

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الآلية و الإلكترونيات  
Département d'automatique et électrotechnique



## Mémoire de Master

Filière : Électrotechnique  
Spécialité : Machines électriques

Présenté par

Kais Nassim

&

Boukettab Abderrahmane

---

# APPLICATION D'UNE MÉTAHEURISTIQUE À LA COMMANDE MPPT D'UN GPV EN PRESENCE D'OMBRAJE

---

Proposé par :  
Mme. BOUDISSA El Ghalia

Année Universitaire 2023-2024

## **REMERCIEMENT**

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu, le Tout-Puissant et Miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience nécessaires pour accomplir ce modeste travail.*

*En second lieu, nous remercions notre encadrante, Mme BOUDISSA, et le co-encadreur, Mr. BOUNEKHLA, pour leur patience, leur disponibilité et surtout leurs judicieux conseils, qui nous ont guidés tout au long de ce travail.*

*Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés à réaliser ce travail.*

*Nous exprimons notre gratitude à tous les enseignants du département d'électrotechnique et d'automatique.*

*Enfin, nous adressons nos remerciements aux membres du jury, qui nous font l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.*

*Merci à vous tous.*

*« Nous souhaitons un bon rétablissement à Mr. Bounekhla. »*

## **DEDICACE**

*Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études.*

*Je dédie également ce mémoire à ma sœur pour son encouragement constant et sa présence rassurante. son soutien m'a toujours été précieux.*

*À Mme Boudissa et M. Bounekhla, pour leur sagesse, leurs conseils éclairés et leur dévouement sans faille.*

*Vous avez su éveiller en moi une passion pour la connaissance et la recherche.*

*Enfin, à tous mes amis et à tous mes camarades de promotion, pour leur compréhension et leur soutien indéfectible tout au long de ce parcours.*

*Merci à tous.*

*Kais Nassim*

***«IMAGINATION IS MORE IMPORTANT THAN KNOWLEDGE»***

## **DEDICACE**

*À toutes les personnes qui ont été présentes pour moi, m'ont encouragé et soutenu tout au long de mon parcours académique, je voudrais exprimer ma plus profonde gratitude.*

*À mes chers parents, vos sacrifices et votre soutien indéfectible ont été le pilier sur lequel j'ai pu construire mon succès.*

*À mes frères et sœurs, ainsi qu'à toute ma famille, votre présence et votre soutien ont été une source de réconfort constant.*

*À mon encadrant et à tous mes professeurs, votre expertise, vos conseils et votre dévouement m'ont guidé à travers les défis académiques avec confiance et détermination.*

*Enfin, à tous mes amis, vous avez été les compagnons de route les plus précieux, partageant mes joies et mes peines, apportant une lumière et une énergie qui ont illuminé chaque étape de ce voyage.*

*Je vous adresse à tous un immense merci, empreint de reconnaissance et de gratitude.*

*Boukettab Abderrahmane*

---

## ملخص:

تعتمد الاستغلال الأمثل لتركيب الألواح الضوئية على الظروف الجوية مثل الإضاءة ودرجة الحرارة. بالتالي، تتعرض الطاقة المستمدة من المولد الضوئي (GPV) لتقلبات عند تغير هذه الظروف مثل المرور في مناطق ذات إضاءة ضعيفة (التظليل). بعبارة أخرى، التركيبي الضوئي الجيد هو الذي تكون فيه الطاقة المنتجة من المولد الضوئي (GPV) في حدها الأقصى بغض النظر عن ظروف الاستخدام. يتضمن هذا العمل تطبيق ميتاهيرستيك يسمى تحسين سرب الجسيمات (PSO) على التحكم MPPT لمولد ضوئي في وجود التظليل. يتم تنفيذ ذلك في محاكاة التحكم تحت بيئة Matlab/Simulink باستخدام لوحين، ثلاث، أربع، وخمس ألواح ضوئية متصلة على التوالي بظروف إضاءة مختلفة وعند درجة الحرارة المحيطة، مما يوفر خصائص متعددة النماذج للجهود والطاقة (P-V). يتم تأكيد فعالية التحكم MPPT المستند إلى PSO من خلال المقارنة مع التقنية التقليدية (الاضطراب والمراقبة) في الظروف مع وبدون تظليل. يتم تحديد أداء المولد الضوئي (GPV) من حيث كفاءة الطاقة.

**كلمات المفتاحية:** الألواح الكهروضوئية، MPPT,P,PSO, PV, V,GPV,P&O

---

## Résumé :

L'exploitation optimale d'une installation photovoltaïque dépend des conditions atmosphériques telles que l'éclairement et la température. Ainsi, la puissance débitée par le générateur photovoltaïque (GPV) subit des fluctuations lors du changement de ses conditions comme le passage dans des endroits mal ensoleillés (ombrage). Autrement dit, une bonne installation photovoltaïque, est celle où la puissance délivrée par le GPV est maximale quelques soient les conditions d'utilisation. Ce travail consiste à appliquer une métaheuristique appelée essaims particulaires (particule swarm optimisation PSO) à la commande MPPT d'un GPV en présence de l'ombrage. Ce dernier est réalisé dans les simulations de la commande sous l'environnement Matlab/Simulink avec deux, trois, quatre et cinq panneaux PV en série avec des éclaircements différents et à la température ambiante, fournissant des caractéristiques P-V multimodales. L'évaluation de l'efficacité de la commande MPPT basée sur PSO est confirmée par la comparaison avec la technique conventionnelle P&O (Perturb&Observe) pour les conditions avec et sans ombrage. La performance du GPV en termes de rendement énergétique est déterminée.

**Mots clés :** Photovoltaïque, MPPT,P,PSO, PV, V,GPV,P&O.

---

---

**Abstract :**

The optimal operation of a photovoltaic installation depends on atmospheric conditions such as illumination and temperature. Thus, the power output of the photovoltaic generator (PVG) experiences fluctuations when these conditions change, such as passing through poorly sunlit areas (shading). In other words, a good photovoltaic installation is one where the power delivered by the PVG is maximized regardless of the usage conditions. This work involves applying a metaheuristic called particle swarm optimization (PSO) to the MPPT control of a PVG in the presence of shading. This is implemented in the control simulations under the Matlab/Simulink environment with two, three, four, and five PV panels in series with different illumination levels and at ambient temperature, providing multimodal P-V characteristics. The effectiveness of the PSO-based MPPT control is confirmed by comparison with the conventional technique P&O (Perturb & Observe) for conditions with and without shading. The performance of the PVG in terms of energy efficiency is determined.

**Keywords :** Photovoltaic, MPPT, PSO, PV,P,V,PVG,P&O.

---

# TABLE DES MATIÈRES

## CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉNERGIES PHOTOVOLTAÏQUES

I.1 Introduction :	3
I.2 Définition et historique du photovoltaïque :	3
I.3 L'effet photovoltaïque :	4
3.1 Les propriétés physiques du photovoltaïque :	4
.....	5
.....	5
3.2 La technologie photovoltaïque :	5
I.4 Le rayonnement solaire :	5
4.1. Rayonnement direct :	6
4.2. Rayonnement diffus :	6
4.3. Rayonnement réfléchi :	6
4.4. Le rayonnement global :	6
I.5 Cellule photovoltaïque :	6
5.1 Technique de fabrication :	7
5.2 Différents types des cellules solaires :	7
5.2.1 Cellule en silicium amorphe :	8
5.2.2 Cellule en silicium monocristallin :	8
.....	8
5.2.3 Cellule en silicium multi-cristallin :	9
I.6 Panneau photovoltaïque :	9
6.1 Assemblage des modules photovoltaïques :	9
6.1.1 Le montage de modules photovoltaïques en série :	9
6.1.2 Le montage de modules photovoltaïques en parallèle :	10
I.7 Module photovoltaïque :	11
7.1 Systèmes photovoltaïques :	12
I.8 Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque :	12
8.1 Caractéristique courant tension ( I(V) ) :	13
8.2 Caractéristique puissance tension ( P(V) ) :	14
8.3 Influence de la température et de l'éclairement sur une cellule photovoltaïque :	14
8.3.1 : Influence de la température :	14
8.3.2 Influence de l'éclairement :	16
I.9 générateur photovoltaïque (gpv) :	19
9.1 Module et groupement de cellules en série :	19

.....	20
9.2 Module et groupement de cellules en parallèle : .....	20
I.10 Effet d'éclairement non homogène sur le GPV : Ombrage partiel .....	23
I.11 Protection des panneaux solaires : .....	26
I.11.1 Protection contre les intempéries : .....	26
I.11. 2 Protection contre les dommages physiques : .....	26
I.11. 3 Protection contre les surtensions et les incendies : .....	26
I.11.4 Entretien régulier : .....	26
I.11.5 Les Diodes dans les panneaux photovoltaïques : .....	27
I.11.5.1 Diodes de Bypass : .....	27
I.11.5.2 Diodes de blocage : .....	28
I.12 Avantages et Inconvénients de l'énergie PV : .....	28
I.13 Conclusion .....	29
<b>CHAPITRE 2 : ÉTAGE D'ADAPTATION ET COMMANDE MPPT</b>	
II.1 Introduction : .....	30
II.2 Rôle des convertisseurs DC-DC : .....	30
II.3 Différents types des hacheurs : .....	30
II.3.1. Convertisseur Boost : .....	30
II.3.1.1 Simulation d'un convertisseur Boost : .....	33
II.3.2 Convertisseur Buck : .....	34
II.3.2.1. Simulation d'un convertisseur Buck : .....	36
II.3.3. Convertisseur Buck-Boost : .....	37
II.3.3.1. Simulation d'un convertisseur Buck-Boost : .....	38
.....	39
II.3.4. Hacheur Sepic : .....	39
II.3.4.1. Simulation du fonctionnement d'un convertisseur sepic : .....	41
II.4 Maximum Power Point Tracking (MPPT) : .....	42
II.4.1 Intérêt du système: .....	42
II.4.2 Fonctionnement : .....	42
.....	43
II.4.3 Application au générateur photovoltaïque : .....	43
II.4.4 MPP (Maximum Power Point) : .....	43
II.4.5 Techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT : .....	44
II.4.5.1 Techniques conventionnelles : .....	45
II.4.5.2 Techniques avancées : .....	46
II.4.5.2 Techniques hybrides : .....	47

II.4.6 Algorithme Perturbation et Observation (P&O) .....	47
.....	49
II.4.7 Commande a incrémentation de la conductance (INC) :.....	49
II.4.8 Les avantages et les inconvénients .....	50
II.4.8.1 Avantages :.....	50
II.4.8.2 Inconvénients : .....	51
II.4.9 Les Algorithmes évolutionnaires :.....	51
II.4.9.1 L'Optimisation par Essaim Particulaire (PSO) :.....	51
II.4.9.2 GWO (Grey Wolf optimisation algorithm) .....	55
.....	57
II.5 Conclusion .....	58
 <b>CHAPITRE 3 : RESULTATS DE SIMULATION</b>	
III.1 Introduction .....	61
III.2 Caractéristiques du panneau photovoltaïque utilisé .....	61
III.3 Simulation du système PV avec la commande MPPT .....	61
III.3.1 Simulation de la commande P&O .....	61
III.3.2 Simulation avec la commande PSO .....	66
III.4 Conclusion .....	81

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1</b> Les propriétés physiques du photovoltaïque .....	5
<b>Figure 1.2</b> Le rayonnement solaire .....	6
<b>Figure 1.3</b> Cellule photovoltaïque.....	7
<b>Figure 1.4</b> Cellule en silicium amorphe .....	8
<b>Figure 1.5</b> Cellule en silicium monocristallin.....	8
<b>Figure 1.6</b> Cellule en silicium multi-cristallin .....	9
<b>Figure 1.7</b> Le montage de modules photovoltaïques en série.....	10
<b>Figure 1.8</b> Le montage de modules photovoltaïques en parallèle .....	11
<b>Figure 1.9</b> Schéma bloc d'une chaîne de conversion photovoltaïque .....	12
<b>Figure 1.10</b> Caractéristique courant tension I(V).....	13
<b>Figure 1.11</b> Caractéristique puissance tension P(V) .....	14
<b>Figure 1.12</b> Caractéristique puissance tension P(V) .....	15
<b>Figure 1.13</b> Caractéristique courant tension I(V).....	15
<b>Figure 1.14</b> Caractéristique puissance tension P(V) .....	16
<b>Figure 1.15</b> Caractéristique courant tension I(V).....	17
<b>Figure 1.16</b> Caractéristique puissance tension P(V) .....	18
<b>Figure 1.17</b> Caractéristique courant tension I(V).....	18
<b>Figure 1.18</b> Composantes d'un champ de modules photovoltaïques .....	19
<b>Figure 1.19</b> Caractéristique P(V) d'un groupement des modules en séries .....	20
<b>Figure 1.20</b> Caractéristique I(V) d'un groupement des modules en séries .....	20
<b>Figure 1.21</b> Caractéristique P(V) d'un groupement des modules en parallèle .....	21
<b>Figure 1.22</b> Caractéristique I(V) d'un groupement des modules en parallèle.....	21
<b>Figure 1.23</b> Caractéristique P(V) d'un groupement des modules mixte .....	22
<b>Figure 1.24</b> Caractéristique I(V) d'un groupement des modules mixte.....	22
<b>Figure 1.25</b> Synoptique de simulation de l'effet d'ombrage .....	23
<b>Figure 1.26</b> Caractéristique puissance tension P(V) en présence d'ombrage .....	24
<b>Figure 1.27</b> Caractéristique courant tension I(V) en présence d'ombrage .....	24
<b>Figure 1.28</b> Caractéristique puissance tension P(V) sous des conditions atmosphériques fixes .....	25
<b>Figure 1.29</b> Caractéristique courant tension I(V).....	25
<b>Figure 1.30</b> Diodes de protection des modules .....	27
<b>Figure 2.1</b> Circuit électrique d'Hacheur élévateur (Boost) .....	31
<b>Figure 2.2</b> Circuit équivalent du Boost quand K est fermé .....	31
<b>Figure 2.3</b> Circuit équivalent du Boost quand K est ouvert .....	31
<b>Figure 2.4</b> Circuit MATLAB SIMULINK d'un hacheur BOOST.....	33
<b>Figure 2.5</b> Simulation de la tension entrée et sortie d'un hacheur DC-DC BOOST.....	33
<b>Figure 2.6</b> Schéma du convertisseur Buck .....	34
<b>Figure 2.7</b> les deux configurations d'un convertisseur Buck.....	34
<b>Figure 2.8</b> Circuit MATLAB SIMULINK d'un hacheur BUCK.....	36
<b>Figure 2.9</b> Résultat de simulation d'un hacheur DC-DC BUCK tension sortie et idéal de.....	36
<b>Figure 2.10</b> Schéma de convertisseur Buck-Boost .....	37
<b>Figure 2.11</b> Les deux configurations d'un convertisseur Buck-Boost .....	37
<b>Figure 2. 12</b> Circuit MATLAB SIMULINK d'un hacheur BUCK-BOOST .....	38
<b>Figure 2.13</b> Simulation de la tentions entrée et sortie d'un hacheur DC-DC BUCK-BOOST .....	39
<b>Figure 2.14</b> Convertisseur sepic.....	40

<b>Figure 2.15</b> SEPIC K ouvert, SEPIC K fermé.....	40
<b>Figure 2.16</b> Circuit MATLAB SIMULINK d'un hacheur SEPIC.....	41
<b>Figure 2.17</b> Circuit MATLAB SIMULINK d'un hacheur SEPIC.....	41
<b>Figure 2.18</b> Un générateur PV avec MPPT.....	43
<b>Figure 2.19</b> Caractéristique PV-IV et le point maximum.....	44
<b>Figure 2.20</b> Les différents techniques MPPT.....	45
<b>Figure 2.21</b> Le fonctionnement de l'algorithme PO.....	48
<b>Figure 2.22</b> : organigramme de la méthode Perturbation et Observation.....	48
<b>Figure 2.23</b> Organigramme de la méthode incrémentation de la conductance.....	50
<b>Figure 2.24</b> Déplacement d'une particule.....	52
<b>Figure 2.25</b> L'organigramme de la poursuite du MPP avec PSO.....	54
<b>Figure 2.26</b> Hiérarchie du loup gris (la dominance diminue de haut en bas).....	55
<b>Figure 2.27</b> L'organigramme de l'algorithme GWO.....	57
<b>Figure 3.1</b> Schéma Matlab/Simulink de la commande P&O.....	62
<b>Figure 3.2</b> Caractéristique P-V en présence d'ombrage (cas de deux lobes).....	63
<b>Figure 3.3</b> Puissance de sortie avec P&O.....	63
<b>Figure 3.4</b> Variation du rapport cyclique avec P&O.....	64
<b>Figure 3.5</b> Caractéristique P-V sous des conditions atmosphériques fixes.....	64
<b>Figure 3.6</b> Puissance de sortie avec P&O.....	65
<b>Figure 3.7</b> Variation du rapport cyclique avec P&O.....	65
<b>Figure 3.8</b> Schéma Matlab/Simulink de la commande PSO avec deux panneaux PV.....	66
<b>Figure 3.9</b> Puissance de sortie avec PSO.....	67
<b>Figure 3.10</b> Variation du rapport cyclique avec PSO.....	67
<b>Figure 3.11</b> Evolution de la puissance de sortie avec PSO.....	68
<b>Figure 3.12</b> Variation du rapport cyclique avec PSO.....	68
<b>Figure 3.13</b> Schéma Matlab/Simulink de la commande PSO avec trois panneaux PV.....	69
<b>Figure 3.14</b> Caractéristique P-V en présence d'ombrage (trois lobes).....	70
<b>Figure 3.15</b> Puissance de sortie avec PSO.....	70
<b>Figure 3.16</b> Variation du rapport cyclique avec PSO.....	71
<b>Figure 3.17</b> Caractéristique P-V sous des conditions climatiques fixes.....	71
<b>Figure 3.18</b> Puissance de sortie avec PSO.....	72
<b>Figure 3.19</b> Variation du rapport cyclique avec PSO.....	72
<b>Figure 3.20</b> Schéma Matlab/Simulink de la commande PSO avec quatre panneaux PV.....	73
<b>Figure 3.21</b> Caractéristique P-V en présence de l'ombrage (quatre lobes).....	74
<b>Figure 3.22</b> L'évolution de la puissance de sortie avec PSO.....	74
<b>Figure 3.23</b> Variation du rapport cyclique avec PSO.....	75
<b>Figure 3.24</b> Caractéristique P-V sous des conditions atmosphériques fixes.....	75
<b>Figure 3.25</b> L'évolution de la puissance de sortie avec PSO.....	76
<b>Figure 3.26</b> Variation du rapport cyclique avec PSO.....	76
<b>Figure 3.27</b> Schéma Matlab/Simulink de la commande PSO avec cinq panneaux PV.....	77
<b>Figure 3.28</b> Caractéristique P-V en présence de l'ombrage (cinq lobes).....	78
<b>Figure 3.29</b> Puissance de sortie avec PSO.....	78
<b>Figure 3.30</b> Variation du rapport cyclique avec PSO.....	79
<b>Figure 3.31</b> Caractéristique P-V sous des conditions climatiques fixes.....	79
<b>Figure 3.32</b> Evolution de la puissance de sortie avec PSO.....	80
<b>Figure 3.33</b> Variation du rapport cyclique avec PSO.....	80

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 3. 1</b> Caractéristiques du panneau Tata power solar systems TP250MBZ.....	61
<b>Tableau 3. 2</b> Rendement du P&O pour le cas de deux panneaux PV sous des conditions climatiques fixe et variable .....	62
<b>Tableau 3. 3</b> Rendement de la commande PSO pour le cas de deux panneaux PV sous des conditions climatiques fixe et variable .....	66
<b>Tableau 3. 4</b> Rendement de la commande PSO pour le cas de trois panneaux PV sous des conditions climatiques fixe et variable .....	69
<b>Tableau 3. 5</b> Rendement de la commande PSO pour le cas de quatre panneaux PV sous des conditions climatiques fixe et variable .....	73
<b>Tableau 3. 6</b> Rendement de la commande PSO pour le cas de cinq panneaux PV sous des conditions climatiques fixe et variable .....	77

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

$P$  (W) : Puissance

PV : Photovoltaïque

$E$  (W/m<sup>2</sup>) : L'éclairement incident

PWM : Pulse Width Modulation

$N_{pp}$  : Nombre de panneaux connectés en parallèle.

$N_{ss}$ : Nombre de panneaux connectés en série.

$I_{cc}$  (A) : Courant de court-circuit

$I_{pv}$ (A) : Courant fourni par la cellule

$I_{ph}$  (A) : Un courant généré par la lumière ou la photo courant

$I_d$ (A) : Le courant de la diode

$I_s$  (A) : Le courant de saturation inverse

$V_d$  (V) : Tension à la borne de la diode

$V_t$ (V) : Le potentiel thermique

$V_{oc}$  : Tension de circuit ouvert (V)

$K$ (J/K) : Constante de Boltzmann

$T_c$ (K) : Une température de cellule

$I_p$ (A) : Courant qui circule dans la résistance parallèle

$R_s$  ( $\Omega$ ) : Résistance série

$R_p$ ( $\Omega$ ) : Résistance parallèle

$I_{sc}$  (à 25 ° C et (1000W / m<sup>2</sup>)) : Le courant de court-circuit de la cellule

$K_i$ : Le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule

$T_{ref}$  (K) : La température de référence de la cellule

$G$  (W / m<sup>2</sup>) : L'ensoleillement

$G_{ref}$  (W / m<sup>2</sup>) : L'insolation de référence de la cellule

$I_{rs}$ : Le courant de saturation inverse de la cellule à une température de référence et un rayonnement solaire

$E_g$ (eV) : L'énergie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule en électronvolt

$N_p$  : Nombre des cellules en parallèle d'un module PV

$N_s$ : Nombre des cellules en série d'un module PV

$V_{oc}$ (V) : La tension en circuit ouvert

$T_s$  : Période de commutation

$i_L$ (A) : Courant de l'inductance

$i$  (A): Courant d'entrée du hacheur

$i_c$  (A) : Courant de la capacité

$i_s$  (A) : Courant de sortie du hacheur

$V_L$  (V) : Tension de l'inductance

$V_e$  (V) : Tension d'entrée du hacheur

$V_s$  (V) : Tension de sortie du hacheur

$D$  : Rapport cyclique

MPPT : Maximum power point tracking

MPP : Maximum power point

IMPP (A) : Le courant au point de puissance maximale

VMPP (V) : La tension au point de puissance maximale

P&O : Perturbation et observation

PSO : Optimisation par essaims de particule

$\Delta V_{pv}$  : La dérivée de la tension PV

VPV : La tension aux bornes du GPV

IPV : Le courant que peut délivrer un GPV

---

***INTRODUCTION***  
***GÉNÉRALE***

---

## Introduction générale

Dans un monde en quête de solutions durables pour contrer la crise énergétique et environnementale, les systèmes photovoltaïques (PV) se positionnent comme des piliers de la transition vers les énergies renouvelables. Ces systèmes, capables de convertir directement la lumière du soleil en électricité, offrent une promesse inestimable : une source d'énergie propre, abondante et infinie. Pourtant, leur potentiel est souvent entravé par un ennemi insidieux : l'ombrage partiel.

Imaginez une journée ensoleillée où un simple nuage ou une ombre projetée par un arbre suffit à réduire drastiquement la production d'énergie de vos panneaux solaires. Ces conditions d'ombrage partiel engendrent des pertes de puissance et créent des points de puissance maximale (MPPT) multiples, rendant difficile l'optimisation du système PV. Les méthodes traditionnelles de suivi du point de puissance maximale, telles que l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O) et celui de la conductance incrémentale (IC), se montrent souvent insuffisantes face à ces défis.

Pour surmonter ces obstacles, l'utilisation des méthodes d'optimisation telles que les métaheuristiques s'avère une solution prometteuse pour améliorer les performances des systèmes PV en présence de l'ombrage. Nous nous sommes intéressés à la métaheuristique des essaims particulaires (en anglais particule swarm optimisation (PSO)) inspirée de l'éthologie qui analyse le comportement collectif des essaims d'oiseaux et des bancs de poissons. PSO est une technique d'optimisation basée sur des règles de transition probabiliste, manipulant une population de particules qui explore l'espace de recherche afin d'exploiter la solution optimale. PSO est dédié au problème caractérisé par des fonctions multimodales.

L'objectif de ce mémoire est de développer une métaheuristique (PSO) pour l'appliquer à la commande MPPT d'un générateur photovoltaïque (GPV) en présence d'ombrage. Le mémoire est structuré en trois chapitres

Le premier chapitre présente des généralités sur l'énergie photovoltaïque et les systèmes photovoltaïques. Les principes de base permettant de transformer la lumière solaire en électricité sont abordés. Un aperçu sur les composants essentiels des systèmes PV est donné. Des cellules solaires aux panneaux solaires, nous mettons en lumière les défis et les opportunités de cette technologie révolutionnaire. Nous abordons également l'impact des conditions d'ombrage partiel dans les systèmes PV.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étage d'adaptation et la commande MPPT. Nous examinons les différents types d'hacheur, notamment les convertisseurs Boost, Buck et Sepic, et leur rôle dans l'optimisation de la performance des systèmes PV. Ensuite, les méthodes traditionnelles de MPPT sont établies ainsi que les défis qu'elles rencontrent en présence d'ombrage partiel. Les méthodes basées sur les métaheuristiques pour la commande MPPT, en particulier PSO sont élaborées

Enfin, le troisième chapitre présente les résultats de simulation pour différents cas de l'ombrage réalisés avec deux, trois, quatre et cinq panneaux en série et des éclaircissements différents à la température ambiante, montrant la caractéristique P-V avec deux, trois, quatre et cinq lobes respectivement. L'évaluation de l'efficacité de la méthode de commande MPPT basée sur la méthode PSO est établie par comparaison avec la technique traditionnelle (P&O). Les performances du système PV en termes de rendement énergétique, de robustesse et de réponse dynamique seront scrutées.

Ce mémoire n'est pas seulement une étude technique, c'est une invitation à repenser l'optimisation des systèmes photovoltaïques sous un angle innovant. En relevant le défi de l'ombrage partiel avec l'algorithme PSO, nous espérons ouvrir de nouvelles voies pour maximiser la performance des systèmes PV et contribuer ainsi de manière significative à un avenir énergétique plus durable.

---

***CHAPITRE I***

***GENERALITES SUR L'ENERGIES  
PHOTOVOLTAÏQUE***

---

## I.1 Introduction :

L'énergie est un élément essentiel pour le développement économique, social et environnemental de l'humanité. Cependant, la dépendance actuelle aux sources d'énergie fossiles pose de nombreux défis, tels que l'épuisement des ressources, le changement climatique, la pollution et les conflits géopolitiques. Face à ces enjeux, il est nécessaire de trouver des sources d'énergie alternatives qui soient respectueuses de l'environnement, durables et accessibles. Parmi ces sources, l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie renouvelable en général présentent de nombreux avantages et opportunités. Dans ce texte, nous allons présenter les caractéristiques, les bénéfices et les applications de ces formes d'énergie innovantes et prometteuses.[1]

## I.2 Définition et historique du photovoltaïque :

Le photovoltaïque est une technologie qui convertit la lumière du soleil en électricité directe. Le processus repose sur l'utilisation de cellules photovoltaïques, généralement fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium. Lorsque la lumière du soleil frappe ces cellules, elle génère un courant électrique. Cette électricité peut ensuite être utilisée pour alimenter des appareils électriques, des bâtiments ou être injectée dans le réseau électrique.[2]

### Historique du photovoltaïque :

**Effet photovoltaïque (1839) :** L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel en 1839. Il a observé que certaines substances produisaient une petite quantité d'électricité lorsqu'elles étaient exposées à la lumière. [3]

**Cellule solaire au sélénium (1883) :** Charles Fritts, un ingénieur américain, a construit la première cellule solaire à base de sélénium recouvert d'une fine couche d'or. Cependant, cette première tentative était peu efficace. [3]

**Développements au cours du 20e siècle :** Des progrès significatifs ont été réalisés au cours du 20e siècle, avec des améliorations dans les matériaux utilisés et les techniques de fabrication. Les applications pratiques étaient toutefois limitées en raison du coût élevé et de l'efficacité relativement faible des cellules solaires. [3]

**Boom de l'industrie (années 1970) :** La crise pétrolière des années 1970 a suscité un intérêt renouvelé pour les énergies renouvelables, dont le photovoltaïque. Des investissements importants ont été réalisés dans la recherche et le développement, conduisant à une amélioration significative de l'efficacité et à une réduction des coûts. [3]

**Croissance exponentielle (années 2000 à nos jours) :** Au cours des dernières décennies, le

marché du photovoltaïque a connu une croissance exponentielle. Les avancées technologiques, les incitations gouvernementales et la sensibilisation croissante aux questions environnementales ont contribué à faire du photovoltaïque une source d'énergie de plus en plus importante dans le monde entier.[4]

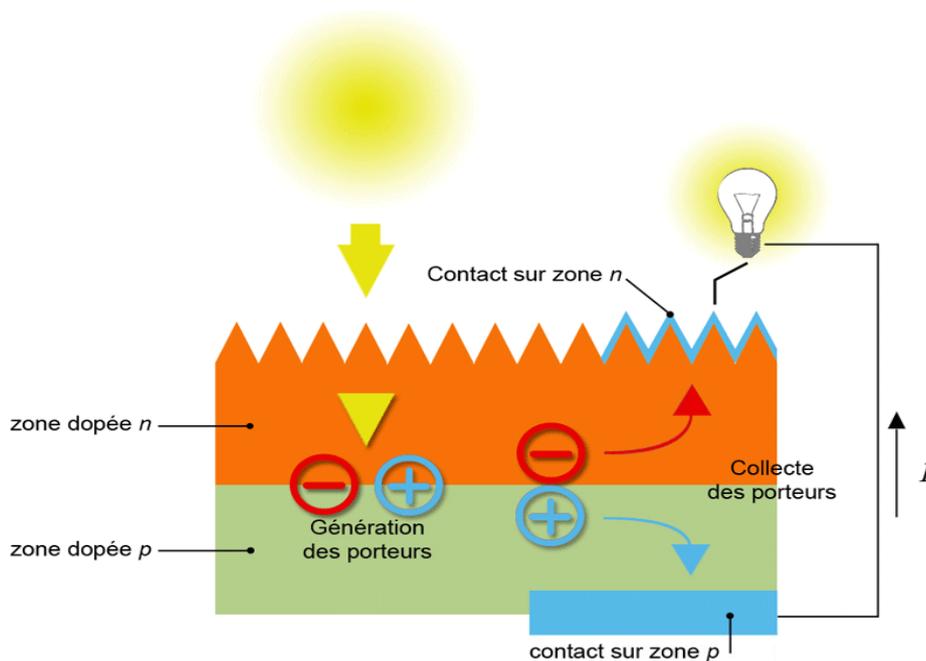
Aujourd'hui, le photovoltaïque est devenu une technologie mature, avec des installations solaires de grande échelle dans de nombreux pays et une adoption croissante dans les applications résidentielles et commerciales. L'industrie continue de progresser avec des recherches visant à augmenter l'efficacité des cellules solaires, réduire les coûts et explorer de nouvelles technologies émergentes.[4]

### **I.3L'effet photovoltaïque :**

L'effet photovoltaïque consiste à générer un courant électrique à partir de la lumière qui frappe un matériau semi-conducteur. Plus la lumière est intense, plus le courant est fort. Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé pour cette technologie. Il transforme la lumière en courant, qui est ensuite acheminé vers les câbles de sortie du panneau par une grille métallique. Les cellules photovoltaïques réagissent très vite à la lumière. L'effet photovoltaïque est donc quasi instantané.

### **3.1 Les propriétés physiques du photovoltaïque :**

Quand un photon touche le semi-conducteur qui forme les cellules photovoltaïques, il libère un électron, laissant derrière lui un « trou » (ou absence d'électron). L'électron se déplace alors vers un autre trou, en perdant de l'énergie. Entre les deux couches d'une cellule photovoltaïque, il y a une tension, comme dans une batterie, qui crée un potentiel électrique. Pour améliorer la conductivité des semi-conducteurs, on ajoute de petites quantités (environ 1 atome pour 1 million) d'un autre élément qui a soit un électron de plus (dopage N négatif) soit un électron de moins (dopage P positif) que le semi-conducteur. Pour le photovoltaïque, la couche du dessus de la cellule est dopée N et la couche du dessous est dopée P.[5]



**Figure 1.1** Les propriétés physiques du photovoltaïque

## 3.2 La technologie photovoltaïque :

Le photovoltaïque est une technologie qui permet de changer l'énergie solaire (photons) en énergie électrique grâce à des cellules photovoltaïques, regroupées en modules appelés panneaux photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est un capteur solaire qui contient plusieurs cellules photovoltaïques. C'est un générateur électrique qui capte la lumière et la convertit en électricité. La quantité d'électricité produite dépend de la puissance maximale du panneau, exprimée en Watt crête (Wc), de l'ensoleillement et de son rendement (la quantité d'énergie qu'il peut récupérer). Le capteur le plus courant est le panneau rectangulaire, installé sur un toit, au sol ou sur une terrasse. Mais il existe aussi d'autres types de capteurs : ardoises, tuiles, éléments de façades.[5]

## I.4 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est reçu de manière intermittente, car les rayons du soleil rencontrent de nombreuses contraintes avant d'atteindre la surface terrestre. Ces obstacles sont dus à la résistance des différentes couches de l'atmosphère et aux nuages. En raison du mouvement de rotation de la Terre sur elle-même combiné à sa forme sphérique, l'ensoleillement varie selon la localisation. [6]

Il existe trois types de rayonnement sur Terre :

**4.1. Rayonnement direct :** il s'agit des rayonnements solaires reçus directement par la Terre en provenance du soleil. Ces rayons sont parallèles entre eux et ne sont pas diffusés par l'atmosphère.[6]

**4.2. Rayonnement diffus :** ce type de rayonnement est dévié par l'atmosphère avant d'atteindre la surface terrestre.[6]

**4.3. Rayonnement réfléchi :** certains rayons solaires sont réfléchis dans l'univers par l'atmosphère pour protéger la vie sur Terre.[6]

**4.4. Le rayonnement global :** à la surface terrestre résulte de la superposition des trois composantes directe, diffus et réfléchi.[6]

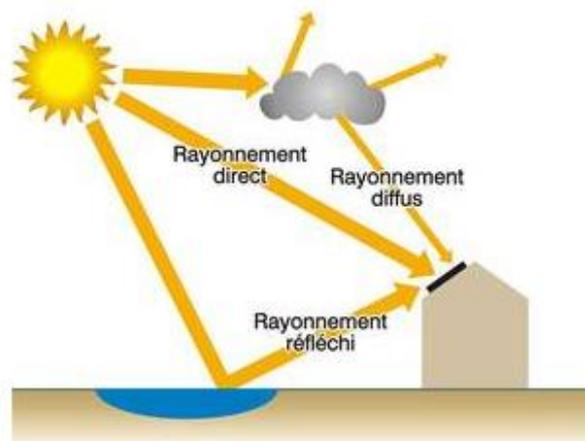


Figure 1.2 Le rayonnement solaire

### I.5 Cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif électronique capable de convertir la lumière (photons) en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Le courant généré dépend de l'intensité lumineuse incidente. Les cellules photovoltaïques produisent un courant continu et leur production d'électricité varie en fonction de l'éclairement. Elles sont généralement fabriquées à partir de semi-conducteurs, principalement du silicium (Si), mais parfois aussi d'autres matériaux tels que le sélénure de cuivre et d'indium ( $\text{CuIn}(\text{Se})_2$  ou  $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$ ), le tellure

de cadmium (CdTe), etc. Ces cellules sont souvent disposées sous forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, encapsulées entre deux contacts métalliques, avec une épaisseur d'environ un millimètre. Pour répondre à différents besoins de puissance, les cellules sont fréquemment regroupées dans des modules solaires photovoltaïques ou des panneaux solaires.

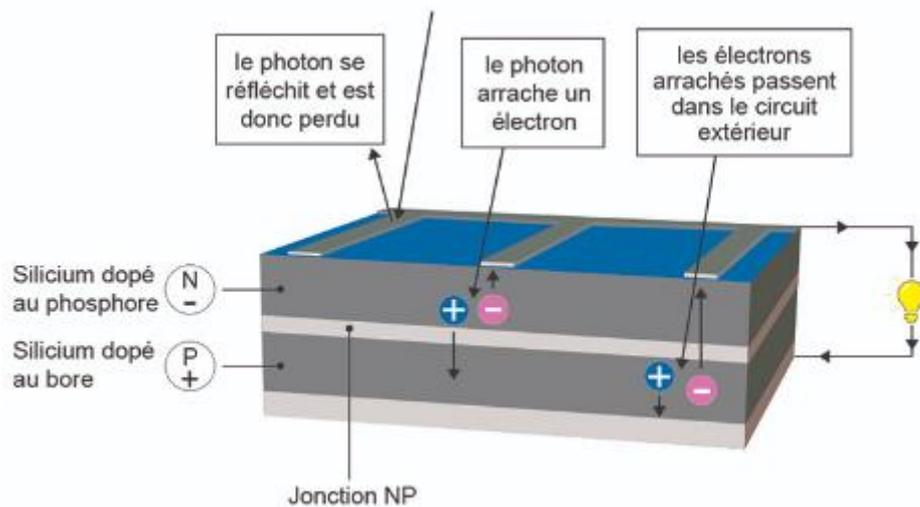


Figure 1.3 Cellule photovoltaïque

## 5.1 Technique de fabrication :

Actuellement, le silicium constitue le principal matériau pour la production des cellules photovoltaïques. Il est extrait de la silice, abondante dans le sable et le quartz. Après une série d'étapes de purification, le silicium est transformé en lingots, puis en plaques appelées « wafers », qui sont métallisées pour devenir des cellules photovoltaïques. La production de ces cellules requiert une quantité significative d'énergie, avec un temps estimé de retour énergétique de deux à trois ans. Les avancées technologiques visent à réduire la consommation de silicium et d'énergie, notamment par le développement de techniques de couches minces sur substrats banalisés. La croissance de l'industrie solaire a été freinée par la pénurie de silicium, incitant à des recherches sur la réduction des coûts et la minimisation de la quantité de silicium utilisée.

## 5.2 Différents types des cellules solaires :

Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques, notamment :

## 5.2.1 Cellule en silicium amorphe :

- La cellule en silicium amorphe est fabriquée à partir d'un gaz de silicium projeté sur du verre. Elle a une couleur gris foncé et est utilisée dans les calculatrices et les montres solaires.
- Elle a comme avantages de fonctionner avec peu de lumière, d'être moins coûteuse que d'autres types de cellules, et de s'adapter à différents supports.
- Elle a comme inconvénients d'avoir un faible rendement en plein soleil, de nécessiter plus d'espace, et de perdre de ses performances au début de son utilisation.[7]



**Figure 1.4** Cellule en silicium amorphe

## 5.2.2 Cellule en silicium monocristallin :

La cellule en silicium monocristallin est une cellule solaire de haute qualité, qui offre un bon rendement et un bon ratio de puissance par surface. Elle est cependant plus chère que d'autres types de cellules.[7]



**Figure 1.5** Cellule en silicium monocristallin

## 5.2.3 Cellule en silicium multi-cristallin :

La cellule en silicium multi-cristallin est une cellule solaire de bonne qualité, qui offre un rendement et un coût intermédiaires entre le monocristallin et l'amorphe. Elle est adaptée aux modules carrés, mais moins performante sous faible luminosité.[7]



Figure 1.6 Cellule en silicium multi-cristallin

## 1.6 Panneau photovoltaïque :

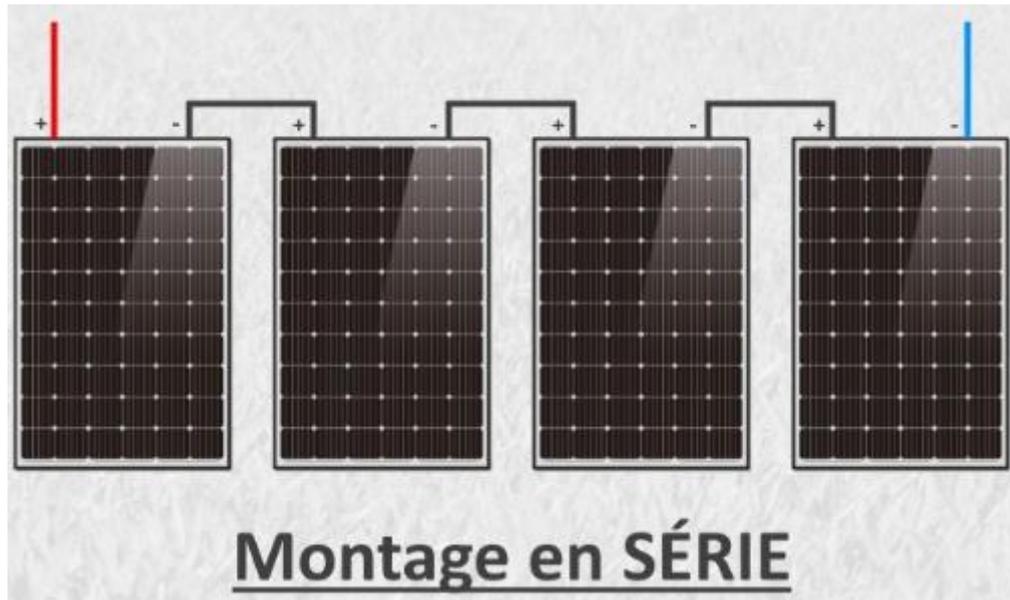
Un panneau photovoltaïque est un dispositif qui convertit l'énergie solaire en électricité. Il est composé de cellules photovoltaïques reliées entre elles et protégées par une couche de verre. Les panneaux photovoltaïques peuvent être installés sur les toits, les façades, les sols ou les structures spéciales pour produire de l'électricité verte et renouvelable.[8]

### 6.1 Assemblage des modules photovoltaïques :

Il existe deux façons de les brancher : **en série** ou **en parallèle**. Ces deux options sont bien différentes, et vous devrez utiliser l'une ou l'autre en fonction de vos besoins.[8]

#### 6.1.1 Le montage de modules photovoltaïques en série :

Les modules photovoltaïques sont branchés en série est de dire que les voltages de chaque module s'additionnent, tandis que l'ampérage reste le même. Ce type de branchement se fait généralement entre des modules qui ont le même ampérage. Sinon, l'ampérage total sera celui du module le plus faible.[8]

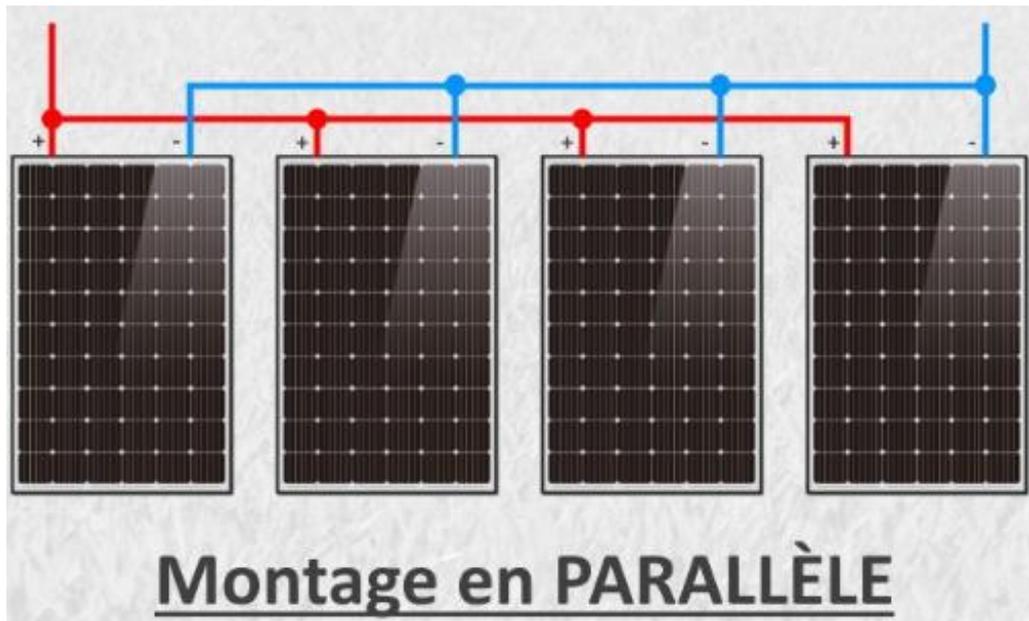


**Figure 1.7** Le montage de modules photovoltaïques en série

Pour un branchement en série, il faut relier les pôles positifs d'un module aux pôles négatifs d'un autre module.[8]

### **6.1.2 Le montage de modules photovoltaïques en parallèle :**

Quand on branche des modules photovoltaïques en parallèle, on obtient la somme des intensités (ampérage), alors que la tension (voltage) ne change pas. C'est l'opposé d'un branchement en série. Ce branchement se fait habituellement entre des modules qui ont le même voltage, pour éviter les problèmes de surtension ou de court-circuit. Les intensités, elles, peuvent varier, car elles s'additionnent. On utilise ce branchement quand on veut une forte intensité.[8]



**Figure 1.8** Le montage de modules photovoltaïques en parallèle

Pour un branchement en parallèle, il faut relier les bornes positives entre elles. Il en est de même pour les bornes négatives.

Lors d'une installation de système photovoltaïque à votre domicile, des techniciens vous aiguillent afin de choisir le système le plus adapté à vos besoins.[8]

### **I.7 Module photovoltaïque :**

L'assemblage de plusieurs cellules forme un module photovoltaïque et le type d'association de ces cellules (série ou parallèle) dépend de la valeur du courant et de la tension désirée à la sortie du panneau photovoltaïque mais dans le principal but et toujours d'avoir plus de puissance. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène. Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.[6]

## 7.1 Systèmes photovoltaïques :

Un système photovoltaïque est un dispositif qui permet de convertir l'énergie solaire en électricité. Il est composé de plusieurs éléments, notamment des panneaux solaires photovoltaïques, des onduleurs, des hacheurs, des batteries et des câbles de connexion. Les panneaux solaires photovoltaïques captent l'énergie du soleil et la convertissent en électricité sous forme de courant continu. [7]

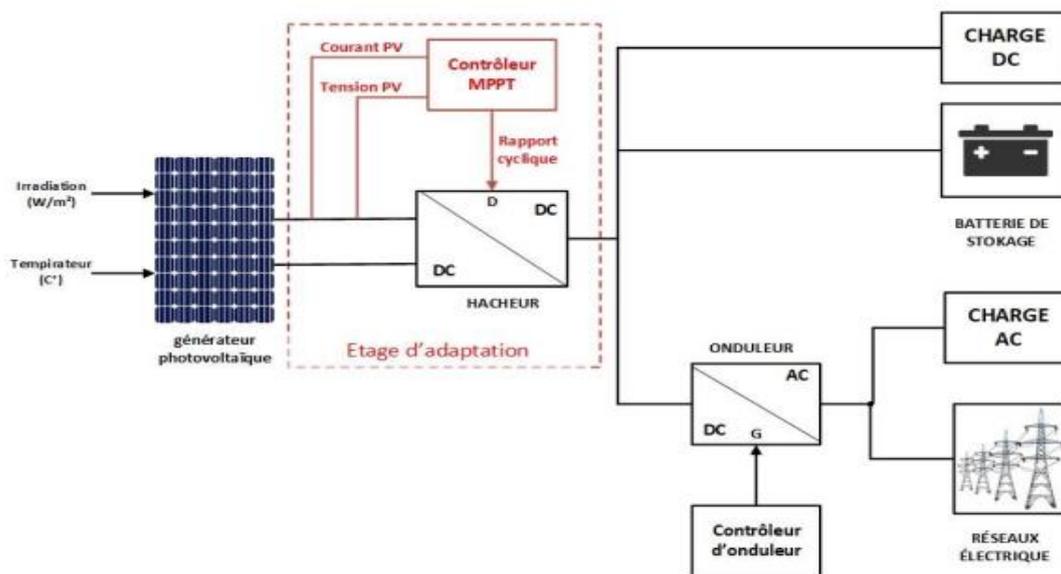


Figure 1.9 Schéma bloc d'une chaîne de conversion photovoltaïque

## I.8 Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque :

Sous un niveau d'éclairement donné, chaque cellule photovoltaïque est caractérisée par deux courbes distinctes : la courbe courant-tension ( $I_{pv}$ - $V_{pv}$ ) et la courbe tension-puissance ( $P_{pv}$ - $V_{pv}$ ). Trois grandeurs physiques jouent un rôle clé dans la définition de ces caractéristiques :

**La tension à vide ( $V_{co}$ ) :** Il s'agit de la tension en circuit ouvert, représentant la tension générée par une cellule éclairée qui n'est pas connectée à un circuit.

**Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) :** Cette valeur représente le courant généré par une cellule éclairée lorsqu'elle est connectée à elle-même en circuit fermé.

**Le Point de Puissance Maximale (PPM) :** Ce point est atteint pour des valeurs optimales de tension et de courant. Il correspond à la puissance maximale que la cellule peut générer dans des conditions données d'éclairement.

Ces paramètres sont essentiels pour évaluer les performances d'une cellule photovoltaïque dans

des conditions spécifiques d'éclairement, et ils permettent de comprendre comment la cellule réagit et produit de l'électricité en fonction des variations de la luminosité ambiante.[7]

## 8.1 Caractéristique courant tension ( I(V) ) :

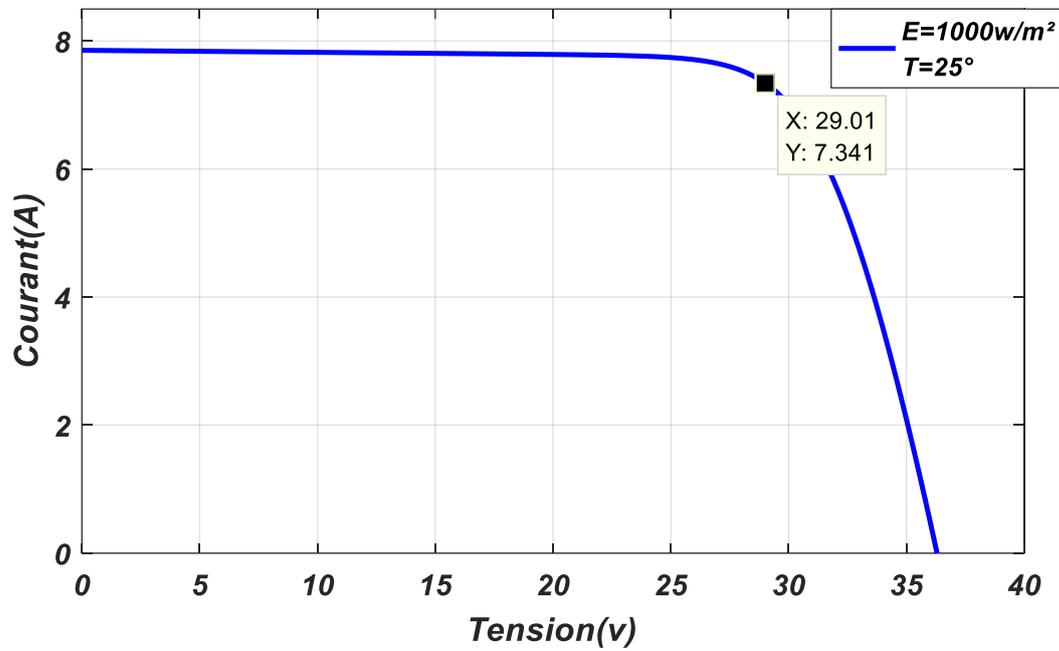


Figure 1.10 Caractéristique courant tension I(V)

## 8.2 Caractéristique puissance tension ( P(V) ) :

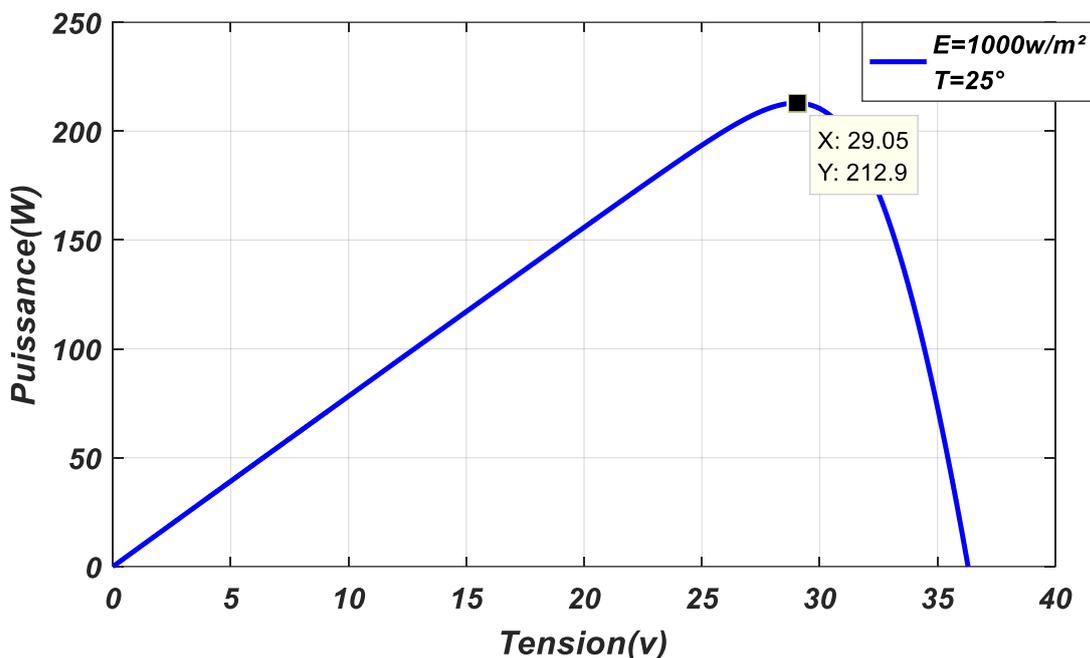


Figure 1.11 Caractéristique puissance tension P(V)

## 8.3 Influence de la température et de l'éclairement sur une cellule photovoltaïque :

L'influence de la température et de l'éclairement sur une cellule photovoltaïque est cruciale pour comprendre son rendement et ses performances. Voici comment ces deux paramètres affectent une cellule photovoltaïque :

### 8.3.1 : Influence de la température :

**Effet sur la tension :** La température a une influence directe sur la tension d'une cellule photovoltaïque. En général, une augmentation de la température entraîne une diminution de la tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ ). Cela est dû à la nature des matériaux semi-conducteurs utilisés dans les cellules, qui voient leur conductivité altérée par la chaleur.[9]

**Effet sur le courant :** La température affecte également le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ). Contrairement à la tension, une augmentation de la température a tendance à augmenter le courant de court-circuit. Cependant, l'effet sur la tension a souvent une influence plus importante sur la puissance globale.[9]

**Effet sur la puissance :** La variation de la tension et du courant impacte la puissance maximale que la cellule peut produire (Point de Puissance Maximale, PPM). En règle générale, une augmentation de la température peut réduire la puissance maximale d'une cellule photovoltaïque.[9]

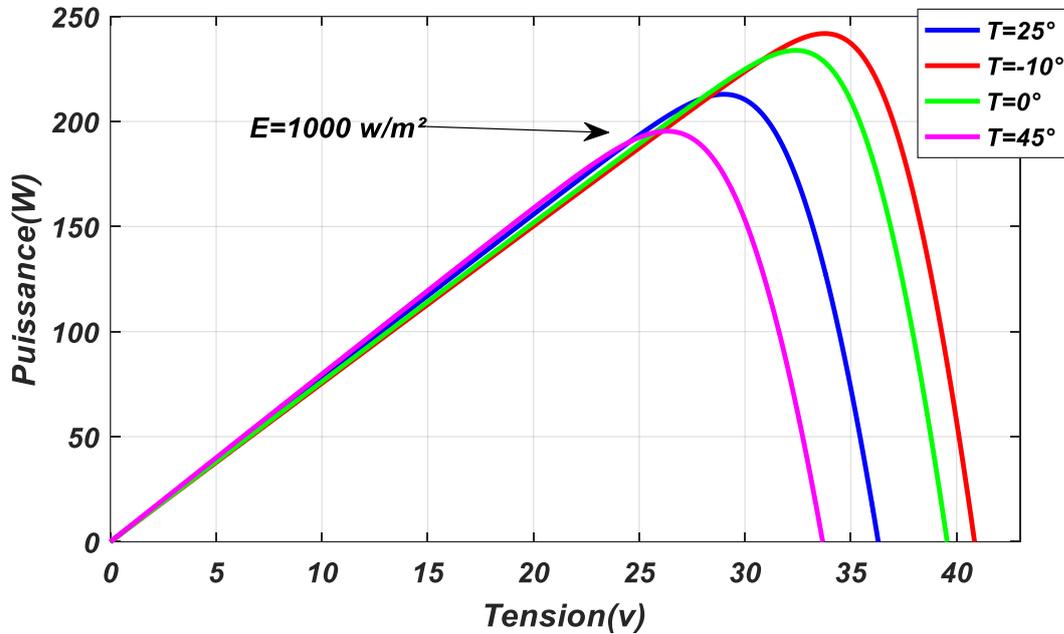


Figure 1.12 Caractéristique puissance tension P(V)

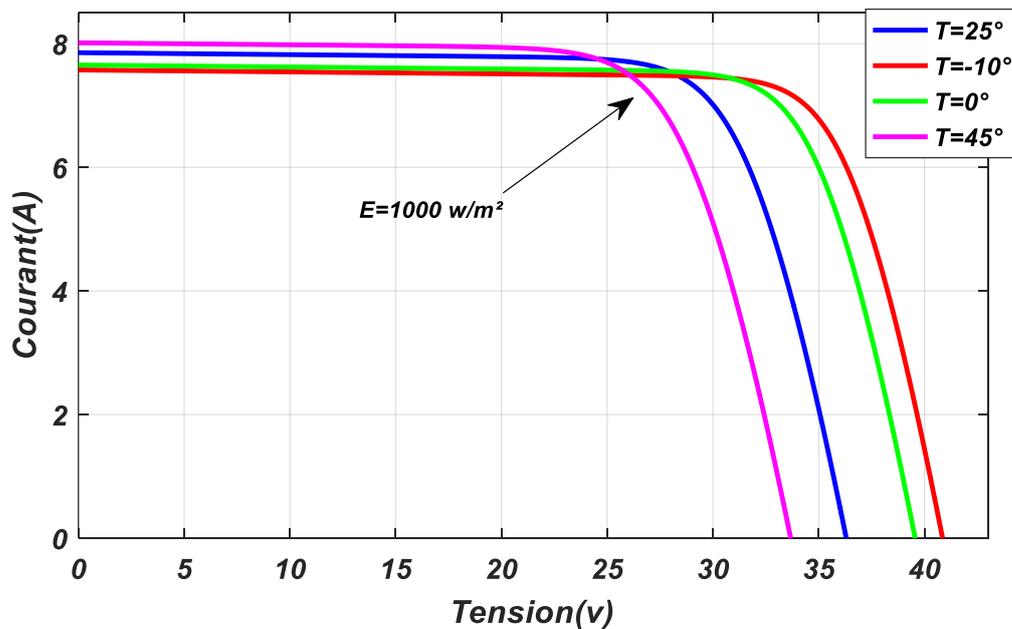


Figure 1.13 Caractéristique courant tension I(V)

8.3.2 Influence de l'éclairement :

**Effet sur la production d'électricité :** L'éclairement, c'est-à-dire le niveau de lumière incidente sur la cellule, a un impact direct sur la production d'électricité. Une cellule photovoltaïque génère plus d'électricité à un niveau d'éclairement plus élevé. Les courbes courant-tension et tension-puissance dépendent directement de l'éclairement.[10]

**Effet sur le PPM :** À mesure que l'éclairement augmente, le Point de Puissance Maximale (PPM) se déplace vers des valeurs de tension et de courant plus élevées. Ainsi, une cellule photovoltaïque peut produire plus de puissance à des niveaux d'éclairement plus élevés.[10]

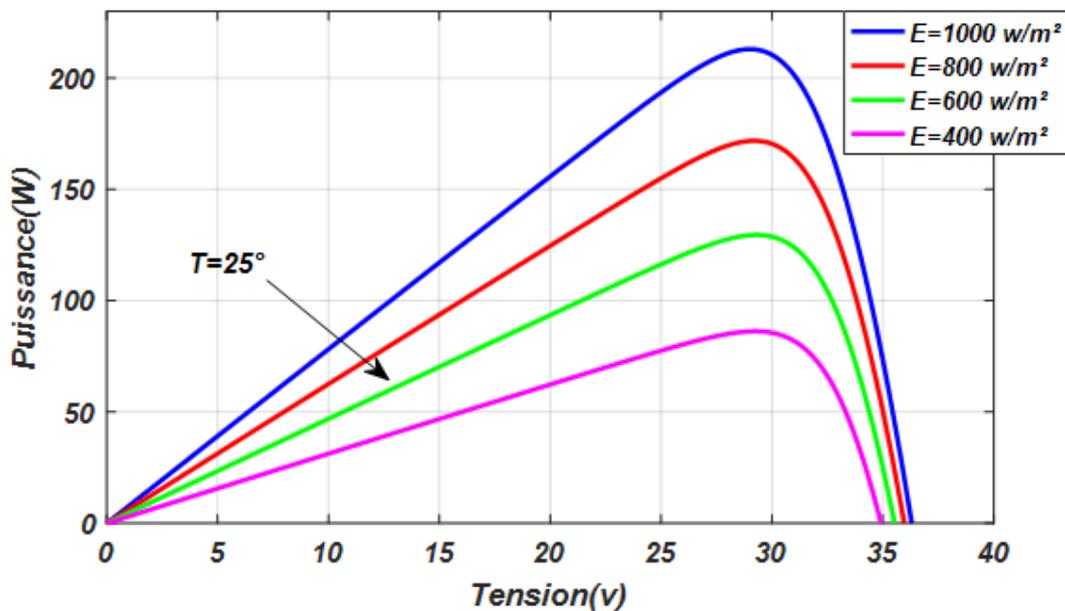


Figure 1.14 Caractéristique puissance tension P(V)

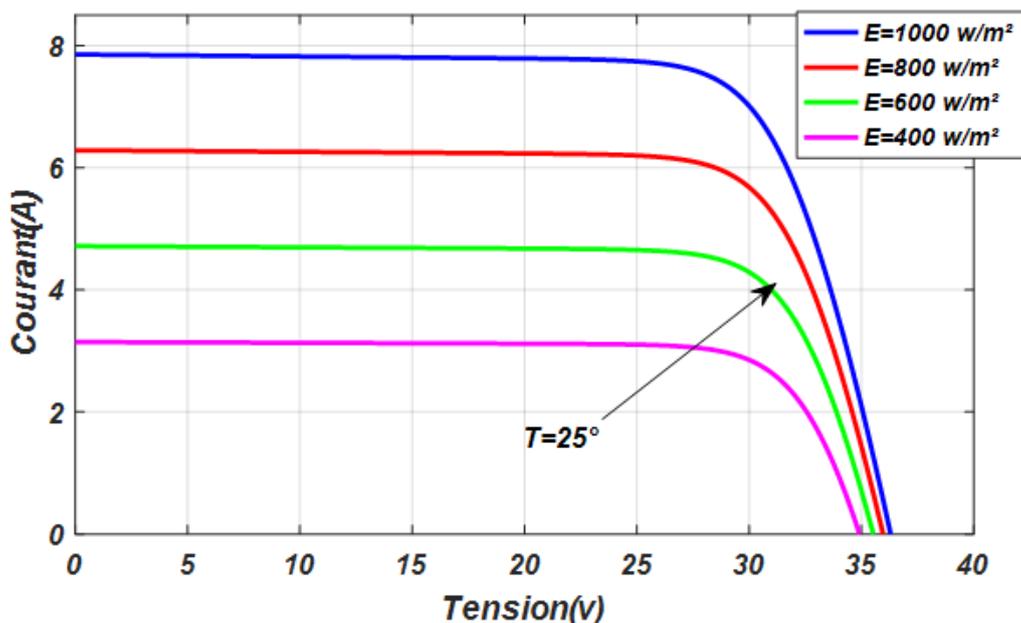


Figure 1.15 Caractéristique courant tension I(V)

### 8.3.3 Influence du changement d'éclairement et de la température :

Lorsque le changement d'éclairement et de la température se produit simultanément, cela peut avoir des effets complexes sur une cellule photovoltaïque en raison de l'interaction entre ces deux paramètres. Voici comment ces influences combinées peuvent se manifester :

#### Effet sur la production d'électricité :

Une augmentation simultanée de l'éclairement et de la température peut conduire à une augmentation globale de la production d'électricité, en particulier si l'impact positif de l'éclairement supplémentaire domine l'effet négatif de la température accrue. [10]

#### Effet sur la tension et le courant :

**Tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ ) :** La variation de l'éclairement et de la température peut influencer la tension à circuit ouvert de manière complexe. Généralement, l'effet de l'éclairement accru tend à augmenter  $V_{co}$ , tandis que l'effet de l'augmentation de la température tend à la réduire. La résultante dépend de la balance entre ces deux influences.

**Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) :** De manière similaire, le courant de court-circuit peut être affecté par le changement d'éclairement et de température de manière simultanée. L'augmentation de

l'éclairement peut augmenter  $I_{cc}$ , tandis que l'effet de la température peut être plus complexe, mais généralement aussi contribuer à une augmentation d' $I_{cc}$ . [10]

### Effet sur le Point de Puissance Maximale (PPM) :

Le PPM est influencée par les variations simultanées de la tension et du courant en raison du changement d'éclairement et de température. Le déplacement du PPM peut dépendre des caractéristiques spécifiques de la cellule photovoltaïque ainsi que de l'équilibre entre les effets opposés de l'éclairement et de la température. [10]

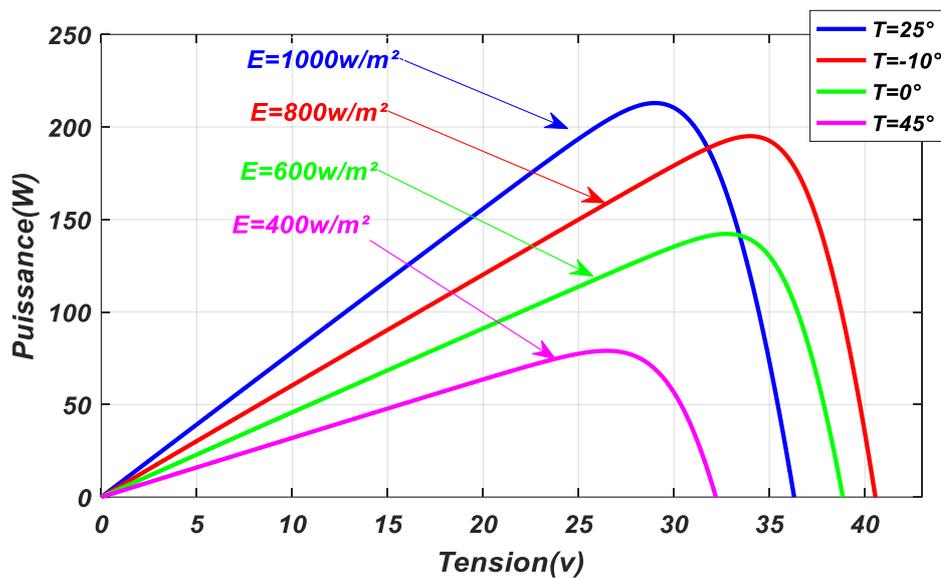


Figure 1.16 Caractéristique puissance tension P(V)

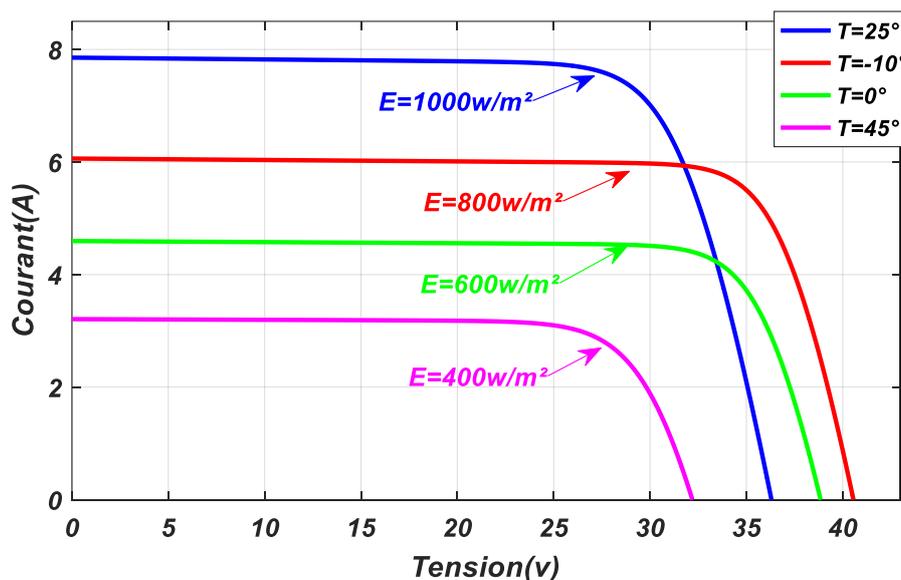
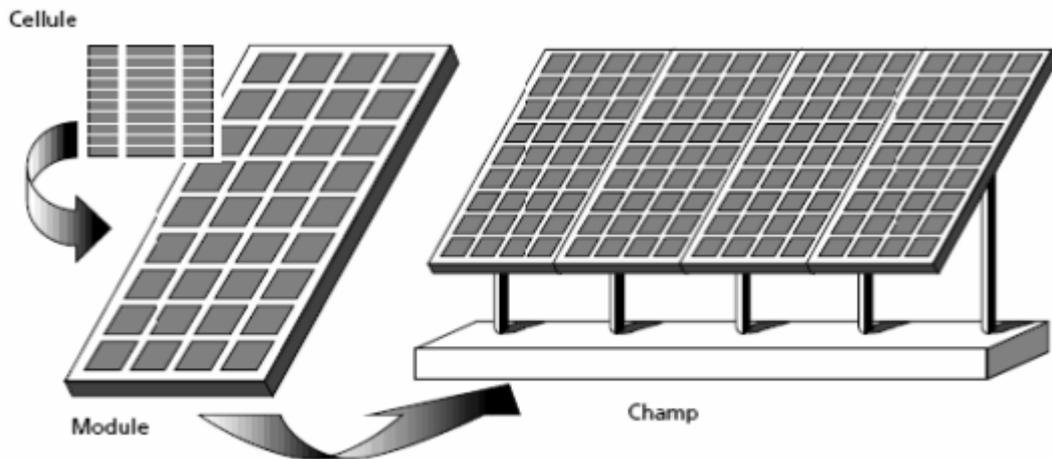


Figure 1.17 Caractéristique courant tension I(V)

## I.9 générateur photovoltaïque (gpv) :

Le générateur photovoltaïque permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique.

Il est réalisé par une association en série et en parallèle de modules photovoltaïques.



**Figure 1.18** Composantes d'un champ de modules photovoltaïques

### 9.1 Module et groupement de cellules en série :

Pour obtenir une tension compatible avec la charge, il faut assembler  $N_{ss}$  modules en série, L'association en série des modules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'un seul module.

La caractéristique d'un groupement de trois modules solaires en série est représentée par les figures suivante : pour un Eclairage  $E=1000W/m^2$  et une Température  $T=25^\circ$

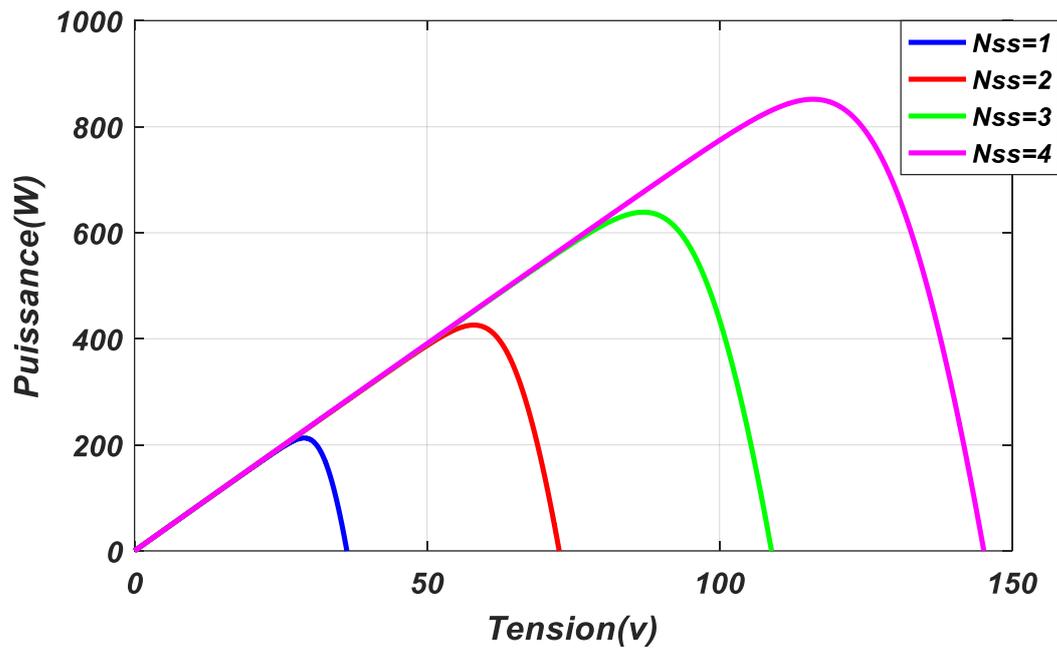


Figure 1.19 Caractéristique P(V) d'un groupement des modules en séries

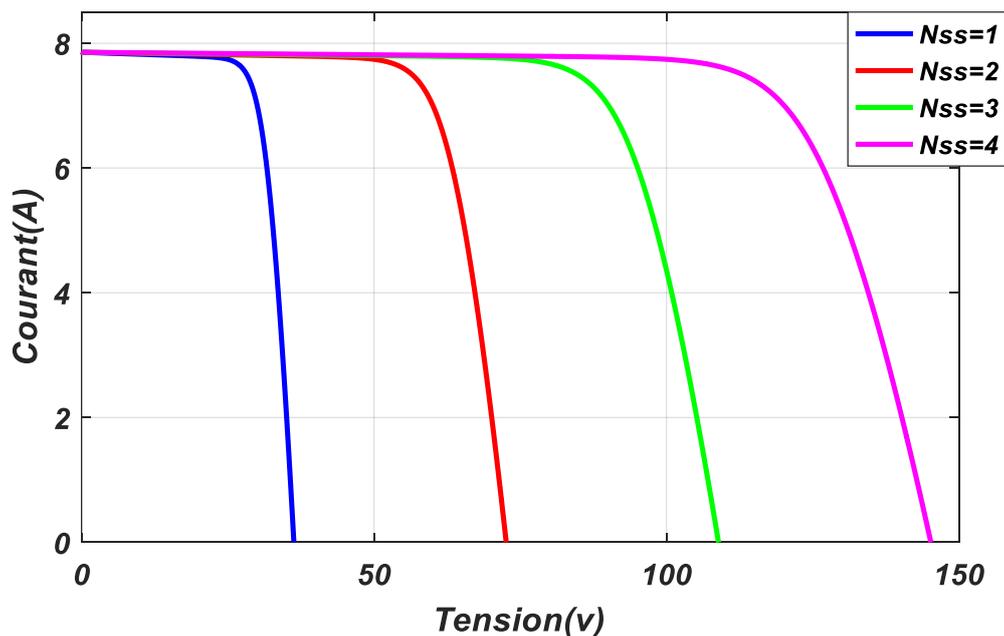


Figure 1.20 Caractéristique I(V) d'un groupement des modules en séries

## 9.2 Module et groupement de cellules en parallèle :

Dans un groupement de modules connectés en parallèle, les modules étant soumis à la même tension, les intensités s'additionnent. La caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

La caractéristique d'un groupement de  $N_{ps}$  modules solaires en parallèle est représentée par les figures suivante : pour un Eclaircement  $E=1000W/m^2$  et une Température  $T=25^\circ$

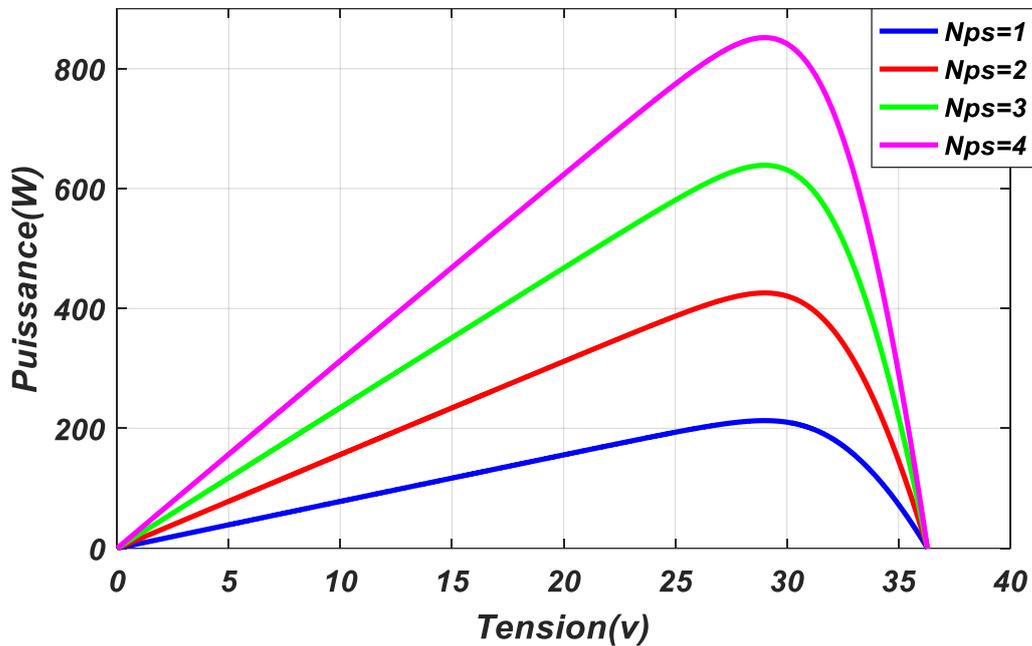


Figure 1.21 Caractéristique P(V) d'un groupement des modules en parallèle

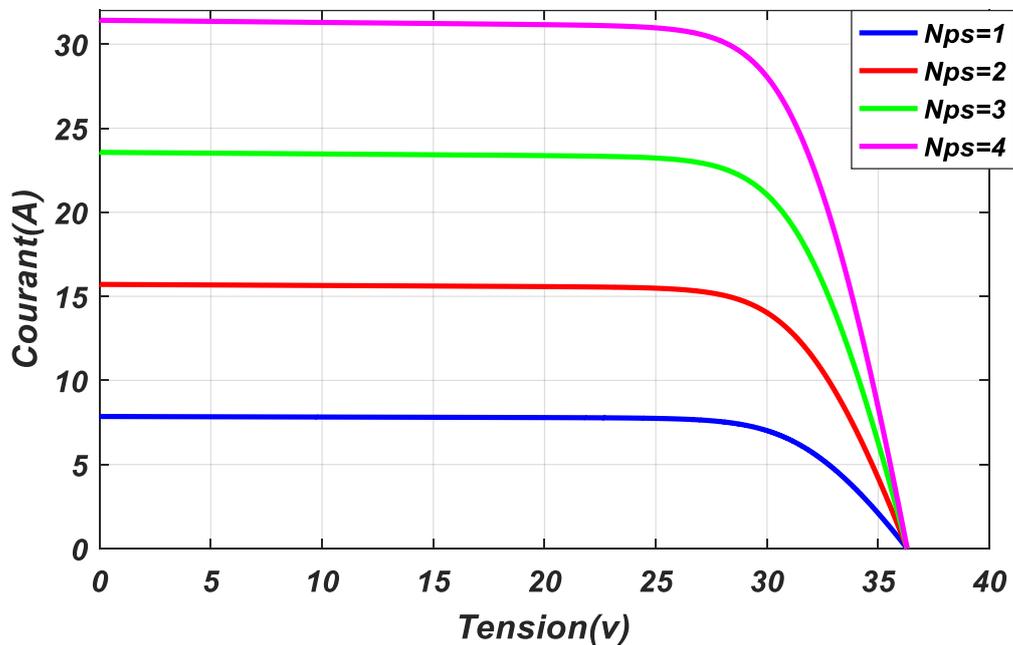


Figure 1.22 Caractéristique I(V) d'un groupement des modules en parallèle

### 9.3 Module et groupement mixte (en Série et en Parallèle) des cellules PV :

pour obtenir une tension et un courant satisfaisants, il est souvent nécessaire d'utiliser un groupement mixte de cellules photovoltaïques, Cela permet d'adapter la configuration du

module en fonction des besoins de l'application.

La caractéristique d'un groupement mixte est représentée par les figures suivante : pour un Eclairement  $E=1000\text{W/m}^2$  et une Température  $T=25^\circ$

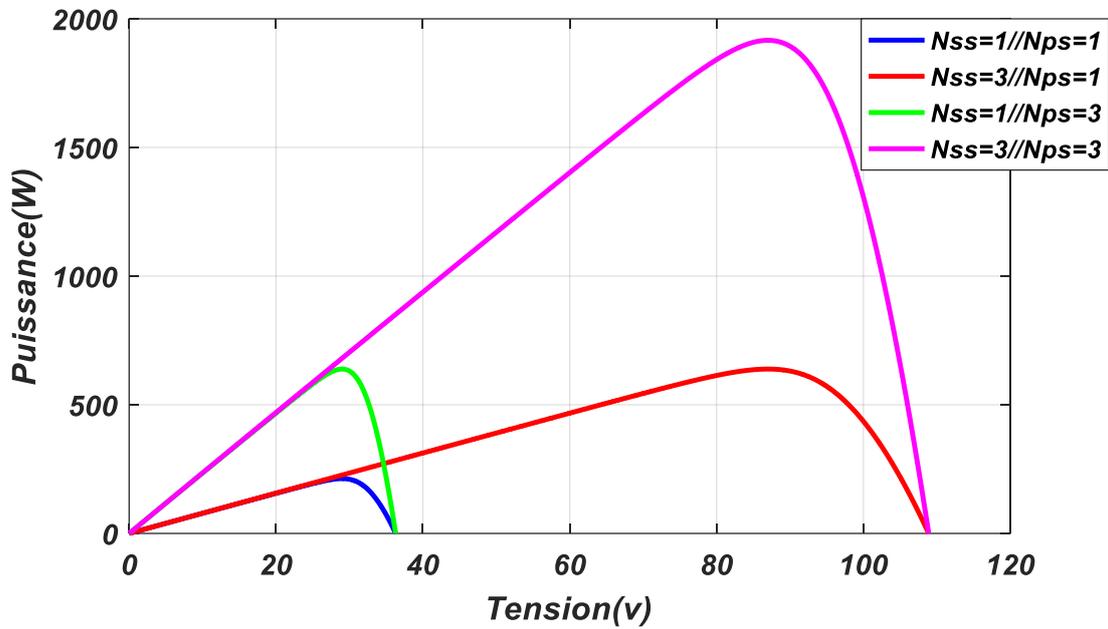


Figure 1.23 Caractéristique P(V) d'un groupement des modules mixte

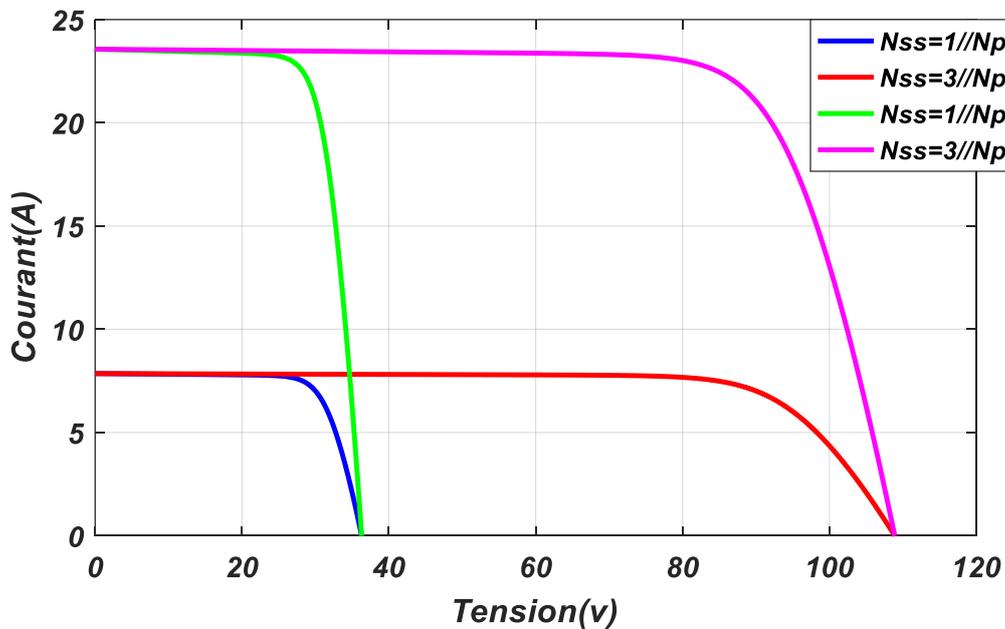


Figure 1.24 Caractéristique I(V) d'un groupement des modules mixte

### I.10 Effet d'éclairement non homogène sur le GPV : Ombrage partiel

Cette section a pour but de marquer l'effet de l'ombrage partiel ou d'éclairement constant et non homogène sur le GPV. Pour cela, on considère un GPV composé de trois modules type 1Soltech 1STH-215-P . Chacun est capable de fournir une puissance crête de 213 W dans les conditions standard de test STC (25 °C, 1000 W/m<sup>2</sup> ). On fixe la température à la valeur de référence et on met les trois modules à des éclairements constants mais différents. Le premier est soumis à 1000 W/m<sup>2</sup> , le second à 600 W/m<sup>2</sup> et le dernier à 400 W/m<sup>2</sup> comme le montre le synoptique

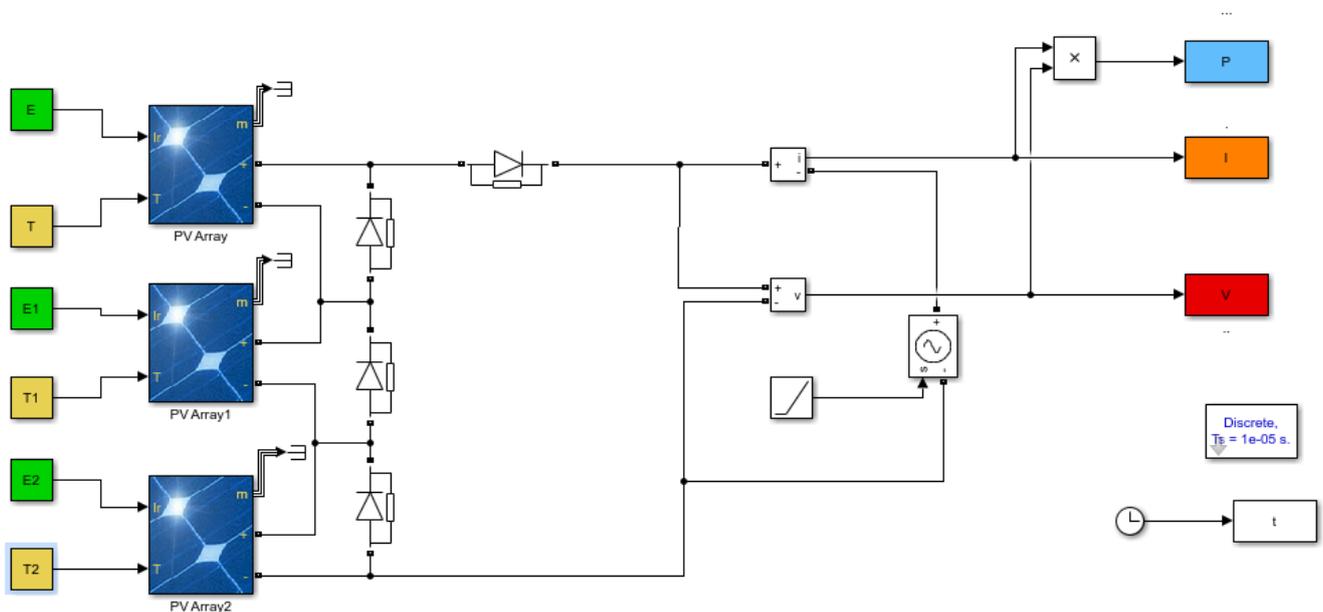


Figure 1.25 Synoptique de simulation de l'effet d'ombrage

L'influence de l'ensoleillement non homogène sur les caractéristiques P-V et I-V est respectivement illustrée dans la figure 1.26 et la figure 1.27 ,On constate l'existence des PPM locaux et un PPM global d'environ 286,7W. Pour le même GPV, on refait le test en considérant un éclairement constant et homogène de 1000 W/m<sup>2</sup> , c'est-à-dire les deux modules ombragés deviennent bien éclairés. Le résultat de simulation est présenté dans la figure 1.28 et la figure 1.29. Dans ce cas, on obtient un PPM de 632.9 W.

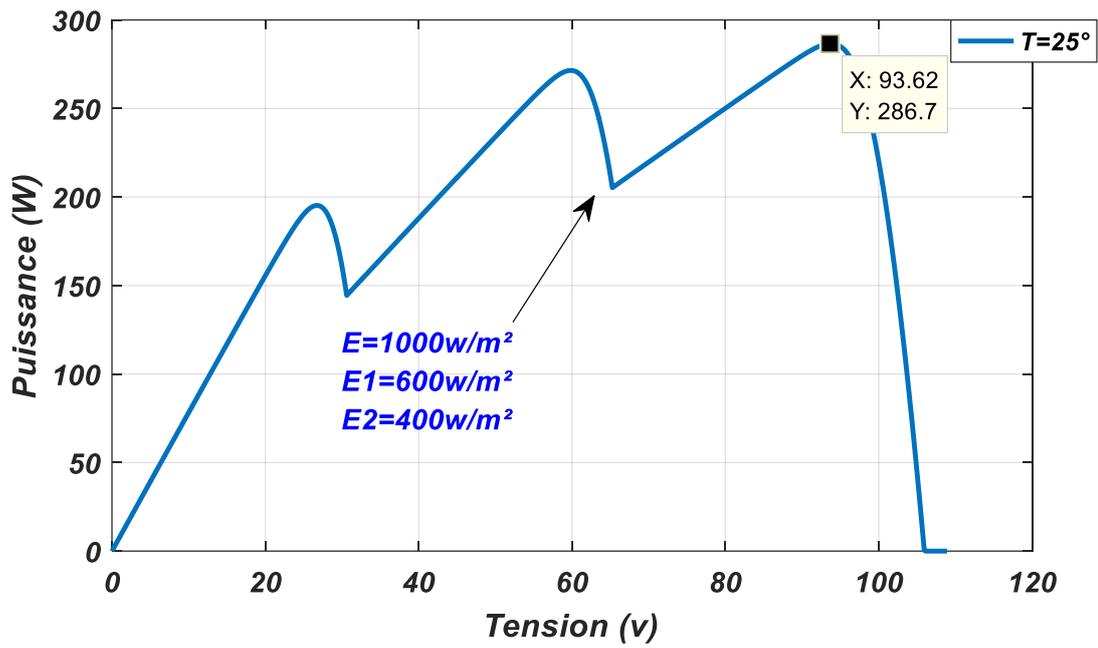


Figure 1.26 Caractéristique puissance tension P(V) en présence d'ombrage

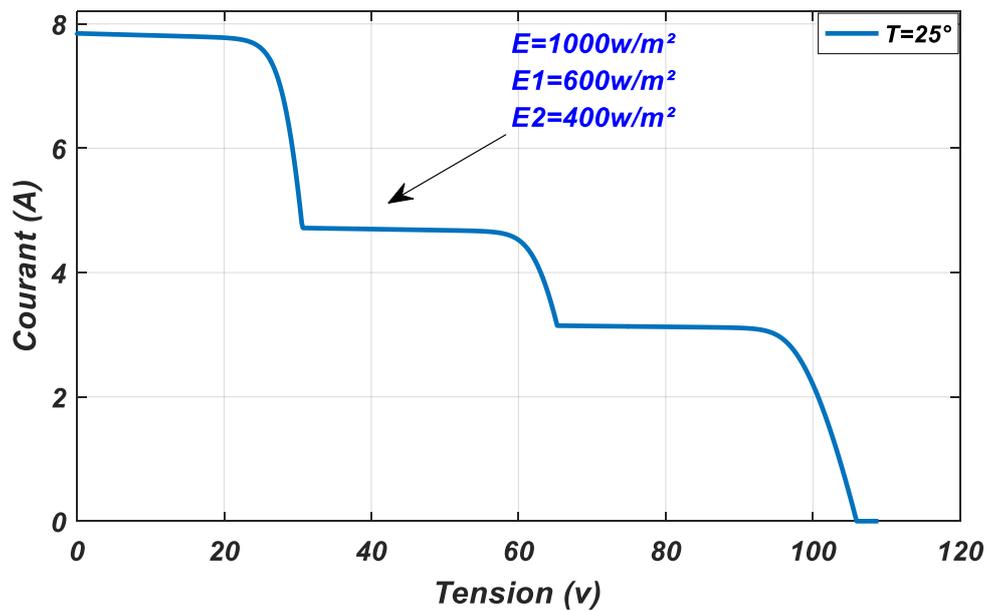
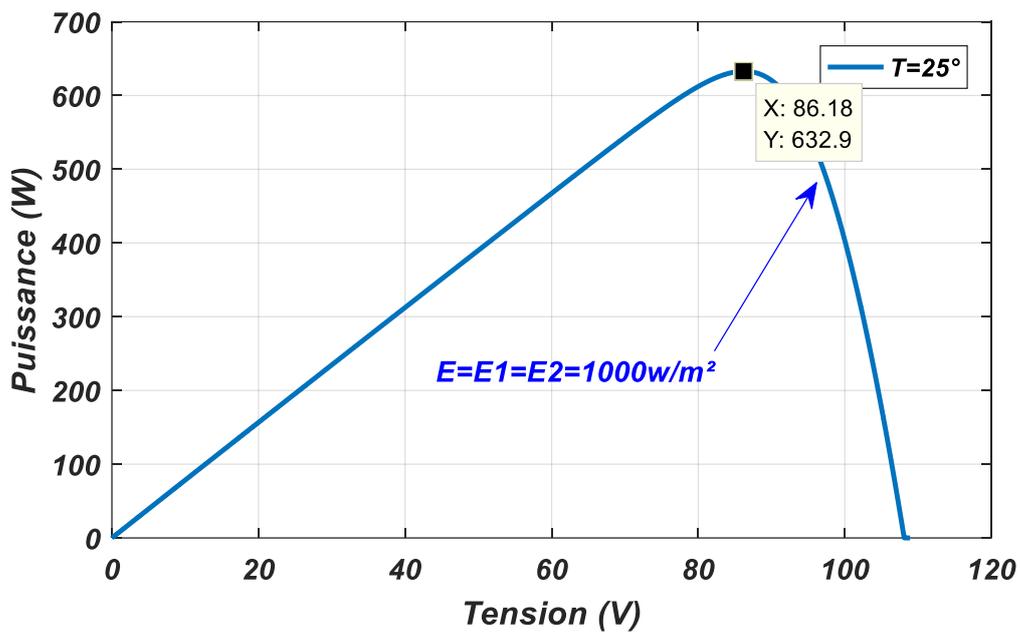
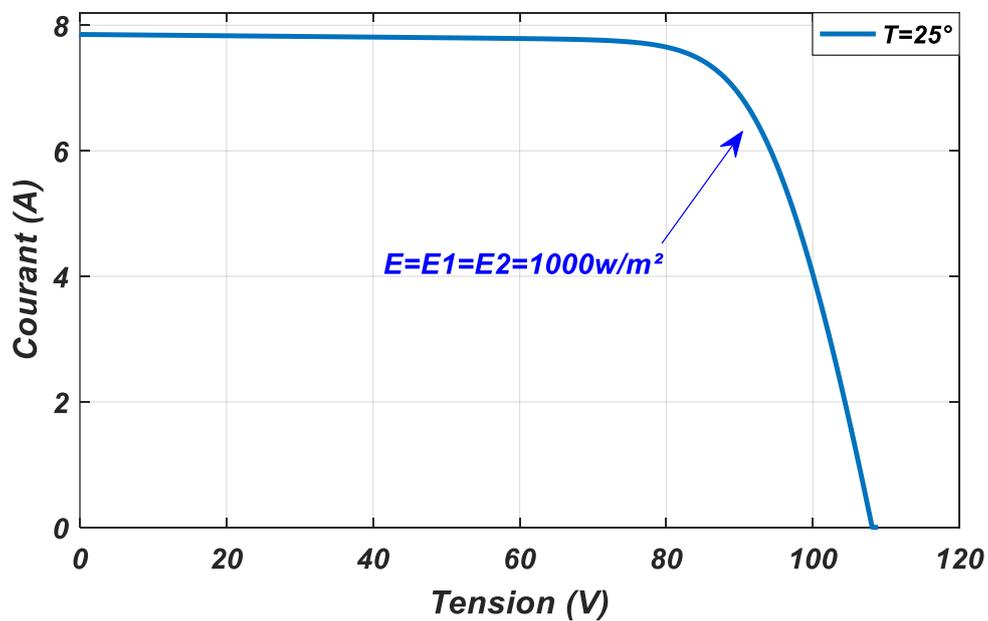


Figure 1.27 Caractéristique courant tension I(V) en présence d'ombrage



**Figure 1.28** Caractéristique puissance tension  $P(V)$  sous des conditions atmosphériques fixes



**Figure 1.29** Caractéristique courant tension  $I(V)$

### I.11 Protection des panneaux solaires :

La protection des panneaux solaires est essentielle pour assurer leur longévité et leur efficacité.

Voici quelques mesures et pratiques pour protéger les panneaux solaires :

#### I.11.1 Protection contre les intempéries :

- **Résistance aux tempêtes et à la grêle :** Les panneaux solaires de haute qualité sont généralement conçus pour résister aux impacts de la grêle. Cependant, dans les zones sujettes à de fortes tempêtes, il peut être utile d'installer des filets de protection ou des écrans anti-grêle.
- **Neige et glace :** Utilisez des supports inclinés pour faciliter le glissement de la neige et de la glace. Des dispositifs de chauffage peuvent également être installés pour dégivrer les panneaux.

#### I.11. 2 Protection contre les dommages physiques :

- **Cadres et fixations robustes :** Assurez-vous que les panneaux sont correctement fixés avec des cadres et des supports robustes pour résister aux vents forts.
- **Grillage ou clôtures :** Protégez les panneaux contre les animaux et les vandales en installant des grillages ou des clôtures autour de l'installation.

#### I.11. 3 Protection contre les surtensions et les incendies :

- **Parafoudres et dispositifs de protection contre les surtensions :** Installez des parafoudres pour protéger les panneaux et les onduleurs contre les surtensions dues aux éclairs.
- **Détecteurs de fumée et extincteurs :** Installez des détecteurs de fumée et gardez des extincteurs à portée de main pour prévenir et gérer les incendies.

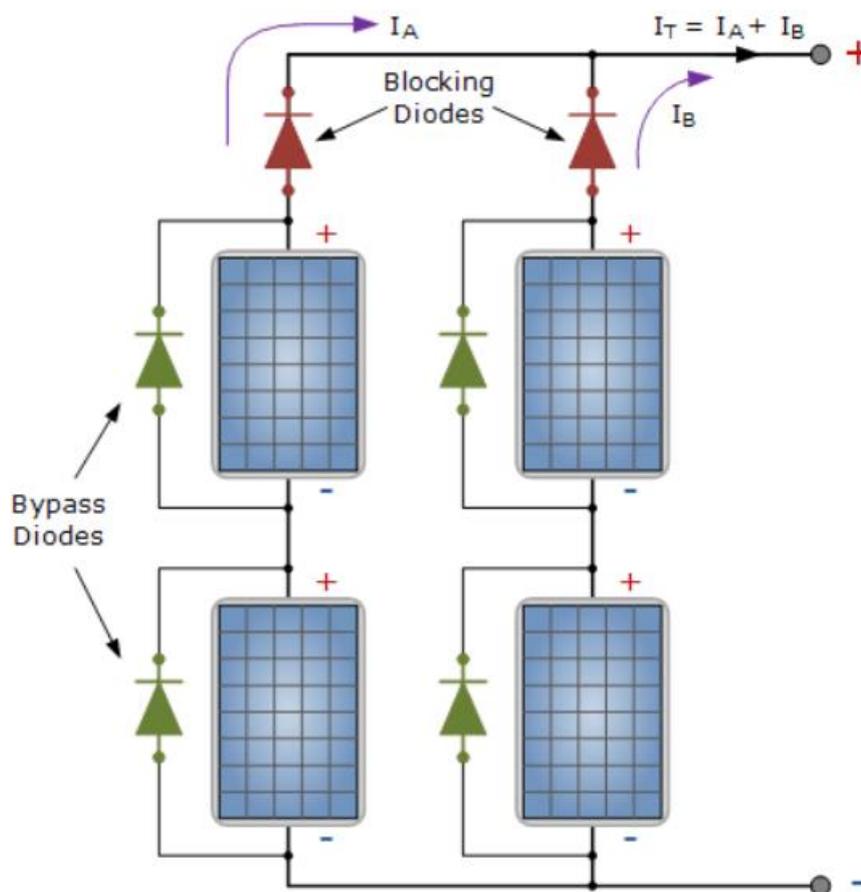
#### I.11.4 Entretien régulier :

- **Nettoyage :** Nettoyez régulièrement les panneaux pour enlever la poussière, les feuilles et autres débris qui peuvent réduire leur efficacité. Utilisez de l'eau et des détergents doux, et évitez les outils abrasifs qui pourraient rayer la surface.

- **Inspections régulières** : Faites inspecter les panneaux et les systèmes électriques régulièrement par des professionnels pour détecter et réparer tout dommage ou dysfonctionnement.

## I.11.5 Les Diodes dans les panneaux photovoltaïques :

Dans les systèmes photovoltaïques, les diodes de bypass et de blocage jouent des rôles essentiels pour la protection et l'optimisation des performances des panneaux solaires.



**Figure 1.30** Diodes de protection des modules

### I.11.5.1 Diodes de Bypass :

Les diodes bypass sont essentielles pour garantir la longévité, la sécurité et la performance des panneaux solaires. Elles protègent les cellules contre les dommages causés par les ombrages partiels et les défaillances, réduisent les pertes de puissance et assurent que le système photovoltaïque fonctionne de manière optimale même dans des conditions non idéales.

### **I.11.5.2 Diodes de blocage :**

Les diodes de blocage, également appelées diodes anti-retours, sont essentielles pour la protection et l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Elles empêchent le courant inverse, protègent les panneaux solaires et les batteries, minimisent les pertes de puissance et augmentent la fiabilité et la durabilité du système. Leur installation correcte est cruciale pour assurer le bon fonctionnement et la longévité des systèmes solaires.

### **I.12 Avantages et Inconvénients de l'énergie PV :**

Les principaux avantages de l'énergie PV sont :

- L'énergie PV est renouvelable et fiable car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles
- Renouvelabilité : Source inépuisable d'énergie grâce au soleil.
- Flexibilité : Installation adaptable selon les exigences énergétiques.
- Entretien réduit : Moins de maintenance comparée aux autres énergies.
- Propreté : Aucune émission polluante durant la production d'énergie.

Les inconvénients de l'énergie PV sont :

- Investissement initial : Coûts de production et d'installation élevés.
- Efficacité : Taux de conversion énergétique plus bas que les énergies fossiles.
- Utilisation du terrain : Nécessité d'un grand espace pour les installations.
- Intermittence : Production limitée aux périodes ensoleillées.
- Stockage énergétique : Coûts élevés liés aux batteries.

### I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'énergie photovoltaïque et ses composantes essentielles. Nous avons abordé les éléments fondamentaux des cellules solaires et Différents groupements de cellules (en série et/ou en parallèle) forment le module photovoltaïque. Nous avons étudié les caractéristiques courant-tension et puissance-tension des cellules solaires et L'influence des paramètres environnants et structurels sur ces caractéristiques a été mise en évidence. Un modèle mathématique a été établi pour comprendre ce phénomène physique. La caractéristique courant-tension est fortement non linéaire et présente un seul point de fonctionnement optimal. L'insertion de convertisseurs statiques avec une commande appropriée entre le générateur et sa charge permet d'optimiser le transfert d'énergie.

---

## ***CHAPITRE 2***

# ***ETAGE D'ADAPTATION ET COMMANDE MPPT***

---

### II.1 Introduction :

L'étage d'adaptation et les algorithmes MPPT (Maximum Power Point Tracking) jouent un rôle essentiel dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la production d'énergie solaire. L'étage d'adaptation, également appelé convertisseur DC-DC, est utilisé pour adapter la tension et le courant du générateur photovoltaïque aux exigences du système de charge ou du réseau électrique. Il permet d'optimiser l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en ajustant les paramètres de tension et de courant.

Les algorithmes MPPT sont des techniques utilisées pour rechercher et suivre le point de puissance maximale (MPP) du générateur photovoltaïque. Le MPP correspond à la combinaison optimale de tension et de courant à laquelle la puissance de sortie du panneau solaire est maximisée. Les algorithmes MPPT ajustent les paramètres de l'étage d'adaptation pour maintenir le système photovoltaïque à son MPP, même en présence de variations des conditions d'éclairement solaire et de température.

Après avoir déterminé la structure du convertisseur adopté, on présentera quelques techniques MPPT existantes qui permettent de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale. La conception d'un étage d'adaptation muni d'un algorithme MPPT permet d'optimiser la conversion énergétique et de relier aisément un GPV à sa charge.

### II.2 Rôle des convertisseurs DC-DC :

les convertisseurs DC-DC sont des composants électroniques utilisés pour convertir une tension continue d'un niveau à un autre. Leur rôle principal comprend la régulation de tension, l'adaptation de tension, l'isolation électrique, l'augmentation ou la réduction de la tension, l'amélioration de l'efficacité énergétique et leur utilisation dans une variété d'applications, notamment l'électronique grand public, l'automobile, les télécommunications et les énergies renouvelables. Ils sont essentiels pour fournir une alimentation stable et adaptée aux besoins variés des systèmes électroniques modernes.[11]

### II.3 Différents types des hacheurs :

#### II.3.1. Convertisseur Boost :

Un convertisseur Boost est un type de convertisseur DC-DC qui élève la tension continue d'entrée à une tension continue supérieure en sortie. le convertisseur Boost augmente la tension d'entrée à une tension de sortie plus élevée. Il est couramment utilisé dans de nombreuses applications où une tension de sortie plus élevée que la tension d'entrée est nécessaire.

Le fonctionnement du convertisseur Boost repose sur l'utilisation d'un interrupteur (généralement un transistor) pour contrôler le flux d'énergie depuis une source d'alimentation (telle qu'une batterie ou une source de tension continue) à travers une inductance (bobine) vers un condensateur et la charge. Lorsque l'interrupteur est fermé, de l'énergie est stockée dans l'inductance sous forme de champ magnétique. Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'énergie stockée dans l'inductance est libérée dans le condensateur et la charge, augmentant ainsi la tension de sortie.[12]

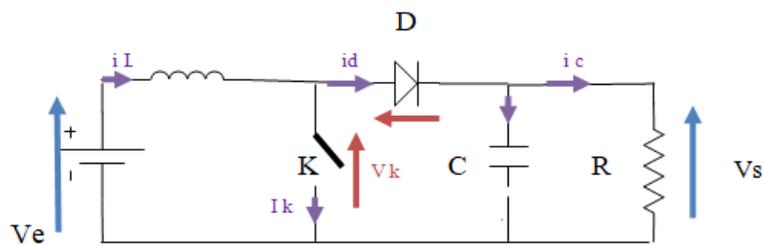


Figure 2.1 Circuit électrique d'Hacheur élévateur (Boost)

-Pour  $(0 < t < \alpha T)$  : L'interrupteur  $K$  est fermé, le circuit du convertisseur prend la configuration suivante :

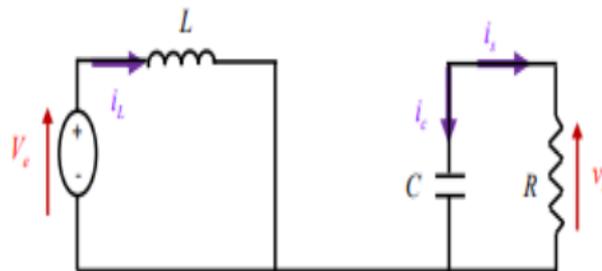


Figure 2.2 Circuit équivalent du Boost quand  $K$  est fermé

-Pour  $(\alpha T < t < T)$ , L'interrupteur  $K$  est ouvert, le circuit du convertisseur se présente selon la configuration montrée dans la Figure (2.3) :

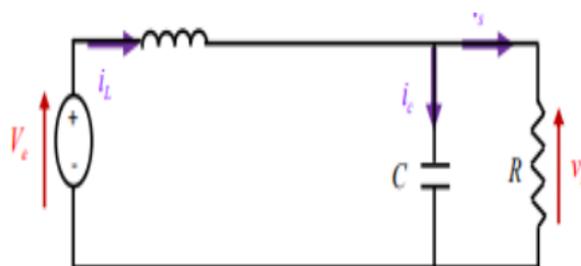


Figure 2.3 Circuit équivalent du Boost quand  $K$  est ouvert

lorsque K est fermé : La tension à ses bornes est nulle, la source et la charge ne sont pas en contact, la diode est alors bloquée et le courant dans l'inductance croît linéairement, cette phase dure de 0 à  $DT$

lorsque K est ouvert : l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode qui devient passante cette phase dure  $DT$  à  $T$ .

- Pour  $t[0,DT]$ , K est fermé :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C1 \frac{dV_L(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C2 \frac{dV_s(t)}{dt} = -i_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_e(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

- Pour  $t[DT, T]$ , K est ouvert :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C1 \frac{dV_e(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C2 \frac{dV_s(t)}{dt} = i_L(t) - i_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_e(t) - V_s(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

A partir des équations (2.1) et (2.2), on peut écrire l'équation suivante :

$$V_e DT_s + (V_e - V)(T_s - DT_s) = 0 \quad (2.3)$$

$$V_e DT_s + (V_e - V)(1 - D)T_s = 0 \quad (2.4)$$

$$V_e DT_s = (-V_e(1 - D) + V_s(1 - D)) T_s \quad (2.5)$$

$$V_e D = \frac{(-V_e(1 - D) + V_s(1 - D))T_s}{T_s} \quad (2.6)$$

$$V_e (D - D + 1) = V_s (1 - D) \quad (2.7)$$

$$V_e = (1 - D)V_s \quad (2.8)$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.9)$$

$$V_s = \frac{1}{1 - D} V_e \quad (2.10)$$

### II.3.1.1 Simulation d'un convertisseur Boost :

On a fait la simulation du circuit du convertisseur Boost par le logiciel MATLAB SIMULINK :

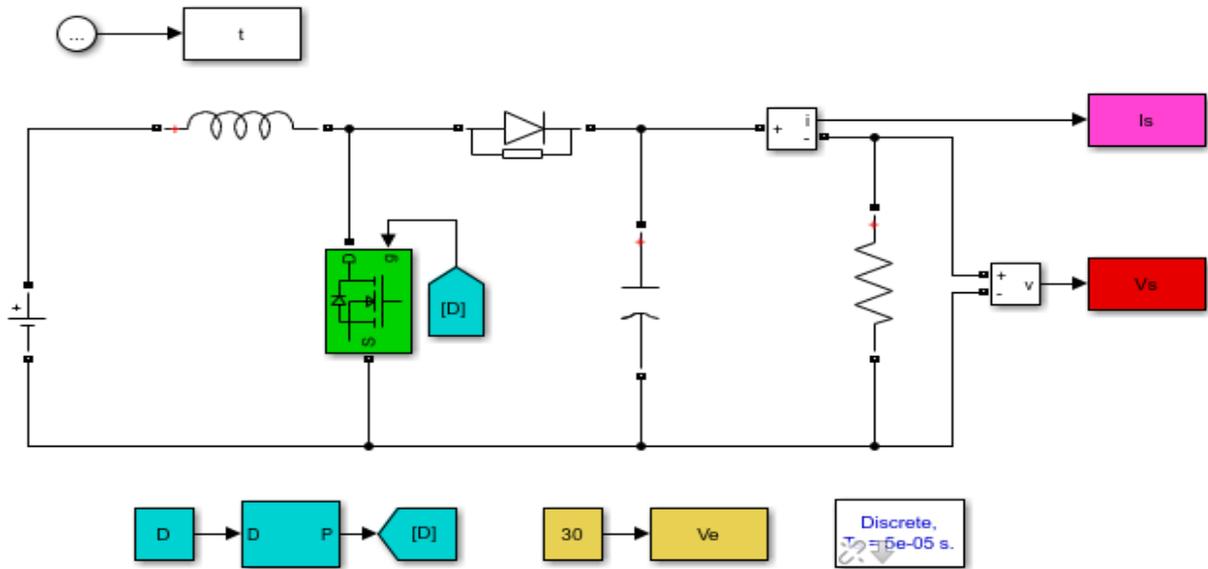


Figure 2.4 Circuit MATLAB SIMULINK d'un hacheur BOOST

Nous avons choisi la valeur de rapport cyclique  $D=0.4$

On fait l'application numérique :

$$\frac{1}{1 - 0.4} \times 30 = 50$$

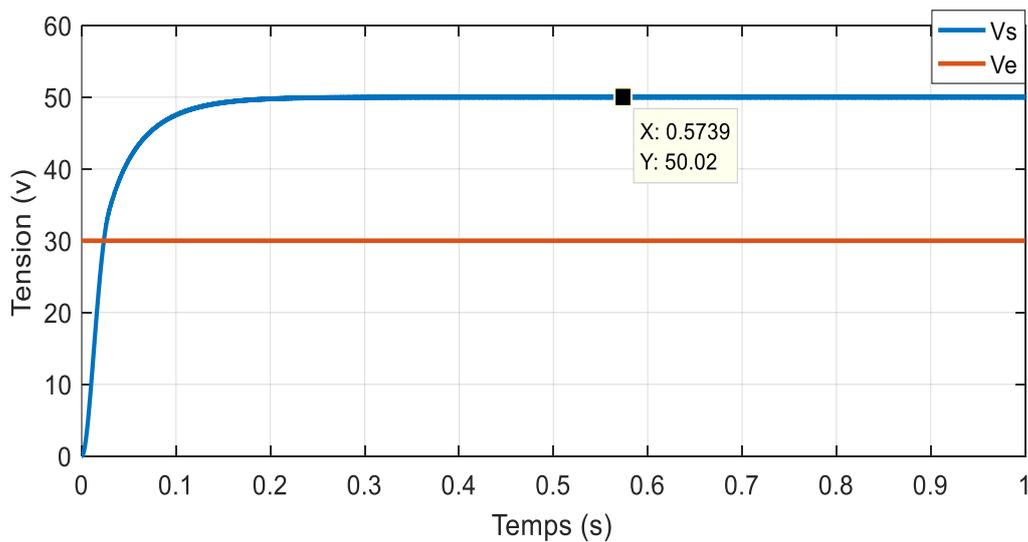


Figure 2.5 Simulation de la tension entrée et sortie d'un hacheur DC-DC BOOST

### II.3.2 Convertisseur Buck :

Un convertisseur Buck est un type de convertisseur DC-DC qui abaisse la tension continue d'entrée à une tension continue inférieure en sortie.

Le convertisseur Buck est un circuit électronique qui régule et abaisse la tension d'entrée pour fournir une tension de sortie inférieure. Il utilise un interrupteur contrôlé, généralement un transistor, pour moduler le flux d'énergie depuis une source d'alimentation vers une charge en régulant la durée pendant laquelle l'interrupteur est ouvert et fermé. Cela permet de réduire efficacement la tension de sortie tout en conservant l'efficacité énergétique du système.

Les convertisseurs Buck sont largement utilisés dans de nombreuses applications, notamment les alimentations à découpage, les systèmes de régulation de tension, les chargeurs de batteries, les systèmes d'alimentation pour les ordinateurs et de nombreux autres dispositifs électroniques nécessitant une tension de sortie inférieure à la tension d'entrée.[13]

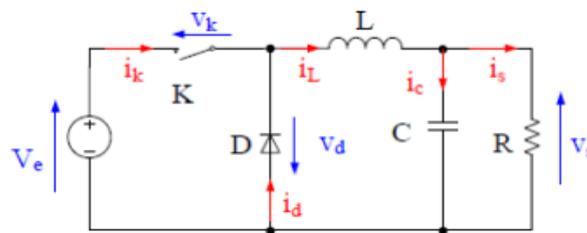


Figure 2.6 Schéma du convertisseur Buck

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux configurations, à savoir : configuration selon l'état de l'interrupteur  $K$  est passant ou bloqué. La figure suivante montre les états de l'interrupteur  $K$ .

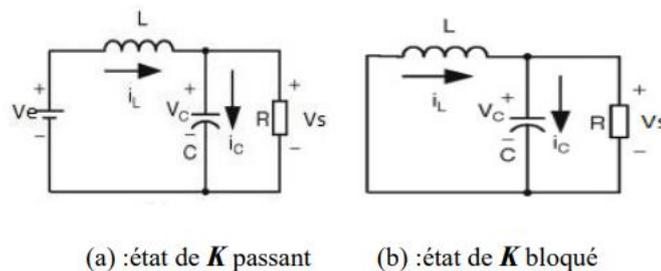


Figure 2.7 les deux configurations d'un convertisseur Buck

Dans l'état passant, l'interrupteur  $K$  est fermé : la source  $V_e$  fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance cette phase dure de  $0$  à  $DT$ , avec  $D$  compris entre  $0$  et  $1$ , étant le rapport cyclique.

Dans l'état bloqué, l'interrupteur  $K$  est ouvert : la diode devient passante car l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre

cette phase durée  $DT$  à  $T$ .

- Pour  $t[0, DT]$ ,  $K$  est fermé :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C1 \frac{dV_e(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C2 \frac{dV_s(t)}{dt} = i_L(t) - i_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_e(t) - V_s(t) \end{cases} \quad (2.11)$$

- Pour  $t[DT, T]$ ,  $K$  est ouvert :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C1 \frac{dV_e(t)}{dt} = i(t) \\ i_{c2}(t) = C2 \frac{dV_s(t)}{dt} = i_L(t) - i_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_s(t) \end{cases} \quad (2.12)$$

En régime permanent, la tension moyenne d'inductance est nulle :

$$V_i(t) = DTs(V_e - V) + (Ts - DTs)(-V_s) = 0 \quad (2.13)$$

La relation de la tension d'entrée  $V_e$  et de sortie  $V_s$  en fonction du rapport cyclique  $D$  est donnée par l'équation (2.3) :

$$(V_e - V_s)DTs = (1 - D)sV_s \quad (2.14)$$

A partir de l'équation (2.14) le rapport de conversion d'hacheur dévolteur est donné par la forme suivant :

$$V_eDTs - V_sDTs = V_sTs(1 - D) \quad (2.15)$$

$$V_eDTs = V_s(DTs + (1 - D)) \quad (2.16)$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{DTs}{DTs + (1 - D)Ts} = \frac{D}{D + 1 - D} = D \quad (2.17)$$

$$V_s = DV_e \quad (2.18)$$

### II.3.2.1. Simulation d'un convertisseur Buck :

On a fait la simulation du convertisseur BUCK par le logiciel MATLAB SIMULINK :

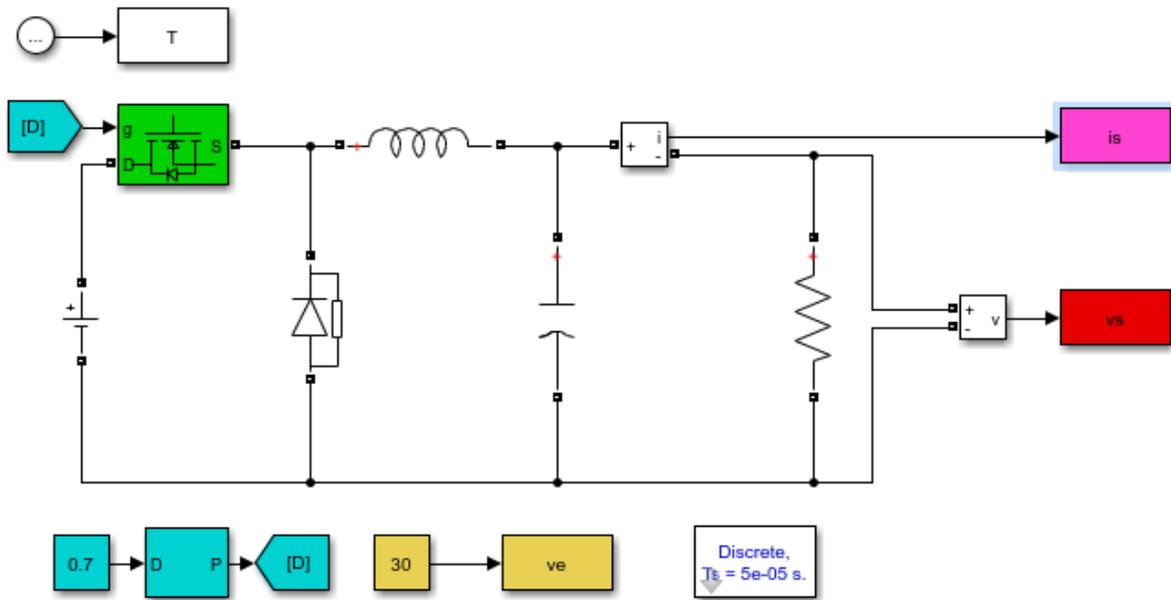


Figure 2.8 Circuit MATLAB SIMULINK d'un hacheur BUCK

Nous avons choisi la valeur de  $D=0.7$

Et on a fait l'application numérique :

$$0.7 \times 30 = 21$$

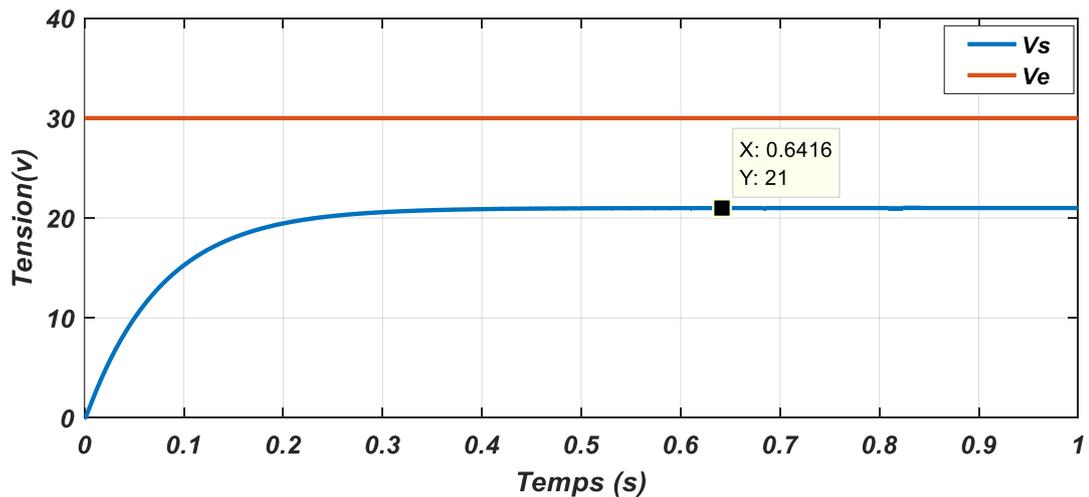


Figure 2.9 Résultat de simulation d'un hacheur DC-DC BUCK tension sortie et idéal de panneau

### II.3.3. Convertisseur Buck-Boost :

Un convertisseur Buck-Boost est un type spécial de convertisseur DC-DC capable de fournir une tension de sortie soit inférieure soit supérieure à la tension d'entrée.

Le convertisseur Buck-Boost est un circuit électronique utilisé pour réguler la tension continue (DC) en ajustant à la fois la tension et le courant en sortie. Contrairement aux convertisseurs Buck et aux convertisseurs Boost.

Son fonctionnement repose généralement sur un interrupteur (transistor) et un circuit de commande qui ajustent le rapport cyclique de l'interrupteur pour obtenir la tension de sortie désirée. Lorsque l'interrupteur est fermé, de l'énergie est stockée dans une inductance. Lorsqu'il est ouvert, cette énergie est libérée dans la charge à travers un condensateur.

Il est utilisé dans des domaines tels que les sources d'alimentation pour appareils portables, les régulateurs de batterie, les chargeurs de batteries, les systèmes solaires, les éclairages LED.

Sa capacité à fournir une tension de sortie réglable par rapport à une tension d'entrée variable en fait un choix polyvalent pour de nombreuses applications où une adaptation de tension est nécessaire.[14]

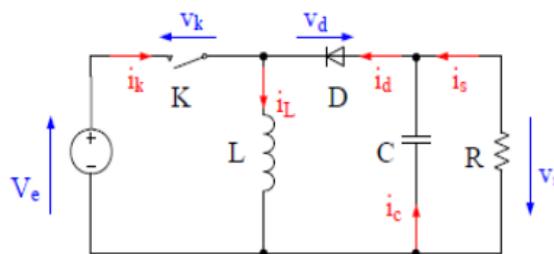
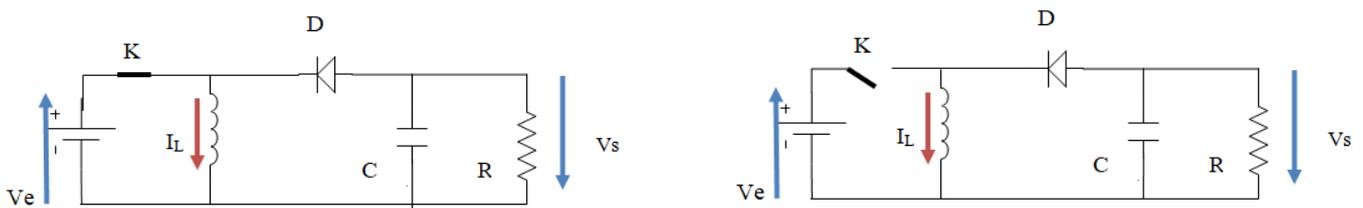


Figure 2.10 Schéma de convertisseur Buck-Boost



(a) :état de K passant (b) :état de K bloqué

Figure 2.11 Les deux configurations d'un convertisseur Buck-Boost

-Pour( $0 < t < \alpha T$ ) : L'interrupteur K est fermé , la diode n'est pas passante et l'inductance stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée..

-Pour( $\alpha T < t < T$ ), C'est l'état bloqué, l'interrupteur K est ouvert la diode devient passante

,l'inductance restitue son énergie à la charge.

- Pour  $t[0, DT]$  , K est fermé :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C1 \frac{dV_e(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C2 \frac{dV_s(t)}{dt} = -i_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_e(t) \end{cases} \quad (2.19)$$

- Pour  $t[DT, T]$  , S est ouvert :

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C1 \frac{dV_e(t)}{dt} = i(t) \\ i_{c2}(t) = C2 \frac{dV_s(t)}{dt} = i_L(t) - i_s(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s(t) \end{cases} \quad (2.20)$$

En régime permanent, le rapport de conversion de convertisseur Buck-Boost s'écrit ainsi :

$$V_e .DTs = V_s . (1 - D)Ts \quad (2.21)$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{D}{1-D} \quad (2.22)$$

$$V_s = \frac{D}{1-D} V_e \quad (2.23)$$

### II.3.3.1. Simulation d'un convertisseur Buck-Boost :

On a fait la simulation du circuit du convertisseur Buck-Boost par le logiciel MATLAB SIMULINK :

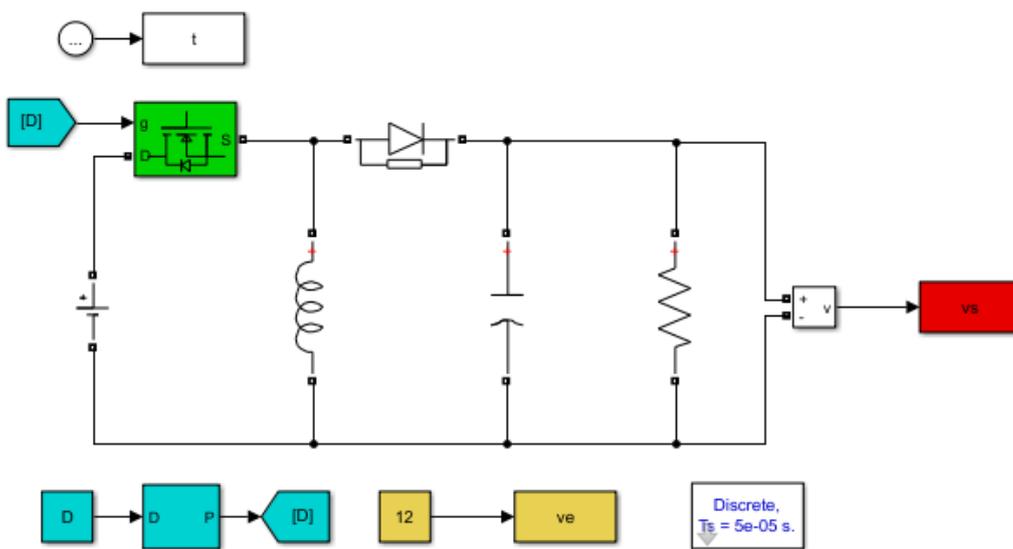


Figure 2. 12 Circuit MATLAB SIMULINK d'un hacheur BUCK-BOOST

Nous avons choisi la valeur de rapport cyclique  $D=0.5$

On fait l'application numérique  $\frac{0.5}{1-0.5} \times 12 = 12v$

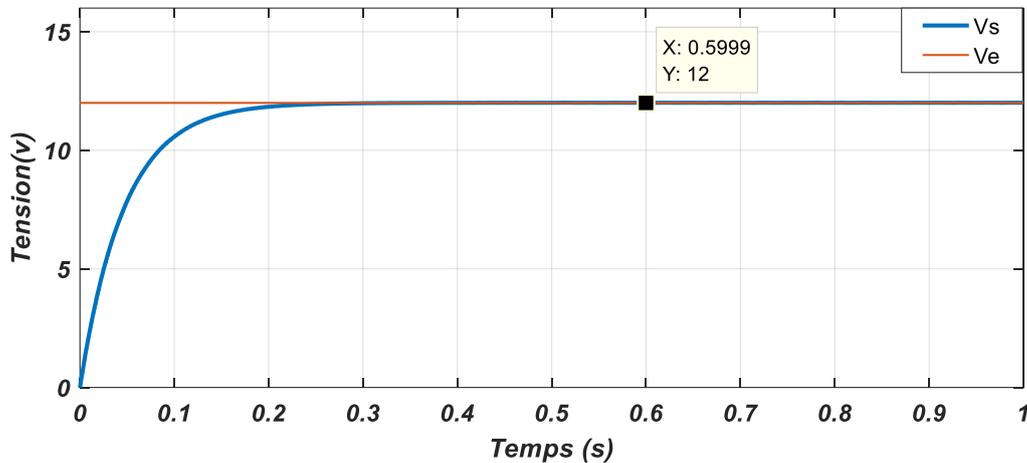


Figure 2.13 Simulation de la tensions entrée et sortie d'un hacheur DC-DC BUCK-BOOST

### II.3.4. Hacheur Sepic :

Un hacheur SEPIC (Single-Ended Primary Inductance Converter) est un type de convertisseur DC-DC qui permet de réguler la tension de sortie pour qu'elle soit soit supérieure soit inférieure à la tension d'entrée, en utilisant un seul inducteur.

le hacheur SEPIC fonctionne en utilisant un commutateur (généralement un transistor) pour contrôler le flux d'énergie à travers un inducteur, un condensateur et une diode. Sa topologie combine les principes des convertisseurs Buck (abaisseur de tension) et Boost (élevateur de tension). L'inducteur est chargé et déchargé alternativement pour stocker et transférer l'énergie, permettant ainsi d'ajuster la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée.

Les hacheurs SEPIC sont largement utilisés dans diverses applications nécessitant une régulation de tension, telles que les alimentations à découpage, les systèmes d'éclairage LED, les chargeurs de batteries, etc. Leur flexibilité en termes de régulation de tension et leur efficacité en font un choix populaire pour de nombreuses applications électroniques.[15]

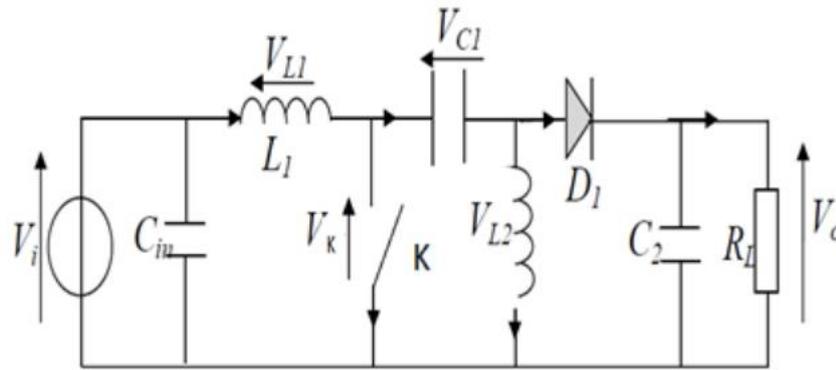


Figure 2.14 Convertisseur sepic

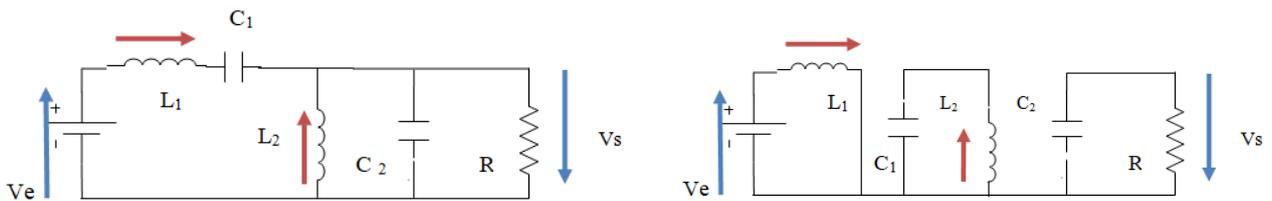


Figure 2.15 SEPIC K ouvert, SEPIC K fermé.

Selon la **Figure 2-14** et pour  $[0,DT]$ , K est fermé, On applique aux bornes de l'inductance  $L_1$  la tension d'entrée  $V_e$ , le courant traversant  $L_1$  va augmenter linéairement est l'énergie est stockée dans  $L_1$

L'énergie contenue dans le condensateur  $C_1$  passe dans l'inductance  $L_2$ , et celle du condensateur  $C_2$  vers la charge. La tension est maintenue constante par le condensateur  $C_2$ .

L'interrupteur K s'ouvre au début de l'intervalle  $[DT, T]$  et la diode est passante L'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L_1$  est restituée dans le condensateur  $C_1$ . L'énergie dans  $L_2$  est transférée vers  $C_2$ .

- Pour  $[0, DT]$ , K est fermé :

$$V_{L1}(t) = V_e(t) \quad (2.24)$$

- Pour  $[DT, T]$ , K est ouvert :

$$V_{L1}(t) = -V_s(t) \quad (2.25)$$

La valeurs moyennes de  $V_{L1}$  sont donner par :

$$V_e D - V_s (1 - D) = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{D}{1-D} \quad (2.27)$$

$$V_s = \frac{D}{1-D} V_e \quad (2.28)$$

### II.3.4.1. Simulation du fonctionnement d'un convertisseur sepic :

On a fait la simulation du circuit du convertisseur SEPIC par le logiciel MATLAB SIMULINK :

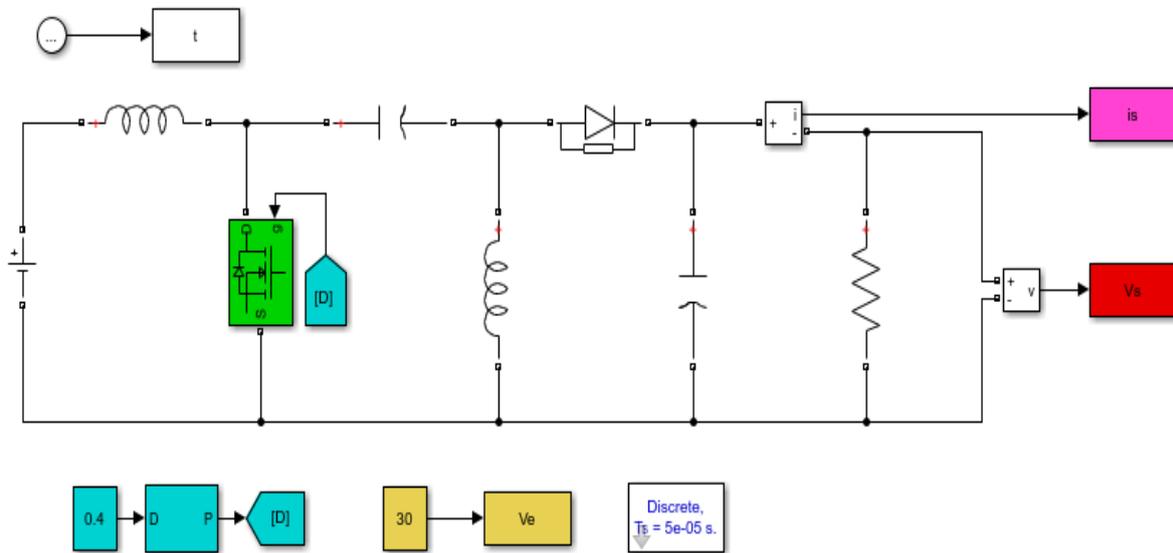


Figure 2.16 Circuit MATLAB SIMULINK d'un hacheur SEPIC

Nous avons choisi la valeur de rapport cyclique  $D=0.4$

On fait l'application numérique :

$$\frac{0.48}{1 - 0.48} \times 29 = 26.7$$

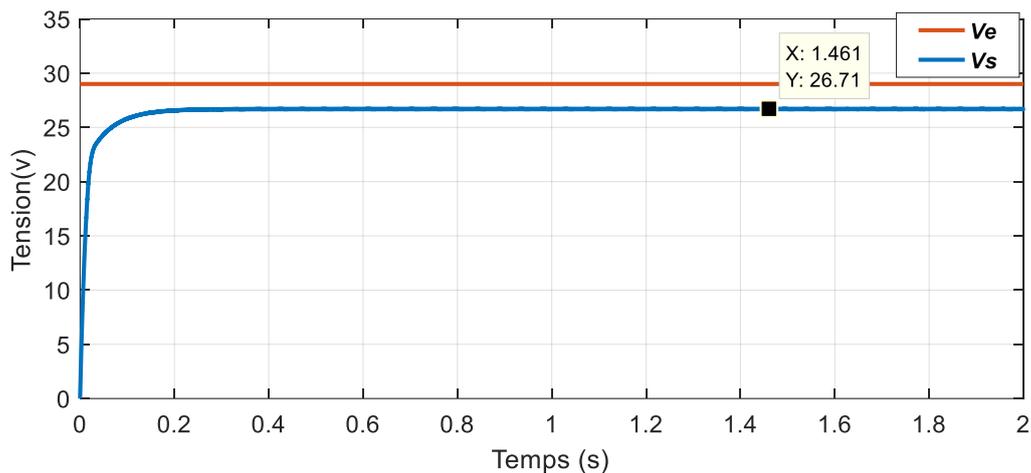


Figure 2. 17 Circuit MATLAB SIMULINK d'un hacheur SEPIC

### II.4 Maximum Power Point Tracking (MPPT) :

Un Maximum Power Point Tracking (MPPT), également appelé suivi du point maximal de puissance (SPMP), est un principe qui permet de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Plus précisément, voici ce que vous devez savoir sur le MPPT :

#### II.4.1 Intérêt du système:

- Le MPPT est souvent associé aux générateurs photovoltaïques (panneaux solaires) et aux générateurs éoliens.
- L'objectif est d'obtenir la puissance maximale possible depuis un ou plusieurs panneaux photovoltaïques.
- La puissance délivrée par les cellules photovoltaïques dépend d'une équation complexe liant le rayonnement solaire, la température et la résistance totale du circuit, ce qui conduit à une puissance de sortie non linéaire.
- Le système MPPT analyse en permanence la sortie du panneau solaire pour appliquer la résistance la plus appropriée dans un environnement donné.[16]

#### II.4.2 Fonctionnement :

- Un générateur photovoltaïque a une caractéristique fortement non linéaire.
  - Le contrôleur MPPT pilote le convertisseur statique reliant le panneau solaire et la batterie pour fournir en permanence le maximum de puissance à la batterie.
  - Le MPPT calcule le voltage maximum que peut délivrer le panneau solaire dans n'importe quelle condition, tout en gardant la puissance maximale du panneau.
  - Par exemple, si le niveau de charge de votre batterie est bas, le régulateur MPPT ajuste la tension de sortie du panneau solaire pour maximiser la puissance fournie à la batterie.
- [16]

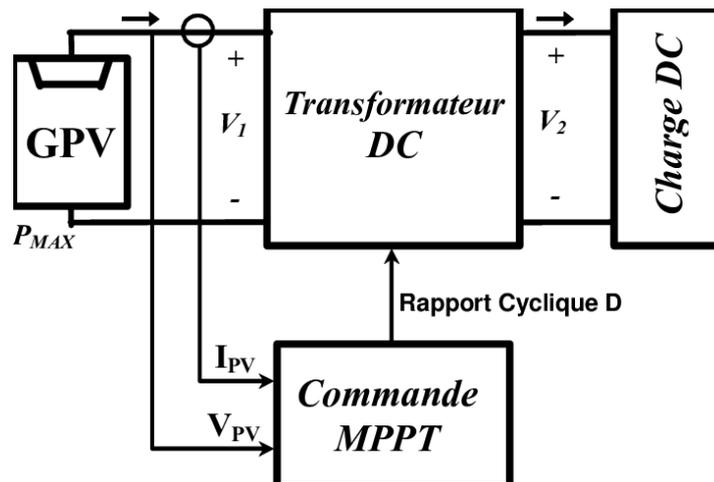


Figure 2.18 Un générateur PV avec MPPT.

### II.4.3 Application au générateur photovoltaïque :

- Les panneaux solaires photovoltaïques produisent un courant dont la tension varie entre 16 Volts et 36 Volts, alors que les batteries fonctionnent généralement avec une tension nominale de 12 Volts.
- Le MPPT permet d'optimiser la conversion de puissance entre le panneau solaire et la batterie, évitant ainsi les pertes inutiles.
- En utilisant la technologie MPPT, on peut extraire le maximum de puissance du panneau solaire, même lorsque la tension de la batterie diffère de celle du panneau.

En résumé, le MPPT est un outil essentiel pour maximiser l'efficacité des systèmes solaires et éoliens en ajustant en permanence les paramètres électriques pour obtenir la puissance maximale. [17]

### II.4.4 MPP (Maximum Power Point) :

Le MPP (ou Maximum Power Point) est en effet le point où le produit du courant et de la tension est maximisé, ce qui correspond à la puissance maximale délivrée par un générateur électrique, tel qu'un panneau solaire photovoltaïque.

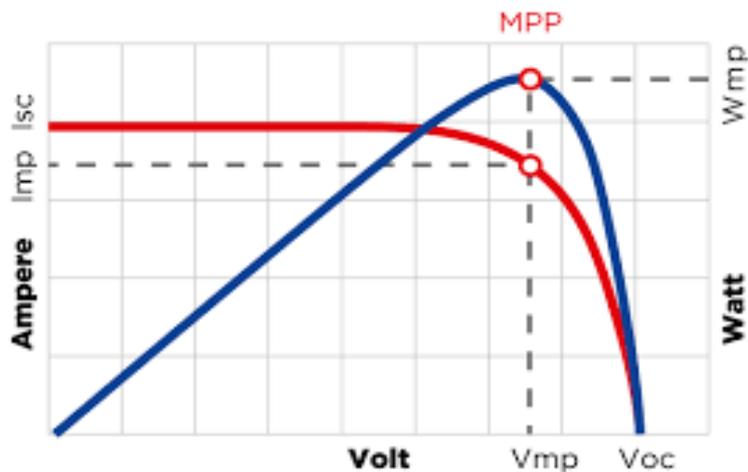


Figure 2.19 Caractéristique PV-IV et le point maximum

#### II.4.5 Techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT :

Des chercheurs ont développé les différentes méthodes de la MPPT dans le but d'améliorer le fonctionnement du système photovoltaïque.

Chaque méthode a ses algorithmes de contrôle, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximale en tenant compte des variables des paramètres du système donné et le climat (le changement brusque de la température et l'éclairement).

Sur ce qui suit de ce chapitre, on va présenter les différentes méthodes de la commande MPPT comme :

- Perturbation et Observation (P&O, Perturbe and Observe)
- Algorithme à base de logique floue
- Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)
- Méthode de la logique floue optimisée par le PSO (PSO-FL).[18]

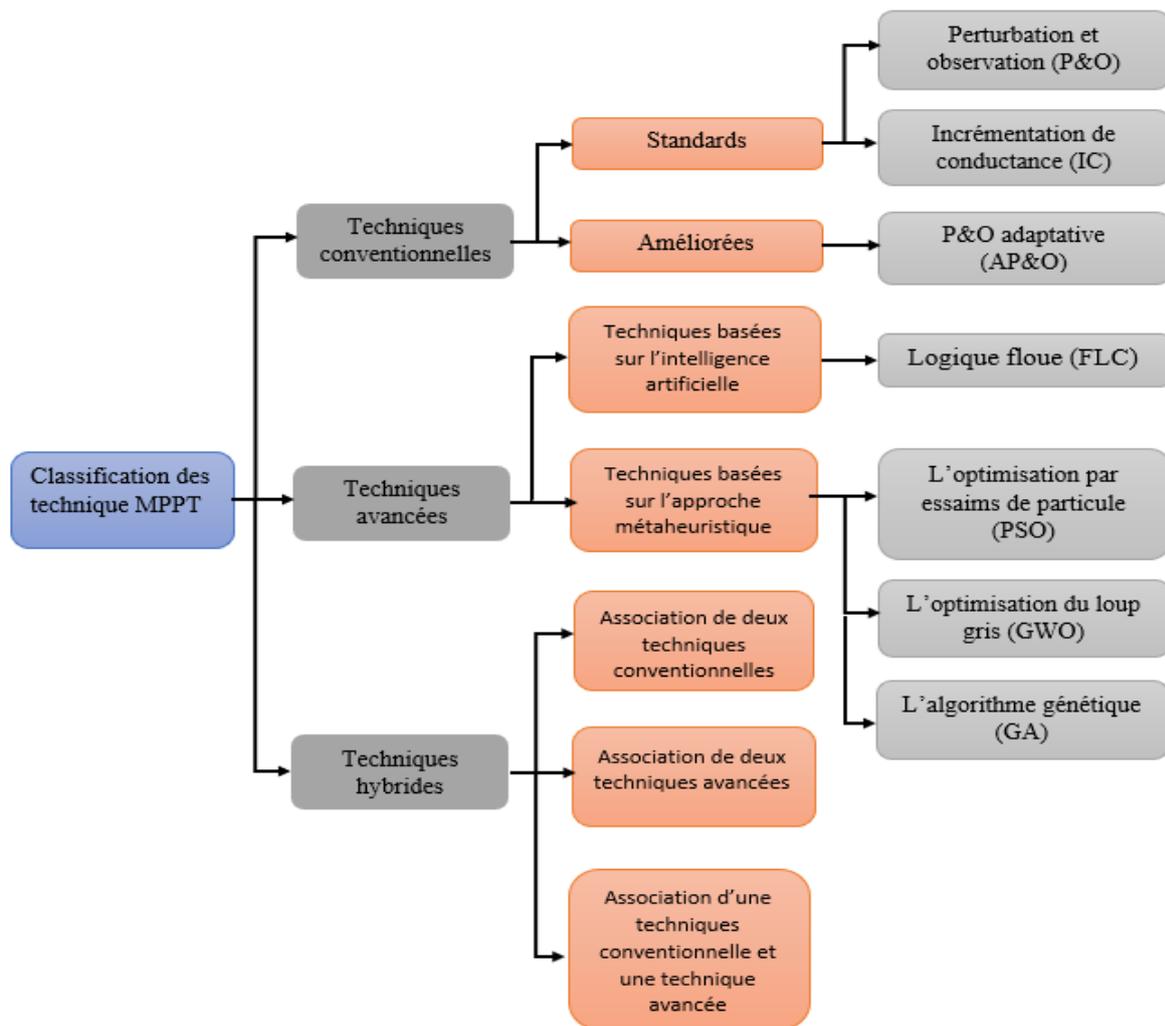


Figure 2. 20 Les différents techniques MPPT

### II.4.5.1 Techniques conventionnelles :

Il existe des méthodes classiques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour optimiser la sortie des panneaux solaires, telles que la méthode "Perturbation et Observation" et la méthode "Incrémentation de conductance". Ces approches sont largement répandues depuis les premières installations de panneaux solaires photovoltaïques en raison de leur coût relativement bas et de l'utilisation d'algorithmes simples pour suivre le point de puissance maximale dans des conditions d'éclairement constant et uniforme. Cependant, elles peuvent manquer d'efficacité lors de changements météorologiques soudains, ce qui a incité les chercheurs à proposer des améliorations au fil des décennies passées.[9]

### II.4.5.2 Techniques avancées :

Actuellement, une importante part de la recherche se focalise sur le développement de techniques MPPT avancées afin d'optimiser de manière significative le suivi du point de puissance maximale. Ces techniques sont classées en trois sous-catégories : les méthodes basées sur l'intelligence artificielle, les approches méta-heuristiques et le contrôle non linéaire.[9]

#### 1)Techniques basées sur l'intelligence artificielle :

Les algorithmes d'intelligence artificielle, tels que les réseaux de neurones artificiels (ANN) et le contrôle par logique floue (FLC), sont employés dans la régulation du MPPT. Ils sont capables d'améliorer la vitesse et la précision des algorithmes conventionnels.[9]

#### 2)Techniques basées sur l'approche méta-heuristique :

Les algorithmes génétiques (GA), l'optimisation par essaims de particules (PSO), les méthodes de recherche aléatoire, l'optimisation par colonies de fourmis et l'algorithme Shuffled Frog Leaping sont des approches d'optimisation basées sur des populations et inspirées par la biologie, qui ont été proposées pour le contrôle MPPT. Ces techniques sont capables de maintenir de bonnes performances dans diverses conditions atmosphériques. Cependant, elles exigent un équilibre entre la précision et la vitesse de convergence, ce qui rend crucial le réglage et la configuration des paramètres tels que la taille de la population, la structure du chromosome et le nombre d'itérations, adaptés aux conditions d'éclairement. De plus, ces méthodes nécessitent des temps de calcul prolongés, ce qui accroît la complexité de leur mise en œuvre.[9]

#### 3)Techniques basées sur le contrôle non linéaire :

La régulation MPPT est accompagnée d'un convertisseur de puissance DC-DC non linéaire situé dans la partie d'adaptation d'une chaîne de conversion photovoltaïque, comme précédemment décrit. Afin d'assurer une traque efficace du point de puissance maximale et une robustesse élevée face aux variations météorologiques, les chercheurs ont exploré l'utilisation de contrôleurs non linéaires avancés pour le MPPT. Plusieurs méthodes ont été suggérées dans la littérature, notamment dans les études menées par. L'utilisation du contrôle en mode glissant (MG) permet de garantir la stabilité et la robustesse du système. Cependant, cette approche présente des inconvénients majeurs tels que les phénomènes de réticence, la variation de la fréquence de commutation et une erreur en régime permanent significative.[9]

### II.4.5.2 Techniques hybrides :

Au cours des récentes années, les techniques hybrides de suivi du point de puissance maximale (MPPT) ont été l'objet de recherches visant à améliorer la précision du suivi et à obtenir des rendements encore plus élevés dans diverses conditions atmosphériques. Ces approches se sont révélées plus efficaces que d'autres méthodes. Les techniques MPPT hybrides peuvent être classées en trois catégories principales :

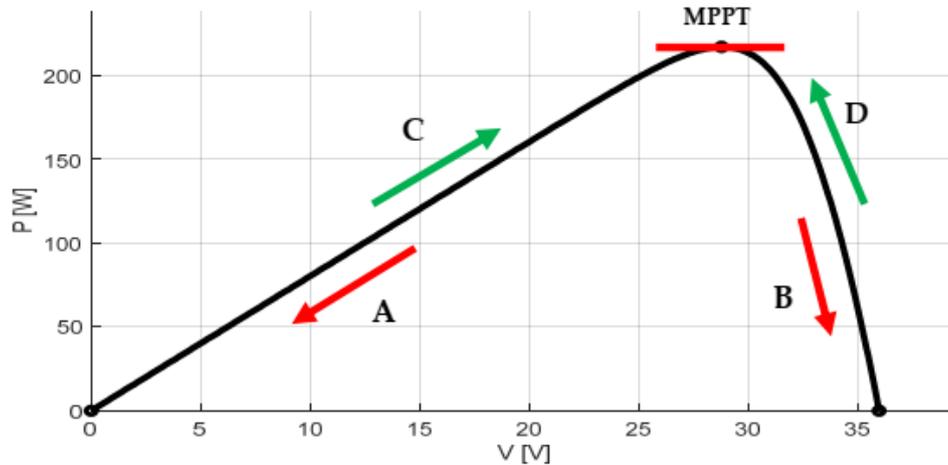
- Deux techniques conventionnelles.
- Deux techniques avancées.
- Une technique conventionnelle et une avancée.

Nous nous concentrerons sur trois des techniques les plus couramment utilisées : la méthode Perturbation et Observation (P&O), le contrôle par logique floue (FLC), ainsi que les techniques hybrides qui combinent Perturbation et Observation (P&O) avec le contrôle par logique floue (FLC), appelées "Algorithmes Perturbation et Observation (P&O) avec pas variable". Leurs principes respectifs seront présentés dans les sections suivantes.[9]

### II.4.6 Algorithme Perturbation et Observation (P&O)

L'algorithme de Perturbation et Observation (PO) est une stratégie utilisée pour optimiser la production d'énergie des modules photovoltaïques (PV). Il ajuste le point de fonctionnement du module PV en modifiant le facteur de marche d'un convertisseur DC-DC. Voici une reformulation de votre texte:

L'algorithme PO ajuste dynamiquement le fonctionnement des modules PV. En variant le facteur de marche du convertisseur DC-DC, il mesure l'impact sur la puissance produite. Si une perturbation augmente la puissance, l'algorithme continue dans cette direction; si elle diminue, il change de cap. Cette méthode, comme son nom l'indique, perturbe délibérément le système pour observer les variations de puissance.[19]



**Figure 2.21** Le fonctionnement de l'algorithme PO

La figure 2.21 illustre quatre scénarios possibles lors du suivi du Point de Puissance Maximale (MPP), où '1' représente la position précédente et '2' la position actuelle (A, B, C, et D). Les expressions mathématiques indiquent si la puissance et le courant augmentent ou diminuent après la perturbation. Selon le cas, le rapport cyclique est ajusté pour soit augmenter la tension du module PV (cas A et C), soit la diminuer (cas B et D), afin de toujours chercher le MPP.

- Cas A :  $\Delta P < 0$  et  $\Delta V < 0$
  - Cas B :  $\Delta P < 0$  et  $\Delta V > 0$
  - Cas C :  $\Delta P > 0$  et  $\Delta V > 0$
  - Cas D :  $\Delta P > 0$  et  $\Delta V < 0$
- L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression :

$$V(K) = V(K - 1) + \Delta V \cdot \text{sign}\left(\frac{dP}{dV}\right)$$

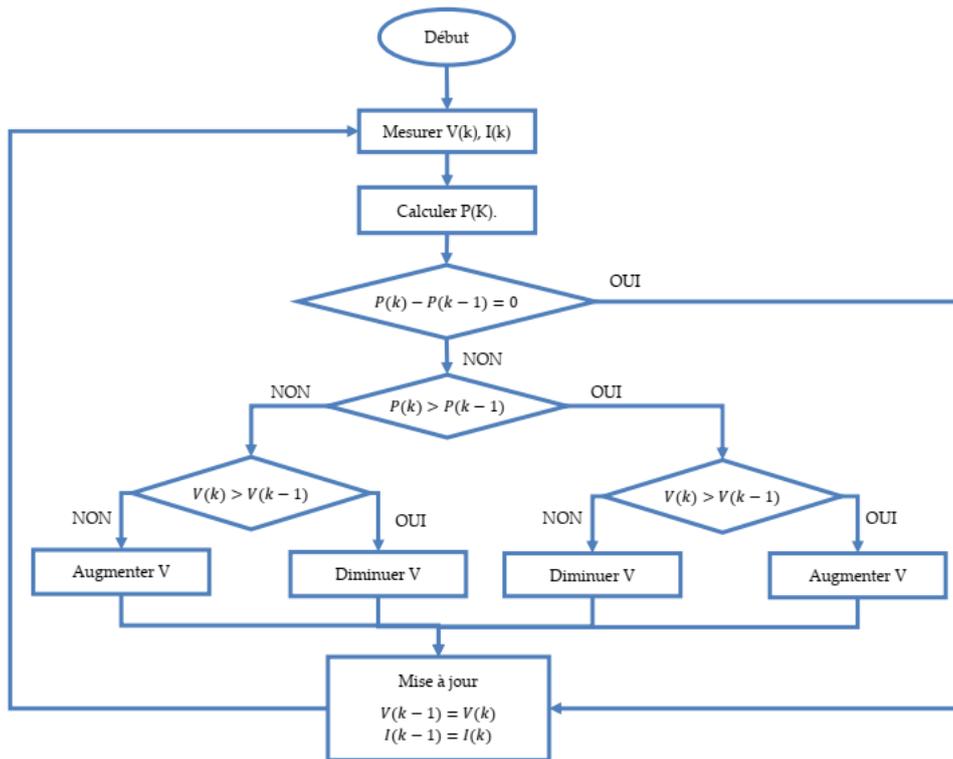


Figure 2. 22 Organigramme de la méthode Perturbation et Observation

#### II.4.7 Commande à incrémentation de la conductance (INC) :

La commande à incrémentation de la conductance (Incond) est utilisée dans le contexte des systèmes photovoltaïques pour ajuster la conductance d'un dispositif électronique, généralement un Maximum Power Point Tracker (MPPT). Voici quelques points importants à noter :

- Lorsque la luminosité extérieure varie, le MPPT doit s'adapter pour maintenir le point de puissance maximale (MPP) du champ photovoltaïque. La commande Incond permet d'augmenter progressivement la conductance (ou diminuer la résistance) pour suivre ces variations.
- En ajustant la conductance, le MPPT peut optimiser la puissance extraite du champ photovoltaïque, même lorsque les conditions d'ensoleillement changent.
- Cette commande est souvent implémentée à l'aide d'algorithmes sophistiqués qui calculent la variation de conductance nécessaire pour se rapprocher du MPP.

En résumé, la commande Incond est un élément essentiel pour maximiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques en exploitant au mieux l'énergie solaire disponible.[19]

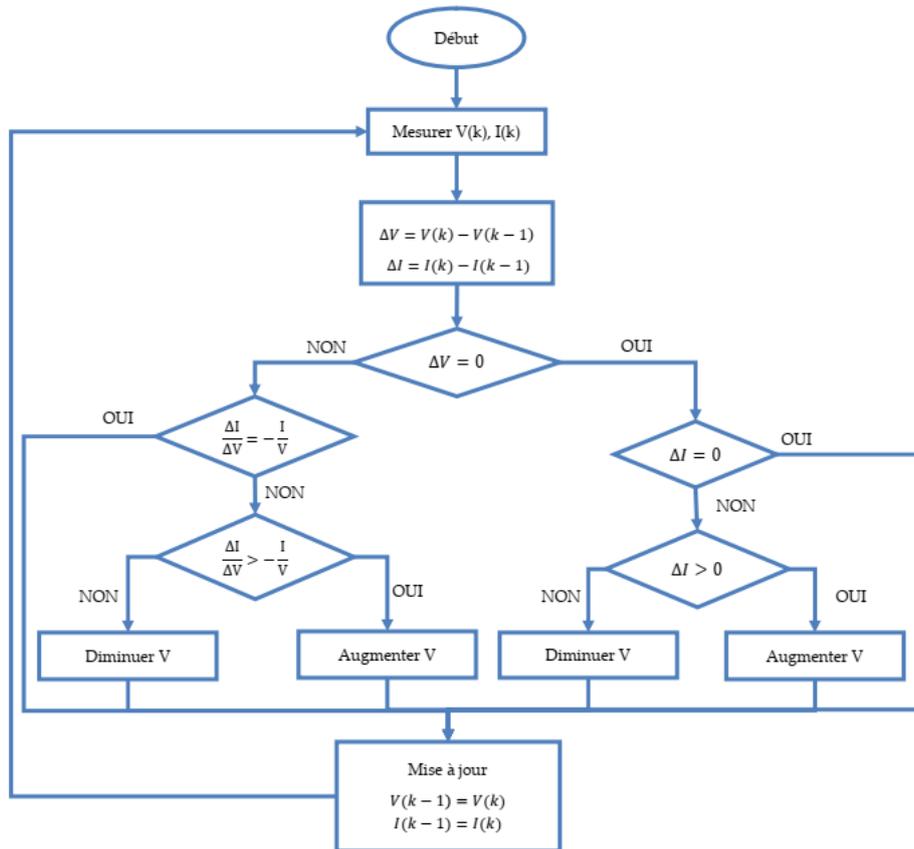


Figure 2.23 Organigramme de la méthode incrémentation de la conductance

## II.4.8 Les avantages et les inconvénients

### II.4.8.1 Avantages :

- **Méthode PO :**
  - Structure de régulation simple.
  - Moins de paramètres à mesurer.
- **Méthode INC :**
  - Haute performance même avec des variations rapides des conditions météorologiques.
  - Rendements de MPPT comparables à ceux de la méthode PO.

### II.4.8.2 Inconvénients :

- **Méthode PO :**
  - Risque de dépassement du point de puissance maximale lors de changements rapides des conditions météorologiques.
- **Méthode INC :**
  - Circuit de commande complexe et coûteux

### II.4.9 Les Algorithmes évolutionnaires :

Représentent une catégorie d'algorithmes d'optimisation inspirés par les processus d'évolution biologique. Ces algorithmes cherchent à identifier le minimum ou le maximum d'une fonction spécifique, simulant ainsi la quête de l'adaptation optimale dans la nature. Diverses stratégies de calcul évolutif existent, toutes fondées sur l'abstraction des mécanismes évolutifs naturels.

Récemment, l'Optimisation par Essaim Particulaire (PSO) s'est distinguée comme une technique particulièrement efficace. Grâce à sa capacité à naviguer dans des espaces de recherche complexes et multimodaux, le PSO peut même s'appliquer à des fonctions qui ne sont pas différentiables, offrant ainsi une nouvelle avenue prometteuse pour l'optimisation dans des contextes variés.

#### II.4.9.1 L'Optimisation par Essaim Particulaire (PSO) :

L'Optimisation par Essaim Particulaire est une méthode d'optimisation qui s'inspire du comportement collectif des oiseaux en vol. Conçue dans les années 1990 par Russel Eberhart et James Kennedy, cette approche ajuste dynamiquement la trajectoire de chaque particule de l'essaim en fonction de ses expériences et de celles de ses voisins. À chaque étape ( $k$ ), le PSO modifie la vitesse et la position des particules selon des formules mathématiques spécifiques, permettant ainsi à l'ensemble de l'essaim de converger vers la meilleure solution possible.[20]

#### Définition de la méthode:

La méthode d'optimisation par essaim de particules (PSO) est un algorithme évolutionnaire inspiré du comportement social des oiseaux et des poissons. Voici une explication plus détaillée des trois composantes du PSO[20] :

- **Composante d'inertie :**

- Chaque particule a une direction de déplacement actuelle.
- La composante d'inertie permet à la particule de suivre cette direction.
- Elle agit comme une force d'inertie qui maintient la particule dans sa trajectoire courante.

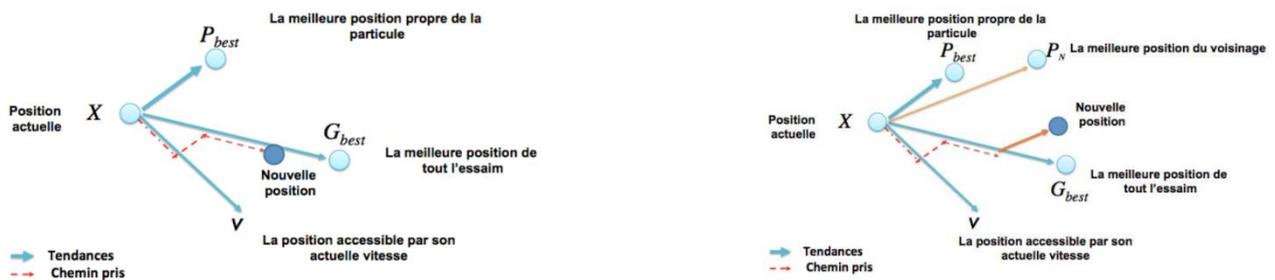
- **Composante cognitive:**

- Chaque particule se souvient du meilleur site (position) qu'elle a déjà visité.
- La composante cognitive pousse la particule à se diriger vers ce meilleur site.
- Cela permet à la particule d'explorer les régions de l'espace de recherche où elle a obtenu de bons résultats par le passé.

### Composante sociale :

- Les particules communiquent entre elles.
- La composante sociale incite une particule à se diriger vers le meilleur site atteint par ses voisines.
- Cela favorise la convergence vers une solution globale optimale.

En combinant ces trois composantes, les particules explorent l'espace de recherche de manière coopérative et adaptative, cherchant à trouver la meilleure solution possible pour un problème donné. Le PSO est souvent utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation, tels que la recherche de paramètres optimaux dans des domaines tels que l'ingénierie, la finance et l'intelligence artificielle.[20]



**Figure 2. 24** Déplacement d'une particule

### Application de la métaheuristique PSO pour le MPPT :

Dans la recherche du point de puissance maximale, on applique une technique basée sur une métaheuristique appelée essaims particulaires (PSO). Cette technique est régie par des règles de transition probabiliste. Dans un premier temps, on génère une population initiale aléatoire de particule représentant le rapport cyclique  $D$  défini comme le signal de commande du hacheur. Chaque particule est caractérisée par sa position dans l'espace de recherche et aussi par sa vitesse (vitesse de déplacement) qui représente la variation du rapport cyclique  $\Delta D$ . La fonction objectif du MPPT est donnée par la puissance correspondante à chaque rapport cyclique.

Les expressions d'évaluation du déplacement de la particule  $D_i$  et de sa vitesse  $\Delta D_i$  sont données comme suit :

$$\Delta D_i(t+1) = C_1 * \Delta D_i(t) + C_2 * \text{rand} * (D_{pbest} - D_i(t)) + C_3 * \text{rand} * (D_{gbest} - D_i(t)) \quad (2.29)$$

$$D_i(t+1) = D_i(t) + \Delta D_i(t+1), \quad i \in \{1, \dots, N\} \quad (2.30)$$

où

$D_{pbest}$  : La meilleure solution par laquelle est passée  $D_i(t)$

$D_{gbest}$  : La meilleure solution connue dans le voisinage

$C_1$  : Coefficient de décélération

$C_2$  : Coefficient de confiance de la particule en son record

$C_3$  : Coefficient de confiance en voisinage

A chaque itération, l'évaluation de chaque particule est effectuée par la fonction objectif. Ainsi, la meilleure position de la particule est celle qui possède la puissance maximale. La mise à jour de la meilleure solution par laquelle est passée la particule et celle connue dans le voisinage est donnée comme suit :

Si Puissance ( $D_i(t+1)$ ) > Puissance ( $D_{pbest}$ )  $\Rightarrow D_{pbest} = D_i(t+1)$

Si Puissance ( $D_i(t+1)$ ) > Puissance ( $D_{gbest}$ )  $\Rightarrow D_{gbest} = D_i(t+1)$

L'organigramme de la poursuite du MPP avec PSO est donné comme suit :

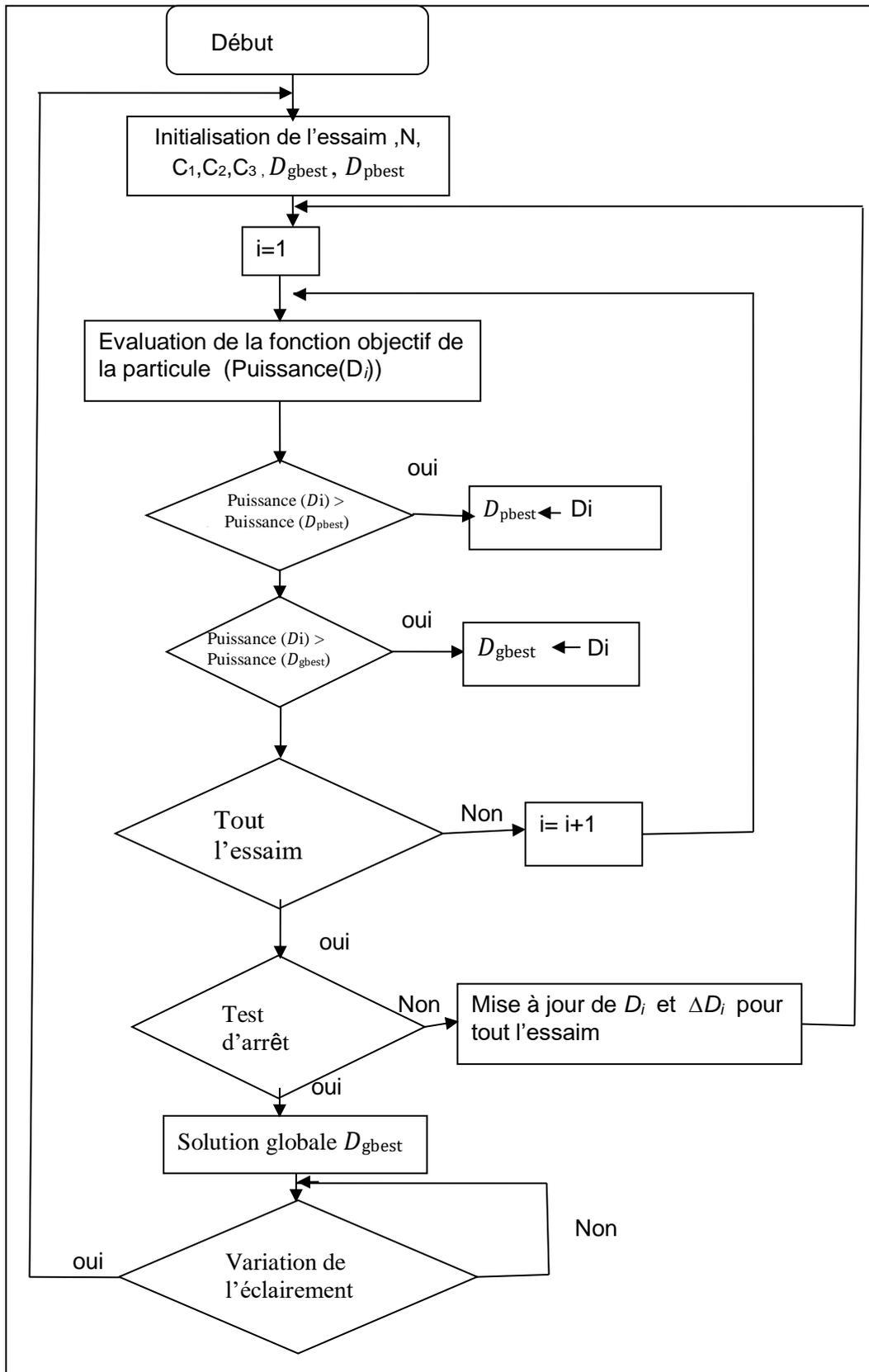


Figure 2.25 L'organigramme de la poursuite du MPP avec PSO

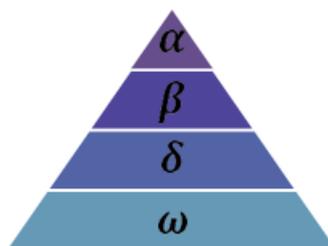
- **Le critère d'arrêt**

Le critère d'arrêt diffère suivant le problème d'optimisation posé et les contraintes de l'utilisateur, il est fortement conseillé de doter l'algorithme d'une porte de sortie puisque la convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas de figure même si les expériences dénotent la grande performance de la méthode. De ce fait plusieurs études ont été menées dans ce sens, différentes propositions ont eu lieu : l'algorithme doit alors s'exécuter tant que l'un des critères de convergence n'a pas été atteint cela peut être : le nombre maximum d'itérations ; l'optimum global est connu a priori, on peut définir une "précision acceptable". D'autres critères d'arrêt peuvent être utilisés selon le problème d'optimisation posé et des contraintes utilisateurs.

En résumé, PSO utilise le concept de l'essaim de particules pour rechercher la meilleure position qui atteint la puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. La mise à jour de la position de la particule se fait en fonction de la fitness, des variations de position et de vitesse.

### II.4.9.2 GWO (Grey Wolf optimisation algorithm)

La méthode d'optimisation métaheuristique proposée par Seyd Ali Mirjalili, Seyed Mohammed Mirjalili et Andrew Lewis en 2014 s'inspire de la hiérarchie sociale et des techniques de chasse des loups gris dans la nature. Connue sous le nom d'optimisation par essaim de loups gris, cette approche se base sur le comportement des loups gris vivant en meute, où chaque meute est structurée selon un ordre hiérarchique bien défini. La hiérarchie sociale des loups gris est divisée en quatre catégories : les loups alpha, les loups bêta, les loups delta et les loups oméga [21][22]



**Figure 2.26** Hiérarchie du loup gris (la dominance diminue de haut en bas)

L'algorithme GWO (Grey Wolf Optimizer) modélise mathématiquement le comportement social des loups gris. Dans chaque itération, les nouvelles solutions sont générées à proximité

des positions des loups alpha (X1) (meilleure solution de l'itération précédente), bêta (X2) (deuxième meilleure solution de l'itération précédente) et delta (X3) (troisième meilleure solution de l'itération précédente), selon l'équation suivante : [21][22]

$$X(t + 1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (2.31)$$

X1 , X2 , X2 Sont calculés à l'aide des équations suivantes : [21][22]

$$X_1 = |X_\alpha - A_1 D_\alpha|; D_\alpha = |C_1 X_\alpha - X(t)| \quad (2.32)$$

$$X_2 = |X_\beta - A_2 D_\beta|; D_\beta = |C_2 X_\beta - X(t)| \quad (2.33)$$

$$X_3 = |X_\delta - A_3 D_\delta|; D_\delta = |C_3 X_\delta - X(t)| \quad (2.34)$$

X(t+1) Est la nouvelle position du loup oméga, X(t) est la position actuelle du loup oméga; D $\alpha$  , D $\beta$  et D $\delta$  sont les voisinages de la position du loup alpha, du loup bêta et du loup delta respectivement. Ai , Ci (i=1, 2, 3) sont des vecteurs de coefficients calculés comme suit: [21][22]

$$A_i = 2ar_i - a \quad ; \quad r_i \in [0,1] \quad (2.35)$$

$$C_i = 2a \quad ; \quad (i=1, 2, 3) \quad (2.36)$$

$$a = 2 - \frac{t}{Maxt} \quad (2.37)$$

- L'organigramme de l'algorithme GWO est représenté comme suit :

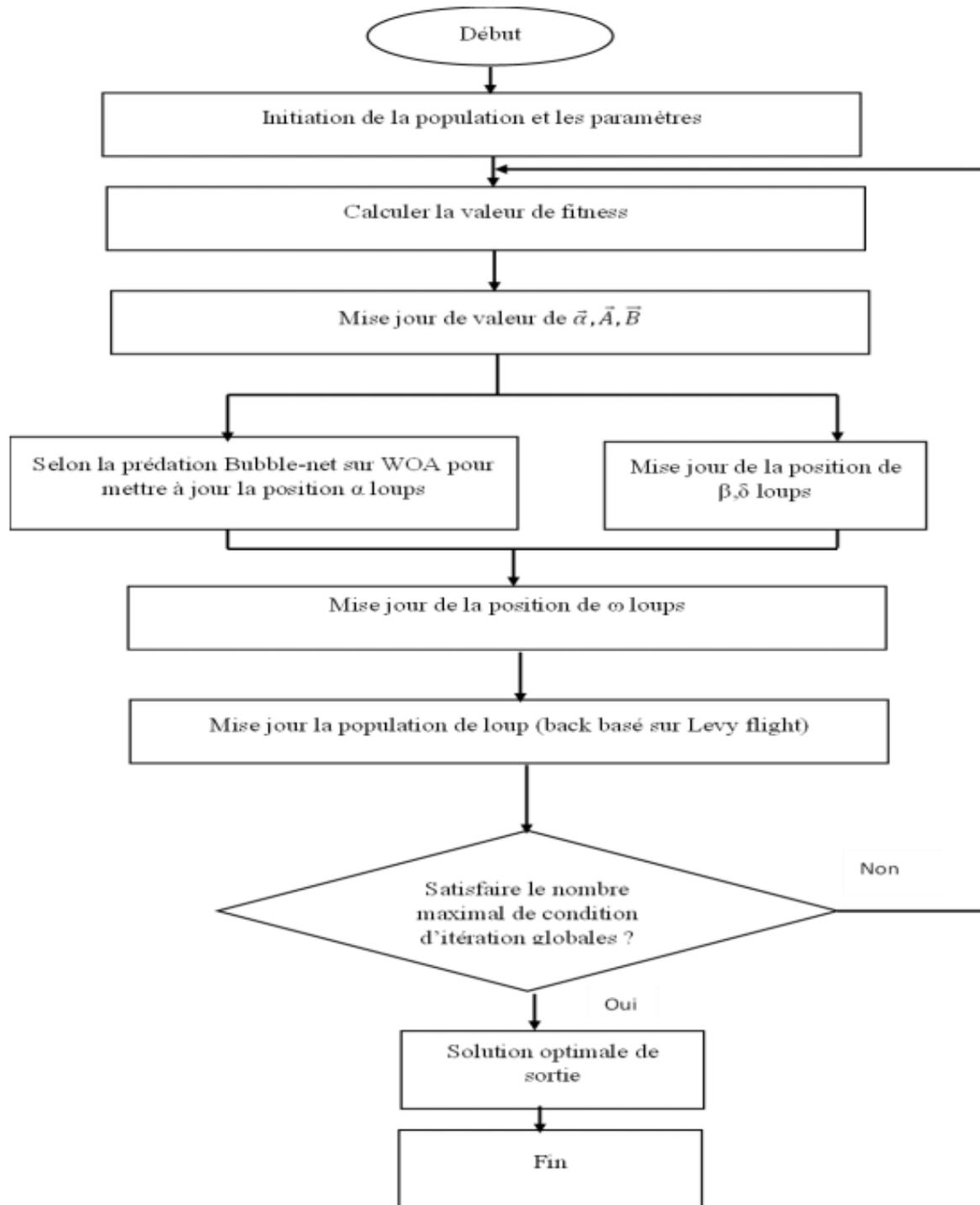


Figure 2.27 L'organigramme de l'algorithme GWO

### II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné l'importance de l'étage d'adaptation dans la chaîne de conversion photovoltaïque. Nous nous sommes concentrés sur l'analyse des modèles mathématiques des différents types de convertisseurs pour assurer leur compatibilité avec l'environnement Simulink. Ensuite, nous avons examiné un ensemble de techniques utilisées pour suivre le point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT), y compris des techniques traditionnelles telles que P&O, et des techniques avancées comme PSO. Enfin, ces processus ont été représentés à travers des graphiques et des schémas de blocs dans l'environnement Simulink.

---

***CHAPITRE III***

***RESULTATS ET***

***SIMULATION***

---

### III.1 Introduction

Les générateurs photovoltaïques (GPV) sont utilisés pour fournir de l'énergie électrique dans de nombreuses applications. Pour exploiter au maximum la puissance d'un GPV, il est nécessaire d'adapter en permanence la charge perçue par celui-ci. Cette adaptation peut être réalisée en insérant un convertisseur DC-DC contrôlé par un mécanisme de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Cette commande permet de sélectionner automatiquement le rapport cyclique du hacheur pour extraire la puissance maximale du GPV.

Ce chapitre présente les résultats de simulation de l'application de la métaheuristique PSO à la commande MPPT d'un GPV en présence de l'ombrage réalisé avec deux, trois, quatre et cinq panneaux en série et des éclairagements différents à la température ambiante, montrant la caractéristique P-V avec deux, trois, quatre et cinq lobes respectivement. L'évaluation de l'efficacité de la commande MPPT basée sur la méthode PSO est confirmée par la comparaison avec la technique traditionnelle (P&O) pour les conditions avec et sans ombrage. La performance du système PV en termes de rendement énergétique est déterminée.

### III.2 Caractéristiques du panneau photovoltaïque utilisé

Les caractéristiques du panneau PV Tata power solar systems TP250MBZ, utilisé dans les simulations sous Matlab/Simulink, sont résumées dans le tableau 3.1

Les paramètres	Symbole	Valeur
Puissance maximale	Pmax (W)	249
Courant de puissance maximale	Imp (A)	8.3
Courant de court-circuit	Isc (A)	8.83
Tension de puissance maximale	Vmp (V)	30
Tension de circuit ouvert	Voc (V)	36.8

**Tableau 3. 1** Caractéristiques du panneau Tata power solar systems TP250MBZ

### III.3 Simulation du système PV avec la commande MPPT

#### III.3.1 Simulation de la commande P&O

Pour évaluer les performances du système PV utilisant la commande MPPT de type P&O, nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (deux GPV en série-BOOST-MPPT et une charge) sous des conditions d'éclairement fixe ( $1000\text{W/m}^2$  et  $1000\text{W/m}^2$ ) et variable (présence

de l'ombrage avec des éclairagements de  $500W/m^2$  et  $1000W/m^2$ ) à la température de  $25^\circ$ , comme l'indiqué le tableau 3.2.

Deux Panneaux Photovoltaïques					
Cas	Température	Combinaison des Éclairagements	$P_{ideal}$	$P_{sortie}$ avec P&O	Rendement du P&O
Cas 1	$25^\circ$	[500 1000]	268.2	235	87.62%
Cas 2	$25^\circ$	[1000 1000]	491.4	491	99.91%

Tableau 3. 2 Rendement du P&O pour le cas de deux panneaux PV sous des conditions climatiques fixe et variable

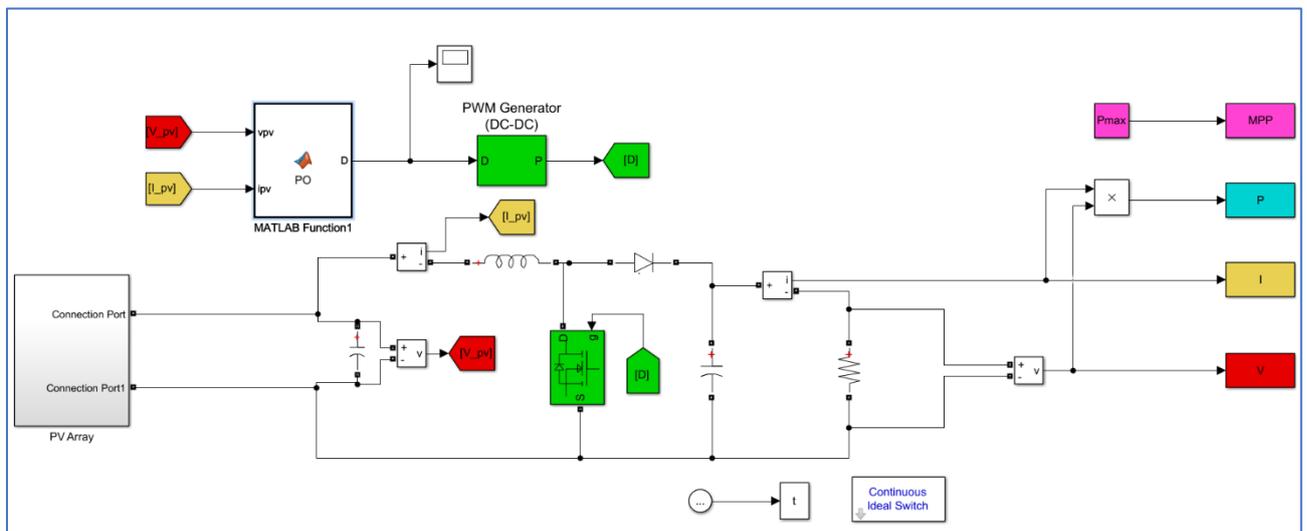


Figure 3. 1 Schéma Matlab/Simulink de la commande P&O

Les résultats de simulation du système PV par la commande (P&O) sont illustrés par les figures (3.2), (3.3) et (3.4) pour le cas 1 du tableau 3.2. Les figures montrent la caractéristique P-V ayant deux lobes (un maximum local et un maximum global), l'évolution du rapport cyclique et la puissance de sortie du GPV, respectivement.

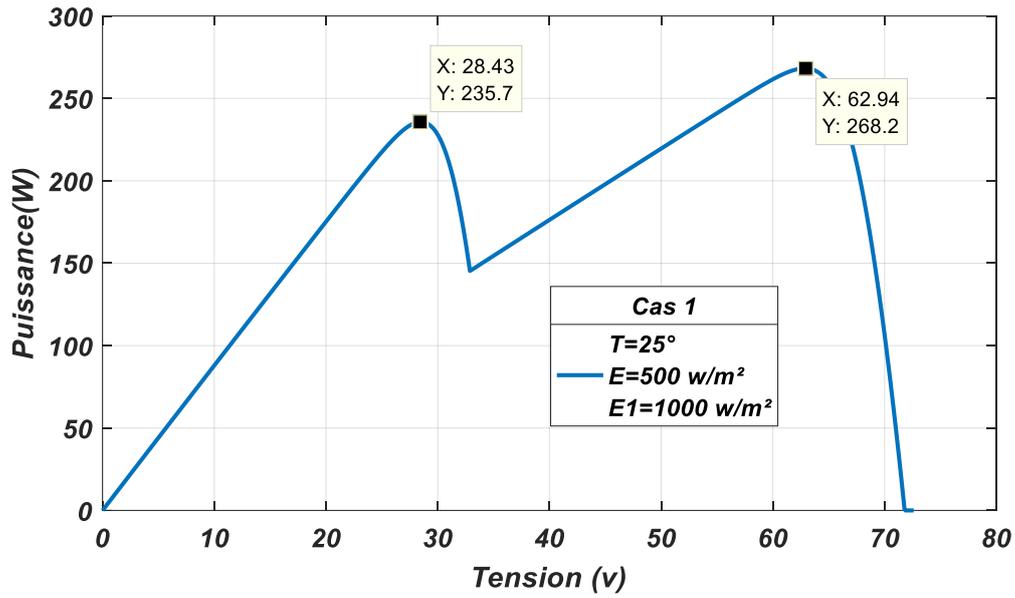


Figure 3. 2 Caractéristique P-V en présence d’ombrage (cas de deux lobes)

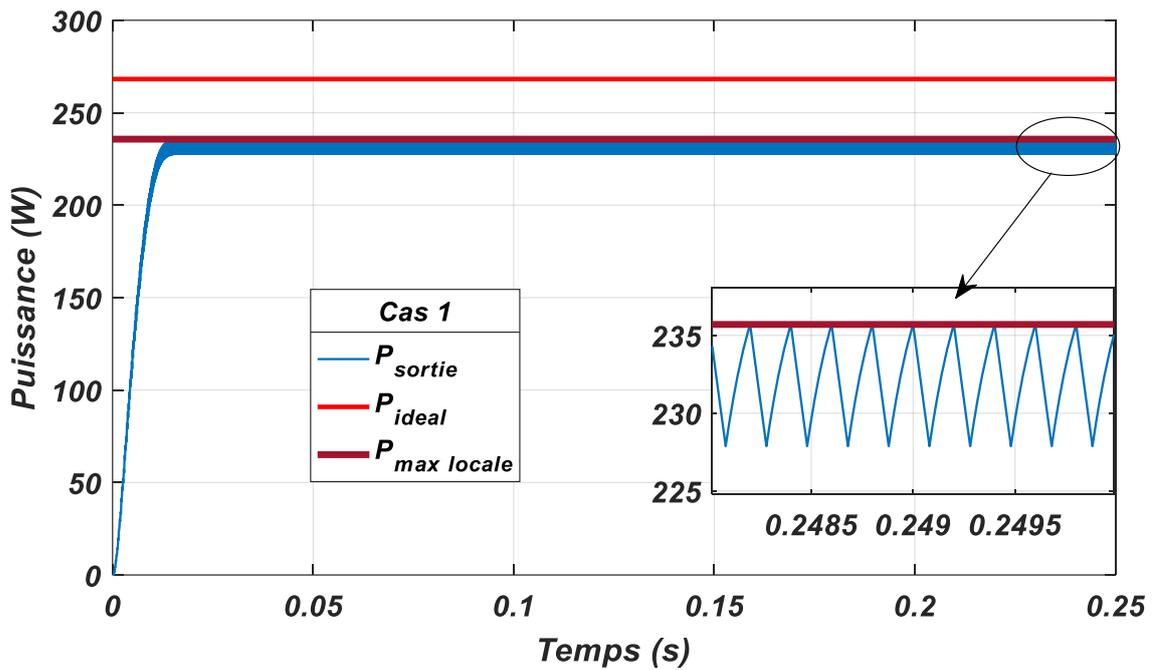


Figure 3. 3 Puissance de sortie avec P&O

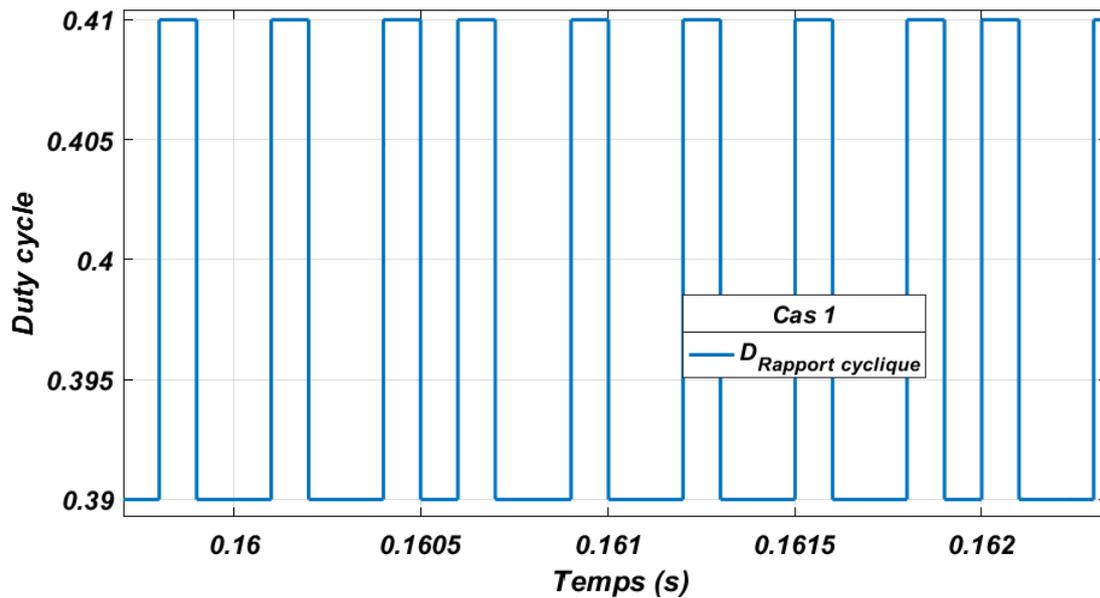


Figure 3. 4 Variation du rapport cyclique avec P&O

Nous remarquons que la commande (P&O) converge vers l'optimum local.

Les figures (3.5), (3.6) et (3.7) illustrent les résultats de simulation du système PV par la commande (P&O) pour le cas 2 du tableau 3.2. Les figures montrent la caractéristique P-V ayant un seul lobe (un maximum global), l'évolution du rapport cyclique et la puissance de sortie du GPV, respectivement.

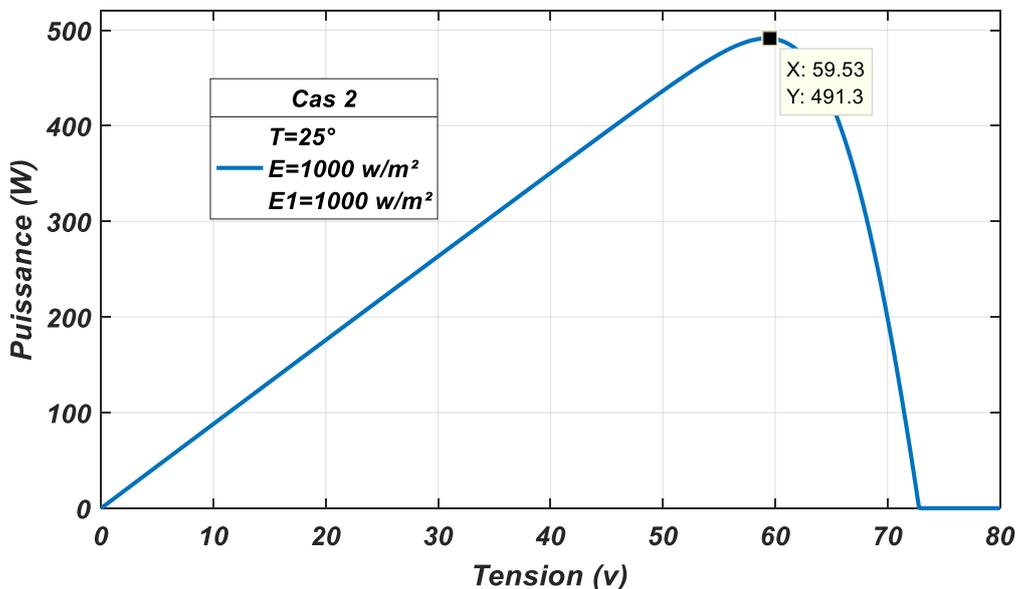


Figure 3. 5 Caractéristique P-V sous des conditions atmosphériques fixes

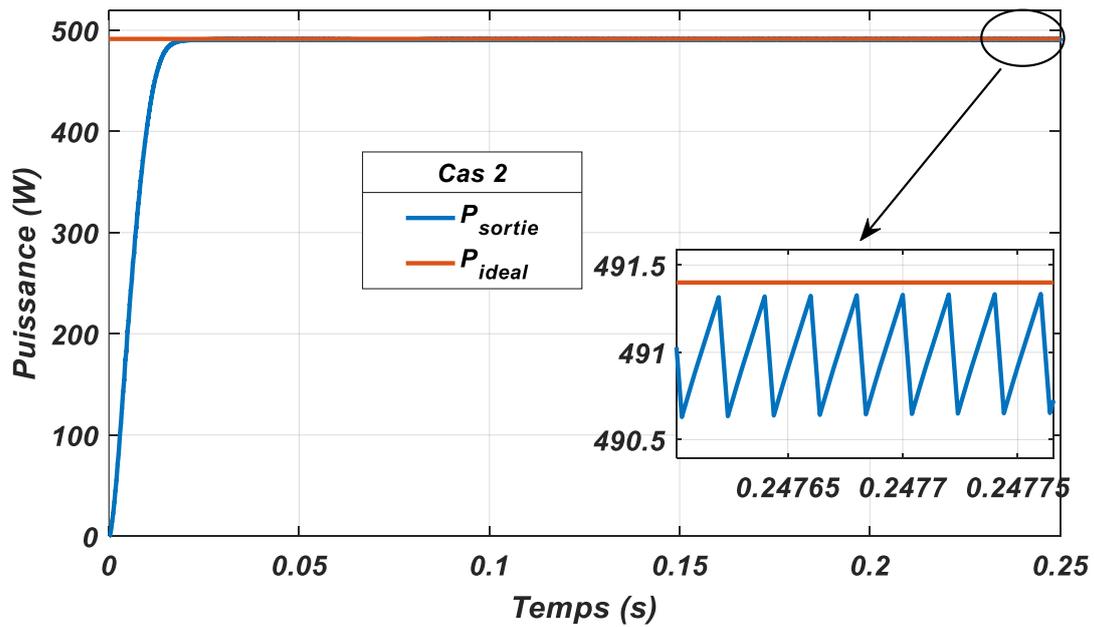


Figure 3. 6 Puissance de sortie avec P&O

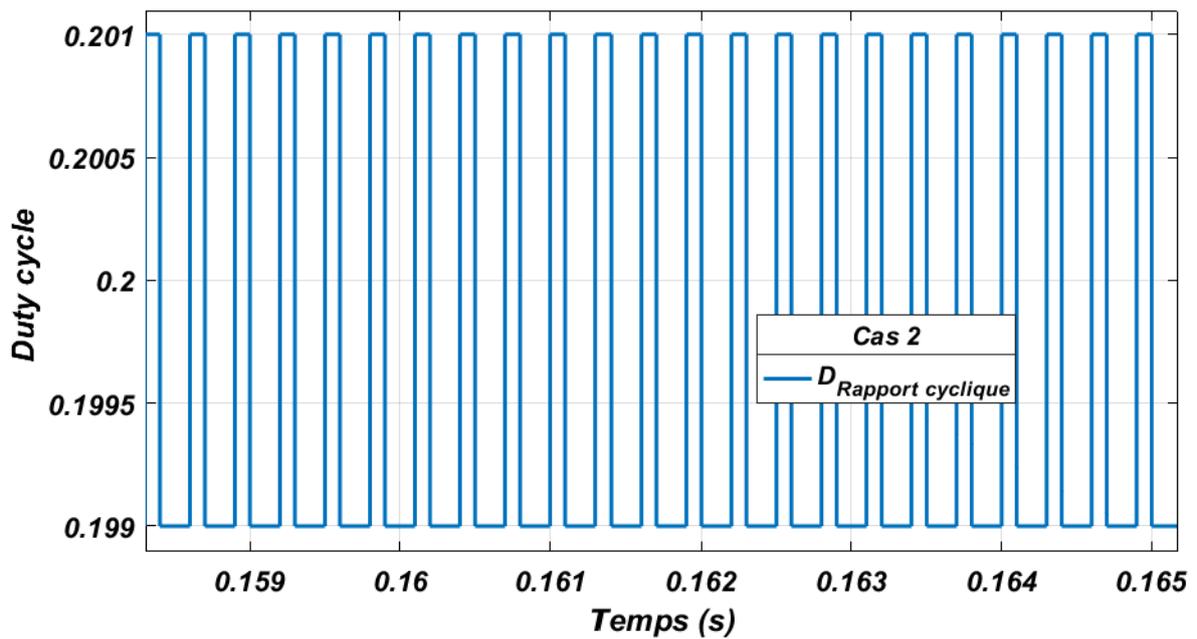


Figure 3. 7 Variation du rapport cyclique avec P&O

Nous observons que, sous un éclairage uniforme, la méthode P&O converge vers la valeur de la puissance maximale. Dans le cas de l'ombrage, le P&O converge vers l'optimum local. Nous en concluons que la méthode P&O n'est adaptée qu'aux conditions atmosphériques uniformes. Par conséquent, nous avons opté pour une technique MPPT avancée : l'Optimisation par Essaim Particulaire (PSO).

### III.3.2 Simulation avec la commande PSO

Pour évaluer les performances du système PV utilisant la commande MPPT de type PSO, nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV -BOOST-MPPT et une charge) sous des conditions atmosphériques fixe et variable. Nous envisageons quatre cas d'ombrage réalisé respectivement par deux GPV en série, trois GPV en série, quatre GPV en série et enfin cinq GPV en série. Pour chaque un des quatre cas envisagé, nous considérons aussi des conditions d'éclairement fixe.

#### a. Deux panneaux PV en série

Le schéma de la commande PSO réalisée sous l'environnement Matlab/Simulink pour le cas de deux panneaux PV en série est donné par la figure 3.8

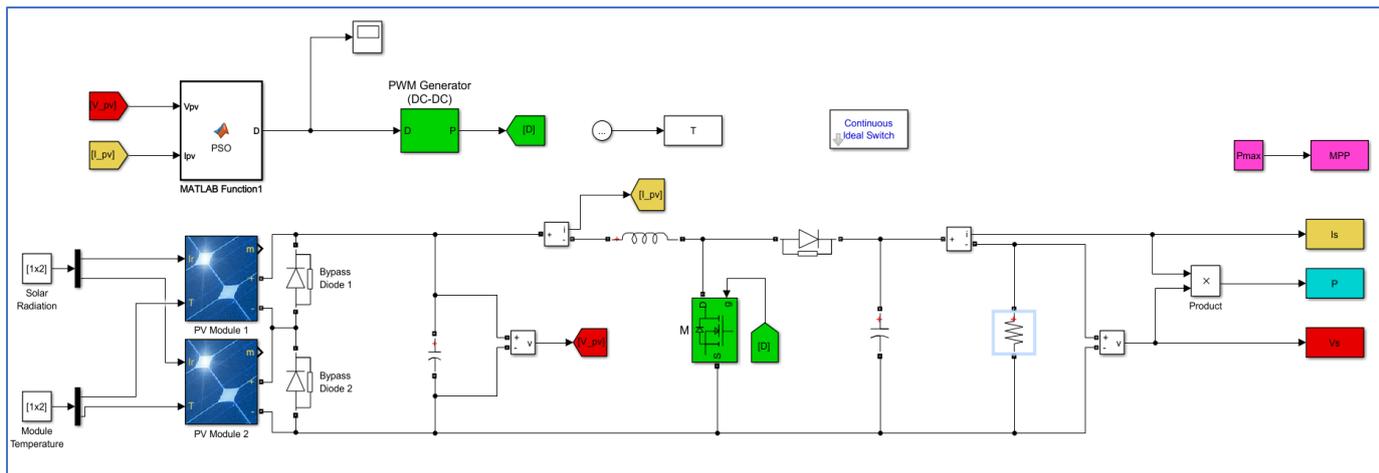


Figure 3. 8 Schéma Matlab/Simulink de la commande PSO avec deux panneaux PV

Le tableau 3.3 donne la combinaison des éclairagements des deux panneaux (fixe et variable) et le rendement de la commande PSO qui est très satisfaisant.

Deux Panneaux Photovoltaïque					
Cas	Température	Combinaison des Éclairement	$P_{ideal}$	$P_{sortie}$ avec PSO	Rendement du PSO
Cas 1	25°	[500 1000]	268.2	267.95	99.90%
Cas 2	25°	[1000 1000]	491.4	491	99.91%

Tableau 3. 3 Rendement de la commande PSO pour le cas de deux panneaux PV sous des conditions climatiques fixe et variable

Les résultats de simulation du système PV par le commande MPPT PSO sont présentés dans les figures (3.9) et (3.10) pour le cas 1 du tableau 3.3. Les figures montrent la puissance de sortie du GPV et l'évolution du rapport cyclique, respectivement.

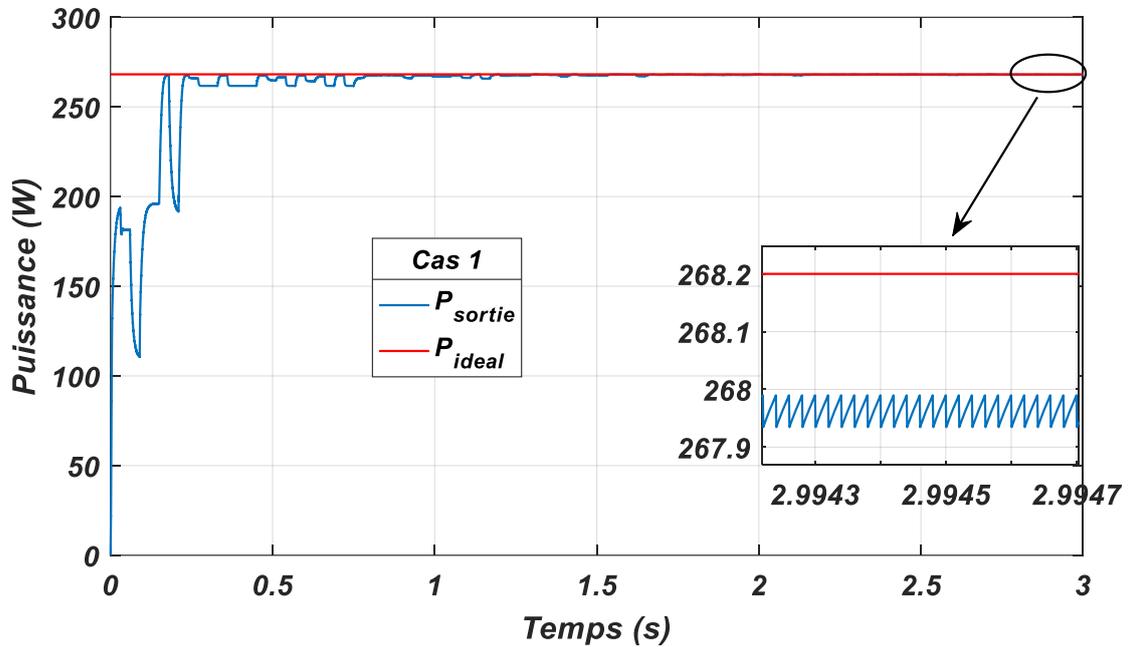


Figure 3. 9 Puissance de sortie avec PSO

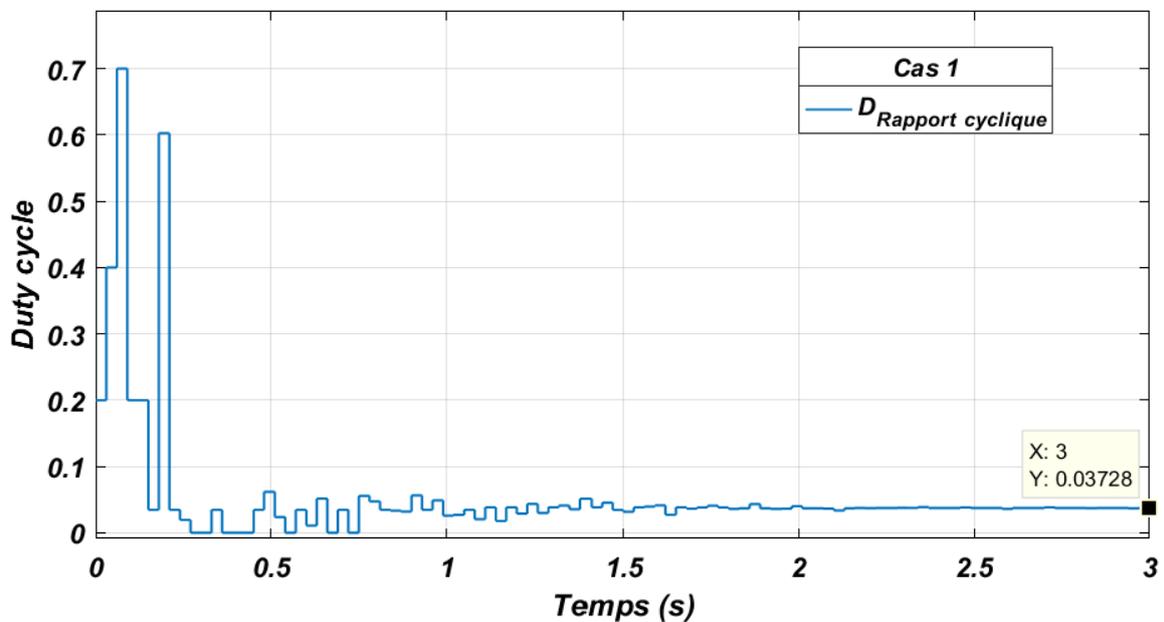
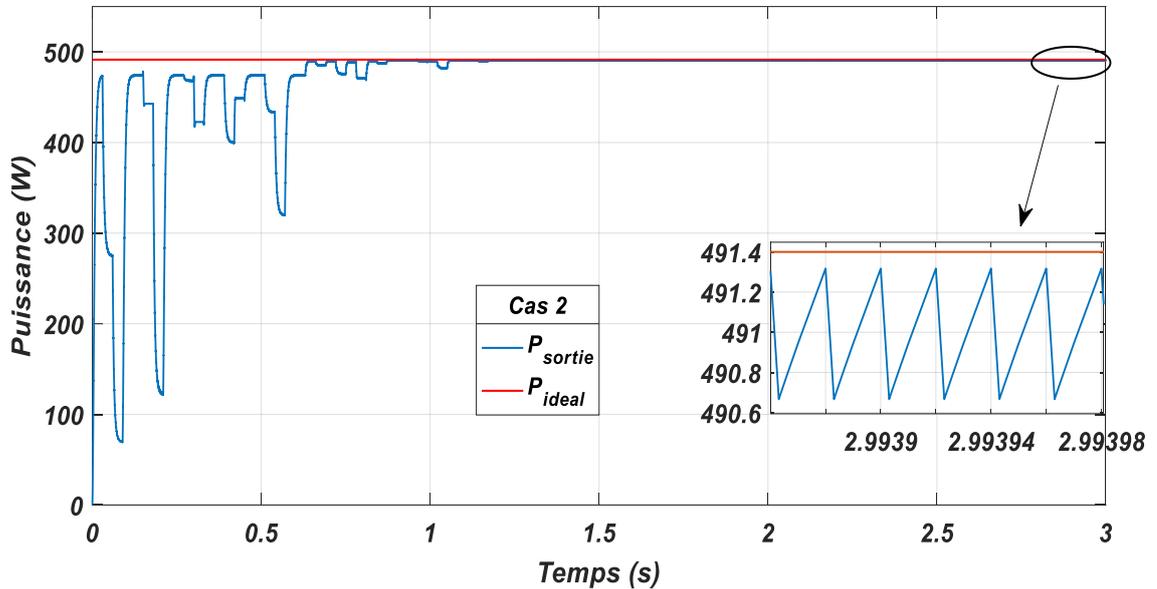


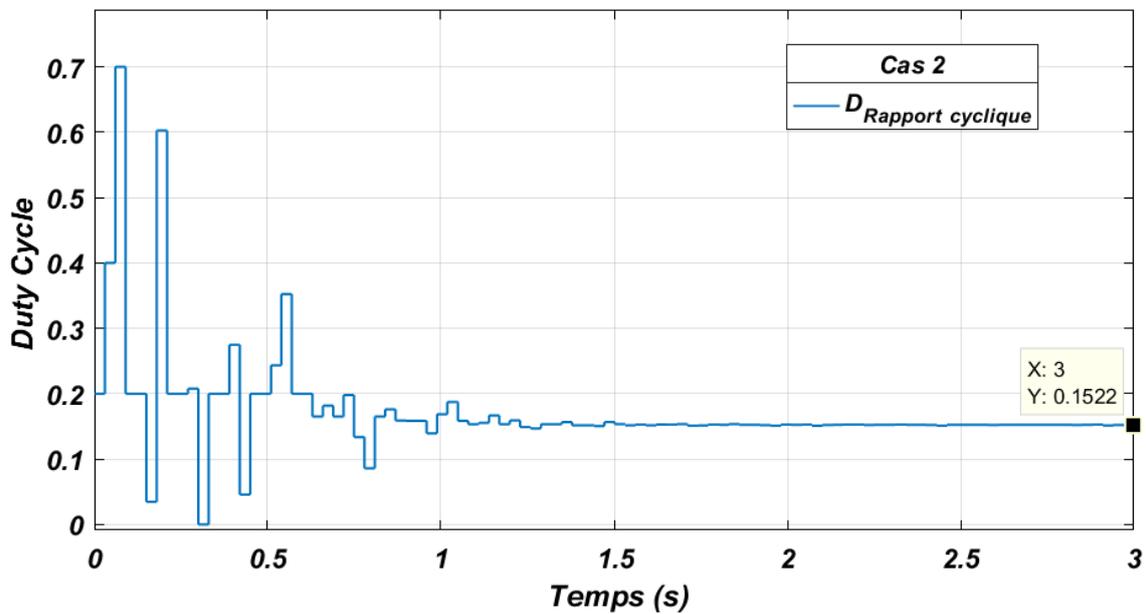
Figure 3. 10 Variation du rapport cyclique avec PSO

Nous remarquons que, malgré les effets d'ombrage, la commande PSO converge vers une valeur très proche du maximum global.

Les figures (3.11) et (3.12) illustrent les résultats de simulation du système PV par la commande (PSO) pour le cas 2 du tableau 3.3. Les figures montrent les évolutions de la puissance de sortie du GPV et du rapport cyclique, respectivement.



**Figure 3. 11** Evolution de la puissance de sortie avec PSO

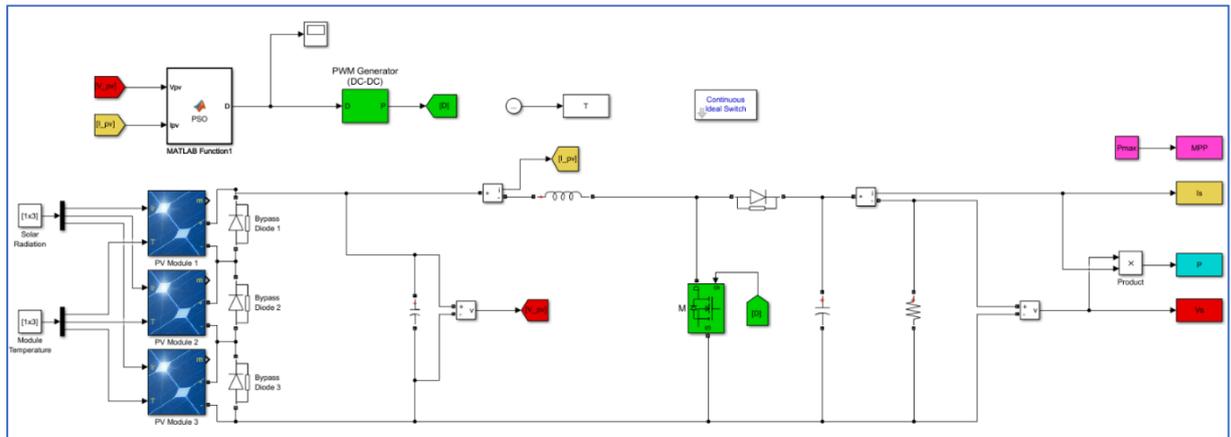


**Figure 3. 12** Variation du rapport cyclique avec PSO

La commande PSO converge vers la valeur de puissance maximale dans les conditions climatiques fixes.

**b. Cas de trois panneaux PV en série**

Le schéma de la commande PSO réalisée sous l'environnement Matlab/Simulink pour le cas de trois panneaux PV en série est donné par la figure 3.13



**Figure 3. 13** Schéma Matlab/Simulink de la commande PSO avec trois panneaux PV

Le tableau 3.4 donne la combinaison des éclairagements des trois panneaux (fixe et variable) et le rendement de la commande PSO

Trois Panneaux Photovoltaïque					
Cas	Température	Combinaison des Éclairément	Pideal	Psortie avec PSO	Rendement
Cas 1	25°	[300 600 1000]	315	313.7	99.58%
Cas 2	25°	[1000 1000 1000]	740.4	739.7	99.90%

**Tableau 3. 4** Rendement de la commande PSO pour le cas de trois panneaux PV sous des conditions climatiques fixe et variable

Les résultats de simulation du système PV par la commande MPPT PSO sont présentés dans les figures (3.14), (3.15) et (3.16) pour le cas 1 du tableau 3.4. Les figures montrent la caractéristique P-V ayant trois lobes (un maximum global et deux locaux), la puissance de sortie du GPV et l'évolution du rapport cyclique, respectivement

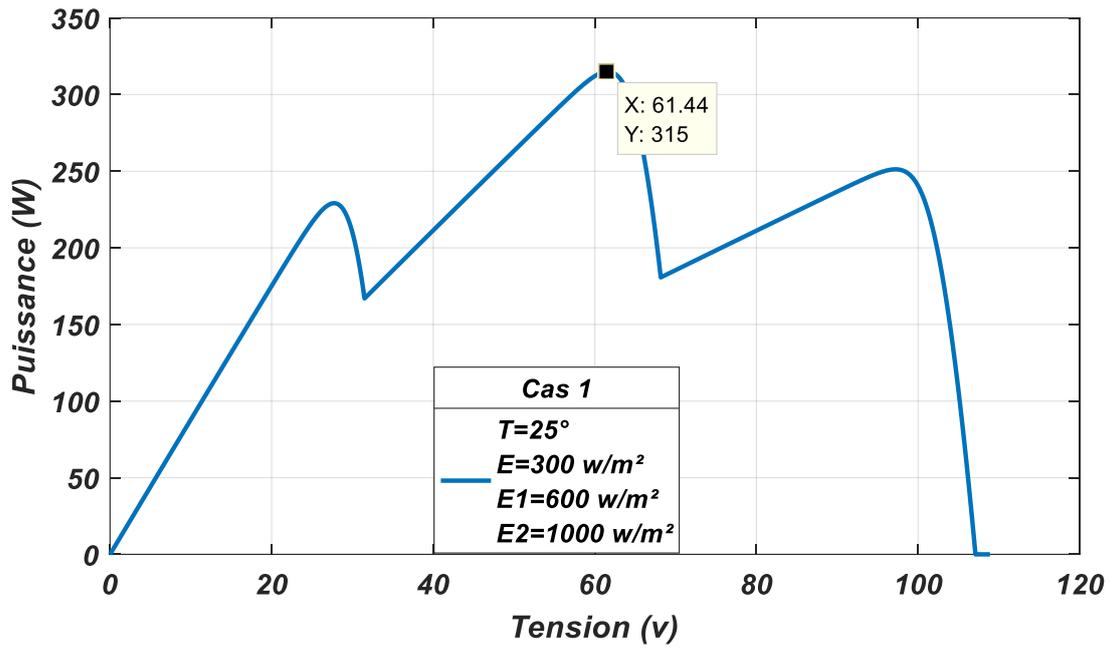


Figure 3. 14 Caractéristique P-V en présence d'ombrage (trois lobes)

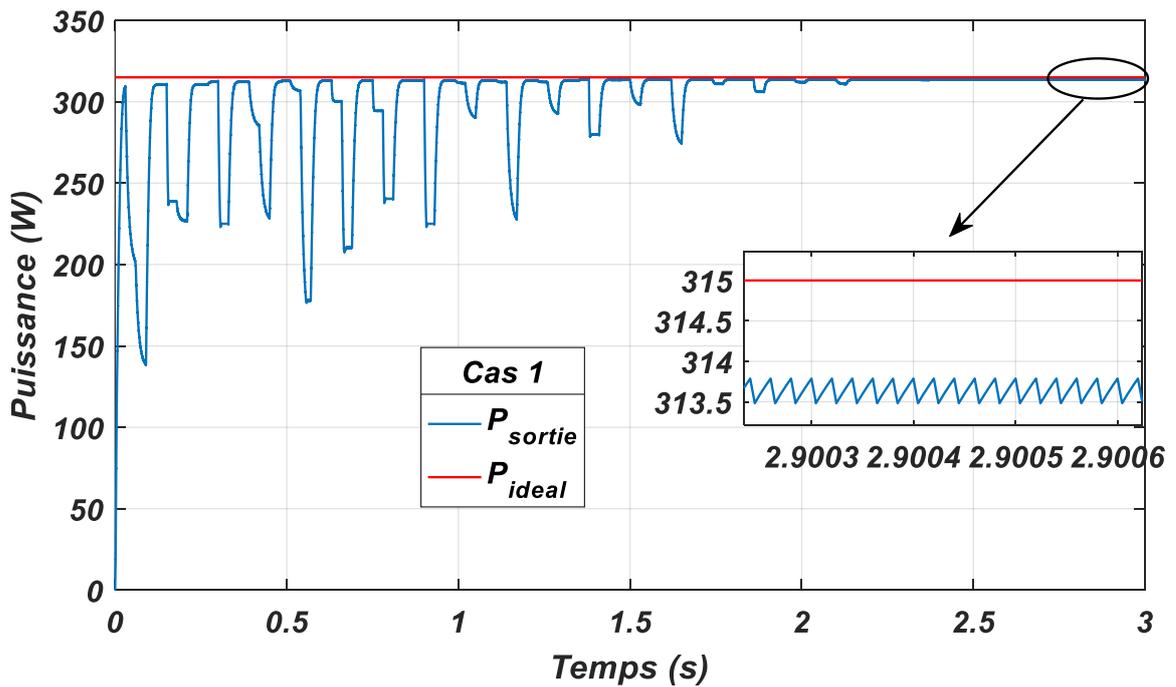


Figure 3. 15 Puissance de sortie avec PSO

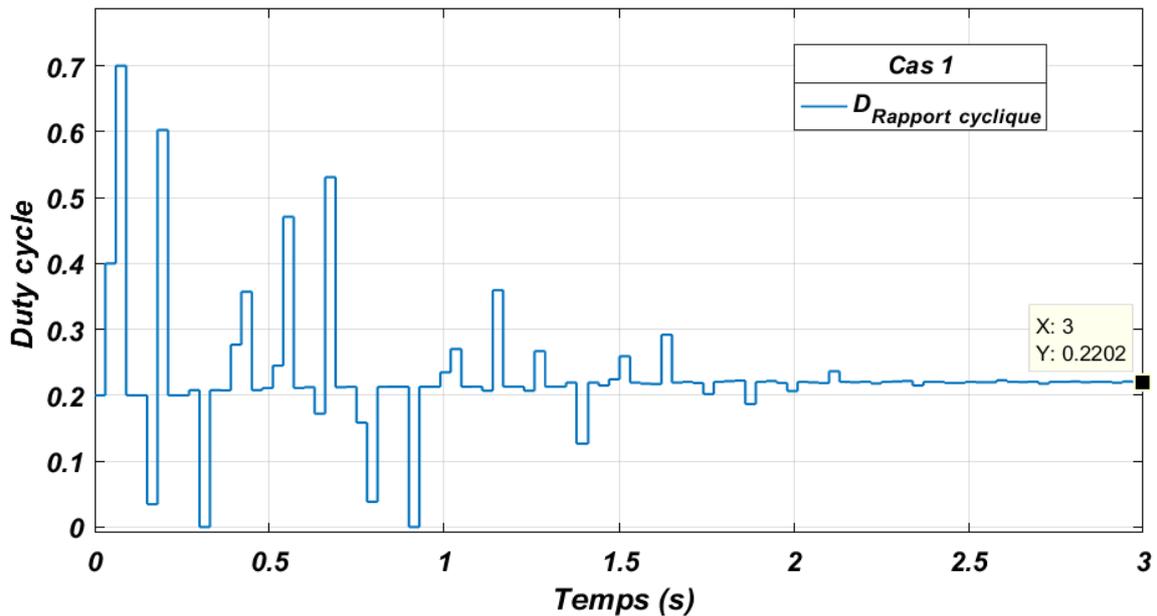


Figure 3. 16 Variation du rapport cyclique avec PSO

Nous remarquons que la commande PSO a bien convergé vers une valeur très proche au maximum global.

Les résultats de simulation du système PV par la commande MPPT PSO sont présentés dans les figures (3.17), (3.18) et (3.19) pour le cas 2 du tableau 3.4. Les figures montrent la caractéristique P-V ayant un lobe unique (un maximum global), la puissance de sortie du GPV et l'évolution du rapport cyclique, respectivement

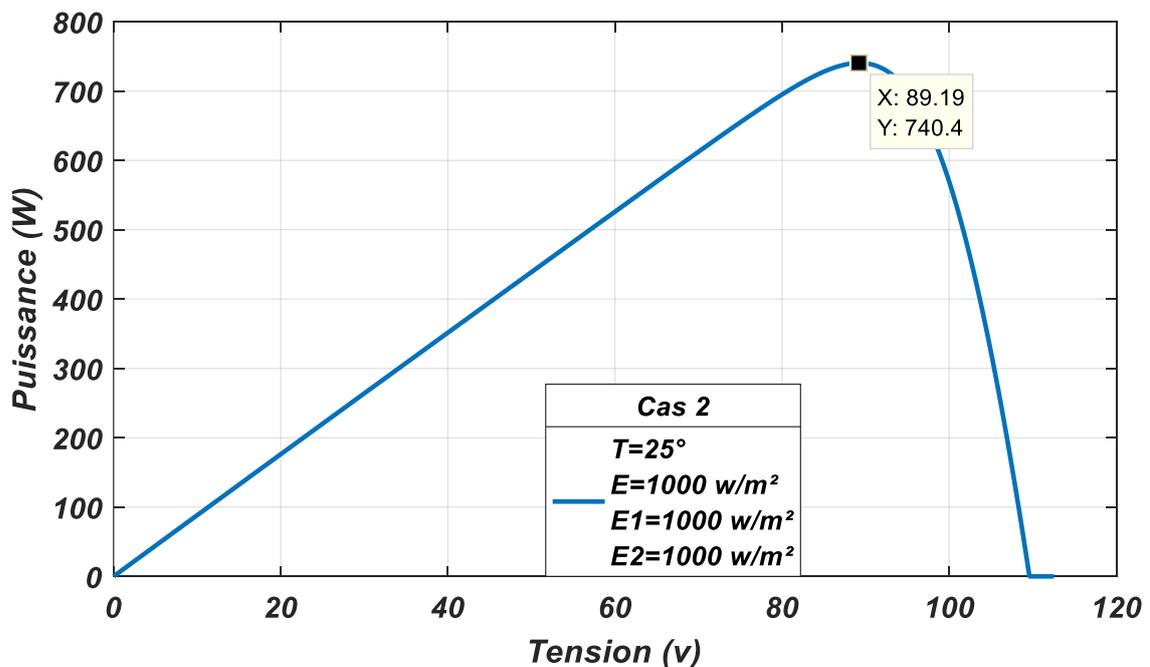


Figure 3. 17 Caractéristique P-V sous des conditions climatiques fixes

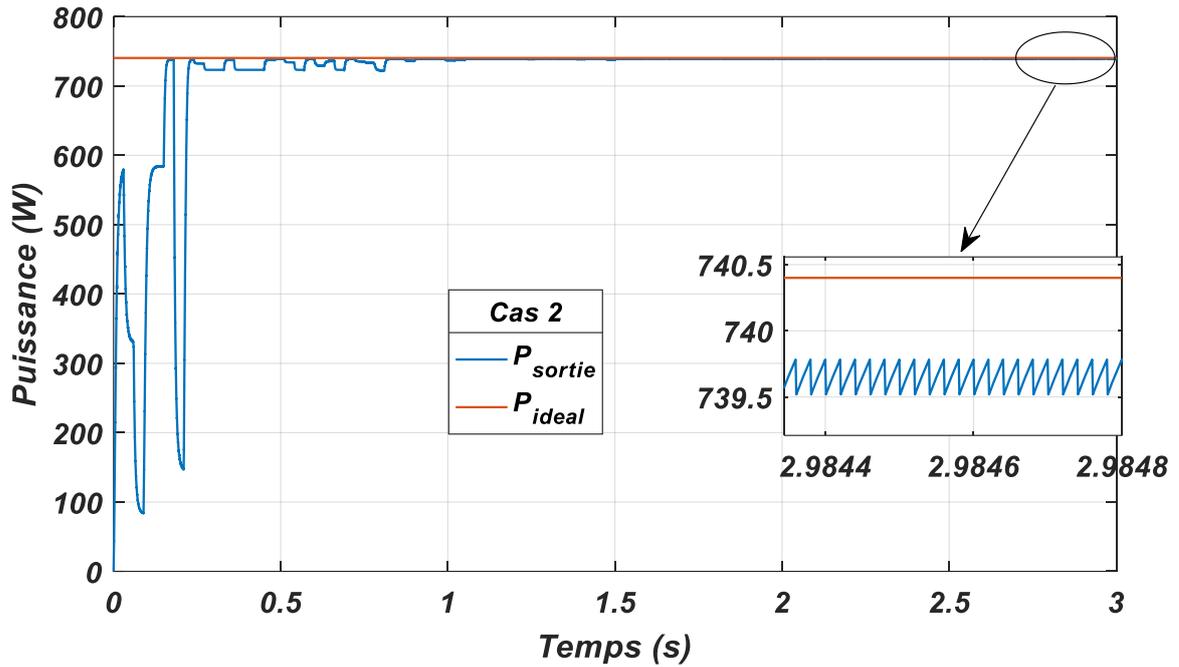


Figure 3. 18 Puissance de sortie avec PSO

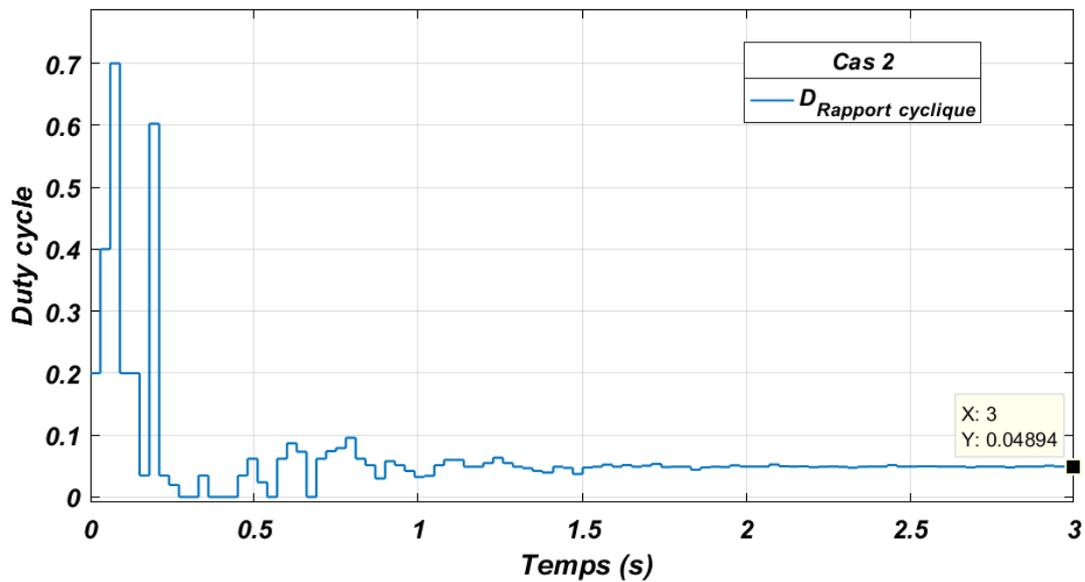
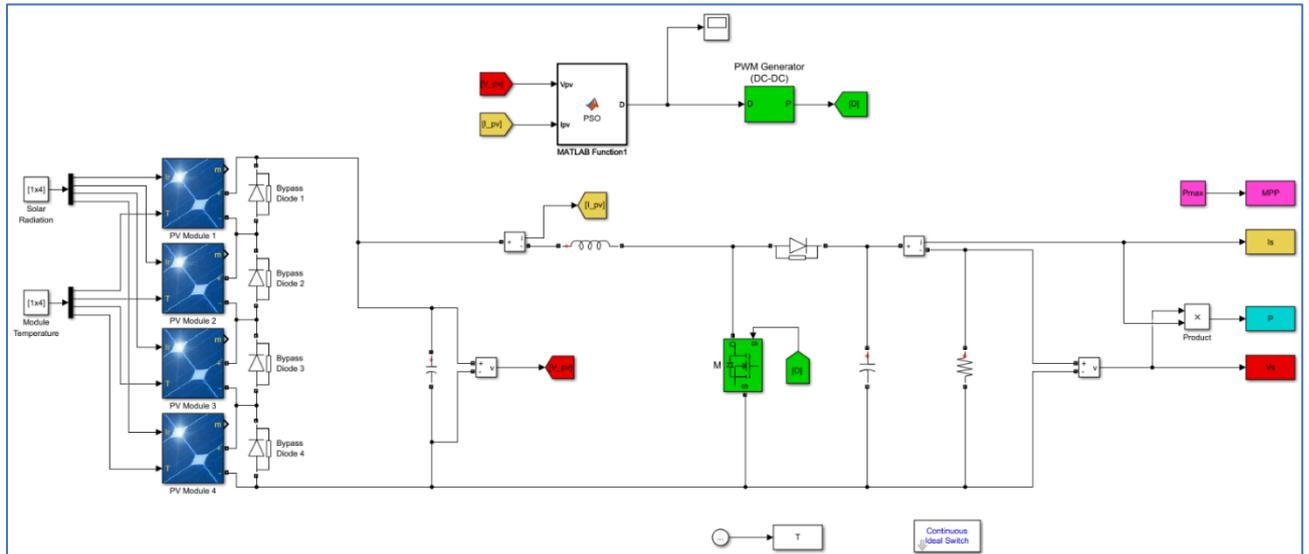


Figure 3. 19 Variation du rapport cyclique avec PSO

La commande PSO a convergé vers une valeur très proche au maximum global.

**c. Cas de quatre panneaux PV en série**

Le schéma de la commande PSO réalisée sous l’environnement Matlab/Simulink pour le cas de quatre panneaux PV en série est donné par la figure 3.20



**Figure 3. 20** Schéma Matlab/Simulink de la commande PSO avec quatre panneaux PV

Le tableau 3.5 donne la combinaison des éclairagements des quatre panneaux (fixe et variable) et le rendement de la commande PSO

Quatre Panneaux Photovoltaïques					
Cas	Température	Combinaison des Éclairément	Pideal	Psortie avec PSO	Rendement
Cas 1	25°	[400 600 800 1000]	484.8	483	99.71%
Cas 2	25°	[1000 1000 1000 1000]	989.4	986.8	99.73%

**Tableau 3. 5** Rendement de la commande PSO pour le cas de quatre panneaux PV sous des conditions climatiques fixe et variable

Les résultats de simulation du système PV par la commande MPPT PSO sont présentés dans les figures (3.21), (3.22) et (3.23) pour le cas 1 du tableau 3.5. Les figures montrent la caractéristique P-V ayant quatre lobes (un maximum global et trois locaux), la puissance de sortie du GPV et l'évolution du rapport cyclique, respectivement

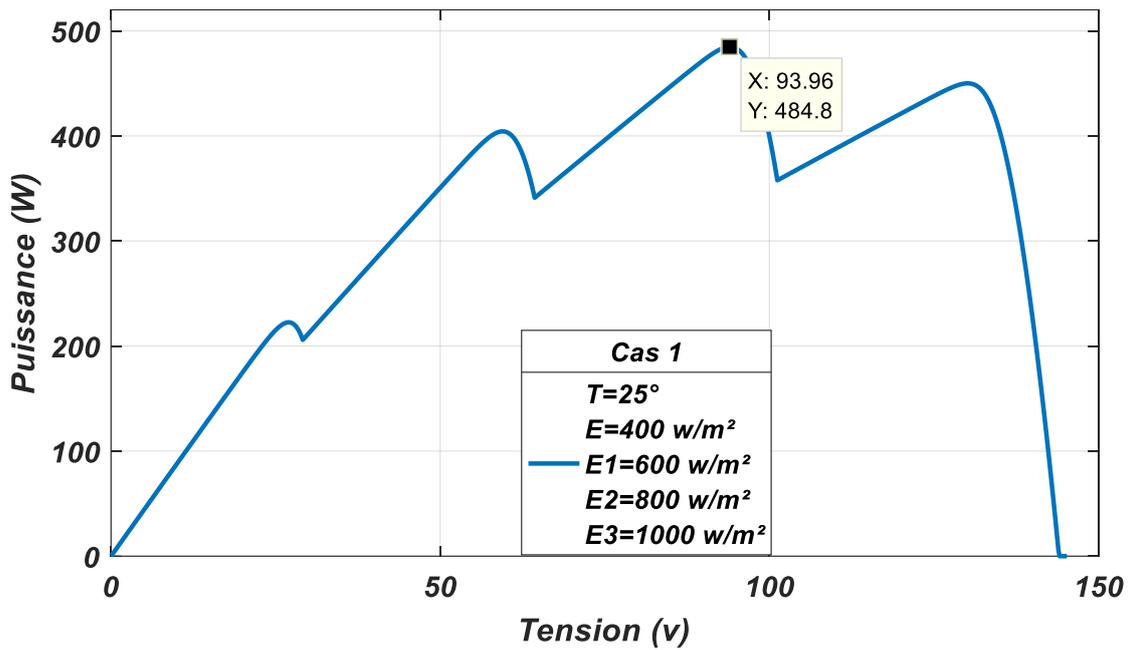


Figure 3. 21 Caractéristique P-V en présence de l'ombrage (quatre lobes)

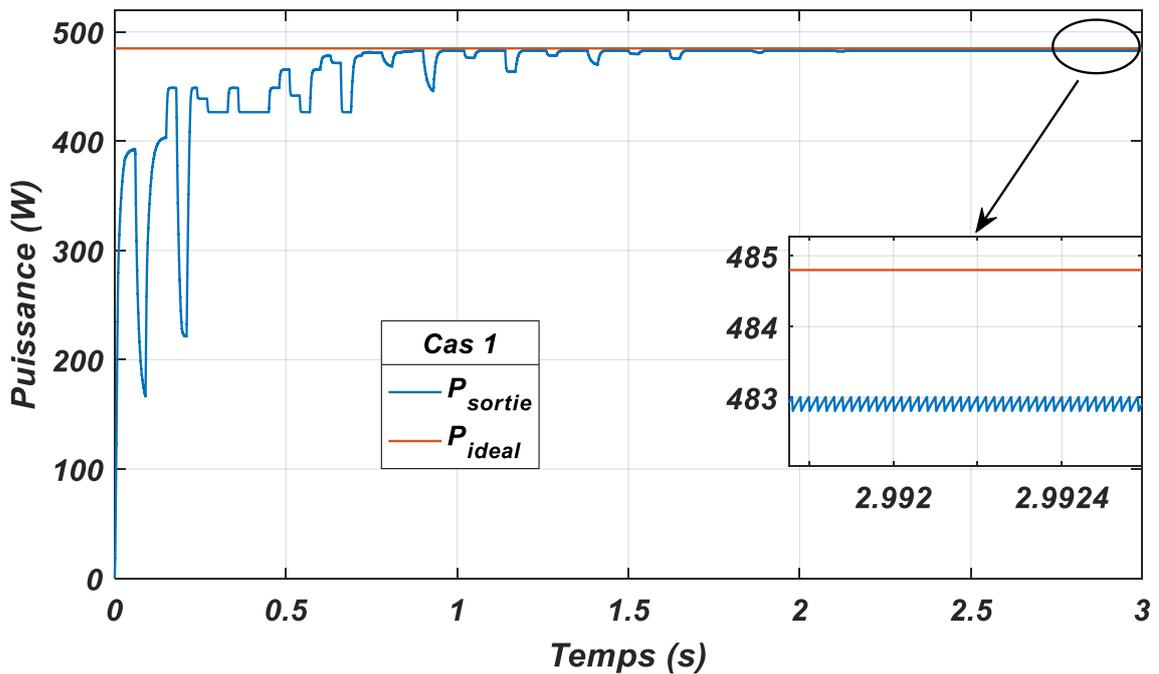


Figure 3. 22 L'évolution de la puissance de sortie avec PSO

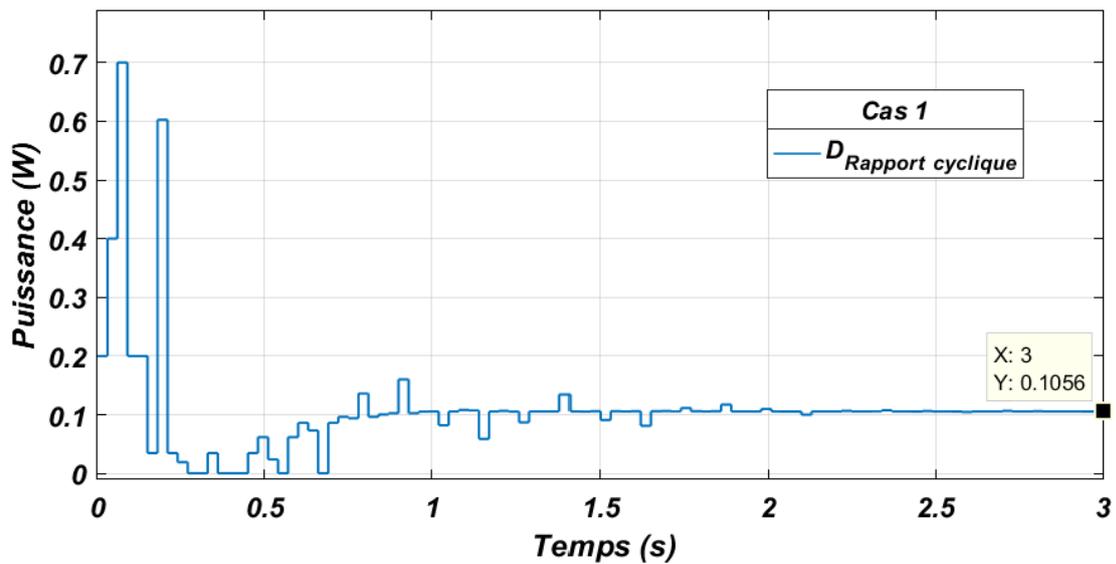


Figure 3. 23 Variation du rapport cyclique avec PSO

Nous remarquons que la commande PSO a bien convergé vers une valeur très proche du maximum global.

Les résultats de simulation du système PV par la commande MPPT PSO sont présentés dans les figures (3.24), (3.25) et (3.26) pour le cas 2 du tableau 3.5. Les figures montrent la caractéristique P-V ayant un lobe unique (un maximum global), la puissance de sortie du GPV et l'évolution du rapport cyclique, respectivement

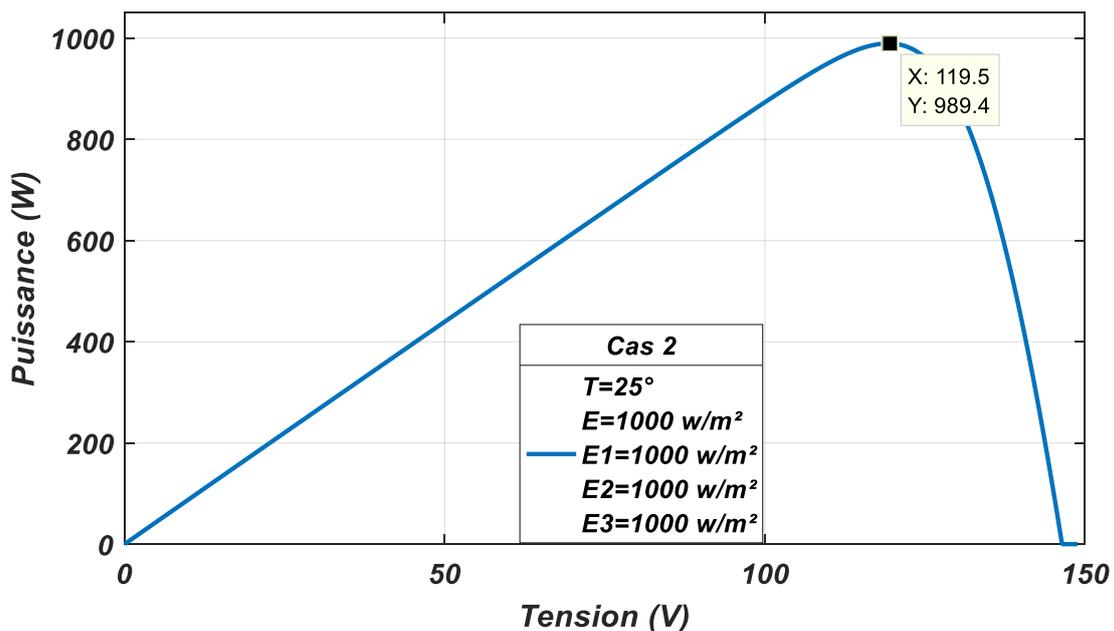


Figure 3. 24 Caractéristique P-V sous des conditions atmosphériques fixes

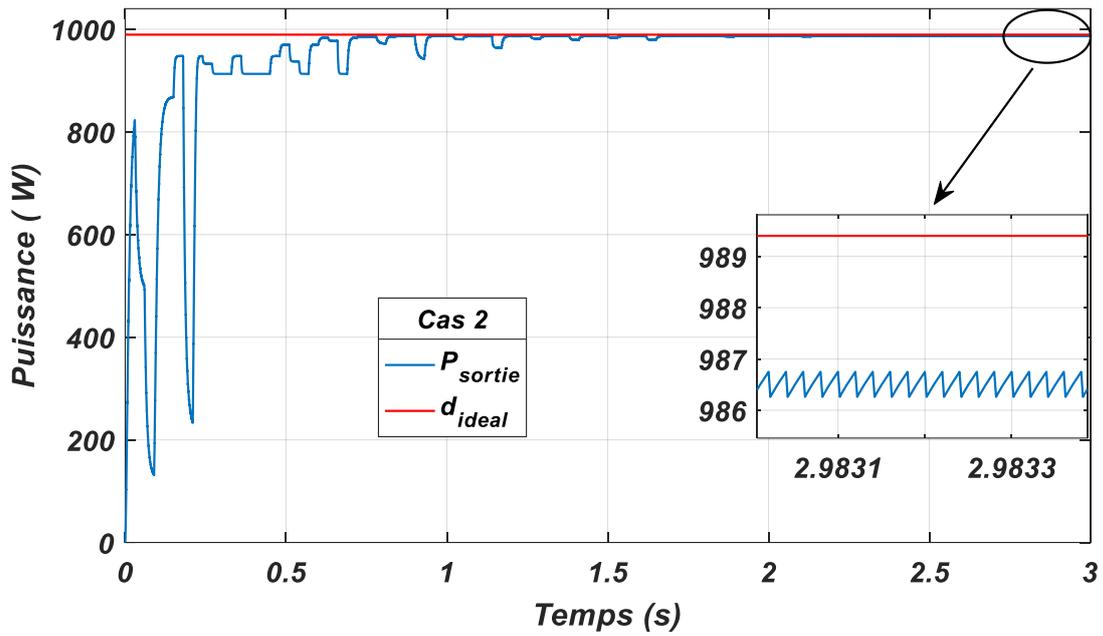


Figure 3. 25 L'évolution de la puissance de sortie avec PSO

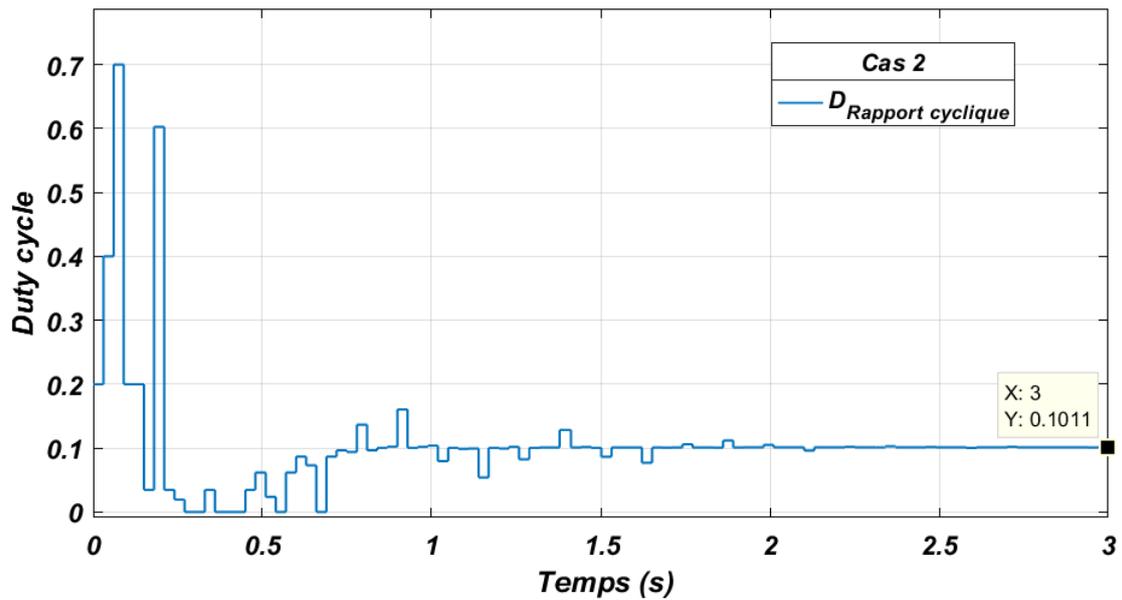
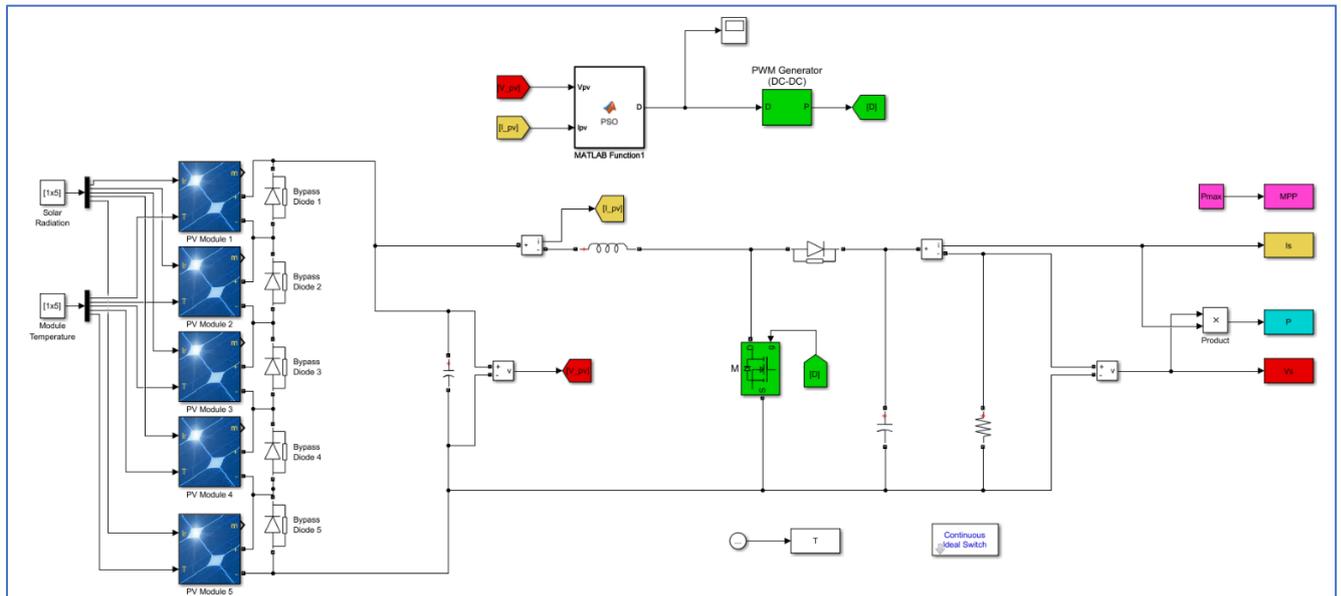


Figure 3. 26 Variation du rapport cyclique avec PSO

La convergence de la commande PSO est très proche de l'optimum global

**d. Cas de cinq panneaux PV en série**

Le schéma de la commande PSO réalisée sous l'environnement Matlab/Simulink pour le cas de cinq panneaux PV en série est donné par la figure 3.27



**Figure 3. 27** Schéma Matlab/Simulink de la commande PSO avec cinq panneaux PV

Le tableau 3.6 donne la combinaison des éclairements des cinq panneaux (fixe et variable) et le rendement de la commande PSO

Cinq Panneaux Photovoltaïques					
Cas	Température	Combinaison des Éclairement	Pideal	Psortie avec PSO	Rendement
Cas 1	25°	[200 400 600 800 1000]	480.6	479.3	99.72%
Cas 2	25°	[1000 1000 1000 1000 1000]	1238	1234	99.67%

**Tableau 3. 6** Rendement de la commande PSO pour le cas de cinq panneaux PV sous des conditions climatiques fixe et variable

Les résultats de simulation du système PV par la commande MPPT PSO sont présentés dans les figures (3.28), (3.29) et (3.30) pour le cas 1 du tableau 3.6. Les figures montrent la caractéristique P-V ayant cinq lobes (un maximum global et quatre locaux), la puissance de sortie du GPV et l'évolution du rapport cyclique, respectivement

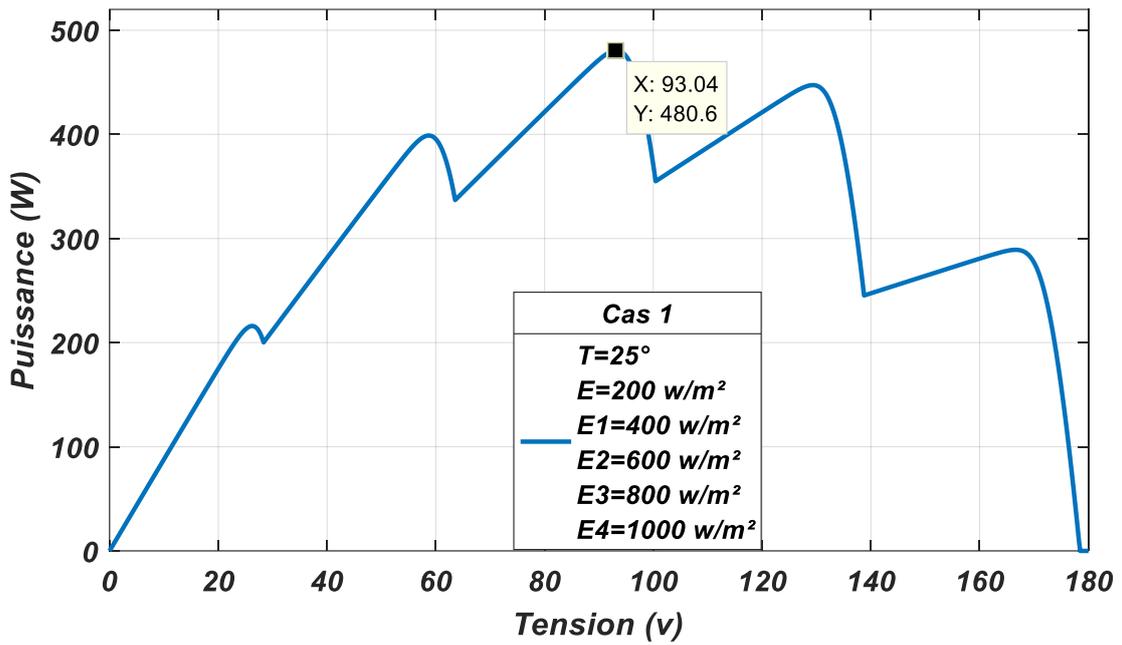


Figure 3. 28 Caractéristique P-V en présence de l'ombrage (cinq lobes)

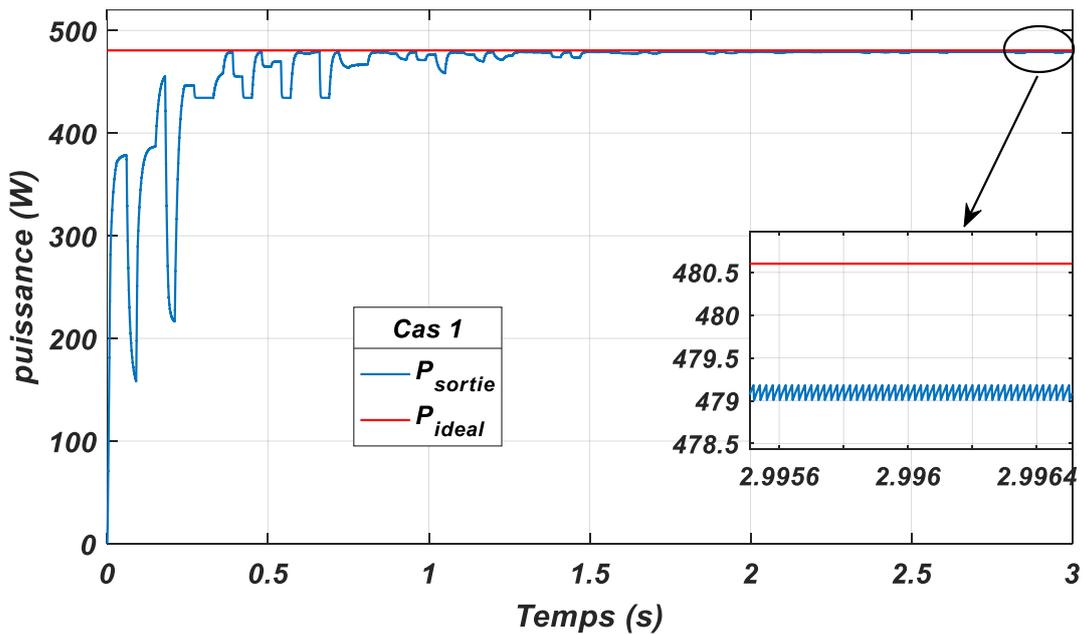


Figure 3. 29 Puissance de sortie avec PSO

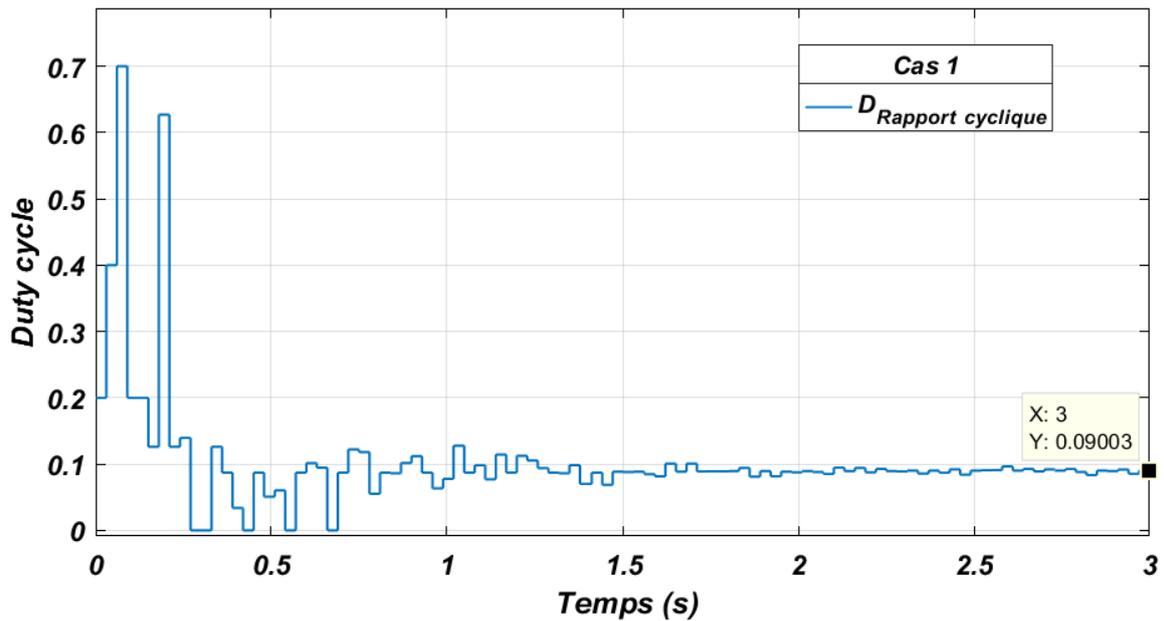


Figure 3. 30 Variation du rapport cyclique avec PSO

Nous remarquons que la commande PSO a bien convergé vers une valeur très proche du maximum global.

Les résultats de simulation du système PV par la commande MPPT PSO sont présentés dans les figures (3.31), (3.32) et (3.33) pour le cas 2 du tableau 3.6. Les figures montrent la caractéristique P-V ayant un lobe unique (un maximum global), la puissance de sortie du GPV et l'évolution du rapport cyclique, respectivement

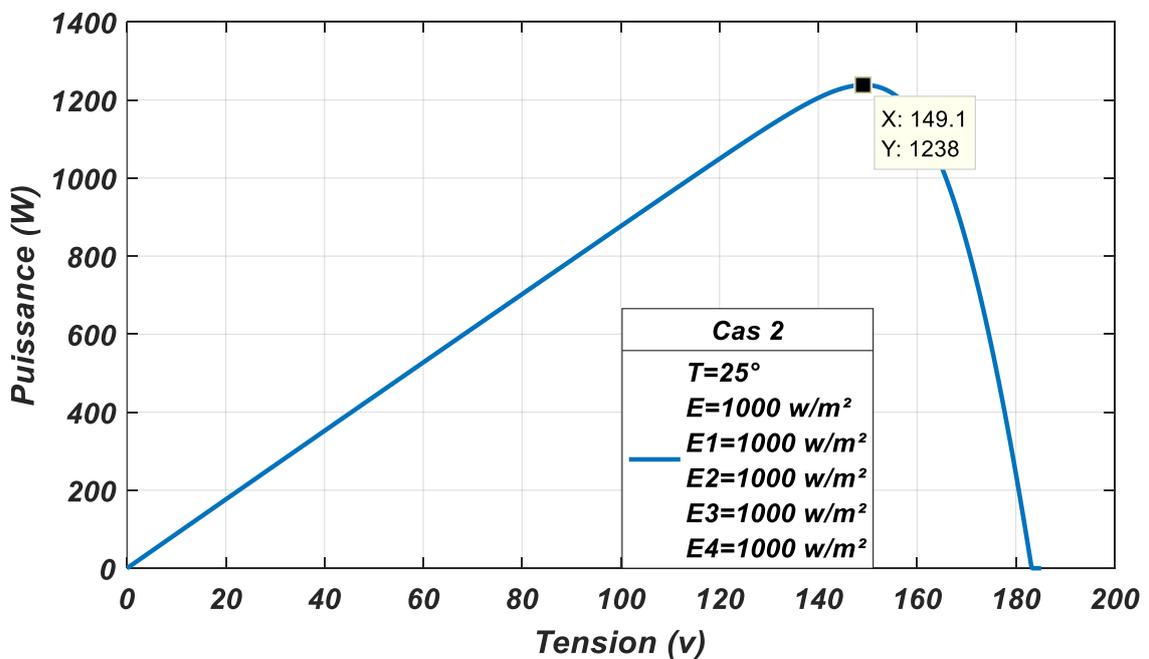


Figure 3. 31 Caractéristique P-V sous des conditions climatiques fixes

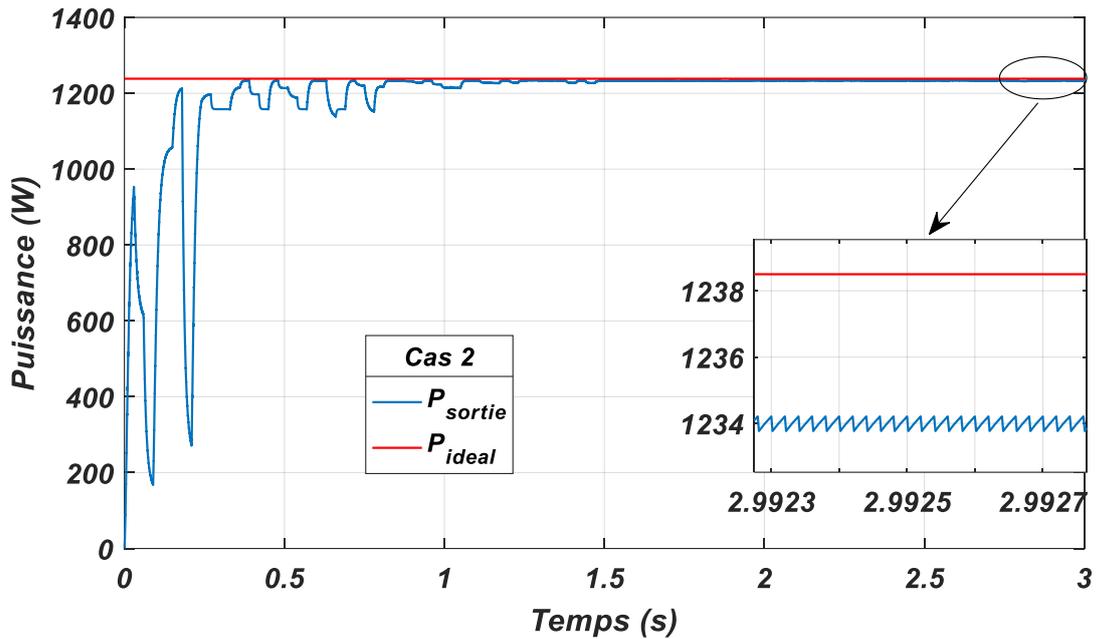


Figure 3. 32 Evolution de la puissance de sortie avec PSO

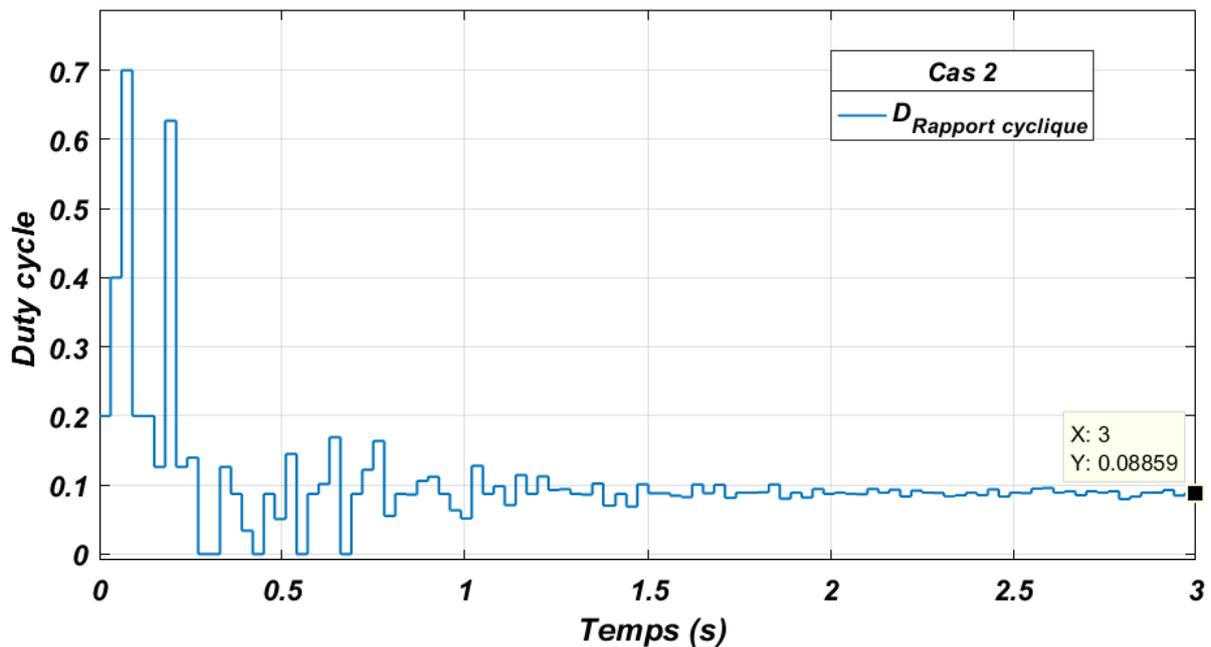


Figure 3. 33 Variation du rapport cyclique avec PSO

Nous constatons que la commande PSO a convergé vers une valeur très proche du maximum global.

- Dans le cas où il n'y a pas d'ombrage, la valeur de la puissance de sortie obtenue avec les deux commandes (PSO et P&O) est presque identique.
- En cas d'ombrage, la commande P&O converge toujours vers le maximum le plus proche du point de départ, qui peut être un maximum local ou global. En revanche, la commande PSO converge toujours vers le maximum global.

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé l'algorithme de commande MPPT basé sur la technique d'optimisation par essaim de particules (PSO). Un convertisseur de type Boost a été utilisé dans les simulations pour démontrer l'efficacité de l'algorithme. Les résultats montrent clairement l'efficacité de la commande MPPT basée sur la technique PSO en présence de conditions d'ombrage, où les algorithmes classiques, tels que l'algorithme P&O, ne peuvent pas fournir des résultats satisfaisants

---

# **Conclusion générale**

---

### Conclusion Générale

La transition vers les sources d'énergie renouvelable est une nécessité impérative pour faire face aux défis énergétiques et environnementaux mondiaux. Les systèmes photovoltaïques (PV) représentent une option prometteuse grâce à leur capacité à convertir directement la lumière du soleil en électricité propre et durable. Cependant, le problème de l'ombrage partiel reste un obstacle majeur à l'amélioration de leur performance.

Cette thèse a exploré l'application de l'algorithme de recherche par essaim de particules (PSO) pour développer une méthode de commande MPPT efficace en présence d'ombrage, en utilisant le convertisseur Boost. Nous avons étudié comment ce type de convertisseur peut être utilisé pour ajuster la tension et la puissance dans les systèmes PV, et comment il peut contribuer à améliorer les performances sous des conditions d'ombrage.

À travers des simulations et des analyses approfondies, nous avons démontré que l'utilisation du convertisseur Boost en combinaison avec l'algorithme PSO peut améliorer l'efficacité de la détermination du point de puissance maximale (MPPT) et augmenter la capacité du système à s'adapter aux conditions d'ombrage. Comparé aux méthodes traditionnelles de MPPT, ce couplage offre une performance améliorée et une efficacité accrue, contribuant ainsi à maximiser l'utilisation de l'énergie solaire dans des conditions défavorables.

Ces résultats représentent une avancée significative dans l'amélioration des performances et de l'efficacité des systèmes PV, ouvrant de nouvelles perspectives pour une utilisation durable de l'énergie solaire. Cependant, il reste encore beaucoup de recherche et d'innovation à explorer dans ce domaine, notamment le développement de techniques plus avancées et leur adaptation à différents types de systèmes PV et conditions environnementales.

En résumé, l'utilisation du convertisseur Boost en combinaison avec l'algorithme PSO représente une avancée majeure dans l'amélioration de la performance des systèmes PV sous ombrage partiel. En adoptant cette approche, nous faisons un pas de plus vers un avenir énergétique plus durable et adaptable. Nous espérons que cette étude inspirera de futures recherches et innovations dans le domaine des énergies renouvelables.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1-<https://www.banquemondiale.org/>
- 2- **Livre:** "Énergies renouvelables et efficacité énergétique"
- 3- 1954-2000 : La conquête du photovoltaïque
- 4- 2000-2012 : L'industrialisation du photovoltaïque
- 5- <https://www.edfenr.com/lexique/photovoltaïque-pv/>
- 6-BOUSSOUF, DRAI Etude et modélisation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique triphasé Université SAAD DAHLEB de BLIDA 2019-2020
- 7- <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>
- 8- <https://www.ines-solaire.org/tout-savoir-sur-les-panneaux-photovoltaïques>
- 9-BELKAS,HAMMOUR Université SAAD DAHLAB de BLIDA (1) 2022-2023
- 10-“Photovoltaic Systems Engineering” par Roger A. Messenger et Jerry Ventre
- 11- “Convertisseurs DC-DC | Comment ça marche, application et avantages” Électricité et Magnétisme 26 octobre 2023
- 12- <https://www.electronics-tutorials.ws/dcdc/boost-converter.html>
- 13- <https://www.electronicshub.org/buck-converter-basics-working-applications/>
- 14- **Article:** "Buck-Boost Converter Basics and Design Fundamentals"
- 15- **Article:** "SEPIC Converter Basics and Design Fundamentals"
- 16- <https://www.jade-technologie.com/role-regulateur-de-charge-solaire-mppt/>
- 17- <https://www.mathworks.com/discovery/mppt-algorithm.html>
- 18- TIGRINE, Ait Ouali Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque, Université A. MIRA-BEJAIA 2018/2019
- 19- J. A. Gow and C. D. Manning, “Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies,” *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 1999.
- 20- “Perfectionnement des algorithmes d'optimisation par essaim particulaire : applications en segmentation d'images et en électronique” Abbas El Dor 2012
- 21- Wang, JS., Li, SX, « An Improved Grey Wolf Optimizer Based on Differential Evolution and Elimination Mechanism», *Sci Rep* 9, 7181 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43546-3>
- 22- S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, A. Lewis, « Grey Wolf Optimizer, *Advances in Engineering Software*», vol. 69, pp. 46-55, 2014, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>

