

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

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT GENIE ÉLECTRIQUE  
N° : CE-05



DOMAINE : SCIENCE TECHNIQUES  
FILIERE : ÉLECTROTECHNIQUE  
OPTION : COMANDE ÉLECTRIQUE

## Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique

**Présenté Par :**

**Benkhira Aboutahar Elmouatassim**

**Salmi Ahmed**

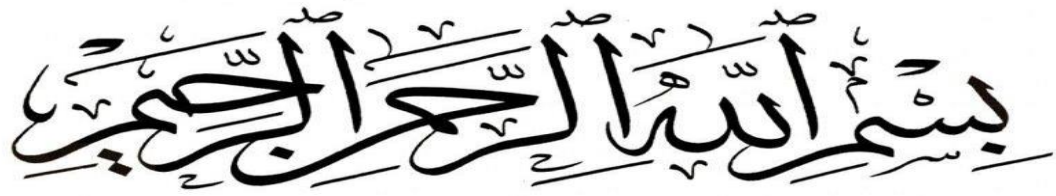
**Intitulé :**

**Commande avancée d'un système photovoltaïque**

**Devant le jury composé de :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
	Professeur	Univ. de M'sila	Président
Boudia Assam	MCA	Univ. de M'sila	Encadreur
	MCA	Univ. de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2022 /2023**



## Dédicace

*Je dédie cet humble travail à :*

*Ma mère et mon père avant tout, qu'ALLAH les protège et prolonge leur vie et leur procure santé et bien-être, qui m'ont aidé tout au long de cette longue étude.*

*À mes frères et sœurs, ma famille, mes amis et tous ceux qui me sont chers pour m'avoir soutenu.*

*Pour chaque âme, que Dieu ait pitié d'elle, qui n'a pas été écrit pour son âge, de se tenir avec moi jusqu'à ces moments.*

*Merci pour tout le soutien que vous m'avez apporté.*

*Benkfira Aboutahar Elmouatassim*

*Aux lecteurs de ce mémoire, pour qui, je l'espère, leur sera utile.*

*A mes parents, qu'ALLAH les protège, et prolonge leur vie et leur procure santé et bien-être, qui m'ont aidé tout au long de cette longue étude.*

*A mes frères et sœurs, merci pour vos encouragements ;*

*Merci pour tout le soutien que vous m'avez apporté*

*Salmi Ahmed*

## Remerciements

*Nous remercions Allah, qui nous a aidés à accomplir cet humble travail, et nous adressons toute notre reconnaissance et notre sincère gratitude au Monsieur **BOUDIA ASSAM**, Maître de Conférences à l'université de M'sila, qui n'a pas lésiné des conseils, des instructions et une bonne orientation tout au long de la période de préparation de ce travail.*

*Nous adressons également nos sincères remerciements et notre gratitude aux membres jurys pour nous avoir donné part de leur temps et accepté l'étude et la discussion de notre mémoire à bras ouverts.*

*Nous remercions tous ceux qui nous ont soutenus dans la préparation de ce mémoire, que ce soit par la prière ou par l'information, que Dieu les récompense et les bénisse.*

### الملخص:

في هذه الدراسة، قدمنا معلومات عامة عن الطاقة الشمسية. ثم شرحنا كيف تقوم الخلايا الكهروضوئية بتحويل الأشعة الشمسية إلى طاقة كهربائية وذلك من خلال نمذجة ومحاكاة نظام ضوئي بقدرة 200 وات. بهدف تطوير وتحسين كفاءة النظام الكهروضوئي، أدخلنا تقنيات تتبع أقصى نقطة للطاقة، حيث استعملنا خوارزمية الاضطراب والمراقبة، والخطوة الخلفية. من خلال مقارنة نتائجهما وجدنا أن التحكم بالخطوة الخلفية أفضل من التحكم بالاضطراب والمراقبة من عدة نواحي، وخاصة التحكم بالخط الخلفي مع التكامل.

### كلمات مفتاحية :

الطاقة الشمسية، الخلايا الكهروضوئية، تتبع أقصى نقطة للطاقة، الخطوة الخلفية، الخطوة الخلفية مع التكامل، الاضطراب والمراقبة.

## Résumé

Cette étude a fourni des informations générales sur l'énergie solaire. Nous avons ensuite modélisé et simulé un système photovoltaïque de 200 watts pour illustrer comment les cellules solaires convertissent le rayonnement solaire en énergie électrique. Afin de développer et d'améliorer davantage l'efficacité du système photovoltaïque, nous avons introduit la technologie MPPT avec algorithme P&O et backstepping. En comparant ces résultats, nous avons constaté que le contrôle du backstepping était supérieur au contrôle P&O à plusieurs égards. En particulier backstepping avec intégrale.

### Mots clés :

Énergie solaire, Cellules photovoltaïques, MPPT, Backstepping, Backstepping avec intégrale, P&O.

---

---

# Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques .....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction .....	4
I.2 Historique .....	4
I.3 Le Potentiel Solaire en Algérie .....	5
I.4 Ressources des énergies renouvelables .....	7
I.5 Rayonnement solaire .....	7
I.5.1 Le rayonnement direct .....	8
I.5.2 Le rayonnement diffus .....	8
I.5.3 Le rayonnement solaire réfléchi .....	8
I.5.4 Le rayonnement global .....	8
I.6 L'effet photovoltaïque .....	9
I.7 Le générateur photovoltaïque et ses performances .....	9
I.7.1 La cellule solaire .....	9
I.7.1.1 Description générale .....	9
I.7.1.2 Principe de la conversion photovoltaïque .....	10
I.7.1.3 Technologies de fabrication des cellules photovoltaïques .....	11
I.7.1.3.1 Cellules amorphes .....	11
I.7.1.3.2 Cellules monocristallines .....	11
I.7.1.3.3 Cellules polycristallines .....	11
I.7.2 Modules (Panneaux) photovoltaïques .....	12
I.7.2.1 Caractéristiques des panneaux solaires utilisés .....	13
I.7.3 Générateur photovoltaïque .....	13
I.8 Jonction P-N .....	13
I.9 Rendement Photovoltaïque .....	14
I.10 Paramètres d'un module photovoltaïque .....	15

---

---

I.10.1	Caractéristique courant-tension I(V)	15
I.10.2	Facteur de forme FF (Fill Factor)	16
I.11	Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque	16
I.11.1	Cas d'une cellule idéale	16
I.11.2	Cas d'une cellule réelle	17
I.11.3	Courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	20
I.11.4	Association des cellules photovoltaïques	22
I.11.4.1	Association de $N_S$ cellules en série	22
I.11.4.2	Association de $N_p$ cellules en parallèle	23
I.11.4.3	Association série-parallèle des cellules	24
I.12	Simulation du générateur photovoltaïque	25
I.13	L'influence de la température et de l'éclairement	26
I.13.1	L'influence de la température	26
I.13.2	L'influence de l'éclairement	26
I.13.3	L'influence de la variation de la résistance série	27
I.13.4	L'influence de la variation de la résistance parallèle (shunt)	27
I.14	Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque	28
I.14.1	Avantages	28
I.14.2	Inconvénients	28
I.15	Conclusion	28
<b>Chapitre II: Techniques de recherche du point de puissance maximal MPPT</b>		<b>29</b>
II.1	Introduction	30
II.2	Connexion directe source-charge	30
II.3	Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge	31
II.4	Les convertisseurs statiques	32
II.5	Les différents types de convertisseurs statiques	32
II.6	Convertisseurs DC/DC (hacheur)	33
II.6.1	Le rôle des convertisseurs DC-DC	34

---

---

II.6.2 Différents types de hacheurs .....	34
II.6.2.1 Convertisseur Abaisseur (Buck) .....	35
II.6.2.2 Convertisseur abaisseur-élevateur (Buck-Boost) .....	36
II.6.2.3 Convertisseur élevateur (Boost) .....	37
II.6.2.3.1 Principe de fonctionnement .....	38
II.6.2.3.2 Modèle mathématique du convertisseur Boost .....	38
II.6.2.3.3 Ondulation du courant dans l'inductance .....	40
II.6.2.4 Analyse et choix du convertisseur .....	41
II.6.2.5 Avantage de convertisseur BOOST .....	42
II.7 Commande MPPT .....	43
II.7.1 Méthodes indirectes (Méthodes Offline) .....	44
II.7.1.1 La méthode de la tension de circuit ouvert .....	44
II.7.1.2 La méthode de court-circuit .....	45
II.7.2 Méthodes directes (méthodes Online) .....	45
II.8 Les Algorithmes MPPT .....	45
II.8.1 La technique Perturbation & Observation (P&O) .....	45
II.8.1.1 Avantage de la méthode P&O .....	47
II.8.1.2 Inconvénients de la méthode P&O .....	47
II.8.2 Méthode d'incrémentation de conductance (IncCond) .....	47
II.8.2.1 Inconvénients de la méthode IncCond .....	49
II.9 Résultats de simulation de la commande MPPT-P&O .....	49
II.9.1 L'influence de de MPPT sous des conditions variables .....	51
II.10 Conclusion .....	52
<b>Chapitre III : Commande MPPT par backstepping .....</b>	<b>53</b>
III.1 Introduction .....	54
III.2 Historique et principe de la commande backstepping .....	54
III.3 Technique du backstepping.....	54
III.4 Méthodes de Lyapunov .....	55

---

---

III.4.1 Première méthode de Lyapunov.....	55
III.4.2 Deuxième méthode de Lyapunov.....	55
III.5 Synthèse de la commande par backstepping .....	55
III.6 Contrôle backstepping avec intégral .....	57
III.7 Simulation d'un système photovoltaïque .....	59
III.7.1 Fonctionnement de MPPT sous des conditions constantes .....	60
III.7.2 Fonctionnement de MPPT sous des conditions variables .....	62
III.7.3 Discussion .....	64
III.8 Conclusion .....	64
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>65</b>



---

---

## *Liste des Figure*

<b>Figure I—1</b> : Le Potentiel Solaire en Algérie .....	6
<b>Figure I—2</b> : Réponse spectrale d'une cellule (PV) .....	7
<b>Figure I—3</b> : Pourcentage des parties du rayonnement solaire lors de sa propagation dans l'atmosphère .....	8
<b>Figure I—4</b> : Types de rayonnement solaire reçus au sol.....	9
<b>Figure I—5</b> : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	10
<b>Figure I—6</b> : Cellule, module et panneau photovoltaïque.....	11
<b>Figure I—7</b> : Principaux types de cellules .....	12
<b>Figure I—8</b> : Panneaux photovoltaïque .....	12
<b>Figure I—9</b> : Jonction P-N.....	14
<b>Figure I—10</b> : Structure d'une cellule photovoltaïque .....	15
<b>Figure I—11</b> : Caractéristiques électriques d'une cellule PV.....	16
<b>Figure I—12</b> : Schéma équivalent d'une cellule idéale.....	17
<b>Figure I—13</b> : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	18
<b>Figure I—14</b> : Schéma bloc du système photovoltaïque dans SIMULINK/MATLAB .....	20
<b>Figure I—15</b> : Schéma bloc du GPV dans SIMULINK/MATLAB .....	21
<b>Figure I—16</b> : Caractéristique I-V d'une cellule PV.....	21
<b>Figure I—17</b> : Caractéristique P-V d'une cellule PV.....	22
<b>Figure I—18</b> : Schéma des cellules photovoltaïques associées en série.....	22
<b>Figure I—19</b> : Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension.....	23
<b>Figure I—20</b> : Schéma des cellules photovoltaïques associées en parallèles .....	23
<b>Figure I—21</b> : Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension.....	24
<b>Figure I—22</b> : Association série-parallèle des cellules PV .....	24
<b>Figure I—23</b> : Caractéristique I-V et P-V des cellules PV raccordées en série – parallèle.....	25
<b>Figure I—24</b> : Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque.....	25
<b>Figure I—25</b> : Influence de la température sur le courant du GPV .....	26
<b>Figure I—26</b> : Influence de l'éclairement sur la puissance du GPV .....	26
<b>Figure I—27</b> : La caractéristique I(V) pour différentes valeurs de $R_s$ .....	27
<b>Figure I—28</b> : La caractéristique I(V) pour différentes valeurs de $R_p$ .....	27
<b>Figure II—1</b> : Connexion directe source-charge. ....	31
<b>Figure II—2</b> :Etage d'adaptation entre un GPV et une charge.....	31

---

---

<b>Figure II—3</b> : Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe.....	32
<b>Figure II—4</b> : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance. ....	33
<b>Figure II—5</b> : Convertisseur DC/DC.....	34
<b>Figure II—6</b> : Schéma de base d'un convertisseur Buck .....	35
<b>Figure II—7</b> : Caractéristiques courant-tension d'un hacheur abaisseur.....	36
<b>Figure II—8</b> : Schéma d'un convertisseur abaisseur-élévateur .....	36
<b>Figure II—9</b> : Caractéristiques courant-tension du convertisseur abaisseur-élévateur .....	37
<b>Figure II—10</b> : Schéma du hacheur survolteur .....	37
<b>Figure II—11</b> : Forme d'ondes courant/tensions dans un hacheur boost .....	38
<b>Figure II—12</b> : Schéma équivalent à la phase d'accumulation d'énergie .....	39
<b>Figure II—13</b> : Schéma équivalent à la phase de roue libre.....	40
<b>Figure II—14</b> : Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique .....	42
<b>Figure II—15</b> : Schéma synoptique d'un système PV utilisant la commande MPPT .....	43
<b>Figure II—16</b> : Recherche du PPM par la méthode (P&O).....	46
<b>Figure II—17</b> : L'algorithme de P&O classique .....	46
<b>Figure II—18</b> : Principe de fonctionnement de l'algorithme IncCond .....	47
<b>Figure II—19</b> : Organigramme de l'algorithme IncCond.....	49
<b>Figure II—20</b> : Schéma bloc du système photovoltaïque dans SIMULINK/MATLAB .....	50
<b>Figure II—21</b> : Résultats de simulation de la commande MPPT-P&O.....	50
<b>Figure II—22</b> : Influence de l'éclairement du GPV .....	51
<b>Figure II—23</b> : Influence de la température du GPV .....	51
<b>Figure III—1</b> : Convertisseur Boost DC-DC.....	55
<b>Figure III—2</b> : Structure globale du système photovoltaïque avec la commande MPPT .....	60
<b>Figure III—3</b> : allures des puissances sous conditions constantes .....	61
<b>Figure III—4</b> : allures des tensions sous conditions constantes .....	61
<b>Figure III—5</b> : allures des courants sous conditions constantes.....	62
<b>Figure III—6</b> : allures des puissances sous conditions variable.....	63

## *Liste des Tableaux*

<b>Tableau I—1</b> : Le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie .....	6
<b>Tableau I—3</b> : Rendement des types de silicium .....	12
<b>Tableau I—2</b> : Caractéristiques des panneaux solaires utilisés .....	13
<b>Tableau II—1</b> : Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC .....	34
<b>Tableau II—2</b> : Comparaison entre les structures DC/DC basse tension non-isolé.....	42
<b>Tableau II—3</b> : Paramètres du hacheur boost.....	50
<b>Tableau III—1</b> : Paramètres des MPPT méthodes.....	60
<b>Tableau III—2</b> : Performance des MPPT.....	63

## **Notations :**

MPPT	Maximum Power Point Tracking
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur Photovoltaïque
FF	Facteur de forme
P&O	Perturbation et observation
Inc-Cond	Incrémentation de l'inductance
FL	Logique floue
MPP	Pointe de puissance maximale
MOSFET	Métal Oxide Field Effet Transistors
IGBTS	Insulte Gâte Bipolaire Transistors

## **Symboles :**

A	Surface de la cellule ( $m^2$ )
$I_{cell}$	Courant générer par la cellule photovoltaïque (A)
$I_{ph\_cell}$	Le photo-courant de la cellule (A)
$I_{d\_cell}$	Courant circulant dans la diode
$I_{Rp\_cell}$	Courant circulant dans la résistance $R_{p\_cell}$
$I_0$	Courant de saturation inverse d'une diode (A)
$I_{cc}$	Courant de court- circuit (A)
$I_{pv\_cell}$	Courant généré par la cellule photovoltaïque (A)
$I_{0r}$	Courant de court-circuit de la cellule à la température et éclairément de référence

## Notations et Symboles

---

---

$I_{mpp}$	Courant maximal (A)
$I_{ref}$	Courant de référence
$N_s$	Cellules en série
$N_p$	Cellules en parallèle
$n$	Facteur d'idéalité de la photopile
$K$	Constante de Boltzmann ( $1,38 * 10^{-23}$ J/ K)
$K_1$	Facteur de proportionnalité qui varie entre 0,71 et 0,92
$K_2$	Constante de proportionnalité qui varie entre 0,78 et 0,92
$q$	Charge de l'électron ( $1,16 * 10^{-19}$ C )
$T$	Température de référence des cellules PV [ $^{\circ}$ C]
$T_n$	Température de la jonction des cellules PV [298°K]
$K_i$	Le rapport entre $I_{cc}$ et la température
$R_{s\_cell}$	Résistance série ( $\Omega$ )
$R_{p\_cell}$	Résistance parallèle shunt ( $\Omega$ )
$E_{g0}$	Energie de gap [ev]
$G$	L'éclairement absorbé par la cellule
$G_{ref}$	L'éclairement de référence (1000 w/m <sup>2</sup> )
$V_{CO}$	Tension de circuit ouvert (V)
$V_i$	Tension de l'entrée GPV (V)
$V_{cell}$	Tension de sortie du générateur PV (V)
$V_s$	Tension de sortie du la charge (V)
$V_{mpp}$	Tension maximal (V)

## *Notations et Symboles*

---

---

$V_t$	Tension thermique
$V_{d\_cell}$	La tension de sortie de la cellule photovoltaïque
$V_{ref}$	La tension de référence
D	Rapport cyclique
$P_{pv}$	Puissance fourni par le PV (W)
$P_{max}$	Puissance maximale (W)
DC	Courant Continu
$S_e$	Nombres des modules en série

## INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières années, la production énergétique mondiale et la demande de ressources fossiles est un défi très important pour répondre à la population croissante et au niveau de confort croissant de notre société moderne et à la demande croissante de niveaux d'énergie dans les sociétés industrialisées. Sources d'énergie fossiles (pétrole, gaz, charbon et uranium...). D'autre part, la forte consommation de ces ressources non renouvelables entraîne des émissions de gaz à effet de serre, de sorte que l'augmentation de la pollution et de la terreur réduit la préservation de ces sources d'énergie pour les générations futures.[1][2]

Aujourd'hui, la communauté scientifique s'intéresse aux nouvelles sources d'énergie dites renouvelables, cette dernière étant la seule filière qui se distingue par sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre et la pollution et sa capacité à capter de plus en plus facilement l'éolien décentraliser, l'hydraulique, la géothermie, la biomasse, énergie solaire. Qui sera étudiée dans ce mémoire l'énergie solaire photovoltaïque .[3]

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement solaire. Elle peut même être convertie en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques, constitués de cellules photovoltaïques, ont la capacité de convertir les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu peut ainsi être utilisée directement. Les systèmes photovoltaïques (PV) sont l'un des meilleurs outils pour produire de l'électricité propre. Ces systèmes fournissent une large gamme de puissance pour les applications autonomes et/ou la transmission sur le réseau électrique[4-5]. Un système photovoltaïque typique consiste généralement en un générateur photovoltaïque composé d'une série de modules de cellules solaires et d'un convertisseur DC-DC statique, qui convertit l'énergie électrique fournie par la source d'alimentation photovoltaïque en une charge. Cette structure se caractérise par des dynamiques non linéaires qui varient significativement avec les conditions d'exploitation telles que celles liées aux conditions climatiques, c'est-à-dire les niveaux de luminosité, d'ombrage, de température, etc. Ces conditions rendent difficile la prédiction de la tension et du courant pour assurer une puissance de sortie maximale [6-7].

Comprendre que l'objectif fondamental de toute recherche est d'améliorer les performances globales des systèmes de conversion photovoltaïque (PV). Lorsqu'un générateur photovoltaïque fournit une charge, quelle que soit sa nature, cela ne signifie pas nécessairement que la rentabilité de l'ensemble du système est faible, mais une efficacité équivalente acceptable et des coûts d'exploitation moyens déterminent l'efficacité d'utilisation de l'énergie solaire. Afin d'avoir une bonne adaptabilité et un rendement élevé, diverses normes et technologies ont été appliquées pour optimiser le rendement des systèmes photovoltaïques.

Parmi ces technologies on retrouve la technologie "Maximum Power Point Tracker" MPPT ("Maximum Power Point Tracker"). Dans la littérature, les algorithmes de recherche MPPT les plus couramment utilisés sont la conductance incrémentale (IC) [6] et la perturbation et l'observation (P&O) [8]. P&O est largement adopté en raison de sa simplicité de mise en œuvre [9-10]. Cependant, les deux technologies échouent lorsque les conditions météorologiques changent rapidement. D'autres types de contrôleurs ont été proposés dans la littérature pour améliorer le fonctionnement des systèmes photovoltaïques. Certaines sont basées sur des lois adaptatives [6], le bilan énergétique [11] et la théorie de l'inversion. Afin de réduire les effets déstabilisants sur le système photovoltaïque, nous proposons d'utiliser la stratégie de contrôle par backstepping, qui est une méthode récente pour les systèmes non linéaires [9].

Le mémoire est organisé comme suit :

Après avoir donné des généralités sur les systèmes photovoltaïques, le chapitre 1 présente les différents types de cellules PV, leur structure de fonctionnement ainsi que leur modélisation. L'influence des conditions météorologiques (la température et l'éclairement) sur le générateur PV (GPV) est également étudiée. Ensuite nous allons montrer les effets de la variation des résistances séries et parallèles par des simulations sur MATLAB.

Le chapitre 2 sera consacré à l'étude des différents convertisseurs statiques (DC-DC) utilisés dans les systèmes de conversion photovoltaïques, ensuite nous allons présenter les algorithmes classiques de recherche du MPPT les plus utilisés à savoir l'incrémentale (IC) et la perturbation et observation (P&O), avec contrôle MPPT (P&O) sur MATLAB SIMULINK.

Le dernier chapitre présente la stratégie de backstepping. Les résultats de 3 contrôleurs : "backstepping" et "backstepping avec intégral" et "P&O" ont été comparés par simulation.



# Chapitre I : **Généralités sur les systèmes photovoltaïques**

## I.1 Introduction :

Le soleil est une source d'énergie inépuisable, émettant chaque année 8 400 fois plus de rayonnement que ce dont l'humanité a besoin. Le rayonnement solaire atteint une certaine intensité ( $1000 \text{ W/m}^2$  en zone tempérée, jusqu'à  $1400 \text{ W/m}^2$  en pollution lumineuse atmosphérique), bien qu'il s'affaiblisse lors de son passage dans l'atmosphère. [12]

Les générateurs photovoltaïques (GPV) ouvrent la possibilité de convertir directement l'énergie solaire en énergie électrique via des cellules solaires. Ces derniers sont généralement constitués de matériaux semi-conducteurs. Leur assemblage en série ou en parallèle donne un module PV .[12]

Cette source d'énergie est sûre, fiable, sans entretien et respectueuse de l'environnement. Il est destiné à de nombreuses applications allant de fractions de watt à plusieurs mégawatts. La plupart des modules vendus aujourd'hui bénéficient d'une garantie de plus de 20 ans et peuvent fonctionner au-delà de cette période. [13].

Dans ce chapitre, nous présentons premièrement quelques notions sur le rayonnement solaire, la constitution d'une cellule photovoltaïque et son principe de fonctionnement. Ensuite nous allons montrer l'effet des conditions météorologiques sur un module PV, ainsi que l'influence des résistances séries et parallèles sur ce dernier.

## I.2 Historique :

Antoine Becquerel découvre l'effet photovoltaïque en 1839, mais ce n'est qu'en 1883 que Charles Fritz met au point la première pile au silicium fonctionnelle. Les utilisations possibles sont longtemps restées très limitées.

Ces premières cellules photoélectriques ont été utilisées pour mesurer l'intensité lumineuse des expositions photographiques. [14]

Les premières cellules solaires au silicium à haut rendement sont apparues dans les années 1950. En 1954, à une époque où l'industrie spatiale naissante cherchait de nouvelles solutions pour alimenter les satellites, trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, développèrent des cellules solaires à haut rendement. C'est le début d'une course entre laboratoires pour améliorer les performances. Une batterie efficace à 9% a déjà été développée en 1958 et le premier satellite avec des cellules solaires a été envoyé dans l'espace.[14]

À mesure que l'industrie des semi-conducteurs au silicium se développe, les coûts de production commencent à baisser, mais la recherche continue d'améliorer l'efficacité des cellules solaires.

1973 : Le premier choc pétrolier a suscité des solutions innovantes à notre dépendance au pétrole pour l'énergie, et les premières maisons à énergie solaire ont été construites à l'Université du Delaware.

Dans les décennies qui ont suivi, le genre a prospéré sans sorties commerciales bâclées. [14]

Malgré des augmentations constantes de la production et des coûts de production bien inférieurs, les années 1980 et 1990 ont atténué les pressions sur l'approvisionnement énergétique et réduit la pression pour développer des sources d'énergie alternatives.

À la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, la technologie photovoltaïque était encore très spécifique.

Pompes à eau, lampes de jardin, timbres d'alimentation, balises océaniques, communications sans fil, électrification de clôture. En fait, cette technologie convient aux applications hors réseau. Certains diront que l'électrification à distance est la principale application de l'énergie solaire. S'il en était ainsi dans le passé, il n'en est plus ainsi aujourd'hui. En 2010, 99 % de l'énergie solaire mondiale était connectée au réseau sous la forme de centrales [14].

Qu'est-ce qui a provoqué ce revirement ?

Le coût de l'énergie solaire a baissé très lentement dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, tandis que le coût des énergies fossiles est resté relativement bas pour des raisons géopolitiques. À ce rythme, les deux courbes se croiseront d'ici à l'an 2000, et il faudra des décennies avant que l'énergie solaire ne devienne commercialement viable. Cependant, deux préoccupations internationales majeures ont poussé certains gouvernements à accélérer le processus [14].

Le 16 mars 1998, le Protocole de Kyoto est officiellement entré en vigueur. Conscients de l'urgence de prendre des mesures efficaces pour freiner le réchauffement climatique, 189 pays ont décidé d'entreprendre des réductions d'émissions de gaz à effet de serre. Il faudra plus d'une décennie pour que l'accord soit finalement mis en œuvre, mais il enverra un signal fort que les pratiques de production dans l'industrie, en particulier dans le secteur de l'énergie, doivent être révisées. La technologie de production d'énergie photovoltaïque qui n'émet pas de gaz à effet de serre est largement répandue.[14]

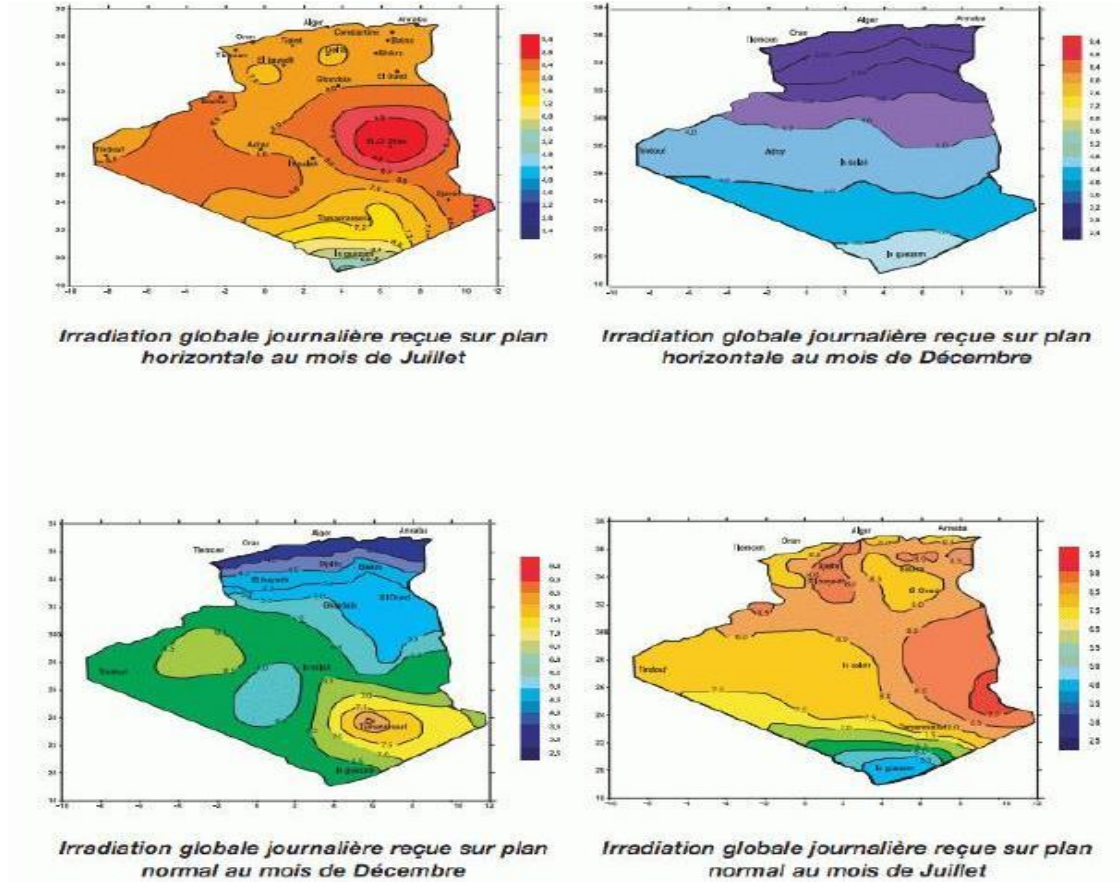
### **I.3 Le Potentiel Solaire en Algérie :**

Grâce à sa situation géographique, l'Algérie possède l'un des gisements solaires les plus élevés au monde. Presque tous les territoires du pays bénéficient de plus de 2 000 heures d'ensoleillement par an, avec un maximum de 3 900 heures (Plateau et désert du Sahara).

Dans la plupart des régions du pays, l'énergie reçue par 1 mètre carré de niveau d'eau est d'environ 5 kWh par jour, c'est-à-dire que le nord est proche de 1700 kWh/mètre carré par an et le sud est proche

de 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an. Au Sahara, ce potentiel, s'il est exploité économiquement, pourrait être un facteur important de développement durable.

Le tableau (I-1) et la figure (I-1) suivants montrent le taux d'insolation dans différentes régions de l'Algérie, qui dispose d'une réserve d'énergie solaire de plus de 5 milliards de GWh/an [15],[16],[17]



**Figure I—1** : Le Potentiel Solaire en Algérie [15]

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures /an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

**Tableau I—1** : Le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [15]

Le module solaire le plus utilisé dans mon pays est le photovoltaïque, mais d'autres composants photovoltaïques, thermoélectriques, thermiques sont encore au stade expérimental. Cependant, le processus de fabrication des modules solaires est compliqué et le rendement de production est faible, ce qui rend le coût très élevé et retarde le développement.

## I.4 Ressources des énergies renouvelables :

Le développement et l'utilisation des énergies renouvelables ont connu une croissance importante ces dernières années. Dans 20 à 30 ans, tous les systèmes énergétiques durables seront basés sur l'utilisation.

Utilisation judicieuse des énergies conventionnelles et recours accru aux énergies renouvelables[18]. Cette énergie couvre 13 % de la demande, dont 10 % sont utilisés pour l'hydraulique. Par rapport aux énergies traditionnelles (énergie fossile et nucléaire), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas émettre de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et d'être une ressource renouvelable. Inépuisable. Ce sont des énergies de flux, par opposition aux énergies dites de réserve (gaz naturel, kérosène, charbon, uranium...) [18],[5]. La production décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre aux consommateurs une plus grande sécurité d'approvisionnement tout en protégeant l'environnement [19],[20].

## I.5 Rayonnement solaire :

Même si la distance entre le Soleil et la Terre est de 150,106 kilomètres, les couches de la Terre reçoivent toujours une énergie massive de 180,106 GW. Cette énergie est émise par la surface du Soleil sous forme de rayonnement électromagnétique d'une longueur de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$  [21]. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se compose grosso modo comme suit :

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $< 0.4 \mu\text{m}$ ).
- 47% dans la bande visible ( $0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$ ).
- 44% dans la bande des infrarouges ( $> 0.8 \mu\text{m}$ ).

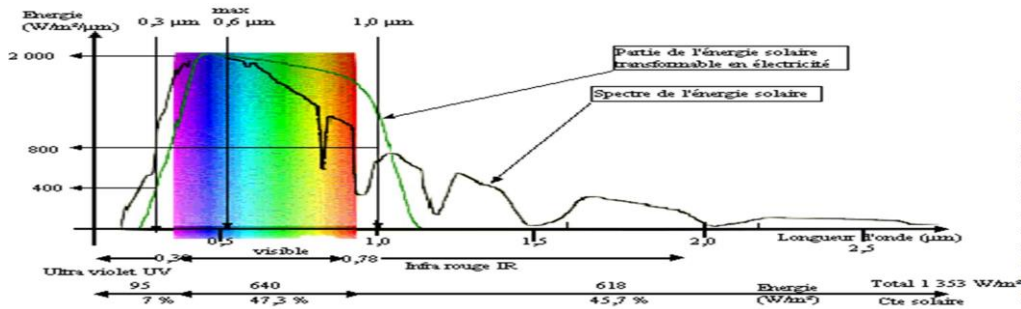
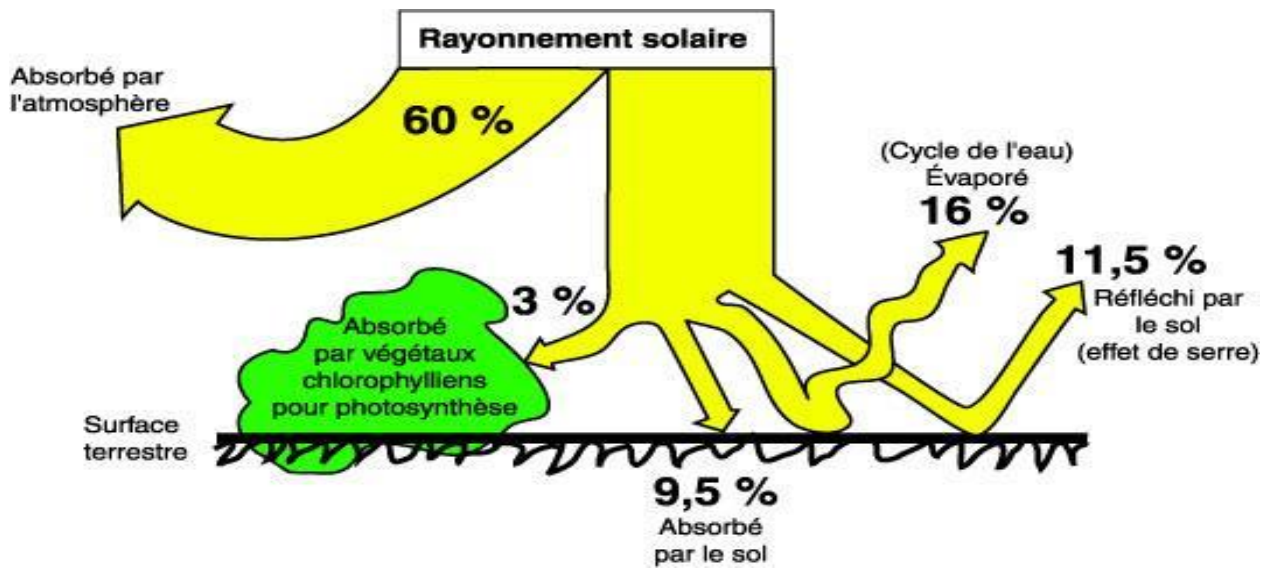


Figure I—2 : Réponse spectrale d'une cellule (PV) [21]



**Figure I—3 :** Pourcentage des parties du rayonnement solaire lors de sa propagation dans l'atmosphère

### I.5.1 Le rayonnement direct :

Reçoit directement du Soleil sans diffusion atmosphérique. Ces rayons sont parallèles entre eux. Le résultat est une ombre qui peut être focalisée à travers un miroir. Elle peut être mesurée avec un pyranomètre.

### I.5.2 Le rayonnement diffus :

Il est constitué de lumière diffusée par l'atmosphère (air, nuages, aérosols). La diffusion est le phénomène par lequel un faisceau lumineux parallèle se divise en plusieurs rayons se déplaçant dans des directions différentes. Dans le ciel, les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et la poussière créent cette (rafale) de rayons solaires. Cela dépend donc surtout des conditions météorologiques.

### I.5.3 Le rayonnement solaire réfléchi :

Alternativement, l'albédo du sol est le rayonnement réfléchi par le sol ou les objets à sa surface. Cet albédo peut être important si le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

### I.5.4 Le rayonnement global :

C'est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets à sa surface. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un pyranomètre ou d'un héliomètre sans écran.

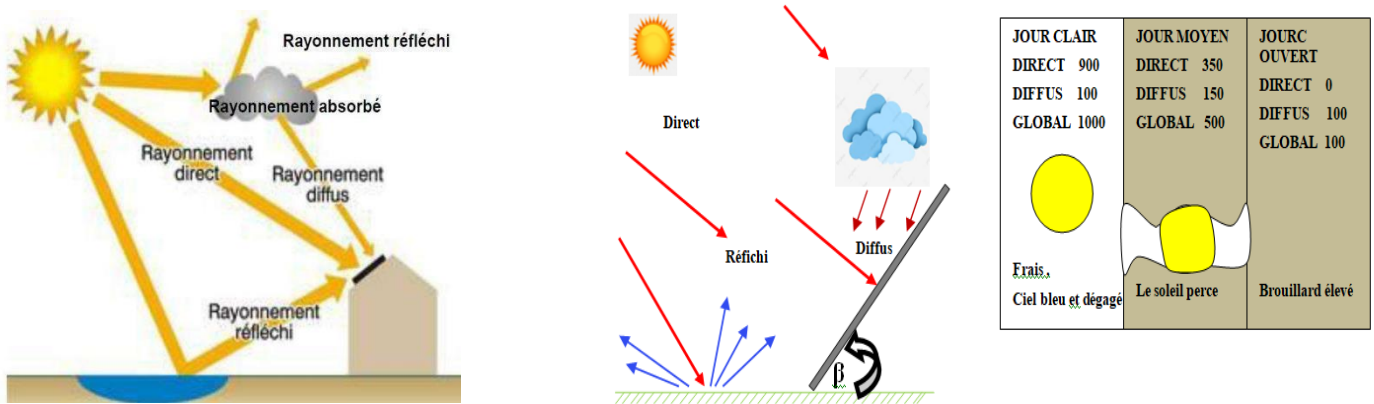


Figure I—4 : Types de rayonnement solaire reçus au sol

## I.6 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est la conversion de l'énergie émise par le soleil sous forme de photons en électricité à l'aide de dispositifs semi-conducteurs appelés cellules solaires [22].

L'effet photovoltaïque ne se produit que lorsqu'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur devant l'éclairage. Par exemple, une telle barrière existe à l'interface entre deux volumes différemment dopés. H. Deux types différents d'impuretés sont introduits à différentes concentrations, par exemple des impuretés de type P-N. Lorsque la lumière frappe ce matériau, les charges transférées par la lumière (effet photoélectrique) sont séparées par une barrière de charge positive d'un côté et de charge négative de l'autre [13].

Les matériaux semi-conducteurs les plus couramment utilisés sont le silicium, le germanium, le sulfure de gallium et l'arséniure de gallium [23].

## I.7 Le générateur photovoltaïque et ses performances :

### I.7.1 La cellule solaire :

#### I.7.1.1 Description générale :

Une cellule photovoltaïque, également appelée cellule solaire, est l'unité de base d'un système à courant continu qui convertit l'énergie solaire en courant continu ou alternatif. Il utilise le phénomène physique "effet photovoltaïque" dans lequel la force électromotrice est générée lorsque la lumière frappe la surface de la cellule. La tension résultante varie entre 0,3 V et 0,6 V, selon le matériau semi-conducteur utilisé et sa température. Cette tension est appelée tension en circuit ouvert ( $V_{CO}$ ) et dépend

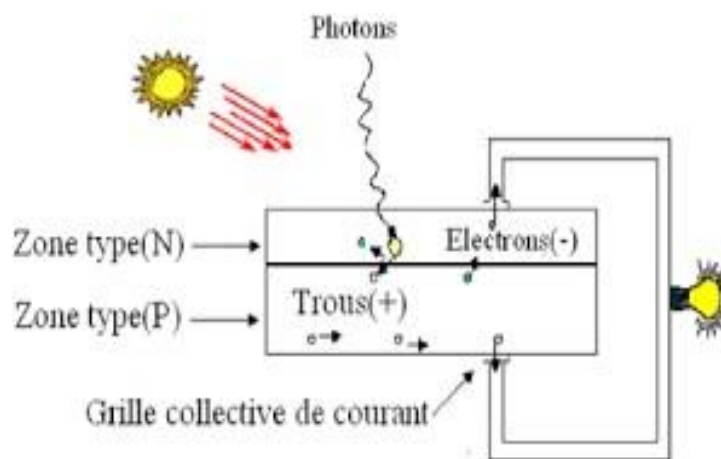
fortement de la température. Le courant maximal qui peut se produire lorsque les pôles de la batterie sont court-circuités est appelé courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) et dépend fortement de l'intensité lumineuse ( $S$ ) [24], [25].

Une cellule solaire est constituée de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et une dopée N (dopée au phosphore), formant une jonction PN avec une barrière de potentiel.

### I.7.1.2 Principe de la conversion photovoltaïque :

Les cellules solaires utilisent l'effet photovoltaïque pour générer et transporter des charges positives et négatives dans des matériaux semi-conducteurs sous l'influence de la lumière, convertissant directement l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. Ce matériau est constitué de deux parties, une contenant des électrons en excès et une manquant d'électrons. On les appelle respectivement dopage N et dopage P. Les électrons en excès dans le matériau de type N diffusent dans le matériau de type P lorsque le premier entre en contact avec le second.

Les régions initialement dopées de type N sont chargées positivement, tandis que les régions initialement dopées de type P sont chargées négativement. Par conséquent, un champ électrique est généré entre eux, poussant les électrons vers la région N et les trous vers la région P. Un nœud (appelé PN) est créé[4]. L'ajout de contacts métalliques aux régions N et P crée une diode. Lorsqu'un composé est éclairé, un photon d'énergie supérieure ou égale à la largeur de la bande interdite transfère son énergie à un atome, provoquant le déplacement de l'électron respectif de la bande de valence vers la bande de conduction, laissant un trou mobile et un électron-trou a paire est générée. Lorsqu'une charge est appliquée aux bornes de la batterie, les électrons de la région N se connectent aux trous de la région P via des connexions externes, créant une différence de potentiel : le courant circule.



**Figure I—5** : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque



Une série de cellules forme un panneau solaire. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Les modules sont connectés en série ou en parallèle les uns avec les autres.

Connexion parallèle - Un concept est défini dans le domaine du photovoltaïque pour obtenir plus de puissance. Un module solaire connecté au récepteur fonctionne "par le soleil" ,auquel s'ajoutent des protections, des régulateurs, des systèmes de stockage d'énergie (batteries), des appareils de contrôle et de mesure, un onduleur....[26].



**Figure I—6 :** Cellule, module et panneau photovoltaïque

### **I.7.1.3 Technologies de fabrication des cellules photovoltaïques :**

Il existe différents types de cellules solaires en silicium (c'est-à-dire semi-conducteurs principalement utilisés dans la fabrication) [27]. Les cellules sont différenciables par Les rendements et les coûts varient.

#### **I.7.1.3.1 Cellules amorphes :**

Les cellules amorphes (Figure I-7.a) n'ont pas de structure cristalline. La productivité et l'efficacité sont inférieures aux autres variétés, mais le rendement est faible.

Ils sont utilisés dans les produits de petite consommation (calculateurs solaires).

#### **I.7.1.3.2 Cellules monocristallines :**

Les cellules les plus efficaces comprennent les cellules en silicium monocristallin (Figure I-7.b), le type avec le rendement de conversion le plus élevé.

#### **I.7.1.3.3 Cellules polycristallines :**

La conception des cellules en silicium polycristallin (Figure I-7.c) est plus simple que celle des autres types de cellules. Coûts de fabrication inférieurs, mais rendements inférieurs.



**Figure I—7** : Principaux types de cellules

Types	Monocristallin	Poly-cristallin	Amorphe
Rendement	13 à 17%	11 à 15%	6 à 10%

**Tableau I—2** : Rendement des types de silicium

### I.7.2 Modules (Panneaux) photovoltaïques :

Un module photovoltaïque est un réseau de cellules de base interconnectées. Certains forment des chaînes utilisables directement. Il remplit deux fonctions.

- La première fonction est l'affectation des cellules pour obtenir les caractéristiques courant-tension d'intérêt pour l'application. En fait, les modules peuvent être connectés en série pour augmenter la tension de fonctionnement, ou en parallèle pour augmenter le courant.
- La deuxième fonction est de protéger contre les éléments atmosphériques extérieurs et de prolonger la durée de vie. En fait, la chaîne cellulaire de l'EVA était encapsulée. Protège des agressions extérieures (rayons UV, humidité) (éthylène acétate de vinyle). La face avant du module est protégée par un verre trempé à haute transmission lumineuse et bonne résistance mécanique, et la face arrière est protégée par un film Tedlar ou polyéthylène. Les modules sont logés dans un cadre métallique stable, ce qui leur confère une grande stabilité mécanique.



**Figure I—8** : Panneaux photovoltaïques

### I.7.2.1 Caractéristiques des panneaux solaires utilisés

Le panneau Kyocera Solar KC200GT a les caractéristiques électriques et mécaniques présenté dans les tableaux suivant (Tableau I-3).

<b>Maximum power <math>P_{max}</math></b>	200 W
<b>Maximum power voltage <math>V_{mp}</math></b>	26.3 V
<b>Maximum power curent <math>I_{mp}</math></b>	7.61 A
<b>Short circuit curent <math>I_{sc}</math></b>	8.21 A
<b>Open circuit voltage <math>V_{oc}</math></b>	32.9 V
<b>Celles per module</b>	54

**Tableau I—3** : Caractéristiques des panneaux solaires utilisés.

### I.7.3 Générateur photovoltaïque :

Selon l'application, le terme photovoltaïque est utilisé pour désigner des modules ou des panneaux photovoltaïques. Cependant, il peut également se référer à l'ensemble du système de production d'énergie solaire. Pour la suite de cet article, le terme « générateur solaire » sera utilisé pour désigner les modules ou panneaux photovoltaïques.

Un panneau se compose de plusieurs modules PV connectés en série et/ou en parallèle pour augmenter la puissance. Pour un éclairage uniforme et une même température, ce qui suit s'applique :

Le but de connecter des cellules solaires en série est d'augmenter la tension. La tension résultante est la somme des tensions sur chaque cellule. A l'inverse, connecter plusieurs cellules solaires en parallèle augmente le courant.

### I.8 Jonction P-N :

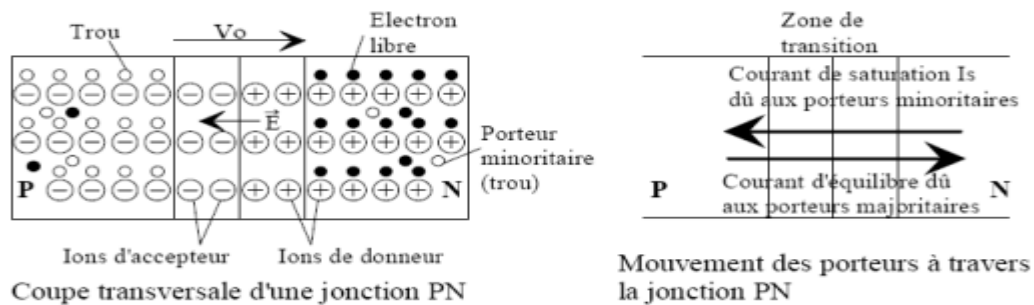
Les jonctions P-N sont à la base de la plupart des applications de semi-conducteurs.

Il est (théoriquement) fabriqué en combinant des semi-conducteurs de type P et de type N. Dans la région de contact, les électrons libres du segment N pénètrent dans le segment P et se recombinent avec des trous. De même, les trous du segment P pénètrent dans le segment N et se recombinent avec les électrons. Ce phénomène est appelé diffusion, et une région sans charge mobile apparaît sur la surface de transition du segment. Cette région est appelée région de transition (également appelée région de charge d'espace ou région d'appauvrissement), où seuls les atomes d'impuretés restent liés

à l'accepteur P. Ions dans les segments (ions donneurs dans le segment N) et atomes semi-conducteurs neutres. Les charges constituées d'ions solides à l'origine du champ électrique  $E$  dans la région de transition ont la même différence de potentiel  $V_0$  (appelée barrière de potentiel) au bord de la région. Cette zone sera à haute impédance [28].

Le champ électrique  $E$  tend à maintenir les porteurs majoritaires dans leurs régions respectives, provoquant l'équilibre des porteurs majoritaires.

Cependant, le champ électrique  $E$  n'empêche pas le passage des porteurs minoritaires ("courant de saturation"  $I_s$ ) présents dans les segments de type P et de type N. Cependant, ce mouvement est compensé par le fait que les porteurs majoritaires ont l'énergie nécessaire pour franchir la barrière.



**Figure I—9 : Jonction P-N**

Cependant, le champ électrique  $E$  n'empêche pas le passage des porteurs minoritaires présents dans les segments de type P et N (courant de "saturation"  $I_s$ ). Cependant, ce mouvement est équilibré par le fait que les porteurs majoritaires possèdent l'énergie nécessaire pour franchir la barrière.

## I.9 Rendement Photovoltaïque :

L'efficacité photovoltaïque est un facteur très important pour les modules photovoltaïques et est définie comme le taux de conversion d'énergie d'une cellule solaire.

L'efficacité est également le pourcentage d'énergie solaire convertie en électricité par une cellule solaire. Il caractérise ces composants et définit leurs performances. L'efficacité dépend du type de semi-conducteur utilisé et est directement liée à la "bande d'espacement". Pour le silicium cristallin, le rendement maximal théorique est de 44 %. Le silicium n'est pas le meilleur matériau, avec une "bande interdite" de 1,10 eV, mais l'arséniure de gallium (GaAs) a une "bande interdite" presque optimale de 1,4 eV.

Les rendements commerciaux les plus élevés pour les cellules monocristallines se situent autour de 12 à 17 % [29].

C'est le rapport entre les quantités d'énergie électrique obtenues par conversion d'énergie La lumière et l'énergie solaire reçues par la cellule.

$$n[\%] = 100 * \frac{P(\text{produite})}{P(\text{incidence})} = 100 * \frac{P_{max}}{G * A} \quad (I-1)$$

Avec : G : éclairement (W/m<sup>2</sup>) ; A : surface de la cellule (m<sup>2</sup>)

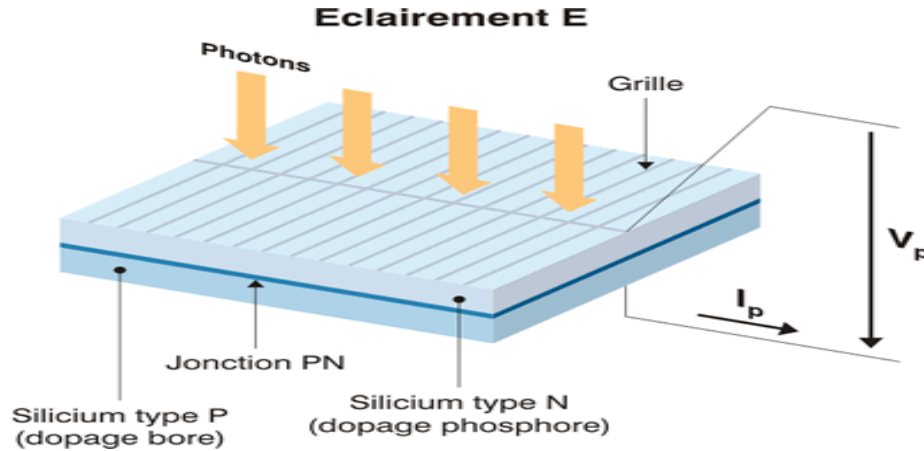


Figure I—10 : Structure d'une cellule photovoltaïque

## I.10 Paramètres d'un module photovoltaïque :

### I.10.1 Caractéristique courant-tension I(V) :

Cette caractéristique dépend de la puissance de rayonnement reçue par unité de surface (la grandeur est appelée éclairement (W/m<sup>2</sup>). Ses principaux paramètres sont les suivants [30]:

- **Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )** : Proportionnel à l'éclairage et à la surface de la cellule. Il est obtenu lorsque le module PV est en condition de court-circuit ( $V_{oc} = 0$ ), ce qui représente le courant maximal produit par la cellule photovoltaïque.
- **Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )** : proportionnelle à la température. Il est généré en condition de circuit ouvert ( $I_{cc} = 0$ ). Il représente la tension maximale générée par le panneau photovoltaïque.
- **Point de puissance maximale ( $P_{pm}$ )** : Indique le point où le produit  $P * I$  est maximal. Il se situe au coude de la courbe. La puissance maximale ( $P_{max}$ ) correspond à la tension maximale ( $V_{mpp}$ ) et au courant maximal ( $I_{mpp}$ ).

$$P_{max} = V_{mpp} * I_{mpp} \quad (I-2)$$

Par conséquent, chaque panneau est caractérisé par quatre valeurs ( $V_{oc}$ ,  $I_{cc}$ ,  $I_{mpp}$  et  $V_{mpp}$ ), qui son Mesuré en STC (Standard Test Conditions), soit 1000 W/m<sup>2</sup> d'éclairement et une température de 25°C.

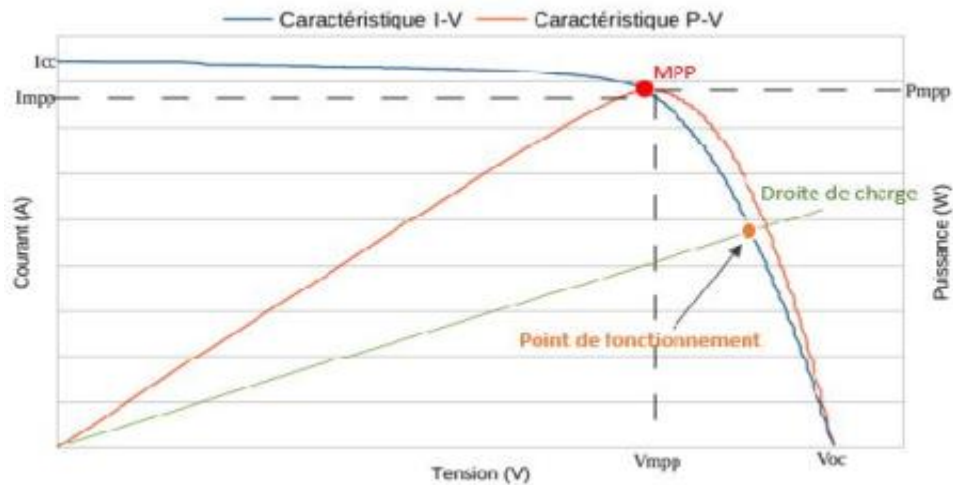


Figure I—11 : Caractéristiques électriques d'une cellule PV.

### I.10.2 Facteur de forme FF (Fill Factor) :

C'est le rapport entre la puissance maximale ( $P_{max}$ ) fournie par le module PV et le produit du courant de court-circuit par la tension de circuit ouvert [30] :

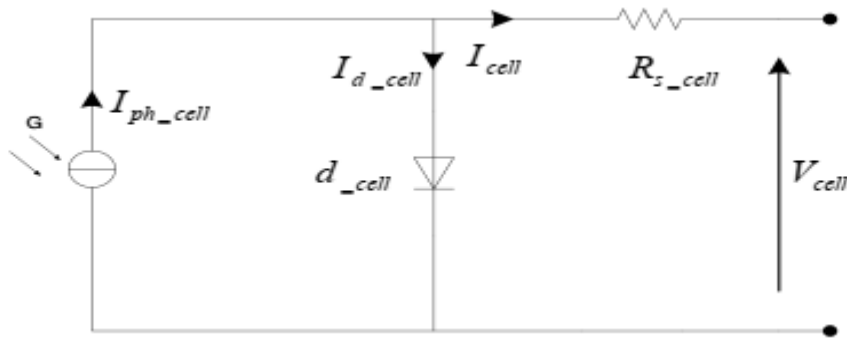
$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{oc}} \quad (I-3)$$

## I.11 Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est une source d'énergie non linéaire. Le courant et la tension de sortie du module dépendent de l'éclairement solaire  $S$  et de la température  $T$ . Pour cette raison, la prédiction des performances d'une cellule photovoltaïque nécessite le développement d'un modèle mathématique afin d'étudier son comportement dans différentes conditions. Météo (lumière, température). De nombreuses études portent sur le développement d'un modèle mathématique de simulation des caractéristiques courant-tension ( $I, V$ ) des cellules photovoltaïques [31][32]. Dans cette section, nous présenterons quelques modèles de cellules photovoltaïques dans la littérature existante. Ensuite, nous expliquerons les modifications apportées au modèle de batterie pour décrire la relation courant-tension d'un générateur photovoltaïque.

### I.11.1 Cas d'une cellule idéale :

Dans un cas idéal, d'après la Fig. (I-12), une cellule à jonction PN éclairée par du photovoltaïque et connectée à une charge peut être représentée schématiquement par un générateur de courant  $I_{ph}$  connecté en parallèle avec la diode fournissant le courant [33].



**Figure I—12** : Schéma équivalent d'une cellule idéale

Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{cell} = I_{ph\_cell} - I_{d\_cell} \quad (I-4)$$

Le courant  $I_{ph}$  est assimilé au courant  $I_{cc}$  avec  $V_{pv} = 0$ , courant de court-circuit obtenu en court-circuitant la charge.

$$I_{ph\_cell} = I_{cc} * \frac{G}{G_{ref}} \quad (I-5)$$

$I_{ph\_cell}$  : Courant photonique, en [A], dépend de la température et l'ensoleillement, calculé dans les conditions nominales (25°C et 1000 W/m<sup>2</sup>) comme suit :

$$I_{ph\_cell} = [I_{cc} + K_i(T - T_n)] * \frac{G}{G_{ref}} \quad (I-6)$$

Avec :

$G$  : L'éclairement absorbé par la cellule

$G_{ref}$  : L'éclairement de référence (1000 w/m<sup>2</sup>)

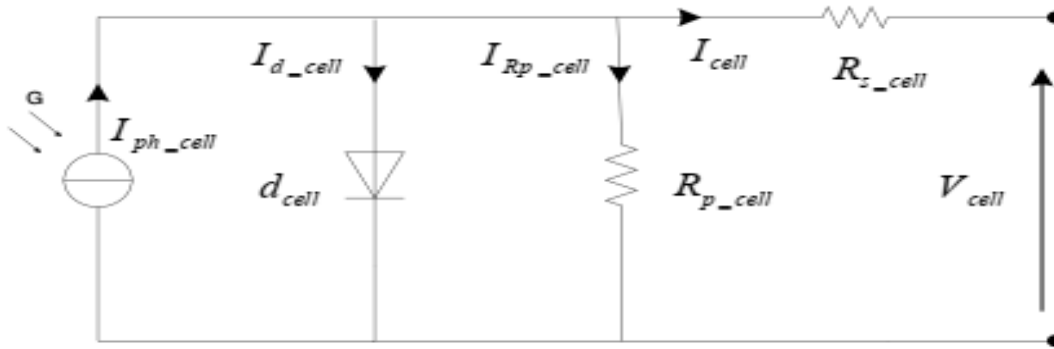
$K_i$  : Le rapport entre  $I_{cc}$  et la température.

$$V_{d\_cell} = \frac{V_{oc}}{N_s} \quad (I-7)$$

### I.11.2 Cas d'une cellule réelle :

Un schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle prenant en compte les effets de la résistance parasite induite par la fabrication est représenté sur la figure (I-13). Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (**D**) caractérisant la jonction, d'une source de courant ( $I_{ph\_cell}$ ) caractérisant le photocourant, d'une résistance série ( $R_{s\_cell}$ ) représentant les pertes dues à l'effet Joule, et d'une résistance

shunt ( $R_{p\_cell}$ ) typiquement bien supérieure à ( $R_{s\_cell}$ ), caractérise le courant de fuite entre la grille supérieure et l'arrière du contact [34].



**Figure I—13** : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

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

$$I_{cell} = I_{ph\_cell} - I_{d\_cell} - I_{Rp\_cell} \quad (I-8)$$

$I_{pv\_cell}$  : Courant généré par la cellule photovoltaïque.

$I_{ph\_cell}$  : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

$I_{d\_cell}$  : Courant circulant dans la diode.

$I_{Rp\_cell}$  : Courant circulant dans la résistance  $R_{p\_cell}$ .

$I_0$  : Courant de saturation.

Le courant traversant la diode  $I_{d\_cell}$  est calculé comme suit : [7]

$$I_{d\_cell} = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) = I_0 \left( e^{\frac{q(V_{cell} + I_{Rs\_cell})}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right) \quad (I-9)$$

$$V_t = \frac{nKT}{q} \quad (I-10)$$

$$I_0 = I_{0r} \left( \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left( \frac{q \cdot E_{g0}}{n \cdot K} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right)} \right) \quad (I-11)$$

$$I_{0r} = \left( \frac{I_{cc}}{e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T}} - 1} \right) \quad (I-12)$$

$V_{d\_cell}$  : La tension de sortie de la cellule photovoltaïque.



$N_s$  : cellules en série et  $N_p$  cellules en parallèle.

$V_t$  : Tension thermique.

$n$  : Facteur d'idéalité de la photopile.

$K$  : Constante de Boltzmann ( $1,38 * 10^{-23}$  J/ K).

$q$  : Charge de l'électron ( $1,16 * 10^{-19}$  C ).

$I_{0r}$  : est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence  $T_{ref}$  et pour un éclairement de référence.

$T_n$  : Température de la jonction des cellules PV [298°K].

$T$  : Température de référence des cellules PV [°C].

$n$  : Facteur d'idéalité de la jonction.

$E_{g0}$  : Energie de gap [ev].

$R_{s\_cell}$  : Résistance série symbolisant la résistance de masse du matériau semi- conducteur, ainsi que les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules.

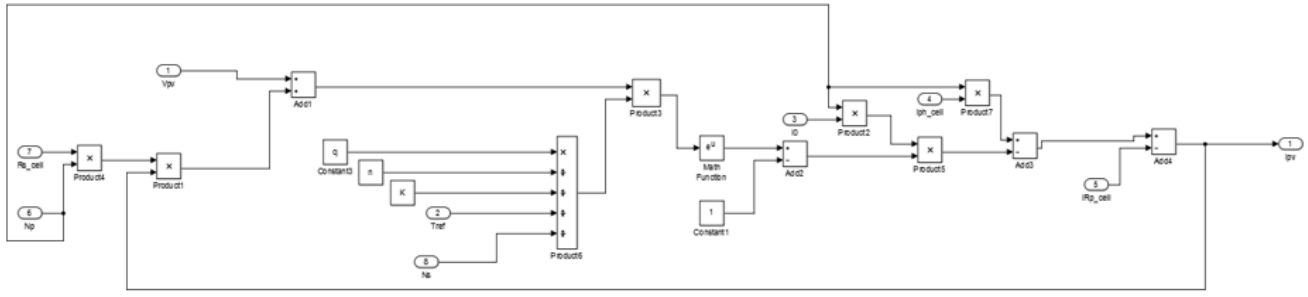
$V_{cell}$  : Tension de sortie du générateur PV.

$R_{p\_cell}$  : Résistance shunt représentant les fuites autour de la jonction PN dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

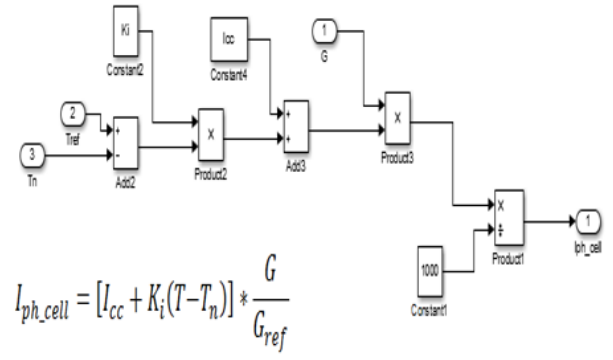
En substituant les équations (I-9) et (I-10) dans l'équation (I-8) le courant  $I_{cell}$  devient :

$$I_{cell} = N_p I_{ph_{cell}} - N_p I_0 \left( e^{\left( \frac{q * \left( V_{cell} + I_{cell} * \frac{R_{s\_cell}}{N_p} \right)}{N_s * K * T * n} \right)} - 1 \right) - \left( \frac{V_{cell} * \frac{N_p}{N_s} + I_{cell} * R_{s\_cell}}{R_{P_{cell}}} \right) \quad (I-13)$$

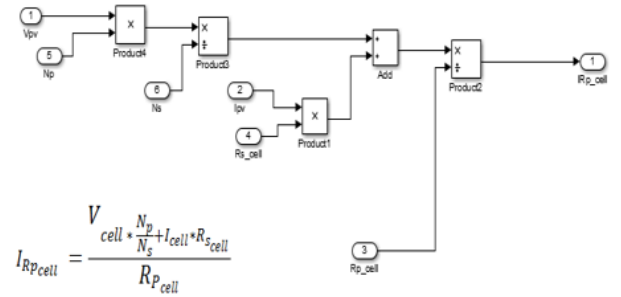
I.11.3 Courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :



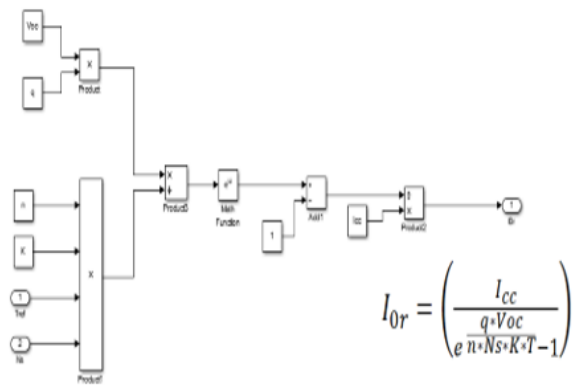
$$I_{cell} = N_p I_{ph\_cell} - N_p I_0 \left( e^{\left( \frac{q(V_{cell} + I_{cell} R_{sc\_cell})}{Ns \cdot K \cdot T + n \cdot k \cdot Tref} \right)} - 1 \right) - \left( \frac{V_{cell} + I_{cell} R_{sc\_cell} + R_{p\_cell} I_{cell}}{R_{p\_cell}} \right)$$



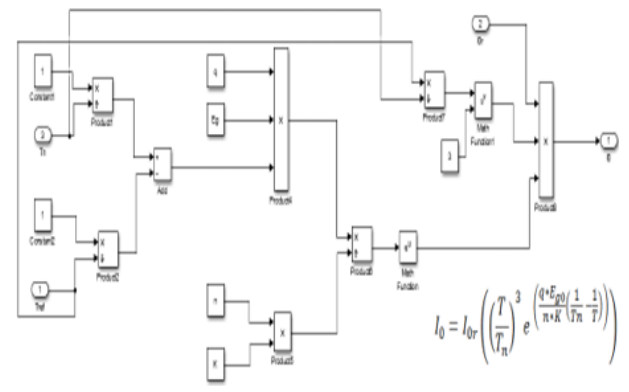
$$I_{ph\_cell} = [I_{cc} + K_i(T - T_n)] * \frac{G}{G_{ref}}$$



$$R_{p\_cell} = \frac{V_{cell} + \frac{N_p}{Ns} I_{cell} R_{sc\_cell}}{R_{p\_cell}}$$

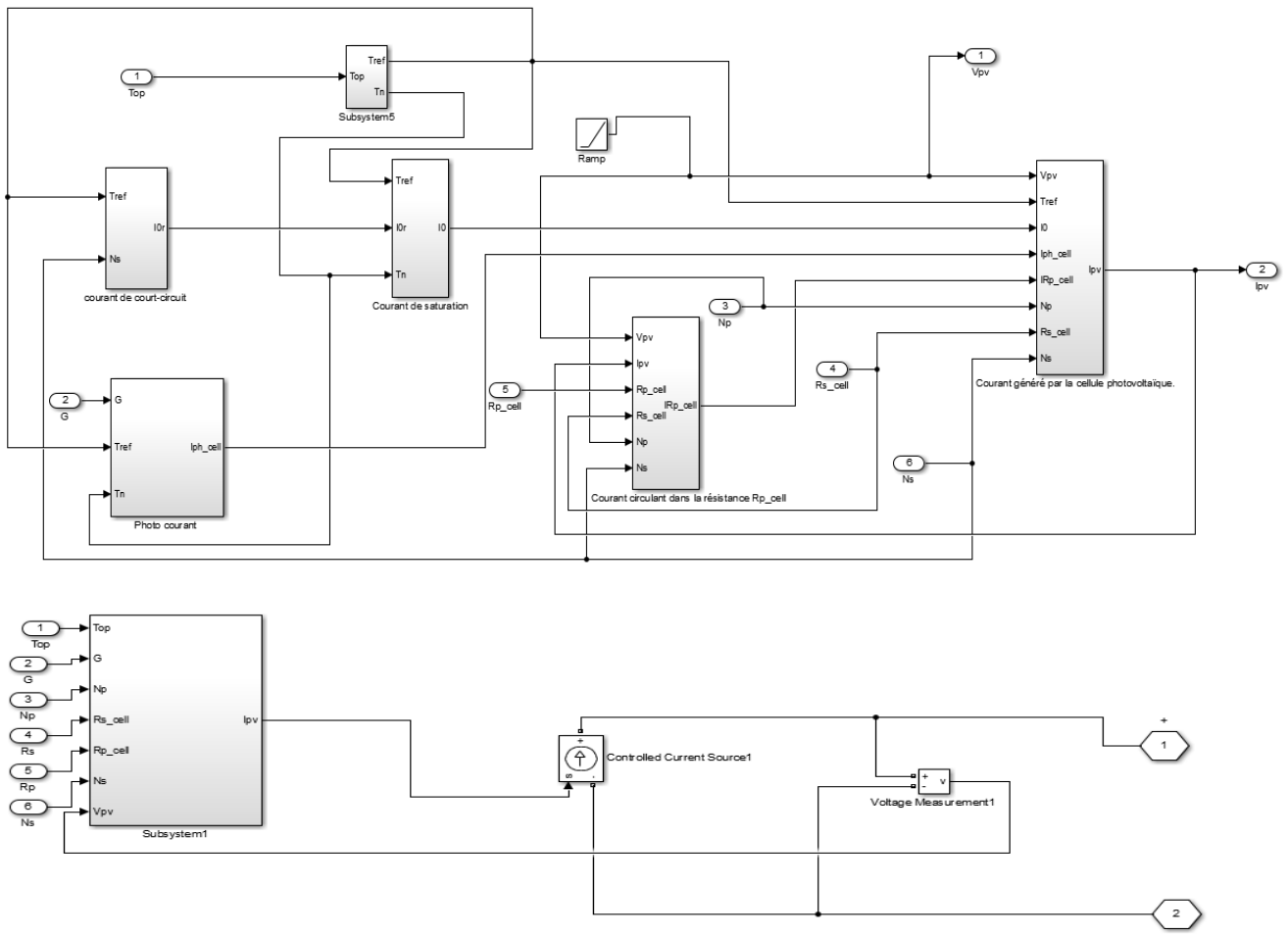


$$I_{0r} = \left( \frac{I_{cc}}{q \cdot Voc} \right) \left( \frac{T}{e^{n \cdot Ns \cdot K \cdot T} - 1} \right)$$



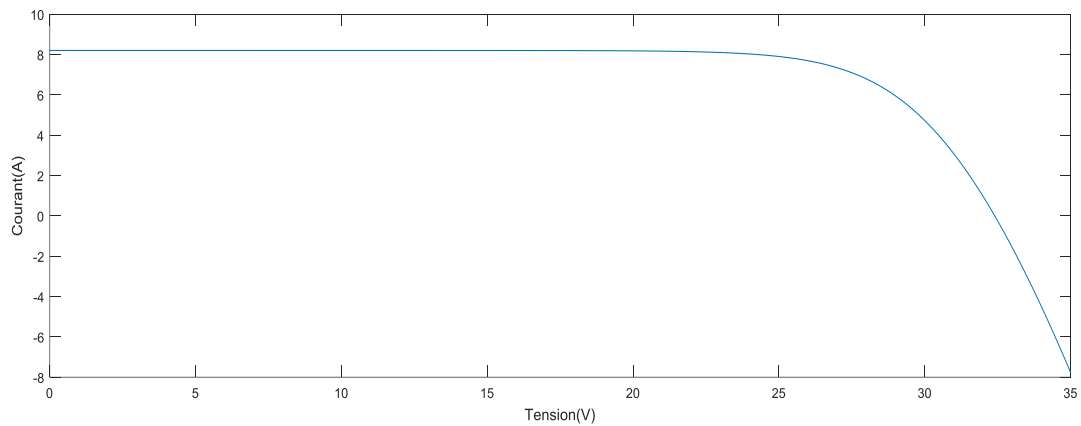
$$I_0 = I_{0r} \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left( \frac{q \cdot Voc}{n \cdot k} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right)}$$

Figure I—14 : Schéma bloc du système photovoltaïque dans SIMULINK/MATLAB

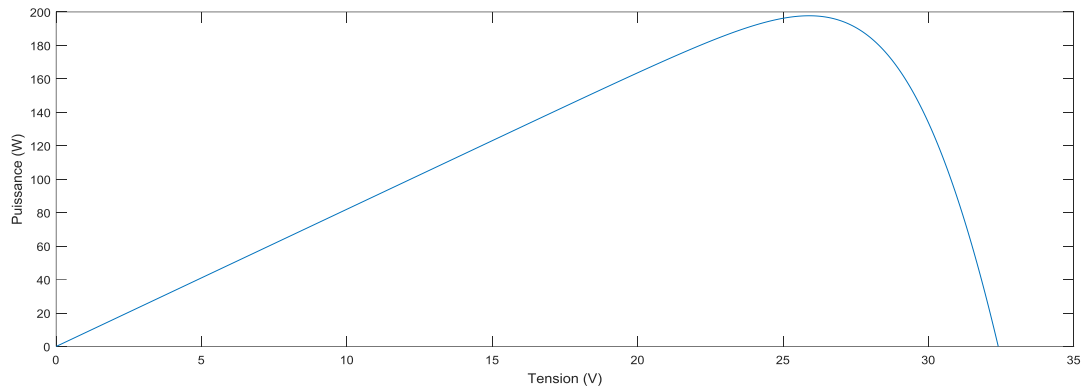


**Figure I—15** : Schéma bloc du GPV dans SIMULINK/MATLAB

Les figures (I-16) et (I-17) illustrent les caractéristiques non linéaires d’une cellule photovoltaïque pour un éclairement et une température donnée.



**Figure I—16** : Caractéristique I-V d’une cellule PV



**Figure I—17** : Caractéristique P-V d'une cellule PV

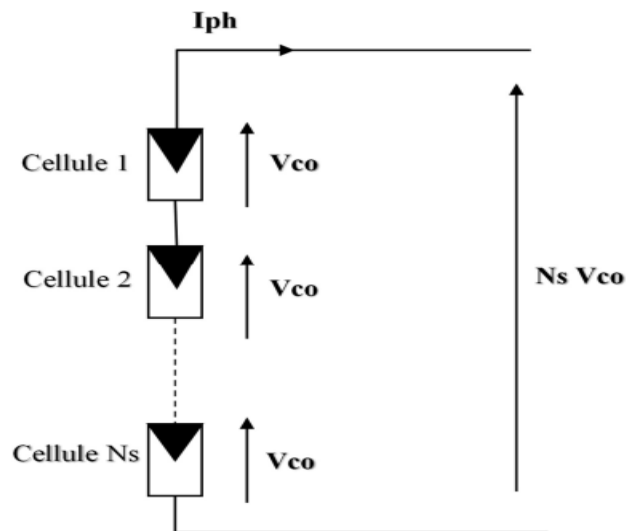
### I.11.4 Association des cellules photovoltaïques :

Un générateur ou module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques de base montées en série et/ou en parallèle pour obtenir les caractéristiques électriques souhaitées telles que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert [35].

#### I.11.4.1 Association de $N_s$ cellules en série :

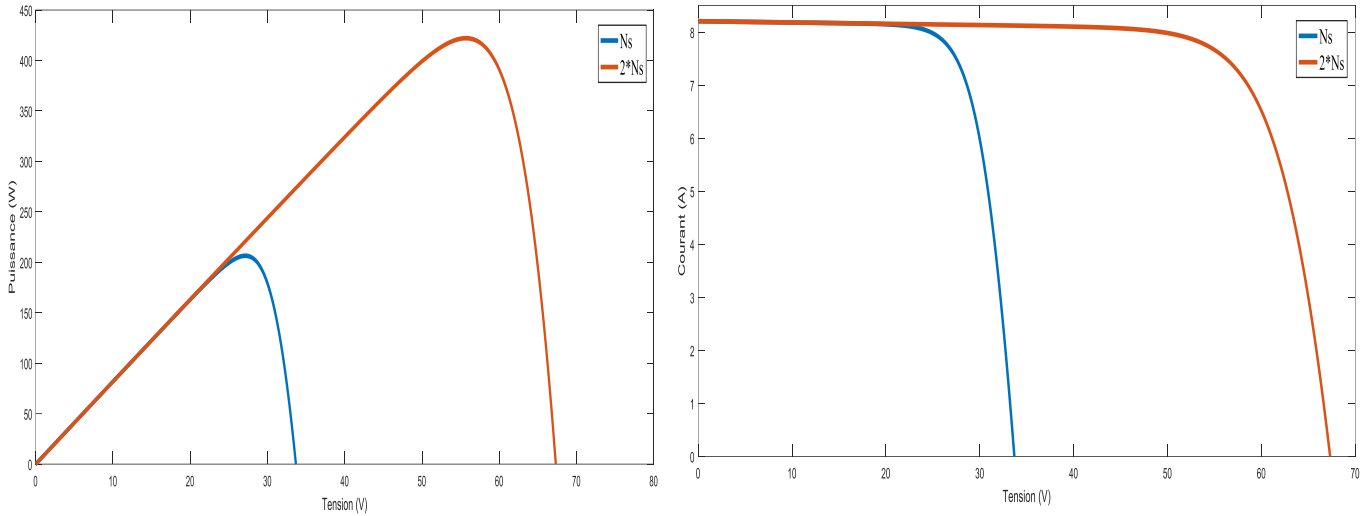
Dans un groupement en série, les cellules sont parcourues par le même courant, et la caractéristique finale (indice s) du groupement en série est obtenue en ajoutant une tension à un courant donné.

$$V_{CO}(\text{module}) = N_s * V_{CO}(\text{cellule}) \quad (\text{I— 14})$$



**Figure I—18** : Schéma des cellules photovoltaïques associées en série

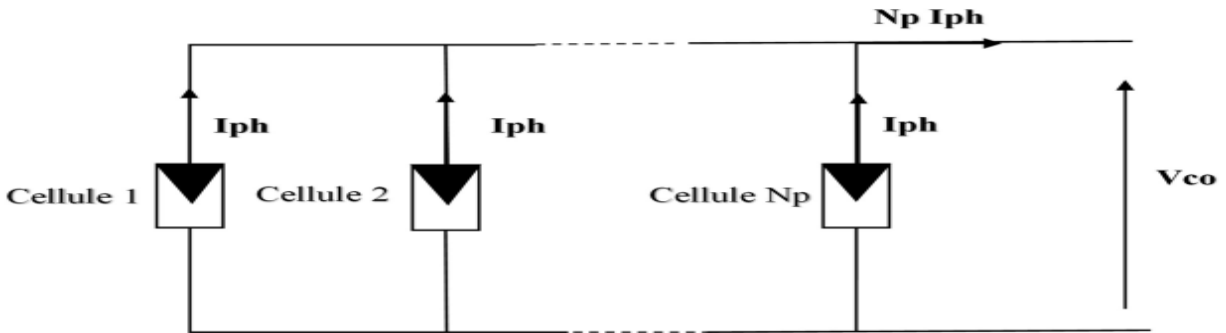
En additionnant des cellules identiques en parallèle comme montre La Figure (I-19), la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle dans la branche.



**Figure I—19 :** Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension

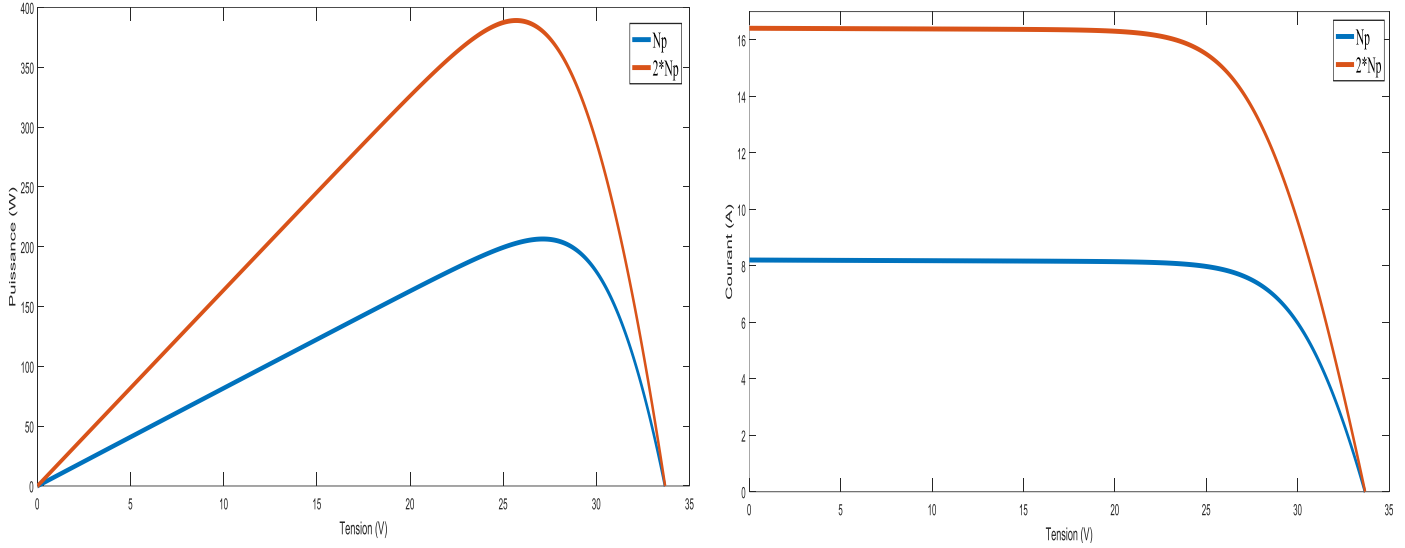
**I.11.4.2 Association de  $N_p$  cellules en parallèle :**

L'association parallèle de  $N_p$  cellules permet d'accroître le courant du générateur photovoltaïque comme le montre la figure (I-20).



**Figure I—20:** Schéma des cellules photovoltaïques associées en parallèles

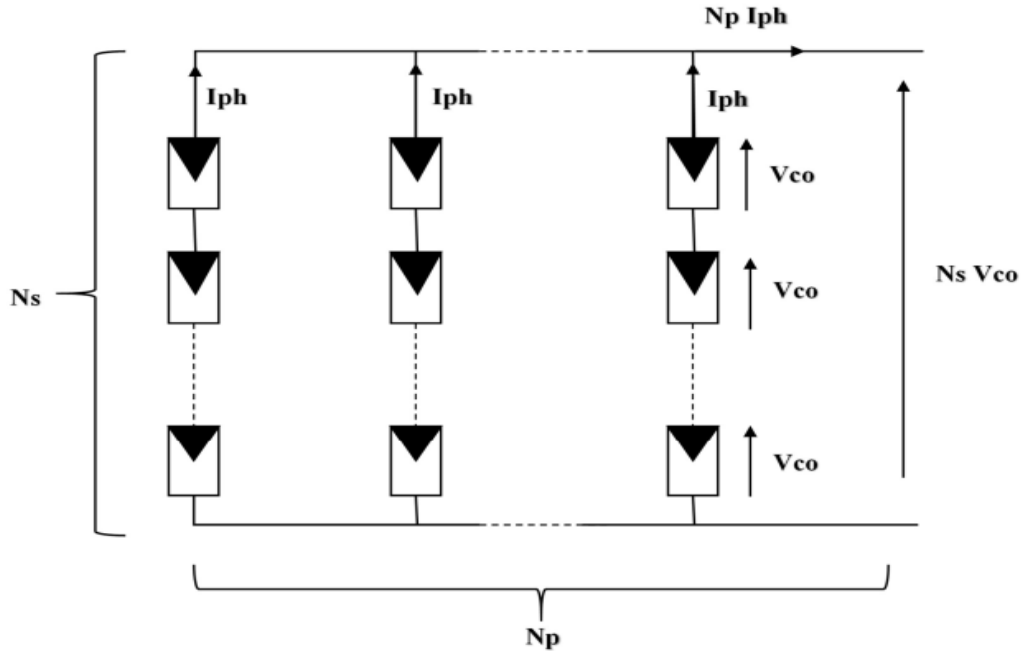
En additionnant des cellules identiques en parallèle comme montre La Figure (I-21), la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle dans la branche.



**Figure I—21:** Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension

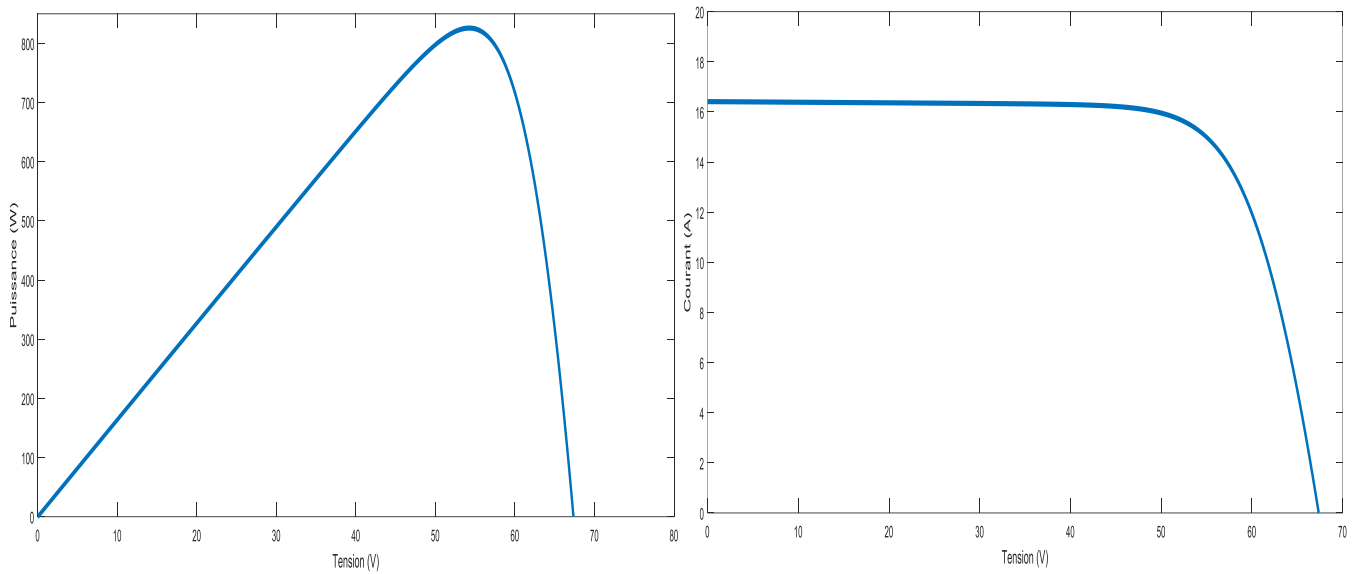
**I.11.4.3 Association série-parallèle des cellules :**

L'association série-parallèle permet d'augmenter la tension et le courant du générateur photovoltaïque.



**Figure I—22:** Association série-parallèle des cellules PV

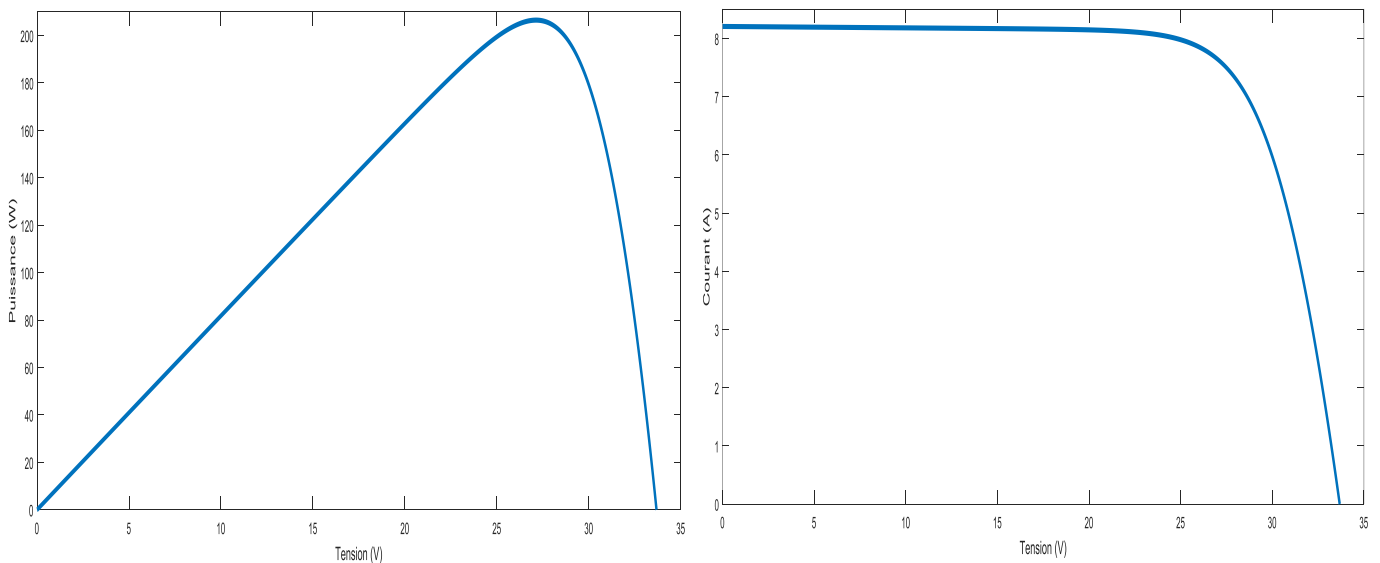
L'association série-parallèle ( $N_s=2$ ,  $N_p=2$ ) permet d'augmenter la tension et le courant du générateur photovoltaïque comme le montre la figure (I-23).



**Figure I—23:** Caractéristique I-V et P-V des cellules PV raccordées en série – parallèle

### I.12 Simulation du générateur photovoltaïque :

Les générateurs photovoltaïques ont des caractéristiques courant-tension non linéaires et ont un point Puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairage et température. Par conséquent, le point de fonctionnement du générateur PV peut varier entre ces points. Correspond aux valeurs extrêmes du courant de court-circuit et de la tension à vide. Le module est composé de 54 cellules monocristallines connectées en série ( $N_s=54$ ). Rappelons que ces paramètres sont donnés pour des conditions de référence, soit  $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T_{ref}=25^\circ\text{C}$

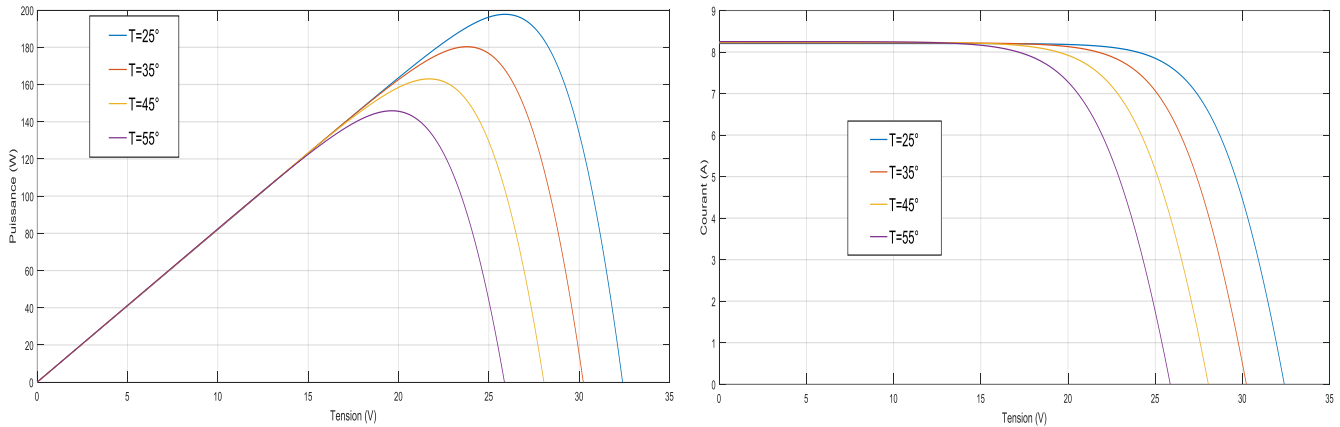


**Figure I—24:** Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque

## I.13 L'influence de la température et de l'éclairement :

### I.13.1 L'influence de la température :

Pour qu'un panneau solaire fonctionne, les cellules photovoltaïques doivent être exposées à Rayonnement solaire. Cela provoque un échauffement, la température agissant sur les Différentes propriétés des cellules [24]. On fixe l'ensoleillement à  $1000 \text{ W/m}^2$  et on fait varier la température de  $25^\circ\text{C}$  jusqu'à  $55^\circ\text{C}$ , les allures obtenues sont présentées ci-dessous :

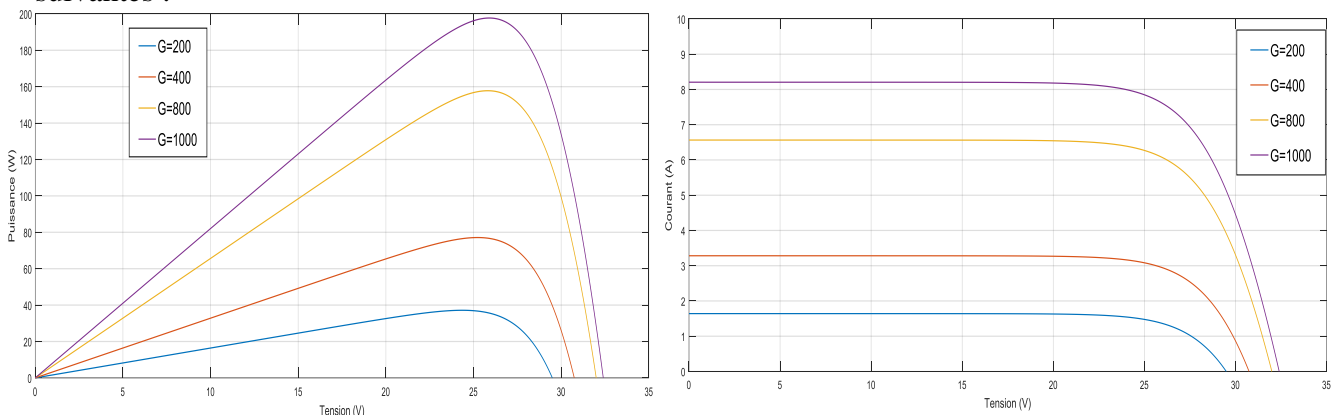


**Figure I—25:** Influence de la température sur le courant du GPV

On remarque que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension et de la puissance du GPV.

### I.13.2 L'influence de l'éclairement :

On applique une température  $T=25^\circ\text{C}$  maintenue constante et on fait varier l'éclairement  $G$  de  $200 \text{ W/m}^2$  jusqu'à  $1000 \text{ W/m}^2$ . Les résultats obtenus sont illustrés par les figures suivantes :

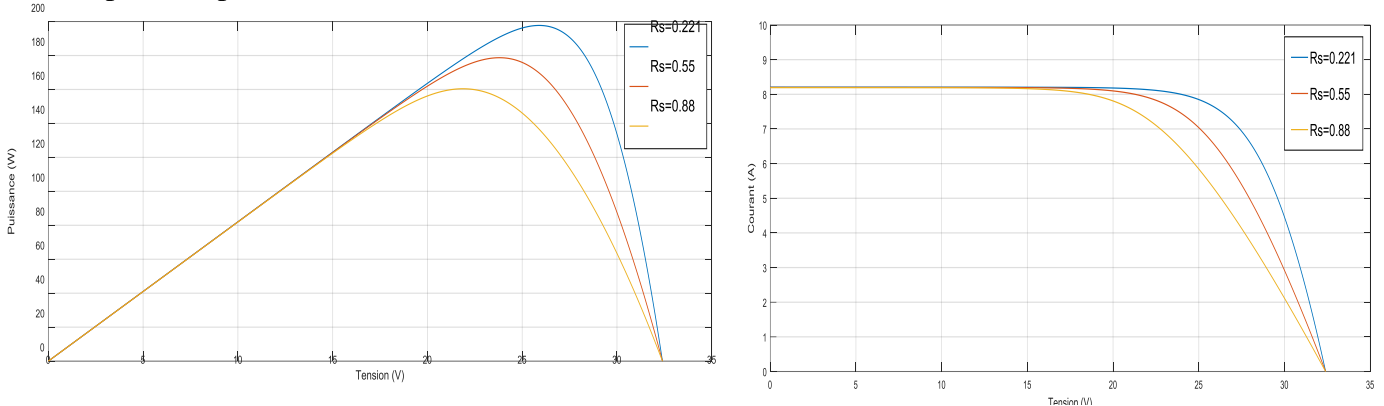


**Figure I—26:** Influence de l'éclairement sur la puissance du GPV



### I.13.3 L'influence de la variation de la résistance série :

La valeur de la résistance série est faible et, dans certains cas, peut être ignorée. Cependant, pour adapter le modèle à un module PV donné, il est possible de faire varier cette résistance et de prédire l'effet de sa variation sur la puissance du module PV. Comme le montre la figure (I-27), un changement de  $R_s$  affecte l'angle de la courbe  $I(V)$ , provoquant une déviation de la pente par rapport au point de puissance maximale.

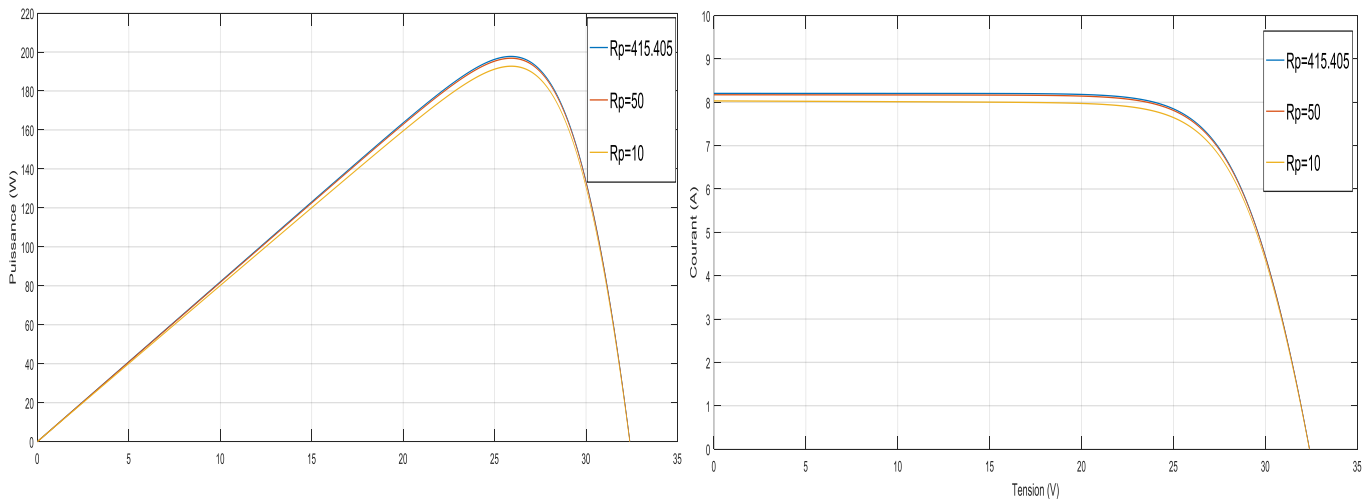


**Figure I—27 :** La caractéristique  $I(V)$  pour différentes valeurs de  $R_s$

Des simulations ont été effectuées pour trois valeurs différentes de  $R_s$ , et nous avons constaté que des valeurs plus élevées de  $R_s$  réduisent la puissance de sortie sur la Fig. (I-27). Le facteur de remplissage donné par l'équation (I—3) diminue à mesure que  $R_s$  augmente.

### I.13.4 L'influence de la variation de la résistance parallèle (shunt) :

La résistance shunt doit être suffisamment grande pour une puissance de sortie optimale et un bon facteur de remplissage. En fait, pour une faible résistance shunt, l'effondrement du courant signifie une perte de puissance élevée et un faible facteur de remplissage, comme le montre la Figure (I-28).



**Figure I—28 :** La caractéristique  $I(V)$  pour différentes valeurs de  $R_p$ .

## **I.14 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque :**

### **I.14.1 Avantages [20] :**

- Fiabilité : Le fait que les dispositifs photovoltaïques n'ont pas de pièces mobiles les rend extrêmement utiles pour une utilisation dans des endroits éloignés, ce qui explique également pourquoi ils sont utilisés dans des applications spatiales.
- Assemblage simple. La forme modulaire des panneaux solaires permet non seulement un montage simple, mais permet également de dimensionner l'installation en fonction des besoins énergétiques de la fraction de watt au Mégawatt.
- Faibles coûts d'exploitation, en raison de l'absence de carburant ou de personnel hautement qualifié.
- Écologique, qui est l'avantage concurrentiel le plus important, car le processus de production d'énergie est non polluant, silencieux et ne cause aucune perturbation à l'environnement.

### **I.14.2 Inconvénients[20] :**

- Le coût des matériaux qui composent les modules PV est très élevé.
- Dépendant des conditions météorologiques.
- Le rendement réel des modules photovoltaïques est faible, généralement l'efficacité des modules varie entre 10% et 15%, cela est dû au fait que les cellules photovoltaïques n'absorbent pas tout le flux lumineux, ou ne font que déplacer des électrons, l'énergie de l'énergie du rayonnement doit être au moins égale à 1 eV, donc toute l'énergie au-dessous de 1 eV n'est absorbée. Cela rend les générateurs photovoltaïques incapables de rivaliser avec d'autres technologies en termes de rendement.
- Le ménage a besoin d'une batterie, ce qui augmente le coût d'installation.

## **I.15 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous expliquons le phénomène photovoltaïque, constitutionnel, Les cellules photovoltaïques et leur fonctionnement. Cette dernière étude a montré, La puissance maximale produite dépend en grande partie de l'intensité de l'éclairage et température. Les modules photovoltaïques ne peuvent produire qu'une certaine puissance maximum la Tension et courant de travail.

## **Chapitre II : Techniques de recherche du point de puissance maximal MPPT**

## II.1 Introduction :

Comme indiqué dans le premier chapitre, les caractéristiques des modules photovoltaïques dépendent directement de l'intensité de l'ensoleillement et de la température, lorsque le module photovoltaïque est directement connecté à la charge, le point de fonctionnement du module PV sera le point d'intersection (V) de son I caractéristiques et les caractéristiques de la charge. [36]

Généralement, ce point de fonctionnement est rarement au point de puissance maximale (MPP), une étude montrant que lorsqu'un GPV est directement couplé à la charge, seulement 31% de la capacité PV est utilisé. [36]

Afin d'amener le système photovoltaïque à fonctionner à sa puissance maximale, l'insertion d'une interface entre le module photovoltaïque et la charge est impérative, cette interface n'est autre qu'un hacheur muni d'une commande MPPT.

En utilisant une méthode spécifique, connue dans la littérature sous le nom de "Maximum Power Point Tracking" ou "Maximum Power Point Tracking", les systèmes PV peuvent être remis en service jusqu'à 97% de leur capacité. [28]

Dans ce chapitre, nous étudierons le hacheur élévateur (Boost), le hacheur abaisseur (Buck) et le hacheur mixte (élevateur-abaisseur ou Boost-Buck) dans les systèmes de conversion photovoltaïque Les convertisseurs DC-DC couramment utilisés, et une explication de la deux méthodes MPPT et comment elles fonctionnent.

## II.2 Connexion directe source-charge :

À l'heure actuelle, il existe encore de nombreuses applications où les générateurs photovoltaïques sont directement connectés aux charges. Ce choix est principalement associé à une simplicité de fonctionnement et à une très faible fiabilité, principalement due à l'absence d'électronique, sans parler du faible coût. Si cette charge est une batterie, elle peut fonctionner en récepteur lorsque le module n'est pas éclairé, la batterie peut ainsi se décharger sur le générateur photovoltaïque et l'endommager de manière irréversible, donc pour éviter cela il faut s'assurer que la connexion se fait à l'aide d'un non - placé en diode Retard entre GPV et la charge. Cette configuration est illustrée à la Figure (II-1). [29]

L'inconvénient de cette configuration est qu'elle ne fournit aucun type de limitation et/ou de mise à l'échelle de la tension. Il n'y a également aucune garantie que la puissance maximale disponible aux bornes du générateur PV sera fourni à la charge.[29]

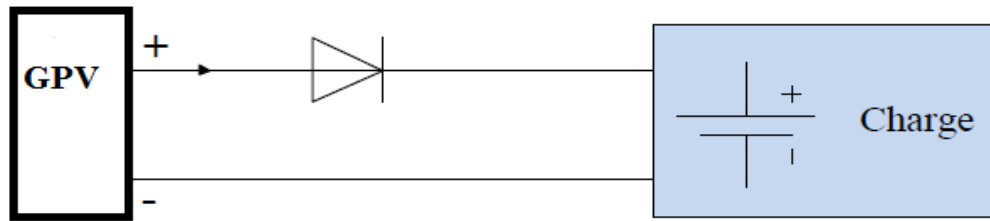


Figure II—1 : Connexion directe source-charge.

### II.3 Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge :

Les générateurs photovoltaïques ont une caractéristique I-V non linéaire qui dépend principalement des niveaux de lumière et de la température des cellules. De plus, en fonction de la charge délivrée par le GPV, on peut constater une grande différence entre la puissance potentielle du générateur et la puissance effectivement délivrée à la charge en mode connexion directe.

Afin de toujours extraire le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et de le transmettre à la charge, une technique couramment utilisée consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge, comme le montre la Figure (II-2).

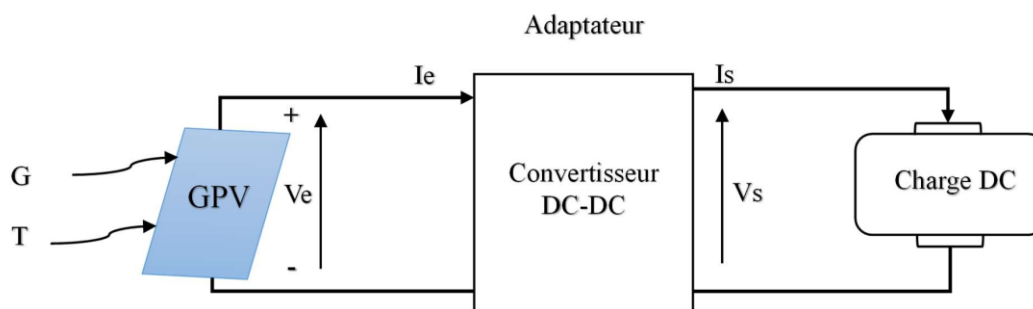
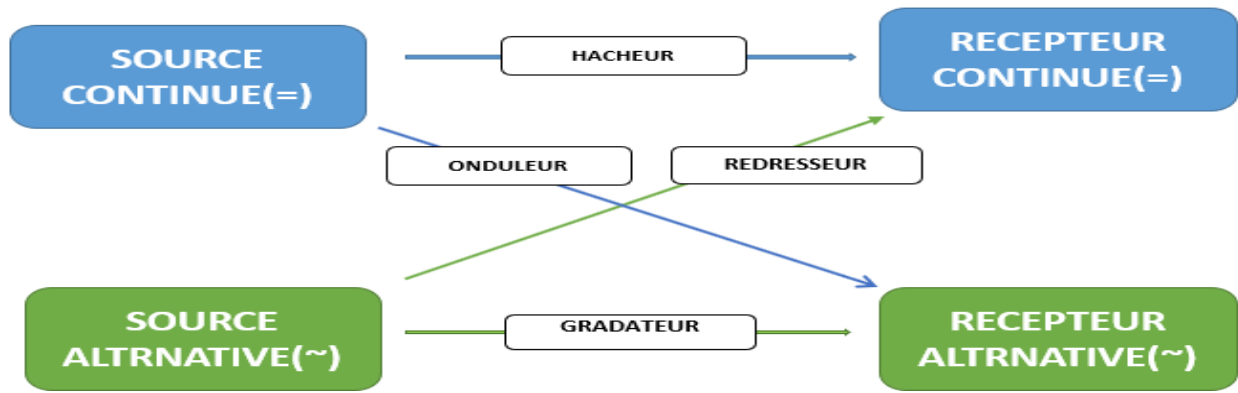


Figure II—2: Etage d'adaptation entre un GPV et une charge

Cet étage agit comme une interface entre deux éléments en s'assurant qu'une action Contrôle, transmission de la puissance maximale fournie par le générateur Ce dernier peut permettre au générateur de fournir sa puissance maximale par commande spécifique, notée  $P_{\max}$  ( $P_{\max} = V_{\text{opt}} * I_{\text{opt}}$ ) où  $V_{\text{opt}}$  et  $I_{\text{opt}}$  représentent respectivement la tension et pour une courbe I-V donnée, Courant optimal pour le générateur photovoltaïque, tout en veillant à ce que la tension ou le courant de la charge corresponde bien aux caractéristiques de cette dernière. Pour maintenir les générateurs photovoltaïques en fonctionnement à leur niveau optimal aussi souvent que possible, la solution habituelle consiste à introduire des convertisseurs statiques en tant qu'adaptatrice source-charge. Le convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules au point de puissance optimal indépendamment de l'éclairage et de la charge.





**Figure II—4** : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance.

- Nous avons parlé de trois types de Transformateurs (gradateur, redresseur, onduleur). Et maintenant, nous allons parler de d'Adaptateur DC-DC (hacheur). Nous allons donner une vue plus profonde d'hacheur puisque notre travail est basé sur le convertisseur DC-DC.

## II.6 Convertisseurs DC/DC (hacheur) :

Un convertisseur DC/DC est un circuit utilisé pour convertir une tension continue en une autre tension continue avec un rapport de transformation bien défini.

$$k = \frac{V_i}{V_s} \quad (\text{II— 1})$$

Avec  $V_s$  la tension de sortie,  $V_i$  la tension d'entrée,  $K$  le rapport de transformation.

Il peut être supérieur à l'unité, auquel cas le convertisseur est appelé élévateur (survolteur). Puisqu'il peut être inférieur à l'unité, dans ce cas, il est appelé abaisseur (dévolteur).

En fait, la tension  $V_i$  est la tension fournie par le panneau solaire et la tension  $V_s$  est la tension qui doit être fournie à la charge [37].

Les convertisseurs DC-DC sont devenus des composants essentiels, en particulier dans l'électronique automobile et d'autres applications industrielles. Grâce à leurs faibles poids et leurs rendements de plus en plus élevés, leurs faibles encombrements ainsi que et leurs coûts réduits, ils ont remplacé les alimentations classiques linéaires, même pour de faibles niveaux de puissance.

Les hacheurs sont des convertisseurs de type DC-DC utilisés pour contrôler la puissance dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une grande flexibilité et un rendement élevé [38].

Pour la conversion de puissance, un rendement élevé doit être maintenu pour éviter la dissipation de puissance et éviter la surchauffe des composants électroniques. Pour cette raison, toute conversion de courant alternatif doit tourner autour d'éléments de stockage d'énergie (inducteurs et condensateurs)

et de commutateurs. L'interrupteur de puissance utilisé dépend du niveau de puissance à convertir ou à contrôler. Les MOSFET (Metal Oxide Field Effect Transistors) sont généralement utilisés pour des puissances relativement faibles (quelques kilowatts) et les IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) pour des puissances plus élevées. Les thyristors ont été couramment utilisés et acceptés aux niveaux de puissance les plus élevés [39].

La Figure (II-5) montre une représentation d'un convertisseur DC-DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [40].

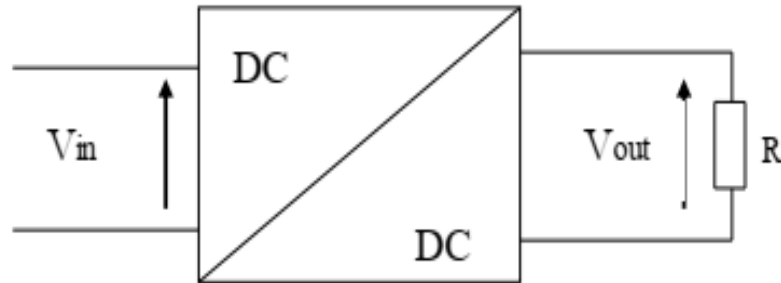


Figure II—5 : Convertisseur DC/DC.

Convertisseurs	Rapport de transformation en fonction de D
Buck	$D$
Boost	$\frac{1}{1 - D}$
Buck-Boost	$\frac{-D}{1 - D}$

Tableau II—1 : Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC.[41]

### II.6.1 Le rôle des convertisseurs DC-DC :

Le rôle du convertisseur DC-DC (dans le cadre du PV) est de réguler entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est réalisé en maintenant le point de fonctionnement à ou très proche du MPP dans toutes les conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristiques de charge, etc.). Contrairement au cas habituel d'utilisation d'un convertisseur DC-DC pour réguler la tension de sortie, ici, c'est la tension d'entrée qui est régulée.

### II.6.2 Différents types de hacheurs :

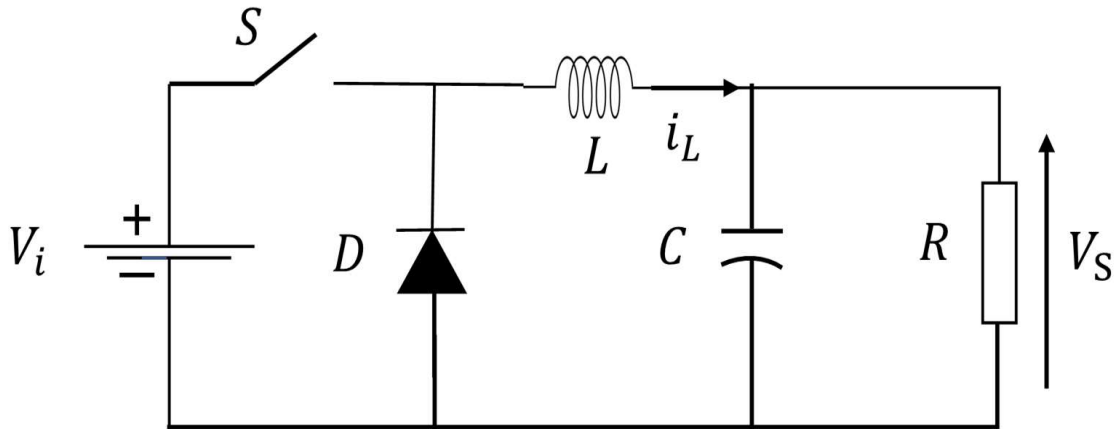
Selon la position du commutateur et de le hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés :



- Abaisseur de tension « Buck »
- Élévateur de tension « Boost »
- Abaisseur élévateur de tension « Buck-Boost »

### II.6.2.1 Convertisseur Abaisseur (Buck) :

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur [42].



**Figure II—6 :** Schéma de base d'un convertisseur Buck

L'équation caractéristique de courant de l'inductance est donnée par :

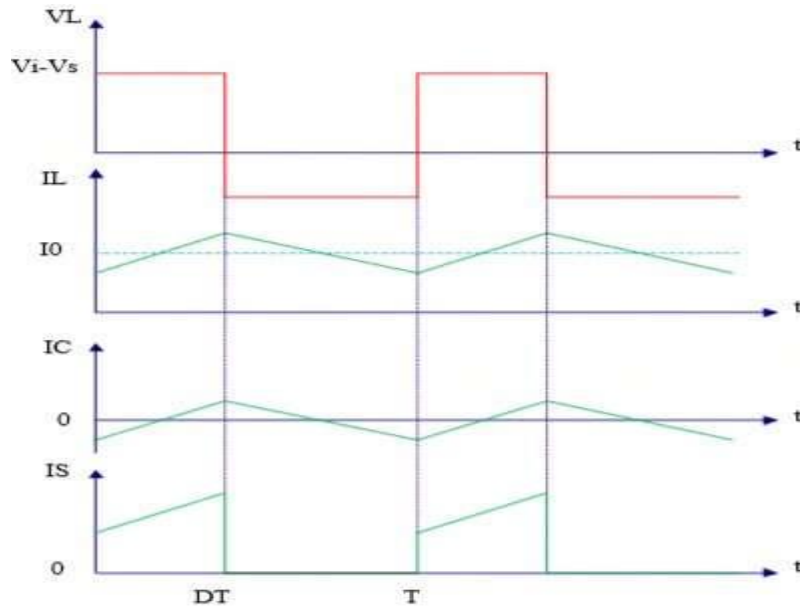
$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_i - V_s}{L} \quad (\text{II— 2})$$

L : Représente l'inductance [H]

Le processus de commutation est décrit par la position de l'interrupteur. Pendant la première période de temps ( $u T$ ), l'inductance se charge. Pendant la deuxième période de temps  $(1-u)T$ , l'inductance libère l'énergie stockée et la transfère à la charge.

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{V_s}{L} \quad (\text{II— 3})$$

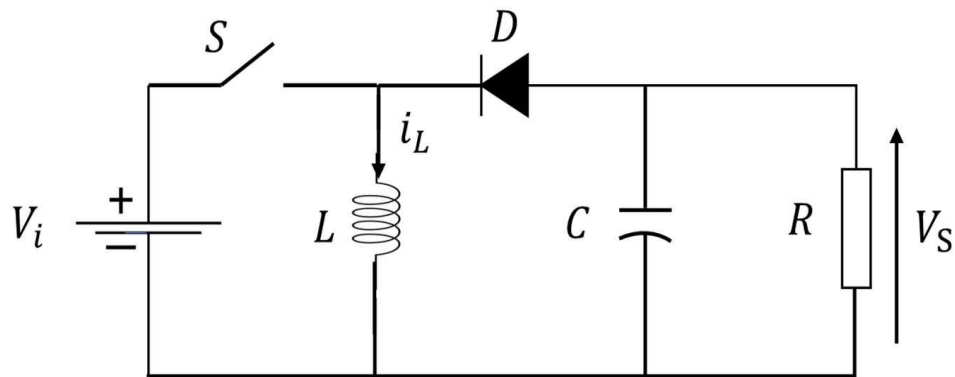
Les caractéristiques des courants et de la tension représentant le fonctionnement de le hacheur dévolteur sont données par la figure suivante :



**Figure II—7** : Caractéristiques courant-tension d'un hacheur abaisseur.[43]

### II.6.2.2 Convertisseur abaisseur-élevateur (Buck-Boost) :

Un convertisseur Buck-boost est une alimentation à découpage dont Capable de fournir une tension inférieure ou supérieure à celle appliquée à ses bornes d'entrée. Se Dépend de la valeur du rapport cyclique.

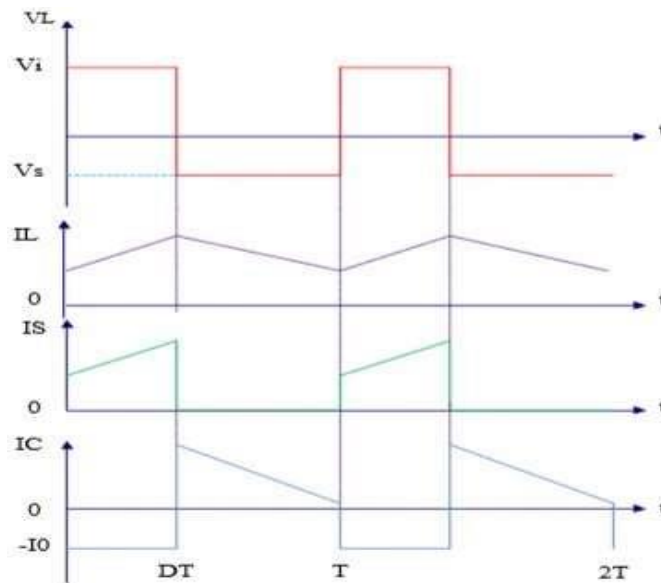


**Figure II—8** : Schéma d'un convertisseur abaisseur-élevateur

Dans ce cas, l'équation de tension aux bornes de la charge décrit le fonctionnement La conduction continue est donnée par :

$$V_s = \frac{u}{1-u} V_i \quad (\text{II—4})$$

Les caractéristiques courant-tension sont données par la figure ci-dessous :

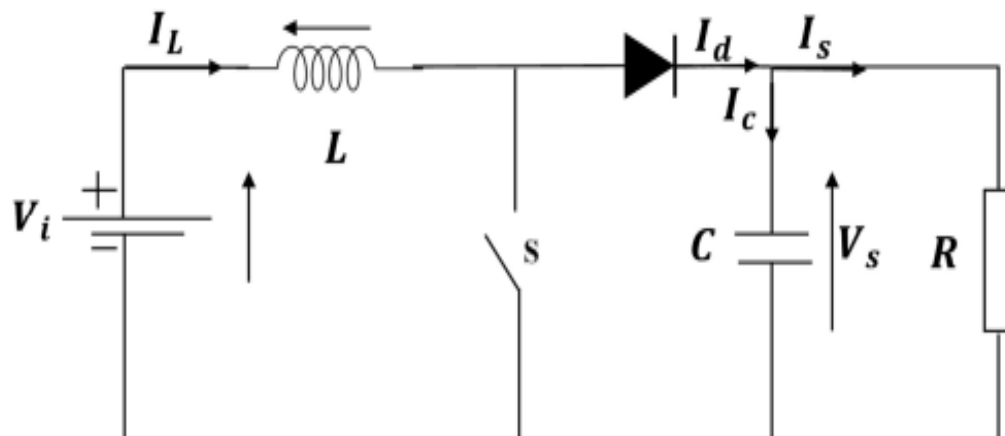


**Figure II—9** : Caractéristiques courant-tension du convertisseur abaisseur-élevateur. [43]

### II.6.2.3 Convertisseur élévateur (Boost) :

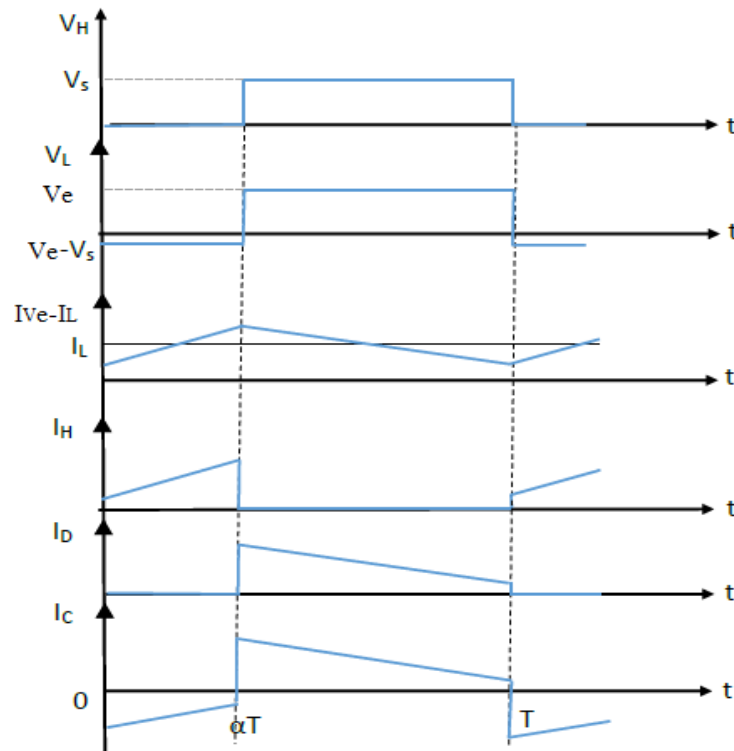
Lorsque vous souhaitez augmenter la tension de votre alimentation CC, vous pouvez utiliser un hacheur shunt élévateur, également appelé hacheur survolteur. Ce dispositif d'électronique de puissance est un convertisseur DC-DC mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs. La découpe se fait à très haute fréquence, ce qui crée une tension moyenne.

La figure suivante montre la forme la plus simple d'un hacheur d'élévateur



**Figure II—10** : Schéma de hacheur survolteur

Les caractéristiques courant-tension sont données par la figure ci-dessous :



**Figure II—11** : Forme d'ondes courant/tensions dans un hacheur boost. [43]

### II.6.2.3.1 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur H.

Pendant la période de temps  $t \in [0, \alpha T]$ , l'interrupteur H est fermé, c'est la phase d'accumulation de l'énergie. Le courant augmente dans l'inductance dont une énergie magnétique sera emmagasinée. La diode est alors bloquée, ce qui laisse la charge déconnectée de l'alimentation.

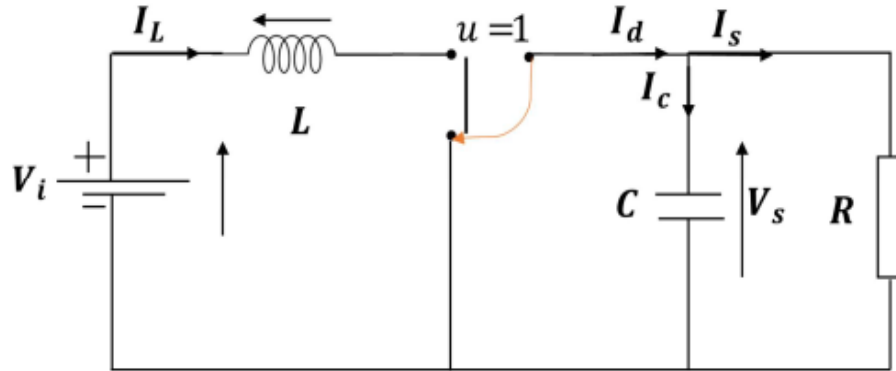
Durant la période de temps  $t \in [\alpha T, T]$ , l'interrupteur H est ouvert, l'inductance se trouve en série avec la charge et sa fem s'additionne à celle de la tension de source, il en résulte alors un transfert accumulé de l'énergie de l'entrée vers la sortie, ce qui fait que la tension de sortie est supérieure à celle d'entrée.

### II.6.2.3.2 Modèle mathématique du convertisseur Boost :

Selon l'état de l'interrupteur pendant la période T du signal de commande, le fonctionnement de hacheur boost peut être divisé en deux phases distinctes.

- **De 0 à  $\alpha T$  : phase d'accumulation d'énergie :**

L'interrupteur est fermé (état de conduction), ce qui fait augmenter le courant dans l'inductance, emmagasinant ainsi une certaine quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est ensuite déconnectée de l'alimentation.



**Figure II—12** : Schéma équivalent à la phase d'accumulation d'énergie

Les deux équations qui régissent le fonctionnement du hacheur sur l'intervalle  $[0, uT]$  sont données par le système d'équations

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_i \quad (\text{II—5})$$

$$C \frac{dV_S}{dt} = -\frac{V_S}{R} \quad (\text{II—6})$$

$$I_L = I_{min} + \frac{V_i}{L} t \quad (\text{II—7})$$

$I_{min}$  représente la valeur minimale de courant dans l'inductance. On a à l'instant  $t = uT$ , le courant atteint sa valeur maximale dans l'inductance  $I_{max}$  suivant :

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_i}{L} uT \quad (\text{II—8})$$

- **De  $uT$  à  $T$  : phase de roue libre :**

L'interrupteur est ouvert et l'inducteur est connecté en série avec le générateur. Sa f.e.m a été ajouté au générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance passe par le Ensuite, il y a la diode D, le condensateur C et la charge R. Cela provoque le transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la charge, ce qui fixe la tension de sortie.

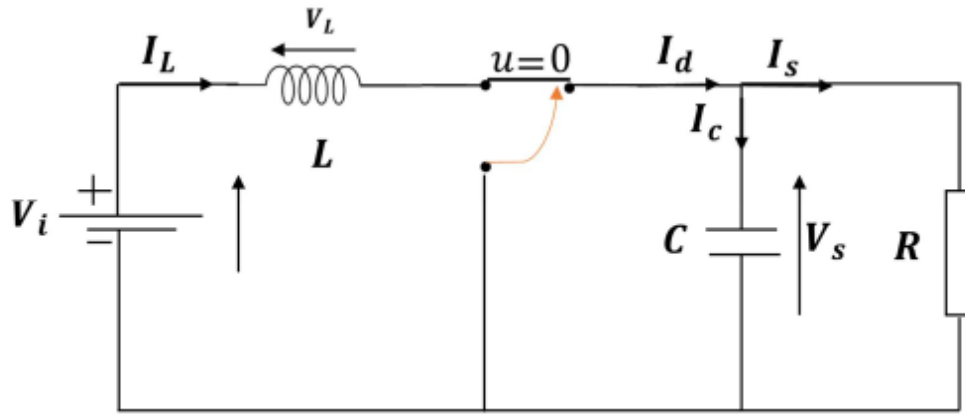


Figure II—13 : Schéma équivalent à la phase de roue libre

Dans ce cas, le fonctionnement peut être décrit par le système d'équation (II-7)

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_i - V_s \\ C \frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_s}{R} + I_L \end{cases} \quad (\text{II— 9})$$

$$I_L = I_{max} + \frac{V_i - V_s}{L} (t - uT) \quad (\text{II— 10})$$

A l'instant  $t = T$ , le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale  $I_{min}$  :

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_i - V_s}{L} (t - u)T \quad (\text{II— 11})$$

Ainsi, il est possible de caractériser le fonctionnement de hacheur sur une période  $[0, T]$  en combinant les deux systèmes d'équations (II-6) et (II-7) sous forme condensée :

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_i - (1 - u)V_s \\ C \frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_s}{R} + (1 - u)I_L \end{cases} \quad (\text{II— 12})$$

### II.6.2.3.3 Ondulation du courant dans l'inductance :

Compte tenu des hypothèses de travail adoptées, les variations  $I_L$  sont linéaires :

- À  $t \in [0, uT]$  : l'interrupteur H est fermé. La tension aux bornes de l'inductance  $L$  vaut  $V_i$ . Cette phase correspond à la croissance du courant dans l'inductance.
- À  $t \in [uT, T]$  : La diode  $D$  est amorcée la tension aux bornes de l'inductance  $L$  vaut  $V_i - V_s$ . Nous avons  $V_s > V_i$ , par conséquent, la tension  $V_L$  est négative ce qui correspond à la décroissance du courant dans l'inductance. [44]

Pendant la phase où  $V_L$  est positive, on peut écrire :

$$V_L = V_i = L \frac{\Delta I_L}{\alpha T} \quad (\text{II— 13})$$

Où  $\Delta I_L$  est l'amplitude des ondulations du courant  $I_L$ .  $I_L$  vient donc :

$$\Delta I_L = \frac{V_i}{Lf} \alpha \quad (\text{II— 14})$$

Par définition de la valeur moyenne :

$$V_L = \int_0^T V_L(t) dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{DT_s} V_i dt + \int_{DT_s}^{T_s} (V_i - V_s) dt \right] \quad (\text{II— 15})$$

Comme la tension moyenne aux bornes d'une inductance est nulle, on peut écrire :

$$V_L = DV_i + (1 - D)(V_i - V_s) = 0 \quad (\text{II— 16})$$

Finalement, on obtient la relation suivante :

$$V_s = \frac{V_i}{1 - D} \quad (\text{II— 17})$$

Le rapport cyclique  $\alpha$  est compris entre 0 et 1 donc la tension de sortie  $V_s$  est nécessairement supérieure à la tension d'entrée  $V_i$ .

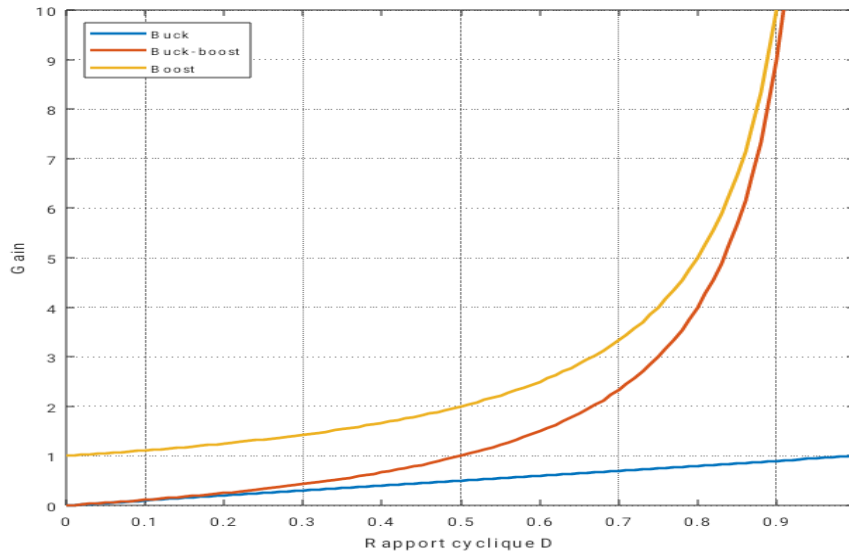
Si on néglige les pertes de commutation des interrupteurs, on peut écrire :

$$i_s = (1 - D)i_i \quad (\text{II— 18})$$

Cette expression montre que le hacheur boost est abaisseur en courant.

#### II.6.2.4 Analyse et choix du convertisseur :

Un panneau solaire photovoltaïque est un dispositif de production d'énergie continue basse tension. Il est préférable de placer un dispositif élévateur entre la source et la charge comme étage d'adaptation d'impédance. Tous les convertisseurs mentionnés ci-dessus, à l'exception du Buck, peuvent agir comme un booster. De plus, les structures Buck-boost et boost peuvent atteindre plus de la moitié du cycle de service. Si l'on regarde la complexité de la structure, Boost est le plus simple. Les contraintes de tension et de courant sur le commutateur et la diode sont presque similaires pour différentes topologies boost.



**Figure II—14** : Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique[45]

Le tableau suivant représente une comparaison entre les différentes topologies des convertisseurs DC/DC basse tension non isolé

Structures	Complexité	Taille	Ondulation de courant	Gain en Tension
BOOST	Basse	Moyenne	Elevée	Bas
BUCK BOOST	Basse	Moyenne	Elevée	Bas
BUCK	Moyenne	Moyenne	Elevée	Haut
IBC	Moyenne	Moyenne	Bas	Bas

**Tableau II—2** : Comparaison entre les structures DC/DC basse tension non-isolé.[46]

### II.6.2.5 Avantage de convertisseur BOOST :

Bien que les convertisseurs abaisseurs soient très efficaces dans les systèmes utilisant des alimentations électriques conventionnelles, les convertisseurs élévateurs peuvent être plus adaptés aux systèmes photovoltaïques avec des suiveurs de point de puissance maximale (MPPT), puisque le convertisseur fonctionne en mode CC, tirant autant d'énergie que possible de

La cellule solaire possible. Par conséquent, le rendement énergétique d'un convertisseur élévateur peut être supérieure à celle d'un convertisseur Buck. Les convertisseurs Boost sont généralement utilisés



pour obtenir des tensions de sortie plus élevées, tandis que les convertisseurs Buck sont utilisés pour abaisser la tension de sortie [45].

## II.7 Commande MPPT :

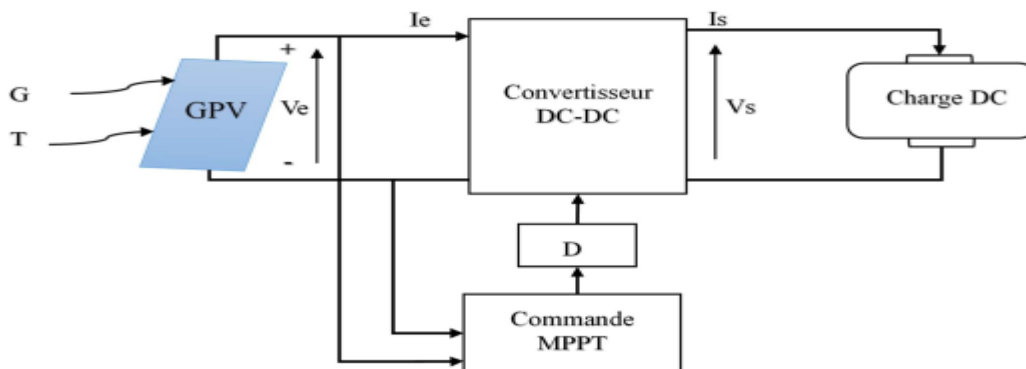
Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir une puissance maximale du panneau solaire, un Maximum Power Point Tracker (MPPT : Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour le contrôle de hacheur. C'est le composant électronique de niveau régulateur qui extrait le maximum d'énergie des installations solaires photovoltaïques.

Les régulateurs MPPT permettent d'optimiser jusqu'à 30 % le rendement des panneaux solaires : pour un panneau photovoltaïque donné, la batterie recevra 30 % d'électricité en plus qu'un régulateur solaire classique [24].

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'électricité afin d'obtenir une puissance maximale des panneaux.

Le serveur MPPT est utilisé pour le contrôle de hacheur. Cette technologie a été développée depuis 1968 et joue un rôle majeur dans la fonctionnalité des panneaux.

Le principe de la commande est de faire varier automatiquement le rapport cyclique  $D$  jusqu'à obtenir une valeur optimale pour maximiser la puissance du panneau, ainsi la commande du convertisseur positionnera le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ) quel que soit les conditions météorologiques  $T$  et  $G$  [24].



**Figure II—15** : Schéma synoptique d'un système PV utilisant la commande MPPT

Bien que les systèmes photovoltaïques soient largement utilisés, leur faible rendement est un gros inconvénient. Par conséquent, des contrôleurs de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont

nécessaires pour améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Diverses méthodes MPPT sont constamment développées et affinées.

Ces méthodes incluent la perturbation et l'observation (P&O) [38,39-40], la conductance incrémentale (IC) [41-42], l'escalade (Hill Climbing HC) [43-44], les réseaux de neurones [47], les méthodes de logique floue [45-46], mode glissant [47-48], backstepping [58], hybride mode glissant-backstepping [47-50] et algorithme génétique [51-52]. De nombreux aspects sont nécessaires, allant du capteur, de la complexité, du coût, de l'efficacité, des oscillations autour des PPM, de la vitesse de convergence, du suivi correct pendant l'irradiation et/ou des changements de température et de la mise en œuvre du matériel.

Plusieurs méthodes ont été développées ces dernières années pour réaliser la commande MPPT. Ces méthodes sont classées en deux variantes : directes et indirectes.

### II.7.1 Méthodes indirectes (Méthodes Offline) :

Les méthodes indirectes sont basées sur la connaissance préalable des caractéristiques non linéaires des générateurs photovoltaïques, et leur précision n'est pas élevée. Ces méthodes nécessitent également de mesurer l'éclairement et la température du générateur photovoltaïque, puis de se référer à la courbe de puissance pour obtenir le courant (ou la tension) de fonctionnement optimal correspondant. Le courant (ou la tension) du générateur mesuré est ensuite comparé à la valeur optimale stockée dans le système de contrôle dans les conditions atmosphériques mesurées. Le contrôle est alors appliqué pour atteindre la valeur optimale de puissance [62]. Ces méthodes comprennent :

- La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.
- La méthode de court-circuit

#### II.7.1.1 La méthode de la tension de circuit ouvert :

Sous différents niveaux d'ensoleillement et de température, la tension d'un générateur photovoltaïque au point de puissance maximale  $V_{MPP}$  peut être considérée comme une fraction constante de sa tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  [10].

$$V_{mpp} \approx K_1 V_{oc} \quad (\text{II— 19})$$

Où  $K_1$  est un facteur de proportionnalité.

Étant donné que  $K_1$  est une fonction des paramètres du module PV utilisé, il doit généralement être recalculé en déterminant empiriquement  $V_{MPP}$  et  $V_{oc}$  pour le module PV spécifique. Sous différentes valeurs pour la lumière et la température. On trouve que la valeur de  $K_1$  est dans 0,71 et 0,92 [63].

Une fois  $K_1$  connue, la tension  $V_{MPP}$  peut être calculée à l'aide de l'équation (II-19) et  $V_{oc}$  est mesuré périodiquement en déconnectant le convertisseur DC-DC pendant une fraction de seconde [63].

Par conséquent, cette méthode présente le problème de l'imprécision, mais a l'avantage d'être simple et bon marché.

### II.7.1.2 La méthode de court-circuit :

Cette méthode est similaire à la méthode précédente ; mais elle fonctionne avec le courant au lieu de la tension. Dans ce cas, le courant optimal  $I_{MPP}$  du générateur PV est un pourcentage fixe du courant de court-circuit  $I_{sc}$  [64]

$$I_{mpp} \approx K_2 I_{sc} \quad (\text{II— 20})$$

Où  $k_2$  est une constante de proportionnalité qui varie entre 0,78 et 0,92[65].

La mesure du courant  $I_{sc}$  en fonctionnement pose des problèmes. Un interrupteur puissance supplémentaire doit généralement être ajoutée au convertisseur de puissance pour court-circuiter le générateur PV est utilisé périodiquement afin que  $I_{sc}$  puisse être mesuré à l'aide d'un capteur de courant [65]. Cela augmente le nombre et le coût des pièces.

### II.7.2 Méthodes directes (méthodes Online) :

La méthode directe est un algorithme itératif de recherche de la valeur optimale de la tension  $V_{pv}$  du GPV pour que celui-ci puisse délivrer sa puissance maximale. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas de connaissance préalable des caractéristiques du panneau PV. Il existe de nombreux algorithmes MPPT dans la littérature, tels que : Perturbation est Observation (P&O), Inductance Incremental Method (Inc-Cond) ... etc.

## II.8 Les Algorithmes MPPT :

Dans cette partie, on présentera l'aspect théorique de quelques méthodes (classiques et modernes) du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque et qui sont :

- Méthode de perturbation et observation (P&O).
- Méthode de conductance Incrementale (IC)
- Méthode de logique floue (FL).

### II.8.1 La technique Perturbation & Observation (P&O) :

L'algorithme perturbe est observé (P&O) est l'algorithme le plus largement utilisé dans la littérature, notamment en pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Le principe de la

technique consiste à perturber (diminuer ou augmenter) la tension  $V_{pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et à analyser le comportement de la variation de puissance résultante  $P_{pv}$ . La Figure (II-16) montre que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente ( $dP/dV > 0$ ), alors il est clair que la perturbation a déplacé le point de fonctionnement vers le MPP. L'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance est réduite de ( $dP/dV < 0$ ), alors la perturbation s'est éloignée du point de fonctionnement du MPP. L'algorithme inversera la direction de la perturbation suivante [66].

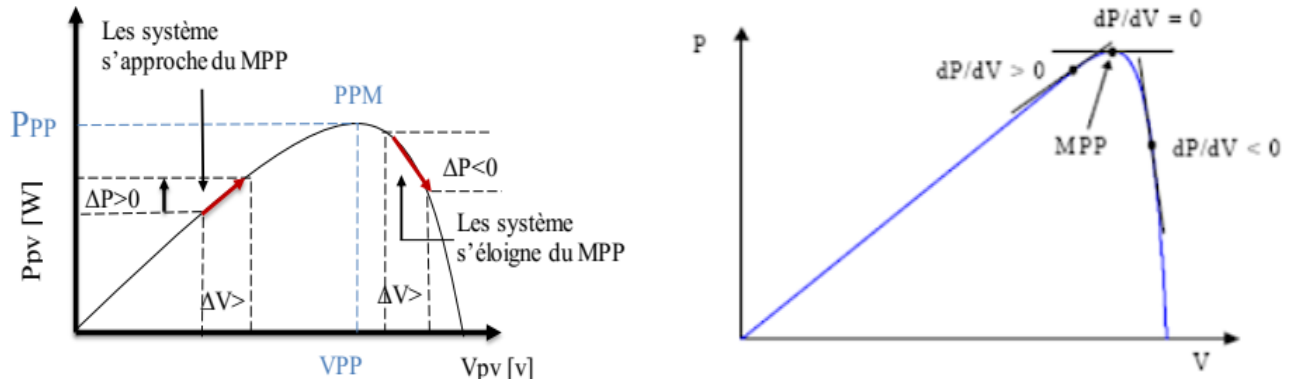


Figure II—16 : Recherche du PPM par la méthode (P&O).

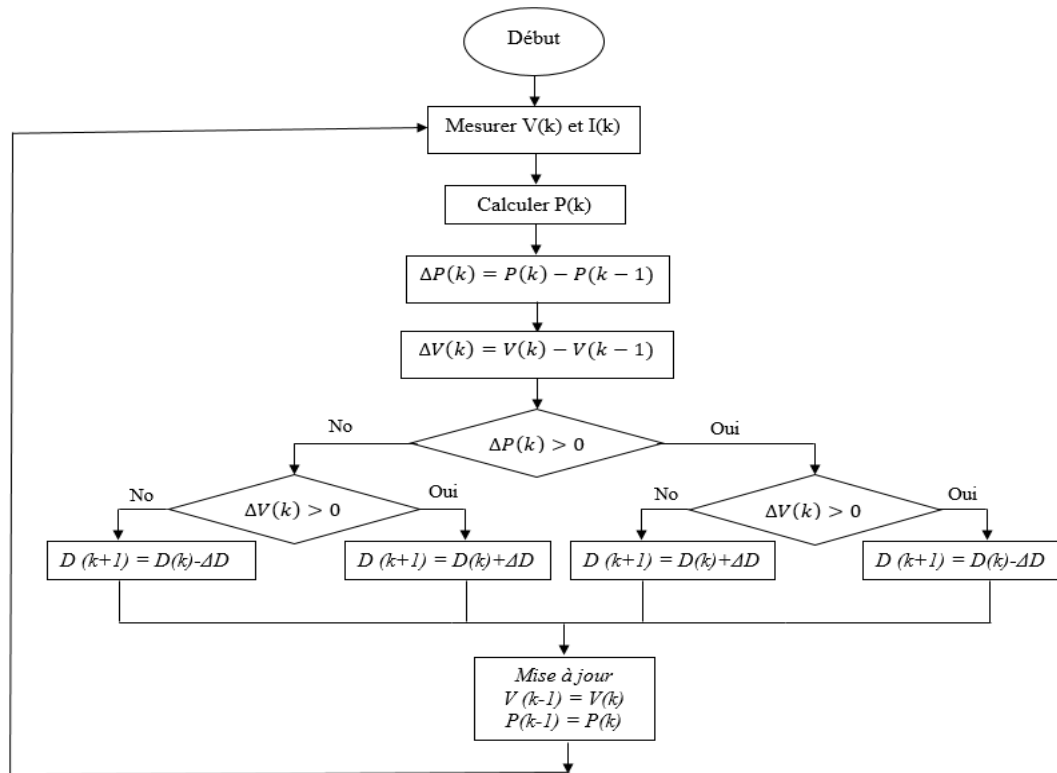


Figure II—17 : L'algorithme de P&O classique

### II.8.1.1 Avantage de la méthode P&O :

- En ce qui concerne la méthode P&O, les avantages qui peuvent être mentionnés incluent une structure de régulation simple et un nombre réduit de paramètres de mesure.
- Les rendements MPPT donne une conductance incrémentielle et les algorithmes P&O sont essentiellement les mêmes [67].
- Structure réglementaire simple [68].
- Réduisez le nombre de paramètres mesurés

### II.8.1.2 Inconvénients de la méthode P&O :

L'algorithme P&O possède les deux inconvénients suivants :

- Lors de changements soudains d'éclairement, l'algorithme s'écarte temporairement de PPM et peut perdre définitivement le contrôle.
- Les oscillations autour de PPM sont un autre inconvénient de l'algorithme P&O. La minimisation du pas incrémental ( $\Delta V$ ) peut être une solution pour réduire ces oscillations. Mais cette solution ralentit la poursuite de PPM. Par conséquent, un compromis doit être fait entre la précision et la rapidité.

### II.8.2 Méthode d'incrémentation de conductance (IncCond) :

La méthode de conductance incrémentale a été introduite pour surmonter les inconvénients de la méthode P&O (changements brusques des conditions climatiques). Le principe est basé sur l'annulation de la dérivée de la puissance par rapport à la tension.

Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance GPV est nulle au MPP, positive à gauche du MPP et négative à droite du MPP, Figure (II-18).

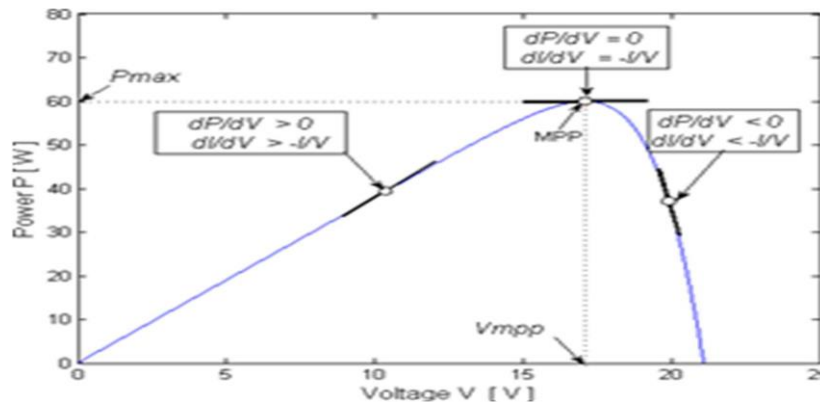


Figure II—18 : Principe de fonctionnement de l'algorithme IncCond

La caractéristique puissance-tension du GPV, permet de déduire les conditions suivantes :

- Si  $\frac{dP}{dV} > 0$ , le point de fonctionnement est à gauche de PPM.
- Si  $\frac{dP}{dV} = 0$ , le point de fonctionnement est sur la PPM.
- Si  $\frac{dP}{dV} < 0$ , le point de fonctionnement est à droite de PPM.

La puissance du GPV est donnée par :

$$P = V * I \quad (\text{II— 21})$$

Et sa dérivée partielle est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (\text{II— 22})$$

$$P_{PV} = P_{max} \Leftrightarrow I + V \frac{dI}{dV} = 0 \Leftrightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (\text{II— 23})$$

Donc, l'équation (II-24) peut être écrite comme suit :

- $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$ , alors le point de fonctionnement est sur la PPM.
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$ , alors le point de fonctionnement est à gauche de PPM
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$ , alors le point de fonctionnement est à droite de PPM.

La conductance et l'incrément de la conductance sont notées respectivement  $G$  et  $\Delta G$  et sont données par :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{II— 24})$$

$$\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{II— 25})$$

La PPM peut être atteint en comparant à chaque instant la valeur de  $G$  avec celle de  $\Delta G$ . Si  $\Delta G > -G$ , on diminue le rapport cyclique. Par contre, si  $\Delta G < -G$ , on augmente le rapport cyclique [69]. Ce processus est répété jusqu'à atteindre la PPM. La figure (II-19). Montre l'algorithme de cette méthode.

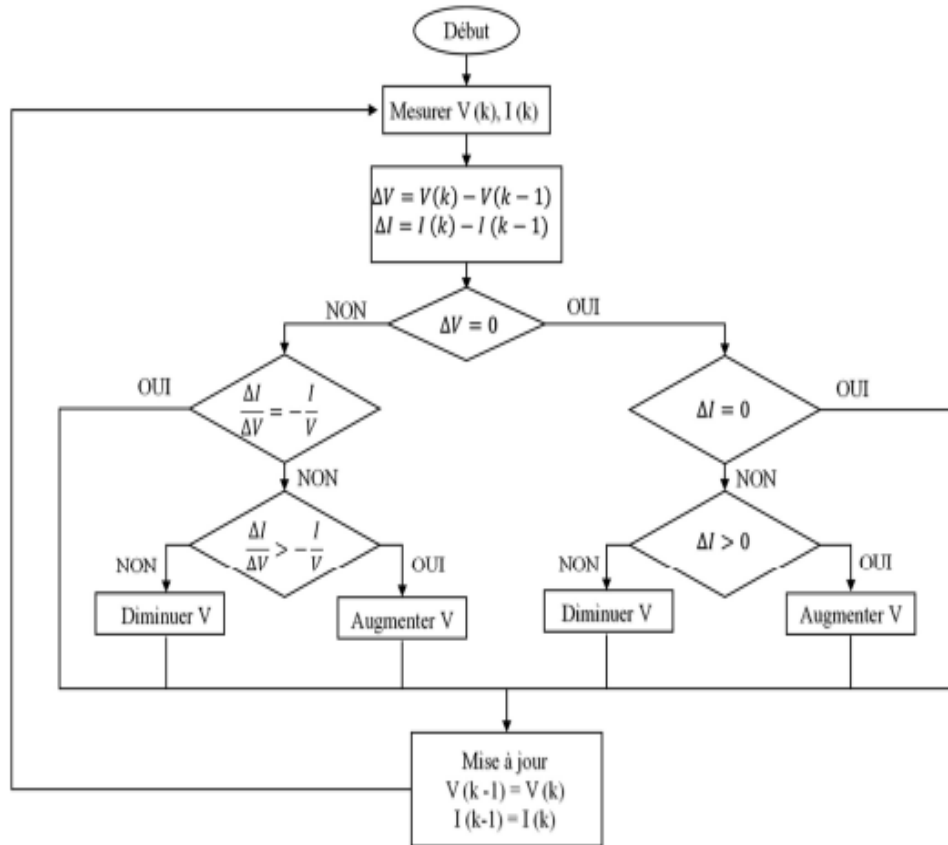


Figure II—19 : Organigramme de l'algorithme IncCond

### II.8.2.1 Inconvénients de la méthode IncCond :

Cet algorithme est difficile à mettre en œuvre en raison de la complexité du circuit Commande. De plus, le calcul en temps réel des dérivées nécessite des processeurs de calcul rapides. Comme la méthode P&O, cette technique présente en fait des oscillations autour de PPM, car il est difficile de satisfaire la condition  $dP_{PV}/dV_{PV} = 0$ , ce qui oblige le système à la rechercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que l'algorithme P&O, ce qui entraîne un temps d'exécution plus long.

## II.9 Résultats de simulation de la commande MPPT-P&O :

Le système photovoltaïque est composé de panneaux photovoltaïques de 200 W. Diverses simulations ont été exécutées sur MATLAB SIMULINK pour évaluer les performances du contrôleur.

Paramètres	Valeurs
Inductance L	$2e^{-2} H$
Capacité C <sub>pv</sub>	$5e^{-3} F$
Capacité C <sub>dc</sub>	$2e^{-4} F$

Tableau II—3 : Paramètres de hacheur boost.

La figure (II-20) représente le schéma bloc du système photovoltaïque étudié.

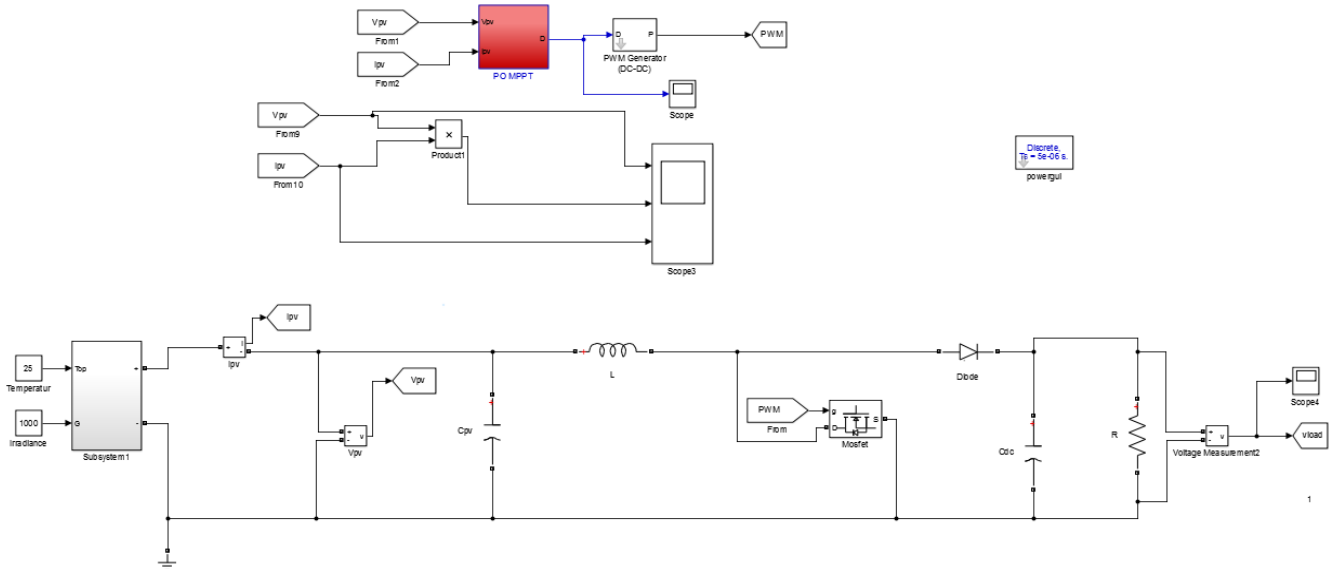


Figure II—20 : Schéma bloc du système photovoltaïque dans SIMULINK/MATLAB

La Figure II-21 Résultats de simulation de la commande MPPT-P&O.

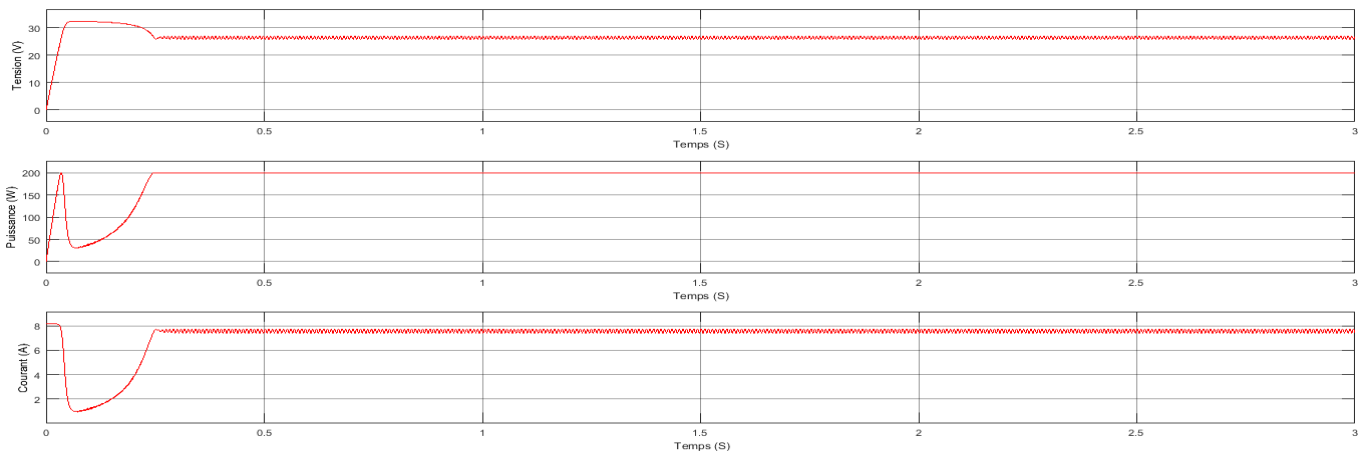


Figure II—21 : Résultats de simulation de la commande MPPT-P&O



### II.9.1 L'influence de de MPPT sous des conditions variables :

Pour évaluer les performances de la commande MPPT-P&O sous différentes conditions environnementales, on effectue le test suivant : Ensoleillement variable et température constante. Afin de montrer du soleil G sur la puissance, nous maintenons la température à une valeur constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) et la quantité de lumière solaire change rapidement. Cette la Figure (II-22) montre la section traversa de la lumière solaire pris en compte. Il faut noter que d'une durée de 3 secondes, la courbe comprendre des changements rapidement entre  $500\text{ W/m}^2$  et  $1000\text{ W/m}^2$  afin de tester l'algorithme MPPT de type P&O.

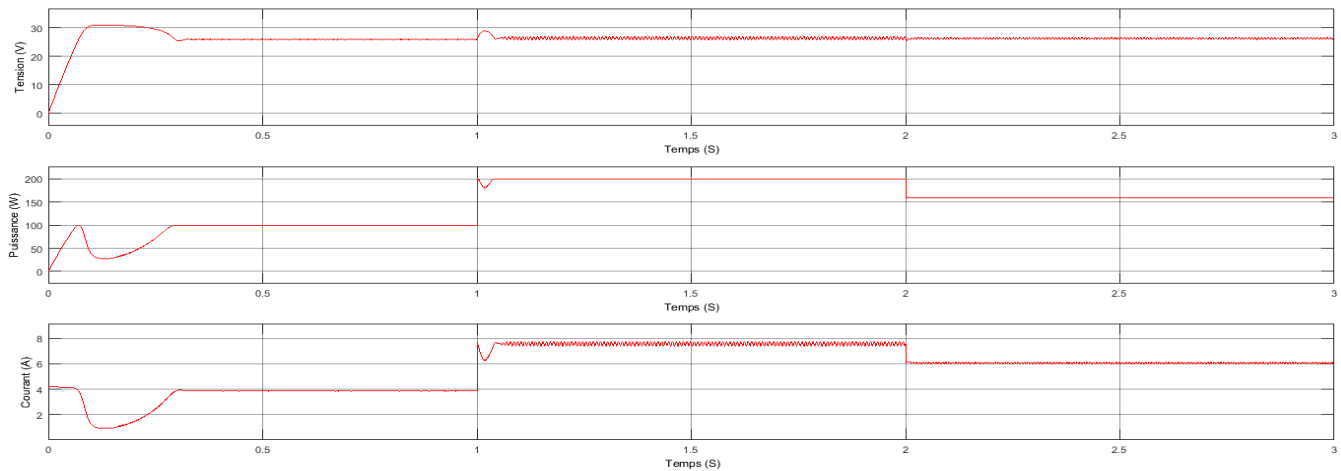


Figure II—22 : Influence de l'éclairement du GPV

On suppose une augmentation de la température de  $25^{\circ}\text{C}$  à  $45^{\circ}\text{C}$  à instant  $t = 3\text{ s}$ , les résultats de simulation sont représentés sur la figure (II-23).

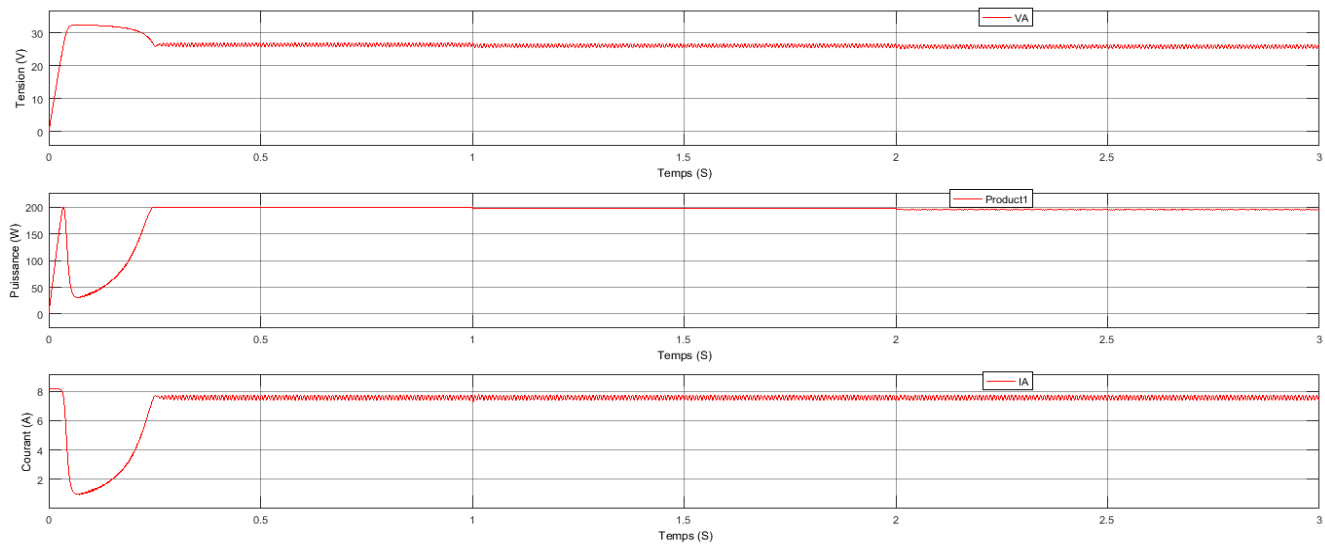


Figure II—23 : Influence de la température du GPV

## II.10 Conclusion :

Le fonctionnement du générateur photovoltaïque à un rendement optimal nécessite l'insertion de convertisseurs statiques (généralement un convertisseur DC-DC) entre le générateur et la charge. Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale (MPP), des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs minimisent l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques.

Dans ce chapitre, nous présentons certains types de convertisseurs DC-DC, une impulsion largement utilisée dans les systèmes PV est introduite pour faire correspondre la source avec la charge, puis nous introduisons l'algorithme classique pour trouver le point à la puissance maximale PPM "Perturbation & Observation ".

Enfin, nous avons simulé le système PV pour évaluer les performances de la commande MPPT-P&O sous différentes conditions environnementales.

## Chapitre III : **Commande MPPT par backstepping**

### **III.1 Introduction :**

La stratégie de backstepping appartient à la conception de contrôle récursif. Son nom vient de la nature récursive de la conception du contrôleur, où le processus de conception commence par une équation scalaire interne qui revient à l'entrée de contrôle externe après avoir traversé une chaîne (ou une séquence d'intégrateurs). Son application est basée sur la conception récursive de contrôleurs non linéaires en sélectionnant certaines variables d'état du système en tant que contrôleurs virtuels, puis en concevant des lois de commande intermédiaires pour ces contrôleurs virtuels sélectionnés. Ses propriétés intéressantes sont une réponse dynamique rapide, le rejet des perturbations externes, la robustesse aux incertitudes des paramètres du système et la dynamique du système modélisé et non modélisé. Il a la capacité de neutraliser tous les effets déstabilisants qui surviennent à travers le domaine.[70]

Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation et la simulation de la commande backstepping d'un système photovoltaïque, ensuite, nous comparons entre les résultats obtenus par cette commande et par la commande P&O.

### **III.2 Historique et principe de la commande backstepping :**

Le backstepping a été développé par Kanellakopoulos et al., inspiré par Feurer et Morse d'une part, Tsiniias et Kokotovic et Sussmann d'autre part. Il fournit une approche systématique de la conception de contrôleurs pour les systèmes non linéaires.[71]

L'idée est de calculer une loi de contrôle qui garantit qu'une certaine fonction de Lyapunov est définie positive et que sa dérivée est toujours négative. La méthode consiste à partitionner le système en un ensemble de sous-systèmes imbriqués dans l'ordre décroissant. Le calcul de la fonction de Lyapunov est alors effectué de manière récursive depuis l'intérieur de la boucle.

A chaque étape, l'ordre du système est augmenté et les parties instables de l'étape précédente sont traitées. Trouvez la loi de commande dans la dernière étape. Cela garantit que le système de compensation maintient la stabilité globale à tout moment pendant qu'il suit et s'ajuste.

Contrairement à la plupart des autres méthodes, l'inversion n'a aucune restriction sur le type de non-linéarité. Cependant, le système doit se présenter sous une forme dite purement paramétrique. De plus, l'inversion permet de garder la non-linéarité utile[71].

### **III.3 Technique du backstepping :**

Concevoir des contrôleurs pour des systèmes non linéaires de grande dimension avec des vecteurs d'état est généralement une tâche difficile, voire impossible. Le technique backstepping fournissent une approche systématique pour répondre à ces questions. Il combine le concept des fonctions de

contrôle de Lyapunov avec des programmes de conception récursifs. Cela surmonte la barrière de dimensionnalité et exploite la flexibilité de conception dans le cas scalaire pour résoudre les problèmes de contrôle des systèmes d'ordre supérieur, aidant à préserver les valeurs finies du vecteur d'état. Bien que la technologie backstepping ait une histoire courte, rien ne l'empêche de trouver de nombreuses applications pratiques dans la littérature. Grâce aux travaux de KOKOTOVIC, l'utilisation de cette technique fournit un cadre mathématique pour la conception de lois de commande pour des systèmes linéaires de noms différents.[72]

### III.4 Méthodes de Lyapunov :

Le contrôle des systèmes non linéaires repose sur deux approches possibles. La première méthode vise à linéariser le système à contrôler, et la deuxième méthode consiste à trouver une fonction de contrôle de Lyapunov qui garantit certaines propriétés du système en boucle fermée.[73]

#### III.4.1 Première méthode de Lyapunov :

Le but de cette méthode est d'étudier la stabilité locale, mais elle ne fournit pas d'informations sur la stabilité globale.

#### III.4.2 Deuxième méthode de Lyapunov :

Le but de cette méthode est de concevoir l'énergie dans le système. Le principe de la méthode est d'analyser la stabilité du système.

### III.5 Synthèse de la commande par backstepping :

Appliquer les lois fondamentales régissant le fonctionnement des convertisseurs boost ; arriver au modèle de moyennage. La Figure (III-1) Schéma représentant le convertisseur.

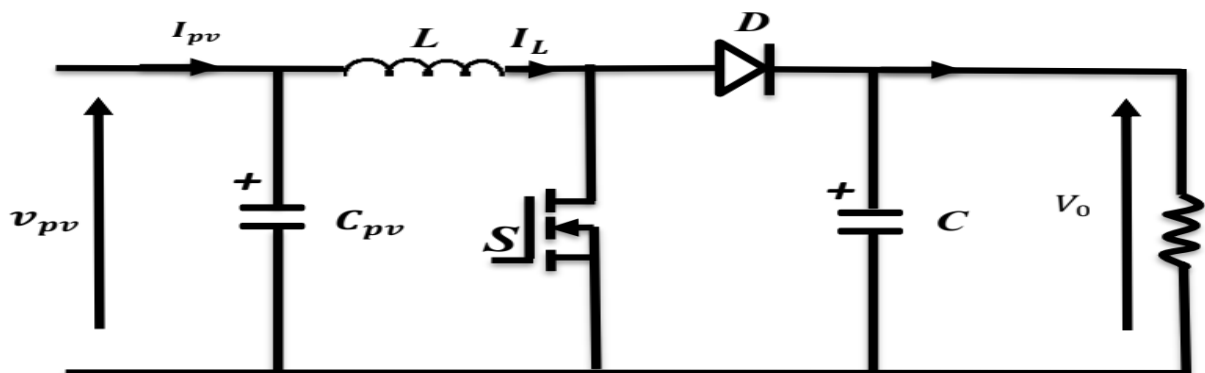


Figure III—1 : Convertisseur Boost DC-DC.

L'équation dynamique de ce convertisseur peut être exprimée comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{C_{pv}} i_{pv} - \frac{1}{C_{pv}} x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{L} x_1 - \frac{1}{L} (1-a)V_0 \end{cases} \quad (\text{III— 1})$$

Ou  $X = [X_1 X_2]^T = [V_{pv} I_L]^T$ , et  $a \in [0 ; 1]$  est un signal de commutation et M la valeur moyenne de  $(1-a)$

### Etape 1 :

On va définir les erreurs de régulation par :

$$e_1 = x_1 - V_{ref} \quad (\text{III— 2})$$

Sa dérivée est :

$$\dot{e}_1 = (\dot{x}_1 - \dot{V}_{ref}) = \frac{1}{C_{pv}} (i_{pv} - x_2) - \dot{V}_{ref} \quad (\text{III— 3})$$

La fonction de Lyapunov étendue est :

$$V_1(e_1) = V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (\text{III— 4})$$

Dont la dérivée est :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 \left( \frac{1}{C_{pv}} (i_{pv} - x_2) - \dot{V}_{ref} \right) \quad (\text{III— 5})$$

Le choix judicieux de  $\dot{e}_1 = -k_1 e_1$  permet l'écriture  $\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2$  où  $k_1$  est une constante positive qui représente un paramètre de conception du contrôleur d'arrière-plan. Pour  $x_2 = x_{ref}$ , nous pouvons trouver la fonction de stabilisation.

$$x_{ref} = k_1 c_{pv} e_1 + i_{pv} - c_{pv} \dot{V}_{ref} \quad (\text{III— 6})$$

### Etape 2 :

La deuxième variable d'erreur qui représente la différence entre la variable d'état  $x_2$  et sa valeur désirée  $x_{ref}$  est définie par :

$$e_2 = x_2 - x_{ref} \quad (\text{III— 7})$$

On déduit alors les équations du système dans l'espace d'erreurs ( $\dot{e}_2$ ) :

$$x_{ref} = k_1 c_{pv} \dot{e}_1 + \dot{v}_{pv} - c_{pv} V_{ref}'' \quad (\text{III— 8})$$

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_{ref} = \frac{1}{L}(x_1 - (1-a)V_0) - k_1 c_{pv} \dot{e}_1 - \dot{v}_{pv} + c_{pv} V_{ref}'' \quad (\text{III— 9})$$

Avec :

$$M = (1-a) \quad (\text{III— 10})$$

La nouvelle fonction de Lyapunov :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (\text{III— 11})$$

Le dérivé peut être exprimé par :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 \quad (\text{III— 12})$$

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 + e_2 \left( \frac{1}{L}(x_1 - MV_0) - k_1 c_{pv} \dot{e}_1 - \dot{v}_{pv} + c_{pv} V_{ref}'' \right) \quad (\text{III— 13})$$

Dans cette étape, la commande M est choisie de manière à obtenir l'expression suivante :

$$\dot{e}_2 = -k_2 e_2 = \frac{1}{L}(x_1 - MV_0) - k_1 c_{pv} \dot{e}_1 - \dot{v}_{pv} + c_{pv} V_{ref}'' \quad (\text{III— 14})$$

D'où l'expression de la commande M à produire par le contrôleur de backstepping :

$$M = \frac{L}{V_0} \left[ \frac{x_1}{L} - \frac{e_1}{c_{pv}} + k_2 e_2 - k_1 c_{pv} \dot{e}_1 - \dot{v}_{pv} + c_{pv} V_{ref}'' \right] \quad (\text{III— 15})$$

Avec  $K_2 > 0$ , on obtient un dérivé négatif de la fonction de Lyapunov :

$$\dot{V}_2 = k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \leq 0 \quad (\text{III— 16})$$

Ce qui assure la convergence des variables d'erreur ( $e_1$ ,  $e_2$ ) asymptotiquement à l'origine, ce qui implique que  $x_1$  converge asymptotiquement à l'origine  $V_{ref}$ , extrayant ainsi la puissance maximale du générateur photovoltaïque est effectuée.[72]

### III.6 Contrôle backstepping avec intégral :

#### Etape 3 :

L'action intégrale est introduite dans l'erreur de suivi qui devient :

$$e_3 = \varepsilon_1 + \gamma_1 \quad (\text{III— 17})$$

Avec :

$$\varepsilon_1 = e_1 = x_1 - V_{ref} \text{ Et } \gamma_1 = \int_0^t (x_1 - V_{ref}) dt \quad (\text{III— 18})$$

La dérivée  $\varepsilon_1$  s'écrit comme suit :

$$\dot{\varepsilon}_1 = (\dot{x}_1 - \dot{V}_{ref}) = \frac{1}{C_{pv}} (i_{pv} - x_2) - \dot{V}_{ref} \quad (\text{III— 19})$$

La fonction de Lyapunov étendue est :

$$V_3(\varepsilon_1, \gamma_1) = V_3 = \frac{1}{2} \varepsilon_1^2 + \frac{1}{2} \gamma_1^2 \quad (\text{III— 20})$$

Dont la dérivée  $V_3$  est :

$$\dot{V}_3 = \varepsilon_1 \dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_1 \left( \gamma_1 + \frac{1}{C_{pv}} (i_{pv} - x_2) - \dot{V}_{ref} \right) \quad (\text{III— 21})$$

Le choix judicieux de  $\dot{\varepsilon}_1 = -k_3 \varepsilon_1$  permet l'écriture  $\dot{V}_3 = -k_3 \varepsilon_1^2$  où  $k_3$  est une constante positive qui représente un paramètre de conception du contrôleur d'arrière-plan. Pour  $x_2 = x_{ref\_2}$ , nous pouvons trouver la fonction de stabilisation.

$$x_{ref\_2} = i_{pv} + k_3 C_{pv} \varepsilon_1 + C_{pv} \gamma_1 - C_{pv} \dot{V}_{ref} \quad (\text{III— 22})$$

#### Etape 4 :

La deuxième variable d'erreur qui représente la différence entre la variable d'état  $x_2$  et sa valeur désirée  $x_{ref\_2}$  est définie par :

$$\varepsilon_2 = x_2 - x_{ref\_2} \quad (\text{III— 23})$$

On déduit alors les équations du système dans l'espace d'erreurs ( $\varepsilon_2$ ) :

$$x_{ref} = i_{pv} + k_3 C_{pv} \varepsilon_1 + C_{pv} \dot{\gamma}_1 - C_{pv} \ddot{V}_{ref} \quad (\text{III— 24})$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_{ref} = \frac{1}{L} (x_1 - MV_0) - i_{pv} - k_3 C_{pv} \dot{\varepsilon}_1 - C_{pv} \dot{\gamma}_1 + C_{pv} \ddot{V}_{ref} \quad (\text{III— 25})$$

Remplace  $x_2 = \varepsilon_2 + x_{ref\_2}$  dans (III – 23)  $\dot{\varepsilon}_1$  devient :

$$\dot{\varepsilon}_1 = (\dot{x}_1 - \dot{V}_{ref}) = \frac{1}{C_{pv}} (i_{pv} - \varepsilon_2 - x_{ref\_2}) - \dot{V}_{ref} \quad (\text{III— 26})$$

En utilisant (III–22), les dérivées temporelles de  $\varepsilon_1$  et  $V_3$  deviennent :

$$\dot{\varepsilon}_1 = -\frac{1}{C_{pv}} \varepsilon_2 - k_3 \varepsilon_1 - \dot{\gamma} \quad (\text{III— 27})$$



$$\dot{V}_3 = -k_3 \varepsilon_1^2 - \frac{1}{C_{pv}} \varepsilon_1 \varepsilon_2 \quad (\text{III— 28})$$

La nouvelle fonction de Lyapunov :

$$V_4 = (\gamma, \varepsilon_1, \varepsilon_2) = V_4 = V_3 + \frac{1}{2} \varepsilon_2^2 \quad (\text{III— 29})$$

Le dérivé peut être exprimé par :

$$\dot{V}_4 = -k_3 \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2 \left[ -\frac{1}{C_{pv}} \varepsilon_1 + \frac{1}{L} (x_1 - MV_0) - \dot{v}_{pv} - k_3 c_{pv} \dot{\varepsilon}_1 - c_{pv} \dot{\gamma}_1 + c_{pv} \ddot{V}_{ref} \right] \quad (\text{III— 30})$$

La loi de commande, qui garantit que la dynamique de la fonction de Lyapunov est négative, est donnée par :

$$M = (1 - a)$$

$$a = \frac{L}{V_0} \left[ -k_4 \varepsilon_2 + \frac{1}{C_{pv}} \varepsilon_1 - \frac{1}{L} (x_1 - V_0) + \dot{v}_{pv} + k_3 c_{pv} \dot{\varepsilon}_1 + c_{pv} \dot{\gamma}_1 - c_{pv} \ddot{V}_{ref} \right] \quad (\text{III— 31})$$

Avec  $k_4 > 0$ , on obtient un dérivé négatif de la fonction de Lyapunov. Ce qui assure la convergence des variables d'erreur  $(\gamma, \varepsilon_1, \varepsilon_2)$  asymptotiquement à l'origine, ce qui implique que  $x_1$  converge asymptotiquement à l'origine  $V_{ref}$ , extrayant ainsi la puissance maximale du générateur photovoltaïque est effectuée.[74]

La tension de référence est calculé par :[74][72]

$$V_{ref} = S_e \left( \frac{N_s n K T}{q} \log \frac{I_{ph} - I_{ref} + I_0}{I_0} \right) \quad (\text{III— 32})$$

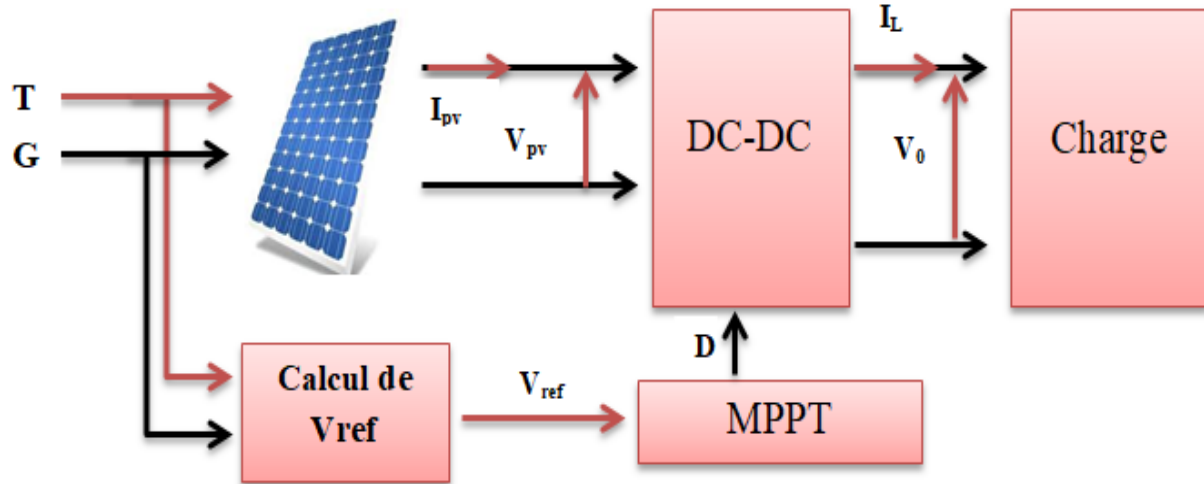
Avec  $S_e$  est les nombres des modules en série.

Où :  $I_{ref} = 0,909 I_{ph}$ .

### III.7 Simulation d'un système photovoltaïque :

Pour appliquer les techniques précédentes, le schéma de la Figure (III-2) représente un système composé d'un panneau photovoltaïque, d'un bloc de contrôle MPPT et d'un convertisseur DC-DC typique (boost). Les performances du module PV (puissance, courant, tension) sont optimisées par un circuit de contrôle basé sur les données du module PV.

La tension de référence est calculée en utilisant l'équation (III-32).



**Figure III—2** : Structure globale du système photovoltaïque avec la commande MPPT.[72]

Les paramètres utilisés sont indiqués dans le Tableau (III-1). On suppose que les interrupteurs utilisés sont sans défaut.

Une étude comparative entre les différentes méthodes décrites ci-dessus a été développée. Par conséquent, nous étudions les performances de cette dernière technique dans des conditions météorologiques stables et fluctuantes.

Techniques	Paramètres	Valeurs
Backstepping	$K_1$	200
	$K_2$	200
Backstepping avec integrale	$K_3$	200
	$K_4$	200

**Tableau III—1** : Paramètres des MPPT méthodes

### III.7.1 Fonctionnement de MPPT sous des conditions constantes :

Dans ce test, la température et l'éclairement sont maintenus constants. On prend la température  $T=25^\circ\text{C}$  et l'ensoleillement  $1000\text{W/m}^2$ .

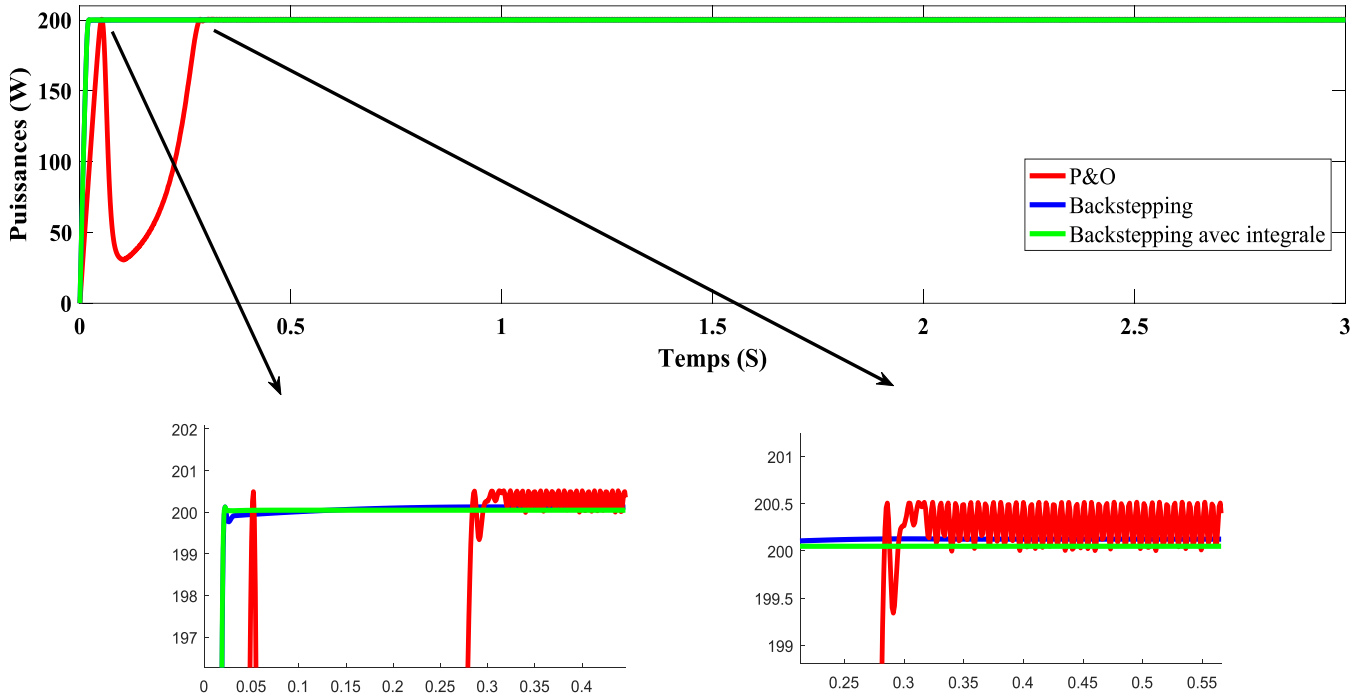


Figure III—3 : Allures des puissances sous conditions constantes

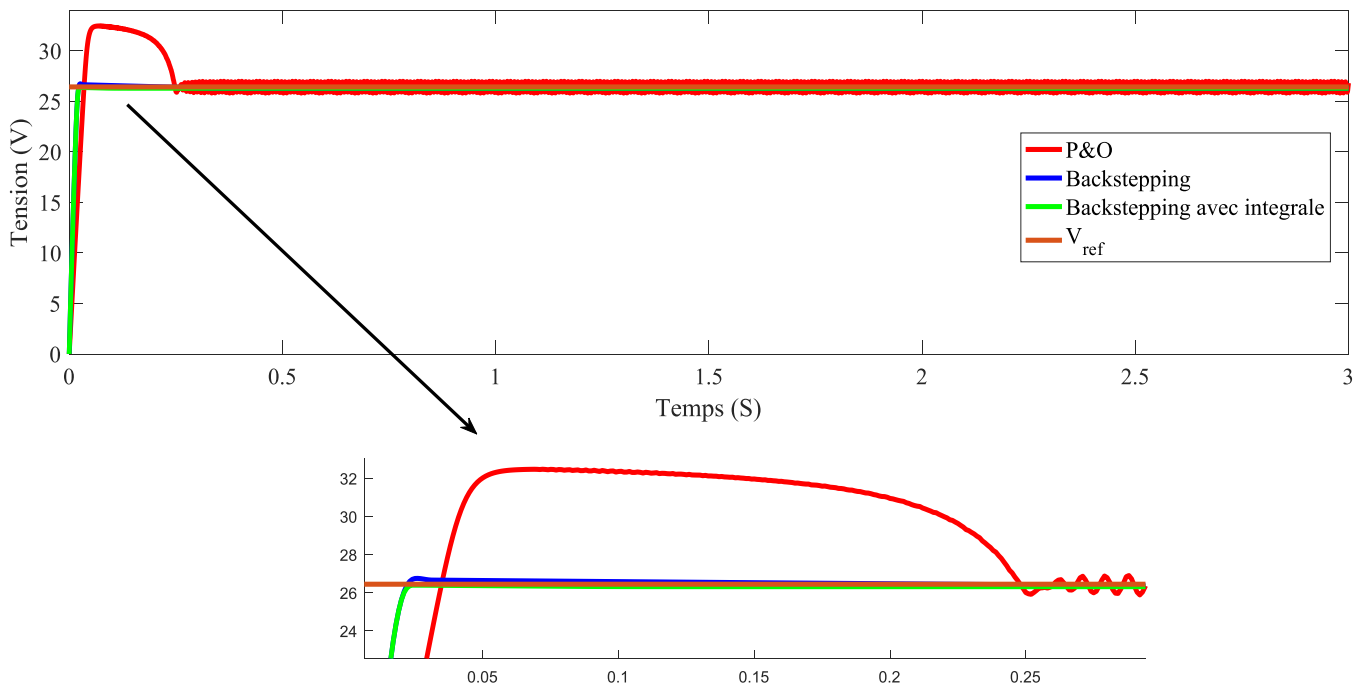
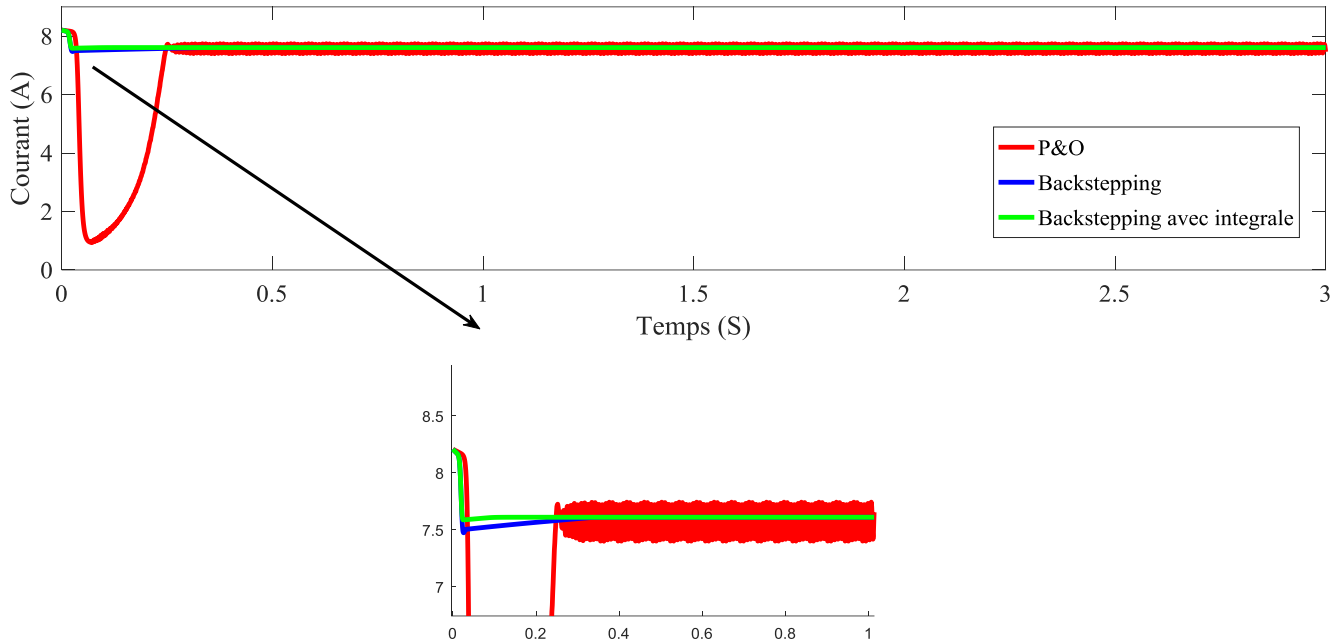


Figure III—4 : allures des tensions sous conditions constantes



**Figure III—5** : allures des courants sous conditions constantes

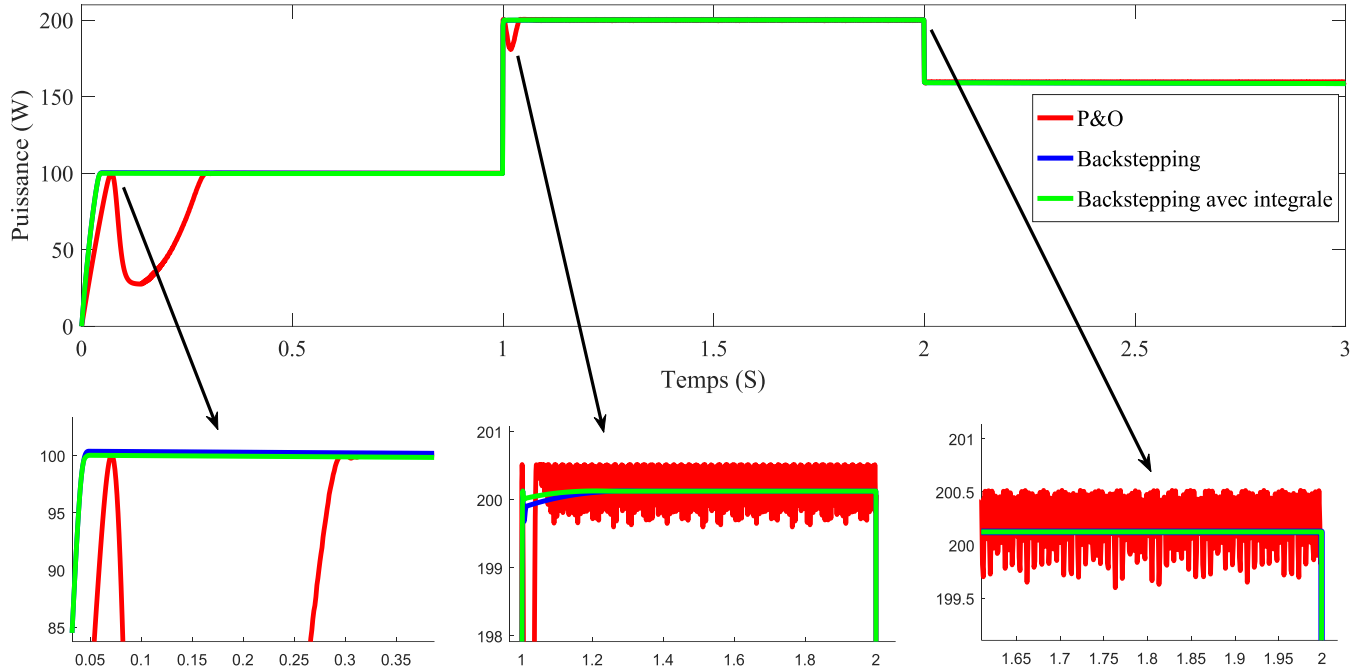
La figure (III-3) montre clairement que les trois méthodes (P&O, backstepping et backstepping avec intégrale) garantissent le point de puissance maximale. Backstep et backstep avec technologie intégrée pour assurer le point le plus haut avec moins de vibrations par rapport P&O.

Comme le montre la figure (III-4), l'équation (III-32) fournit la tension de référence avec précision, et les trois méthodes suivent avec précision la tension de référence, mais la méthode du Backstepping avec intégrale se compare favorablement à la puissance élevée pour suivre la référence (moins d'oscillation et moins d'erreur). À d'autres méthodes.

La figure (III-5) représente une technologie backstepping avec intégrale pour assurer la réduction des vibrations (moins d'oscillation et moins d'erreur) par rapport à d'autres méthodes.

### III.7.2 Fonctionnement de MPPT sous des conditions variables :

Pour explorer le comportement du système face aux changements de l'éclairement, nous procédons comme suit : Comme vous pouvez le voir sur la figure (III-6), je l'ai testé et il a changé très rapidement. Lumière du soleil ( $500\text{W/m}^2$  -  $800\text{W/m}^2$  -  $1000\text{W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ )



**Figure III—6** : allures des puissances sous conditions variable

À partir de la Figure (III-6), nous pouvons voir que le dépassement de la puissance de sortie, la sonnerie et les temps de réponse des trois méthodes MPPT sont indiqués dans le Tableau (III-2), et observer l'amélioration significative obtenue avec les méthodes MPPT hybride proposé. Une comparaison des performances MPPT est présentée dans le tableau.

Dans le but de comparer chaque algorithme selon son application et de l'adapter en conséquence, il est nécessaire de fournir des indicateurs de performance pouvant servir de base de comparaison. Des métriques supplémentaires au-delà des métriques de réponse dynamique typiques sont également disponibles. Le dépassement et les vibrations sont des mesures importantes, car l'énergie transmise est essentielle pour utiliser l'énergie solaire comme source d'énergie.

	Dépassement(W)	Oscillation (W)	Temps de réponse (S)
P&O	0.5	0.6	0.15
Backstepping	0	0.05	0.005
Backstepping avec integrale	0	0	0.001

**Tableau III—2** : Performance des MPPT.

### III.7.3 Discussion :

L'algorithme P&O est un algorithme classique et simple. En général, l'algorithme dépend fortement des conditions initiales et fluctue autour de l'optimum. Le principal inconvénient de cet algorithme est qu'il se comporte de manière erratique lorsque l'illumination (nuages) change soudainement.

Les algorithmes basés sur le backstepping sont des algorithmes robustes et efficaces. En fait, l'algorithme fonctionne au point optimal sans fluctuations. Il présente également un bon comportement en état transitoire. Cependant, la mise en œuvre de ce type d'algorithme est plus compliquée que celle des algorithmes traditionnels. De plus, l'efficacité de cet algorithme dépend fortement du tableau d'inférence.

### III.8 Conclusion :

La puissance de sortie fournie par les modules PV peut être maximisée à l'aide du système de contrôle MPPT. Il se compose d'une unité de contrôle qui pilote la régulation pour connecter la sortie PV à la charge et la régulation de puissance pour extraire la puissance maximale de l'installation PV. Nous discutons ici de certaines techniques MPPT de la littérature.

Parmi les méthodes envisagées, la méthode de Backstepping avec intégrale s'est avérée être la meilleure solution en termes de quantité optimale d'énergie extraite (facteur de suivi), de tension d'ondulation en régime permanent réduite et de bonne réponse transitoire. Résultant en la meilleure performance globale parmi les techniques étudiées. Le backstepping peut également être une alternative performante à l'algorithme MPPT. Le tableau Discussion et conclusions sert de guide utile pour sélectionner la méthode MPPT appropriée pour un système PV particulier.

Ce chapitre a présenté l'application de la commande MPPT basée sur le backstepping et backstepping avec intégrale dans le système PV étudié. Comparé à la méthode P&O, ce contrôle est très robuste, permettant au système d'atteindre rapidement la PPM même lorsque l'éclairement change rapidement.

---

---

## CONCLUSION GENERALE

Grâce à sa position géographique, l'Algérie est l'un des pays les plus ensoleillés au monde et le premier pays à bénéficier de ce type d'énergie renouvelable grâce au désert du Sahara qui représente une énorme ressource solaire. Cependant, comprendre le caractère aléatoire de cette source d'énergie est l'un des défis à relever pour mieux l'utiliser.

La recherche présentée dans cet article vise à améliorer les performances opérationnelles des systèmes photovoltaïques (PV) contrôlés par la technologie MPPT et à assurer le maintien de la puissance maximale délivrée par le champ électrique optique. Elle porte sur l'optimisation énergétique de la chaîne de conversion d'énergie de production d'énergie. Les travaux menés dans cet article ont porté sur l'optimisation du fonctionnement des générateurs PV dans la chaîne de conversion PV. Les générateurs photovoltaïques ont des caractéristiques I-V non linéaires et un seul point de fonctionnement optimal (puissance maximale) qui varie en fonction de l'éclairage et de la température. Le contrôle permanent du GPV via l'étage de régulation est indispensable pour maintenir le générateur en marche et atteindre un bon rendement à ce stade.

Et pour mettre en œuvre cette amélioration, cet article a étudié la modélisation et la simulation du contrôle MPPT avec backstepping et backstepping avec intégral.

Le premier chapitre a fourni des informations générales sur les systèmes photovoltaïques et a expliqué comment les cellules solaires sont utilisées pour convertir le rayonnement solaire en énergie électrique. J'ai expliqué le principe de la conversion photoélectrique et la chaîne de conversion photoélectrique. Il a été constaté que les performances des modules photovoltaïques sont fortement affectées par les conditions climatiques, en particulier le rayonnement solaire et la température. Pour faire fonctionner le générateur solaire avec un rendement optimal, un transformateur électrostatique doit être connecté entre le générateur et le récepteur. Les contrôleurs MPPT sont souvent utilisés pour s'assurer que les systèmes PV fonctionnent à leur point de puissance maximum. Ces contrôleurs sont conçus pour le suivi PPM afin de réduire l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance de référence variable maximale en fonction des conditions météorologiques.

Le chapitre 2 décrit brièvement la technique de suivi du point de puissance maximale MPPT pour assurer le fonctionnement du système PV à PPM. Initialement, deux méthodes traditionnelles ont été introduites :

Conduction incrémentielle (IncCond) et Perturbation et observation (P&O). Le principal problème avec la technique P&O est l'écart par rapport au véritable point de puissance maximale lorsque l'éclairage fluctue soudainement. Cependant, l'algorithme IncCond est plus complexe que l'algorithme

---

---

P&O et prend plus de temps à s'exécuter. Ces deux techniques introduisent des fluctuations autour de PPM. Cela signifie que le système est toujours à la recherche de PPM. Par conséquent, il est possible d'utiliser une version avancée de Robuste Control, l'approche backstepping, pour surmonter les problèmes posés par les méthodes conventionnelles ci-dessus. Nous présentons la modélisation des cellules, des générateurs photovoltaïques et des convertisseurs contrôlés par le schéma de suivi de puissance maximale. Il introduit une méthode qui est un algorithme de perturbation et d'observation, et plusieurs types de convertisseurs DC-DC (convertisseur boost) pour adapter les alimentations et les charges. Un système PV a été simulé pour évaluer les performances du contrôleur MPPT P&O dans diverses conditions environnementales.

Dans le chapitre 3, une méthode avancée a été proposée pour spécifier le contrôle MPPT basé sur le backstepping pour les systèmes photovoltaïques. Ce contrôle assure un fonctionnement dans la plage PPM, une immunité aux variations d'éclairage et de température, et atténue les oscillations qui se produisent au niveau de la tension de sortie du convertisseur. Dans ce chapitre, nous nous intéressons au problème de contrôle des systèmes photovoltaïques utilisant la technologie backstepping. Pour résoudre ce problème, nous avons d'abord présenté le concept de base de la théorie du backstepping. Ensuite, deux commandes de backstepping (backstepping et backstepping avec intégrale) sont introduites pour résoudre le problème de transfert d'énergie. Les paramètres du contrôleur ont été calculés en résolvant un ensemble d'équations non linéaires obtenu en combinant les équations de conception du filtre et les contraintes nécessaires de sorte que le schéma de retour en arrière soit maintenu à tous les points de fonctionnement du module PV et du convertisseur. Nous avons fini par simuler ces deux commandes dans l'environnement Matlab. Les résultats de la simulation montrent des performances de contrôle élevées en termes de précision, de qualité du signal de contrôle et de vitesse.

Après avoir simulé le système et examiné les résultats, nous sommes arrivés aux conclusions suivantes :

- Le rôle du convertisseur DC-DC est de faire correspondre l'alimentation (GPV) et la charge pour obtenir un transfert de puissance maximal. Ceci est rendu possible en ayant le point de fonctionnement à ou très proche de MPP dans toutes les conditions de fonctionnement (irradiance, température, propriétés, charge, etc.) ;
- Un fonctionnement relativement satisfaisant du système PV est obtenu en utilisant le contrôle MPPT.
- Une grande précision et de bons résultats ont été obtenus par le contrôle du backstepping avec intégrale.

Enfin, nous voudrions suggérer quelques points de vue pour améliorer cet humble travail :



- Autres méthodes MPPT : logique floue, commande par mode glissant ... ;
- L'implémentation pratique.

- [1] E. Saloux, “Optimisation structurelle des systèmes énergétiques.” École Polytechnique de Montréal, 2014.
- [2] S. Abada, “Etude et optimisation d’un générateur photovoltaïque pour la recharge d’une batterie avec un convertisseur sepic.” Université Laval, 2011.
- [3] M. Amarouyache, “Contribution à l’optimisation d’une chaîne de conversion d’énergie photovoltaïque.” Ph. D. thesis, Constantine 1 University, 2014.
- [4] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N. C. Voulgaris, “Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system,” *IEEE Trans. power Electron.*, vol. 16, no. 1, pp. 46–54, 2001.
- [5] B. Yang, W. Li, Y. Zhao, and X. He, “Design and analysis of a grid-connected photovoltaic power system,” *IEEE Trans. power Electron.*, vol. 25, no. 4, pp. 992–1000, 2009.
- [6] R. Khanna, Q. Zhang, W. E. Stanchina, G. F. Reed, and Z.-H. Mao, “Maximum power point tracking using model reference adaptive control,” *IEEE Trans. power Electron.*, vol. 29, no. 3, pp. 1490–1499, 2013.
- [7] C. Konstantopoulos and E. Koutroulis, “Global maximum power point tracking of flexible photovoltaic modules,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 2817–2828, 2013.
- [8] R. A. Mastromauro, M. Liserre, and A. Dell’Aquila, “Control issues in single-stage photovoltaic systems: MPPT, current and voltage control,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 8, no. 2, pp. 241–254, 2012.
- [9] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method,” *IEEE Trans. power Electron.*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, 2005.
- [10] T. Esum and P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” *IEEE Trans. energy Convers.*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [11] J. Chavarria, D. Biel, F. Guinjoan, C. Meza, and J. J. Negroni, “Energy-balance control of PV cascaded multilevel grid-connected inverters under level-shifted and phase-shifted PWMs,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 1, pp. 98–111, 2012.
- [12] S. Petibon, “Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques.” Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2009.
- [13] Aicha ROUABAH, HANANOU, and Fatiha, “Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque,” *Mémoire master, Univ. Ouargla*, 2014.
- [14] M. Tissot, *L’énergie solaire, thermique et photovoltaïque*. Editions Eyrolles, 2012.
- [15] “sonelgaz.dz.”
- [16] G. des Energies Renouvelables, “Ministère de l’Energie et des Mines,” *République Algérienne Démocratique Pop.*, pp. 4–5, 2007.
- [17] M. Brahim, “Situation des énergies renouvelables en Algérie,” in *Conférence sur la maîtrise de l’énergie et de l’environnement dans un contexte d’économie de marche*, 2001, vol. 22.
- [18] F. Kendouli, “Etat de l’art et modélisation des microcentrales,” *Mémoire, soutenu en*, 2007.

- [19] O. Gergaud, “Modélisation énergétique et optimisation économique d’un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur.” École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2002.
- [20] B. Mohammed, “Modélisation d’un système de captage photovoltaïque autonome,” *Mémoire Magister Cent. Univ. Bechar, Inst. des Sci. Exactes*, vol. 15, 2008.
- [21] B. Equer, “le pompage photovoltaïque manuel de cours,” *énergie Sol. photovoltaïque ellipses*, vol. 18, 1993.
- [22] T. Eswam, J. W. Kimball, P. T. Krein, P. L. Chapman, and P. Midya, “Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control,” *IEEE Trans. power Electron.*, vol. 21, no. 5, pp. 1282–1291, 2006.
- [23] L. F. BENDJOUDI Faouzi, “Etude et Conception D’un Système de Pompage Photovoltaïque Avec Stockage Electrochimique,” 2014.
- [24] C. Cabal, “Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque.” Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2008.
- [25] R. Faranda and S. Leva, “Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems,” *WSEAS Trans. power Syst.*, vol. 3, no. 6, pp. 446–455, 2008.
- [26] O. Boukli-Hacene, “Conception et réalisation d’un générateur photovoltaïque muni d’un convertisseur MPPT pour meilleur gestion énergétique.” 2011.
- [27] M. Bouafia and L. Deblaoui, “Modélisation et simulation d’une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d’Indium et de Gallium (CIGS),” *Mémoire Master Prof. Univ. Kasdi Merbah. Ouargla*, 2012.
- [28] A. Mirecki, “Étude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance.” 2005.
- [29] A. C. Pastor, “Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques.” INSA de Toulouse, 2006.
- [30] W. F. CHOUIKHI, “Réalisation d’une commande buck-boost pour PV.” 2018.
- [31] B. DENDIB, “Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque: étude comparative.” Thèse, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2017.
- [32] S. Diaf, “Intégration des systèmes à sources renouvelables d’énergie pour la production décentralisée d’électricité en site isolé.” Alger, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, 2009.
- [33] S. Abouda, “Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompages.” Reims, 2015.
- [34] F. Z. Zerhouni, M. Zegrar, S. K. Brahim, and A. B. Stambouli, “Optimisation d’un système à énergie verte avec validation pratique,” *J. Renew. Energies*, vol. 11, no. 1, pp. 41–49, 2008.
- [35] A. Saadi, “Etude comparative entre les techniques d’optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque,” *Mémoire Magister, Univ. Biskra*, vol. 3, pp. 2013–2014, 2000.
- [36] L. Protin and S. Astier, “Convertisseurs photovoltaïques,” *Tech. l’ingénieur. Génie électrique*, vol. 5,

- no. D3360, pp. D3360-1, 1997.
- [37] K. A. N DIAYE Papa Amadou, "Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque," 2019.
- [38] A. AZIZI, "Modélisation et optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride." Université de Annaba-Badji Mokhtar, 2019.
- [39] L. Abbassen, "Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque." Université Mouloud Mammeri, 2011.
- [40] B. Fatima, "Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique," *Univ. Abdelhamid Ibn Badis Most.*, 2018.
- [41] D. Salim, "Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone," *Univ. Ferhat Abbas Sétif*, 2011.
- [42] S. Hegedus and A. Luque, "Handbook of photovoltaic science and engineering," 2003.
- [43] A. Belkaid, "conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome." 2018.
- [44] A. Rufer and P. Barrade, "Cours d'électronique de puissance-Conversion DC/DC," *Ec. Polytech. Fédérale Lausanne (EPFL), Lausanne, Suisse*, 2001.
- [45] Z. Seyfeddine and O. M. Mohamed, "Etude et simulation d'un hacheur Boost pour suivre le point de puissance maximal (MPPT)".
- [46] H. C. Lasgaa, "Commande d'un convertisseur DC-DC dans les applications de pile à combustible".
- [47] S. Messalti, "A new neural networks MPPT controller for PV systems," in *IREC2015 the sixth international renewable energy congress*, 2015, pp. 1–6.
- [48] A. Harrag and S. Messalti, "Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 1247–1260, 2015.
- [49] A. Loukriz, S. Messalti, and A. Harrag, "Design, simulation, and hardware implementation of novel optimum operating point tracker of PV system using adaptive step size," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 101, pp. 1671–1680, 2019.
- [50] A. Loukriz, M. Haddadi, and S. Messalti, "Simulation and experimental design of a new advanced variable step size Incremental Conductance MPPT algorithm for PV systems," *ISA Trans.*, vol. 62, pp. 30–38, 2016.
- [51] A. Harrag and S. Messalti, "New Combined Fuzzy-IC Variable Step Size MPPT Reducing Steady State Oscillations," in *International Conference in Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*, 2018, pp. 376–383.
- [52] T. Logeswaran and A. SenthilKumar, "A review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems under uniform and non-uniform irradiances," *Energy Procedia*, vol. 54, pp. 228–235, 2014.
- [53] N. A. Kamarzaman and C. W. Tan, "A comprehensive review of maximum power point tracking

- algorithms for photovoltaic systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, pp. 585–598, 2014.
- [54] U. Yilmaz, A. Kircay, and S. Borekci, “PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 994–1001, 2018.
- [55] A. Harrag and S. Messalti, “Indirect hybrid fuzzy-P&O variable step size MPTT controller improving performances under fast changing atmospheric conditions,” *J. Renew. Energies*, vol. 21, no. 1, pp. 129–139, 2018.
- [56] M. Sabir and H. Abdelghani, “New Improved Hybrid MPPT Based on Backstepping-sliding Mode for PV System,” 2019.
- [57] D. G. Montoya, C. A. Ramos-Paja, and R. Giral, “Improved design of sliding-mode controllers based on the requirements of MPPT techniques,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 1, pp. 235–247, 2015.
- [58] A. D. Martin and J. R. Vazquez, “MPPT algorithms comparison in PV systems: P&O, PI, neuro-fuzzy and backstepping controls,” in *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2015, pp. 2841–2847.
- [59] K. Dahech, M. Allouche, T. Damak, and F. Tadeo, “Backstepping sliding mode control for maximum power point tracking of a photovoltaic system,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 143, pp. 182–188, 2017.
- [60] A. Harrag and S. Messalti, “GA-based solar cell parameters extraction application to single, double and triple diode models,” *J. Renew. Energies*, vol. 18, no. 4, pp. 701–711, 2015.
- [61] M. S. A. Cheikh, C. Larbes, G. F. T. Kebir, and A. Zerguerras, “Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme,” *Rev. des énergies Renouvelables*, vol. 10, no. 3, pp. 387–395, 2007.
- [62] S. Rudra, R. K. Barai, and M. Maitra, *Block backstepping design of nonlinear state feedback control law for underactuated mechanical systems*. Springer, 2017.
- [63] B. Subudhi and R. Pradhan, “A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 89–98, 2012.
- [64] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, and A. Lazaro, “Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems,” *Sol. energy Mater. Sol. cells*, vol. 90, no. 11, pp. 1555–1578, 2006.
- [65] D. Sera, “Real-time modelling, diagnostics and optimised MPPT for residential PV systems,” 2009.
- [66] F. Cheddadi, I. Boumhidi, and S. Sefriti, “Comparaison entre la Commande MPPT par mode glissant et la Perturbation et Observation pour les systèmes Photovoltaïques,” in *IMAT3E’18 International Meeting on Advanced Technologies in Energy and Electrical Engineering*, 2018.
- [67] H. Boumaaraf, “Modélisation et commande numérique d’un système photovoltaïque connecté au réseau.” Alger, 2010.
- [68] H. BOUZERIA, “Modélisation et commande d’une chaine de conversion photovoltaïque.” Université de Batna 2, 2016.
- [69] T. Noguchi, S. Togashi, and R. Nakamoto, “Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 217–223, 2002.

- [70] R. Khan, L. Khan, S. Ullah, I. Sami, and J. S. Ro, “Backstepping based super-twisting sliding mode mppt control with differential flatness oriented observer design for photovoltaic system,” *Electron.*, vol. 9, no. 9, pp. 1–30, 2020, doi: 10.3390/electronics9091543.
- [71] H. BENADDA, “Application des commandes non linéaires avec observateur d’un robot manipulateur.” Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf ..., 2013.
- [72] A. Boudia, “Contribution à l’étude d’un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec un système de stockage à base d’une inductance supraconductrice (SMES).” Univ M’sila, 2020.
- [73] B. BELKACEM and L. MOHAMMED, “Commande par backstepping d’un convertisseur DC-DC entrelacée.” UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M’SILA, 2019.
- [74] A. Taouni, A. Abbou, M. Akherraz, A. Ouchatti, and R. Majdoul, “MPPT design for photovoltaic system using backstepping control with boost converter,” *Proc. 2016 Int. Renew. Sustain. Energy Conf. IRSEC 2016*, pp. 469–475, 2017, doi: 10.1109/IRSEC.2016.7983920.