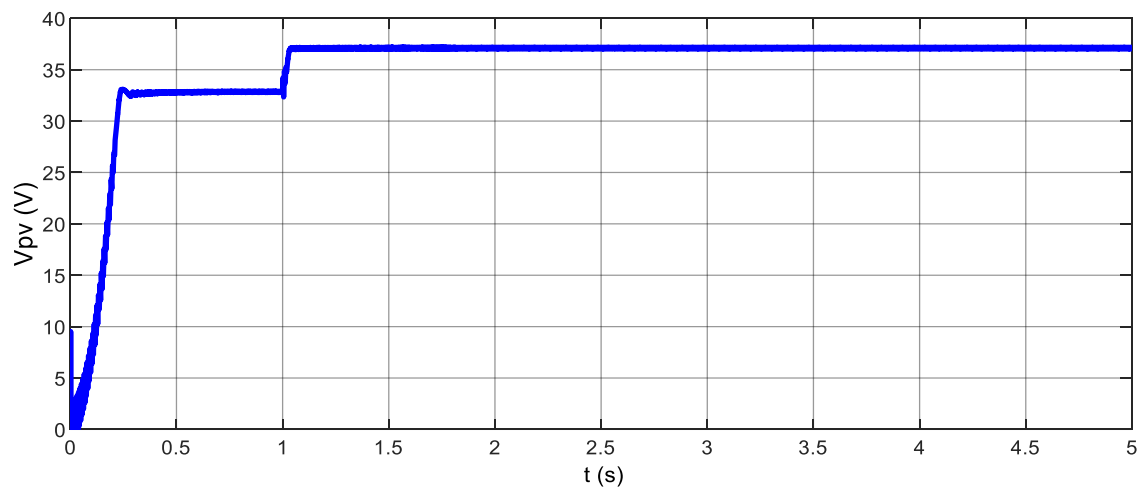


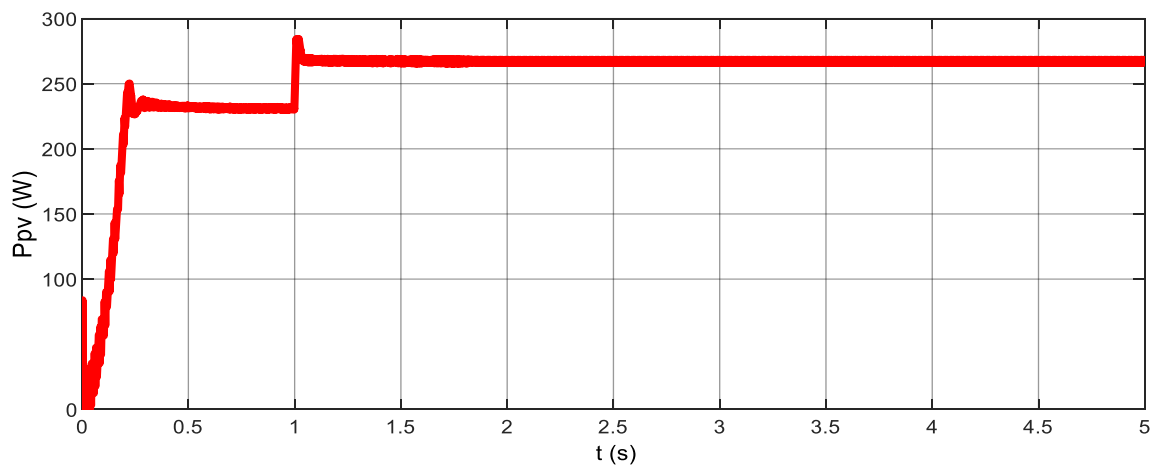
Figure 2. 17 Température du panneau photovoltaïque



a. Courant



b. Tension



c. Puissance

Figure 2. 18 Évolution des grandeurs électriques du générateur photovoltaïque sous MPPT P&O lors d'une variation de la température

Les résultats montrent qu'une diminution de la température entraîne une augmentation de la tension photovoltaïque, qui passe d'environ 33 V à 37 V. Par conséquent, la puissance maximale extraite augmente d'environ 230 W à 270 W. En revanche, le courant varie très peu et reste proche de sa valeur initiale.

Ces résultats confirment que la baisse de la température améliore les performances du générateur photovoltaïque en augmentant principalement la tension et la puissance produite. La commande MPPT P&O suit efficacement le nouveau point de puissance maximale après cette variation

2.8. Conclusion

En conclusion, l'utilisation d'une commande MPPT est indispensable pour exploiter efficacement l'énergie produite par un générateur photovoltaïque. Les différentes techniques présentées montrent que chaque méthode possède ses propres avantages et limites en termes de simplicité de mise en œuvre, de précision, de rapidité de convergence et de coût d'implémentation.

Parmi les méthodes étudiées, l'algorithme Perturbation et Observation (P&O) se distingue par sa simplicité de conception et son efficacité dans de nombreuses applications photovoltaïques. Toutefois, ses performances peuvent être affectées par les variations rapides des conditions climatiques, notamment celles de l'irradiance solaire ainsi que de la température.

Les concepts et méthodes développés dans ce chapitre constituent une base essentielle pour la modélisation et la simulation de la commande MPPT P&O appliquée à un système photovoltaïque. Ces travaux permettront d'évaluer les performances de cette commande sous différentes conditions de fonctionnement, en particulier en présence d'un ombrage partiel.

Chapitre 03

*Analyse et simulation des performances d'un système
photovoltaïque sous ombrage partiel avec la technique
MPPT P&O*

Chapitre 03

Analyse et simulation des performances d'un système photovoltaïque sous ombrage partiel avec la technique MPPT P&O

3.1. Introduction

L'ombrage partiel constitue l'un des phénomènes les plus critiques affectant les systèmes photovoltaïques, car il peut entraîner une réduction significative de la puissance produite et perturber le fonctionnement du générateur photovoltaïque. Son impact dépend à la fois du niveau d'ombrage et de la configuration du champ photovoltaïque.

Dans ce chapitre, une étude de l'effet de l'ombrage partiel sur les performances d'un système photovoltaïque commandé par l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) de type Perturbation et Observation (P&O) est présentée. Après avoir exposé les généralités relatives à l'ombrage partiel ainsi que ses conséquences sur les caractéristiques électriques du générateur photovoltaïque, une modélisation du système est réalisée sous MATLAB/Simulink. Plusieurs scénarios de fonctionnement sont ensuite étudiés afin d'analyser l'évolution de la tension, du courant et de la puissance photovoltaïques, ainsi que l'efficacité de la commande MPPT face aux variations de l'irradiance et aux conditions d'ombrage partiel.

3.2. Généralités sur l'ombrage partiel dans les systèmes photovoltaïques

3.2.1. Définition de l'ombrage partiel

Il se peut qu'un obstacle, de quelque nature qu'il soit (bâtiment, arbre, etc.) fasse de l'ombre aux panneaux solaires [27].

Les modules photovoltaïques sont très sensibles à l'ombrage. Contrairement aux panneaux solaires thermiques qui peuvent tolérer un peu d'ombrage, les modules photovoltaïques ne peuvent être occultés, principalement à cause des connections électriques (en série) entre les cellules et entre les modules [28].

On distingue 2 types d'ombrage : l'ombrage total et l'ombrage partiel. L'ombrage complet empêche tout rayonnement (direct et indirect) d'atteindre une partie de cellule photovoltaïque (par exemple, une déjection d'oiseau, une branche d'arbre sur le panneau, une

couverture). L'ombrage partiel empêche seulement le rayonnement direct d'atteindre une partie de la cellule photovoltaïque (par exemple, une cheminée, un arbre, un nuage). Souvent, les cellules d'un module photovoltaïque sont connectées en série. Ainsi, la cellule la plus faible va déterminer et limiter la puissance des autres cellules.

L'ombrage de la moitié d'une cellule ou de la moitié d'une rangée de cellule diminuera la puissance proportionnellement au pourcentage de la surface ombrée d'une cellule, dans ce cas de 50%.

L'ombrage total d'une rangée de cellules peut réduire à zéro la puissance du module [28].



Figure 3. 1 Exemple d'ombrage partiel d'un générateur photovoltaïque causé par un arbre

3.2.2. Impact de l'ombrage

L'ombrage sur une seule cellule photovoltaïque, peut perturber le fonctionnement de l'ensemble du module photovoltaïque.

Le schéma ci-dessous représente pour un panneau constitué de 3 rangées parallèles, dont chacune des rangées est composée de 9 cellules en série, l'impact que l'ombrage partiel (cellules grisées) peut avoir sur la production totale de ce même panneau

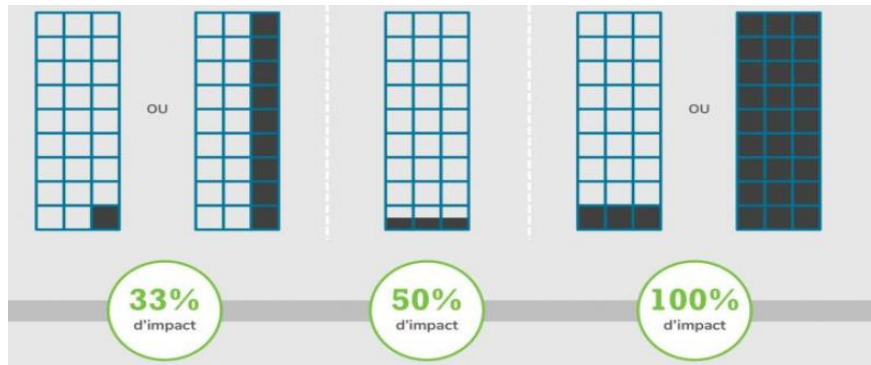


Figure 3. 2 l'impact de l'ombrage partiel sur la production d'un panneau photovoltaïque

Néanmoins, selon les technologies, l'impact d'une même ombre sera plus ou moins pénalisant. Les cellules photovoltaïques cristallines affichent en effet une diminution de rendement nettement supérieure à celle des cellules photovoltaïques amorphes, qui fonctionnent plutôt en lumière diffuse et donc sont moins dépendantes de l'angle d'incidence de la lumière solaire. Là où les cellules cristallines perdent 90% de leur efficacité, les cellules amorphes n'en perdent que 30% [29].

3.2.3. Moyens de réduction des effets de l'ombrage

Pour limiter les effets de l'ombre sur une installation solaire, nous pouvons:

- Installer des panneaux solaires équipés d'une diode by-pass
- Connecter chaque panneau à un optimiseur solaire
- Configurer les panneaux en parallèle en les associant à des micro-onduleurs [30]

3.3. Caractéristiques du champ PV

Le champ photovoltaïque (PV) utilisé dans cette étude est constitué de plusieurs modules photovoltaïques de type TSM-250PA05.08, connectés en série et en parallèle. Chaque module est composé de 60 cellules photovoltaïques raccordées en série. Les tableaux 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4 présentent les principales caractéristiques techniques des modules photovoltaïques utilisés dans cette étude [31].

Tableau 3. 1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque Trina Solar TSM-250PA05.08

Propriétés TSM-250 PA5.08	Valeur
Dimensions du plateau	1650 x 992 x 35 mm
le poids	18,6 kg
taille des cellules	156×156 mm
Nombre de cellules	60
Épaisseur du verre	3,2 mm
Type de cadre	aluminium ionisé
catégorie de protection des boîtes de livraison	IP 65
Type de connecteur	MC4
section transversale du câble	4 mm ²
longueur du câble	1000 mm

Tableau 3. 2 Spécifications électriques du module TSM-250PA05.08 dans des conditions de test standard

Spécifications électriques dans des conditions de test standard	TSM-250 PA5.08
Puissance maximale Pmax (W)	250
La tension du point de puissance maximum - Vmpp (V)	30,3 V
Le courant du point de puissance maximum - Impp (A)	8,27 A
La tension du circuit ouvert - Vco (V)	38 V
Courant du court-circuit - Isc (A)	8,79 A
L'efficacité du module η_m (%)	15,3%

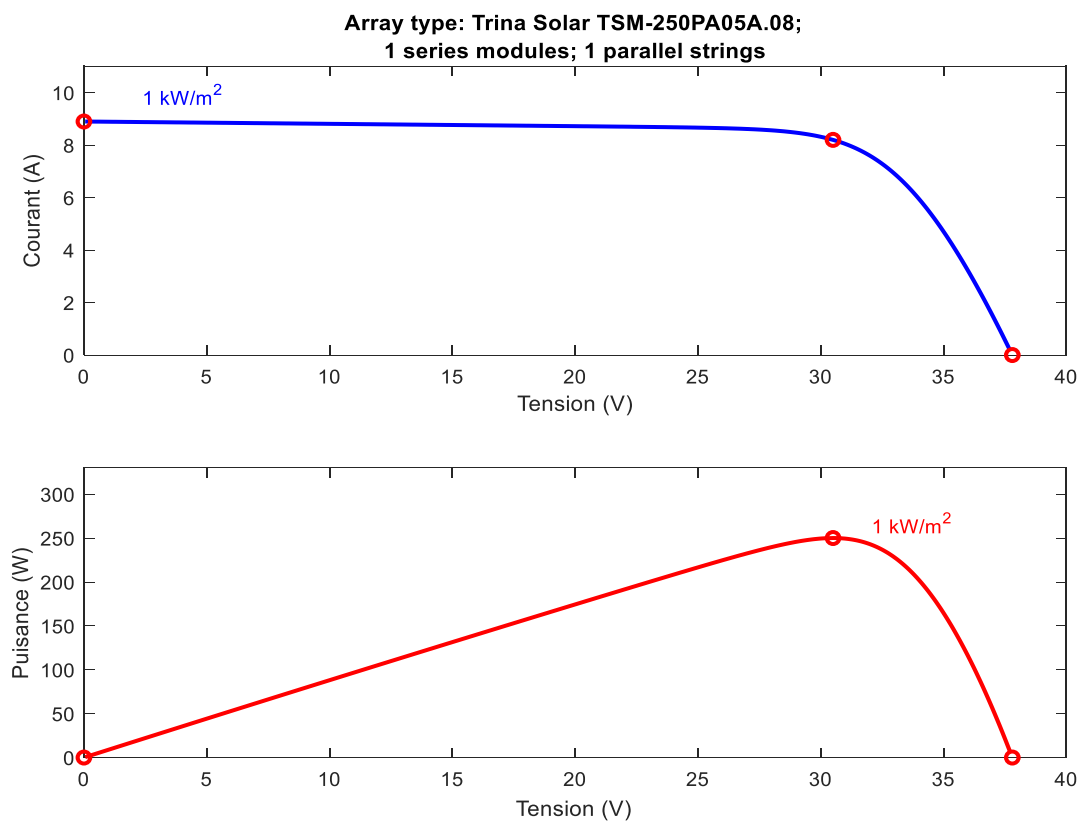
Tableau 3. 3 Caractéristiques électriques du module TSM-250PA05.08 à la température nominale de fonctionnement

Caractéristiques électriques à la température nominale de fonctionnement	TSM-250 PA5.08
Puissance maximale Pmax (W)	183 Wp
La tension du point de puissance maximum - Vmpp (V)	27,3 V

Le courant du point de puissance maximum - I_{mpp} (A)	6,7 A
La tension du circuit ouvert - V_{co} (V)	34,8 V
Courant du court-circuit - I_{sc} (A)	8,79 A

Tableau 3. 4 Coefficients de température du module TSM-250PA05.08

Les Coefficients de température	Valeur
Plage de températures de fonctionnement	-40 à 85 °C
Coefficient de température de P_{max} %/°C	-0,41
Coefficient de température de V_{oc} %/°C	-0.32
Coefficient de température de I_{sc} %/°C	0,053

**Figure 3. 3** Caractéristique I-V du module PV TSM250-PA05.08 sous conditions standards d'essai

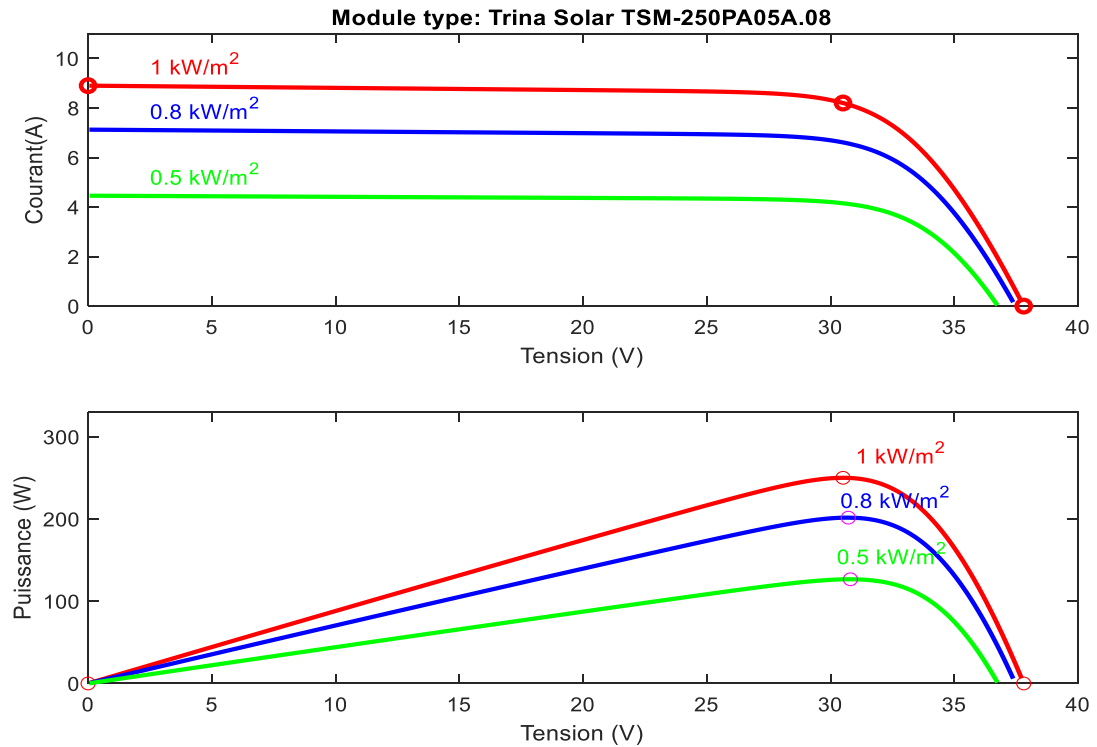


Figure 3. 4 Caractéristique I-V d'un champ de modules PV TSM250-PA05.08 avec variation d'irradiation

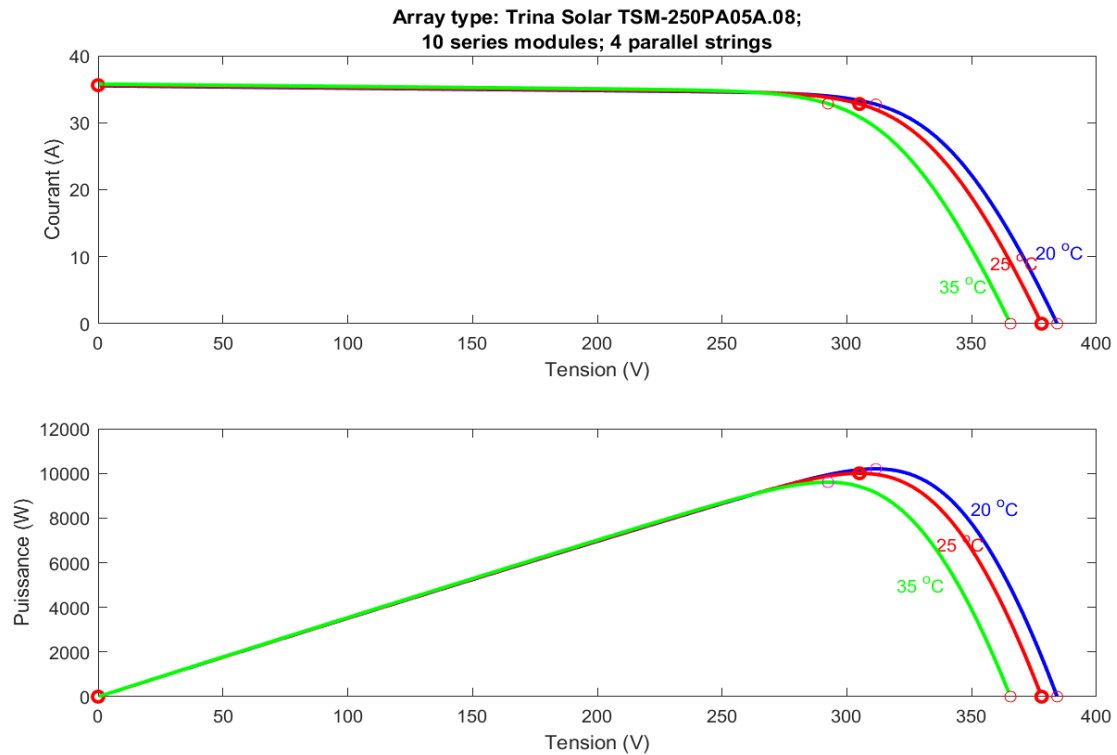


Figure 3. 5 Caractéristique I-V d'un champ de modules TSM250-PA05.08 avec variation de température

3.4. Paramètres du convertisseur Boost

Le convertisseur DC/DC assure le transfert de l'énergie produite par le panneau photovoltaïque vers la charge tout en permettant l'extraction de la puissance maximale disponible. Sa commande est réalisée à l'aide d'un signal de modulation de largeur d'impulsion (PWM), dont le rapport cyclique est ajusté par un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT). L'interrupteur de puissance utilisé dans ce convertisseur est généralement un transistor de type MOSFET ou IGBT.

Le tableau 3.5 regroupe les paramètres des différents composants du convertisseur.

Tableau 3. 5 Paramètres des composants du convertisseur BOOST

Composant	C1 (mF)	C2 (mF)	L(H)	R (Ohm)
Valeur	1	3.2	1.1478e-3	100

La figure 3.6 présente le schéma électrique du convertisseur DC/DC Boost utilisé dans le système photovoltaïque étudié.

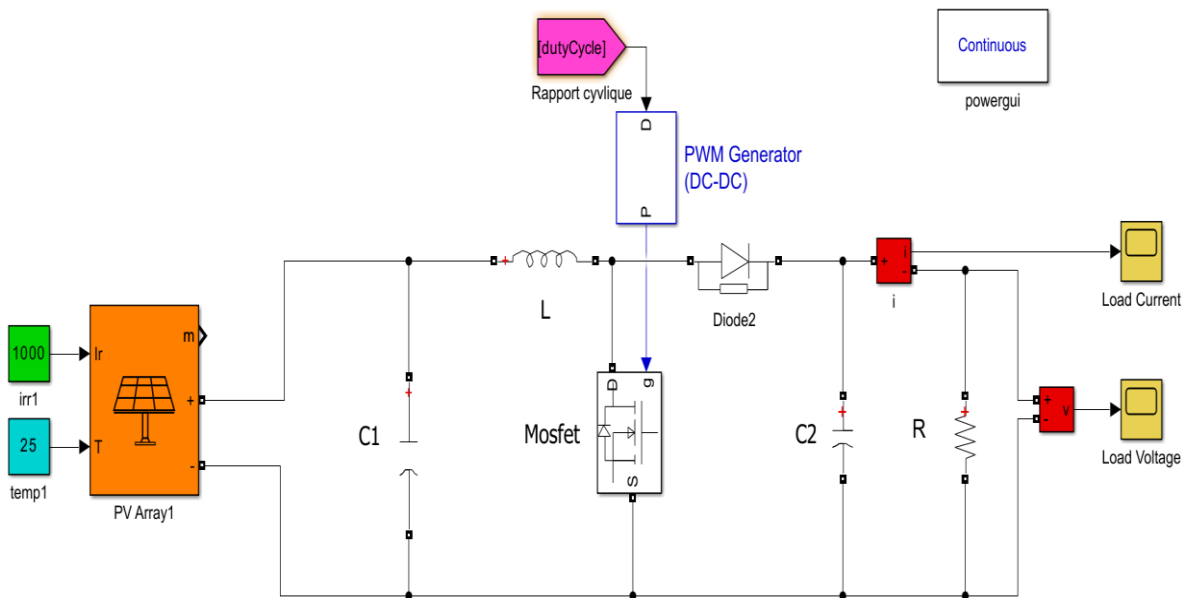


Figure 3. 6 Schéma de circuit du convertisseur DC/DC BOOST

3.5. Résultats de simulation

Afin d'étudier les performances de l'algorithme proposé, nous avons effectué des simulations dans l'environnement MATLAB/Simulink en appliquant la commande MPPT P&O dans des conditions normales de fonctionnement, puis sous un ombrage partiel progressif, ainsi que lors du retour progressif aux conditions normales de fonctionnement du générateur photovoltaïque.

3.5.1. Évaluation des performances de la commande MPPT P&O dans des conditions normales

La figure 3.7 suivante représente le schéma Simulink de notre système photovoltaïque. Dans cette étude, les deux panneaux photovoltaïques sont soumis aux mêmes conditions de fonctionnement, avec une irradiation constante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C , afin d'évaluer les performances de la commande MPPT P&O en régime normal. »

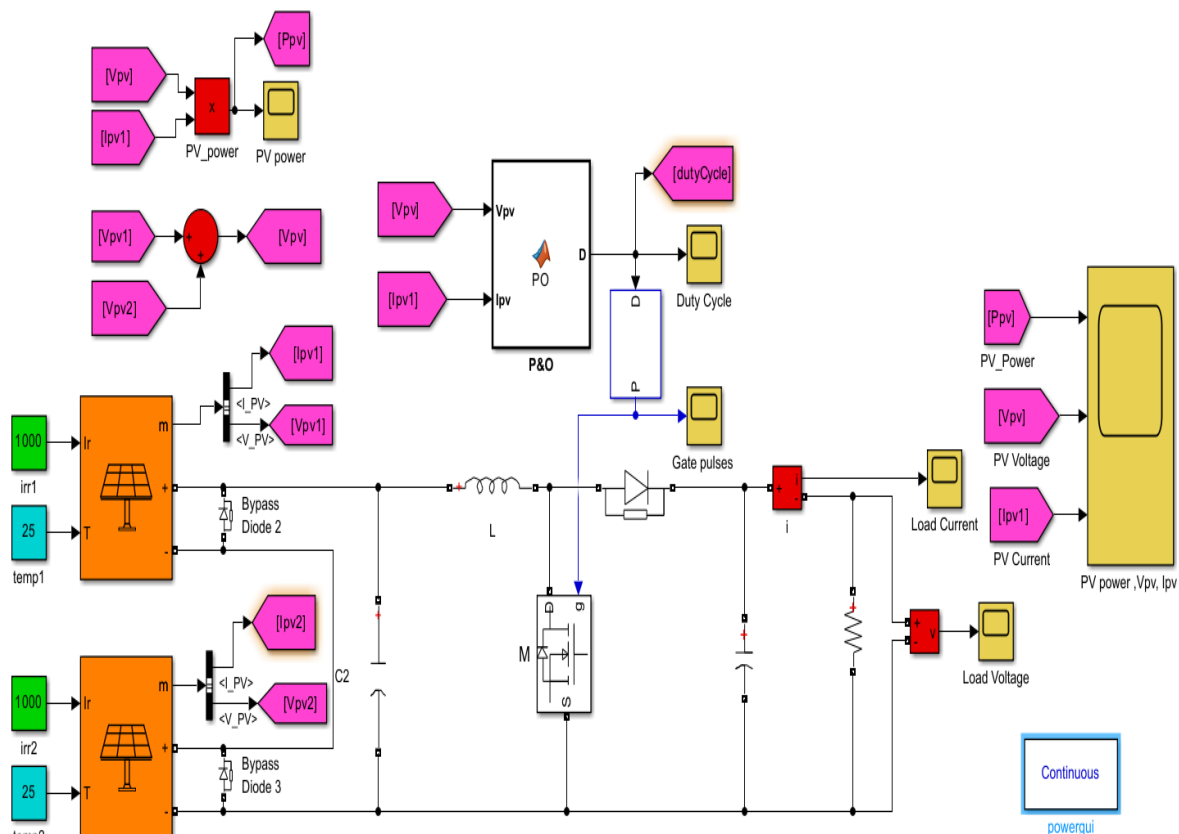
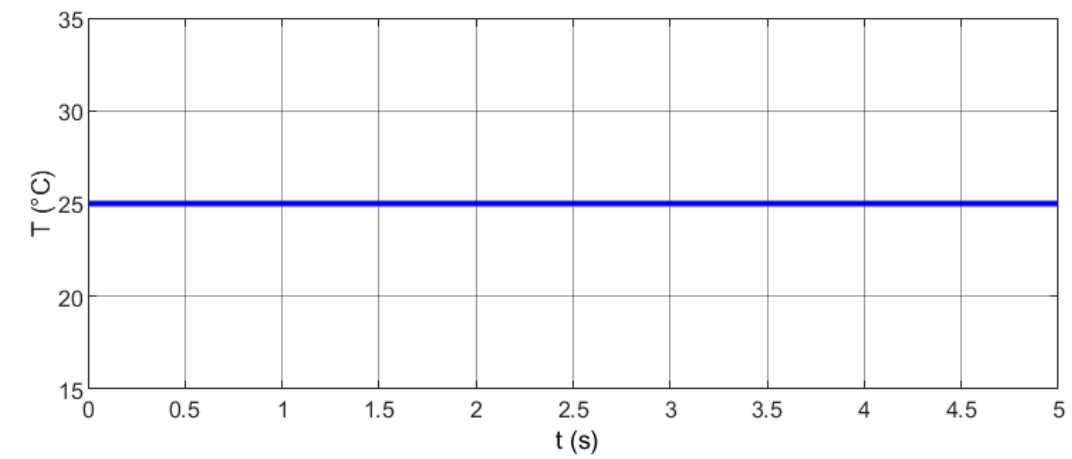
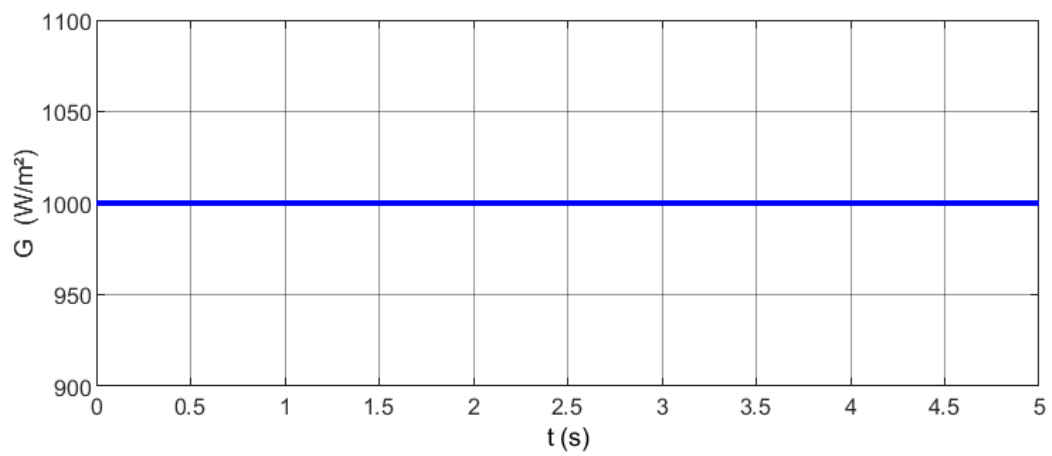


Figure 3. 7 Schéma Simulink du système PV étudié



a. Température



b. Eclairement

Figure 3. 8 Température et Eclairement du panneau photovoltaïque PV2

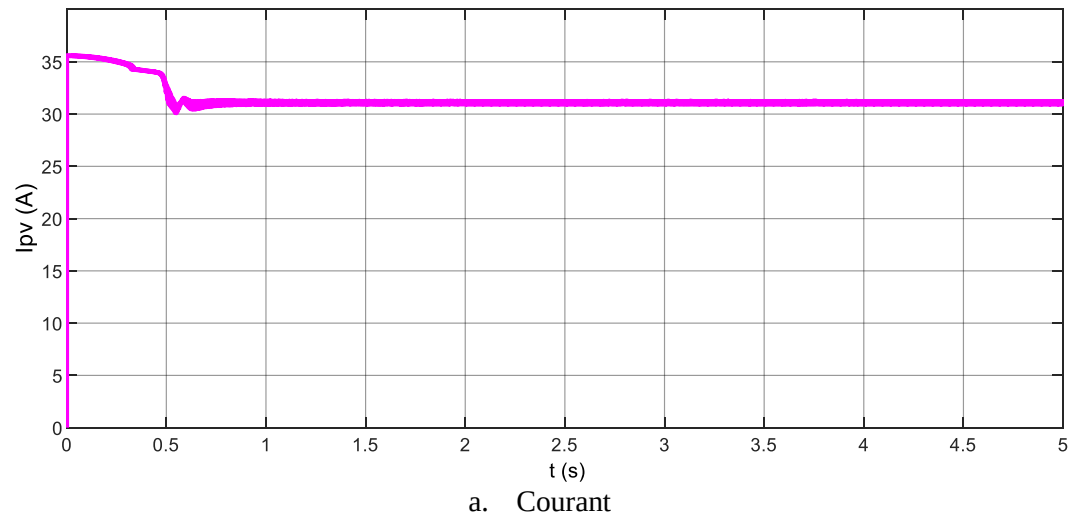
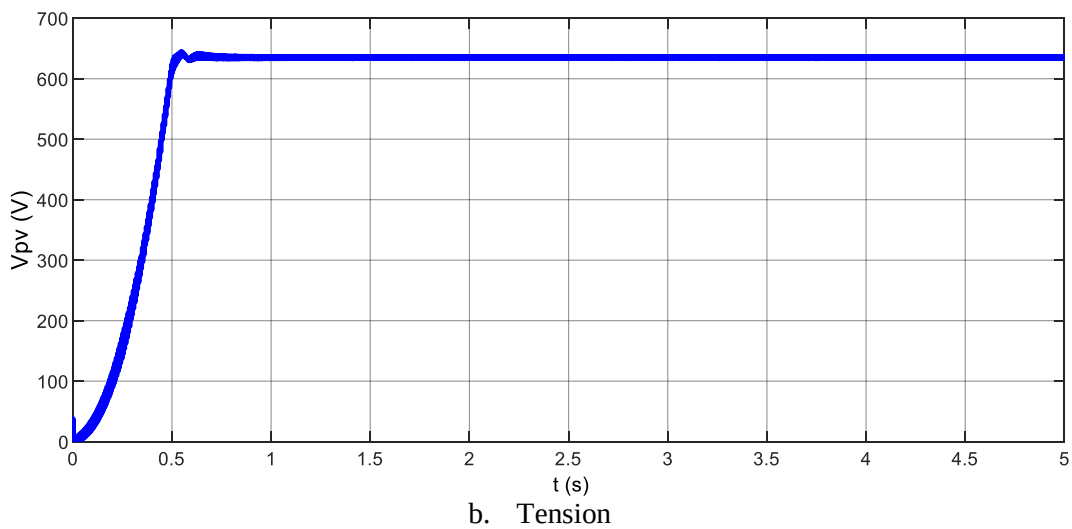
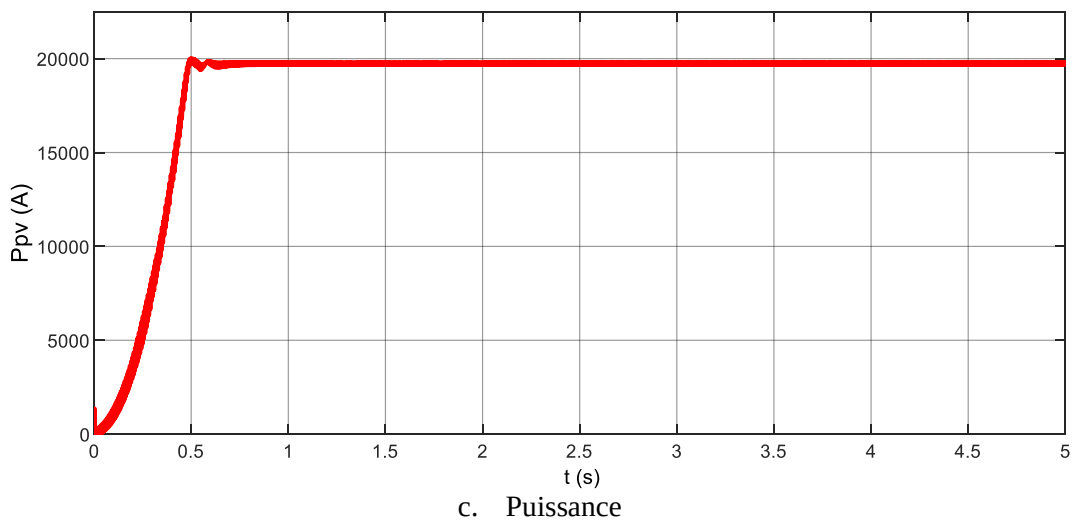


Figure 3. 9 Évolution des grandeurs photovoltaïques sous la commande MPPT P&O dans des conditions normales de fonctionnement.

La figure 3.9 présente l'évolution de la tension, du courant et de la puissance du générateur photovoltaïque sous des conditions normales d'irradiation ($G = 1000 \text{ W/m}^2$) et de température ($T = 25^\circ\text{C}$), appliquées aux deux panneaux photovoltaïques TSM-250PA05.08. Les résultats de simulation montrent que la commande MPPT P&O permet d'atteindre rapidement le point de puissance maximale (MPP).

La tension photovoltaïque V_{pv} augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur stable d'environ 640 V après un temps de réponse inférieur à 0,55 s. Le courant photovoltaïque I_{pv} se stabilise autour de 31 A après une faible phase transitoire. La puissance générée P_{pv} atteint une valeur proche de 20 kW, correspondant au point de puissance maximale du générateur photovoltaïque, après un temps de réponse d'environ 0,5 s.

Ces résultats confirment l'efficacité de l'algorithme P&O dans le suivi du point de MPP sous des conditions d'ensoleillement uniformes, en assurant une convergence rapide vers le point de fonctionnement optimal et une bonne stabilité en régime permanent.

3.5.2. Étude du comportement de la commande MPPT P&O sous un ombrage partiel de 50 % ($G_{pv2} = 500 \text{ W/m}^2$)

Dans cette étude, l'irradiation du premier panneau photovoltaïque est maintenue constante à 1000 W/m^2 , tandis que celle du second panneau est réduite à l'instant $t=1\text{s}$ de 1000 W/m^2 à 500 W/m^2 afin d'évaluer l'influence d'un ombrage partiel sur les performances de la commande MPPT P&O.

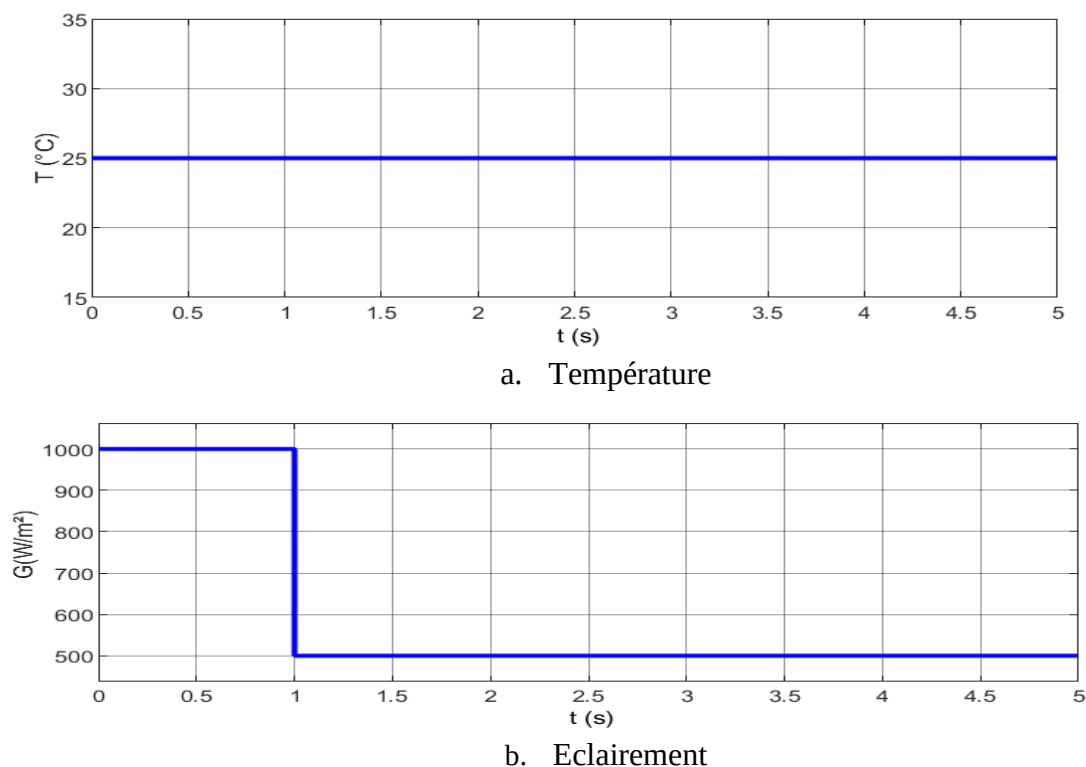
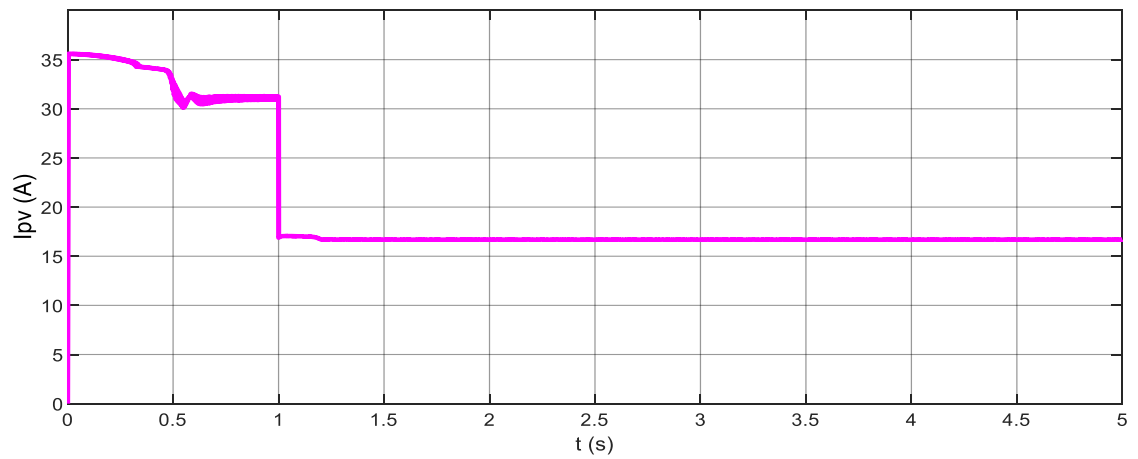
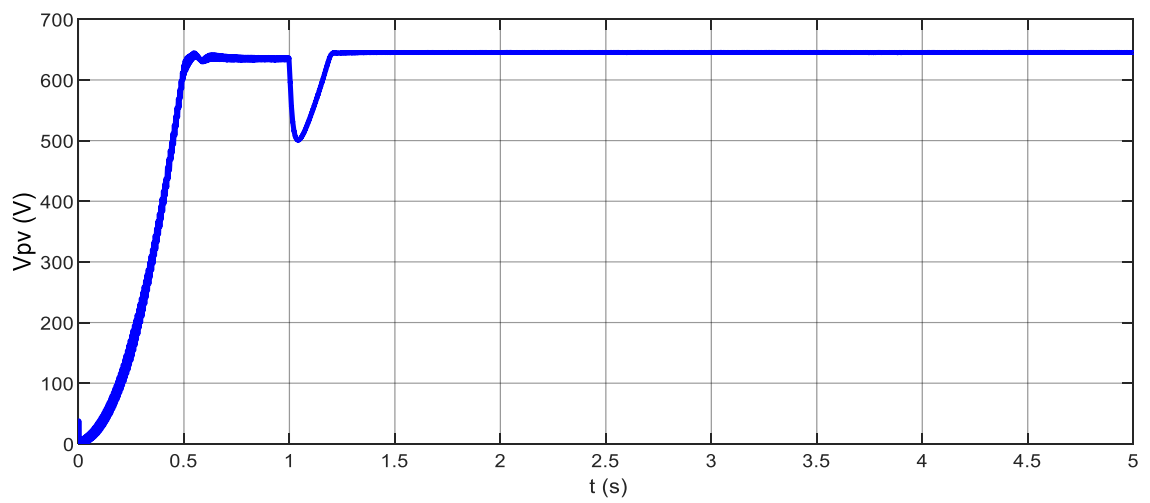


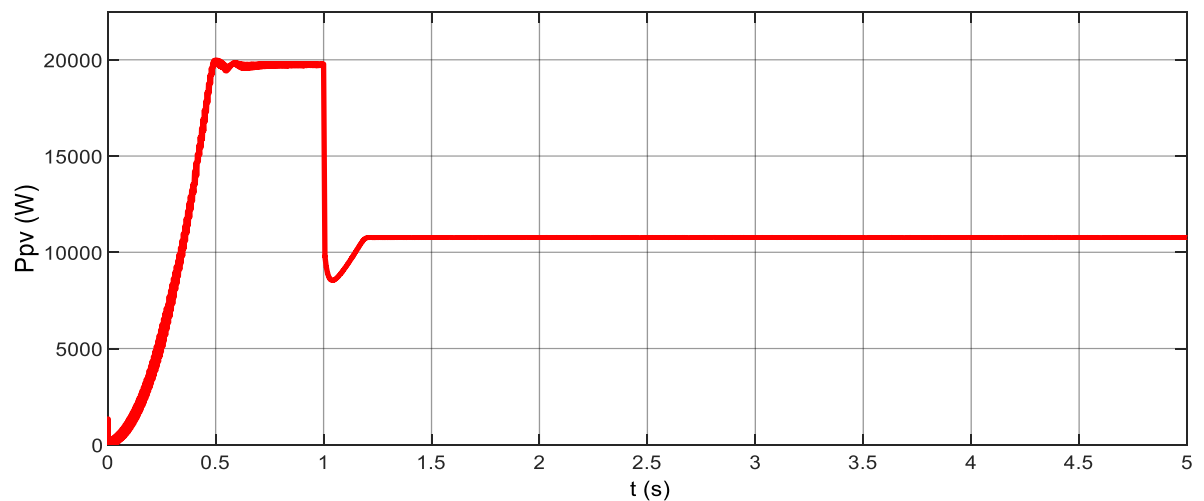
Figure 3. 10 Température et Eclairement du panneau photovoltaïque PV2



a. Courant



b. Tension



c. Puissance

Figure 3. 11 Évolution du générateur photovoltaïque sous la commande MPPT P&O en présence d'un ombrage partiel de 50 %

La figure 3.11 présente l'évolution du courant photovoltaïque I_{pv} , de la tension V_{pv} et de la puissance P_{pv} sous l'effet d'un ombrage partiel, où l'irradiance du deuxième panneau photovoltaïque (PV2) passe de 1000 W/m^2 à 500 W/m^2 .

Le courant photovoltaïque I_{pv} se stabilise initialement autour de 31 A (Figure 3.11a). Lorsque l'irradiance du second panneau est réduite de 1000 à 500 W/m^2 , soit une diminution de 50% , le courant chute à environ 17 A avant de se stabiliser à cette nouvelle valeur. Cette diminution met en évidence l'impact direct de l'ombrage partiel sur le courant fourni par le générateur photovoltaïque.

La Figure 3.11.b montre que la tension photovoltaïque V_{pv} augmente rapidement au démarrage pour atteindre une valeur stable d'environ 640 V . Lors de l'application de l'ombrage partiel sur le second panneau ($1000 \rightarrow 500 \text{ W/m}^2$), une légère perturbation transitoire est observée. La tension varie faiblement autour de cette valeur sans modification significative de sa valeur moyenne. Après cette phase transitoire, V_{pv} retrouve rapidement son régime permanent, ce qui indique que l'ombrage partiel n'affecte pas significativement la tension du générateur photovoltaïque.

Quant à la puissance photovoltaïque P_{pv} , elle diminue de manière significative, passant d'environ 20 kW à $10,5 \text{ kW}$, soit une réduction proche de 50% . Après cette perturbation, l'algorithme MPPT basé sur la méthode de perturbation et d'observation (P&O) parvient à localiser rapidement un nouveau point de fonctionnement stable correspondant aux nouvelles conditions d'irradiation.

Ces résultats montrent que l'ombrage partiel affecte principalement le courant et la puissance du système photovoltaïque, tandis que la tension demeure relativement stable. Ils confirment également l'efficacité de la commande MPPT P&O pour suivre les variations rapides de l'irradiance et maintenir le fonctionnement du générateur photovoltaïque à proximité de son point de puissance maximale.

3.5.3. Étude de la commande MPPT P&O sous ombrage partiel et retour aux conditions normales

Dans cette étude, seule l'irradiance du second panneau varie successivement entre 1000 , 500 , 300 , 500 et 1000 W/m^2 , tandis que le premier panneau est maintenu à une irradiance constante de 1000 W/m^2 .

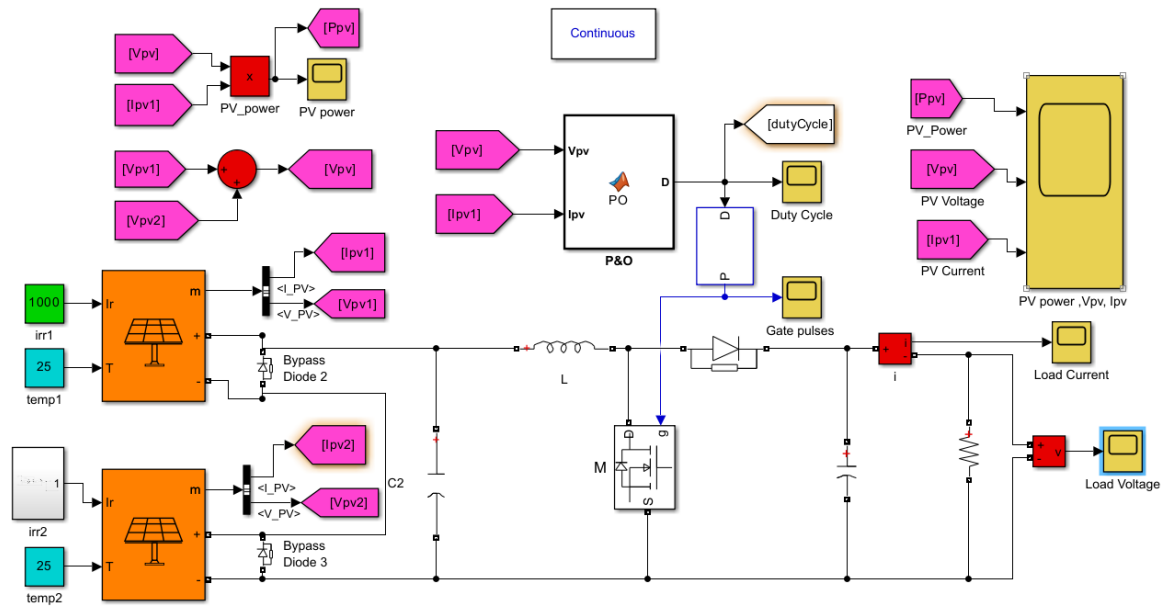


Figure 3. 12 Schéma de simulation de la commande MPPT P&O sous ombrage partiel

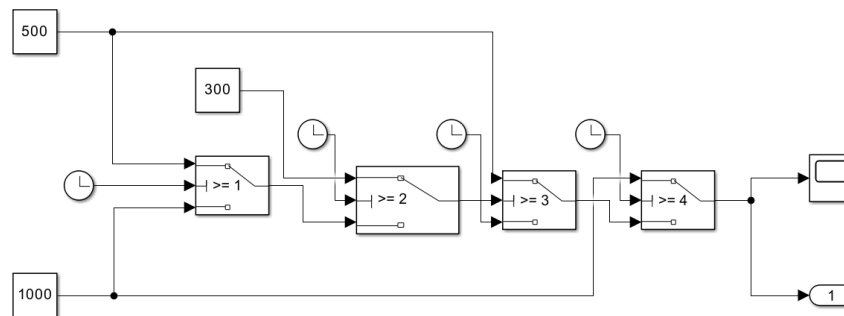


Figure 3. 13 Schéma block d'évolution de l'irradiance du panneau solaire 2

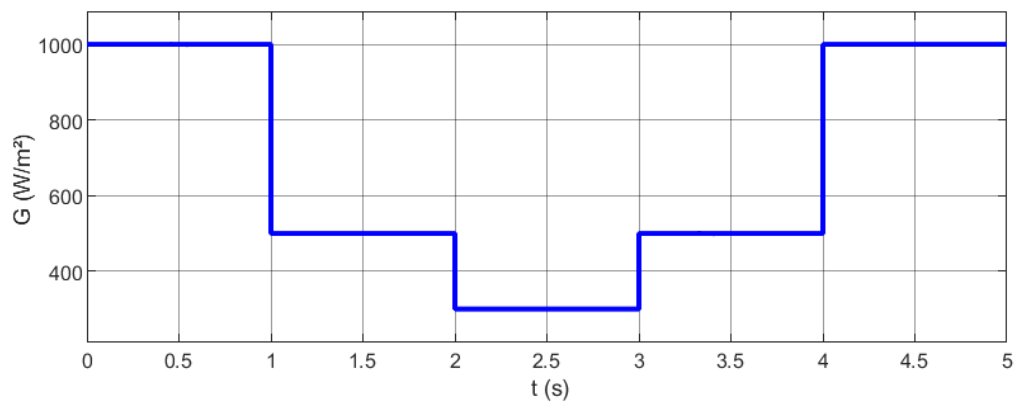
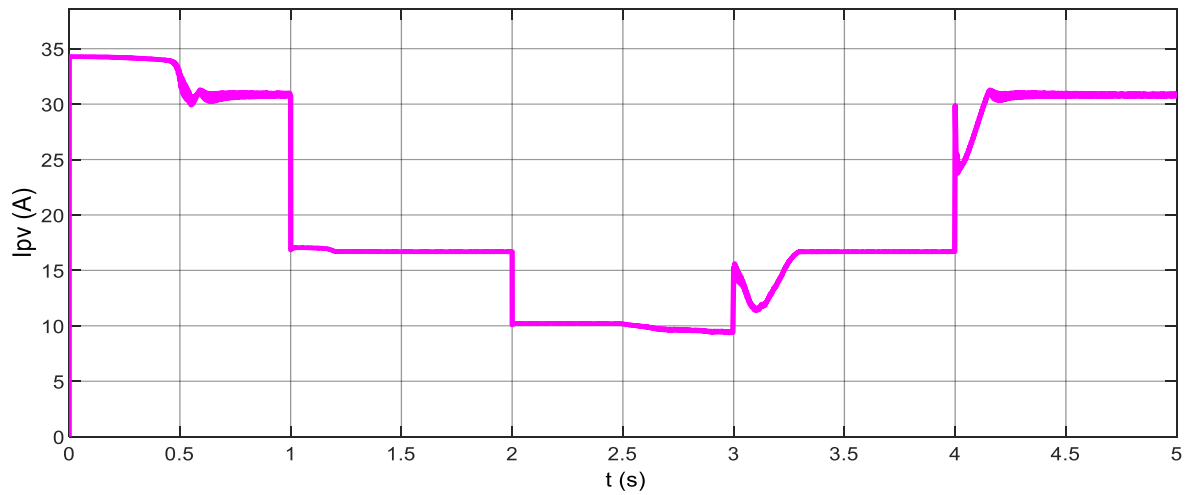
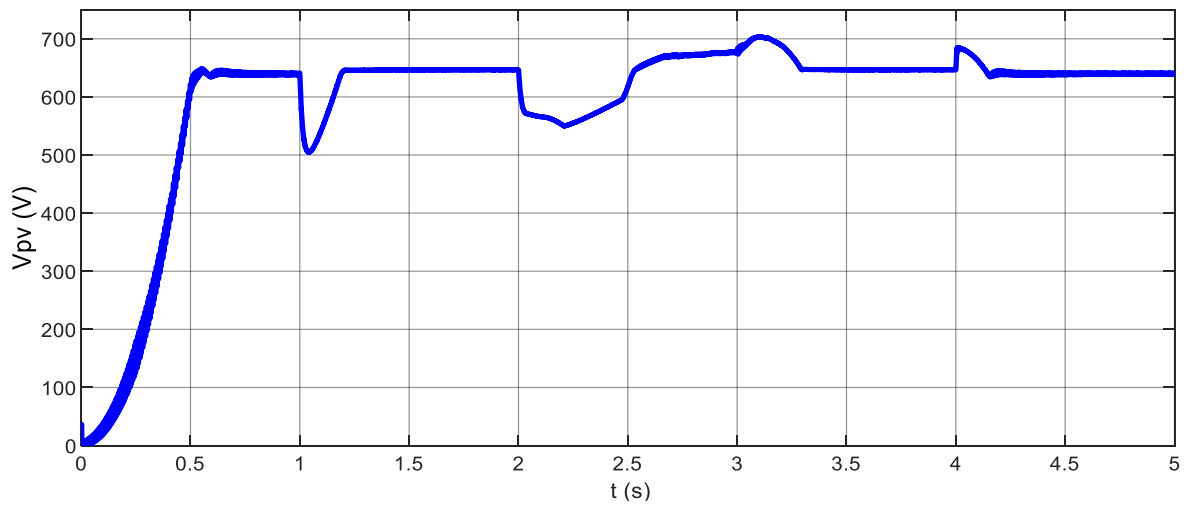


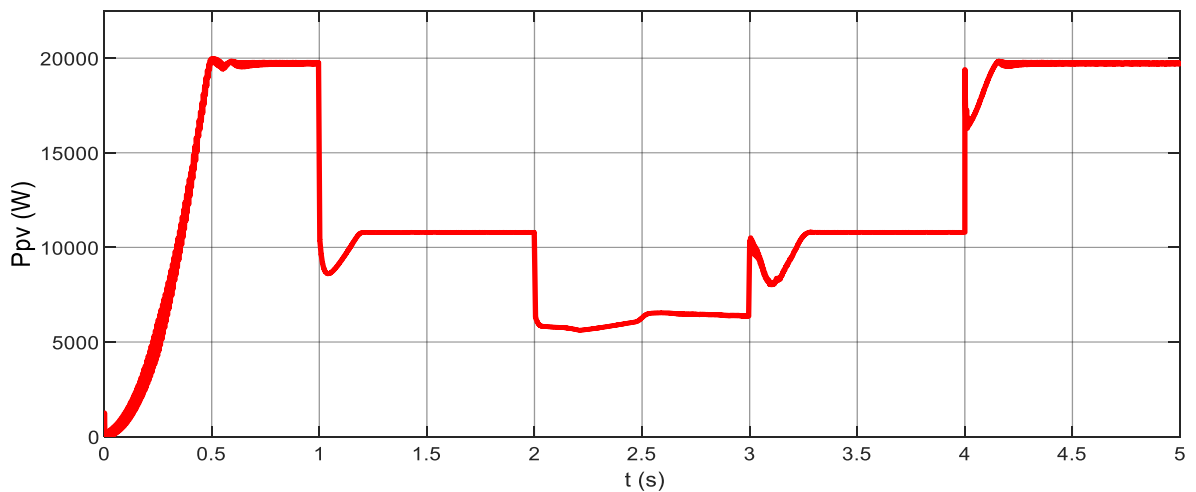
Figure 3. 14 Évolution de l'éclairement du panneau photovoltaïque PV2



a. Courant



b. Tension



c. Puissance

Figure 3. 15 Évolution des grandeurs photovoltaïques sous la commande MPPT P&O en conditions d'ombrage partiel

D'après la figure (3.15. a), on observe que le courant photovoltaïque I_{pv} varie directement avec l'irradiance. Il passe d'environ 31 A à 17 A lorsque l'irradiance diminue de 1000 à 500 W/m², puis atteint près de 10 A pour une irradiance de 300 W/m². Lors du retour progressif aux conditions normales, le courant augmente de nouveau jusqu'à retrouver sa valeur initiale.

En revanche, la tension photovoltaïque V_{pv} augmente rapidement au démarrage jusqu'à atteindre une valeur stable (Figure 3.15. b). Lors des variations successives de l'irradiance du panneau PV2 (1000, 500 puis 300 W/m²), seules de faibles variations de la tension sont observées. Lorsque l'irradiance revient progressivement à 500 W/m² puis à 1000 W/m², la tension retrouve sa valeur initiale. Ces résultats montrent que l'ombrage partiel influence peu la tension du générateur photovoltaïque.

La figure de simulation (3. 15.c) montre que la puissance photovoltaïque P_{pv} suit la même évolution que le courant. Elle est d'environ 20 kW pour une irradiance de 1000 W/m², diminue à 10,5 kW pour 500 W/m², puis à 6 kW pour 300 W/m². Lorsque l'irradiance augmente à nouveau, la puissance retrouve progressivement ses valeurs initiales.

Ces résultats montrent que lors du retour progressif aux conditions normales et de la disparition de l'ombrage partiel, le courant, la tension et la puissance retrouvent leurs valeurs initiales. Ils confirment également l'efficacité de la commande MPPT P&O pour suivre le point de puissance maximale en présence d'un ombrage partiel.

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, les performances de la commande MPPT P&O ont été étudiées par simulation sous MATLAB/Simulink, en conditions normales de fonctionnement et sous ombrage partiel. Les résultats obtenus ont montré que l'algorithme atteint rapidement le point de puissance maximale (MPP), avec un temps de réponse d'environ 0,5 s, tout en assurant une bonne stabilité de la tension, du courant et de la puissance.

L'application d'un ombrage partiel sur le second panneau photovoltaïque a entraîné une diminution significative du courant et de la puissance produite, tandis que la tension est restée relativement stable. Les différentes variations d'irradiance ont permis d'évaluer le comportement de la commande MPPT P&O face aux perturbations induites par l'ombrage partiel.

Les résultats ont également montré que l'algorithme P&O conserve sa capacité à suivre le point de puissance maximale et à s'adapter rapidement aux nouvelles conditions de fonctionnement. Cette étude confirme ainsi l'efficacité de la méthode P&O pour l'extraction de la puissance maximale, tout en mettant en évidence l'impact négatif de l'ombrage partiel sur les performances du générateur photovoltaïque.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail était d'étudier les performances d'un système photovoltaïque équipé d'une commande de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Cette étude a permis de mettre en évidence l'importance de l'extraction optimale de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque afin d'améliorer son rendement et de garantir une meilleure adaptation aux variations des conditions climatiques.

Les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink ont montré que l'association d'un générateur photovoltaïque à un convertisseur Boost commandé par l'algorithme MPPT de type Perturbation et Observation (P&O) permet d'assurer un suivi efficace du point de puissance maximale dans des conditions normales de fonctionnement. Les résultats obtenus ont mis en évidence une convergence rapide vers le point de fonctionnement optimal ainsi qu'une bonne stabilité de la tension, du courant et de la puissance en régime permanent.

L'étude du comportement du système sous différentes conditions d'ombrage partiel a permis d'évaluer l'influence des variations d'irradiance sur les performances du générateur photovoltaïque. Les résultats ont montré que l'ombrage partiel entraîne une diminution importante du courant et de la puissance produite, tandis que la tension reste relativement stable. Malgré ces perturbations, l'algorithme P&O conserve une bonne capacité d'adaptation et permet de maintenir le fonctionnement du système au voisinage du point de puissance maximale disponible.

Les résultats obtenus confirment ainsi l'intérêt de l'utilisation des techniques MPPT dans les systèmes photovoltaïques modernes. Ils démontrent également l'efficacité de la méthode P&O, qui se distingue par sa simplicité de mise en œuvre, sa robustesse et son faible coût de calcul.

Comme perspectives, il serait intéressant d'étendre cette étude à l'évaluation et à la comparaison d'algorithmes MPPT plus avancés, tels que la Conductance Incrémentale (INC), la Logique Floue ou les techniques basées sur l'Intelligence Artificielle, afin d'améliorer les performances du système sous des conditions d'ombrage partiel complexes. Une validation expérimentale des résultats obtenus par simulation constituerait également une étape importante pour confirmer les performances du système dans des conditions réelles de fonctionnement.

Bibliographie

- [1] <https://www.eniplenitude.fr/en-lumiere/maison-ecologique/solaire/avantages-panneaux-photovoltaïques>
- [2] Belalem abdeldjabar, Sandali walid, “ simulation d’une cellule solaire photovoltaïque à base de $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$,” mémoire de master, université kasdi merbah ouargla, 2016/2017.
- [3] Remili azzeddene, Saadi hamza, “ intégration de système photovoltaïque aux pivots d’irrigation de type anabib,” mémoire de master, université de mohamed el-bachir el-ibrahimi - bordj bou arreridj, 2021/2022.
- [4] Benahmed salim riad, Bemmami fethallah, “ etude et conception avec simulation 3d d’un suiveur solaire,” mémoire de master, université aboubakr belkaïd– tlemcen, 2020/2021.
- [5] Dr. Belaid lalouni sofia, “ cours energie solaire photovoltaïque,” cours, université a.mira de bejaia, 2020/2021.
- [6] G. Maïlys, « réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres », thèse de doctorat, insa de lyon, 2012.
- [7] Gouareh Abdelhamid, “ simulation d’une cellule solaire en couches minces à base de $\text{Sb}_2(\text{Se}_1-\text{XsX})_3$,” mémoire de master, kasdi merbah ouargla, 2020/2021.
- [8] Derbali messaouda, Cheknar nour el houda, “ etude et simulation des commandes mppt d’un système photovoltaïque sous variation d’éclairement solaire,” mémoire de master, université amar thelidji- laghouat, 2020/2021.
- [9] Achouri mohamed cherif, “ modélisation d’un panneau solaire photovoltaïque,” mémoire de master, university badji mokhtar- annaba, 2021.
- [10] Gohmes mohammed yacine, Djellali belkasem, djedai akram, “ modélisation et commande d’un système pv connecté au réseau électrique utilisant dstatcom,” mémoire de master, université kasdi merbah ouargla, 2019/2020.
- [11] Benkassis amira, Menasria azzeddine, “ etude et modélisation d’un panneau photovoltaïque,” mémoire de master, université 8 mai 1945 – guelma, 2024.
- [12] Legougui asaad taha, Azizi abdenour, “ application des méthodes d’intelligence artificielle dans la modélisation optimale des générateurs photovoltaïques,” mémoire de master, université kasdi merbah ouargla, 2022/2023.

- [13] Bouzaghou sedik, Berrian djaber, “ développement des modèles mathématiques d’un générateur photovoltaïque d’défectueux,” mémoire de master, université des sciences et de la technologie houari boumedien, 2014/2015
- [14] Xueyang jiang, “ étude comparative de structures de convertisseurs pour les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique moyenne tension,” comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique, l’université du québec à trois-rivières, 2019.
- [15] Nadjia med hossam eddine taha, Laiadi abd el karim, “ commande d’un convertisseur dc-dc entrelacé,” mémoire de master, université mohamed khider de biskra, 2021/2022.
- [16] M. Abouchabana nabil, “ etude d’une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un mppt,” memoire de magister en electronique, ecole nationale superieure polytechnique, 2008/2009.
- [17] Mr lakhdar toumi abdellah, Mr Badaoui yacine, “ etude et conception ’ d’un convertisseur dc–dc boost,” memoire de magister en electronique, université ibn khaldoun de tiaret, 2017/2018.
- [18] Gaied chortane bacem, “amélioration de l’algorithme mppt pour un système pv par l’intégration des nouvelles techniques basées sur l’intelligence artificielle,” mémoire de maîtrise en génie, école de technologie supérieure (éts), université du québec, montréal, canada, 2022.
- [19] Ben nasser bilel, « étude et modélisation de la commande mppt avec matlab », mémoire de maîtrise en ingénierie, université du québec à rimouski (uqar), rimouski, canada, octobre 2021.
- [20] Rugamba jean vainqueur e, Manirumva eloge, « étude et optimisation d’un système pv en utilisant des mppt à base des algorithmes intelligents », mémoire de master , université ibn khaldoun de tiaret, 2020/2021. sedrati youcef, nouar hatem, “ implémentation de l’algorithme p&o pour un système photovoltaïque,” mémoire de master, université kasdi merbah-ouargla, 2015/2016.
- [21] Sedrati youcef, Nouar hatem, “ implémentation de l’algorithme p&o pour un système photovoltaïque,” mémoire de master, université kasdi merbah-ouargla, 2015/2016.
- [22] <https://www.multipower.fr/mppt-techniques/>
- [23] Yawovi kofson arnold langueh, “implémentation d’algorithmes basés sur les réseaux de neurones et la logique floue sur circuit fpga pour le suivi du point de puissance maximale dans

les générateurs photovoltaïques,” mémoire de maîtrise en ingénierie, université du québec à rimouski (uqar), 2024.

[24] Komlan wisdom attipou, “optimisation d’un panneau solaire ombragé à l’aide de l’algorithme pso,” mémoire de maîtrise en génie électrique, université du québec à trois-rivières, 2025.

[25] Abbes h, Abid h, Loukil k., Toumi a. et Abid m., « étude comparative de cinq algorithmes de commande mppt pour un système photovoltaïque », revue des energies renouvelables, vol. 17, n° 3, pp. 435-445, 2014.

[26] Talbi said, Riah rachid, “comparaison et synthèse d’un nouvel algorithme mppt robuste pour une chaîne de production d’énergie photovoltaïque,” projet de fin d’études, école nationale polytechnique (enp), alger, 2011.

[27] Benblidia houssam, Kerkar amar, “étude de l’effet de l’ombrage sur un système photovoltaïque,” mémoire de master, université saad dahlab de blida, 2014/2015.

[28] Zroug meriem, Bouaicha khalida, “l’effet de l’ombrage partiel sur la puissance produite par les pv (panneaux photovoltaïques),” mémoire de master, université badji mokhtar annaba, 2023/2024.

[29] <https://guidebatimentdurable.brussels/produire-lelectricite-verte-photovoltaique-autres/2-analyser-potentiel-production-photovoltaique>

[30] <https://www.goensol.com/production-panneau-solaire/ombre-solaire>

[31] <https://www.solarelectricsupply.com/trina-solar-tsm-250pa05-solar-panels>

ملخص:

يتناول هذا العمل دراسة نظام كهروضوئي مزود بخوارزمية تتبع نقطة القدرة العظمى من نوع الاضطراب والملاحظة. تم تحليل تأثير الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة على أداء النظام، بالإضافة إلى دراسة عمل المحولات المستمرة المستمرة. كما تم إجراء محاكاة لتقييم أداء النظام في ظروف تشغيل مختلفة، خاصة في حالة التظليل الجزئي. وقد أكدت النتائج فعالية خوارزمية الاضطراب والملاحظة في تتبع نقطة القدرة العظمى.

الكلمات المفتاحية : مولد ضوئي , تحكم MPPT , DC/DC محول , خوارزمية الإزعاج والملاحظة , (P&O) التظليل الجزئي .

Résumé :

Ce mémoire présente l'étude d'un système photovoltaïque équipé d'une commande MPPT de type Perturbation et Observation (P&O). Les effets de l'irradiance solaire et de la température sur les performances du système sont analysés, ainsi que le fonctionnement des convertisseurs DC-DC. Des simulations ont été réalisées afin d'évaluer les performances du système sous différentes conditions, notamment en présence d'un ombrage partiel. Les résultats obtenus confirment l'efficacité de l'algorithme P&O dans le suivi du point de puissance maximale.

Mots-clés : Générateur PV, Commande MPPT, DC/DC Convertisseur, Algorithme de P&O, ombrage partiel.

Abstract:

This thesis presents the study of a photovoltaic system equipped with a Perturb and Observe (P&O) MPPT controller. The effects of solar irradiance and temperature on system performance are analyzed, along with the operation of DC-DC converters. Simulations were carried out to evaluate the system under different operating conditions, particularly under partial shading. The results confirm the effectiveness of the P&O algorithm in tracking the maximum power point.

Keywords: PV generator, MPPT Control, DC/DC converter, P&O algorithm, Partial Shading.