

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : ELECTROTECHNIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : COMMANDE ELECTRIQUE

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Optimisation du point de puissance maximum pour un système photovoltaïque sous l'effet d'ombrage partiel**

Présenté par : *Chorfi Yasmine*  
*Akriche chaima*

Encadrant : *Lakhdara Amira*

MAB

UBMA

## Jury de Soutenance :

Bahi Tahar	Professeur	UBMA	Président
Lakhdara Amira	MAB	UBMA	Encadrant
Zarzouri Nora	MCA	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

# Remerciement

*C'est avec une immense joie et une grande fierté que je termine ce modeste travail, accompli avec l'espoir sincère de réussir.*

*Avant tout, je tiens à remercier le bon dieu.*

*Je souhaite adresser mes plus chaleureux remerciements à mon encadrante Mme Lakhdara Amira. Son soutien indéfectible, ses conseils avisés et sa disponibilité constante ont été inestimables tout au long de la réalisation de ce projet. Sa bienveillance et son expertise ont grandement contribué à la réussite de ce travail.*

*Ainsi qu'aux professeurs Mr Bahi Tahar et Mme Zarzouri Nora pour avoir accepté de consacrer leur temps à évaluer ce travail.*

*Le grand mérite revient aussi à ma chère mère, vos sacrifices, votre amour inconditionnel et votre soutien constant ont été les piliers de ma réussite. Vous avez toujours été là pour moi, m'encourageant et me guidant à chaque étape. Sans votre dévouement et vos encouragements, je n'aurais pas pu arriver jusqu'ici.*

*Merci du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait pour moi.*

*À ma grande mère et mes tantes, votre affection et votre soutien m'ont également été d'un grand secours. Vous avez toujours cru en moi, même dans les moments de doute ; vos conseils avisés et vos encouragements m'ont donné la force de persévérer et d'atteindre mes objectifs.*

*Mes remerciements s'adressent également à mes professeurs durant tout mon cycle universitaire et mon département.*

*A ma binôme merci pour ta disponibilité et ta patience, ainsi que pour les nombreuses heures que tu as consacrées à ce projet.*

*Merci pour votre présence et votre bienveillance tout au long de cette aventure.*

*Avec toute ma gratitude.*

*Chorfi Yasmine*

# Remerciements

*Il est des projets qui, pour voir le jour, nécessitent l'appui et le concours de nombreux individus. Ce mémoire, fruit de longues heures de travail et de réflexion, n'aurait pu aboutir sans le soutien précieux de plusieurs personnes que je souhaite remercier sincèrement.*

*Je tiens à exprimer ma haute gratitude, mes profonds respects et mes sincères remerciements et reconnaissances d'abord à mon encadreur madame A. LAKHDARA pour son accompagnement exceptionnel, ses conseils judicieux et sa patience. Son expertise et sa rigueur ont été des éléments essentiels à l'aboutissement de ce travail.*

*J'adresse mes chaleureux remerciements à monsieur T. BAHY pour avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire.*

*Mes sincères remerciements sont adressés à madame N. ZERZOURI pour m'avoir honoré en acceptant d'examiner ce travail.*

*Mes remerciements ne seraient pas complets si je n'exprimais pas ma profonde gratitude à mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral et leur confiance indéfectible en mes capacités. Leurs présence a été un pilier fondamental tout au long de cette aventure.*

*Enfin, je souhaite tout particulièrement remercier mes frères, ma sœur et ma grande famille.*

*Et ma collègue qui, au fil du temps, est devenue comme une sœur pour moi. Et je remercie aussi toutes les personnes qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce travail, en particulier, tout le personnel du département de Électrotechnique t à l'université Badji Mokhtar Annaba, pour leur bonne humeur et leur disponibilité.*

*Mes remerciements également les enseignant qui ont assuré mon formation.*

A.CHAIMA

## **RÉSUMÉ**

La puissance générée par un module photovoltaïque fluctue en fonction de l'intensité de l'irradiation et de la température des cellules. Pour optimiser les performances des systèmes d'énergie solaire photovoltaïque, il est crucial d'utiliser un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) afin de tirer le maximum de puissance de la source d'entrée. Dans ce travail, nous avons étudié et modélisé les différents composants de la chaîne photovoltaïque, incluant le panneau PV, les convertisseurs DC-DC, ainsi que la simulation.

Le phénomène de l'ombrage partiel représente un défi commun dans les systèmes photovoltaïques (PV). De nombreuses approches ont été explorées pour atténuer ce problème, notamment en utilisant des techniques d'optimisation méta-heuristiques pour suivre la courbe P-V à multiples pics dans les systèmes PV sous ombrage partiel. Ce projet de fin d'étude propose ainsi un nouvel algorithme méta-heuristique, l'algorithme Grey Wolves Optimization (GWO), pour identifier le point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. L'évaluation de l'algorithme GWO a démontré sa rapidité, sa robustesse et sa précision dans des conditions standard, d'ombrage partiel et de variations d'éclairement. De plus, les résultats montrent une amélioration significative des performances de l'algorithme GWO par rapport aux algorithmes Pratical Swarm Optimization (PSO) et Perturb and Observe (P&O).

**ABSTRACT**

The power generated by a photovoltaic module fluctuates based on the intensity of irradiation and the temperature of the cells. To optimize the performance of photovoltaic solar energy systems, it is crucial to use a Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm to extract the maximum power from the input source. In this work, we studied and modeled the different components of the photovoltaic chain, including the PV panel, DC-DC converters, and simulations.

The phenomenon of partial shading represents a common challenge in photovoltaic (PV) systems. Numerous approaches have been explored to mitigate this problem, notably by using meta-heuristic optimization techniques to track the multi-peak P-V curve in PV systems under partial shading. This final year project thus proposes a new meta-heuristic algorithm, the Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm, to identify the maximum power point in photovoltaic systems. The evaluation of the GWO algorithm demonstrated its speed, robustness, and accuracy under standard conditions, partial shading, and varying irradiance. Additionally, the results show a significant improvement in the performance of the GWO algorithm compared to the Particle Swarm Optimization (PSO) and Perturb and Observe (P&O) algorithms.

## ملخص

تتذبذب القدرة المولدة من وحدة الخلايا الضوئية بناءً على شدة الإشعاع ودرجة حرارة الخلايا. لتحسين أداء أنظمة الطاقة الشمسية الضوئية، من الضروري استخدام خوارزمية تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT) لاستخلاص أقصى طاقة من مصدر الإدخال. في هذا العمل، قمنا بدراسة و نمذجة المكونات المختلفة للسلسلة الضوئية، بما في ذلك اللوح الضوئي، محولات DC-DC، والمحاكاة.

يمثل ظاهرة الظل الجزئي تحديًا شائعًا في أنظمة الطاقة الضوئية (PV). تم استكشاف العديد من النهج للتخفيف من هذه المشكلة، ولا سيما باستخدام تقنيات التحسين الميتا-إرشادية لتتبع منحني P-V متعدد القمم في أنظمة الطاقة الضوئية تحت الظل الجزئي. يقترح هذا المشروع النهائي خوارزمية GWO ميتا-إرشادية جديدة، وهي خوارزمية تحسين الذئب الرمادي (GWO) ، لتحديد نقطة القدرة القصوى في الأنظمة الضوئية. أثبت تقييم خوارزمية GWO سرعتها، متانتها، ودقتها في الظروف العادية، والظل الجزئي، وتغيرات الإشعاع. بالإضافة إلى ذلك، تظهر النتائج تحسینًا كبيرًا في أداء خوارزمية مقارنة بخوارزميات تحسين السرب العملي (PSO) وخوارزمية الاضطراب والمراقبة (P&O).

# SOMMAIRE

## RESUME

## SYMBOLES ET ACRONYMES

## LISTE DES FIGURES

## LISTE DES TABLEAUX

## INTRODUCTION GENERALE

### CHAPITRE 1

#### ETAT DE L'ART SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

<b>1.1</b>	Introduction	3
<b>1.2</b>	Développement des énergies renouvelables	3
<b>1.3</b>	Les énergies renouvelables	4
1.3.1	L'énergie éolienne	4
1.3.2	L'énergie géothermique	6
1.3.3	L'énergie marine	6
1.3.4	L'hydroélectricité	7
1.3.5	La bioénergie	8
1.3.6	L'énergie solaire	9
1.3.7	Irradiation solaire	16
1.3.8	Angle d'inclinaison des panneaux solaires (photovoltaïques)	17
1.3.9	Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque	18
<b>1.4</b>	Conclusion	19

### CHAPITRE 2

#### MODELISATION DE LA CHAINE PHOTOVOLTAIQUE

<b>2.1</b>	Introduction	20
<b>2.2</b>	Modélisation de la cellule photovoltaïque	20
2.2.1	Modèles électriques équivalents	20
2.2.2	Modèle à une diode	21
2.2.3	Facteur de forme (FF)	25
2.2.4	Rendement de la conversion ( $\eta$ )	25
<b>2.3</b>	Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)	26
2.3.1	Association des cellules photovoltaïques en série	26
2.3.2	Association des cellules photovoltaïques en parallèle	27
<b>2.4</b>	Modélisation des convertisseurs statiques (Hacheur)	29
2.4.1	Le rapport cyclique	29
2.4.2	Types des convertisseurs DC-DC (Hacheur)	30
2.4.3	Simulation du convertisseur Boost	33
<b>2.5</b>	Conclusion	36

### **CHAPITRE 3 COMMANDE DU PANNEAU**

<b>3.1</b>	Introduction	37
<b>3.2</b>	Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)	37
<b>3.3</b>	Les commandes MPPT classique	38
3.3.1	Méthode de perturbe et d'observe (P&O)	39
<b>3.4</b>	Effet de l'ombrage partiel sur le fonctionnement du générateur PV	41
<b>3.5</b>	Système de protection	42
<b>3.6</b>	Techniques méta-heuristiques	43
3.6.1	Technique d'essai d'optimisation des particules (PSO)	43
3.6.2	Technique d'optimisation des loups gris (GWO)	47
<b>3.7</b>	Conclusion	50

### **CHAPITRE 4 SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE SOUS IRRADIATION UNIFORME ET NON UNIFORME**

<b>4.1</b>	Introduction	51
<b>4.2</b>	Simulation du système photovoltaïque	51
<b>4.3</b>	Résultats de simulation du système photovoltaïque sous irradiation Uniforme	52
4.3.1	Caractéristique du système photovoltaïque	52
4.3.2	Résultats de simulation de système photovoltaïque avec la commande MPPT P&O (méthode classique)	54
<b>4.4</b>	Résultats de simulation du système photovoltaïque sous irradiation non uniforme (ombrage partiel)	57
<b>4.5</b>	Conclusion	61
	<b>CONCLUSION GENERALE</b>	62
	<b>REFERENCES</b>	63

Symbole	Désignation	Unité
$I_{CC}$	courant de court-circuit de la cellule	(A)
$I_{01}$	courant de saturation de la diode $D_1$	(A)
$I_{02}$	courant de saturation de la diode $D_2$	(A)
$I_{Rp}$	courant à travers la résistance parallèle	(A)
$I$	courant fourni par la cellule	(A)
$I_{cc(ref)}$	courant de court-circuit pour une température de référence mesurée sous un ensoleillement de $1000W/m^2$	(A)
$I_{max}$	courant maximal	(A)
$V_{pv}$	tension aux bornes de la cellule	(V)
$V_{co}$	tension du circuit ouvert	(V)
$V_{max}$	tension maximale	(V)
$K$	constante de Boltzmann	(J / K)
$T_c$	température effective de la cellule	(K)
$T_{ref}$	température de référence de la cellule correspondante à la température standard $25\text{ }^\circ\text{C}$	(K)
$q$	charge de l'électron	(C)
$n$	facteur d'idéalité	
$n_1$	facteur de non idéalité de la jonction de la diode $D_1$	
$n_2$	facteur de non idéalité de la jonction de la diode $D_2$	
$R_p$	résistance parallèle qui caractérise les courants de la jonction	( $\Omega$ )
$R_s$	résistance série qui caractérise les diverses résistances des contacts et connexion	( $\Omega$ )
$R_{ch}$	résistance de charge	( $\Omega$ )
$K_i$	coefficient de température du courant $I$	(%/°C)
$E$	irradiation	(W/m <sup>2</sup> )
$E_0$	irradiation nominal standard	(W/m <sup>2</sup> )
$FF$	facteur de forme	
$\eta$	rendement de la conversion	(%)
$n_s$	nombre de cellule en série	
$n_p$	nombre de cellule en parallèle	

### Acronymes

<b>GPV</b>	Générateur Photovoltaïque
<b>PV</b>	Cellule Photovoltaïque
<b>DC</b>	Courant Continu
<b>PPM</b>	Point de Puissance Maximum
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking
<b>GMPP</b>	Global Maximum Power Point
<b>P&amp;O</b>	Perturbation et Observation
<b>PSO</b>	Partical Swarm Optimization
<b>GWO</b>	Grey Wolf Optimization
<b>OP</b>	Ombrage partiel
<b>PG</b>	Point Global
<b>PP</b>	Point Partiel

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b>	La consommation d'énergie totale et la production d'électricité en 2022	4
<b>Figure 1.2</b>	L'énergie éolienne	5
<b>Figure 1.3</b>	L'énergie géothermique	6
<b>Figure 1.4</b>	L'énergie marine	7
<b>Figure 1.5</b>	L'hydroélectricité	8
<b>Figure 1.6</b>	La bioénergie	9
<b>Figure 1.7</b>	L'énergie solaire	10
<b>Figure 1.8</b>	La carte de l'irradiation solaire globale en Algérie	11
<b>Figure 1.9</b>	Système photovoltaïque	13
<b>Figure 1.10</b>	Système photovoltaïque plus détaillé	13
<b>Figure 1.11</b>	Schéma d'un système autonome (hors-réseau)	14
<b>Figure 1.12</b>	Système de Pompage PV au fil de soleil	15
<b>Figure 1.13</b>	Injection partielle et totale	16
<b>Figure 1.14</b>	Composantes du rayonnement solaire au sol	17
<b>Figure 1.15</b>	L'angle d'incidence maximal (a) en été ; (b) en hiver	17
<b>Figure 2.1</b>	Modèle de la cellule photovoltaïque	20
<b>Figure 2.2</b>	Schéma équivalent du modèle à une seule diode	22
<b>Figure 2.3</b>	Circuit de connexion et caractéristique courant-tension $I=f(V)$	24
<b>Figure 2.4</b>	Caractéristique résultante d'une connexion de $n_s$ cellules en série	26
<b>Figure 2.5</b>	Branchement en série des panneaux PV	27
<b>Figure 2.6</b>	Caractéristiques résultant d'un groupement de $n_p$ cellules en parallèle	28
<b>Figure 2.7</b>	Branchement en série des panneaux PV	28
<b>Figure 2.8</b>	Symbole d'un convertisseur DC-DC	29
<b>Figure 2.9</b>	Périodes d'ouverture et fermeture d'un interrupteur	30
<b>Figure 2.10</b>	Modèle hacheur série	31
<b>Figure 2.11</b>	Modèle hacheur parallèle	31
<b>Figure 2.12</b>	Modèle hacheur série parallèle	32
<b>Figure 2.13</b>	Schémas équivalents du hacheur survolteur : K (a) : fermé, (b) : ouvert	32
<b>Figure 2.14</b>	Tension d'entrée ( $V_i$ ) et tension de sortie ( $V_0$ ) d'un hacheur Boost	34
<b>Figure 2.15</b>	Commande PWM avec $D=0.25$	35
<b>Figure 2.16</b>	Commande PWM avec $D=0.5$	35
<b>Figure 2.17</b>	Commande PWM avec $D=0.75$	36
<b>Figure 3.1</b>	Chaîne de conversion photovoltaïque contrôlée par une MPPT	38
<b>Figure 3.2</b>	Principe de la technique P&O	39
<b>Figure 3.3</b>	Organigramme de la méthode P&O	40
<b>Figure 3.4</b>	Ombre partiel	41
<b>Figure 3.5</b>	Ombre de l'arbre aux panneaux solaire	42
<b>Figure 3.6</b>	Schéma d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour	43
<b>Figure 3.7</b>	Volée d'oiseaux en formation en V	44
<b>Figure 3.8</b>	Stratégie de déplacement d'une particule	45
<b>Figure 3.9</b>	Organigramme de la MPPT par PSO	46
<b>Figure 3.10</b>	Comportement de la meute des loups gris lors de la chasse : (A) Poursuite de la proie, (B-D) harcèlement et encerclement, (E) Position d'attaque	47
<b>Figure 3.11</b>	La hiérarchie des loups gris	48

<b>Figure 3.12</b>	Mise à jour des positions des loups	48
<b>Figure 3.13</b>	Organigramme de l'algorithme GWO	49
<b>Figure 4.1</b>	Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec commande MPPT	51
<b>Figure 4.2</b>	Caractéristique sous l'irradiation variable et température constante (25°C)	53
<b>Figure 4.3</b>	Caractéristique sous l'irradiation constante (1000w/m <sup>2</sup> ) et température variable	54
<b>Figure 4.4</b>	Puissance extraire avec P&O sous E variable	55
<b>Figure 4.5</b>	Puissance extraite avec P&O sous T variable	56
<b>Figure 4.6</b>	caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ sous ombrage partiel	58
<b>Figure 4.7</b>	Puissance de la charge	58
<b>Figure 4.8</b>	caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ sous ombrage partiel	59
<b>Figure 4.9</b>	Puissance de la charge	59
<b>Figure 4.10</b>	caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ sous ombrage partiel	60
<b>Figure 4.11</b>	Puissance de la charge	60

## **Liste des tableaux**

<b>Tableau 4.1</b>	les caractéristiques du système photovoltaïque	52
--------------------	--	----

## **Introduction générale**

La consommation énergétique mondiale repose principalement sur les énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel et nucléaire), qui ont un impact négatif sur l'environnement [1]. Le changement climatique, l'un des problèmes les plus graves du XXI<sup>e</sup> siècle, est principalement causé par les émissions de gaz à effet de serre, issues notamment de la combustion des énergies fossiles [2]. Avec l'évolution actuelle du niveau de vie, la demande croissante en énergie a conduit à un développement significatif des énergies renouvelables, telles que les énergies photovoltaïque (PV), thermique, hydraulique, etc. Ces sources d'énergie propres et durables sont devenues cruciales car elles sont perçues comme une alternative viable aux énergies fossiles en déclin, s'inscrivant ainsi dans les objectifs du protocole de Kyoto. [3]

L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque peut offrir une solution, car elle convertit directement une partie d'irradiation en énergie électrique. Cette technologie se distingue par sa flexibilité, sa disponibilité, son efficacité, sa longévité, ainsi que ses faibles coûts d'exploitation et de maintenance. [4]

Cependant, l'énergie solaire photovoltaïque est intermittente, dépendant des conditions d'irradiation et température. La majorité des panneaux photovoltaïques sont composés de plusieurs cellules connectées en série. Ainsi, lorsqu'une cellule du panneau est ombragée, le rendement global du panneau est considérablement diminué. En résumé, il est important de noter que l'ombrage, même partiel, a un impact significatif sur la production des panneaux photovoltaïques.

Le travail réalisé dans ce projet de fin d'étude porte sur l'utilisation de l'énergie solaire, obtenue via un générateur photovoltaïque (GPV). Pour assurer une extraction optimale de cette énergie, un convertisseur DC/DC de type Boost est employé. Une étude détaillée de la structure de ce convertisseur est présentée. La technique de commande adoptée vise à poursuivre le point de puissance maximale (PPM), correspondant à une tension et un courant optimaux du panneau PV, pour lesquels la puissance est maximale, quelles que soient les conditions météorologiques (irradiation, température, etc.). Plusieurs techniques de commande de "Poursuite de Point de Puissance Maximale" ou "Maximum Power Point Tracker (MPPT)" ont été étudiées et simulées dans l'environnement MATLAB/Simulink.

Le contenu de ce projet de fin d'étude est organisé en quatre chapitres, décrits comme suit :

- ✚ Dans le premier chapitre, nous avons présenté état de l'art sur les énergies renouvelables en commençant par les différents types des systèmes photovoltaïques et les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.
- ✚ Le deuxième chapitre, sera consacré sur la modélisation de la chaîne photovoltaïque et les modèle électrique d'une cellule à une diode. un convertisseur DC-DC (hacheur).
- ✚ Le troisième chapitre, la commande du panneau plusieurs techniques de commande classiques (INC, P&O) et méta-heuristiques (PSO, GWO) pour le système photovoltaïque afin d'extraire le point de puissance maximale (MPPT) sous différentes conditions climatiques uniforme et non uniforme.
- ✚ Le quatrième chapitre, est consacré à la simulation et aux résultats obtenus. L'implémentation des différentes techniques de commande MPPT a été réalisée pour valider l'efficacité des méthodes proposées. Cela a été accompli en simulant les caractéristiques et les performances du système générateur photovoltaïque dans diverses conditions météorologiques (irradiation, température).
- ✚ Le travail se termine par une conclusion générale.

## Chapitre 01

### Etat de l'art sur les énergies renouvelables

#### 1.1 Introduction

L'activité énergétique humaine fait face à deux défis majeurs. D'une part, il est devenu évident que les sources d'énergie conventionnelles ne pourront pas satisfaire indéfiniment la demande croissante. En conséquence, il est impératif d'explorer de nouvelles méthodes de production énergétique pour répondre aux besoins des générations futures. D'autre part, les émissions de gaz à effet de serre résultant de nos activités énergétiques constituent une cause principale du changement climatique. [5]

La prise de conscience de l'épuisement des ressources énergétiques traditionnelles, combinée à l'impact de notre consommation d'énergie sur l'environnement, nous pousse vers des modes de production et d'utilisation de l'énergie plus durables. Dans ce contexte, les énergies renouvelables apparaissent comme une solution viable. Parmi celles-ci figurent l'énergie éolienne, la biomasse, la géothermie et l'énergie solaire, dont la majorité est directement ou indirectement dérivée du soleil. Ainsi, tant que le soleil continuera de briller, ces sources d'énergie resteront inépuisables. [6]

#### 1.2 Développement des énergies renouvelables

Alors que le monde continue de faire face à des défis sans précédent liés au changement climatique et à la sécurité énergétique, l'importance et l'urgence d'accélérer le déploiement des énergies renouvelables sont désormais indiscutables. Dans ce contexte, il est essentiel d'examiner les progrès réalisés jusqu'à présent et de mettre en lumière les opportunités et les défis à venir pour 2024.

Selon les estimations les plus récentes de l'Agence internationale de l'énergie (IEA), Les énergies fossiles ont compté pour près de 82% de la consommation d'énergie primaire et environ 61% de la production d'électricité dans le monde en . Ces technologies, autrefois marginales, sont désormais au cœur des stratégies de décarbonations et de diversification énergétique de nombreux pays. La baisse continue des coûts de production, grâce aux avancées technologiques et à l'augmentation des capacités de production, rend ces énergies de plus en plus compétitives par rapport aux sources traditionnelles. [7]

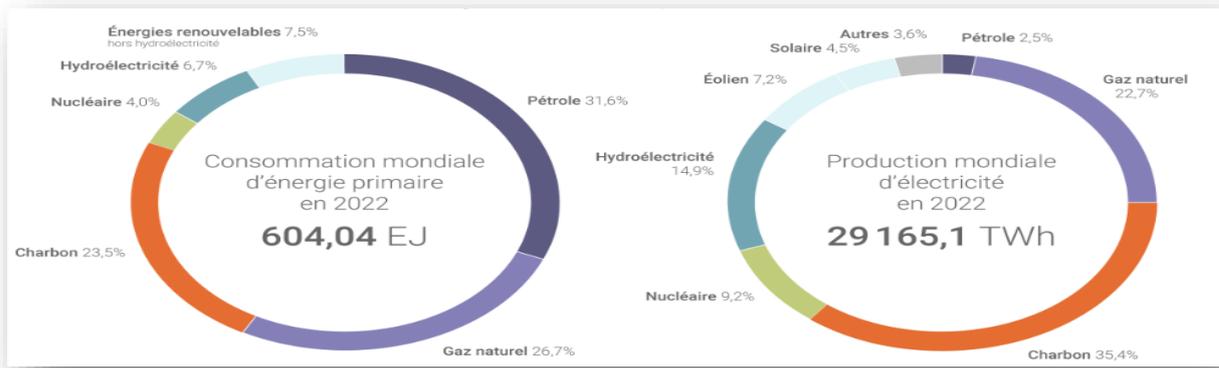


Figure 1.1 La consommation d'énergie totale et la production d'électricité en 2022. [8]

### 1.3 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie naturelles qui se régénèrent à un rythme supérieur à celui de leur consommation. Par exemple, la lumière solaire et le vent sont des sources renouvelables constamment disponibles. Ces sources sont abondantes et présentes partout autour de nous.

En revanche, les combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz sont des ressources non renouvelables qui nécessitent des centaines de millions d'années pour se former. Leur combustion pour produire de l'énergie libère des gaz à effet de serre nocifs, notamment du dioxyde de carbone.

La production d'énergie renouvelable génère beaucoup moins d'émissions que la combustion de combustibles fossiles. Pour faire face à la crise climatique, il est crucial de passer des combustibles fossiles, responsables de la majeure partie des émissions actuelles, aux énergies renouvelables.

Aujourd'hui, les énergies renouvelables sont moins coûteuses dans la plupart des pays et créent trois fois plus d'emplois que les combustibles fossiles. [9]

#### 1.3.1 L'énergie éolienne

Pour l'énergie éolienne, le principe repose sur l'exploitation de l'énergie cinétique de l'air en mouvement à l'aide de grandes éoliennes, soit sur terre (éoliennes terrestres), soit en mer ou en eau douce (éoliennes en mer). Bien que l'énergie éolienne soit utilisée depuis des millénaires, les technologies terrestres et maritimes ont considérablement évolué ces dernières années pour

maximiser la production d'électricité, grâce à des turbines plus hautes et des rotors de plus grand diamètre.

Même si la vitesse moyenne du vent varie considérablement d'un endroit à l'autre, le potentiel technique de l'énergie éolienne dans le monde dépasse la production mondiale d'électricité. Dans la plupart des régions, ce potentiel est largement suffisant pour permettre un déploiement significatif de l'énergie éolienne.

De nombreuses régions du monde bénéficient de vents forts, mais les meilleurs endroits pour produire de l'énergie éolienne sont parfois éloignés. L'énergie éolienne en mer offre un potentiel immense. [10]



Figure 1.2 L'énergie éolienne. [11]

### 1.3.2 L'énergie géothermique

L'énergie géothermique exploite la chaleur provenant de l'intérieur de la Terre. Cette chaleur est extraite de réservoirs géothermiques via des puits ou d'autres méthodes. Les réservoirs naturellement suffisamment chauds et perméables sont appelés « réservoirs hydrothermaux », tandis que ceux qui nécessitent une stimulation hydraulique pour être utilisables sont appelés « systèmes géothermiques améliorés ».

Une fois à la surface, des fluides de différentes températures peuvent être utilisés pour produire de l'électricité. Les technologies de production d'électricité à partir de réservoirs hydrothermaux sont éprouvées et fiables, fonctionnant depuis plus d'un siècle. [12]



Figure 1.3 L'énergie géothermique. [13]

### 1.3.3 L'énergie marine

L'énergie marine provient de technologies exploitant l'énergie cinétique et thermique de l'eau de mer, comme celle des vagues ou des courants, pour produire de l'électricité ou de la chaleur. Ces systèmes en sont encore à leurs débuts, avec plusieurs prototypes de dispositifs

pour la houle et les courants de marée actuellement en développement. Le potentiel théorique de l'énergie marine dépasse largement les besoins énergétiques actuels de l'humanité. [14]



Figure 1.4 L'énergie marine. [15]

### 1.3.4 L'hydroélectricité

L'hydroélectricité exploite l'énergie de l'eau qui descend des hauteurs vers les basses altitudes, avec la production pouvant provenir de réservoirs ou de rivières. Les centrales hydroélectriques à réservoir utilisent l'eau stockée dans un réservoir, tandis que les centrales hydroélectriques au fil de l'eau tirent parti du débit disponible de la rivière.

Les réservoirs des centrales hydroélectriques ont souvent plusieurs usages : ils fournissent de l'eau potable, de l'eau pour l'irrigation, contrôlent les inondations et les sécheresses, et assurent des services de navigation ainsi que l'approvisionnement en énergie.

Actuellement, l'hydroélectricité est la plus grande source d'énergie renouvelable dans le secteur de l'électricité. Elle dépend généralement de régimes pluviométriques stables, mais peut être affectée par les sécheresses dues aux changements climatiques ou aux modifications des écosystèmes qui influencent les précipitations.

Les infrastructures nécessaires à la production d'hydroélectricité peuvent également avoir des effets néfastes sur les écosystèmes. Pour cette raison, de nombreuses personnes considèrent que les centrales hydroélectriques de petite taille sont préférables. [16]



Figure 1.5 L'hydroélectricité. [17]

### 1.3.5 La bioénergie

La bioénergie est produite à partir de diverses matières organiques constituant la biomasse, telles que le bois, le charbon de bois, les déjections animales et autres effluents d'élevage pour la production de chaleur et d'électricité, ainsi que les cultures agricoles pour les biocarburants liquides. La biomasse est principalement utilisée en milieu rural pour la cuisson, l'éclairage et le chauffage, souvent par les populations pauvres des pays en développement.

Les systèmes modernes de biomasse incluent les cultures ou arbres spécialement cultivés à cet effet, les résidus agricoles et sylvicoles, ainsi que divers flux de déchets organiques. La production d'énergie par combustion de biomasse émet des gaz à effet de serre, mais à des niveaux inférieurs à ceux de la combustion de combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole ou le gaz.

Cependant, l'utilisation de la bioénergie doit être envisagée avec précaution en raison des potentiels impacts environnementaux négatifs associés à l'expansion à grande échelle des plantations forestières et bioénergétiques, ainsi qu'à la déforestation et aux changements d'affectation des sols qui en résultent. [18]



Figure 1.6 La bioénergie. [19]

### 1.3.6 L'énergie solaire

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante et peut être exploitée même par temps nuageux. La quantité d'énergie solaire interceptée par la Terre est environ 10 000 fois supérieure à la vitesse de consommation énergétique de l'humanité.

Les technologies solaires permettent de produire de la chaleur, du froid, de l'éclairage naturel, de l'électricité et des carburants pour diverses applications. Elles convertissent la lumière du soleil en énergie électrique soit par des panneaux photovoltaïques, soit par des miroirs qui concentrent le rayonnement solaire.

Bien que tous les pays ne disposent pas de la même quantité d'énergie solaire, cette énergie peut significativement contribuer au mix énergétique de chaque pays. Les coûts de fabrication

des panneaux solaires ont fortement diminué au cours des dix dernières années, rendant cette technologie non seulement abordable mais souvent la moins chère pour produire de l'électricité. Les panneaux solaires, disponibles en différentes teintes selon les matériaux utilisés, ont une durée de vie d'environ 30 ans. [20]



Figure1.7 L'énergie solaire. [21]

### 1.3.6 (1- Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie possède l'un des plus vastes gisements solaires du bassin méditerranéen. Dans les zones proches de la mer, le rayonnement solaire est influencé par les saisons, tandis que les régions sahariennes reçoivent une quantité d'énergie solaire plus importante, mais avec des températures de l'air plus élevées. Cette diversité fait que l'énergie totale reçue en Algérie est estimée à 169 400 TWh par an, ce qui représente 5000 fois la consommation annuelle d'électricité du pays. [22]

### 1.3.6 (2-Irradiation en Algérie

Il s'agit carte de l'Atlas solaire algérien, Cet atlas comprendra une série de cartes de différents types d'irradiation solaire, produites par l'équipe d'instrumentation du CDER. Cette équipe crée des cartes du potentiel solaire en utilisant des données recueillies sur un nombre limité de sites en Algérie. Leur travail repose sur des modèles estimant les irradianations solaires globales, directes et diffuses pour divers types de ciels, et les résultats sont validés par des mesures de terrain.

Ces cartes solaires sont cruciales pour la conception de systèmes de production d'énergie solaire. Leur utilisation permettra aux concepteurs d'optimiser le rendement en fonction du climat local, en choisissant de manière optimale les produits, matériaux et configurations adaptés. [23]

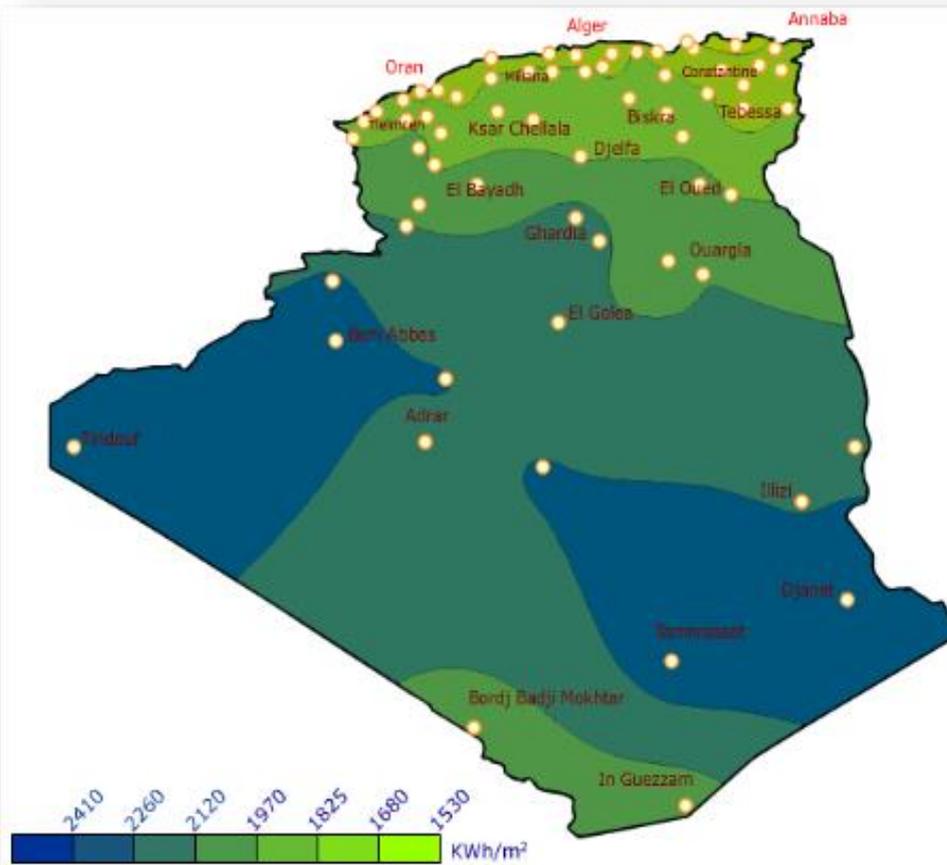


Figure 1.8 La carte de l'irradiation solaire globale en Algérie. [24]

### 1.3.6 (3- Solaire photovoltaïque)

L'énergie solaire photovoltaïque exploite la lumière du soleil pour transformer l'énergie des photons en électricité à la surface de la Terre. Les photons de la lumière solaire transmettent leur énergie aux électrons dans un semi-conducteur, constituant une cellule photovoltaïque. Cette transformation, appelée effet photovoltaïque, se fait sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le terme "photovoltaïque" vient du mot "photo" (du grec "phos" signifiant "lumière") et du nom "Volt" (en hommage au physicien Alessandro Volta, qui a grandement contribué à la recherche en électricité) [25].

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes du matériau sont "bombardés" par les photons de la lumière. Sous l'effet de ce bombardement, les électrons des couches externes (appelés électrons de valence) ont tendance à être "arrachés". Si l'électron retourne à son état initial, cette agitation se traduit par un échauffement du matériau, transformant l'énergie cinétique du photon en énergie thermique. Cependant, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne retourne pas à son état initial. Ces électrons "arrachés" créent une faible tension électrique continue, transformant ainsi directement une partie de l'énergie cinétique des photons en énergie électrique.

L'effet photovoltaïque représente la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique à l'aide de cellules, généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, ces cellules sont connectées entre elles pour former un module solaire. [26]

### 1.3.6 (4- Système photovoltaïque)

Un système photovoltaïque (PV) est un ensemble de composants utilisés pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Ces composants comprennent principalement le champ photovoltaïque, le conditionnement de puissance, le système de stockage (dans certains cas) et la charge (voir figure 1.9). Le conditionnement de puissance peut inclure : un régulateur seul, un régulateur avec un convertisseur (DC/DC et/ou DC/AC), ou un convertisseur seul. Un exemple plus détaillé d'un tel système est illustré à la figure 1.10.

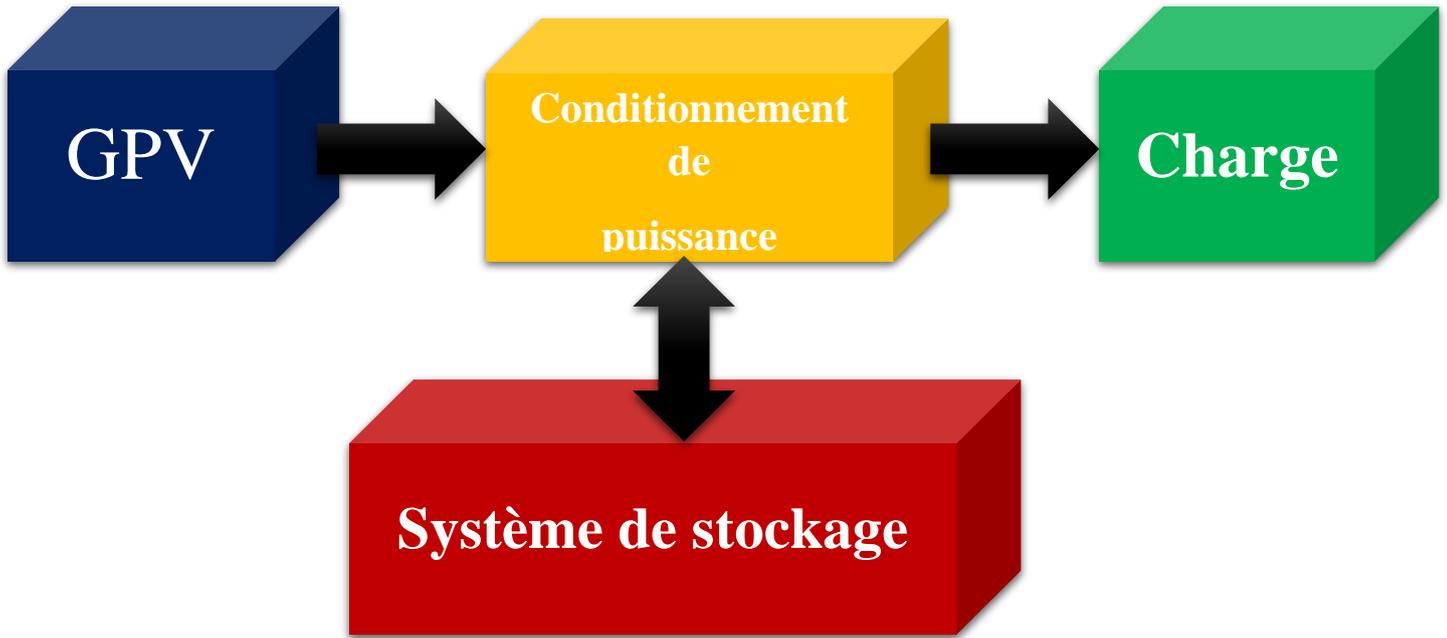


Figure1.9 Système photovoltaïque.

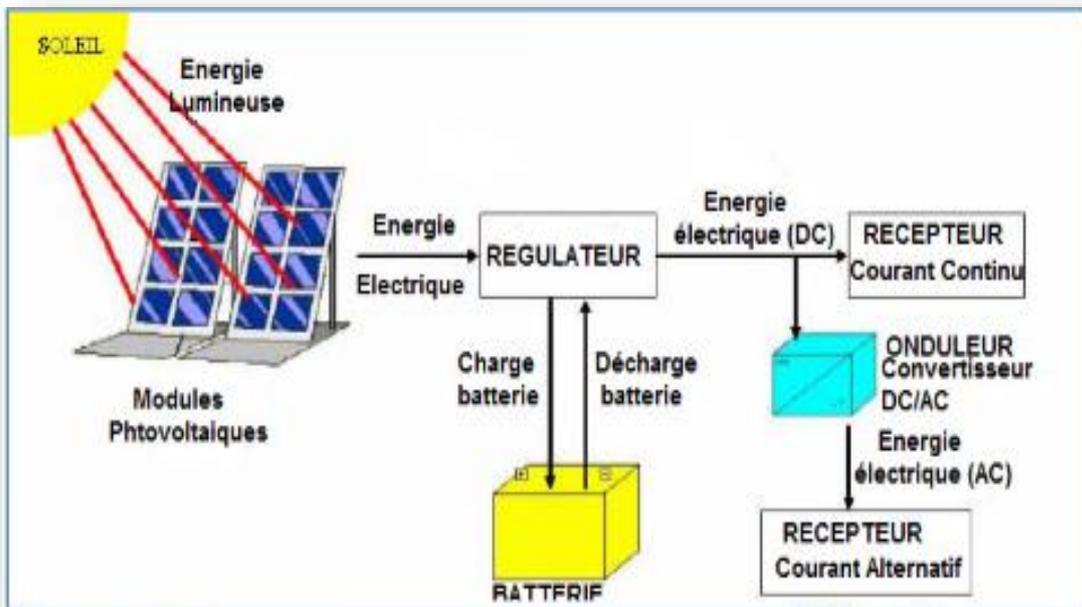


Figure 1.10 Système photovoltaïque plus détaillé. [27]

### 1.3.6 (5- Les différents types des systèmes photovoltaïques

On distingue deux types de systèmes PV :

- Systèmes PV autonomes
- Système à injection au réseau.

#### a) Systèmes autonomes

Un système photovoltaïque (PV) est dit autonome lorsque la charge est passive (par exemple : lampes, moteurs, etc.). Un système PV autonome est entièrement indépendant d'autres sources d'énergie et fournit de l'électricité à l'utilisateur sans être connecté au réseau électrique (voir Fig. 1.11). Dans la plupart des cas, un système autonome nécessite des batteries ou d'autres moyens de stockage pour l'utilisation pendant les périodes où l'énergie solaire n'est pas disponible (par exemple, la nuit ou par temps nuageux). Les systèmes PV autonomes sont généralement utilisés pour alimenter des maisons isolées, des îles, des zones montagneuses ainsi que des applications telles que la surveillance à distance et le pompage de l'eau (dans certains cas).

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils représentent la source d'énergie électrique la plus économique. Actuellement, ces systèmes sont particulièrement compétitifs dans les zones isolées, éloignées du réseau électrique, et où les besoins en énergie sont relativement faibles (généralement moins de 10 kWc). [28]

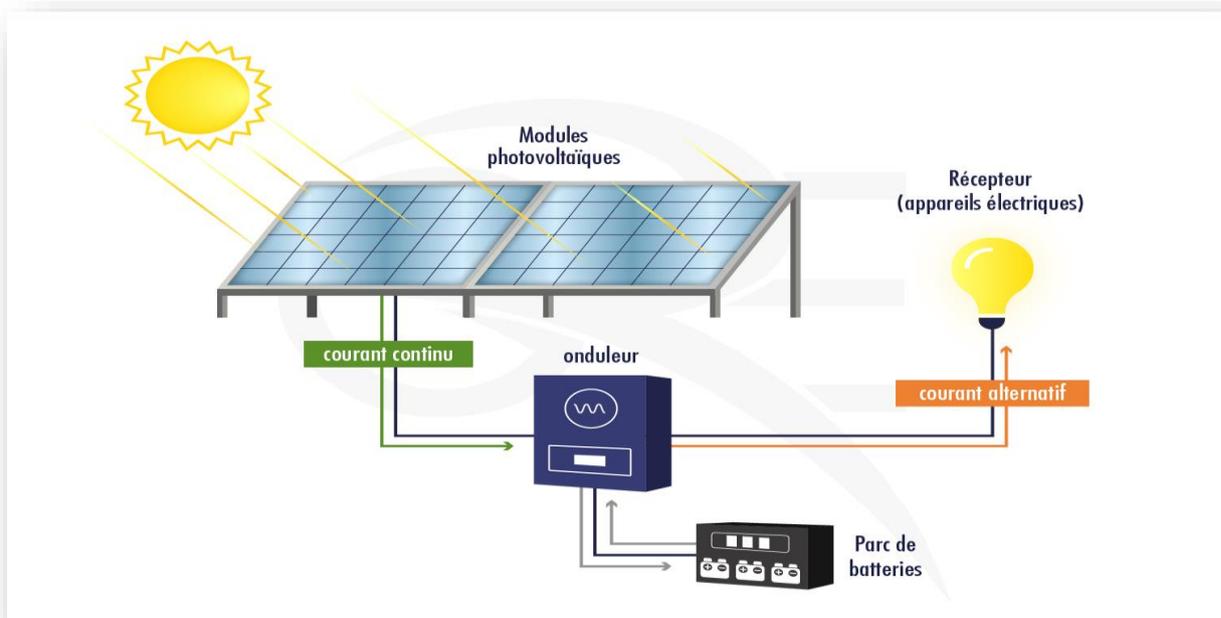


Figure 1.11 Schéma d'un système autonome (hors-réseau). [29]

**a) 1. les systèmes PV autonomes**

On distingue deux types :

- Les systèmes au fil du soleil
- Les systèmes avec stockage

**A) Les systèmes au fil du soleil**

Les systèmes au fil du soleil sont des systèmes sans stockage qui utilisent directement l'énergie solaire sans aucune source d'appoint. Ils se classent en deux catégories selon la nature de la charge à alimenter : les systèmes à courant continu et les systèmes à courant alternatif. L'application la plus courante de ces systèmes est le pompage photovoltaïque, qui se divise également en deux types : les systèmes de pompage PV à courant continu et ceux à courant alternatif. Pour ces derniers, un onduleur est nécessaire. La Fig. 1.12.b présente un exemple de système de pompage PV où le conditionneur d'énergie peut être un convertisseur DC/DC, un convertisseur DC/AC, ou les deux, Bien que ces systèmes soient simples, leur principal inconvénient est l'interruption de l'alimentation en l'absence de soleil. En général, ces systèmes utilisent un autre moyen de stockage, tel que des réservoirs d'eau, pour le pompage PV. [30]

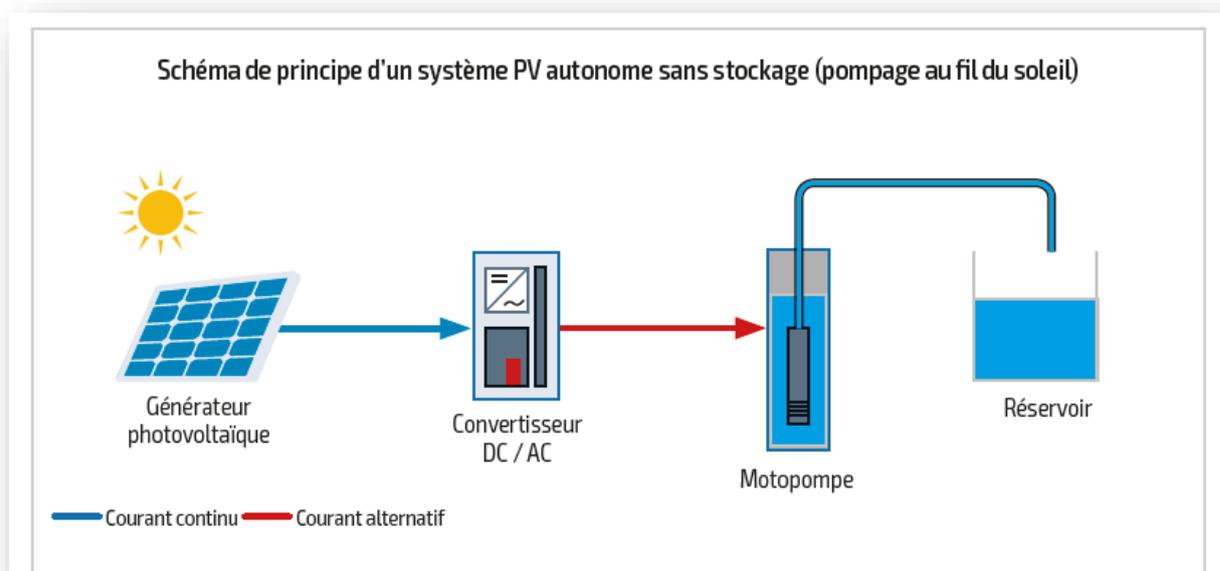


Figure 1.12 Système de Pompage PV au fil de soleil. [31]

## B) Les systèmes avec stockage

Les systèmes avec stockage sont équipés de moyens de stockage de l'énergie. Ces systèmes permettent d'alimenter les charges pendant les périodes de faible irradiation (passage des nuages) ou en l'absence totale de soleil (la nuit). Le système de stockage emmagasine l'énergie excédentaire produite par les panneaux photovoltaïques lorsqu'elle est disponible, puis la restitue durant les périodes de déficit énergétique. Un exemple typique de ces systèmes est l'alimentation électrique des maisons situées dans des sites isolés. [32]

### 1.3.6 (6-Systèmes PV connecté aux réseaux

Un système photovoltaïque (PV) raccordé au réseau est un système dont la charge est partiellement ou totalement alimentée par le réseau électrique. Autrement dit, le générateur PV injecte sa puissance dans le réseau électrique via un onduleur. [33]

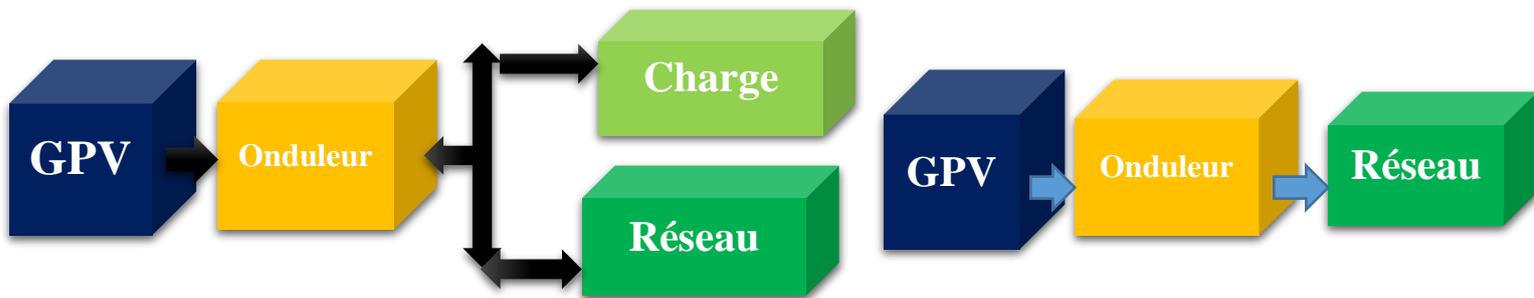


Figure 1. 13(a) Injection partielle

Figure1 .13(b) Injection totale

### 1.3.7 Irradiation solaire

Contrairement à la conduction et à la convection, le transfert de chaleur par rayonnement n'exige pas la présence d'un support matériel solide ou fluide. Le terme "rayonnement électromagnétique" englobe tous les échanges pouvant se produire lorsque les corps sont séparés par le vide ou par tout autre milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques. L'irradiation solaire est un rayonnement électromagnétique avec des longueurs d'onde variant de 0,2 à 0,4  $\mu\text{m}$ , couvrant de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible. C'est la source principale de l'énergie solaire. La quantité d'irradiation solaire reçue par une surface au sol dépend principalement de la période (conditions météorologiques), du lieu (altitude et latitude) et de l'environnement (conditions atmosphériques). Située entre les latitudes 20° et 37° dans l'hémisphère Nord, l'Algérie reçoit un maximum d'énergie lors du solstice d'été (21 ou 22 juin) et un minimum lors du solstice d'hiver (21 ou 22 décembre). [34]

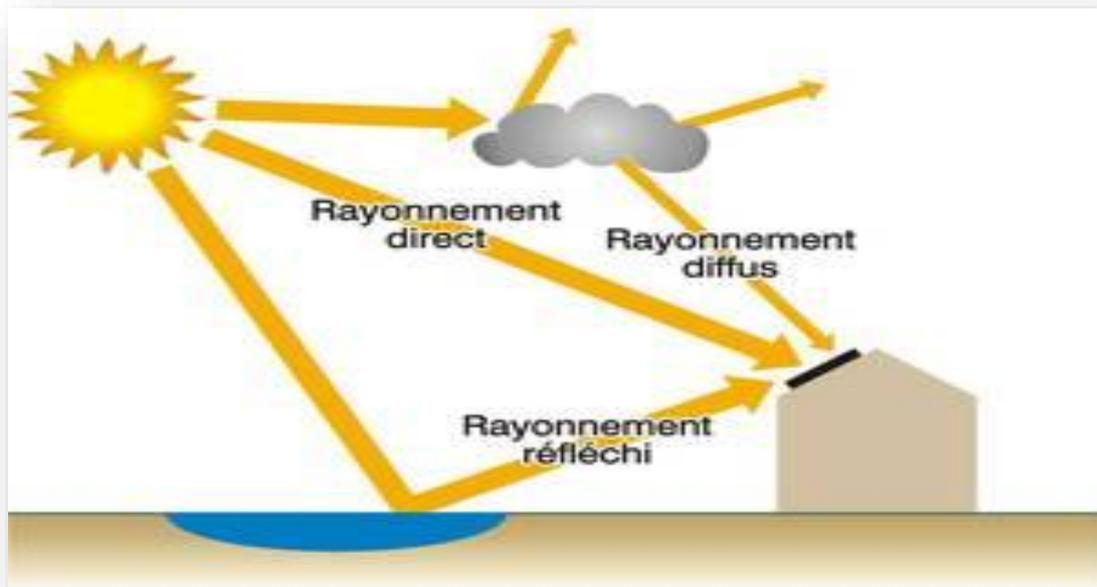


Figure 1.14 Composantes du rayonnement solaire au sol. [35]

### 1.3.8 Angle d'inclinaison des panneaux solaires (photovoltaïques)

Le rendement des centrales solaires dépend de plusieurs facteurs, dont l'angle d'incidence des rayons du soleil. Idéalement, cet angle, c'est-à-dire l'angle formé par le plan des panneaux solaires et les rayons solaires, devrait toujours être de  $90^\circ$  pour que les panneaux captent le maximum de photons. Cependant, cette situation est rarement atteinte.

D'une part, l'angle d'incidence varie tout au long de la journée : il augmente progressivement depuis le lever du soleil jusqu'à midi, lorsqu'il atteint son point culminant, puis diminue jusqu'au coucher du soleil. D'autre part, il n'atteint presque jamais  $90^\circ$ . [36]

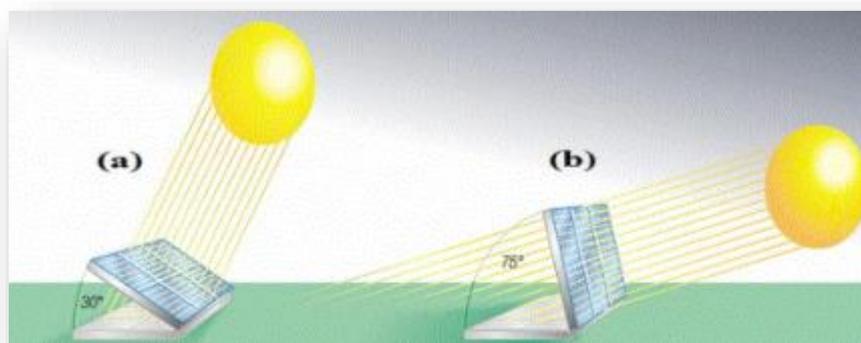


Figure 1.15 L'angle d'incidence maximal (a) en été ; (b) en hiver. [37]

### 1.3.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

En général, l'énergie solaire photovoltaïque est largement acceptée par la société. Cependant, il est important de connaître les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire afin de renforcer ou de nuancer notre opinion. [38]

#### 1.3.9 (1- Avantages :

Les avantages de l'énergie solaire dépendent de différents facteurs. Selon les caractéristiques de l'installation solaire, certains avantages seront observés par rapport à d'autres sources d'énergie.

- ✚ L'énergie solaire est une énergie renouvelable et, par conséquent, elle est inépuisable ;
- ✚ Faible pollution et respect l'environnement ;
- ✚ Installation et maintenance avec un cout réduit ;
- ✚ Favorable pour les sites isolés ;
- ✚ L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de son propriétaire ;
- ✚ Dans les cas de l'énergie solaire photovoltaïque connectée au réseau, la surproduction de panneaux solaires peut être vendue à des moments où il n'est pas nécessaire de consommer toute l'énergie produite.

#### 1.3.9 (2- inconvénients

Selon les caractéristiques de l'installation solaire, les inconvénients de l'énergie solaire peuvent varier en importance. Malgré ses nombreux avantages, il est crucial de les analyser soigneusement, car certains peuvent rendre une installation solaire impraticable. Voici les principaux aspects à considérer :

- **Efficacité énergétique** : L'énergie solaire a une efficacité relativement faible comparée à d'autres sources d'énergie. Le rapport entre l'énergie reçue par un panneau solaire et la quantité d'énergie produite est inférieur à celui d'autres sources, comme l'énergie nucléaire.
- **Coût économique** : Les coûts associés à l'énergie solaire peuvent être élevés, particulièrement pour les grandes centrales solaires. Bien que l'énergie solaire

thermique, qui utilise des propriétés de température et de thermodynamique, puisse offrir de meilleures performances que le photovoltaïque, l'investissement initial reste souvent important.

- **Dépendance à la météo** : Les performances de l'énergie solaire dépendent fortement des conditions météorologiques. Dans les régions où le ciel est souvent nuageux, cette source d'énergie devient moins viable.
- **Limitation du temps solaire** : Dans certaines régions, la durée d'ensoleillement est limitée. Par exemple, dans les pays nordiques, les journées d'hiver offrent très peu d'heures solaires utiles. De plus, l'inclinaison du soleil varie au cours de l'année, affectant la performance des panneaux solaires.
- **Limites de stockage de l'énergie** : Il est nécessaire de stocker l'énergie, car les périodes de production ne coïncident pas toujours avec les périodes de besoin. Les solutions de stockage, comme les batteries solaires et les réservoirs d'eau chaude, ont encore un rendement relativement faible.
- **Impact environnemental** : Bien que l'énergie solaire soit considérée comme une énergie propre, les panneaux solaires contiennent des éléments qui peuvent être nocifs pour l'environnement.

Il est essentiel de prendre en compte ces inconvénients lors de la planification d'une installation solaire pour déterminer sa faisabilité et son efficacité globale.

## 1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension des énergies renouvelables, en mettant particulièrement l'accent sur l'énergie solaire. Nous avons également rappelé quelques notions fondamentales sur le rayonnement solaire.

## Chapitre 02

### Modélisation de la chaîne photovoltaïque

#### 2.1 Introduction

Dans ce deuxième chapitre, nous allons modéliser chaque élément de la chaîne de production photovoltaïque. Nous débuterons par la présentation d'un modèle mathématique du panneau photovoltaïque, en particulier le modèle à une seule diode et par la suite, nous réaliserons une étude détaillée du hacheur Boost, qui jouera le rôle d'étage d'adaptation pour notre système.

#### 2.2 Modélisation de la cellule photovoltaïque

D'après la littérature, on distingue principalement deux modèles de cellules photovoltaïques [39] : le modèle à deux diodes et le modèle dit "standard" à une diode. Les circuits électriques équivalents de ces modèles sont respectivement illustrés, par la figure 2.1

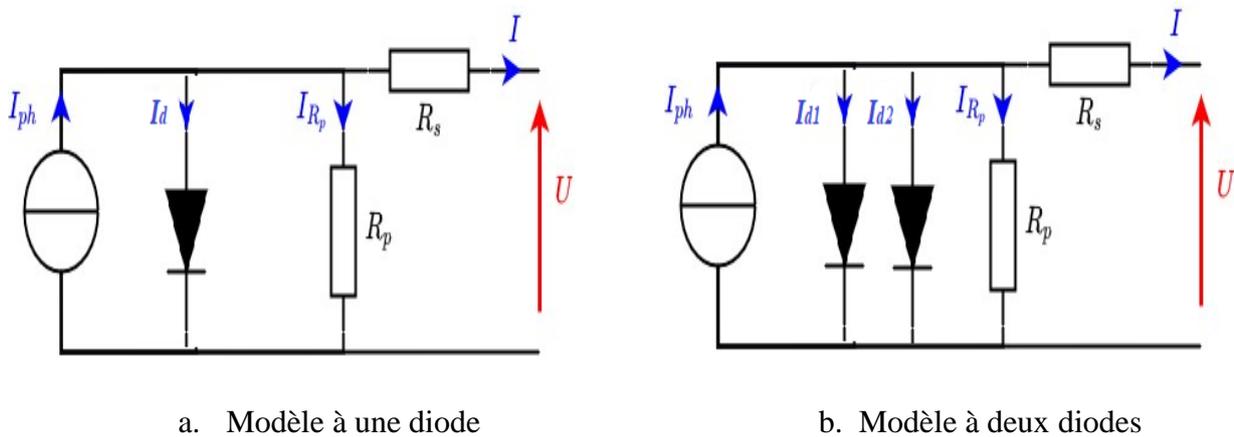


Figure 2.1 Modèle de la cellule photovoltaïque.

En plus de différencier le nombre de diodes, ces modèles incluent une source de courant qui génère le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) de la cellule, ainsi qu'une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance montée en parallèle ( $R_p$ ).

##### 2.2.1 Modèles électriques équivalents

Pour les modèles mentionnés précédemment, l'expression du courant de sortie  $I$  est formulée par l'équation suivante :

$$I = I_{cc} - I_{01} \left[ e^{\frac{q(V_{pv} + I.R_s)}{n_1.k.T}} - 1 \right] - I_{02} \left[ e^{\frac{q(V_{pv} + I.R_s)}{n_2.k.T}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I.R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Avec,

$I_{cc}$  : courant de court-circuit de la cellule (A) ;

$I_{01}$  : courant de saturation de la diode  $D_1$  (A) ;

$I_{02}$  : courant de saturation de la diode  $D_2$  (A) ;

$K$  : constante de Boltzmann ( $1.381 * 10^{-23} J / K$ ) ;

$T_c$  : température effective de la cellule ;  $T(K) = 273 + T$  (°C)

$q$  : charge de l'électron ( $1.602 \times 10^{-19} C$ ) ;

$n_1$  : facteur de non idéalité de la jonction de la diode  $D_1$  ;

$n_2$  : facteur de non idéalité de la jonction de la diode  $D_2$  ;

$I$  : courant fourni par la cellule (A) ;

$V_{pv}$  : tension aux bornes de la cellule (V).

- **Facteur d'idéalité**

Le facteur d'idéalité  $n$  est compris entre 1 et 2 :

$$1 \leq n \leq 2 \quad (2.2)$$

Le facteur d'idéalité est établi à "1" pour une diode idéale, mais peut augmenter jusqu'à 2 lorsqu'on prend en compte le courant de génération-recombinaison. L'expression de  $n$  est déduite en dérivant le logarithme népérien de  $I$  par rapport à  $V$ .

$$n = \frac{1}{V_T} \cdot \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (2.3)$$

Dans la suite, de ce mémoire, on va considérer le modèle à une seule diode car c'est celui qui est le plus souvent utilisé.

### 2.2.2 Modèle à une diode

Le modèle "standard" à une diode, établi par Shockley pour une seule cellule photovoltaïque, décrit le fonctionnement d'un module photovoltaïque. Il est étendu à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques connectées en série et en parallèle. Ce modèle présente une diode de moins par rapport au modèle à deux diodes, ce qui

signifie qu'il comporte une exponentielle de moins dans l'équation caractéristique courant-tension [40].

Le circuit électrique représentant la cellule photovoltaïque, illustré dans la figure (2.2), comprend une source de courant qui modélise le flux lumineux, avec des pertes simulées par deux résistances : une résistance parallèle et une résistance série. Ce modèle implique donc cinq paramètres :  $n$ ,  $I_s$ ,  $R_p$ ,  $R_s$  et  $I_s$ . Ce modèle est souvent désigné sous le nom de 1LM5P (Modèle à mécanisme agrégé avec 5 paramètres)

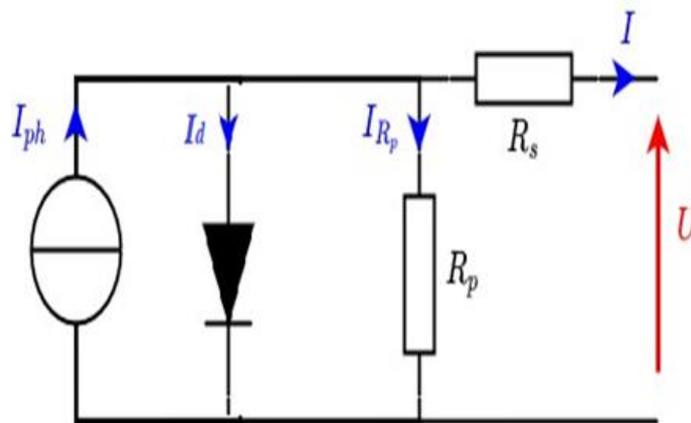


Figure 2.2 Schéma équivalent du modèle à une seule diode. [41]

Où,

$R_s(\Omega)$  : résistance parallèle qui caractérise les courants de la jonction ;

$R_p(\Omega)$  : résistance série qui caractérise les diverses résistances des contacts et connexion.

De la figure 2.2, on peut déduire :

$$I = I_{cc} - I_d - I_{R_p} \quad (2.4)$$

$I_{cc}$  (A) : Courant de court-circuit (Photovoltaïque) qui dépend de l'ensoleillement et de la température ;

$I_d$  (A) : Courant à travers la diode ;

$I_{R_p}$  (A) : Courant à travers la résistance parallèle.

Le courant de court-circuit à une température  $T$  donnée est exprimé par la relation suivante :

$$I_{cc(T)} = I_{cc(T_{ref})} [1 + k_i (T_c - T_{ref})] \quad (2.5)$$

Où,

$I_{cc}(T_{ref})$  : courant de court-circuit pour une température de référence mesurée sous une irradiation de  $1000W/m^2$  et qui est donné par la fiche technique du constructeur ;

$T_{ref}$  : température de référence de la cellule exprimée en Kelvin ( $^{\circ}K$ ) correspondante à la température standard  $25^{\circ}C$ , soit  $T_{ref}(^{\circ}K)=25+273.15^{\circ}K$ ;

$k_i$  : coefficient de température du courant  $I$  exprimé en ( $\%/^{\circ}C$ ) (selon la fiche du constructeur) ;

Le courant  $I_{cc}$  est proportionnel à l'irradiation ( $E$ ). Il s'exprime par la relation suivante :

$$I_{cc}(E) = I_{cc}(E_0) \cdot \frac{E}{E_0} \quad (2.6)$$

Où,  $E_0$  est l'irradiation nominale standard égale à  $1000W/m^2$

L'expression (2.4) peut s'écrire

$$I = I_{cc} - I_d - \frac{V_{pv} + I.R_s}{R_p} \quad (2.7)$$

Avec,

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{q}{n.k.T_c}(V_{pv} + I.R_s)} - 1 \right) \quad (2.8)$$

En supposant que la cellule photovoltaïque soit de bonne qualité, la  $R_p$  aura une valeur très élevée et donc le troisième terme de la partie droite de l'équation (2.7) peut être négligé.

$$\left( \frac{V_{pv} + I.R_s}{R_p} \approx 0 \right)$$

Donc, l'équation courant-tension de la cellule s'écrit :

$$I = I_{cc} - I_0 e^{\frac{q}{n.k.T_c}(V_{pv} + I.R_s)} \quad (2.9)$$

Ainsi, on retient de (2.9) que :

$$e^{\frac{q}{n.k.T_c}(V_{pv}+I.R_s)} \gg 1 \tag{2.10}$$

D'autre part, les grandeurs caractéristiques telles que le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) peuvent être déterminées à partir de la caractéristique courant-tension ( $I=f(V)$ ). La tension  $V_{co}$  est soit fournie par le fabricant, soit mesurée à l'aide de relevés effectués sous un éclairage de 1000 W/m<sup>2</sup>.

Cependant, la forme de la caractéristique courant-tension ( $I=f(V)$ ) d'une cellule PV pour une température et une irradiation fixes est illustrée par la figure (2.3).

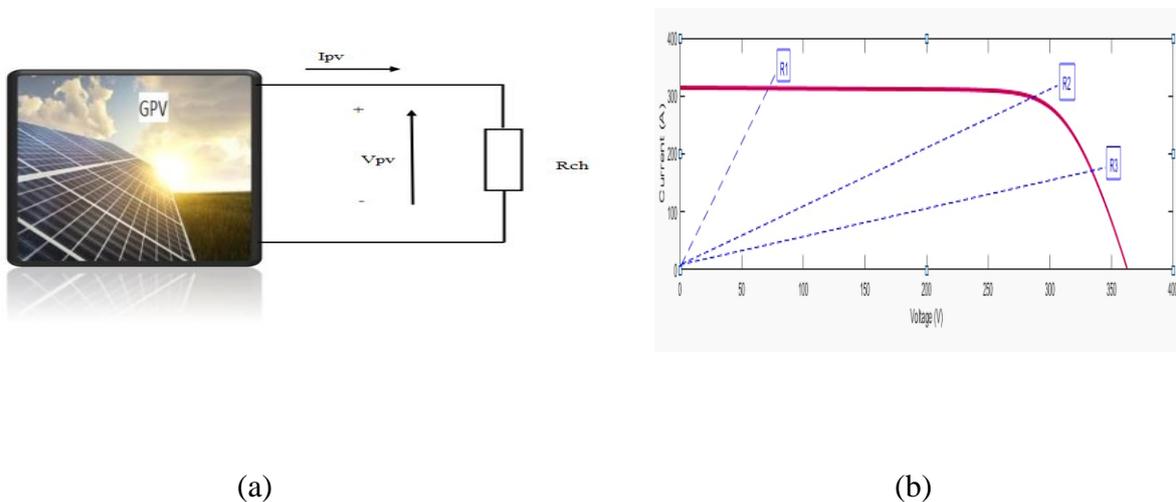


Figure 2.3 Circuit de connexion et caractéristique courant-tension  $I=f(V)$ .

Lorsqu'une résistance de charge ( $R_{ch}$ ) est connectée aux bornes du panneau solaire, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection des caractéristiques du panneau et de la charge. Si la charge est purement résistive ( $R_{ch}=R_1, R_2, \dots$ ), sa caractéristique est une droite.

$$\frac{I}{V_{pv}} = \frac{1}{R_{ch}} \quad (\text{cas de la figure 2.3.b}).$$

Avec :

- **Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )** : c'est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit soit  $V=0$  (pratiquement  $I_{cc}=I$  ;
- **Tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ )** : c'est la tension aux bornes de la cellule lorsque le courant de la cellule PV est nul. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$V_{co} = \left(\frac{nkT_c}{q}\right) \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) = V_{th} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad (2.11)$$

Où,

$$V_{th} = \left(\frac{nkT}{q}\right) \quad (2.12)$$

C'est la tension thermique.

- **Puissance maximale ( $P_{max}$ )** : elle est associée à une tension maximale ( $V_{max}$ ) à une intensité maximale ( $I_{max}$ ) et que sous les conditions normalisées d'irradiation standard (Température=25° et une Irradiation = 1000 W/m<sup>2</sup>), elle est dite puissance crête.

### 2.2.3 Facteur de forme (FF)

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que la cellule peut délivrer, notée  $P_{max}$ , et la puissance représentée par le rectangle formé par  $V_{co}$  et  $I_{cc}$  (puissance optimale). [42]

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (2.13)$$

Plus la valeur de ce facteur est élevée, plus la puissance exploitable sera grande. Les meilleures cellules auront donc été optimisées grâce à des compromis technologiques pour se rapprocher le plus possible des caractéristiques idéales.

Pour les cellules ayant un rendement moyen, le FF = 0.7 à 0.85.

### 2.2.4 Rendement de la conversion ( $\eta$ )

Le rendement de la conversion ( $\eta$ ) désigne le rendement énergétique maximum. Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale ( $P_{max}$ ) fournie par la cellule et la puissance du rayonnement solaire incident ( $P_i$ ).

$$\eta = \frac{P_{Max}}{P_{inc}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{S \cdot E_0} = \frac{V_{co} \cdot I_{cc} \cdot FF}{P_{inc}} \quad (2.14)$$

Avec ( $P_{inc}$ ) est égale au produit de l'éclairement par la surface totale des photopiles.

Il est généralement compris dans l'intervalle [43] :  $14\% \leq \eta \leq 16\%$ .

## 2.3 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série ou en parallèle constitue un générateur photovoltaïque. Lorsque les cellules sont connectées en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant ainsi la tension totale du générateur. En revanche, lorsque les cellules sont connectées en parallèle, c'est le courant qui augmente.

### 2.3.1 Association des cellules photovoltaïques en série

L'association de  $n_s$  cellules en série, comme illustré à la figure 2.4, permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Dans cette configuration, les cellules sont traversées par le même courant, et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue en additionnant les tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation ci-dessous résume les caractéristiques électriques d'une association en série de  $n_s$  cellules [43].

$$I_{ccns} = I_{cc} \text{ et } V_{ccns} = n_s * V_{co}. \quad (2.15)$$

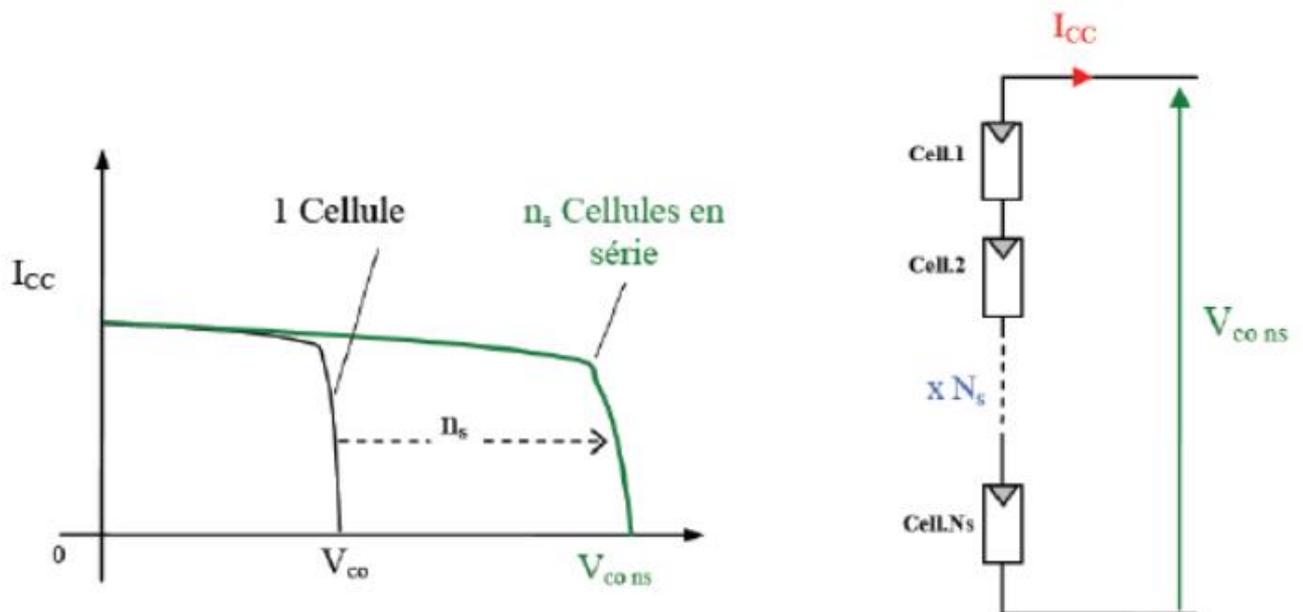


Figure 2.4 Caractéristique résultante d'une connexion de  $n_s$  cellules en série. [44]

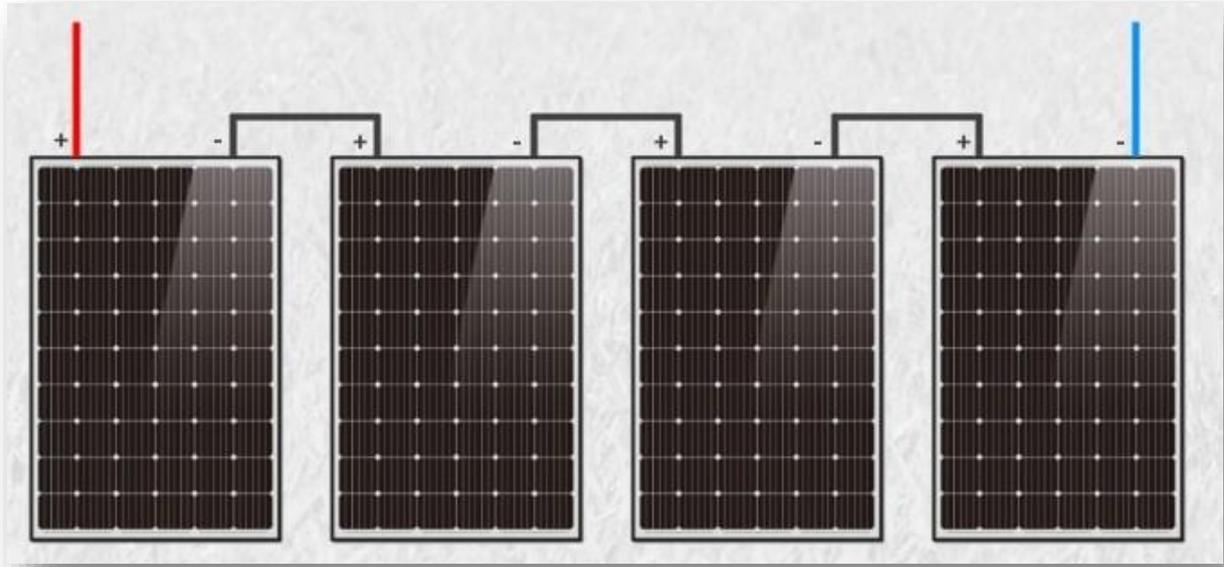


Figure 2.5 Branchement en série des panneaux PV. [45]

### 2.3.2 Association des cellules photovoltaïques en parallèle

L'association parallèle de  $n_p$  cellules, comme illustré à la figure 2.6, permet d'augmenter le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension, et la caractéristique résultante de ce groupement est obtenue en additionnant les courants [46].

$$I_{ccnp} = n_p * I_{cc} \text{ et } V_{conp} = V_{co} \quad (2.16)$$

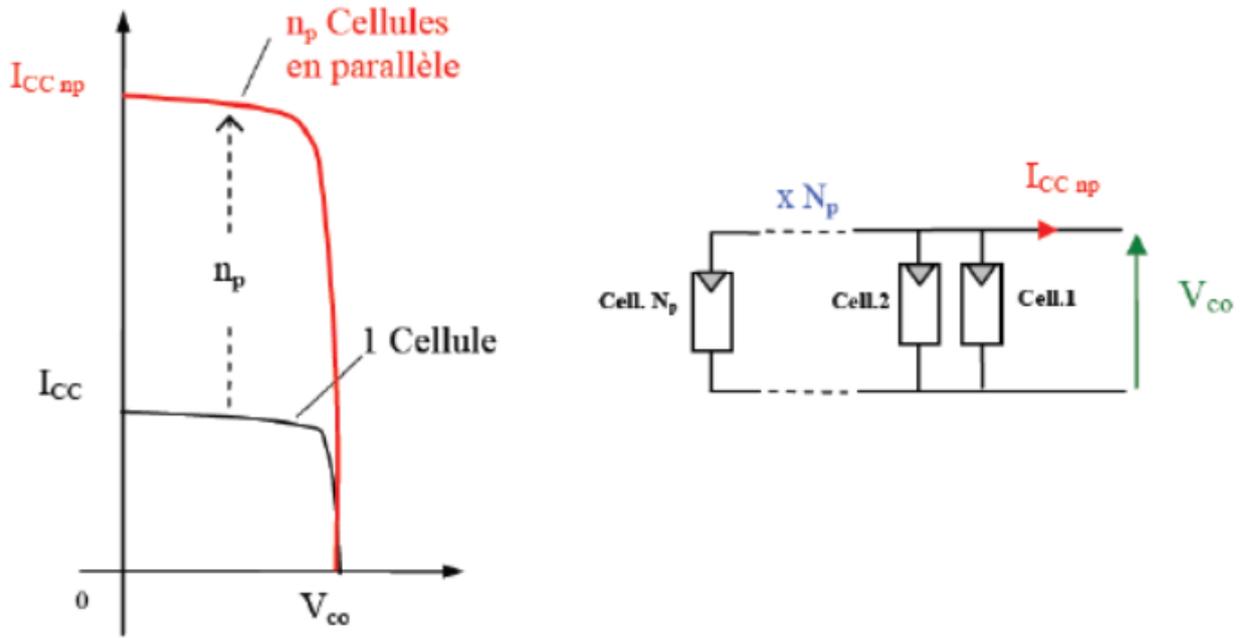


Figure 2.6 Caractéristiques résultant d'un groupement de  $n_p$  cellules en parallèle. [47]

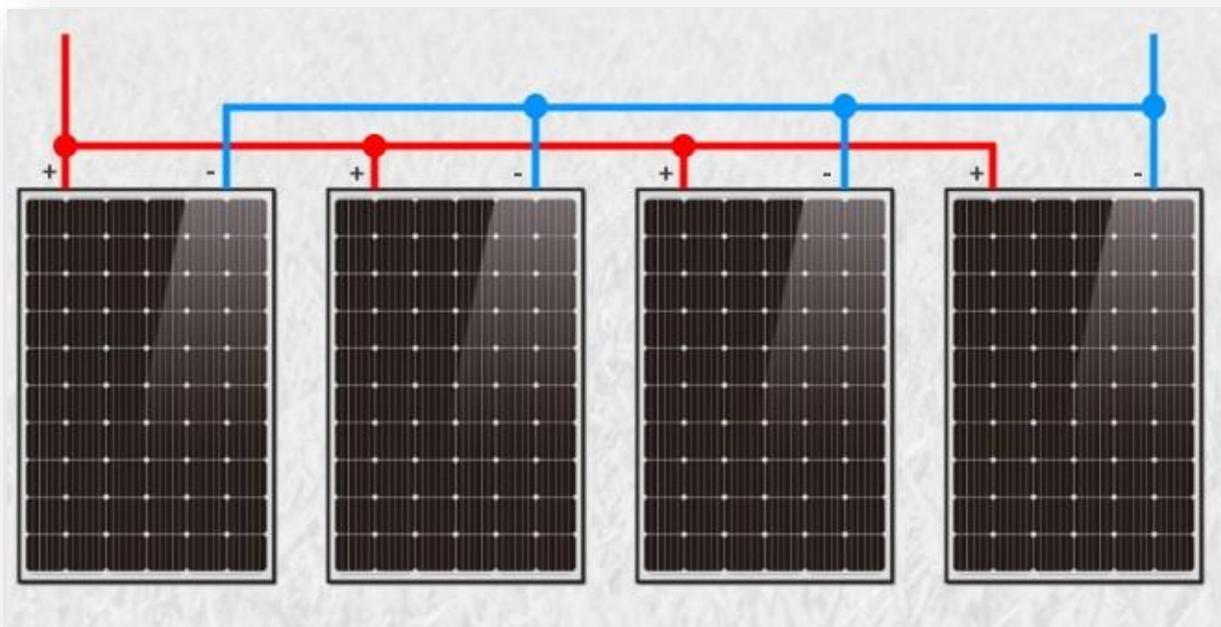


Figure 2.7 Branchement en série des panneaux PV. [48]

## 2.4 Modélisation des convertisseurs statiques(Hacheur)

Les hacheurs sont des convertisseurs continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une grande souplesse et un rendement élevé (figure 2.8). Un hacheur est composé de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans des conditions idéales, ces composants ne consomment aucune puissance active, ce qui explique le bon rendement des hacheurs.

Un hacheur permet de réguler le transfert d'énergie d'une source continue vers la charge avec une efficacité élevée. Selon sa structure, il peut fonctionner comme un abaisseur ou un élévateur de tension et, dans certaines conditions, renvoyer de l'énergie à l'alimentation [49].

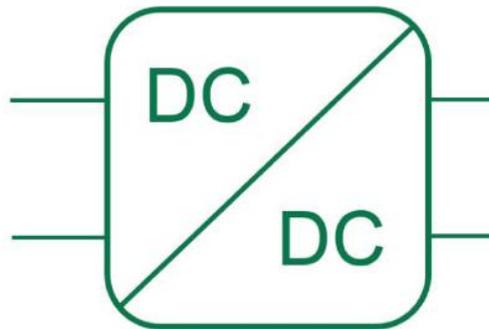


Figure 2.8 Symbole d'un convertisseur DC-DC. [50]

### 2.4.1 Le rapport cyclique

Les semi-conducteurs d'un hacheur DC/DC nécessitent une commande de la base. Cependant, les périodes d'ouverture ( $T_o$ ) (bloqué : non passant) et de fermeture ( $T_f$ ) (passant) pour une période du cycle de commande ( $T_c$ ) définit le rapport cyclique ( $D$ ).

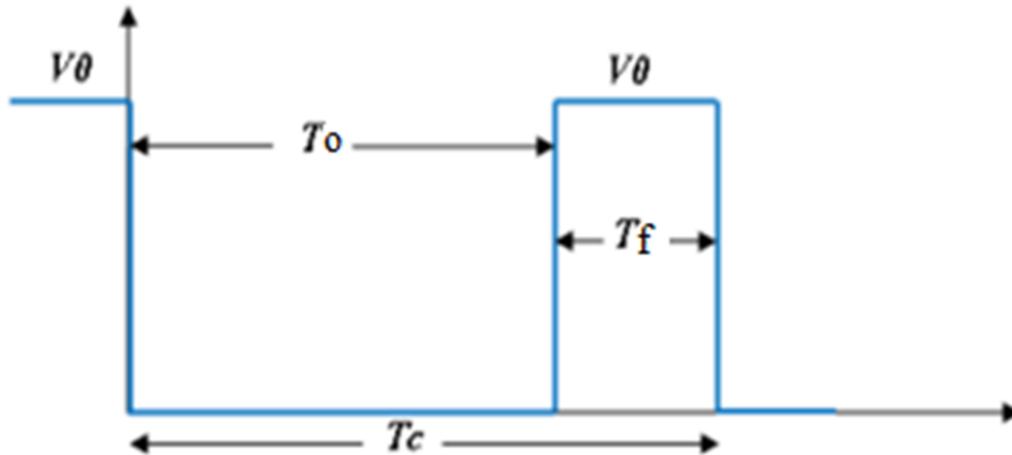


Figure 2.9 Périodes d'ouverture et fermeture d'un interrupteur.

Le rapport cyclique est alors exprimé par la relation suivante :

$$D = \frac{T_f}{T_c} \in [0 \ 1] \quad (2.17)$$

#### 2.4.2 Types des convertisseurs DC-DC (Hacheur)

Les convertisseurs statiques DC /DC sont des dispositifs électroniques utilisés pour changer un niveau de tension continue (DC) en un autre niveau de tension continue.

Ils sont largement utilisés dans les applications qu'il est nécessaire de réguler la tension pour des systèmes électriques , des batteries et d'autres dispositifs nécessitant une alimentation stable voici les principaux types de convertisseurs DC/DC .

- **Hacheur série (Buck / abaisseur)**

Ce type de convertisseur réduit la tension d'entrée pour fournir une tension de sortie plus faible.

Son rapport cyclique = D.

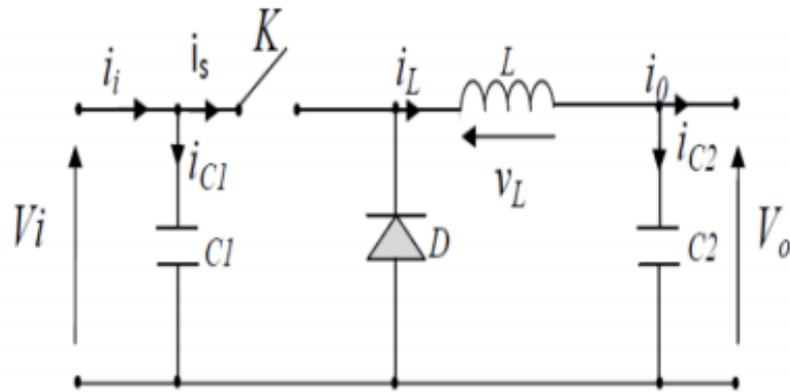


Figure 2.10 Modèle hacheur série. [51]

- **Hacheur parallèle survolteur (Boost-converter)**

Également connu sous le nom de "Boost" ou hacheur élévateur, ce type de hacheur est souvent représenté par son schéma de principe de base, où  $K$  désigne le semi-conducteur, comme illustré dans la figure 2.11. Son application courante consiste à augmenter la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée [52].

Son rapport cyclique =  $\frac{1}{1-D}$ .

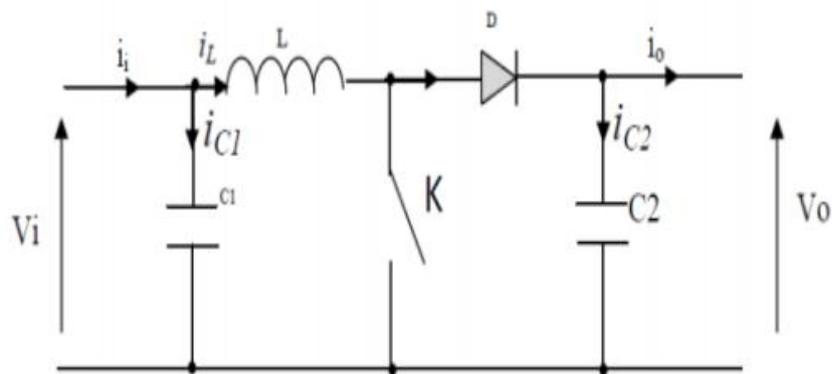


Figure 2.11 Modèle hacheur parallèle. [53]

- **Hacheur série parallèle (Buck-Boost)**

Ce convertisseur peut à la fois abaisser ou élever la tension d'entrée pour fournir une tension de sortie qui peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée.

Son rapport cyclique =  $\frac{-D}{1-D}$ .

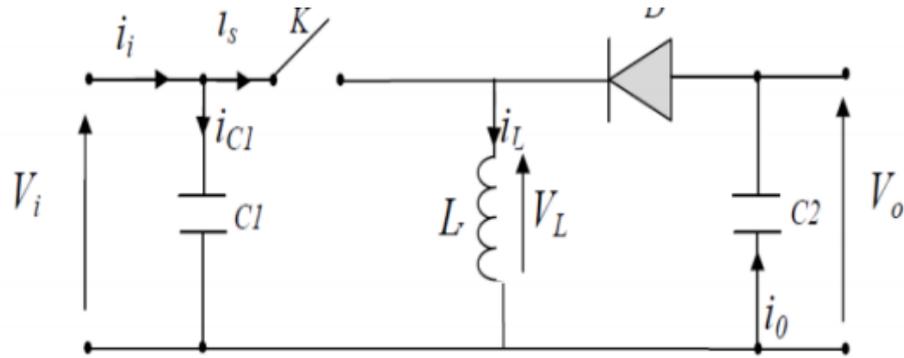


Figure 2.12 Modèle hacheur série parallèle. [54]

Les lois de Kirchhoff sont appliquées aux circuits équivalents du convertisseur survolteur (Boost). La figure 2.13 illustre les configurations correspondant aux deux phases de fonctionnement.

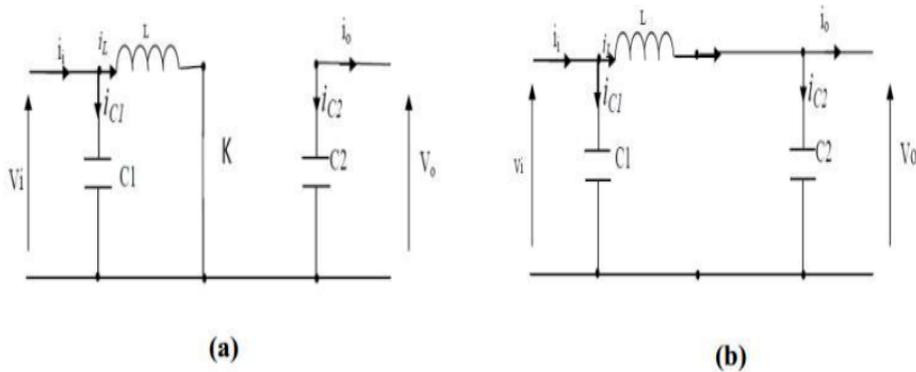


Figure 2.13 Schémas équivalents du hacheur survolteur : K (a) : fermé, (b) : ouvert. [55]

**1ère phase :**

Elle correspond à la séquence de fonctionnement ( $0 \leq t \leq DT_s$ )

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -v_i(t) \end{cases} \quad (2.18)$$

**2ème phase :**

Elle correspond à la seconde séquence de fonctionnement ( $1-DT_s$ ) soit ( $DT \leq t \leq T$ )

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{cases} \quad (2.19)$$

Pour obtenir une représentation dynamique valable pour toute la période  $T_s$ , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt} T_s + \frac{dx}{dt} (1-D) T_s \quad (2.20)$$

En appliquant la relation (2.20) aux systèmes d'équations (2.18) et (2.19), on obtient les équations gouvernant le système sur une période complète. Ainsi, on obtient le modèle approximatif du convertisseur survolteur [56].

$$\begin{cases} \dot{i}_l = i_i - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ \dot{i}_0 = (1-D)i_l - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ v_i(t) = l \frac{di_l}{dt} + (1-D)v_o \end{cases} \quad (2.21)$$

**2.4.3 Simulation du convertisseur Boost**

Le convertisseur DC-DC agit comme un adaptateur entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge continue (DC) afin de maximiser le transfert de puissance. Le point de fonctionnement est ainsi maintenu près du point de puissance maximale (PPM), quelles que soient les conditions d'exploitation, telles que l'irradiation, la température ou les variations de charge, etc.) .

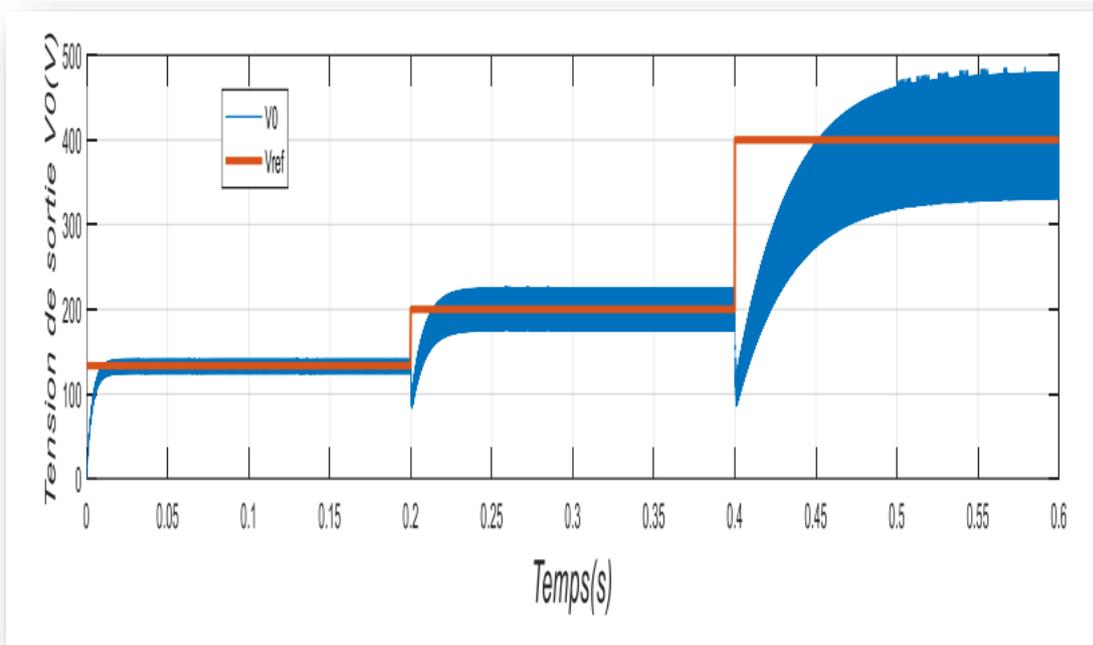
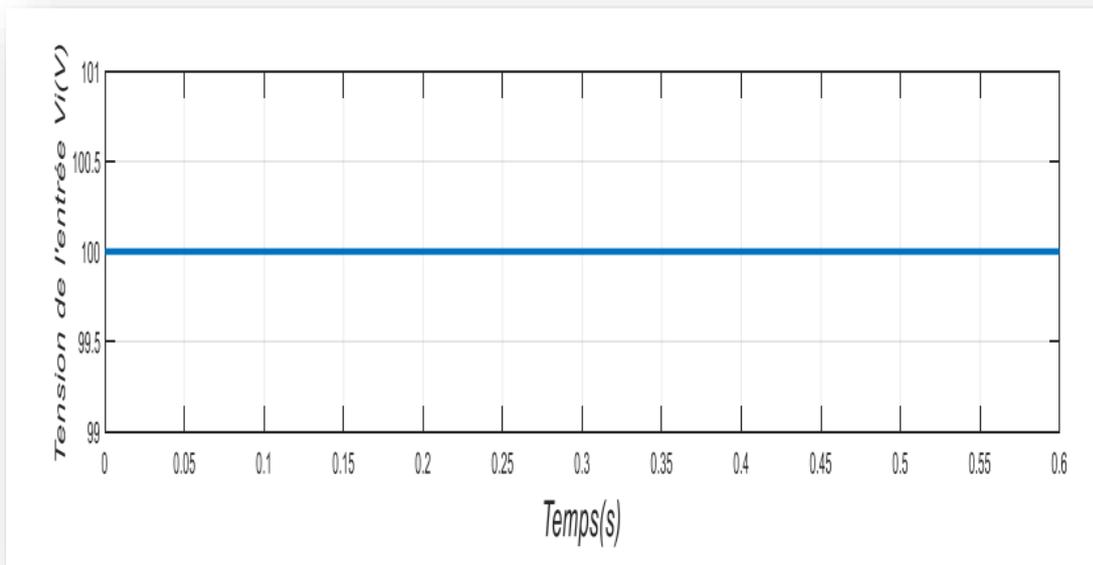


Figure 2.14 Tension d'entrée ( $V_i$ ) et tension de sortie ( $V_0$ ) d'un hacheur Boost.

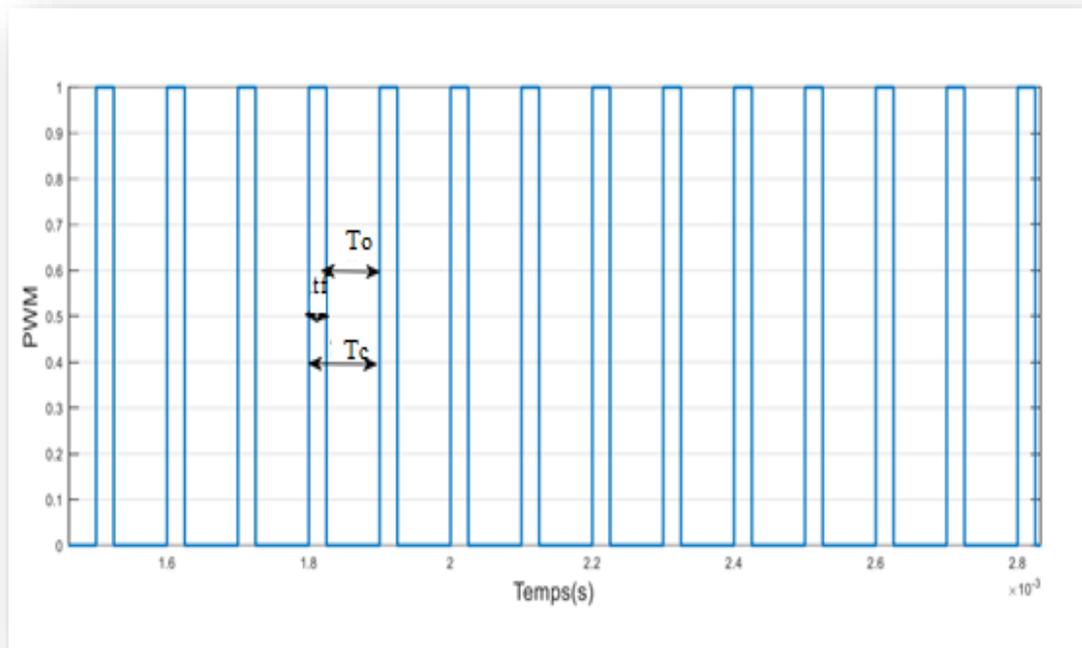


Figure 2.15 Commande PWM avec  $D=0.25$ .

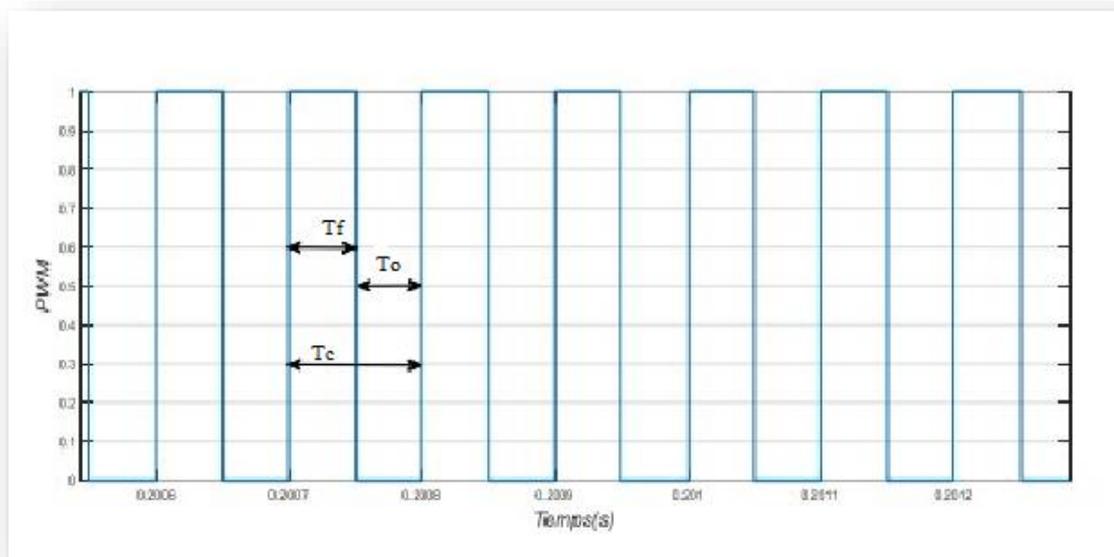
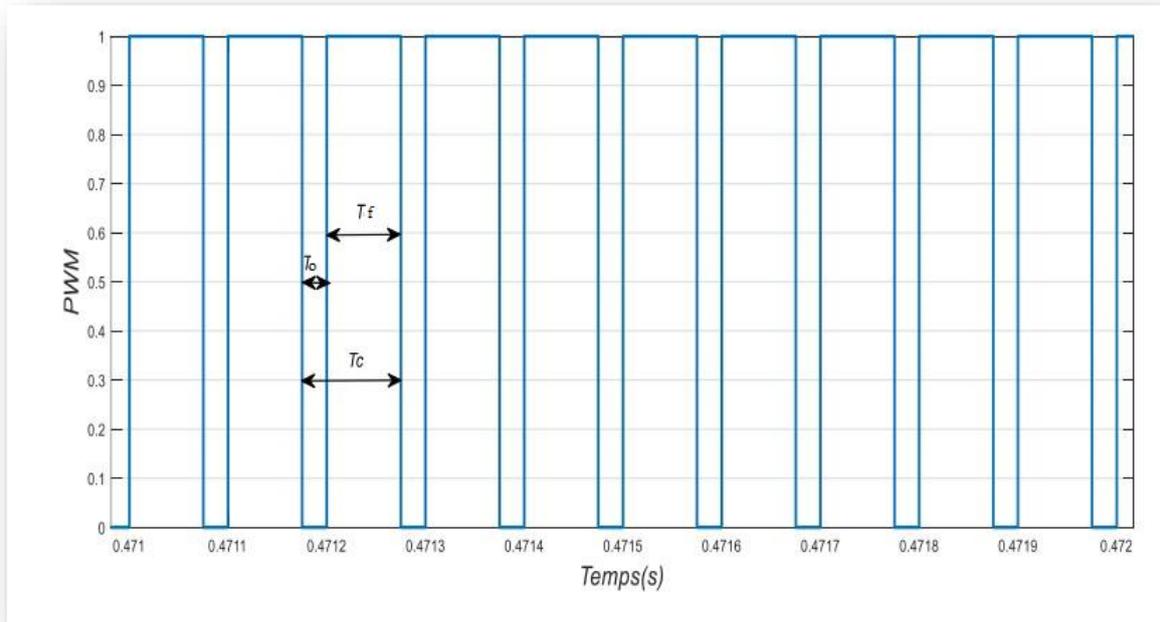


Figure 2.16 Commande PWM avec  $D=0.5$ .

Figure 3.17 Commande PWM avec  $D=0.75$ .

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré en détail la modélisation des cellules photovoltaïques et l'intégration des hacheurs Boost pour optimiser la conversion d'énergie.

La modélisation des cellules photovoltaïques nous a permis de comprendre les caractéristiques électriques et les performances sous différentes conditions météorologiques (irradiation, température).

En parallèle, l'étude du hacheur Boost a mis en lumière son rôle crucial dans l'augmentation de la tension continue fournie par les cellules photovoltaïques.

---

## Chapitre 03

### Commande du panneau

#### 3.1 Introduction

Actuellement, en raison du rendement relativement bas des dispositifs de conversion photon-électron (entre 12 et 17 %), [57] il devient crucial d'améliorer ces systèmes pour qu'ils fonctionnent en continu à leur pleine capacité. La conversion de l'énergie des photons en électricité est fortement influencée par des facteurs tels que l'irradiation, la température et la charge connectée au générateur photovoltaïque. Une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, offre une solution. Elle permet de maintenir le générateur photovoltaïque en fonctionnement optimal, produisant constamment sa puissance maximale. Ainsi, quelles que soient les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur ajuste le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ).

Dans ce chapitre, nous allons exposer l'architecture d'une chaîne de conversion photovoltaïque, MPPT, ainsi que le principe de la poursuite du Point De Puissance Maximale (PPM) avec des différentes méthodes.

#### 3.2 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

Le principe de la commande MPPT réside dans la recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en garantissant une adaptation optimale entre le générateur et sa charge afin de transférer la puissance maximale. La configuration de la chaîne de conversion photovoltaïque, en conjonction avec une commande MPPT, est illustrée dans la figure 3.1. Pour utiliser cette commande, on sélectionne une charge CC. La commande MPPT est nécessairement couplée à un hacheur pour la conversion solaire, de manière à ce que la puissance maximale ( $P_{max}$ ) fournie par le générateur photovoltaïque soit atteinte.

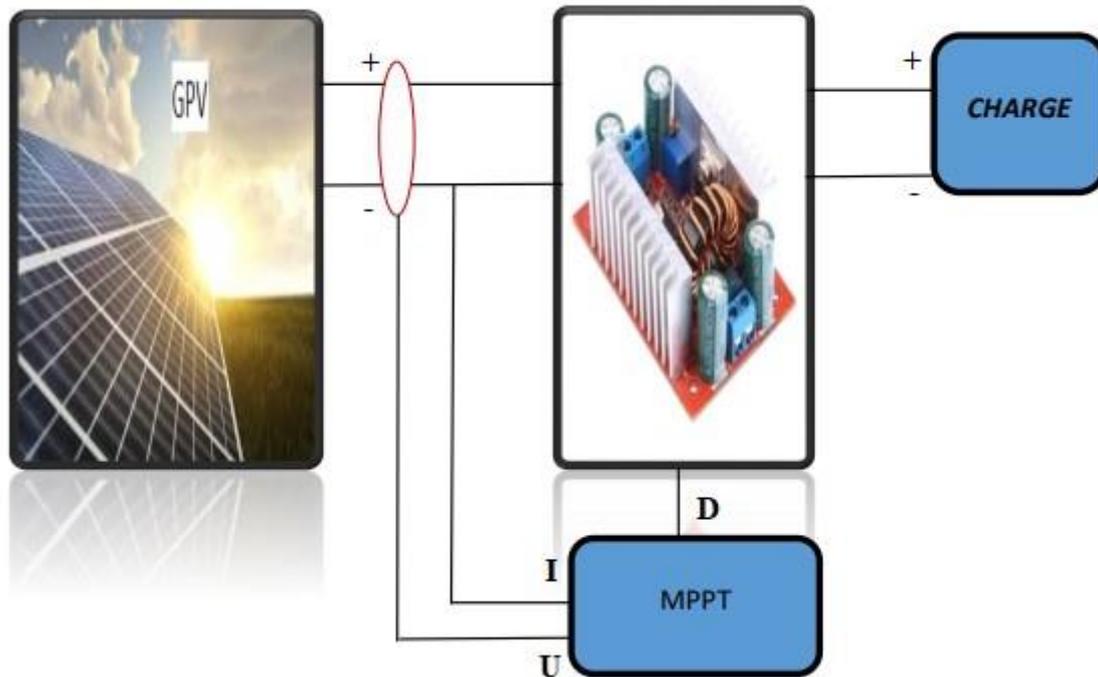


Figure 3.1 Chaîne de conversion photovoltaïque contrôlée par une MPPT.

On agissant sur le rapport cyclique, il est possible de contrôler le système PV afin d'optimiser la puissance du générateur, indépendamment des fluctuations de charge ou des conditions météorologiques.

Pour les deux scénarios de variation d'irradiation et de température, il suffit d'ajuster le rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximale. Ainsi, ajuster le rapport cyclique du hacheur est nécessaire pour maintenir et atteindre le point de puissance maximale dans toutes les conditions de fonctionnement du générateur PV. [58]

### 3.3 Les commandes MPPT classique

Il existe actuellement plusieurs types de commandes classiques effectuant la recherche du point de puissance maximale. Parmi les algorithmes les plus utilisés on peut citer : [59]

- algorithme Perturber et Observer (P & O) ;
- algorithme de la conductance incrémentale (INC) ;

### 3.3.1 Méthode de perturbe et d'observe (P&O)

En raison de sa simplicité et de sa facilité de mise en œuvre, la méthode P & O est l'une des approches les plus répandues pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT). Son principe repose sur l'introduction d'une perturbation dans la tension continue du générateur photovoltaïque, suivie de l'observation des variations de la puissance de sortie du générateur. Si la puissance augmente suite à cette perturbation incrémentielle, elle est maintenue dans la même direction ; sinon, elle est inversée. [60]

Lorsque la puissance augmente avec une perturbation incrémentielle, le point de fonctionnement est déplacé vers la gauche par rapport au point de puissance maximale. En revanche, si une perturbation incrémentielle entraîne une diminution de la puissance, cela indique que le point de fonctionnement est situé quelque part à droite du point de puissance maximale. Dans ce cas, la méthode inverse la perturbation pour produire une variation préjudiciable de la tension du générateur photovoltaïque afin de retrouver le point de puissance maximale. [61]

Une fois que le point de puissance maximale est atteint, le système opère à ce point, comme illustré dans la figure 3.2

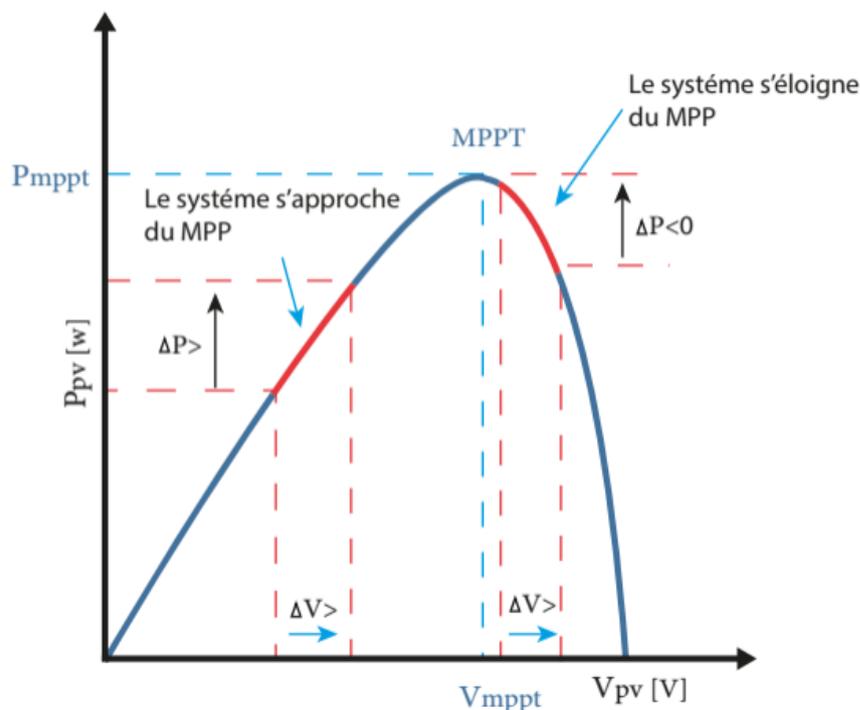


Figure 3.2 Principe de la technique P&O. [62]

L'organigramme de l'algorithme de la méthode P&O est représenté par la figure 3.3

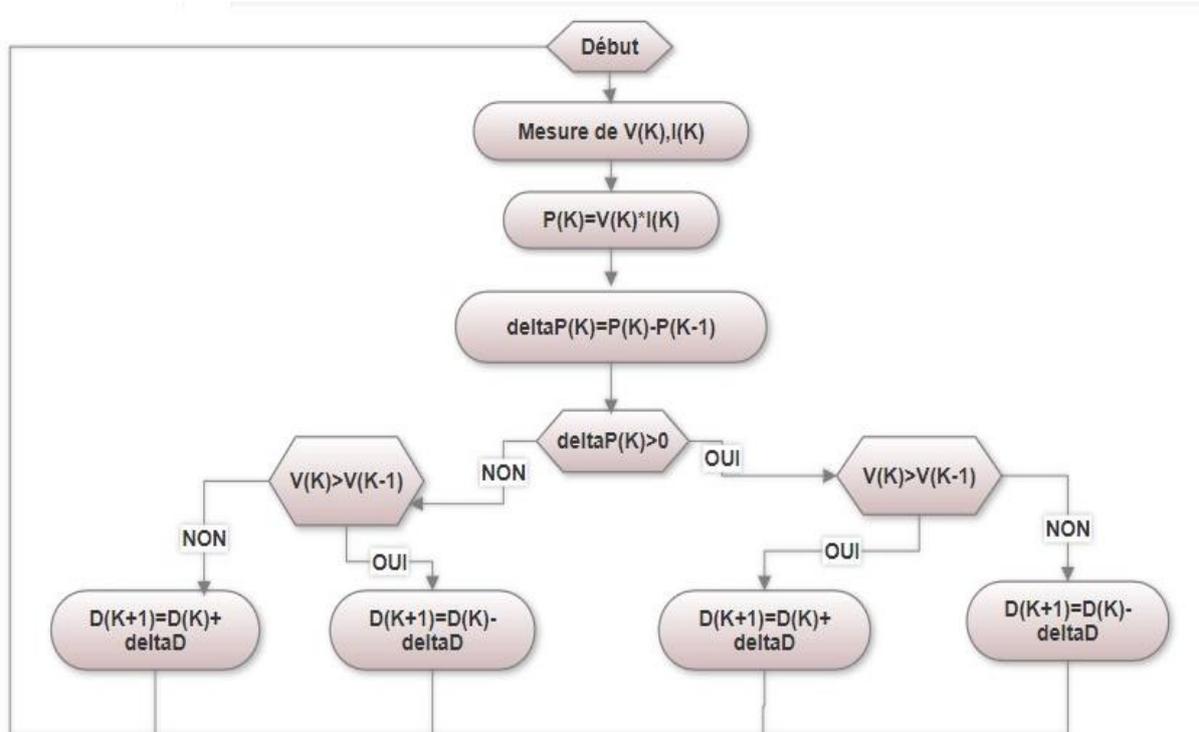


Figure 3.3 Organigramme de la méthode P&O.

- **Avantages et inconvénients de P&O**

- **Avantages [63]**

- Structure de régulation simple.
    - Nombre des paramètres mesures réduit.

- **Inconvénients [64]**

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques.

### 3.4 Effet de l'ombrage partiel sur le fonctionnement du générateur PV

Dans des conditions environnementales normales, la puissance produite par un système photovoltaïque est optimale. Cependant, si le générateur photovoltaïque est soumis à des contraintes environnementales telles que l'ombrage partiel, ses performances diminuent.

L'ombrage est causé par une répartition non uniforme d'irradiation sur la surface du générateur photovoltaïque. Cela peut être dû à des raisons atmosphériques (par exemple, à travers les nuages), à des obstacles dans l'environnement du générateur (comme des câbles, des branches, des bâtiments), ou à une accumulation partielle de poussière sur la surface du générateur.

L'ombre perturbe le fonctionnement normal du système photovoltaïque, car un module ombragé impacte négativement les autres modules qui reçoivent une irradiation uniforme. Parmi les problèmes rencontrés, on trouve la réduction du rendement du système PV et l'apparition de plusieurs maximums locaux de puissance et un seul point global. [65]



Figure 3.4 Ombrage partiel. [66]



Figure 3.5 Ombre de l'arbre aux panneaux solaire. [67]

### 3.5 Système de protection

Pour assurer une durée de vie prolongée à une installation photovoltaïque destinée à la production d'énergie électrique, il est nécessaire d'ajouter des protections électriques aux modules photovoltaïques. Ces protections préviennent les pannes destructrices causées par l'association en série des cellules et le parallélisme des modules. Actuellement, deux types de protections classiques sont couramment utilisés dans ces installations :

➤ **Diode by-pass**

La diode de dérivation (by-pass) est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules afin de protéger les cellules les plus faibles contre la polarisation inverse. [68] Ces diodes peuvent isoler un sous-ensemble de cellules lorsque l'irradiation est non uniforme. Cependant, l'activation de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur en entraînant une perte partielle de la production d'énergie et l'apparition de maximums locaux de puissance et un seul global. [69]

➤ **Diode anti-retour**

Les tensions produites par les strings peuvent varier. Lors de leur mise en parallèle pour former un champ, le string ayant la tension la plus faible peut absorber un courant inverse provenant des autres strings. Cela entraîne une baisse de la production d'énergie et peut causer des défaillances dans les modules traversés par ce courant inverse.

Pour empêcher la circulation des courants inverses, une diode anti-retour est installée à l'extrémité de chaque string. (Figure 3.6) [70]

La diode anti-retour empêche le passage de courants inverses dans les générateurs photovoltaïques. Ce phénomène peut se produire lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle ou lorsqu'une charge en connexion directe, telle qu'une batterie, peut passer du mode récepteur au mode générateur, par exemple pendant la nuit.

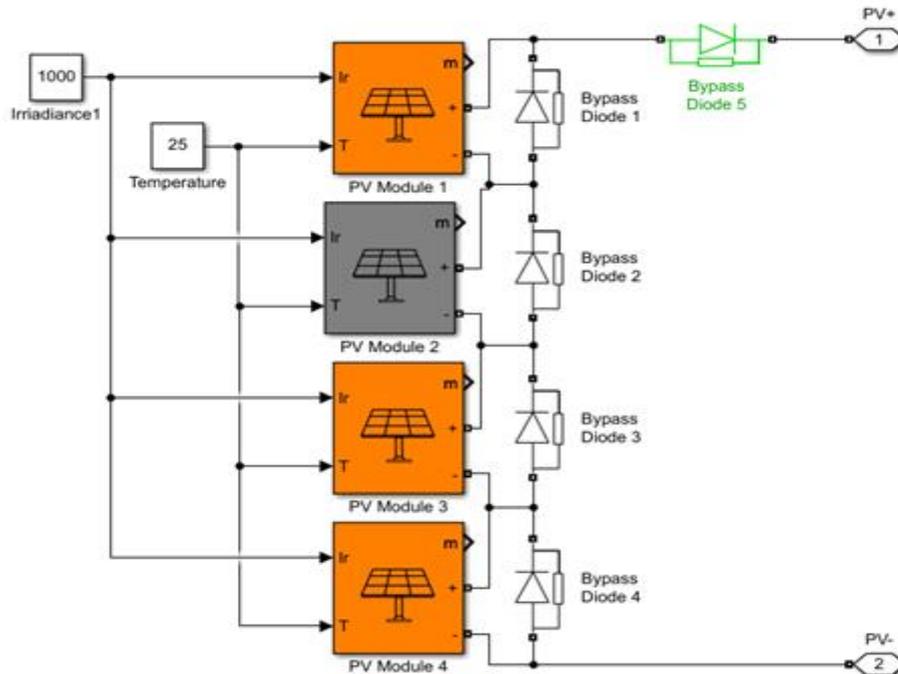


Figure 3.6 Schéma d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

## 3.6 Techniques méta-heuristiques

### 3.6.1 Technique d'essai d'optimisation des particules

#### Principe

L'optimisation par Essaim de Particules, connue sous le nom de Particle Swarm Optimization (PSO) en anglais, appartient à la famille des algorithmes évolutionnaires. Elle a été conceptualisée en 1995 par Russel Eberhart, ingénieur en électricité, et James Kennedy, socio-psychologue. [71]

Cet algorithme tire son inspiration des observations réalisées lors de simulations informatiques portant sur les vols en groupe d'oiseaux et les bancs de poissons, telles que celles menées par Reynold, Heppner & Grenander. En d'autres termes, il s'inspire étroitement des

comportements grégaires observés chez les oiseaux migrateurs. [72] Ces derniers, lorsqu'ils parcourent de longues distances pour migrer, chercher de la nourriture ou réaliser des parades aériennes, doivent optimiser leurs déplacements en fonction de divers paramètres tels que l'énergie dépensée et le temps nécessaire.

Comme par exemple la formation en forme de V présentée dans la figure 3.7 suivante :



Figure 3.7 Volée d'oiseaux en formation en V. [73]

Dans l'algorithme PSO, le groupe de particules est appelé un essaim. Chaque membre de cet essaim est désigné comme une particule. Le déplacement de chaque particule est gouverné par des règles et des conditions précises, qui sont influencées par les mouvements des autres particules de son voisinage. [74] Dans ce contexte, ce déplacement revêt une importance significative et doit être logique, constituant ainsi le principe fondamental du PSO. Son objectif est de rechercher un optimum au sein d'un voisinage donné. Le déplacement est influé par les trois composantes suivantes : [75]

- Une composante d'inertie : la particule s'efforce de suivre instinctivement son cap de déplacement.
- Une composante cognitive : la particule fait tout pour se diriger vers la meilleure position rencontrée jusqu'à présent.
- Une composante sociale : la particule s'inspire également de l'expérience, du parcours des autres particules, pour se diriger vers la meilleure position rencontrée par ses voisins.

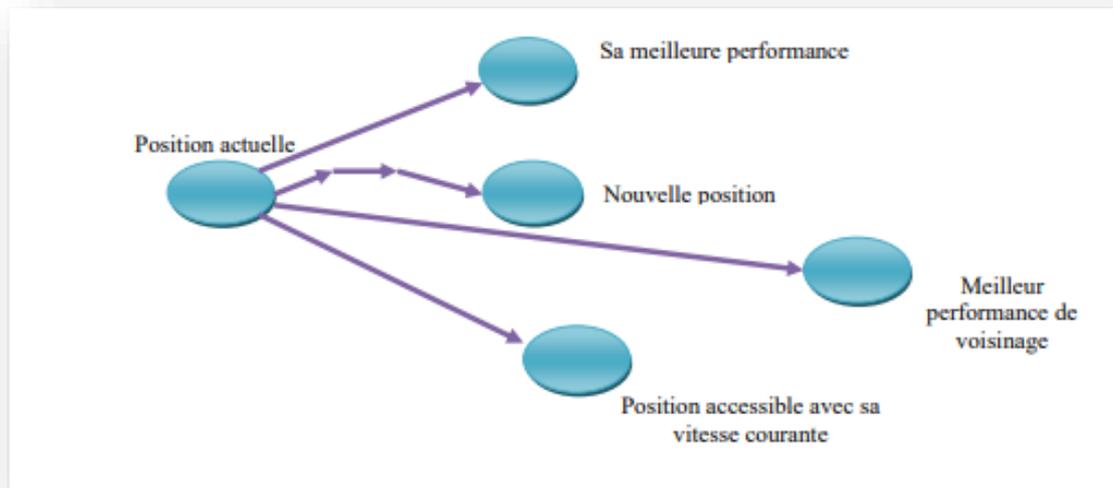


Figure 3.8 Stratégie de déplacement d'une particule. [76]

### Utilisation de la PSO pour le MPPT

Pour rechercher le point de puissance maximale, il est possible d'utiliser le rapport cyclique  $D$ , qui détermine le signal de commande du convertisseur DC/DC, en lieu et place de la position de la particule  $x$ . La modification du rapport cyclique  $\Delta D$  peut être considérée comme la vitesse de déplacement  $v$ . La fonction fitness serait alors la puissance associée à chaque rapport cyclique, en résumé : [77]

Les équations d'évaluation sont :

$$V_i(t+1) = w * (V_i(t) + c_1 * rand_1 * (PBest_i(t) - D_{fitness_i}(t)) + c_2 * rand_2 * (GBest_i(t) - P_i(t))) \quad (3.1)$$

Avec,

$$P_i(t+1) = P_i(t) + V_i(t+1) \quad (3.2)$$

Et,

$$D = PSO(V, I) \quad (3.3)$$

Avec,

P : rapport de vitesse ;

V : vitesse ;

PBest : meilleure position de la particule qui correspond à Local\_DBest ;

GBest: meilleure position du groupe de particules qui correspond àGlobal\_DBest;

rand : random variable ;

D : duty cycle ;

$c_1$  : poids de l'information locale ;

$c_2$  : poids de l'information global ;

w : poids d'inertie.

L'organigramme de l'algorithme PSO est représenté par la figure 3.9

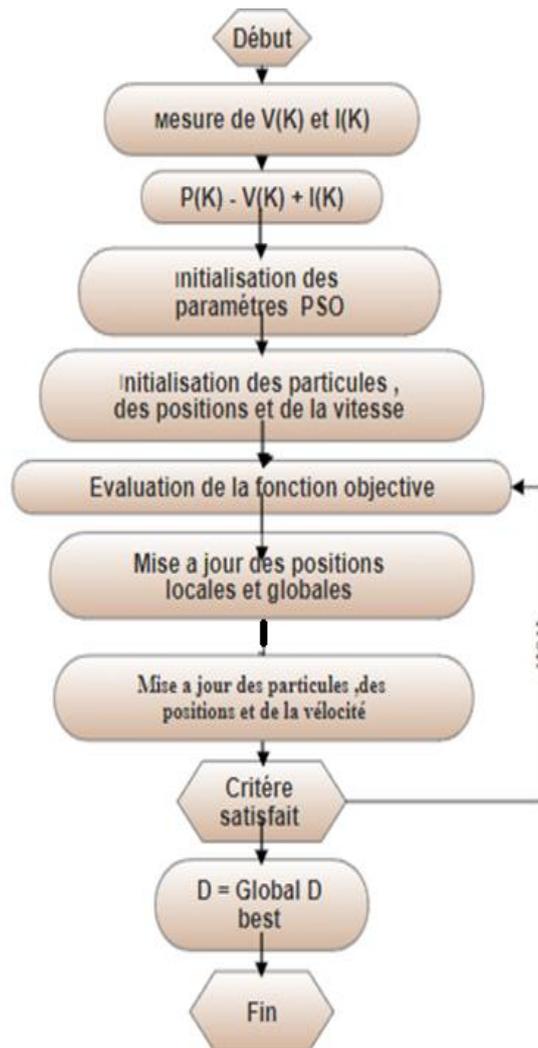


Figure 3.9 Organigramme de la MPPT par PSO.

### 3.6.2 Technique d'optimisation des loups gris

L'algorithme d'optimisation des loups gris (Grey Wolves Optimisation, (GWO)) a été conçu pour imiter la hiérarchie sociale des loups gris Figure 3.10, en particulier leurs comportements de chasse. [78] Comme illustré à la Figure 3.11, le GWO utilise quatre types de loups pour modéliser la population : Les loups  $\alpha$ , qui dirigent la chasse, sont considérés comme les meilleures solutions. Les loups  $\beta$  et  $\delta$ , représentant respectivement les deuxièmes et troisièmes meilleures solutions, assistent les loups  $\alpha$  dans la prise de décision. Les loups  $\omega$  sont les suiveurs. [79]

La Figure 3.12 montre comment les positions des loups gris sont mises à jour pendant la chasse.

Les principales phases sur lesquelles repose le GWO sont : [80]

- Reconnaissance de la position de la proie et encerclement de cette dernière.
- Harceler la cible jusqu'à ce qu'il cesse de bouger. Par conséquent, les positions de loups sont mises à jour pour converger vers les meilleures positions obtenues.
- Attaque du gibier.



Figure 3.10 Comportement de la meute des loups gris lors de la chasse : (A) Poursuite de la proie, (B-D) harcèlement et encerclement, (E) Position d'attaque. [81]

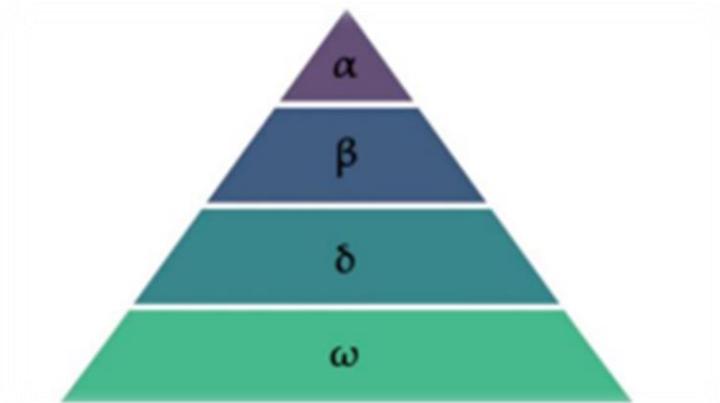


Figure 3.11 La hiérarchie des loups gris. [82]

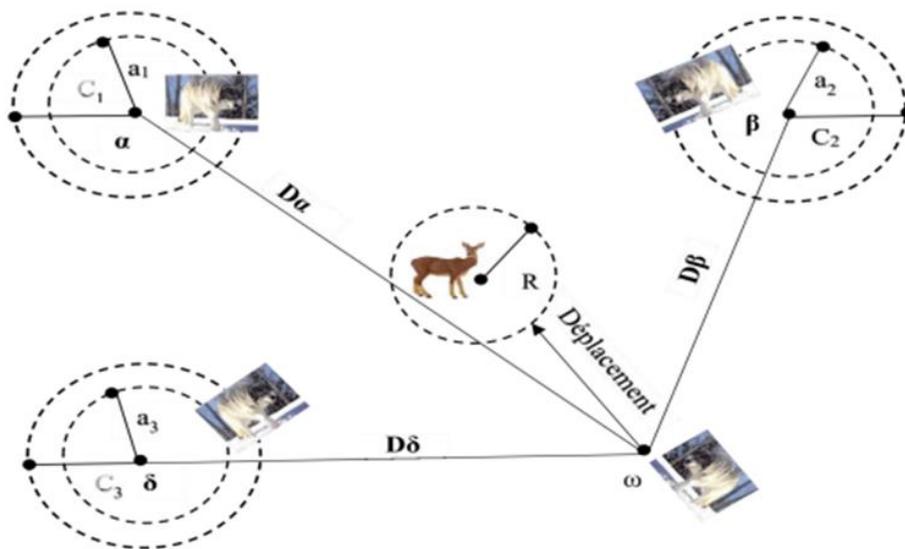


Figure 3.12 Mise à jour des positions des loups. [83]

L'organigramme de l'algorithme GWO est représenté par la figure 3.13

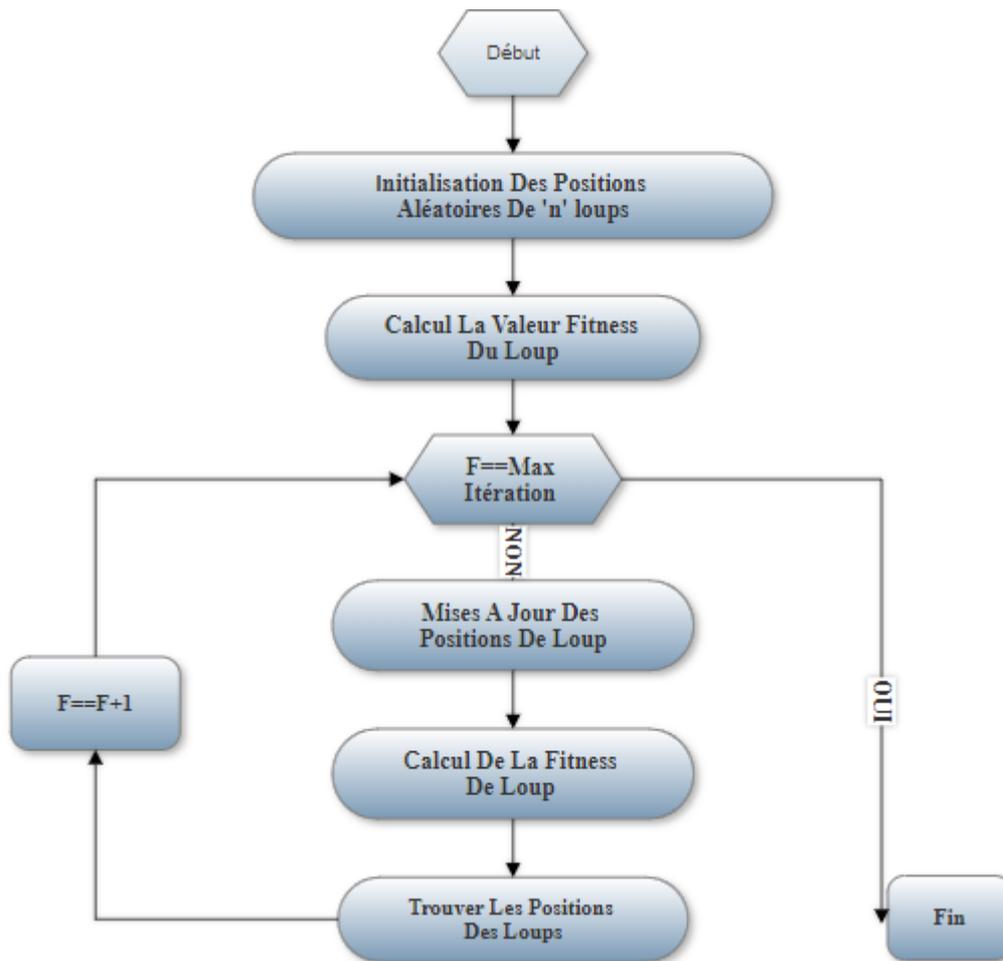


Figure 3.13 Organigramme de l'algorithme GWO.

L'algorithme GWO donné par la figure 3.13 se déroule selon les étapes suivantes [84] :

1. Initialisation aléatoire : Les positions des loups  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\delta$  sont initialisées de manière aléatoire dans l'espace de recherche, délimité par des valeurs minimales et maximales (Eq. (3.4)). Les positions initiales de chaque type de loup sont fixées à une valeur infinie (Eq. (3.5)).

$$\text{Alpha\_position} = \text{Beta\_position} = \text{Delta\_position} = \text{zeros} \quad (3.4)$$

$$\text{Alpha\_score} = \text{Beta\_score} = \text{Delta\_score} = \infty \quad (3.5)$$

2. Calcul de la fonction objective (fitness) : La fonction objective est choisie pour minimiser l'erreur, correspondant ainsi au fitness. Les scores Alpha\_score, Beta\_score et Delta\_score sont comparés au fitness comme suit :

- Si  $\text{Alpha\_score} < \text{fitness}$ , Alpha\_score est mis à jour à la valeur de fitness et la nouvelle position (Alpha\_position) du loup  $\alpha$  correspondra à ce score récent.

- Si  $\text{Alpha\_score} > \text{fitness}$  et  $\text{Beta\_score} < \text{fitness}$ ,  $\text{Beta\_score}$  est mis à jour à la valeur de  $\text{fitness}$  et la nouvelle position ( $\text{Beta\_position}$ ) du loup  $\beta$  correspondra à ce score récent.
  - Si  $\text{Alpha\_score} > \text{fitness}$ ,  $\text{Beta\_score} > \text{fitness}$  et  $\text{Delta\_score} < \text{fitness}$ ,  $\text{Delta\_score}$  est mis à jour à la valeur de  $\text{fitness}$  et la nouvelle position ( $\text{Delta\_position}$ ) du loup  $\delta$  correspondra à ce score récent.
3. Mise à jour des positions des loups, les positions des loups sont mises à jour à chaque itération.
  4. Calcul du fitness et mise à jour des positions : Cette étape est répétée à chaque itération jusqu'à atteindre le nombre maximal d'itérations ( $\text{Max\_itération}$ ), qui constitue le critère d'arrêt du GWO [85].

Le comportement d'attaque peut être présenté par les relations suivantes [86] :

$$\vec{e} = \left| \vec{c} \cdot \vec{x}_p(t) - \vec{x}_p(t) \right| \quad (3.4)$$

$$\vec{x}(t+1) = \vec{x}_p(t) - a \cdot \vec{e} \quad (3.5)$$

Où  $t$  est l'itération courante ;  $a$ ,  $c$  et  $e$  représentent le coefficient vecteurs ;  $x_p$  est le vecteur de position de la proie et  $x$  spécifie la vecteur de position du loup gris.

Les vecteurs  $a$  et  $c$  sont estimés comme suit :

$$\vec{a} = 2\vec{b} \cdot r_1 - \vec{b} \quad (3.6)$$

$$\vec{c} = 2 \cdot r_2 \quad (3.7)$$

Où, les composantes de  $b$  décroissent linéairement de 2 à 0 et  $r_1, r_2$  sont des vecteurs aléatoires appartenant au domaine  $[0, 1]$ .

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude sur la technique MPPT, en particulier les algorithmes P&O, PSO et GWO, utilisés pour déterminer le point de fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque (GPV), ainsi que l'effet de l'ombrage partiel et son influence sur le rendement du GPV et les solutions proposés par les algorithmes métha-heuristiques. Dans le prochain chapitre, nous présenterons une étude sur la simulation d'un système PV intégrant des commandes MPPT basées sur les algorithmes P&O, PSO et GWO.

## Chapitre 04

### Système photovoltaïque sous irradiation uniforme et non uniforme

#### 4.1 Introduction

La simulation sert à évaluer théoriquement les performances d'un système. Dans cette optique, nous pouvons utiliser cette méthode pour simuler un générateur photovoltaïque suivi d'un convertisseur DC/DC, et pour tester les commandes MPPT. Cette approche nous permet d'ajuster facilement les paramètres du système, tels que les conditions météorologiques, et d'observer l'impact des commandes sur le générateur photovoltaïque.

Les logiciels MATLAB et SIMULINK offrent un ensemble d'outils intégrés pour le traitement du signal, permettant la simulation de systèmes à la fois continus et discrets. Ainsi, ils sont particulièrement adaptés pour tester les commandes MPPT numériques. Ce chapitre se concentre sur la simulation et l'étude comparative des différentes méthodes de commande afin d'obtenir des résultats optimaux.

#### 4.2 Simulation du système photovoltaïque

La figure (4.1) présente le schéma synoptique du système photovoltaïque étudié, incluant tous les étages simulés : GPV, DC-DC et MPPT. Pour cette simulation, nous avons utilisé un module photovoltaïque User defined et un hacheur Boost avec les caractéristiques qui sont présenté dans le tableau (4.1)..

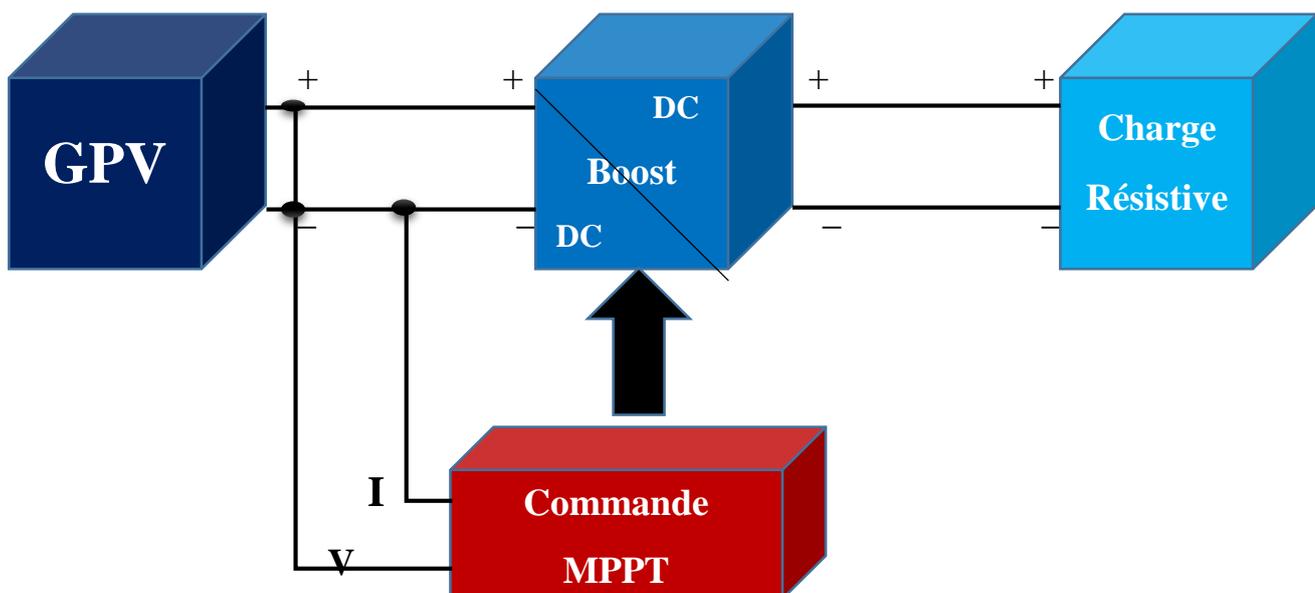


Figure 4.1 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec commande MPPT

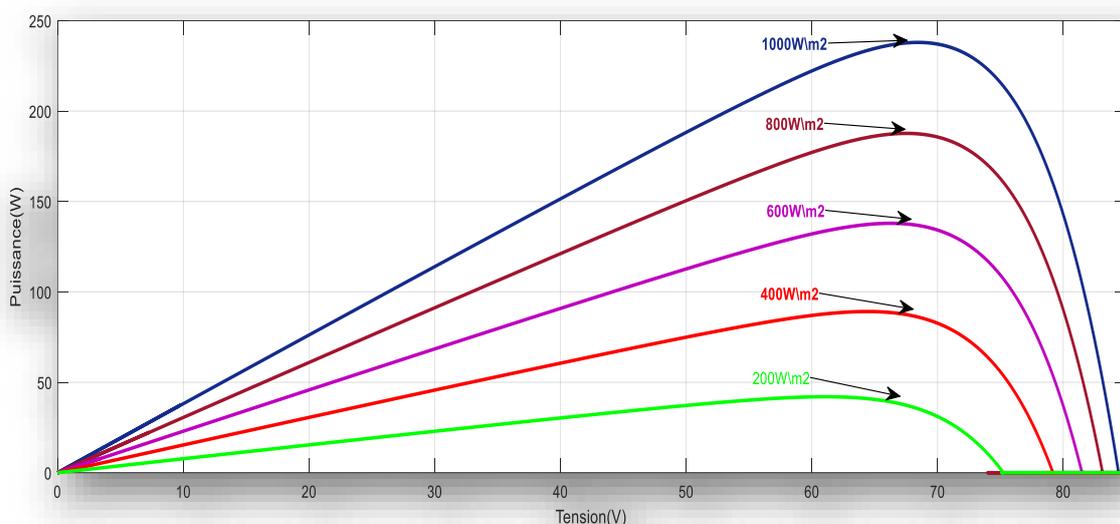
Panneau	Hacheur	Charge
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>P_{max}=59,85 \text{ W}</math></li> <li>• <math>V_{oc}=21.1 \text{ V}</math></li> <li>• <math>V_{mp}=17.1 \text{ V}</math></li> <li>• <math>V_{oc}=-0.8(\%/deg.C)</math></li> <li>• <math>N_{cell}=36</math></li> <li>• <math>I_{sc}=3.8 \text{ A}</math></li> <li>• <math>I_{mp}=3.5 \text{ A}</math></li> <li>• <math>I_{sc}=0.00247(\%/deg.C)</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>C1= 10e-6F,</math></li> <li>• <math>C2=0.4676e-3F,</math></li> <li>• <math>L=1.1478e-3H,</math></li> <li>• <math>R= 0.01ohm</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>R=53 \text{ ohm}</math></li> </ul>

Tableau 4.1 les caractéristiques du système photovoltaïque

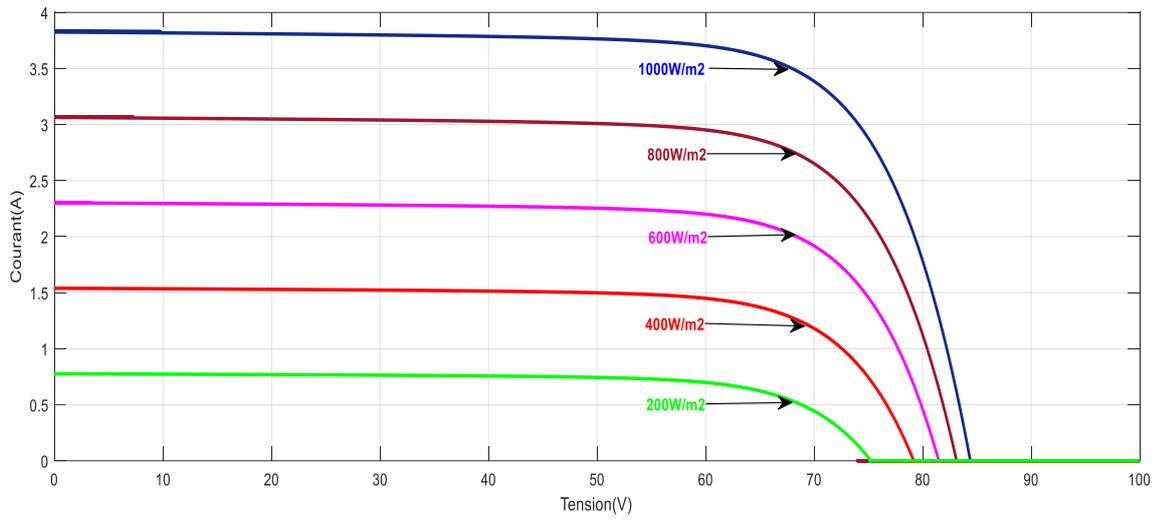
### 4.3 Résultats de simulation du système photovoltaïque sous irradiation uniforme

#### 4.3.1 Caractéristique du système photovoltaïque

La production de puissance des systèmes photovoltaïques dépend principalement de l'irradiation et de la température]. Les figures 4.2 et 4.3 montrent respectivement les courbes de courant et de puissance des panneaux photovoltaïques en fonction des variations d'irradiation et de température.

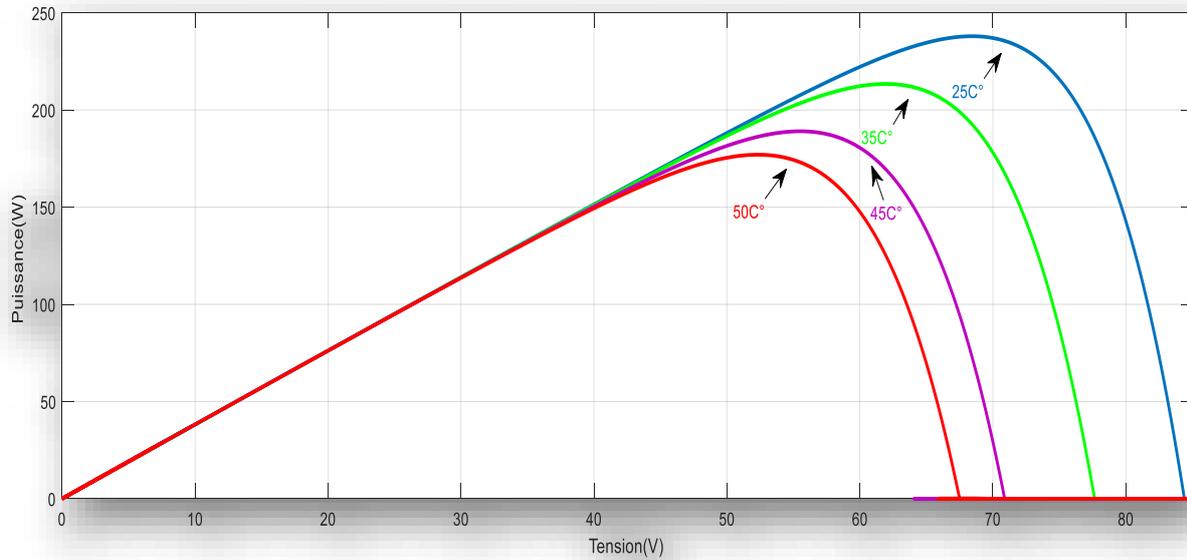


(b). Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$

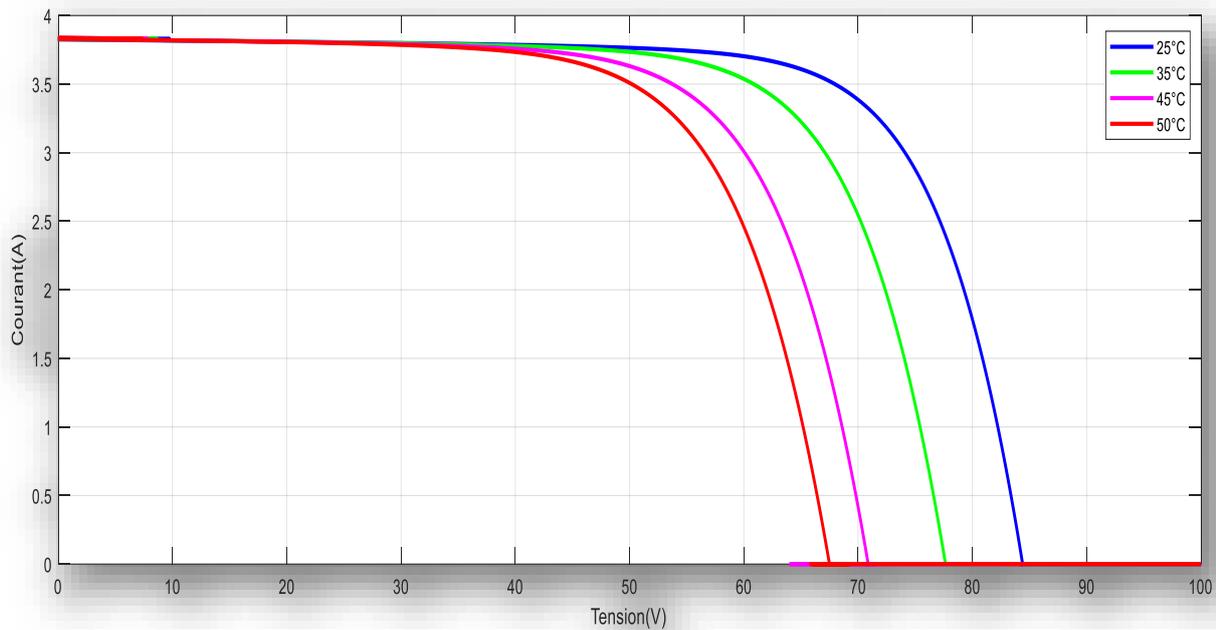


(b). Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$

Figure 4.2 Caractéristique sous l'irradiation variable et température constante (25°C)



(a). Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$



(b). Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$

Figure 4.3 Caractéristique sous l'irradiation constante (1000w/m2)et température variable

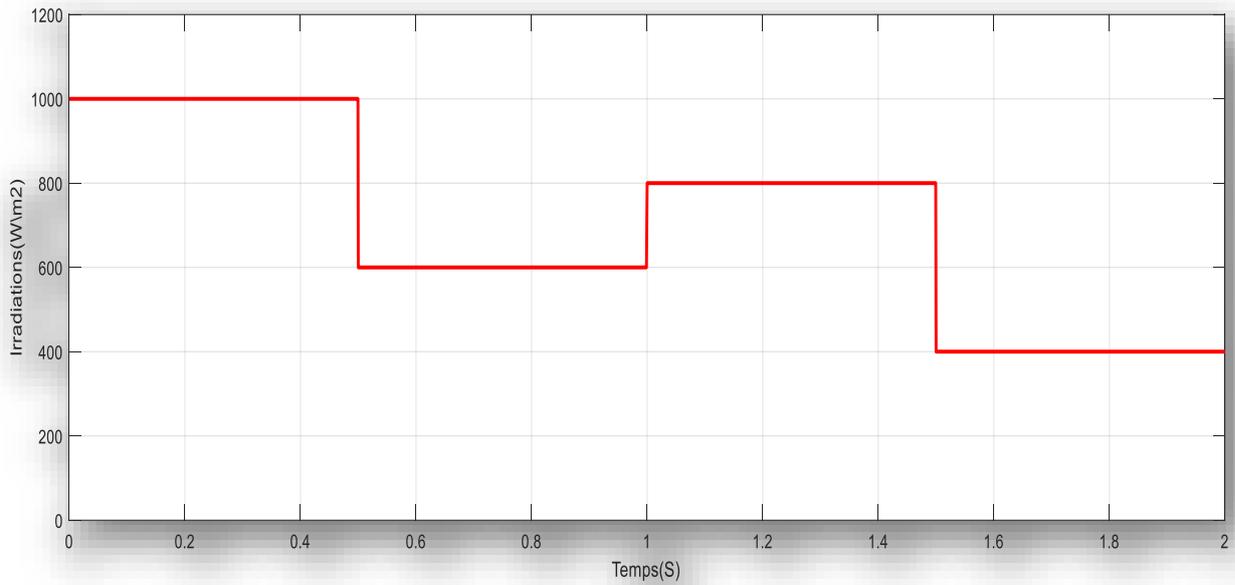
- **Interprétation des résultats**

On observe clairement que le point de puissance maximale varie en fonction du niveau d'irradiation et de la température. Il est donc essentiel d'utiliser un bloc d'extraction de puissance maximale (MPPT) pour optimiser la puissance délivrée par le panneau, quelles que soient les conditions météorologiques.

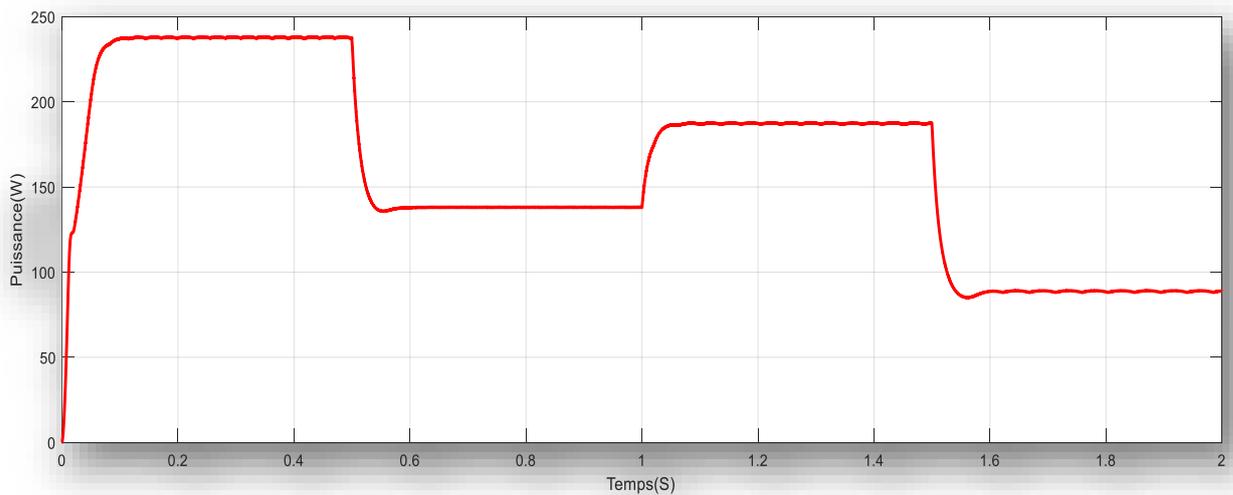
### 4.3.2 Résultats de simulation de système photovoltaïque avec la commande MPPT P&O (méthode classique)

#### A) Variation d'irradiation

Cette section est dédiée à l'analyse par simulation du système photovoltaïque sous différentes conditions climatiques. Pour des valeurs d'irradiation de  $E=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $800 \text{ W/m}^2$ ,  $600 \text{ W/m}^2$ , et  $400 \text{ W/m}^2$  avec une température constante de  $25^\circ\text{C}$ , comme le montre la figure 4.4(a), le panneau délivre sa puissance maximale, comme indiqué dans la figure 4.4(b)



(a). profile d'irradiation uniforme



(b). Puissance de la charge

Figure 4.4 Puissance extraire avec P&O sous E variable

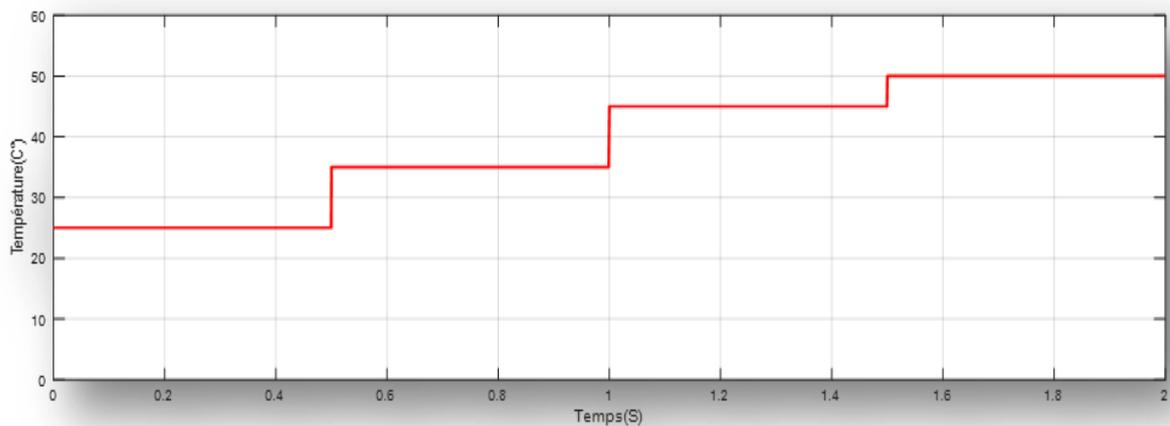
- **Interprétation des résultats**

On remarque que quand en augmentant graduellement l'irradiation, la méthode P&O devrait montrer une augmentation de la puissance extraite, avec des ajustements périodiques pour optimiser le MPP.

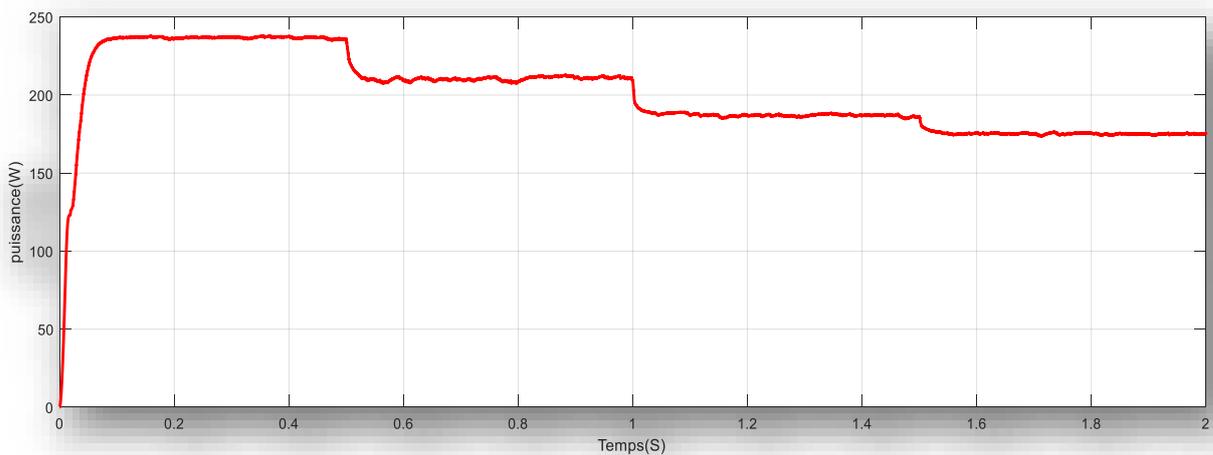
Quand l'irradiation décroissante : En diminuant l'irradiation, la puissance diminue et la méthode P&O ajuste la tension pour suivre la nouvelle puissance maximale possible, les points de puissance extraies à chaque changement d'irradiation correspondent au point de puissance maximum des caractéristique du panneau ce qui valide votre méthode d'optimisation.

### B) Variation de la température

Lorsque la température varie à des valeurs de 25°C, 35°C et 45°C, 50°C et que l'irradiation est maintenue constante à 1000W/m<sup>2</sup>, les figures 4.5(a) et 4.5(b) montrent respectivement l'évolution de la température et de la puissance extraite par le panneau solaire.



(a). profile de changement de température



(b). puissance de la charge

Figure 4.5 Puissance extraite avec P&O sous T variable

- **Interprétation des résultats**

On remarque que quand en augmentant la température (par exemple, de 25°C à 50°C), la méthode P&O devrait montrer une diminution de la puissance extraite, avec des ajustements pour suivre le nouveau MPP à chaque étape de température.

Quand en diminuant la température, la puissance extraite augmente, et la méthode P&O ajuste la tension pour suivre la nouvelle puissance maximale possible.

#### **4.4 Résultats de simulation du système photovoltaïque sous irradiation non uniforme (ombrage partiel)**

L'analyse du fonctionnement du système est envisagée en tenant compte d'irradiation, tout en prenant en considération le phénomène d'ombrage. Dans ces conditions, la caractéristique statistique  $P=(Vpv)$  présente plusieurs points de puissance maximale (MPP), parmi lesquels un seul est le MPP global, tandis que les autres sont des MPP partiels.

- **1 er profil d'ombrage**

Les résultats de la simulation sont illustrés à la figure 4.6. Sous le premier profil d'ombrage, il y a un pic global (PG) et un pic partiels (PP) de puissance maximale. La figure 4.7 montre que, dans ces conditions, seuls les algorithmes avancés PSO, et GWO détectent la puissance maximale globale (PG = 113.5W). Il est également important de noter que la courbe de  $Ppv$  PSO, présente trop d'oscillations avant d'atteindre le point maximal.

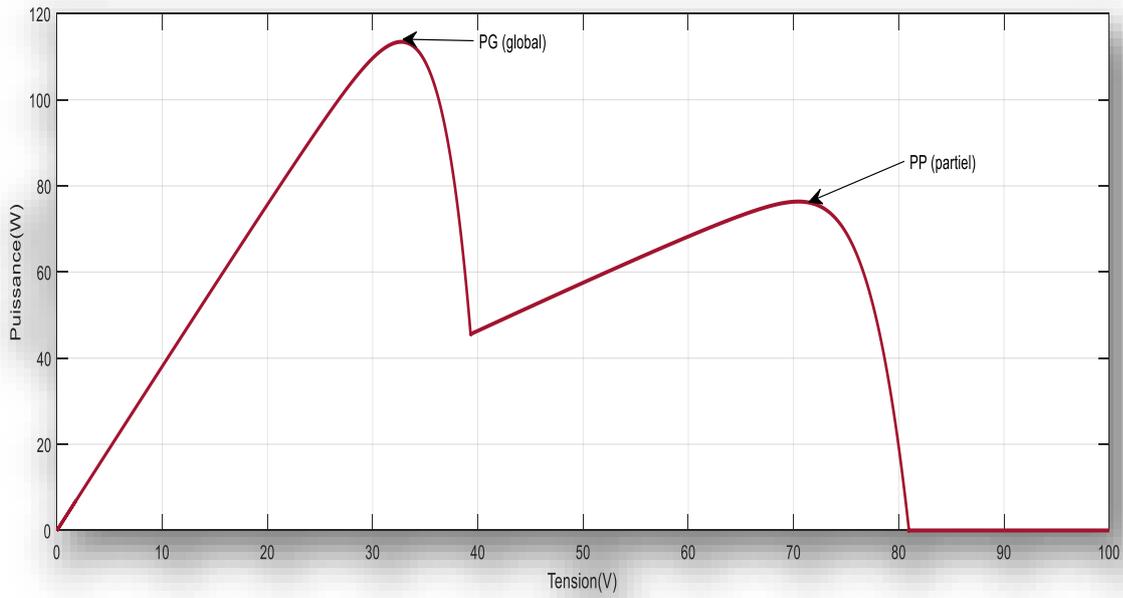


Figure 4.6 caractéristique  $P_{pv} = f(V_{pv})$  sous ombrage partiel

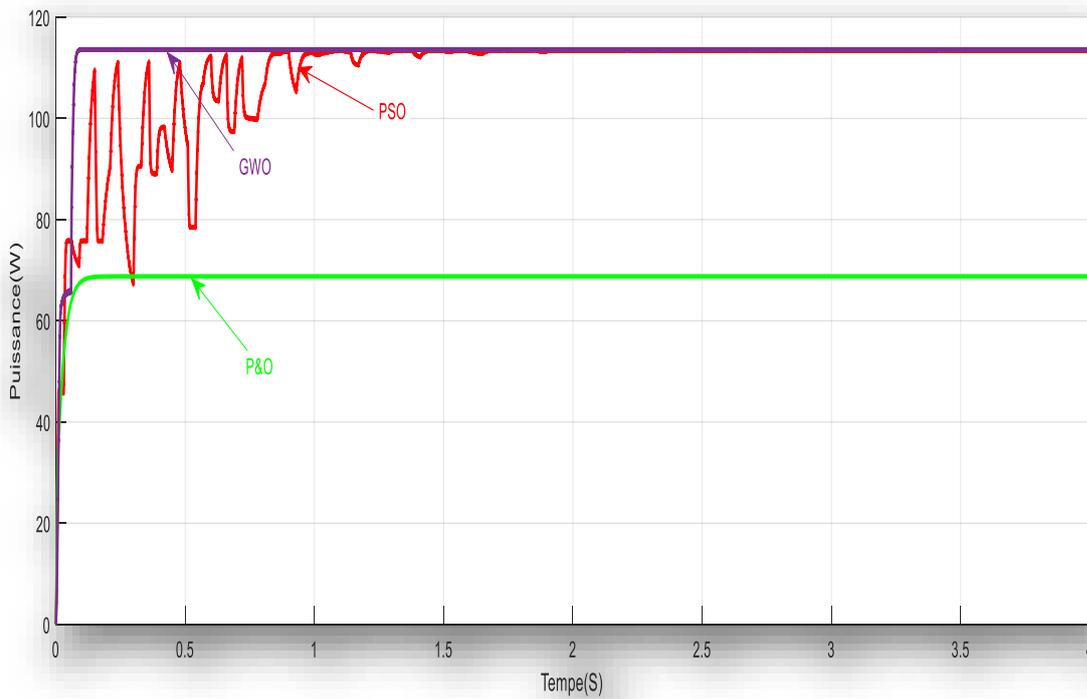


Figure 4.7 Puissance de la charge

- 2<sup>ème</sup> profil d'ombrage

Les résultats de la simulation sont illustrés à la figure 4.8. Sous le premier profil d'ombrage, il existe un pic global (PG) et deux (02) pics partiels (PP1 et PP2) de puissances maximales. De plus, la figure 4.9 montre que sous cette condition, tous les algorithmes av P&O, PSO, et GWO détectent la puissance maximale globale.

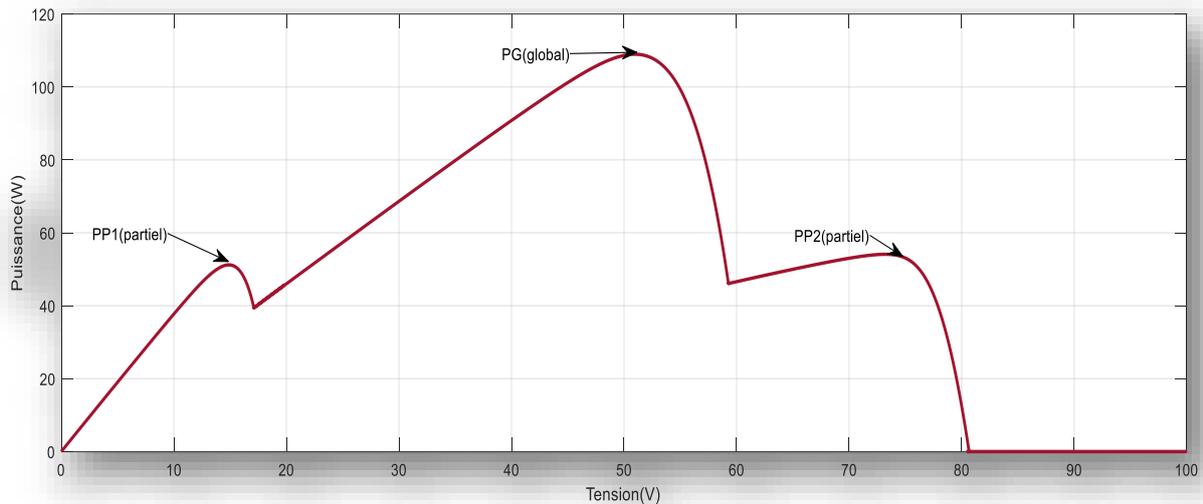


Figure 4.8 caractéristique  $P_{pv} = f(V_{pv})$  sous ombrage partiel

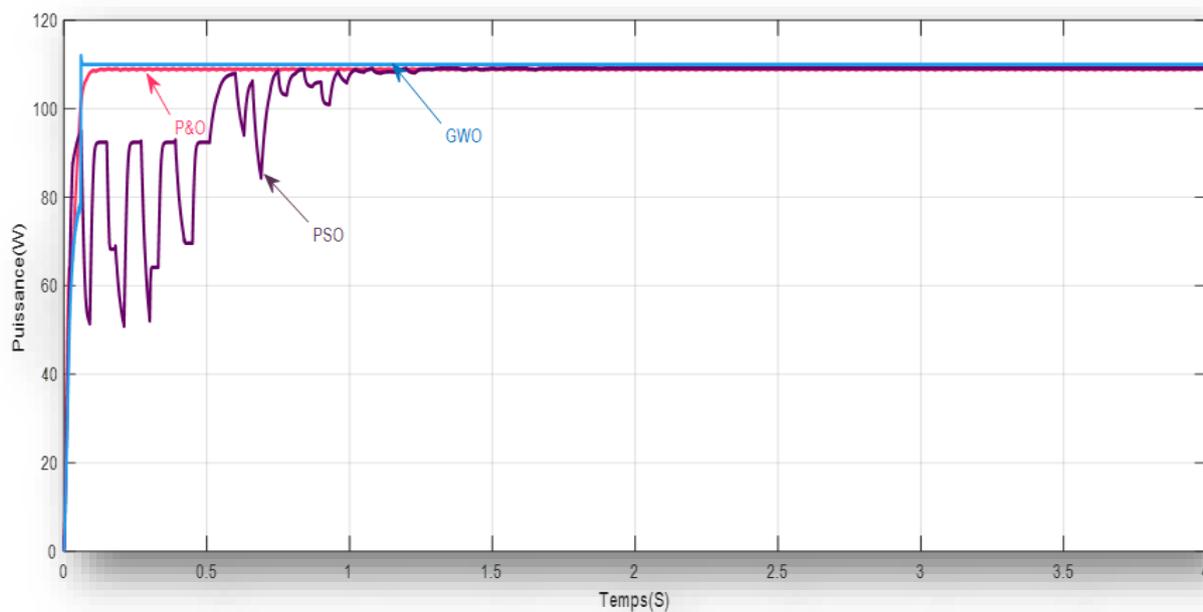


Figure 4.9 Puissance de la charge

- 3<sup>ème</sup> profil d'ombrage

Sous l'effet de ce troisième profil d'ombrage, la caractéristique  $P_{pv}=(V_{pv})$  est représentée à la figure 4.10. Elle présente un pic global (PG) et des trois pic partiel de puissance maximale.

Les trois profils ont été sélectionnés en fonction de la position du point de puissance maximale globale. On remarque que, pour le premier profil, il est situé à l'extrême gauche, pour le second profil en position intermédiaire, et pour le troisième profil à l'extrême droite.

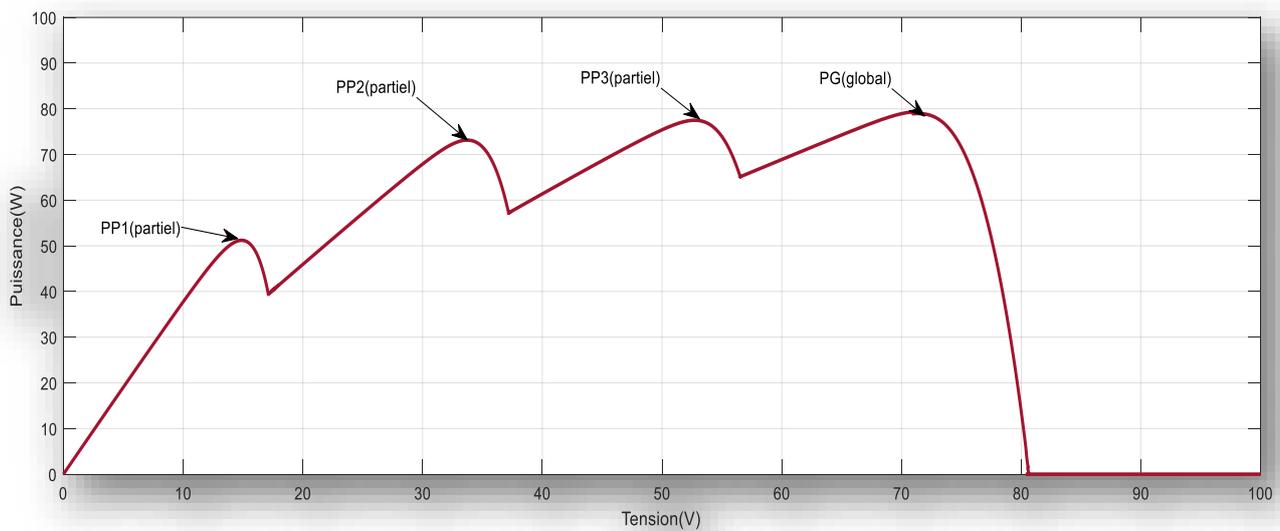


Figure 4.10 caractéristique  $P_{pv} = f(V_{pv})$  sous ombrage partiel

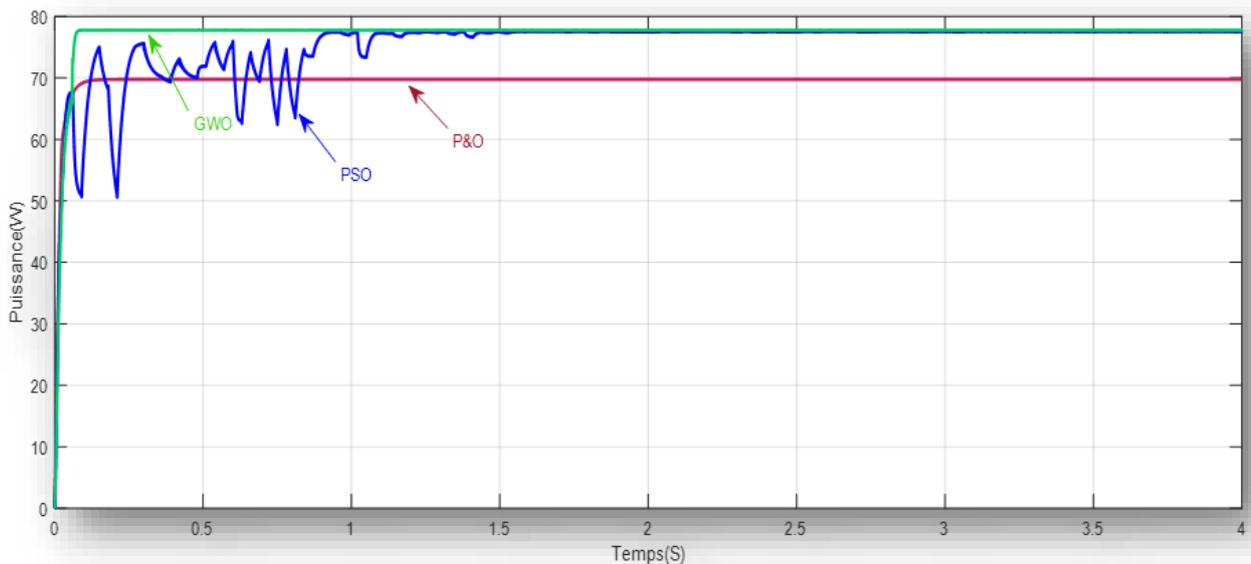


Figure 4.11 Puissance de la charge

Les méthodes de MPPT Perturb and Observe (P&O), Particle Swarm Optimization (PSO) et Grey Wolf Optimization (GWO) diffèrent par leur complexité, coût computationnel et performance. P&O, simple et facile à implémenter, présente un faible coût computationnel mais peut osciller autour du point de puissance maximale et est moins efficace sous ombrage partiel. PSO, inspiré par le comportement des essaims, offre une bonne capacité de trouver le MPP global et s'adapte bien aux conditions changeantes, mais nécessite plus de ressources computationnelles et est plus complexe à implémenter. GWO, basé sur le comportement social des loups gris, combine une haute capacité de recherche globale avec une complexité modérée, offrant une robustesse et une précision élevées, mais requiert également des ressources computationnelles significatives. En résumé, P&O est idéal pour des solutions simples et économiques, PSO excelle dans des environnements complexes, et GWO offre un bon équilibre entre performance et complexité.

Le choix de la méthode MPPT dépend fortement des exigences spécifiques du système PV et des contraintes opérationnelles. P&O reste une option viable pour des systèmes nécessitant simplicité et faible coût, tandis que PSO et GWO sont mieux adaptés aux environnements complexes nécessitant une plus grande robustesse et précision. Les simulations montrent clairement que GWO peut offrir une performance optimisée avec une complexité gérable, positionnant cette méthode comme un excellent compromis pour de nombreux systèmes photovoltaïques avancés.

## **4.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exploré et comparé les performances des méthodes de commande MPPT Perturb and Observe (P&O), Particle Swarm Optimization (PSO) et Grey Wolf Optimization (GWO) à travers des simulations détaillées. Chaque méthode a été évaluée en termes de complexité d'implémentation, coût computationnel, rapidité de convergence et efficacité sous différentes conditions, y compris les variations d'ensoleillement et les ombrages partiels.

## **Conclusion général**

L'optimisation du point de puissance maximum (MPPT) pour un système photovoltaïque sous l'effet d'ombrage partiel constitue un enjeu majeur pour améliorer l'efficacité énergétique et la rentabilité des installations solaires. L'ombrage partiel, causé par des éléments environnementaux comme les arbres, les bâtiments et les nuages, engendre des points de puissance multiples sur la courbe  $P=f(V)$  des panneaux photovoltaïques, rendant complexe la localisation du point de puissance maximum global (GMPP). Les méthodes traditionnelles de MPPT, telles que la Perturbation et Observation (P&O), montre leurs limite dans ces conditions hétérogènes et dynamiques. Pour relever ce défi, des algorithmes avancés ont été développés commande (PSO) Particle Swarm Optimization et Grey Wolf Optimization (GWO). Ces algorithmes offrent une adaptabilité continue aux variations d'ombrage, permettant une meilleure identification et exploitation du GMPP. L'intégration de l'intelligence artificielle ouvre également de nouvelles perspectives en améliorant la capacité des systèmes à s'adapter à des environnements variables et à optimiser la production énergétique en temps réel.

L'amélioration des méthodes MPPT sous l'effet d'ombrage partiel est donc essentielle pour maximiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques, minimiser les pertes d'énergie et augmenter la rentabilité des investissements dans l'énergie solaire. Les progrès continus dans ce domaine de recherche promettent de fournir des solutions encore plus robustes et efficaces, contribuant ainsi de manière significative à la transition vers des sources d'énergie renouvelables, fiables et durables, tout en soutenant les objectifs globaux de développement durable et de réduction des émissions de carbone.

- [1] Agence Internationale de l'Énergie. (2023). *World Energy Outlook 2023*
- [2] GIEC. (2021). Rapport de synthèse du Groupe de travail I - Les bases physiques du changement climatique
- [3] Secrétariat de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). (1997). *Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*
- [4] Agence Internationale de l'Énergie Renouvelable (IRENA). (2019). *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects.*
- [5] John A. R., Felix Thomas, Sabin Sunny A, Jishnu Balakrishnan K, Adharsh Ashok, Gopakumar Pathirikkat, 2017, « Multiple Renewable Energy Extraction using MISOC Topology for Residential Applications », International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI-2017), Jan. 05 07, Coimbatore, INDIA.
- [6] Dahmane, Menad. , « Gestion, optimisation et conversion des énergies pour habitat autonome », Diss. Université de Picardie Jules Verne, 2015.
- [7] <https://www.lumo-france.com/>
- [8] <https://www.connaissancedesenergies.org/>
- [9] Michaille, Patrick VE, Grenèche, « Dominique and Mazière, Maurice. "1 Les différentes sources d'énergie », Transition énergétique : la France en échec : Analyse et perspectives, Les Ulis: EDP Sciences, 2021, pp. 15- 26. <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2295-9.c002>
- [10] <https://www.un.org/fr> Nation Unies
- [11] <https://www.un.org/fr> Nation Unies
- [12] « Les différentes catégories d'énergies marines », <https://www.planeteenergies.com/fr/medias/decryptages/les-differentes-categories-d-energiesmarines>, publié le 27 août 2014 | mis à jour le 08 oct. 2020.
- [13] <https://www.un.org/fr> Nation Unies

- [14] MF Bonadonna, M Lisi - SHS Web of Conferences, 2016 - shs-conferences.org
- [15] <https://www.un.org/fr> Nation Unies
- [16] A Hachemi - 2017 - thesis.univ-biskra.dz
- [17] <https://www.un.org/fr> Nation Unies
- [18] L Simonnet, R Muller, O Elfarouk, E Pajot, L Bècle... - moodle.insa-rouen.fr
- [19] <https://www.un.org/fr> Nation Unies
- [20] SA Belharrat - 2010 - ummto.dz
- [21] <https://www.un.org/fr> Nation Unies
- [22] Cabal Cédric, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [23] Gomez, Lionel Davy, et al. , « Dimensionnement par optimisation d'un système photovoltaïque pour une alimentation isolée avec profil de charge constant », 2016.
- [24] Available: <http://www.cder.dz>.
- [25] L. de Schoulepnikoff et Gymnase Auguste Piccard, Quelle source d'énergie pour les vingt prochaines années ? , Travail de maturité Alexandra Catana, 3M7, 2009.
- [26] José Miguel Navarro, Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible, Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [27] Antonio Luque and Steven Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [28] Nabil, B Hamid - 2017 - ummto.dz
- [29] MY GOHMES, B DJELLALI, A DJEDAI - <dspace.univ-ouargla.dz>
- [30] K Amara - 2015 - ummto.dz
- [31] Y BENTOURA, A ELHOR - 2020 - thesis.essa-tlemcen.dz
- [32] B Robyns, A Davigny, H Barry, S Kazmierczak... - 2019 - books.google.com
- [33] S Simpure - 2018 - theses.fr

- [34] Mida, Dris. « Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride Eolien–Photovoltaïque». Diss. Université Mohamed Khider-Biskra, 2019
- [35] A Labouret, M Viloz, A Viloz - Dunod, Paris, 2012 - media.electre-ng.com
- [36] N Bellel - 2023 - 41.111.178.106
- [37] MB Youcef, MM Badreddine - researchgate.net
- [38] F Roussafi - 2019 - theses.hal.science
- [39] BG Lohan - 2018 - theses.hal.science
- [40] T Mahdia, K Silia - 2016 - ummto.dz
- [41] A LAKHDARA - 2022 - dspace.univ-guelma.
- [42] B Melkhir - 2017 - ummto.dz
- [43] F Ghaleb - 2016 - dspace.univ-usto.dz
- [44] MB Abdelghani - Mémoire de Master Faculté de Technologie ..., 2018 - biblio.univ-annaba.dz
- [45] D DRAIDI - 2022 - dspace.univ-guelma.dz
- [46] S Abouda - 2015 - theses.fr
- [47] [https://www.researchgate.net/figure/Caracteristique-resultante-dun-groupement-de-n-p-cellules-en-parallele\\_fig8\\_327839184](https://www.researchgate.net/figure/Caracteristique-resultante-dun-groupement-de-n-p-cellules-en-parallele_fig8_327839184)
- [48] <https://lesolairepourtous.fr/>
- [49] Michel Pinard, convertisseurs et électronique de puissance, Dunod, 2007.
- [50] <http://dspace.univ-tebessa.dz:8080/jspui/handle/123456789/6872>
- [51] A Boucherit - 2011 - theses.hal.science
- [52] F FETITI - archives.univ-biskra.dz
- [53] A ABDELOUAHED - 2017 - toubkal.imist.ma
- [54] <https://www.vitavous.com/>

- [55] Benzidane, Mohammed Ridha, et al. , « Miniaturization and Optimization of a DC–DC Boost Converter for Photovoltaic Application by Designing an Integrated Dual-Layer Inductor Model », Transactions on Electrical and Electronic Materials : 1-14, 2021.
- [56] Lequeu Thierry, Cours d'électronique de puissance, IUT GEII 2ième année, Option EEP, 2004/2005.
- [57] T Baron - 2021 - theses.fr
- [58] B Bounoua, R Haouchine - 2012 - dspace.ummto.dz
- [59] <https://theses.hal.science/> M. Angel Cid Pastor 2006
- [60] Abdel-Salam, Mazen, Mohamed Th El-Mohandes, and Mahmoud El-Ghazaly. "An efficient tracking of MPP in PV systems using a newly-formulated P&O-MPPT method under varying irradiation levels », Journal of Electrical Engineering & Technology 15.1: 501-513, 2020
- [61] Kim, Bongsuck, et al, « A study on high-efficiency MPPT algorithm based on P&O method with variable step size », The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics 24.1: 1-8, 2019.
- [62] M.A.S. Masoum, et al ,Design, construction and testing of a voltage-based maximum power point tracker (VMPPT) for small satellite power supply, 13th Annual AIAA/USU Conference, Small Satellite, 1999.
- [63] Amélioration de l'algorithme MPPT pour un système PV par l'intégration des nouvelles techniques basées sur l'intelligence artificielle B Gaied Chortane - 2022 - espace.etsmtl.ca
- [64] Modélisation et Commande du Système Photovoltaïque par Les Techniques **P&O** et **PSO** A BELLAOUAR, Y BEN BADA - 2022 - dspace.univ-ghardaia.edu.
- [65] Etude comparative des algorithmes P&O et INC pour l'optimisation de l'énergie photovoltaïque B BENZAIT, DE TOUAHRIA - 2020 - dspace.univ-ghardaia.edu.dz
- [66] Modélisation et analyse de l'effet de l'ombrage partiel sur la production M Khatem - 2021 - depot-e.uqtr.ca
- [67] Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque.N Aouchiche - 2020 - theses.hal.science

- [68] Détection et localisation de défauts dans un système photovoltaïque I Said, L Chafie - 2013 - ummto.dz
- [69] Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV L Bun – 2011 theses.hal.science
- [70] Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV L Bun – 2011 theses.hal.science
- [71] Javed, Saba, and Kashif Ishaque. , « A comprehensive analyses with new findings of different PSO variants for MPPT problem under partial shading », *Ain Shams Engineering Journal* 13.5: 101680, 2022.
- [72] Lakhdara A, Bahi T, Moussaoui A. , « PSO Control under Partial Shading Conditions. *Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*, 2020, 2(2),126-136. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2020.2.2.5>
- [73] <https://fr.123rf.com/Migration de volée d'oiseaux en formation en V au crépuscule>
- [74] Application d'un modèle parallèle de la méthode PSO au problème de transport d'électricité M Zemzami, N Elhami, A Makhloufi... - OpenScience-ISTE ..., 2016 - researchgate.net
- [75] Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque. N Aouchiche - 2020 - theses.hal.science
- [76] SYNTHESE DE FILTRES RECURSIFS BIDIMENSIONNELS BASEE SUR L'ALGORITHME PSO - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/Figure-31-Deplacement-dune-particule\\_fig5\\_350291153](https://www.researchgate.net/figure/Figure-31-Deplacement-dune-particule_fig5_350291153)
- [77] Conception of optimal MPPT controller based artificial intelligence of a Photovoltaic system A Nedjma - 2020 - inis.iaea.org
- [78] Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque. N Aouchiche - 2020 - theses.hal.science
- [79] Optimisation de l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux de distribution par la commande MPPT A Houam - 2022 - dspace.univ-tebessa.dz
- [80] Contribution à l'optimisation de l'insertion des énergies renouvelables dans un réseau électrique intelligent (Smart Grid) S Haddi, T Bouktir - 2019 - researchgate.net
- [81] <https://wolfproject.fr/> La chasse : une stratégie et des mâchoires rapides

[82] Mohanty, Satyajit, Bidyadhar Subudhi, and Pravat Kumar Ray. , « A grey wolf assisted perturb & observe MPPT algorithm for a PV system », IEEE Transactions on Energy Conversion 32.1: 340-347, 2016.

[83] Optimisation de l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux de distribution par la commande MPPT A Houam - 2022 - dspace.univ-tebessa.dz

[85] Mohanty, Satyajit, Bidyadhar Subudhi, and Pravat Kumar Ray. "A new MPPT design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions », IEEE Transactions on Sustainable Energy 7.1 : 181-188, 2015

[86] Contribution à la commande non linéaire des robots manipulateurs F LOUCIF - 2021 - dspace.univ-guelma.d