



DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

THEME

*Etude et maximisation de puissance d'un  
système photovoltaïque*

Présenté par:

- Lemita Ines
- Lemita Affaf

Devant le jury :

- |                        |     |                  |
|------------------------|-----|------------------|
| - Aziz Boukadoum       | MCA | <b>Président</b> |
| - Djamel Ounnas        | MCA | <b>Encadreur</b> |
| - Mohamed Amine moussa | MCB | <b>Examineur</b> |

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral element consisting of a central flower with several petals and leaves, positioned at the beginning of the calligraphic text.

# Remerciement

*Je remercie premièrement **Dieu** qui m'a donné ce bien là et que je vie ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail.*

*Je voudrais remercier, mon encadreur de mémoire **Dr.Ounnas Djamel**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

*Je remercie également les membres du jury qui m'ont honoré en acceptant de juger et d'enrichir ce travail.*

*Le travail de mémoire que nous avons effectué doit beaucoup à certaines personnes que nous tenons à les remercier sincèrement.*

*Enfin, nous remercions toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail.*

# Dédicaces

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral, ma source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père*

*Hama.*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, maman Yamina*

*A mes chères sœurs ; dallel et nour elyakine*

*A mes chères frères ; Ramzi et hamza*

*« 'Ceux qui m'ont toujours soutenu et m'ont donné la force de persévérer dans les pires moments, je vous aime ' »*

*A ma famille*

*« Les plus grands cœurs au monde qui sont là toujours avec nous. Je vous souhaite tout ce qui est merveilleux dans ce monde. »*

*A ma binôme affaf merci d'être toujours à mes côtés.*

*A tous mes amis, mes proches, et mes camarades, en souvenir de tout ce qu'on a pu partager.*

*Lemita Ines*

# Dédicaces

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...  
Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour et Le  
respect...*

*Je dédie ce mémoire à mes très chers parents mon père  
DJALLOUL et ma mère LADMIA, pour l'amour qu'ils m'ont  
toujours donné, leurs encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont  
apportée durant mes études.*

*A mes chères frères ABDERAHMAN et SAMIR*

*A mes chères sœurs NOUARA, HOUDA et ROUMAÏSSA  
qui m'ont encouragé à réaliser cette recherche*

*A tout ma grande famille*

*A toute personne m'a aidé financièrement ou psychiquement*

*Lemita Affaf*

## Liste des symboles

### Notations et Abréviations

$PV$	Photovoltaïque.
$GPV$	Générateur photovoltaïque.
$DC$	Courant Continu (direct current).
$AC$	Courant alternatif (Alternating current)
$\lambda$	Longueur d'onde
$R_s$	Résistance Série
$h$	Constante de Planck
$c$	Célérité de la lumière
$FF$	Facteur de forme.
$\eta$	Rendement de conversion.
$I$	Courant de la cellule (A)
$I_{ph}$	Le photo-courant (A).
$I_{rs}$	Courant de saturation (A).
$V_d$	Tension aux bornes de la diode (V)
$V_t$	Potentiel thermique
$q$	Charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19} C$ )

## Liste des symboles

$k$	Constante de Boltzmann ( $1.38 e^{-23} j / k$ )
$n$	Facteur d'idéalité de la diode
$k_i$	Le courant de court-circuit de la cellule [A].
$I_{cc}$	Courant de court-circuit (A).
$I_{pv}$	Courant du GPV [A] ;
$V_{pv}$	Tension du GPV [V]
$N_s$	Nombre de cellules connectées en série par module
$N_p$	Nombre de modules connectés en parallèle.
$V_{co}$	Tension à circuit ouvert (V).
$V_{mpp}$	tension de la puissance maximale
$I_{mpp}$	Courant dans le point PPM
$T$	Température de la jonction des cellules PV [°K].
$I_D$	Courant à travers la diode [A]
$I_{sc}$	Courant de court-circuit [A]
$W$	Watt
$G$	Irradiation solaire [w/m <sup>2</sup> ]
$V$	Volts

## *Liste des symboles*

<i><math>\alpha</math></i>	Le rapport cyclique.
<i>MPP</i>	le point de puissance maximale
<i>MPPT</i>	Maximum Power Point tracking
<i>INC</i>	Algorithme d'incrément de la conductance
<i>P &amp; O</i>	Méthode de perturbation et d'observation
<i>PWM</i>	Modulation de largeur d'impulsions (Pulse Width Modulation).
<i>PSO</i>	Optimisation par essaim de particules (Particle swarm optimization).



## *Liste des figures*

Figure N°	Titre	Page
<b><i>Chapitre I</i></b>		
<b>Figure I.1</b>	Image du soleil.	<b>3</b>
<b>Figure I.2</b>	principe de fonctionnement des panneaux	<b>4</b>
<b>Figure I.3</b>	rayonnement solaire	<b>5</b>
<b>Figure I.4</b>	Spectre de rayonnement solaire	<b>6</b>
<b>Figure I.5</b>	Types de cellules solaires	<b>7</b>
<b>Figure I.6</b>	Circuit de cellule PV équivalent	<b>9</b>
<b>Figure I.7</b>	Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque réelle	<b>11</b>
<b>Figure I.8</b>	Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque réelle.	<b>12</b>
<b>Figure I.9</b>	Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série	<b>13</b>
<b>Figure I.10</b>	Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en série	<b>14</b>
<b>Figure I.11</b>	Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en série	<b>14</b>
<b>Figure I.12</b>	Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle	<b>15</b>
<b>Figure I.13</b>	Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle	<b>15</b>
<b>Figure I.14</b>	Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en parallèle	<b>16</b>
<b>Figure I.15</b>	Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en série	<b>16</b>
<b>Figure I.16</b>	Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en série	<b>17</b>
<b><i>Chapitre II</i></b>		
<b>Figure II.1</b>	Schéma de principe d'un hacheur.	<b>19</b>
<b>Figure II.2</b>	Convertisseur survolteur réel	<b>20</b>
<b>Figure II.3</b>	Convertisseur dévolteur réel.	<b>21</b>
<b>Figure II.4</b>	Convertisseur dévolteur-survolteur réel.	<b>21</b>
<b>Figure II.5</b>	schéma de principe du hacheur Boost	<b>23</b>
<b>Figure II.6</b>	Allure du signal de commande appliqué à l'interrupteur Q.	<b>24</b>

## *Liste des figures*

<b>Figure II.7</b>	Schéma équivalent du hacheur Boost durant la phase active	<b>25</b>
<b>Figure II.8</b>	Schéma équivalent du hacheur Boost durant la phase de roue libre	<b>26</b>
<b>Figure II.9</b>	Allures des tensions et courants en mode conduction continue	<b>30</b>
<b>Figure II.10</b>	Allure du courant traversant l'inductance en conduction discontinue	<b>31</b>
<b>Figure II.11</b>	Courant d'entrée	<b>34</b>
<b>Figure II.12</b>	Tension d'entrée	<b>34</b>
<b>Figure II.13</b>	Courant de sortie	<b>35</b>
<b>Figure II.14</b>	Tension de sortie	<b>35</b>
<b><i>Chapitre III</i></b>		
<b>Figure III.1</b>	Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT	<b>38</b>
<b>Figure III.2</b>	Caractéristique $V_{pv}=f(V_{pv})$ d'un panneau solaire	<b>40</b>
<b>Figure III.3</b>	Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode perturber et observer.	<b>41</b>
<b>Figure III.4</b>	Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de Conductance	<b>43</b>
<b>Figure III.5</b>	Organigramme de l'algorithme Hill Climbing	<b>44</b>
<b>Figure III.6</b>	Variation de la tension en fonction du temps	<b>45</b>
<b>Figure III.7</b>	Variation du courant en fonction du temps	<b>45</b>
<b>Figure III.8</b>	Variation de la puissance en fonction du temps	<b>46</b>
<b>Figure III.9</b>	Variation de la tension en fonction du temps	<b>46</b>
<b>Figure III.10</b>	Variation du courant en fonction du temps	<b>47</b>
<b>Figure III.11</b>	Variation de la puissance en fonction du temps	<b>47</b>
<b><i>Chapitre IV</i></b>		

## *Liste des figures*

<b>Figure IV.1</b>	volée d'anser en formation en V	<b>48</b>
<b>Figure IV.2</b>	stratégie de déplacement d'une particule	<b>50</b>
<b>Figure IV.3</b>	Organigramme de l'algorithme PSO	<b>52</b>
<b>Figure IV.4</b>	Caractéristique (I-V) sous ombrage et avec ombrage	<b>54</b>
<b>Figure IV.5</b>	Caractéristique (P-V) sous ombrage et avec ombrage	<b>55</b>
<b>Figure IV.6</b>	Caractéristique (P-V) sous ombrage partiel	<b>55</b>
<b>Figure IV.7</b>	ombrage partiel de courant PV 41W	<b>56</b>
<b>Figure IV.8</b>	ombrage partiel de tension PV 41W	<b>57</b>
<b>Figure IV.9</b>	ombrage partiel de courant PV 52W	<b>57</b>
<b>Figure IV.10</b>	ombrage partiel de puissance PV 21W	<b>58</b>

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<i>Chapitre I</i>		
<b>Tableau I.1</b>	type de panneaux solaire	<b>2</b>
<i>Chapitre II</i>		
<b>Tableau II.1</b>	Gain en tension des convertisseurs.	<b>22</b>
<i>Chapitre III</i>		
<b>Tableau III.1</b>	Résumé de l'algorithme P&O	<b>40</b>

**Résumé:** Le suivi du point de puissance maximale (MPPT, Maximum Power Point Tracking) est une technique essentielle pour maximiser la puissance de sortie d'un système photovoltaïque. Le MPPT est un algorithme ou un dispositif électronique utilisé pour ajuster en temps réel la tension et le courant de sortie du système afin de trouver le point de fonctionnement optimal des panneaux solaires. L'objectif du MPPT est de suivre les variations des conditions d'ensoleillement et de charger les panneaux solaires à leur point de puissance maximale, même si les conditions environnementales changent continuellement. Cela permet d'extraire la quantité maximale d'énergie solaire disponible à tout moment et d'optimiser le rendement du système photovoltaïque. En utilisant la technique du MPPT, les systèmes photovoltaïques peuvent augmenter considérablement leur efficacité énergétique et leur production d'électricité. Dans ce contexte, l'objectif de ce mémoire est l'étude et la maximisation de puissance d'un système photovoltaïque.

**Mots clés** Convertisseur DC/DC. MPPT, Générateur, photovoltaïque, P&O, INC, Optimisation par essaims particulaires (*PSO*).

**Abstract:** Maximum Power Point Tracking (MPPT) is a crucial technique for maximizing the power output of a photovoltaic system. MPPT is an algorithm or electronic device used to dynamically adjust the voltage and current output of the system to find the optimal operating point of the solar panels. The goal of MPPT is to track the variations in sunlight conditions and charge the solar panels at their maximum power point, even as environmental conditions continuously change. This allows for extracting the maximum amount of available solar energy at any given time and optimizing the efficiency of the photovoltaic system. By employing the MPPT technique, photovoltaic systems can significantly increase their energy efficiency and electricity generation. This not only maximizes the power output but also enhances the return on investment by reducing the payback period for the initial installation and operating costs. MPPT thus plays a crucial role in improving the overall efficiency of photovoltaic systems. In this context, the objective of this memory is the study and the maximization of power of a photovoltaic system.

**Keywords** DC/DC converter. MPPT, Generator, Photovoltaic, P&O, INC, Particle Swarm Optimization (PSO).

**ملخص:** يُعد MPPT خوارزمية أو جهاز إلكتروني يُستخدم لضبط الجهد والتيار الناتج من النظام بشكل ديناميكي للعثور على نقطة التشغيل الأمثل لوحدة الطاقة الشمسية. الهدف من MPPT هو تتبع نقطة الاستطاعة العظمى للطاقة الشمسية، حتى مع استمرار تغير الظروف البيئية. وهذا يسمح باستخلاص الحد الأقصى للطاقة الشمسية المتاحة في أي وقت وتحسين كفاءة النظام الشمسي. باستخدام تقنية MPPT، يمكن للأنظمة الشمسية أن تزيد بشكل كبير من كفاءتها الطاقية وإنتاج الكهرباء. وهذا لا يعمل فقط على تعظيم إخراج القدرة، بل يساهم أيضًا في زيادة عائد الاستثمار من خلال تقليل تكلفة الاسترداد وتكاليف التشغيل. بالتالي، في هذا السياق، الهدف من هذه الذاكرة هو نظام كهروضوئي.

**الكلمات المفتاحية:** المحول DC / DC ، MPPT ، المولد ، الكهروضوئية ، P&O ، INC ، تحسين سرب الجسيمات (PSO).

# *SOMMAIRE*



# Sommaire

Remerciement .....	I
Dédicace .....	II
Liste des symboles .....	IV
Liste des figures .....	VII
Liste des tableaux .....	X
Résumé .....	XI
Abstract .....	XI
ملخص.....	XII
Introduction générale : .....	1

## *CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes PV*

I.1.Introduction : .....	3
I.2.Energie solaire : .....	3
I.2.1.Les panneaux solaires : .....	4
I.2.2.Les type de panneaux solaire : .....	4
I.2.3.fonctionnement des panneaux solaires : .....	4
I.3.Rayonnement solaire : .....	4
I.3.1.Différents types de rayonnement solaire : .....	5
✓ Rayonnement direct : .....	5
✓ Rayonnement diffus : .....	5
✓ Rayonnement global : .....	5
✓ Rayonnement réfléchi : .....	5
I.3.3.spectre de rayonnement : .....	6
I.4.Photovoltaïque : .....	6
I.4.1.cellules photovoltaïques : .....	6
I.4.2.Type de cellules photovoltaïques : .....	7
✓ Cellules monocristallines : .....	7



✓ Cellules poly cristallines : .....	7
✓ Cellules amorphes : .....	7
I.4.3.Principe de fonctionnement : .....	7
I.5.Différents systèmes photovoltaïques : .....	8
✓ Systèmes autonomes : .....	8
✓ Systèmes raccordés au réseau : .....	8
✓ Systèmes hybrides : .....	8
I.6.Modélisation du générateur photovoltaïque : .....	8
I.7.Caractéristiques d'un système photovoltaïque : .....	11
I.7.1.Caractéristique courant-tension : .....	11
I.7.2.Caractéristique puissance - tension (P-V) : .....	11
I.7.3.courant de court-circuit ( <i>ISC</i> ) : .....	12
I.7.4.tension de circuit ouvert ( <i>V<sub>co</sub></i> ) : .....	12
I.7.5.point de puissance maximale (PPM) : .....	12
I.7.6.Rendement : .....	12
I.6.7.facteur de forme : .....	12
I.8.Différents branchements des panneaux PV : .....	13
I.8.1.branchements en série : .....	13
I.8.2.Association des cellules en parallèle : .....	14
I.8.3. Association mixte(en série et en parallèle) : .....	16
I.8.4.configuration de PV de réseau dans des conditions d'ombrage partiel : .....	16
✓ Configuration série : .....	16
I.9.1.les avantages : .....	17
I.9.2. Les inconvénients : .....	17
Conclusion .....	18

## *CHAPITRE II: dimensionnement de convertisseur Boost*

II.1. Introduction .....	19
II.2.Convertisseurs DC-DC .....	19
II. 3.Différents types d'hacheurs .....	19

II. 3.1.Hacheur survolteur (Boost) .....	20
II. 3.2. Hacheur série (Buck) .....	20
II. 3.2. Hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost) .....	21
II.4. Domaine d'utilisation des hacheurs .....	22
II.5. Gain en tension des convertisseurs .....	22
II. 6.Utilisation des hacheurs dans les systèmes PV .....	22
II.7.Principe de fonctionnement du hacheur boost (parallèle, élévateur) .....	23
II.7.1.Conduction continue .....	24
II.7.2.Conduction discontinue .....	31
II.7.3.Conduction critique .....	32
II.8.Dimensionnement et choix des composants L et C du hacheur Boost .....	32
II.8.1.Essais de mesures préliminaires des valeurs des composants .....	32
II.8.2. Dimensionnements des composants du hacheur Boost .....	33
II.9.Résultat et simulation .....	34
Conclusion .....	35

### *CHAPITRE III : la commande MPPT des systèmes PV sous irradiation Uniform*

III.1.Introduction .....	36
III.2. Commande MPPT .....	36
III.3. Principe de la recherche du point de puissance maximal .....	36
III. 4.Classification des Commandes MPPT .....	37
III. 4.1.MPPT indirecte .....	37
III. 4.2.MPPT Directe .....	37
III.5.Types d'algorithme de MPPT .....	38
III.5.1.Algorithmes Perturber et Observer (P&O) .....	38

❖ Avantages et inconvénients de P&O .....	41
a) Avantage .....	41
b) Inconvénients .....	41
III.5.2. Algorithmes de la conductance incrémentale (INC) .....	41
III.5.3. Algorithme "Hill Climbing" .....	43
III.6. Résultat et simulation .....	44
✓ Simulation de la conductance incrémentale (INC) .....	45
Conclusion.....	46

### *CHAPITRE IV : La commande MPPT des systèmes PV sous ombrage partiel*

IV.1. Introduction .....	47
IV.2. L'algorithme d'optimisation par essaims particulaires (PSO) .....	47
IV.3. Principe de l'Algorithme PSO .....	48
IV.4. Utilisation de la PSO pour le MPPT .....	49
IV.5. Avantages et inconvénients de PSO.....	52
✓ Avantages.....	52
✓ Inconvénients.....	52
IV.6. Ombrage partiel avec la commande PSO.....	52
IV.7. Résultat et simulation .....	53
✓ Configuration de PSO dans des conditions d'ombrage partiel .....	53
✓ Simulation de différent type de la commande MPPT .....	55
Conclusion.....	57
Conclusion général .....	58
Référence bibliographique .....	60

# *Introduction générale*



## ***Introduction générale :***

L'énergie renouvelable est devenue de plus en plus importante de nos jours, en raison de son impact positif sur l'environnement et de sa durabilité à long terme, par rapport à l'énergie fossile. Contrairement aux sources d'énergie fossile telles que le pétrole, le charbon et le gaz naturel, les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et géothermique sont naturellement reconstituées et ne contribuent pas aux émissions de gaz à effet de serre responsables du changement climatique [1].

L'énergie photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui utilise la lumière du soleil pour produire de l'électricité. Elle repose sur l'utilisation de panneaux solaires composés de cellules photovoltaïques capables de convertir directement l'énergie solaire en électricité. L'énergie photovoltaïque présente de nombreux avantages significatifs. Elle est propre et respectueuse de l'environnement. Contrairement aux combustibles fossiles, l'énergie photovoltaïque ne produit pas de gaz à effet de serre, ce qui contribue à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et à l'atténuation du changement climatique. Elle ne génère pas non plus de polluants atmosphériques ou de déchets toxiques, ce qui en fait une source d'énergie propre et durable [2].

Un simple système photovoltaïque peut être composé d'un panneau solaire et un convertisseur Dc-Dc contrôlé par un dispositif de suivi du point de puissance maximale (MPPT) et une charge. Le panneau solaire, équipé de cellules photovoltaïques, est responsable de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Le dispositif MPPT surveille en permanence la tension et le courant du panneau solaire pour déterminer le point de puissance maximale, c'est-à-dire le point de fonctionnement où la production d'électricité est optimale.

Il existe plusieurs techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour optimiser l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité. Voici quelques-unes des techniques MPPT les plus couramment utilisées

- Perturbation et observation (P&O) : C'est l'une des méthodes les plus simples et les plus largement utilisées. Elle consiste à mesurer la tension et le courant du panneau solaire, puis à augmenter ou diminuer progressivement la tension jusqu'à atteindre le point de puissance maximale. Cependant, cette méthode peut être sensible aux changements rapides des conditions d'ensoleillement.

- Suivi du courant de sortie (INC) : Cette technique consiste à mesurer le courant de sortie du panneau solaire et à ajuster la tension de manière à maintenir le courant de sortie constant. Cela permet de suivre automatiquement le point de puissance maximale, même en présence de variations des conditions d'ensoleillement.
- Suivi de la tension de sortie (VOC) : Cette méthode consiste à mesurer la tension de sortie du panneau solaire et à ajuster le courant de charge pour maintenir la tension de sortie à un niveau optimal. Cela permet de maximiser la production d'électricité en maintenant la tension du panneau solaire à son point de puissance maximale.

Ces différentes techniques MPPT ont leurs avantages et leurs limitations, et le choix de la méthode dépend des caractéristiques spécifiques du système photovoltaïque et des conditions d'exploitation. L'objectif commun de toutes ces techniques est d'optimiser la production d'électricité en maintenant le panneau solaire à son point de puissance maximale, ce qui permet d'exploiter au mieux l'énergie solaire disponible.

Le mémoire présenté est organisé en quatre chapitres principaux résumés dans ce qui suit:

Dans le premier chapitre, on va faire une description générale sur le photovoltaïque. Leur principe de fonctionnement et la modélisation et Les différentes caractéristiques d'un système. Et la simulation du système photovoltaïque dans des conditions normales et en présence d'ombrage partiel, A la fin de ce chapitre, on mettra en valeur les avantages et les inconvénients de ce système.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude les différents types de convertisseurs DC-DC, qui sont représentés dans hacheur BOOST, hacheur BUCK et hacheur BUCKBOOST et étudiés spécifiquement hacheur BOOST et leur modèle mathématique et focalise sur le dimensionnement des composants en validant l'étude par simulation

Au troisième chapitre, nous avons étudié la méthode d'optimisation dans les systèmes photovoltaïques qui est la poursuite du point d'énergie maximale et étudier les différentes techniques de poursuite de la puissance maximale PPM traditionnelles , qui est Perturbation & Observation (P&O) , l'Incrément de Conductance (INC) et Hill climbing et leur simulation Nous terminons notre mémoire en étudiant une méthode qui s'appelle optimisation par essaim particulaire (PSO) dont nous allons discuté en mentionnant sa définition et son principe de fonction, et leurs résultats et simulations.

# *Chapitre I*

## *Généralité sur les système PV*



**I.1.Introduction :**

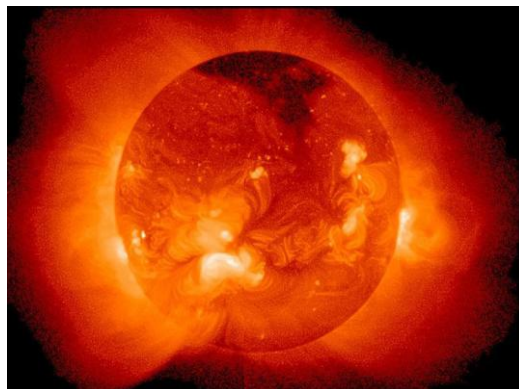
L'énergie photovoltaïque est une possibilité de développement efficace et durable. C'est pour cela que les recherches scientifiques se développent dans le sens de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes solaires. L'optimisation des systèmes solaires est basée sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement [3].

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable produite par le rayonnement du soleil.

- Découverte en 1839 par le physicien français Becquerel
- En 1954, trois chercheurs américains (Charpin, Pearson et Price) des laboratoires BELL mirent au point la première cellule photovoltaïque au silicium avec un rendement de 4% [4].

**I.2.Energie solaire :**

Le soleil est une étoile, Il est composé 74% d'hydrogène et 25% d'hélium. Sa température de cœur peut atteindre 107 K la terre décrit autour du soleil dans un plan Dit "plan de l'écliptique", la terre tourne sur elle L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers essentiellement sous forme d'un rayonnement électromagnétique de photons et de rayonnement infrarouge. Apprécier la distance de la terre au soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h, les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir [5].



**Figure (I.1) :** Image du soleil



**I.2.1.Les panneaux solaires :**

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules Photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules en série ou en Parallèle afin d'obtenir une tension souhaitée [6].

**I.2.2.Les type de panneaux solaire :**

<b>1 - LES PANNEAUX THERMIQUES (ou capteurs solaires)</b>	<b>2 - LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES</b>	<b>3 - LES PANNEAUX THERMODYNAMIQUES</b>
Transforment l'énergie solaire en énergie thermique (chaleur)  <b>SOLAIRE → CHALEUR</b>	Transforment l'énergie solaire en énergie électrique via l'effet photoélectrique  <b>SOLAIRE → ELECTRIQUE</b>	Transforment l'énergie solaire en énergie électrique via la production de vapeur qui fera ensuite tourner des turbines  <b>SOLAIRE → ELECTRIQUE</b>

**Tableaux(I.1) :** type de panneaux solaire

**I.2.3.fonctionnement des panneaux solaires :**

Les panneaux solaires sont constitués des cellules photovoltaïques, ces cellules sont des composants électroniques capables de produire l'électricité a partie des rayonnements solaires grâce à l'effet photo. Cet effet est basé sur le comportement des matériaux semi-conducteur quand ils reçoivent des rayons solaires, des que photons rentre en contact avec les matériaux, il transmette leur énergie en électron de semi-conducteur qui génère un courant électrique (voir Figure I.2) [3].



**Figure (I.2) :** principe de fonctionnement des panneaux

**I.3.Rayonnement solaire :**

Le rayonnement solaire est la lumière qui provient du soleil sous forme d'onde Électromagnétique. Il est constitué de photons d'énergie :

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

Avec :

$\lambda$ : Longueur d'onde

$h$ : Constante de Planck

$c$ : Célérité de la lumière [7].

### I.3.1. Différents types de rayonnement solaire :

✓ **Rayonnement direct :**

Rayonnement direct est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus [8].

✓ **Rayonnement diffus :**

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire rencontre des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc. Ces obstacles ont pour effet de repartir un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions [9].

✓ **Rayonnement global :**

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et réfléti par le sol). Dans la figure ci-dessous est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre [8]

✓ **Rayonnement réfléchi :**

C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante par exemple : la neige ; cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée. Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure suivante [9] :

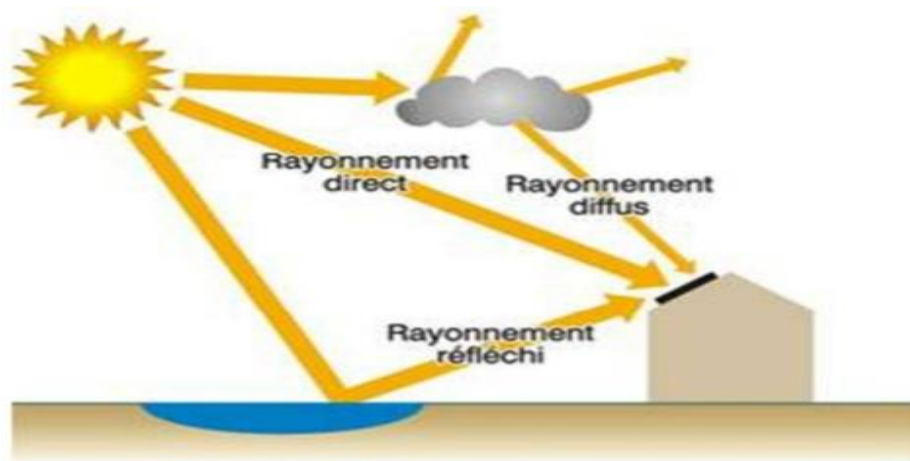


Figure (I.3): rayonnement solaire

### I.3.3. spectre de rayonnement :

L'énergie lumineuse extraterrestre ne nous parvient pas intégralement car elle subit des transformations en traversant l'atmosphère terrestre. En effet, son intensité lumineuse ainsi que son spectre dépend de la composition de l'atmosphère non seulement en particules et en gaz mais aussi des nuages [10]

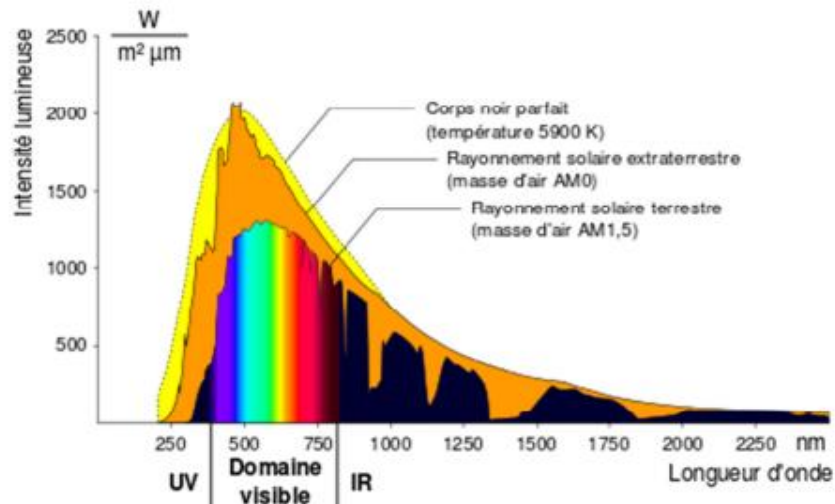


Figure (I.4) : Spectre de rayonnement solaire

### I.4. Photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec, « photos » signifie lumière et « volta » nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt. En 1905, Einstein découvrit que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.

**Photos** : Lumière.

**Volt** : Unité de tension électrique, du nom Alessandro volta [11].

#### I.4.1. cellules photovoltaïques :

La cellule est un petit générateur de courant continu et est le principal élément de conversion photovoltaïque où ses composants sont des matériaux semi-conducteurs du type PN qui convertissent l'énergie photonique en énergie électrique sous l'effet des photons de lumière

### I.4.2. Type de cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de Cellule a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [12]

✓ **Cellules monocristallines :**

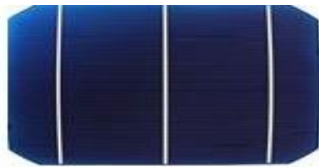
Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée [12].

✓ **Cellules poly cristallines :**

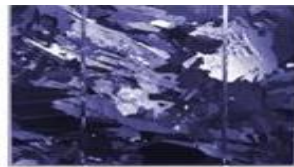
Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Il a un coût de production moins élevé. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium polycristallin s'étend de 11 – 13 % (autour de 18 % en laboratoire) [13]

✓ **Cellules amorphes :**

Les panneaux « étalés » sont réalisés avec du silicium amorphe au fort pouvoir énergisant et présentés en bandes souples [14]



Cellule monocristalline



cellule poly-cristallines



cellule amorphe

**Figure (I.5) :** Types de cellules solaires

### I.4.3. Principe de fonctionnement :

La cellule photovoltaïque est un capteur composé de deux couches fines de semi-conducteurs, ces deux couches différentes couches de stéroïdes :

- Pour la couche N, entrée d'électrons périphériques
- Pour la couche P, déficit en électrons

Ces deux couches ont donc un potentiel différent. Photon Energy

La lumière captée par les électrons terminaux (couche N) leur permet de franchir la barrière et la génération d'un courant électrique direct. Pour recueillir ces électrons sont déposées en imprimant l'écran sur les couches de semi-conducteurs [12]

### I.5. Différents systèmes photovoltaïques :

Les systèmes PV sont classés en fonction de trois types : autonomes, hybrides et reliés réseau. Le type choisit dépendra des besoins, de l'emplacement et de budget [15]

✓ **Systèmes autonomes :**

Un système photovoltaïque autonome est un système non connecté au réseau électrique. Il est souvent utilisé dans les sites isolés où l'accès au réseau est difficile ou impossible. Ce type d'installation photovoltaïque nécessite l'utilisation d'une batterie de stockage pour assurer la fourniture d'électricité pendant la nuit ou bien lors d'un faible éclairage [16]

✓ **Systèmes raccordés au réseau :**

Un système photovoltaïque raccordé au réseau est qui constitue l'objet de notre étude. Aujourd'hui, les réseaux électriques sont de plus en plus décentralisés avec l'avènement de nouveaux moyens de production d'énergie comme le photovoltaïque. Ces genres de systèmes sont branchés en parallèle au réseau et dont l'énergie produite par les modules photovoltaïques est injectée au réseau électrique

- Par ailleurs, la combinaison des deux systèmes est une solution applicable et est connus sous le nom de système photovoltaïque hybride [16].

✓ **Systèmes hybrides :**

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires. En pratique, les modules de systèmes PV sont souvent alliés à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie. Ils conviennent mieux lorsque la demande d'énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout au long de l'année), lorsque l'énergie doit être fournie sur demande ou si le budget est limité [15].

### I.6. Modélisation du générateur photovoltaïque :

Les cellules solaires sont généralement modélisées avec des schémas équivalents à un-deux Diode Il est difficile de modéliser le courant de court-circuit affecté par l'éclairage comme Effet photovoltaïque source et diode, tandis que résistances en série et cavité Parallèle représente la perte du modèle [17].

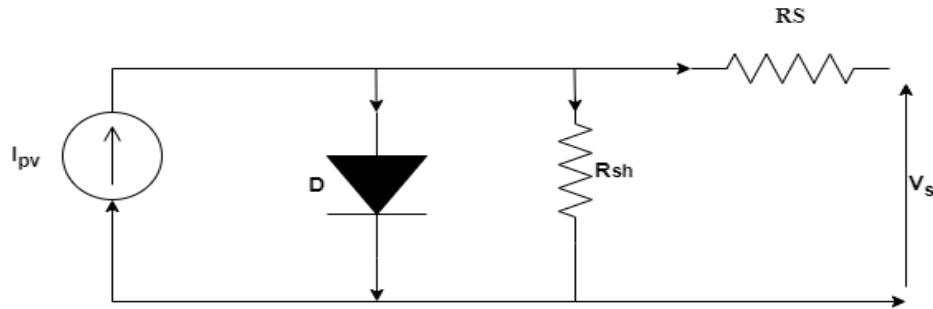


Figure (I.6) : Circuit de cellule PV équivalent

La résistance  $R_s$  représente les dévers résistances de contact et de connexion,  $R_{sh}$

Caractérise les courants de fuite

D'après la loi du nœud :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{I.2}$$

Où

$I$  : Courant de la cellule [A]

$I_{ph}$  : Le Photo-courant [A]

$I_{sh}$  : Le courant traversant la résistance shunt [A]

Avec :

$$I_d = I_{rs} [e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1] \tag{I.3}$$

$$V = V_d - R_s I \tag{I.4}$$

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \tag{I.5}$$

Ce qui donne :

$$I = I_{ph} - I_{rs} [e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \tag{I.6}$$

$$V_d = \frac{nkT}{q}$$

$I_{rs}$  : Courant de saturation de la diode [A]

$V_d$  : Tension aux bornes de la diode [V]

$V_t$  : Potentiel thermique [V], donné par :

$$V_t = \frac{nkT}{q} \tag{I.7}$$

$q$  : Charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19} C$ )

$k$  : Constante de Boltzmann ( $1.38 e^{-23} j / k$ )

$T$  : Température de la cellule [K]

$n$  : Facteur d'idéalité de la diode

Le photo-courant, généré par la cellule, peut être exprimé en fonction de l'ensoleillement avec l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i(T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \tag{I.8}$$

$G$  : L'irradiation

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

$T_{ref}$  : La température référence (25°C=298K)

$k_i$  : Le courant de court-circuit de la cellule [A].

Constante représentant la variation du courant avec la température [A/K]

Les modules PV sont généralement connectés en série et en parallèle pour augmenter La tension et l'ampérage à la sortie du générateur. Ceux-ci sont interdépendants forment une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec Equipement électrique commun [18].

L'expression du courant total peut être exprimée comme suit :

$$I_{pv} = N_p \cdot \left[ I_{ph} - I_{rs} \left( e^{\left( \frac{V_{pv} + R_s \frac{I_{pv}}{N_p}}{nV_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \frac{I_{pv}}{N_p}}{R_{sh}} \right] \tag{I.9}$$

Où

$I_{pv}$  : Courant du GPV [A] ;

$V_{pv}$  : Tension du GPV [V]

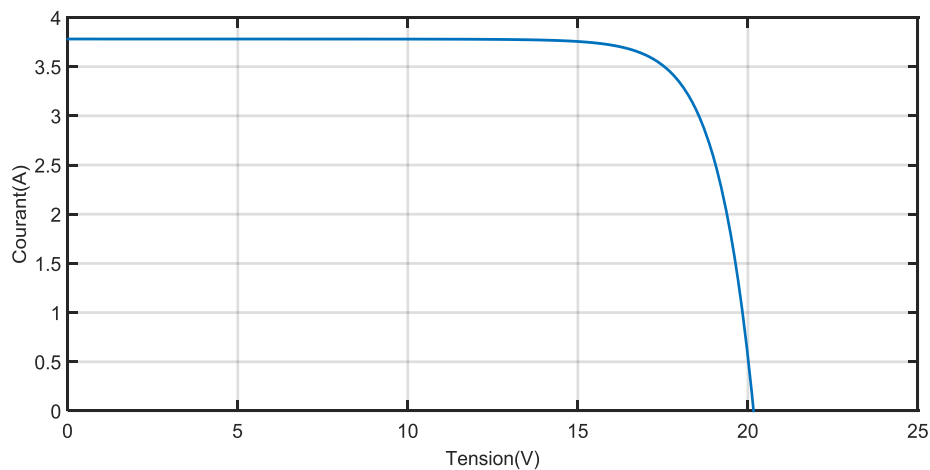
$N_s$  : Nombre de cellules connectées en série par module

$N_p$  : Nombre de modules connectés en parallèle.

## I.7.Caractéristiques d'un système photovoltaïque :

### I.7.1.Caractéristique courant-tension :

La figure ci-dessous représente la caractéristique photovoltaïque dans les conditions constantes d'irradiation et de température (1000W/m<sup>2</sup> et 25 c°).



**Figure (I.7) :** Caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque .

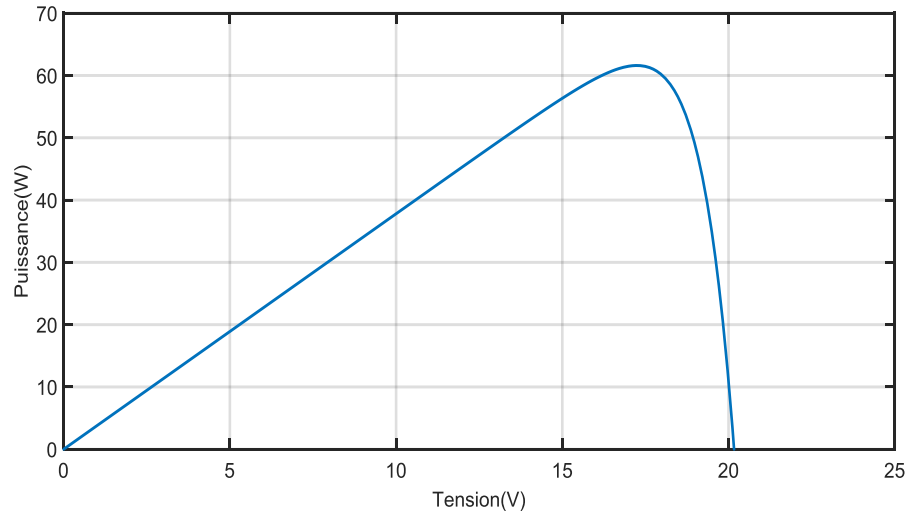
### I.7.2.Caractéristique puissance - tension (P-V) :

La figure ci-dessous représente la caractéristique photovoltaïque dans les conditions constantes d'irradiation et de température (1000W/m<sup>2</sup> et 25 c°).

La puissance délivrée par la cellule a pour expression :

$$P_{PV} = V_{PV} \times I_{PV} \quad (\text{I.10})$$





**Figure (I.8) :** Caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque.

### I.7.3.courant de court-circuit ( $I_{SC}$ ) :

C'est le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. En pratique ce courant est très proche du courant photovoltaïque  $I_{PH}$ [19]

### I.7.4.tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ) :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [20]

$$V_{CO} = Vt \cdot \log \left( \frac{I_{PH}}{I_S} + 1 \right) \quad (\text{I.11})$$

### I.7.5.point de puissance maximale (PPM) :

C'est le point où le générateur travaille en rendement maximal et produit une puissance de sortie maximale [19]

### I.7.6.Rendement :

Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente [21]

$$\eta = FF \times \frac{V_{CO} I_{SC}}{S \times E_s} = \frac{P_e}{S \times E_s} \quad (\text{I.12})$$

### I.6.7.facteur de forme :

Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule [11].

$$FF = \frac{P_{PPM}}{V_{CO} \times I_{SC}} \quad (\text{I.13})$$

## I.8. Différents branchements des panneaux PV :

### I.8.1. branchements en série :

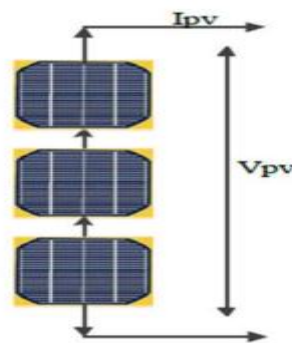
Une association de ( $N_s$ ) cellule en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électrique d'une association série de ( $N_s$ ) cellules [22]

$$V_{SCO} N_s = N_s \times V_{CO} \quad (\text{I.14})$$

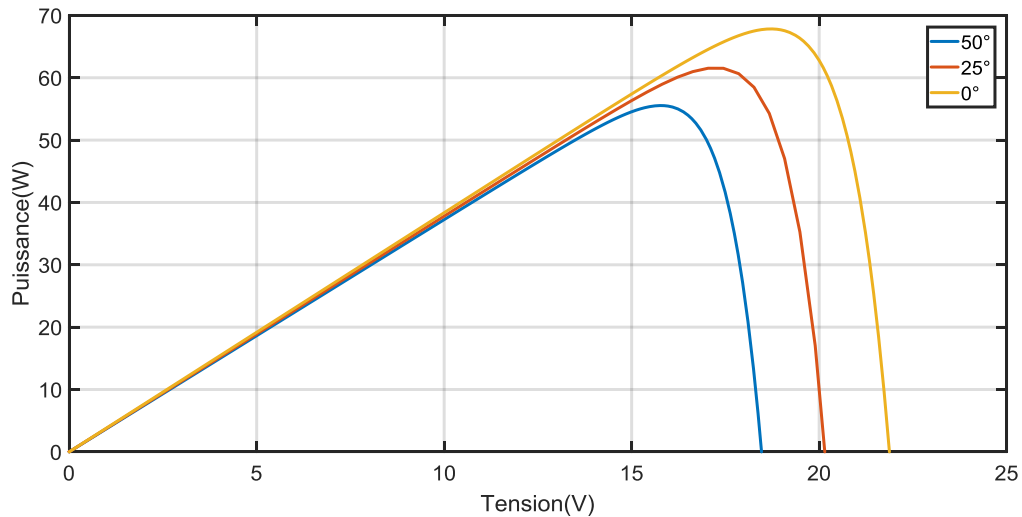
$$I_{SC} = I \quad (\text{I.15})$$

$V_{CO} N_s$  : La somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.

$I_{SC} N_s$  : Courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série

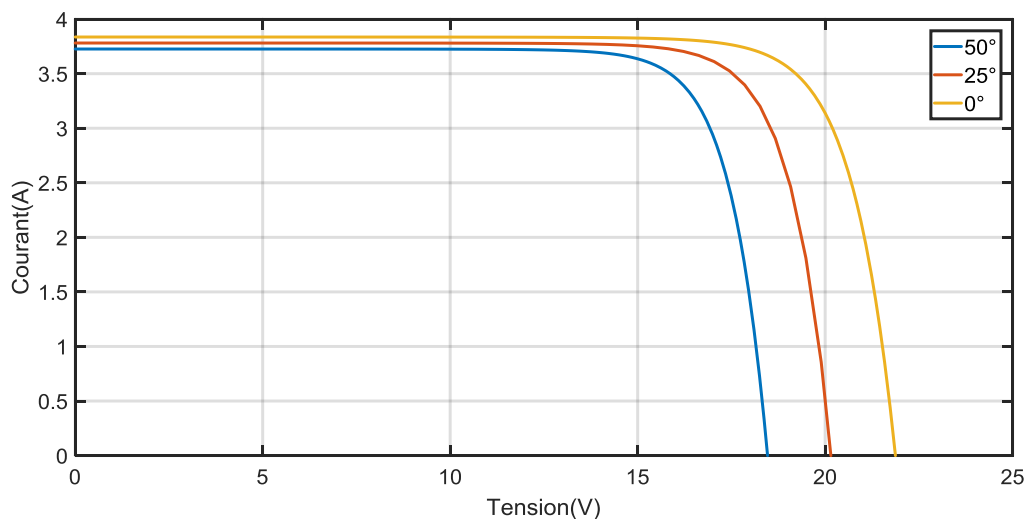


**Figure (I.9) :** Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série



**Figure (I.10) :** Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en série

D'après la figure (I.10) on remarque l'augmentation de la température entraîne une diminution de la puissance maximale.

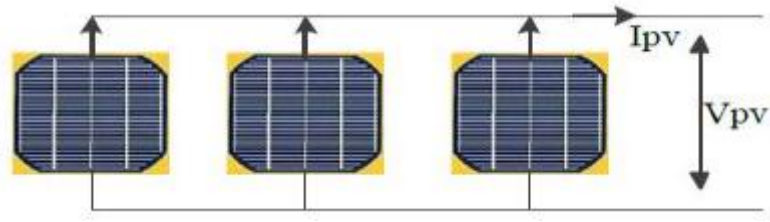


**Figure (I.11) :** Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en série

D'après la figure (I.11) on remarque la tension à vide d'un panneau PV diminue avec l'augmentation de la température et le courant de court-circuit est faiblement dépendant de la température.

### I.8.2. Association des cellules en parallèle :

En additionnant des cellules (modules) identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule (module) et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en parallèle dans la branche [23]



**Figure (I.12) :** Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle

Les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants

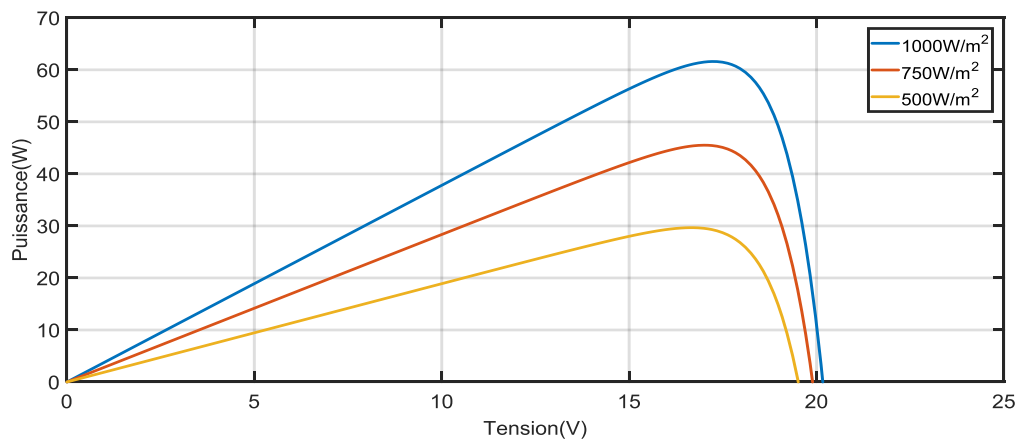
Avec :

$$I_{PSC} = I_{SC} N_p \tag{I.16}$$

$$V_{PCO} = V_{CO} n_s \tag{I.17}$$

$I_{PSC} = I_{SC} N_p$ : Le courant de court circuit de  $N_p$  cellule en parallèle.

$V_{PCO} = V_{CO}$  : La Tension du circuit ouvert de  $N_p$  cellules en parallèle.



**Figure (I.13) :** Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle

D'après la figure (I.13) en remarque que la variation de l'irradiation solaire(G) influe sur la puissance, plus l'irradiation augmente plus la puissance augmente

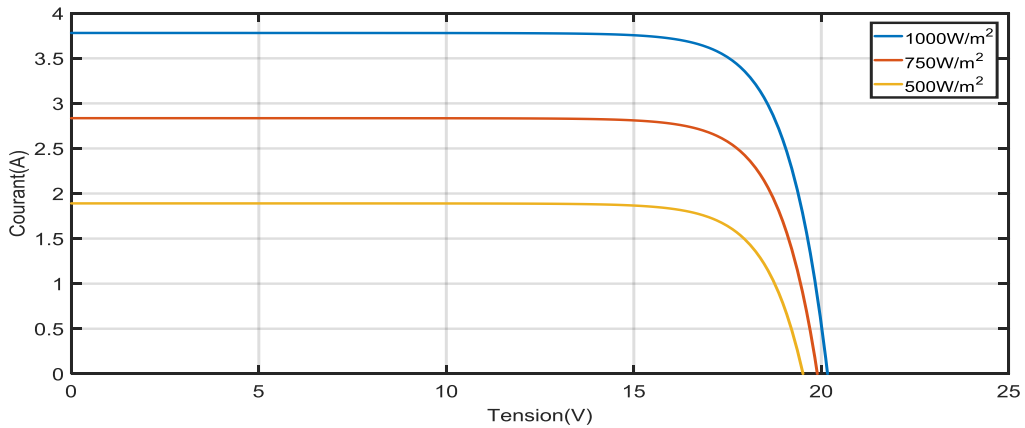


Figure (I.14) : Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en parallèle

D'après la figure (I.14) en remarque une diminution du courant de court-circuit et une diminution de la tension du circuit ouvert avec la diminution de l'irradiation solaire(G)

**I.8.3. Association mixte(en série et en parallèle) :**

La caractéristique globale courant/tension d'un générateur photovoltaïque se déduit théoriquement de la combinaison  $N_s, N_p$  Cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par le rapport  $n$  parallèlement à l'axe des tensions et du rapport  $N_p$  parallèlement à l'axe des courants [24].

**I.8.4.configuration de PV de réseau dans des conditions d'ombrage partiel :**

✓ **Configuration série :**

Les figures (I.15) et (I.16) montrent la variation de l'irradiation pour ( $G=800 \text{ W/m}^2$

$G=600 \text{ W/m}^2, G=400 \text{ W/m}^2, G=200 \text{ W/m}^2$ ) et une température constante  $T=25c^\circ$

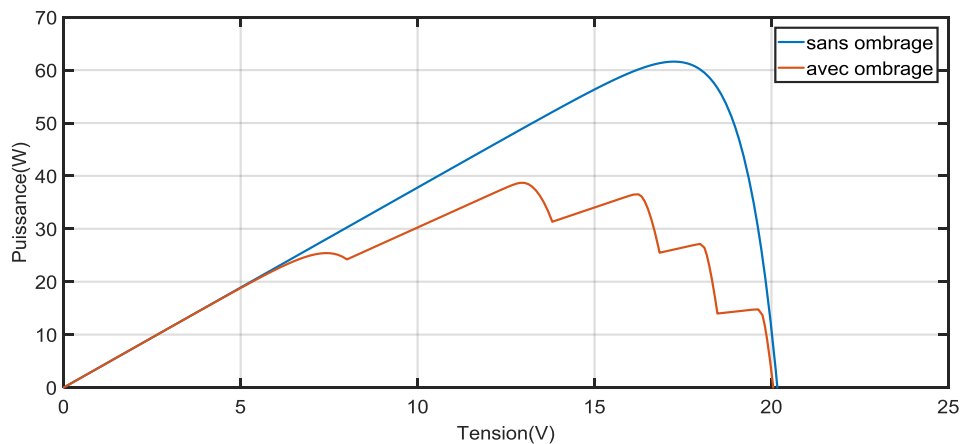
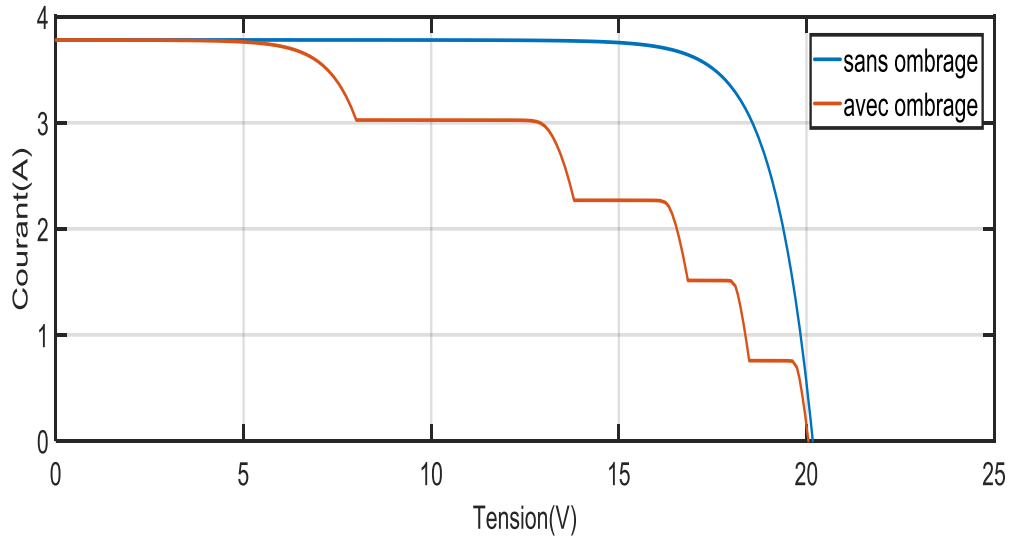


Figure (I.15) : Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en série



**Figure (I.16) :** Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en série

Les figures illustrent les caractéristiques I-V et P-V sans ombrage et avec ombrage pour une configuration série respectivement

Nous remarquons que chaque fois que l'irradiation solaire change, la valeur de la puissance et le courant diminuent.

### **I.9. Les avantages et les inconvénients :**

#### **I.9.1. les avantages :**

- Gratuité de cette ressource et énormité de son potentiel réparti sur le globe terrestre [25]
- Peu d'entretien [25]
- Son carburant est gratuit [19].
- L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants [19].
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une Grande ville [21].
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur [21].

#### **I.9.2. Les inconvénients :**

- Source diffuse du rayonnement solaire qui nécessite de grandes surfaces [25]
- Technologie coûteuse [25]

- Facteur de charge faible [25]
- Le rendement électrique diminue avec le temps [21].
- Pollution à la fabrication [21]
- Tributaire des conditions météorologiques [6].
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru [6].

### **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons fourni une description générale de l'énergie photovoltaïque, ou nous avons passé revue la cellule photovoltaïque et son fonctionnement, car elle est la base de la conversion de l'énergie solaire en électricité, puis nous discutons des types de cellules. En plus de l'influence paramètres sur les systèmes PV. Nous avons terminé ce chapitre énumérant les avantages et les inconvénients de cette énergie

# *Chapitre II*

## *Dimensionnement de convertisseur Boost*





## II.1. Introduction :

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Dans les systèmes photovoltaïques les convertisseurs DC-DC permettent de poursuivre le point de fonctionnement optimum.

Dans ce chapitre nous allons voir le principe de fonctionnement des convertisseurs DC-DC pour transformer une puissance continue d'entrée pour une puissance continue de sortie [26].

## II.2. Convertisseurs DC-DC :

Un Convertisseur DC-DC est un dispositif électrique qui permet de transformer une tension continue de valeur fixe en une tension continue réglable (Figure II.1). Il est constitué d'un interrupteur qui peut être un transistor (pour des faibles puissances) ou un thyristor (pour grande puissance).

Un hacheur est un abaisseur de tension lorsque l'interrupteur est placé en série avec la charge. Il est élévateur de tension lorsque l'interrupteur est placé en parallèle avec la charge [27].

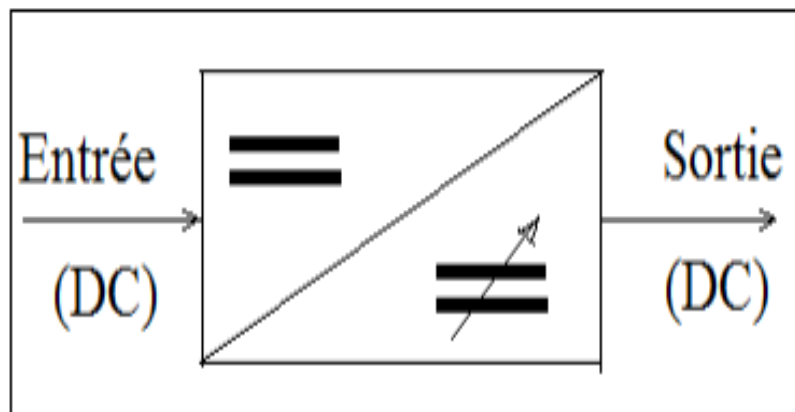


Figure (II. 1) : Schéma de principe d'un hacheur.

## II. 3. Différents types d'hacheurs :

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC- DC qui regroupent des convertisseurs à isolement galvanique entre l'entrée et la sortie et des convertisseurs qui présentent une borne commune entre l'entrée et la sortie [27].

Dans les convertisseurs à stockage d'énergie, trois types des convertisseurs statiques sont distingués :

- Hacheur abaisseur « Buck converter »
- Hacheur élévateur « Boost converter »
- Hacheur abaisseur élévateur « Buck-Boost converter »

### II. 3.1. Hacheur survolteur (Boost) :

Un convertisseur Boost (ou Step-Up en anglais), ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. On utilise un convertisseur Boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. Son schéma de principe de base est celui de la figure (II.2) [28].

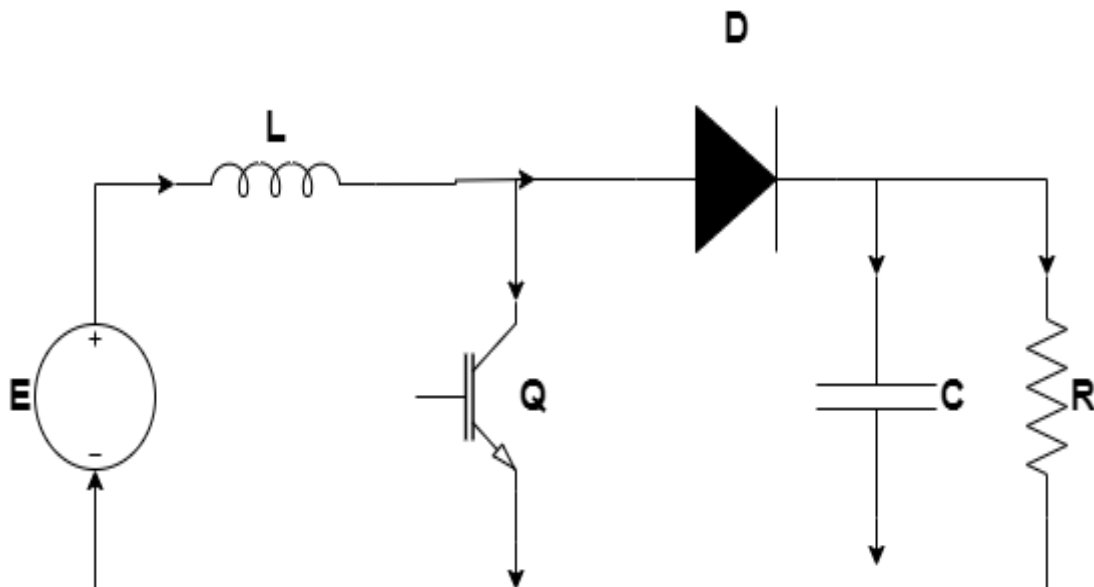
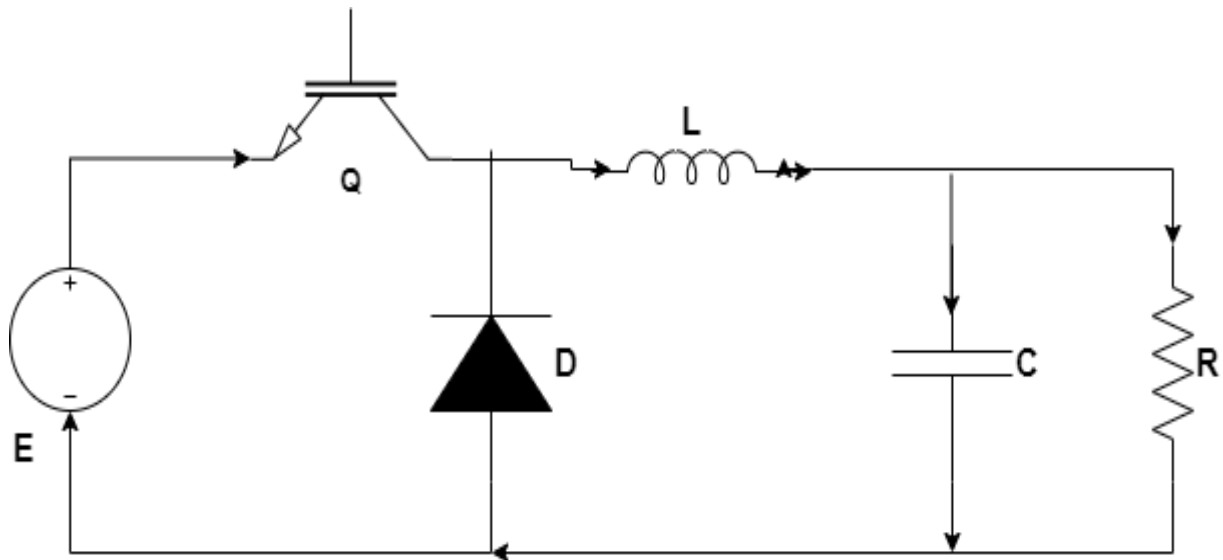


Figure (II.2) : Convertisseur survolteur

### II. 3.2. Hacheur série (Buck) :

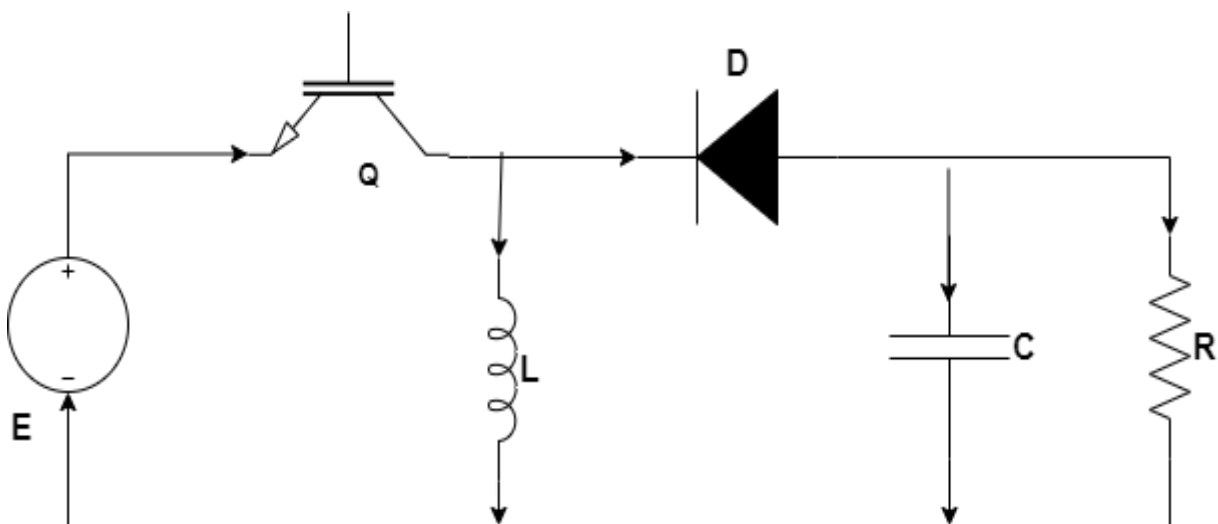
Le hacheur série, hacheur abaisseur ou bien dévolteur est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant [27].



Figure(II.3) : Convertisseur dévolteur

### II. 3.2. Hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost)

Le hacheur abaisseur-élevateur est aussi appelé dévolteur-survolteur ou de type Buck-Boost. Le hacheur abaisseur-élevateur est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents [27].



Figure(II.4). Convertisseur dévolteur-survolteur

**II.4. Domaine d'utilisation des hacheurs :**

Un des gros domaines d'utilisation des hacheurs est la variation de vitesse du moteur à courant continu (MCC), Ils équipent par exemple la majorité des engins de moyenne traction, tels que ceux utilisés pour le métro. La première génération de TGV (TGV Sud Est) est équipée d'ensembles hacheurs-moteurs à courant continu.

On trouve aussi des hacheurs dans tous les équipements destinés à l'utilisation de l'énergie solaire [28].

**II.5. Gain en tension des convertisseurs :**

Le tableau II.1 représente les gains en tension des différents convertisseurs continu-continu [27].

	Boost	buck	buck-boost
Gain en tension	$\frac{1}{\alpha - 1}$	$\alpha$	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$
Courant de source	Continu	discontinu	discontinu

**Tableau(II.1) :** Gain en tension des convertisseurs.

**II. 6.Utilisation des hacheurs dans les systèmes PV**

La topologie boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur boost pour augmenter la tension de sortie au niveau de service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telle que le buck-boost, le cuk, et le sepic [27].

## II.7.Principe de fonctionnement du hacheur boost (parallèle, élévateur) :

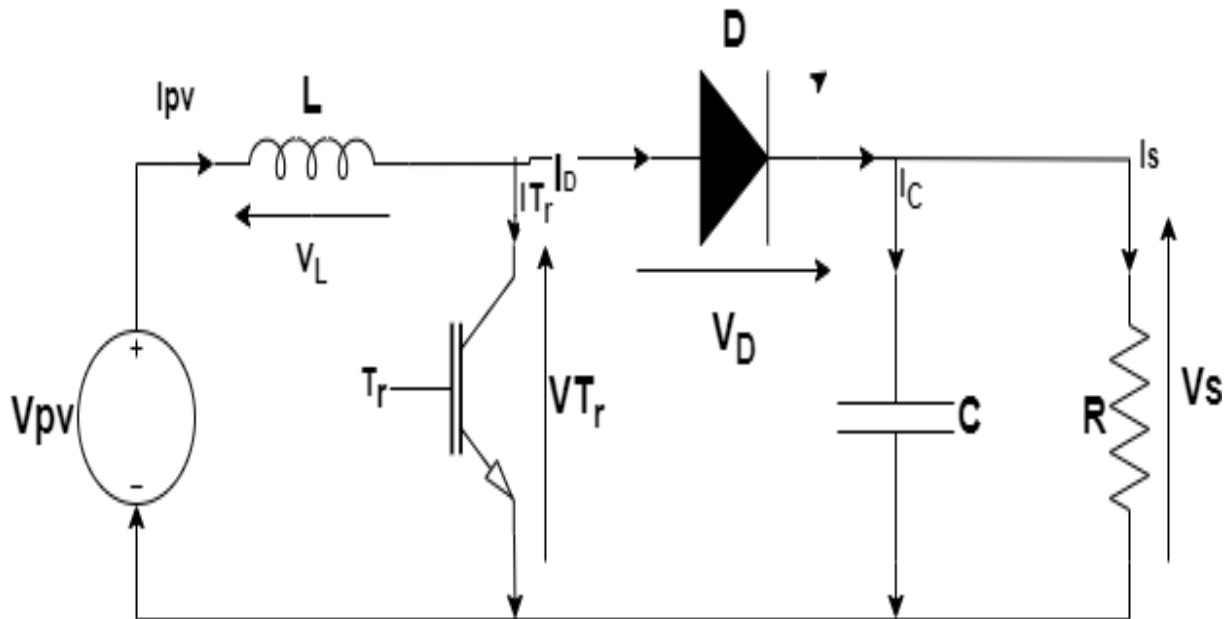


Figure (II.5) : schéma de principe du hacheur boost

Une inductance  $L$  est placée en série entre la tension continue d'entrée  $V_e$  (fournie par une batterie ou une pile) et un transistor  $Q$  fonctionnant en commutation. Lorsque  $Q$  est passant, le courant  $I_L$  augmente linéairement et une énergie  $E$  est stockée dans  $L$ . La diode  $D$  est bloquée. Puis, au blocage du transistor, l'inductance se décharge linéairement dans le condensateur et la charge  $R$  (supposée résistive) à travers la diode. Cette décharge n'est possible que si  $V_s > V_e$  [27].

Selon l'état de l'interrupteur, on peut distinguer deux phases de fonctionnement :

- **La phase active** : lorsque l'interrupteur  $Q$  est fermé et la diode  $D$  est ouverte. Durant cette séquence, le courant traversant l'inductance  $L$  va augmenter linéairement et une énergie est stockée dans  $L$ . Le condensateur  $C$  fournit une énergie à la charge  $R$ .
- **La phase de roue libre** : lorsque l'interrupteur  $Q$  est ouvert, la diode  $D$  est fermée.

Durant cette séquence, l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L$  est restituée au condensateur et à la charge  $R$ . Lors de cette phase, le fait que l'inductance  $L$  soit en série avec la source de tension d'entrée permet d'obtenir un montage boost (survolteur). La figure (II.6) présente l'allure du signal de commande appliqué à l'interrupteur  $Q$ . C'est un signal rectangulaire de fréquence  $f$  dont la durée est à l'état haut (durée de conduction de l'interrupteur  $Q$ , notée  $T_{ON}$ ) est ajustée par le paramètre  $\alpha$ . Ce paramètre, appelé rapport

cyclique, est défini comme étant le rapport entre la durée de conduction de l'interrupteur Q et la période de découpage T de celui-ci :

$$\alpha = \frac{T_{ON}}{T} \tag{II.1}$$

Et On a :

$$T = T_{ON} + T_{OFF} \tag{II.2}$$

Où  $T_{OFF}$  correspond à la durée de blocage de l'interrupteur Q.

La durée de conduction T est comprise entre 0 et 1 donc, le rapport cyclique est compris entre 0 et 1. On peut exprimer la durée de conduction et de blocage de l'interrupteur Q en fonction de  $\alpha$  et T :

✓ Durée de conduction :

$$T_{ON} = \alpha T \tag{II.3}$$

✓ Durée de blocage :

$$T_{OFF} = (1 - \alpha) T \tag{II.4}$$

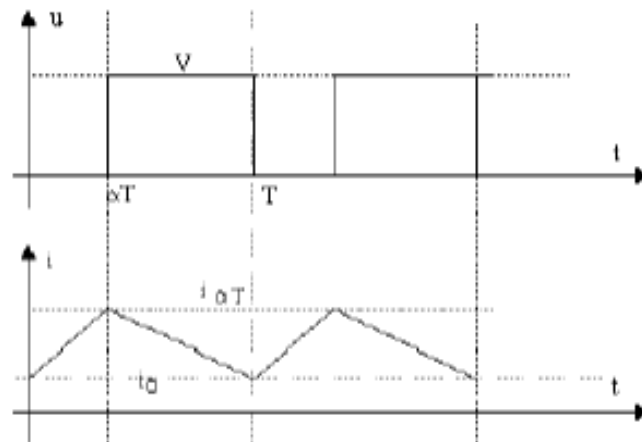


Figure (II.6) : Allure du signal de commande appliqué à l'interrupteur Q.

Donc nous pouvons calculer le rapport cyclique comme suit :

$$\alpha = \frac{T_{ON}}{T} = \left( \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \right) \tag{II.5}$$

### II.7.1. Conduction continue

a) **Phase active** : Pour  $0 < t < \alpha t$

À l'instant  $t = 0$ , on ferme l'interrupteur  $T_r$  pendant une durée  $\alpha T$ . La tension aux bornes de la diode est égale à  $V_D = V_{Tr} - V$ . Comme l'interrupteur  $T_r$  est fermé, on a  $V_{Tr} = 0$ , ce qui implique  $V_D = -V_s$ . La diode est donc bloquée puisque  $V_s > 0$ . Dans ces conditions, on obtient alors le schéma équivalent de la figure ci-dessous.

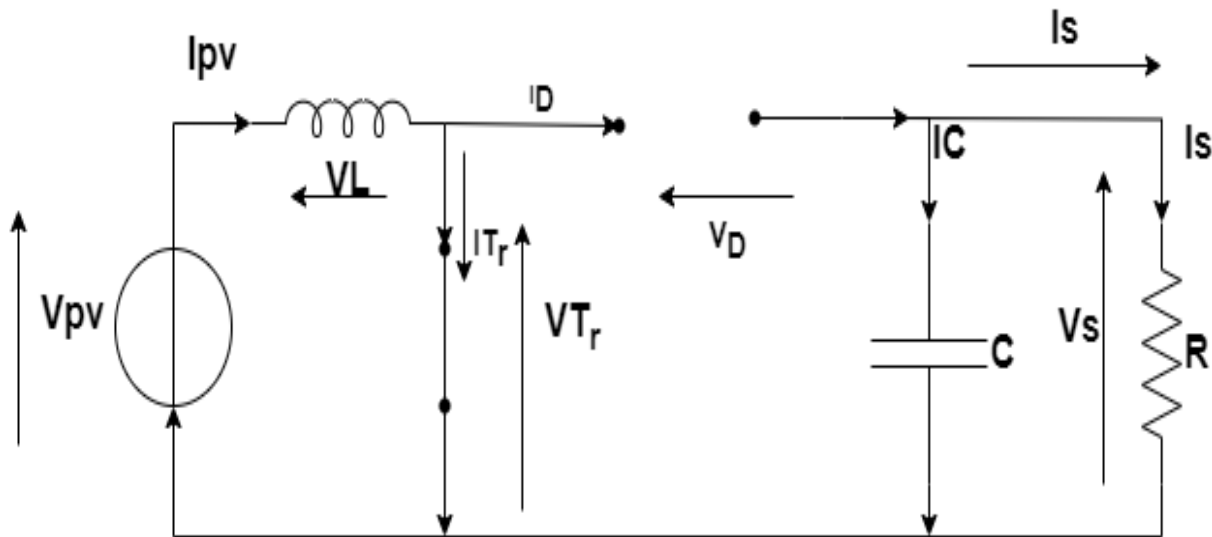


Figure (II.7) : Schéma équivalent du hacheur Boost durant la phase active

La tension aux bornes de l'inductance est alors :

$$V_L = V_{pv} = L \frac{di}{dt} \tag{II.6}$$

En résolvant cette équation différentielle, on obtient l'expression suivante qui exprime

$$I_s = I_{pv} (1 - \alpha)$$

L'évolution du courant traversant l'inductance :

$$i_L = \frac{V_{pv}}{L} t + I_{Lmin} \tag{II.7}$$

**b) Phase de roue libre :  $\alpha T < t < T$**

À l'instant  $t = \alpha T$  on ouvre l'interrupteur  $T_r$  pendant une durée  $(1 - \alpha)T$ . Pour assurer la continuité du courant, la diode D entre en conduction. On obtient alors le schéma équivalent de la figure ci-dessous :

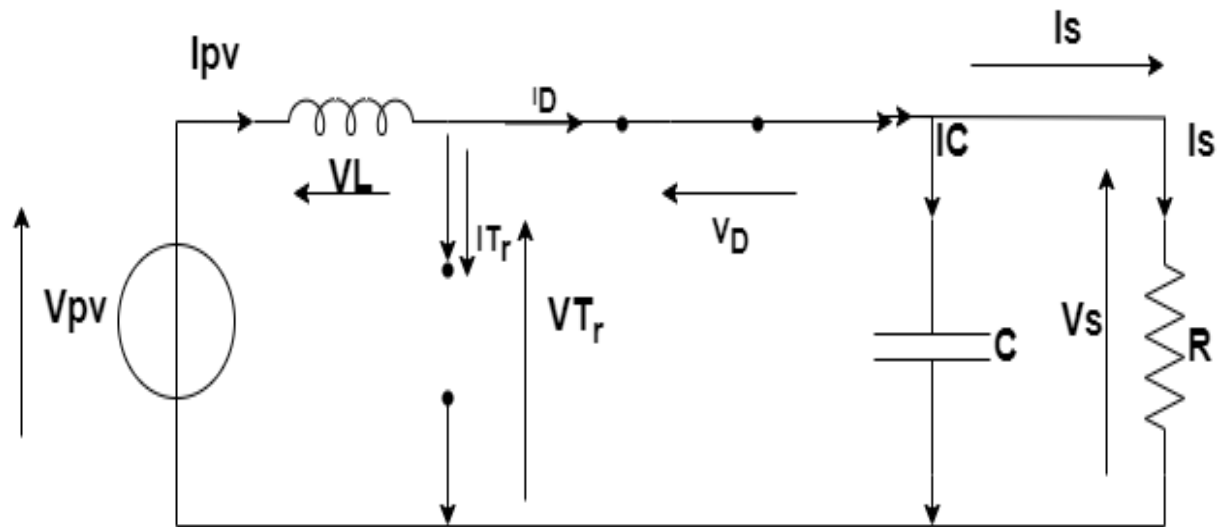


Figure (II.8) : Schéma équivalent du hacheur Boost durant la phase de roue libre

La tension aux bornes de l'inductance est alors:  $V_L = V_{pv} - V_s = L \frac{dI}{dt} < 0$ . En résolvant cette équation différentielle, on obtient la formule suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

$$i_L = \frac{V_{pv} - V_s}{t} (t - \alpha T) + I_{Lmax} \tag{II.8}$$

➤ Expression de  $V_s$  et  $I_s$  :

Par définition :

$$\langle V_L \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_L dt = \frac{1}{T} \left( \int_0^{\alpha T} V_{pv} dt + \int_{\alpha T}^T (V_{pv} - V_s) dt \right) \tag{II.9}$$

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

$$\langle V_L \rangle = \alpha V_{pv} + (V_{pv} - V_s)(1 - \alpha) = 0 \tag{II.10}$$

Et finalement, on obtient la relation suivante :

$$V_s = \langle v_s(t) \rangle = \frac{V_{pv}}{1 - \alpha} \tag{II.11}$$



Le rapport cyclique  $\alpha$  est compris entre 0 et 1 donc la tension de sortie  $V_s$  est nécessairement Supérieure à la tension d'entrée  $V_{bar}$  (montage survolteur).

Si on suppose que le courant d'entrée est parfaitement continu, on peut écrire :

$$I_s = \langle I_s(t) \rangle = \frac{1}{T} \left( \int_{\alpha T}^T I_{pv} dt \right) \tag{II.12}$$

Ce qui conduit à ;

$$I_s = I_{pv} (1 - \alpha) \tag{II.13}$$

Cette expression montre bien que le hacheur Boost est un abaisseur de courant. Au regard de ces différentes expressions, on peut remarquer que le rapport cyclique  $\alpha$ . permet de régler la tension moyenne de sortie (respectivement le courant moyen de sortie) pour une tension moyenne d'entrée donnée (respectivement un courant moyen d'entré). Il est donc possible de régler le transfert moyen de puissance entre l'entrée et la sortie de la structure à partir du rapport cyclique  $\alpha$ .

Le transfert moyen de puissance est :

$$P = \langle P \rangle = (1 - \alpha) V_s \cdot I_{pv} \tag{II.14}$$

➤ **Expression de  $\Delta I_L$  :**

L'ondulation absolue du courant  $I_L$  est défini par  $\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin}$  A partir des relations précédentes, à  $t = \alpha T$  on peut écrire  $I_{Lmax} = \frac{V_{pv}}{L} \alpha T + I_{Lmin}$  on en deduit l'expression de  $\Delta I_L$

suivante ;  $\Delta I_L = \frac{\alpha V_{pv}}{L.f}$  Cette expression nous montre que l'ondulation en courant diminue

Lorsque la fréquence de commutation  $f$  ou la valeur de l'inductance  $L$  augmente.

Comme  $V_{pv} = V_s (1 - \alpha)$  on peut écrire :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha (1 - \alpha) \cdot V_s}{L.f} \tag{II.15}$$

En résolvant  $\frac{d\Delta I_L}{d\alpha} = 0$ , on trouve que l'ondulation en courant  $\Delta I_L$  est maximale pour  $\alpha = \frac{1}{2}$

.Le dimensionnement de l'inductance  $L$ , à partir d'une ondulation en courant donnée, s'effectue à

l'aide l'inéquation suivante :

$$L \geq \frac{VS}{4f \Delta IL_{max}} \quad (\text{II.16})$$

➤ **Ondulation de tension  $\Delta V_s$  :**

Pour déterminer l'expression de l'ondulation en tension  $\Delta V_s$  on fait l'hypothèse que le courant  $I_s$  est parfaitement constant. On a la relation suivante  $i_c = c \frac{dv_s}{dt}$  or, pour  $0 \leq t \leq \alpha T$  :

on a la  $i_c = -I_s$  résolution de cette équation différentielle nous donne :

$$V_s = \frac{I_s}{c} + V_{s \max} \quad (\text{II.17})$$

At  $= \alpha T$ , on a :

$$V_s(\alpha T) = V_{s \max} = \frac{I_s}{c} \alpha T + V_{s \max} \quad (\text{II.18})$$

Et par suite on a :

$$\Delta V_s = V_{s \max} - V_{s \min} = \frac{I_s}{c} \alpha T \quad (\text{II.19})$$

Finalement :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha V_s}{R.C.f} \quad (\text{II.20})$$

Cette expression nous montre que l'ondulation en tension diminue lorsque la fréquence de Commutation  $f$  ou la valeur du condensateur.  $C$  Augmente. Le dimensionnement du condensateur  $C$ , à partir d'une ondulation en tension donnée, S'effectue à l'aide l'inéquation suivante :

$$C \gg \frac{\alpha_{\max} V_s}{R.\Delta V_s.f} \quad (\text{II.21})$$

➤ **Formes d'ondes des principaux signaux :**

Les formes d'ondes des principaux signaux sont données à la figure (II.7). A partir de ces Formes d'ondes, on peut exprimer les valeurs moyennes et efficaces des courants qui traversent la diode D et l'interrupteur  $T_r$ . Nous pouvons également en déduire les contraintes Maximales en tension et courant sur les interrupteurs. Ces relations seront utilisées lors du Dimensionnement des différents composants de la structure.

- **Courant moyen traversant la diode D :**

$$I_D = \langle I_D \rangle = I_s \quad (\text{II.22})$$

- **Courant efficace traversant la diode D :**

$$I_{D\text{eff}} = \sqrt{\left(\frac{I_s}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12} \cdot (1-\alpha)} \quad (\text{II.23})$$

- **Courant moyen traversant l'interrupteur**

$$T_r : IT_r = \langle i_{T_r}(i) \rangle = \frac{I_s}{1-\alpha} = I_{pv} \quad (\text{II.24})$$

- **Courant efficace traversant l'interrupteur T :**

$$I_{(Tr\text{-eff})} = \sqrt{\left(\frac{I_s}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}} \cdot \alpha \quad (\text{II.25})$$

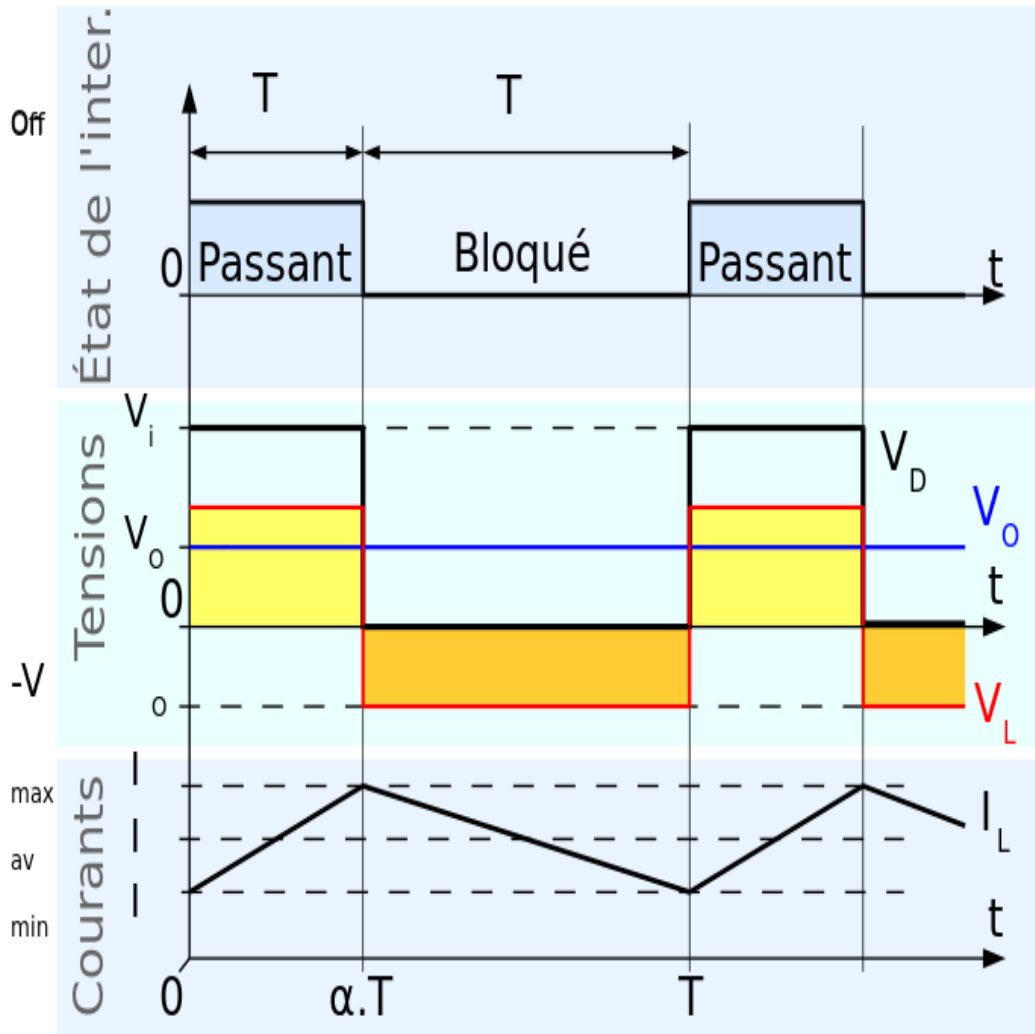


Figure (II.9) : Allures des tensions et courants en mode conduction continue

Les contraintes en tension et courant sur l'interrupteur commandé  $T_r$  et la diode D sont les

- **Contraintes maximales en tension**

$$v_{Tr\ max} = |v_{D\ max}| = v_{s\ max} = \frac{V_{pv}}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (II.26)$$

- **Contraintes maximales en courant :**

$$i_{Tr\ max} = i_{D\ max} = i_{L\ max} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (II.27)$$

Le dimensionnement de la cellule de commutation s'effectue dans le cas le plus défavorable. Pour calculer les contraintes en tension et courant dans le pire des cas, il nous faut remplacer dans les expressions ci-dessus  $\alpha$  par  $\alpha_{max}$ .

II.7.2. Conduction discontinue :

En conduction discontinue, on rajoute une phase pendant laquelle la diode D ne conduit pas ( $I_L = 0$ ).

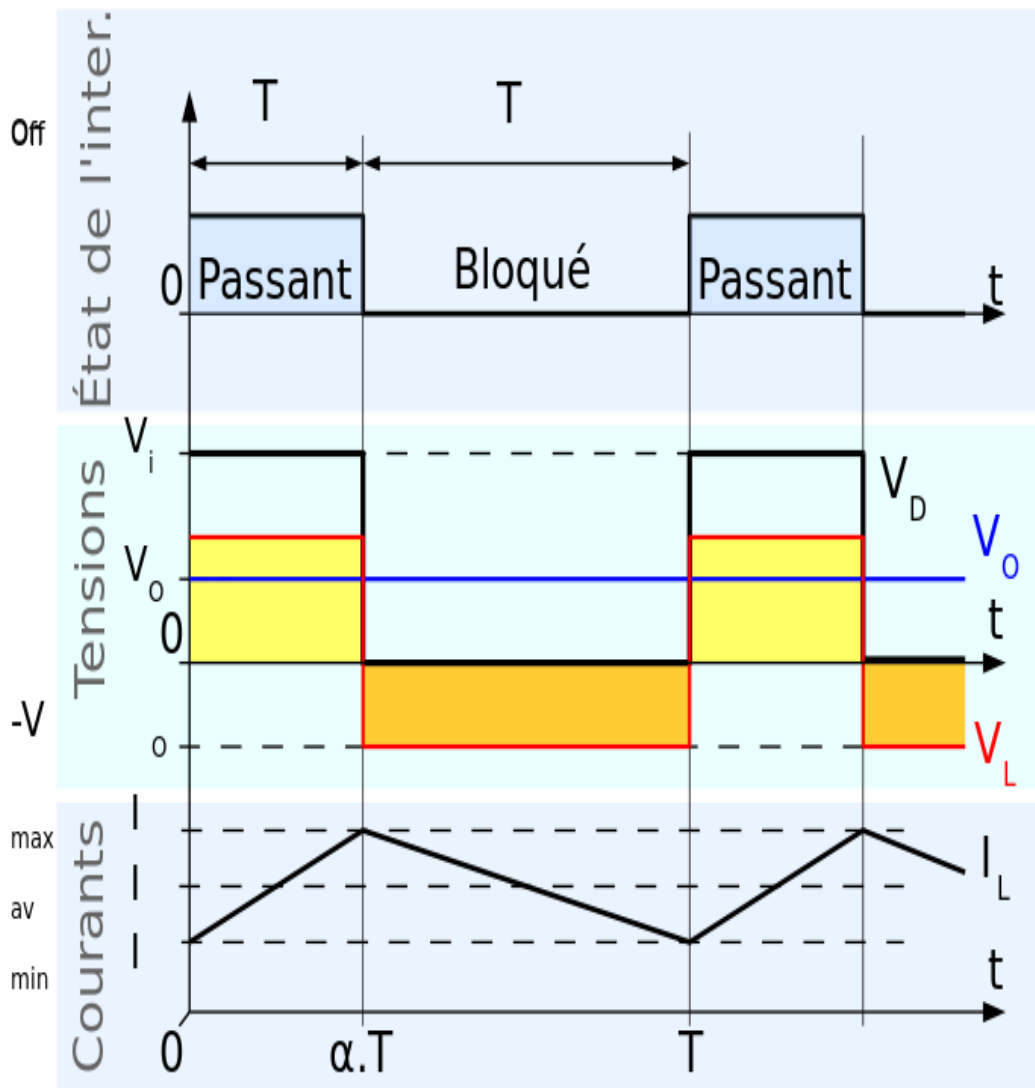


Figure (II .10) : Allure du courant traversant l'inductance en conduction discontinue

$$\Delta t = \beta T; \forall \alpha T \leq t \leq \beta T \rightarrow i_L(t) = \frac{V_{pv}}{L}(t - \alpha T) + I_{L\alpha T} \rightarrow I_L(\beta T) = 0 \quad (II.28)$$

Et avec  $I_L(\alpha T) = \frac{V_{pv}}{L} \alpha T$  on a :

$$\Delta t = \frac{V_{pv}}{V_s - V_{pv}} \cdot \alpha T \quad (II.29)$$

Le courant moyen de sortie est :

$$I_s = \langle i_s \rangle = \langle i_D \rangle = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^{\beta T} i_L(t) dt \rightarrow I_s = \frac{1}{2} i_L(\alpha T) \left( \frac{\beta T - \alpha T}{T} \right) \quad (\text{II.30})$$

Ce qui conduit à :

$$I_s = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2 V_{pv}^2 T}{L (V_s - V_{pv})}$$

(II.31)

Ou bien :

$$V_s = \left( 1 + V_{pv} \alpha^2 \frac{V_{pv}}{2L f I_s} \right) \quad (\text{II.32})$$

- **Puissance disponible ou échangée :**

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V_s \langle i_s(t) \rangle dt \rightarrow P = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2 T}{L} \frac{V_s V_{pv}}{(V_s - V_{pv})} \quad (\text{II.33})$$

Dans ce régime de fonctionnement, la tension de sortie est donc dépendante de la charge pour un rapport cyclique fixe. Ceci implique qu'en conduction discontinue, il est nécessaire de mettre en œuvre une boucle de régulation.

### II.7.3. Conduction critique :

Cette phase définit la limite entre les régimes continu et discontinu. Pour  $\alpha_{limite}$  on

$$t = \beta T - \alpha T = (1 - \alpha)T \quad \text{c'est-à-dire } \beta T = T$$

$$\Delta t = \frac{V_{pv}}{V_s - V_{pv}} \alpha_{lim} T = (1 - \alpha_{lim})T \quad (\text{II.34})$$

Ce qui nous donne finalement :

$$\alpha_{lim} = \frac{V_s - V_{pv}}{V_s} \quad (\text{II.35})$$

## II.8. Dimensionnement et choix des composants L et C du hacheur Boost :

### II.8.1. Essais de mesures préliminaires des valeurs des composants :

Pour le dimensionnement des différents composants du circuit du convertisseur afin de diminuer les ondulations des courants et des tensions sans faire un surdimensionnement ce qui

accroît le poids et le prix des circuits, un calcul de ces composants en fonction des ondulations voulues est nécessaire. Cette remarque est très importante pour le dimensionnement de l'inductance L afin de respecter le courant admissible par l'interrupteur où dans le cas pratique les ondulations du courant  $IL$  sont plus importantes par rapport aux autres ondulations [30].

$$C \geq \frac{\alpha_{max} \times P_{max}}{f \times \Delta V_s \times V_s} = \frac{\alpha_{max} \times P_{max}}{f \times 5\% \times V_s^2} \quad (II.36)$$

$$\text{et } L \geq \frac{V_s}{4 \times f \times \Delta IL} \quad (II.37)$$

$$\text{Avec } \alpha_{max} = 1 - \frac{V_{pvmin}}{V_s} \quad (II.38)$$

$$\begin{aligned} V_s &\leq 5\% V_s \\ \text{Et } IL &\leq 0.1A \\ f &= 5KHz \end{aligned} \quad (II.39)$$

### II.8.2. Dimensionnements des composants du hacheur Boost

- **Cahier des charges :**

Les spécifications imposées par notre cahier des charges pour réaliser le circuit de hacheur Boost sont les suivantes :

- ✓ Tension d'entrée nominale  $V_{pvnom} = 10V$
- ✓  $V_{pm} = 17,8V$ ,  $P_{max} = 55W$  dans la condition standard  $G = 1000W / m^2$  et  $T = 25^\circ C$ .
- ✓ Tension de sortie choisie  $V_s = 48V$  avec une ondulation de 5% soit  $V_s \leq 2,4 V$
- ✓ Puissance nécessaire à la charge  $P_{ch} = 55 W$ ,  $I_{Smax} = \frac{P_{max}}{V_s} = 1.145A$
- ✓ On choisit une fréquence de hachage  $f = 5 kHz$

$$\alpha_{max} = 1 - \frac{V_{pvmin}}{V_s} \rightarrow \alpha_{max} = 0.79$$

$$I_{Smax} = (1 - \alpha) I_{pm} \rightarrow I_{Smax} = 36.9\% I_{pm} \text{ Soit : } I_{PV} \leq 3\% I_{PVmax}$$

$$I_{pvmax} \leq 0.1A \quad I_{Lmax} \leq 5\% \leq 0.1A$$

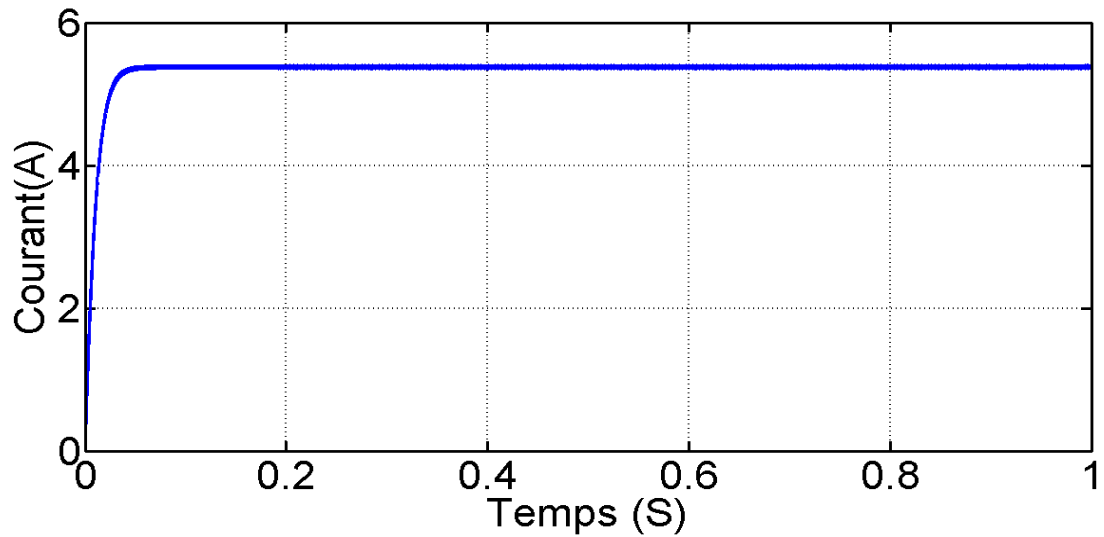
- ❖ **Le condensateur C :**

$$C \geq \frac{\alpha_{max} \times P_{max}}{f \times \Delta V_s \times V_s} = \frac{\alpha_{max} \times P_{max}}{f \times 5\% \times V_s^2} \quad \text{donc } C = \frac{0.79 \times 55}{5000 \times 5\% \times 48^2} = 75.43 \mu F$$

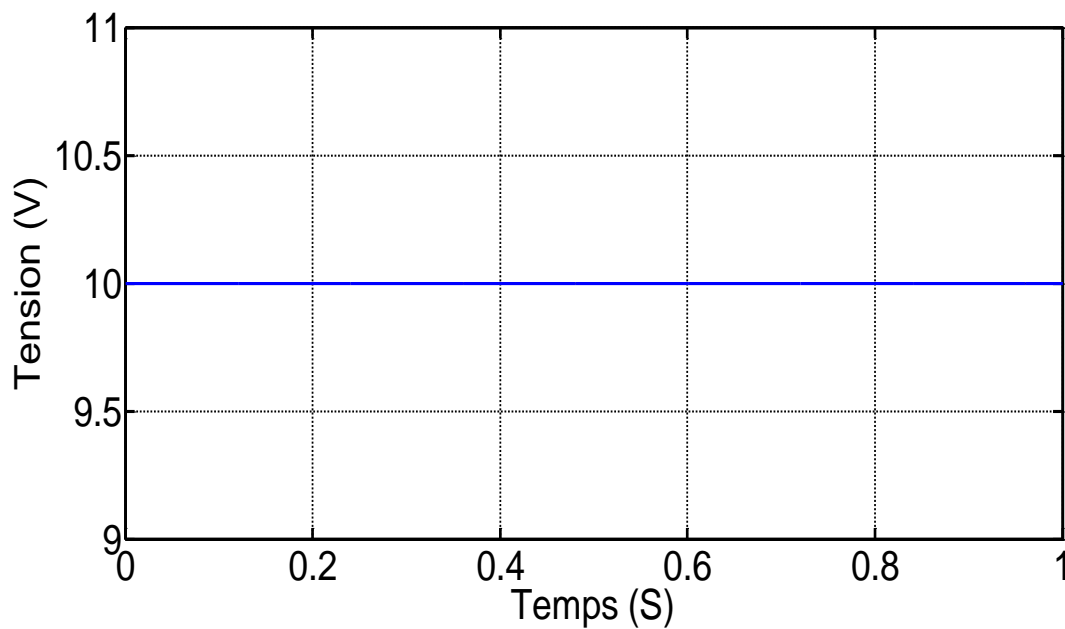
❖ L'inductance L :

$$L \geq \frac{V_s}{4 \times f \times \Delta I L} \text{ Donc } L = \frac{48}{4 \times 50 \times 0.1} = 24 = 24 \text{ mH}$$

**II.9.Résultat et simulation :**

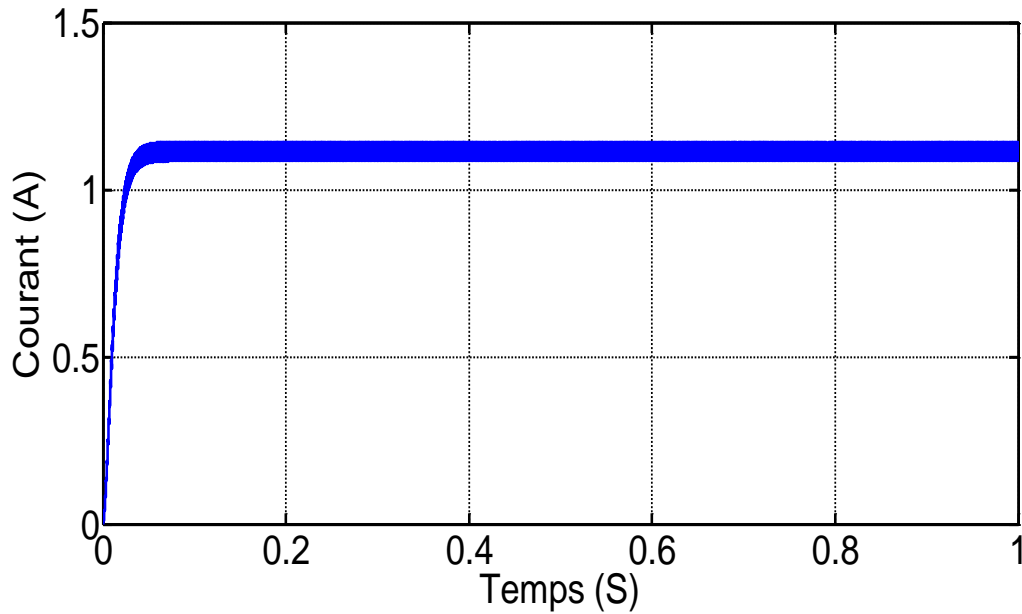
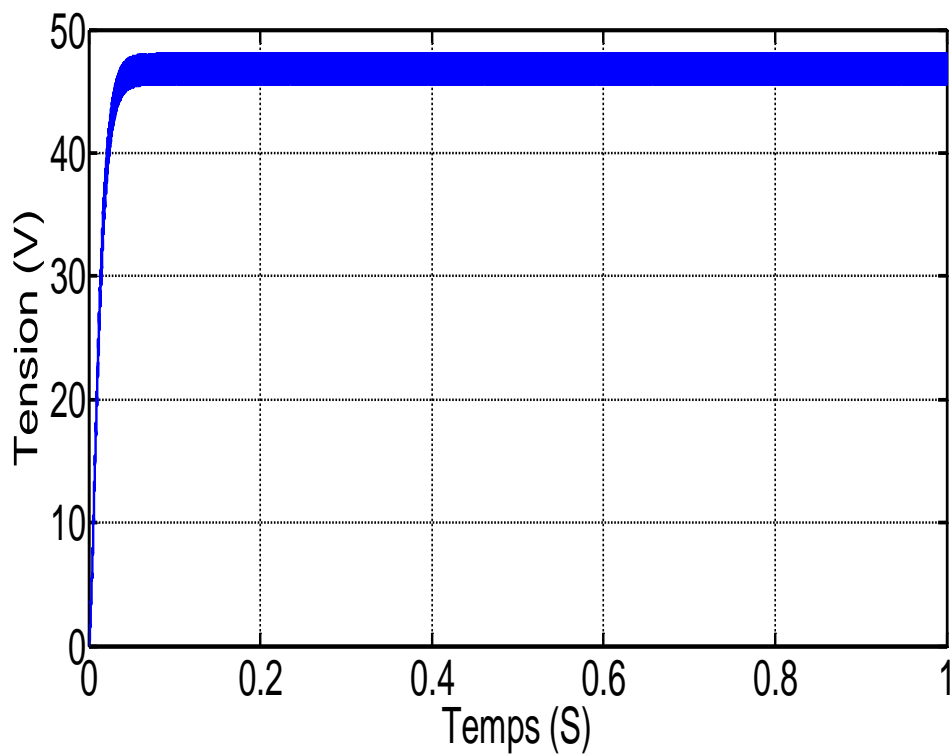


**Figure II .11:** Courant d'entrée



**Figure II .12:** Tension d'entrée



**Figure II .13:** Courant de sortie**Figure II .14:** Tension de sortie

La figure illustre représente la tension de sortie en fonction du temps

Le rôle du convertisseur BOOST fait élevé la valeur de tension en entrée de 10V a 48V en sortie en donnant une valeur de rapport cyclique de  $\alpha_{max} = 0.79$ , et cela prouve l'efficacité de cette dimensionnement.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre a été consacré à l'étude les différents types de convertisseurs DC-DC et étudiés spécifiquement hacheur BOOST et leur modèle mathématique et focalise sur le dimensionnement des composants en validant l'étude par simulation

# *Chapitre III*

*Commande MPPT des systèmes PV  
sous irradiation uniforme*



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

Les générateurs photovoltaïques sont reconnus par leur fonctionnement en large gamme de tension et courant de sortie, mais ils ne peuvent délivrer une puissance maximale. En effet, les variations climatiques qui influent sur la caractéristique  $I(V)$  entraînent la fluctuation de la puissance maximale. Pour cela il existe plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le MPP. Ces commandes sont connues sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking), associées à un hacheur DC\DC qui assure le couplage entre le générateur et

La charge [31].

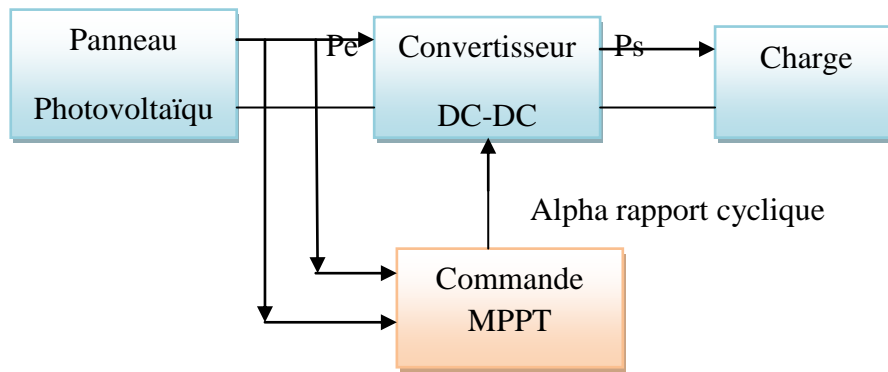
### **III.2. Commande MPPT :**

La commande MPPT, est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires [32].

### **III.3. Principe de la recherche du point de puissance maximal :**

Cette méthode permet au générateur PV de travailler à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques d'irradiations et de température. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant [33].

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier ( $I$  et  $V$  et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. Plusieurs algorithmes sont disponibles [34].



**Figure (III.1) :** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

### III. 4. Classification des Commandes MPPT :

La classification peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : méthodes directes et indirectes [33].

#### III. 4.1. MPPT indirecte :

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{sc}$  ou  $V_{oc}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc.... [33].

#### III. 4.2. MPPT Directe :

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV est indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur,

ainsi que la multiplication de ces deux variables. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O) [33].

### III.5.Types d'algorithme de MPPT :

Les algorithmes les plus utilisés dans MPPT sont :

- ✓ algorithmes Perturber et Observer (P&O).
- ✓ algorithmes de la conductance incrémentale (INC).
- ✓ Algorithme "Hill Climbing"
- ✓ Algorithme d'optimisation par essais particulaire(PSO).

#### III.5.1.Algorithmes Perturber et Observer (P&O) :

L'algorithme P&O est largement utilisé parce qu'il a la particularité d'avoir une structure simple, et peu de paramètre de mesure, Utilisée comme entrain les valeurs de tension  $V_{pv}$  et de courant  $I_{pv}$ , et comme sortie la valeur de rapport cyclique  $\alpha$  cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV. On calcule la puissance fournie par le panneau  $P(k)$  et la compare à la précédente  $P(k-1)$  si la puissance augmente, on s'approche du (MPP) et la variation du rapport cyclique est maintenu dans le même sens. Au contraire si la puissance diminue, on s'éloigne[35].

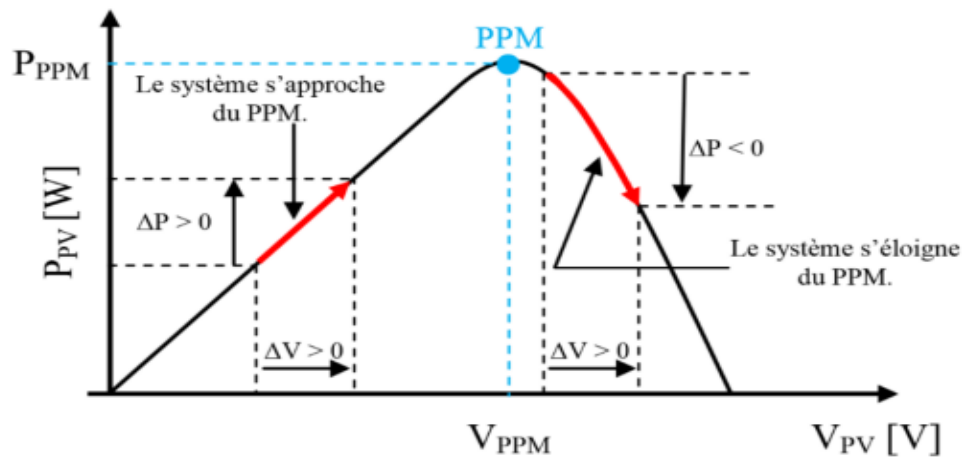


Figure (III.2) : Caractéristique  $V_{pv}=f(V_{pv})$  d'un panneau solaire

Le tableau suivant résume la démarche de cette méthode :

perturbation	Changement de la puissance	Perturbation suivante
positive	Positif	positive
positive	Négatif	négative
négative	Positif	négative
négative	Négatif	positive

Tableau (III.1) : Résumé de l'algorithme P&O

La figure (III.3) représente un algorithme classique lié à la commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant [36]

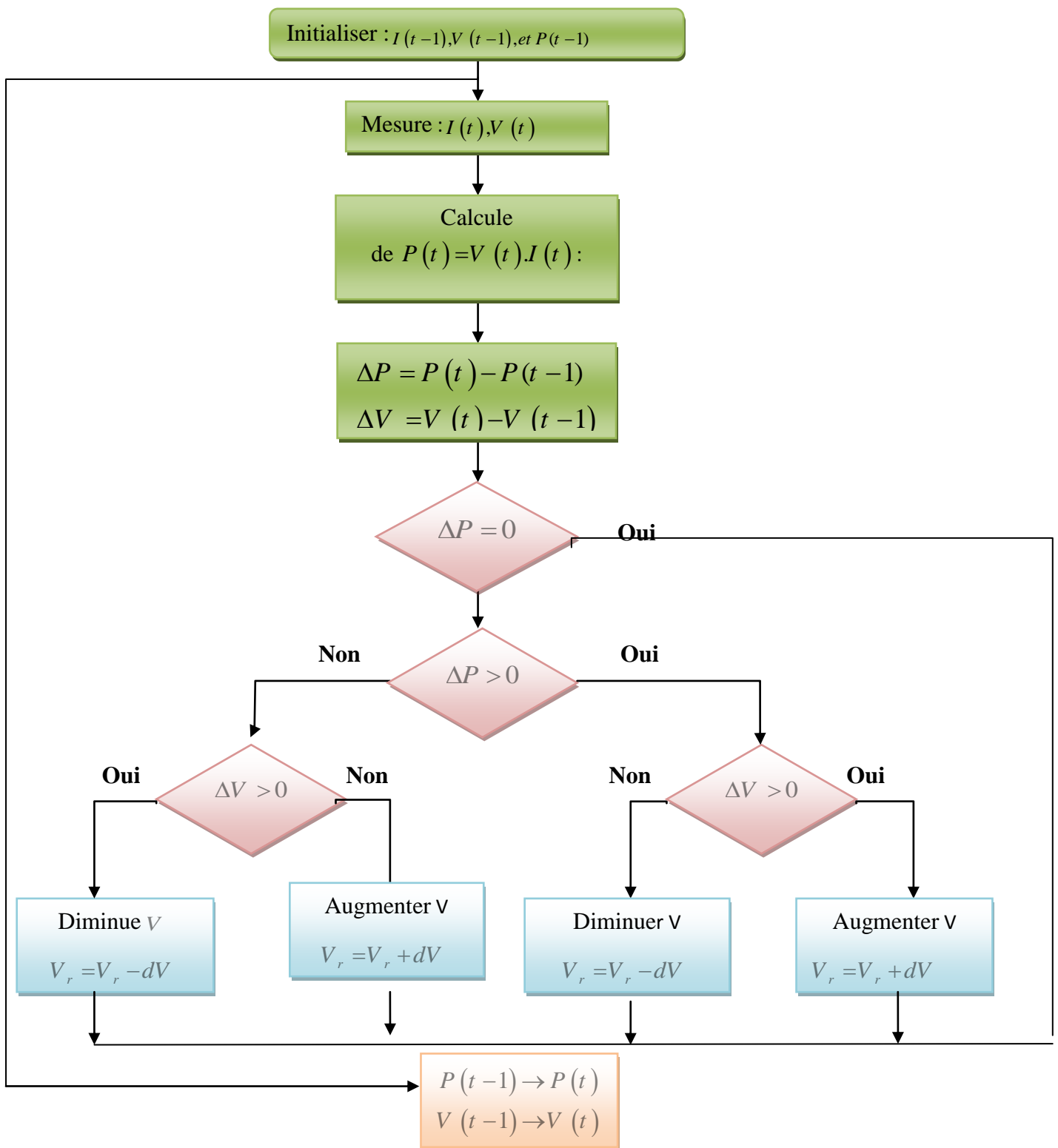


Figure (III. 3) : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode perturber et observer.



En raison de sa facilité de mise en œuvre, la méthode P&O est souvent utilisée. Bien que cela soulève des problèmes autour des oscillations PPM, parce que la recherche doit être répétée périodiquement pour forcer le système à osciller autour de PPM. De plus, pour les changements soudains des conditions météorologiques et/ou de la charge, ces méthodes interprètent parfois mal la direction qu'elles doivent suivre. Atteindre le PPM [37].

### ❖ Avantages et inconvénients de P&O :

#### a) Avantage :

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

#### b) Inconvénients :

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

### III.5.2. Algorithmes de la conductance incrémentale (INC) :

L'algorithme tire parti du fait que la pente de la courbe de tension secteur d'un panneau photovoltaïque est égale à zéro au point de puissance maximale. La pente est positive dans la région à gauche du point de puissance maximale et négative dans la région à droite [38].

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{III.1})$$

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{III.2})$$

La caractéristique puissance-tension du GPV, permet d'écrire les conditions suivantes :

✓ Si  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ , le point de fonctionnement est à gauche du PPM

✓ Si  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ , le point de fonctionnement est sur le PPM

✓ Si  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ , le point de fonctionnement est à droite du PPM

Pratiquement cette technique présente des oscillations autour du PPM

$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0$  car il est difficile de remplir la condition ce qui fait que le système

reste toujours en train de la chercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long [39].

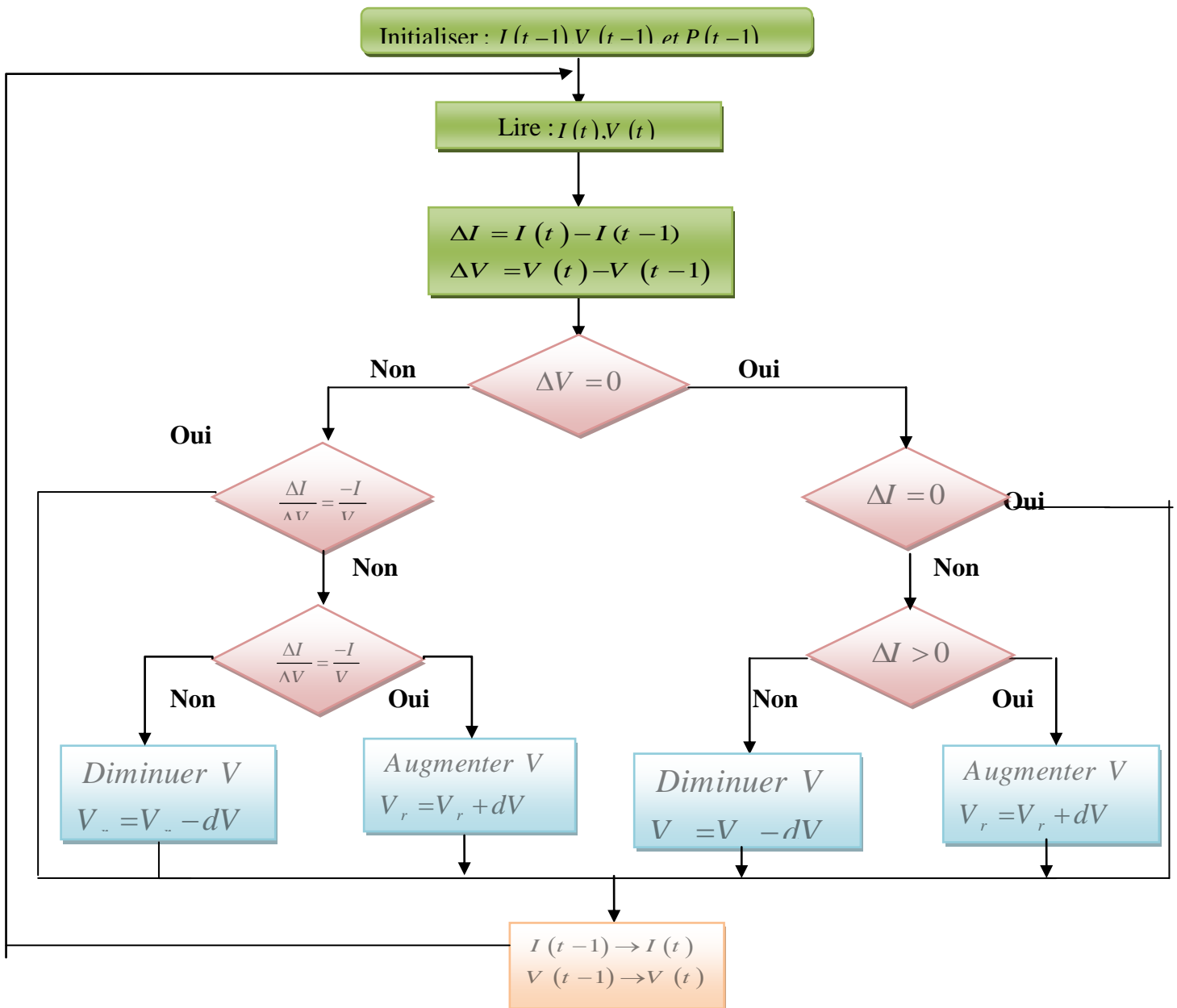


Figure (III.4) : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode IncCond de Conductance.

### III.5.3.Algorithme “Hill Climbing” :

La technique de commande dite Hill Climbing est l'une des techniques de commande les plus couramment utilisées, grâce à sa simplicité de mise en œuvre, consistant en un point d'élévation de fonctionnement le long de la caractéristique génératrice, pour lequel deux pentes (rampes) sont possibles [40].

Mais cette technique oscille autour du PPM en régime permanent et manque parfois des recherches PPM dans des conditions climatiques en évolution rapide [1].

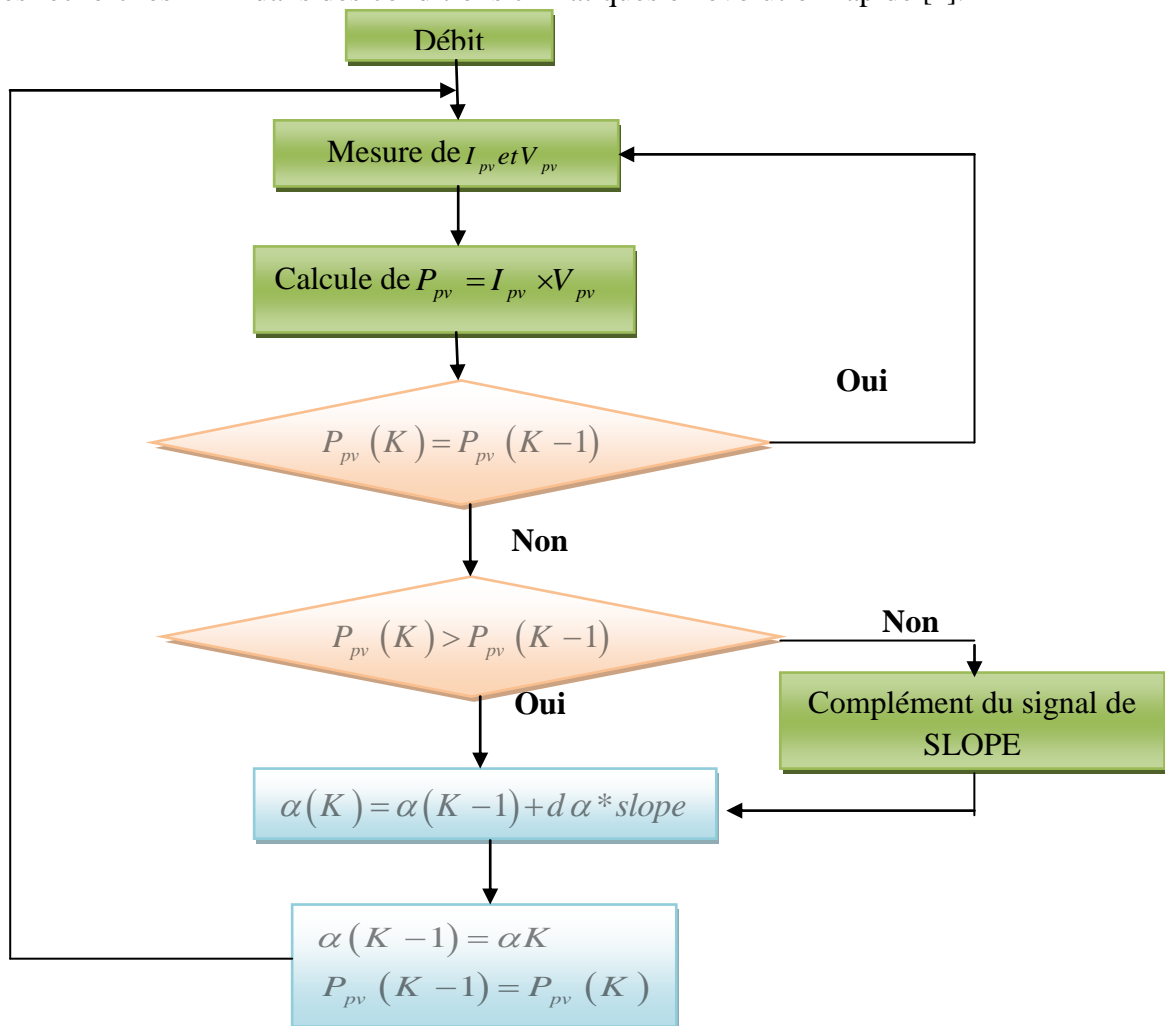


Figure (III.5) : Organigramme de l’algorithme Hill Climbing.

La variable ‘sens’ correspond à une variable qui prend la valeur «1» ou «-1» suivant la direction que l’on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance de sortie du panneau. Périodiquement, la puissance de panneau est comparée à la valeur déterminée

Précédemment, en fonction du résultat de comparaison, le signe de la valeur sens change ou reste identique. Une fois le PPM atteint, le système oscille autour de ce dernier indéfiniment [1].

### III.6.Résultat et simulation :

✓ **Simulation de Perturber et Observer (P&O) :**

Les figures ci-dessous représentent la variation de la puissance, tension et de courant sous des conditions atmosphériques fixes l'irradiation  $G = 1000W/m^2$  et une température  $T = 25C^\circ$

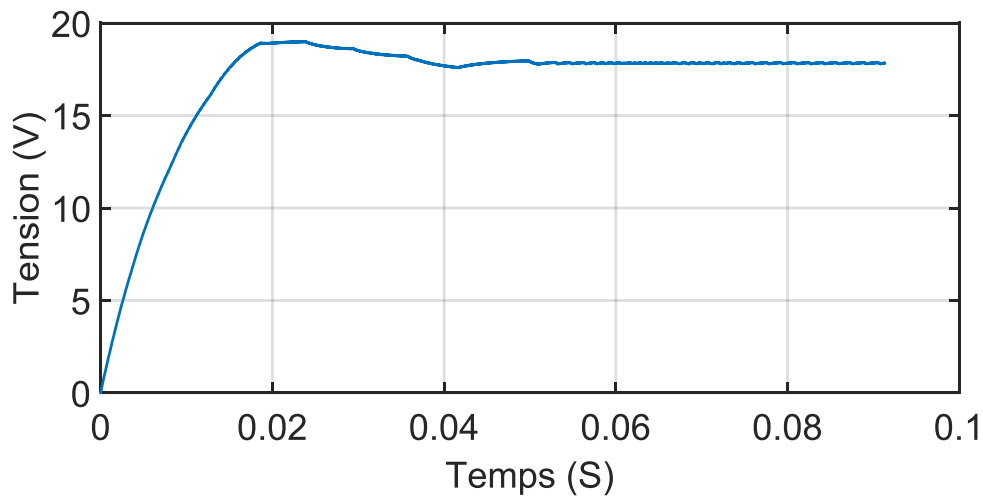


Figure (III.6) : Variation de la tension en fonction du temps

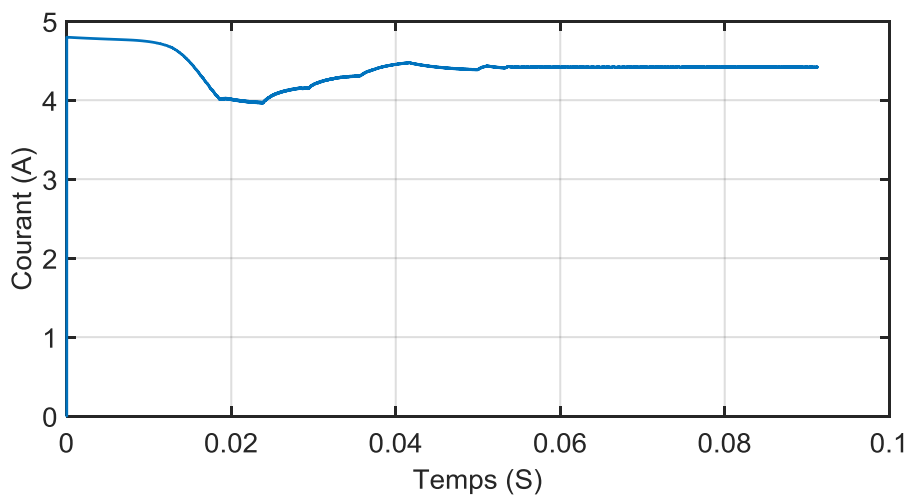


Figure (III.7) : Variation du Courant en fonction du temps

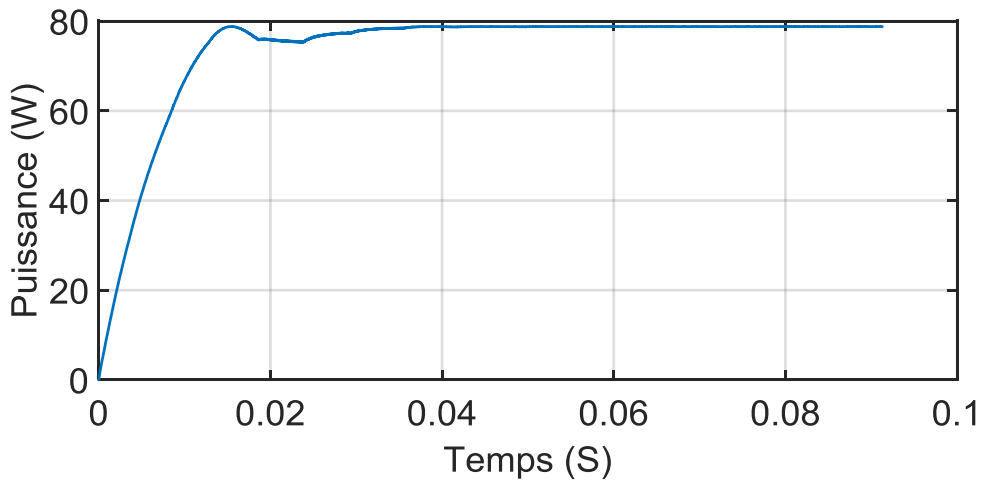


Figure (III.8) : Variation de la puissance en fonction du temps

Dans ce cas, nous avons utilisé un panneau photovoltaïque de valeur de puissance Qui était jusqu'à 80w. La figure(III.8) exprime les changements de puissance en fonction du temps où la valeur maximale de puissance de ce panneau atteint la valeur 80W

✓ **Simulation de la conductance incrémentale (INC) :**

Les figures ci-dessous représentent la variation de la puissance, tension et de courant sous des conditions atmosphériques fixes l'irradiation  $G = 1000W/m^2$  et une température  $T = 25C^{\circ}$

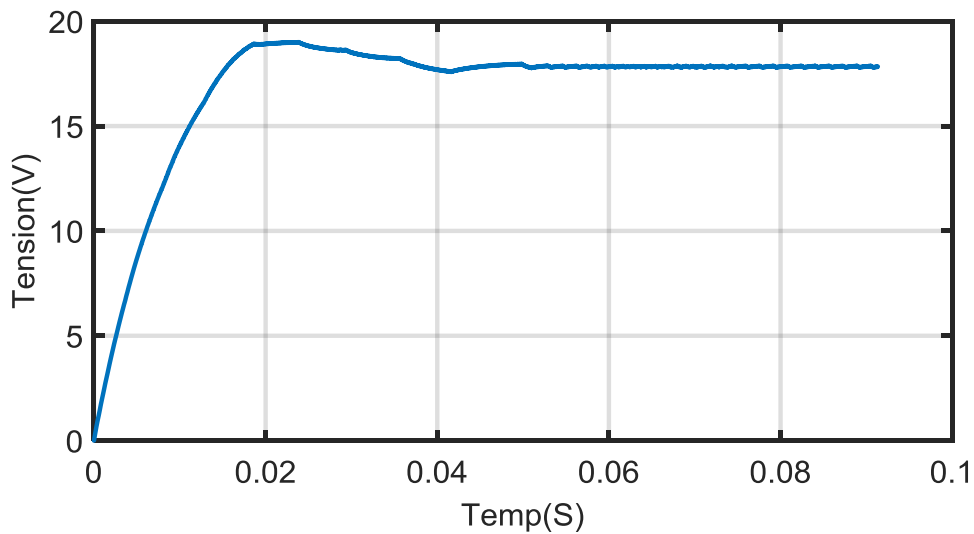


Figure (III.9) : Variation de la tension en fonction du temps

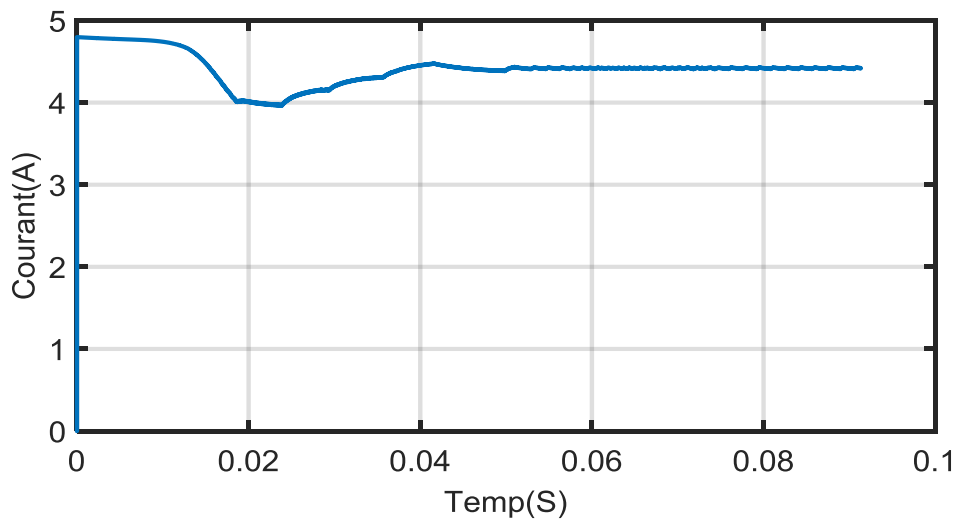


Figure (III.10) : Variation du courant en fonction du temps

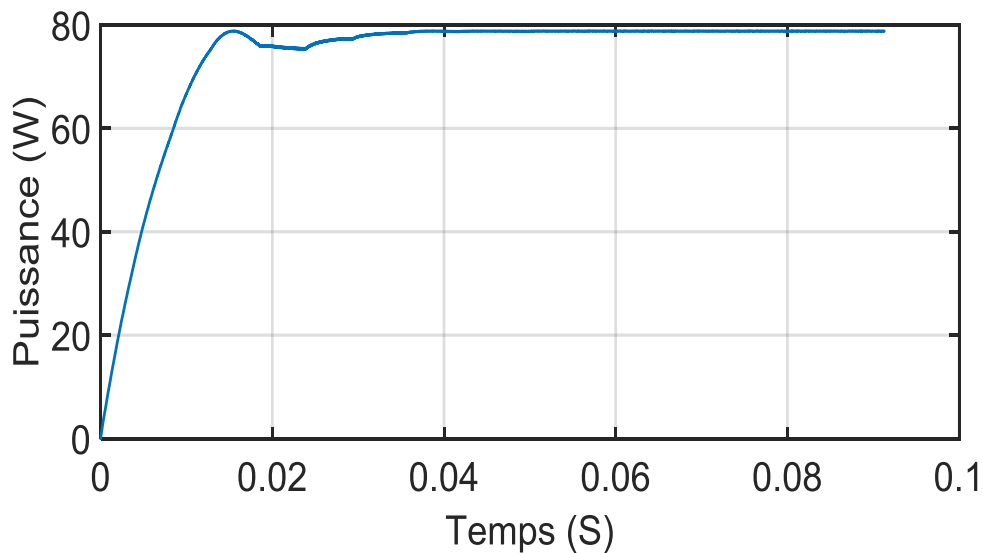


Figure (III.11) : Variation de la puissance en fonction du temps

Dans ce cas, nous avons utilisé un panneau photovoltaïque de valeur de puissance Qui était jusqu'à 80w. La figure (III.11) exprime les changements de puissance en fonction du temps où la valeur maximale de puissance de ce panneau atteint la valeur de 80W

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait étudiée l'adaptation par la convertisseur DC-DC et les différentes techniques de la commande MPPT traditionnelles pour chercher a la puissance du générateur PV maximale.

# *Chapitre IV*

## *Commande MPPPT des systèmes sous ombrage partiel*



### IV.2.Introduction :

L'ombrage partiel d'un module *PV* entraîne un changement important sur sa courbe de puissance ( $P - V$ ) même si une très faible partie du module ou de la cellule est à l'ombre. Une diminution importante de la puissance produite en est alors la conséquence.

Ainsi, une attention toute particulière doit être portée sur ce problème sous peine d'une forte réduction de la productivité des systèmes *PV*.

Afin d'illustrer l'influence de l'ombrage partiel, nous considérons un système *PV* avec deux modules *PV* connectés en série [41].

### IV.2 .L'algorithme d'optimisation par essais particuliers (PSO) :

Le PSO est un algorithme inspiré des mouvements d'un essaim d'oiseaux. Il a été développé au milieu des années 90 par deux chercheurs américains, Russel Eberhart, ingénieur électricien, et James Kennedy, socio-psychologue, le PSO fait varier la vitesse et la position de chaque individu à l'itération  $k$  [41].



**Figure(IV.1) :** volée d'anser en formation en V



### **IV.3. Principe de l'Algorithme PSO :**

Le principe de l'algorithme consiste à déplacer ces particules dans l'espace de Recherche afin de trouver la solution optimale. Au départ de l'algorithme, un essaim est réparti au hasard dans l'espace de recherche, chaque particule ayant également une vitesse aléatoire.

Ensuite, à chaque pas de temps :

Chaque particule est capable d'évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure performance, c'est-à-dire la meilleure position qu'elle a atteinte Jusqu'ici (qui peut en fait être parfois la position courante) et sa qualité (la valeur en cette position de la fonction à optimiser).

Chaque particule est capable d'interroger un certain nombre de ses congénères de son voisinage et d'obtenir de chacune entre elles sa propre meilleure performance. A chaque pas de temps, chaque particule choisit la meilleure des meilleures performances dont elle a connaissance modifie sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

A partir des quelques informations dont elle dispose, une particule doit décider de son prochain mouvement, c'est-à-dire décider de sa nouvelle vitesse pour ce faire, elle combine trois informations :

- Sa vitesse actuelle.
- Sa meilleure position actuelle.
- La meilleure performance (vitesse et position) de ses voisins.

Le hasard joue un rôle, grâce à une modification aléatoire limitée des coefficients de Confiance, ce qui favorise l'exploration de l'espace de recherche [41].

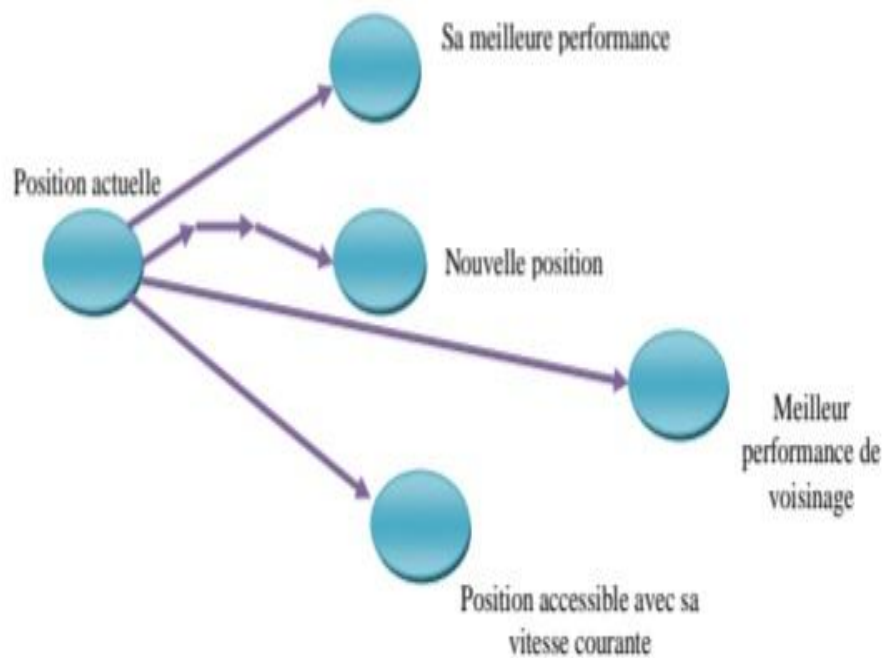


Figure (IV.2) : stratégie de déplacement d'une particule

#### IV.4. Utilisation de la PSO pour le MPPT :

Lors de la recherche du point de puissance maximale, le rapport cyclique  $D$  peut être utilisé (qui définit le signal de commande du convertisseur DC/DC) au lieu de la position de la particule  $x$ , la variation du rapport cyclique  $\Delta D$  en tant que vitesse de déplacement  $v$ , et la fonction de fitness est la puissance correspondant à chaque rapport cyclique [42].

Les équations d'évaluation sont :

$$D_i(t+1) = D_i(t) + \Delta D_i(t+1), i \in \{1, \dots, n_p\} \quad (IV.1)$$

$$\Delta D_i(t+1) = w \Delta D_i(t) + c_1 r_1 (D_{op\_i} - D_i(t)) + c_2 r_2 (D_{op\_g} - D_i(t)) \quad (IV.2)$$

Ou,

$D_i(t+1)$  : Le rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $t$  ;

$D_i(t)$  : Le rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $t$  ;

$\Delta D_i(t+1)$  : La variation du rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $(t+1)$  ;

$\Delta Di(t)$  : La variation du rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $t$  ;

$DOP\_i$  : Le meilleur rapport cyclique de la particule  $i$  à l'instant  $t$  ;

$DOP\_g$  : Le meilleur rapport cyclique global (de toutes les particules de l'essaim)

A chaque itération, la puissance correspondant à chaque position est déterminée.

Essaim de particules, puis on définit la fonction "fitness" cible, qui donne le poids

Chaque rapport cyclique (position des particules), si la position de l'alimentation est meilleure proportionnellement plus élevé, on peut donc écrire :

Si  $P(Di(t+1)) > P(DDop\_i) \Rightarrow Dop\_i = Di(t+1)$

Si  $P(Di(t+1)) > P(DDop\_g) \Rightarrow Dop\_g = Di(t+1)$

La figure (IV.3) donne les étapes de la poursuite du MPP avec PSO.

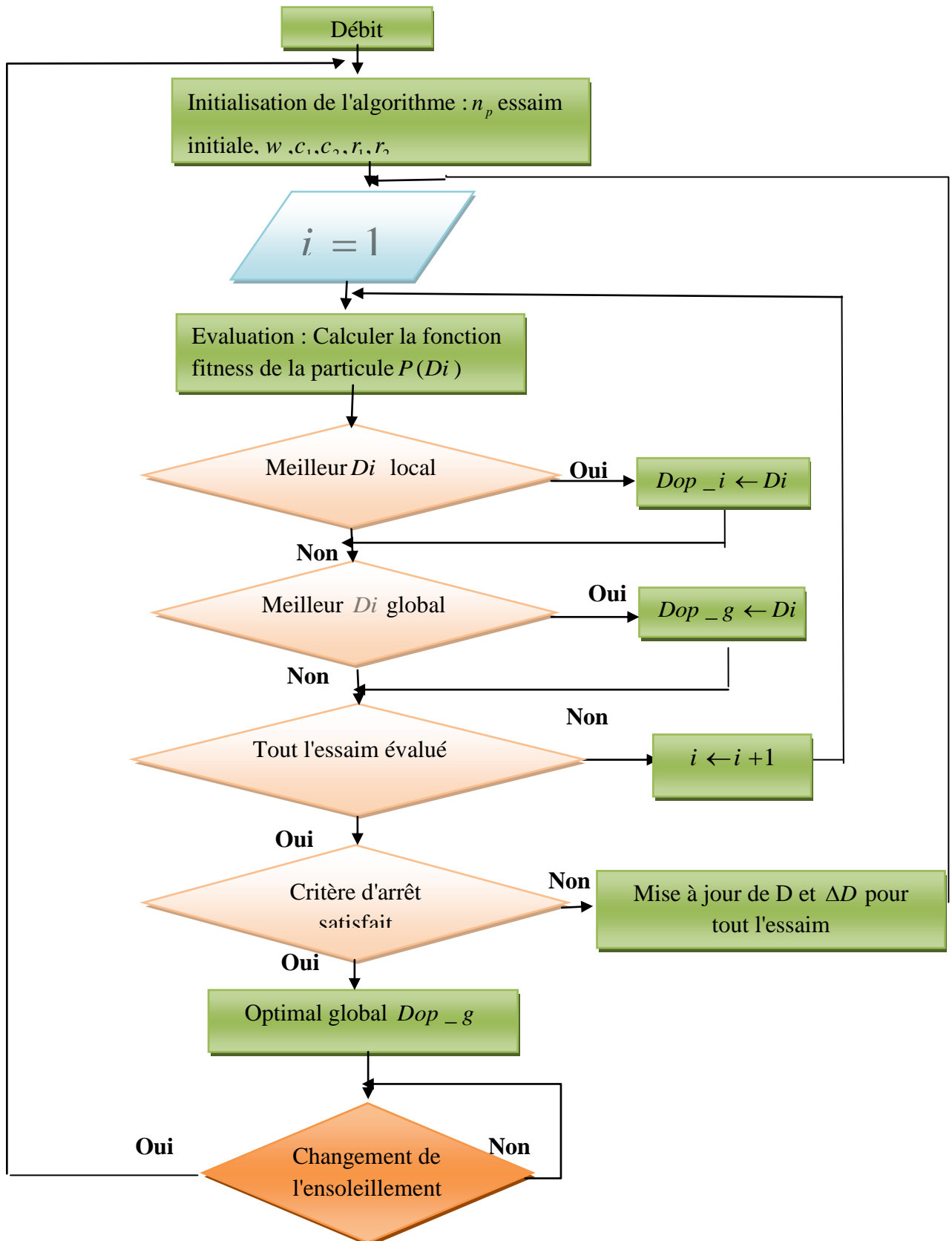


Figure (IV.3) : Organigramme de l'algorithme PSO

### IV.5. Avantages et inconvénients de PSO

#### ✓ Avantages

L'algorithme du PSO présente un avantage certain sur les méthodes classiques dans le sens où il permet une exploration aléatoire de l'espace de solution.

De plus de sa simplicité à mettre en œuvre et son exécution conduit à l'obtention de très bon résultat, rapidement et facilement avec peu de paramètre à ajuster.

Bien que le PSO trouve de bonnes solutions dans un temps beaucoup plus court que d'autres algorithmes évolutionnaires, l'amélioration de la qualité des solutions ne peut être garantie en augmentant le nombre d'itération [43].

#### ✓ Inconvénients

- Le premier inconvénient est que l'essaim peut prématurément converger.
- Le deuxième inconvénient est que les approches stochastiques ont un problème de dépendance, tout changement d'un de leurs paramètres peut avoir un effet sur le fonctionnement de l'algorithme tout comme sur la solution obtenue [43].

### IV.6. Ombrage partiel avec la commande PSO :

La méthode PSO est basée sur la collaboration entre les individus, et Les particules peuvent converger grâce à des règles de déplacement très simples Atteint progressivement le maximum global. Ainsi au début de l'algorithme chaque particule est positionnée (au hasard ou non) Dans l'espace de recherche de problème.

Fonction de 3 composantes :

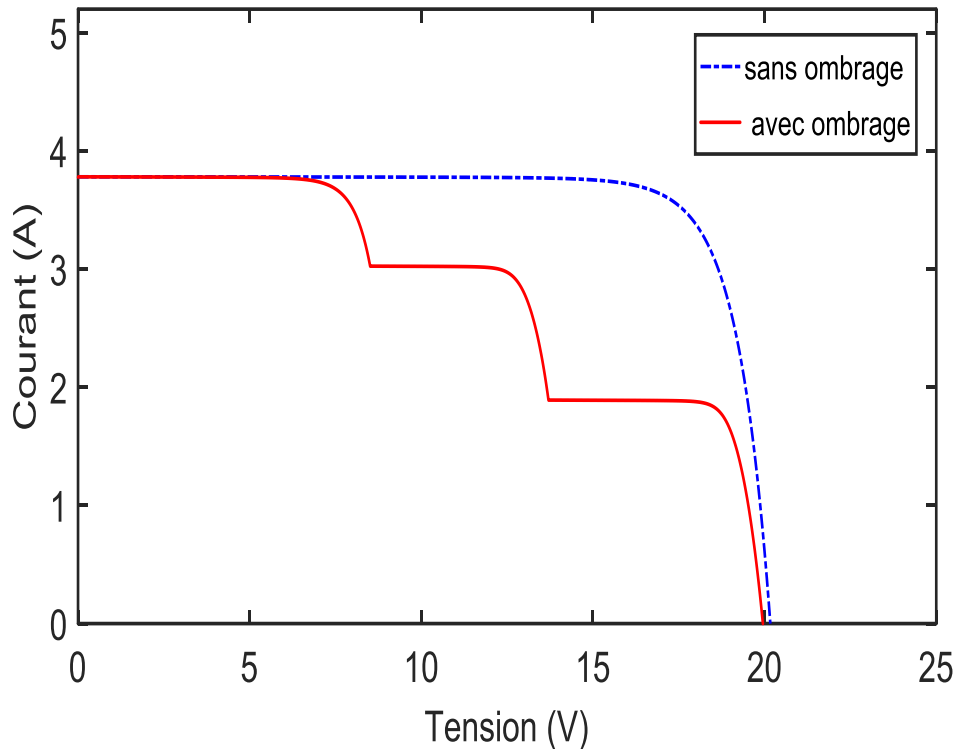
1. Sa vitesse actuelle  $V_k$
2. Sa meilleure solution  $P_i$
3. La meilleure solution obtenue dans son voisinage  $P_g$  [42]

### IV.7. Résultat et simulation :

#### ✓ Configuration de PSO dans des conditions d'ombrage partiel :

La première courbe représente les Caractéristiques (I-V) dans les conditions normal ( $T = 25C^{\circ}$  et  $G = 1000(W / m^2)$ ) et avec ombrage partiel a l'irradiation variable et la température fixe

La deuxième courbe représente les Caractéristiques (P-V) en même condition



**Figure (IV.4) :** Caractéristique (I-V) avec ombrage partiel

La figure(IV.4) illustré représente des changements de courant en fonction de la tension dans les deux cas : dans le cas de l'ombrage partiel et sans ombrage

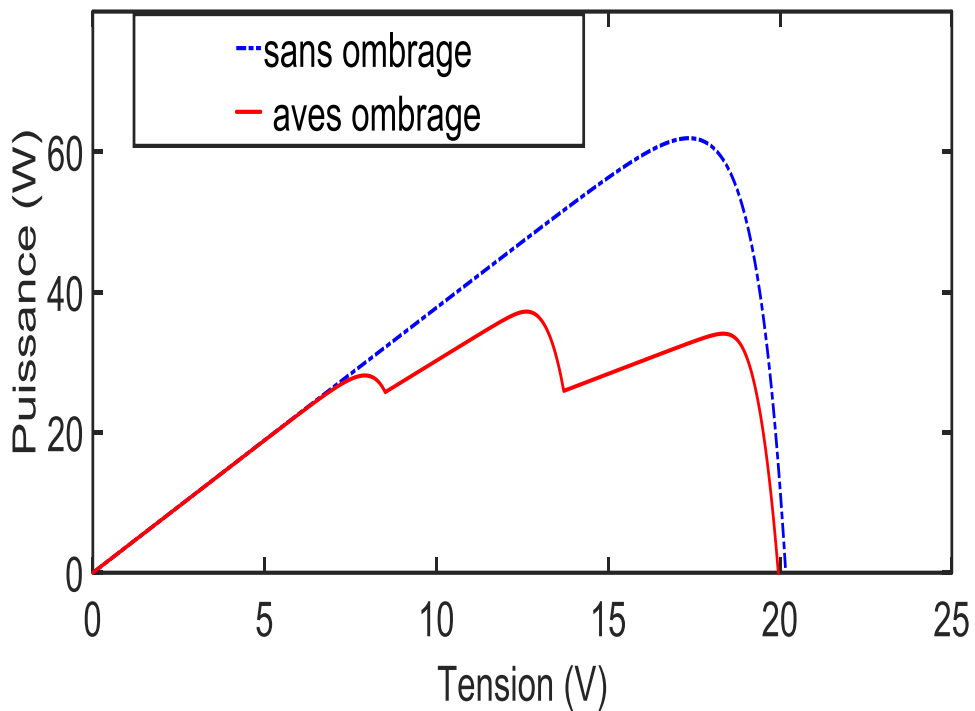


Figure (IV.5) : Caractéristique (P-V) avec ombrage partiel

La figure(IV.5) illustrée représente des changements de puissance en fonction de la tension dans les deux cas : dans le cas de l'ombrage partiel et sans ombrage

On remarque que dans le cas normal la valeur de la puissance supérieure était de 60W et dans le cas de l'ombrage elle était d'environ 38W

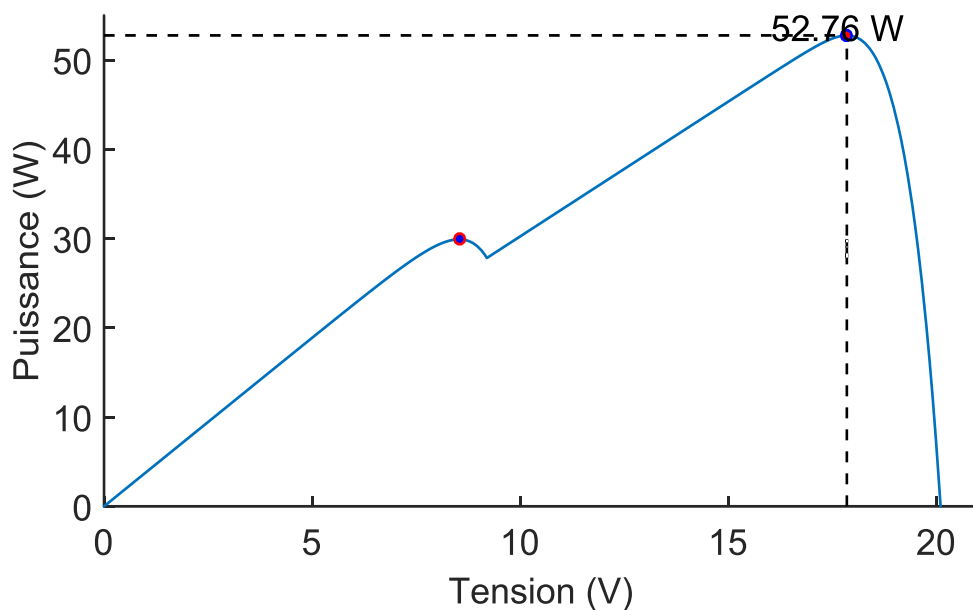


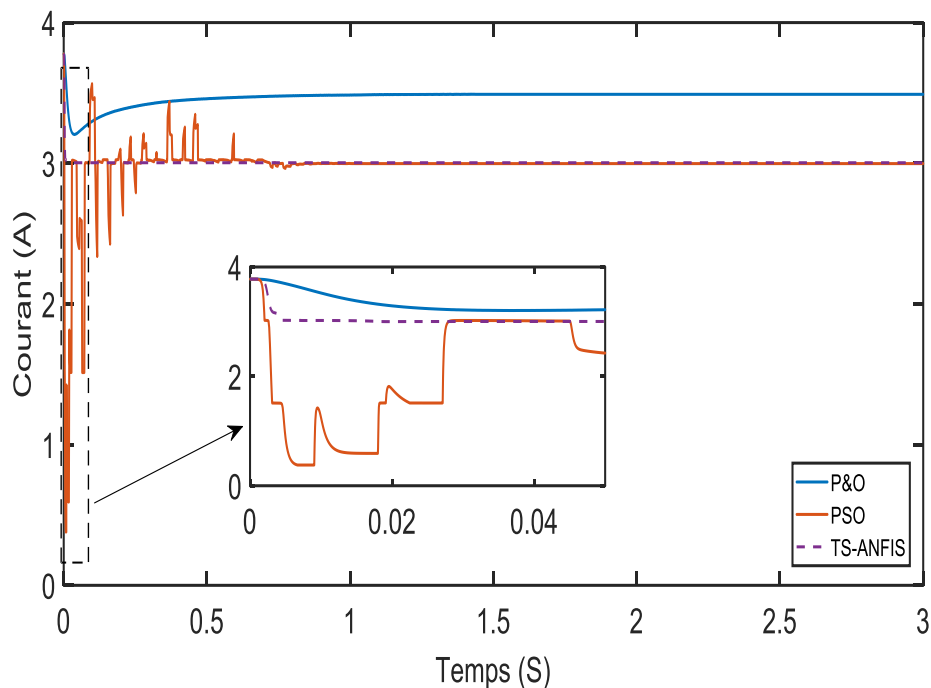
Figure (IV.6) : Caractéristique (P-V) avec ombrage partiel

La figure (IV.6) illustrée représente un autre cas de l'ombrage ou il présente des changements de puissance en fonction de la tension dans le cas avec ombrage partiel

On remarque que la valeur max de la puissance supérieure était de 52.76W

### ✓ Simulation de différent type de la commande MPPT :

La figure illustre l'ombrage partiel de courant et de tension d'un panneau photovoltaïque 41W nous avons fait une étude entre 3 techniques de la commande MPPT



**Figure (IV.7) :** ombrage partiel de courant PV 41W



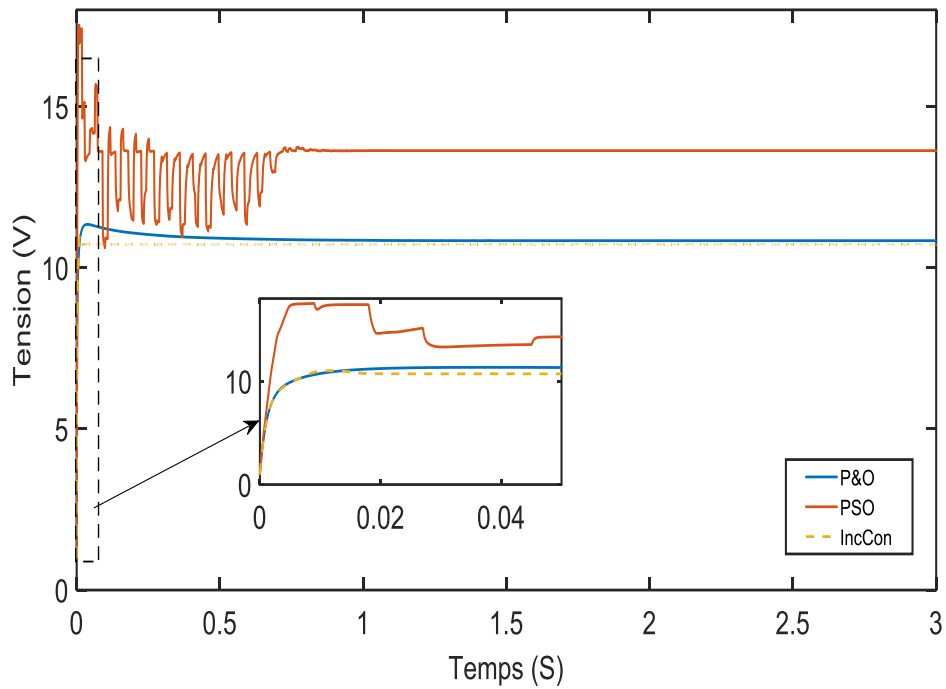


Figure (IV.8) : ombrage partiel de tension PV 41W

La figure illustre un autre cas de l'ombrage partiel de courant d'un panneau photovoltaïque 52 W nous avons fait une étude entre 3 techniques de la commande MPPT

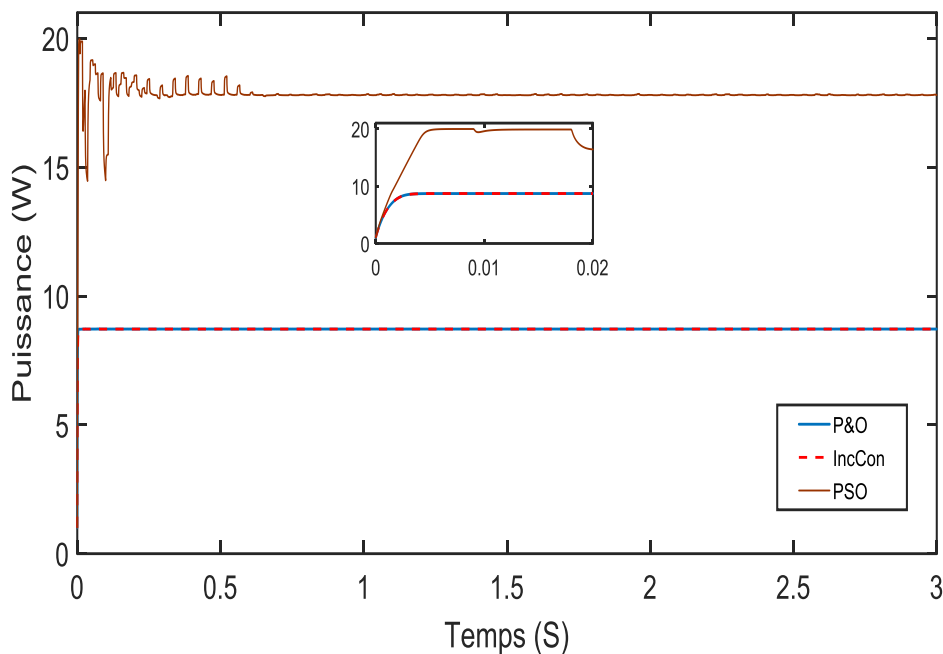


Figure (IV.9) : ombrage partiel de courant PV 52W

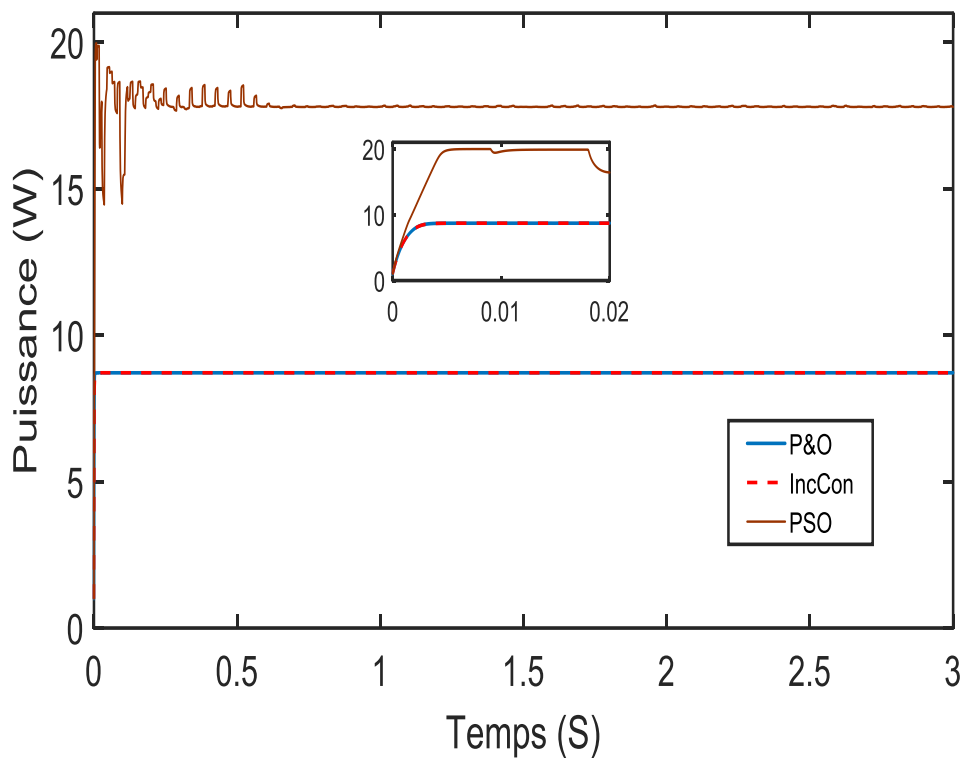


Figure (IV.10) : ombrage partiel de puissance PV 21W

La figure (IV.10) représente l'ombrage partiel de puissance PV 21W. Où nous avons étudié les techniques de la commande MPPT pour la recherche de la valeur maximale de puissance, on remarque que la commande P&O et la commande IncCon ne converge pas vers le point de puissance maximal PPM.

Et la commande PSO on remarque qu'il converge vers le point de puissance maximal.

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'algorithme PSO de la commande MPPT et leur simulation dans le cas avec ombrage partiel et nous avons effectué une Comparaison de différentes techniques.

# *Conclusion générale*



## *Conclusion générale*

L'énergie est l'un des éléments les plus importants nécessaires à la vie, en raison de l'augmentation continue de sa demande. Les énergies renouvelables sont considérées comme une bonne alternative pour protéger l'environnement d'une part et sa disponibilité d'autre part, l'énergie solaire est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie naturelle qui est le soleil.

Le soleil est la source d'énergie la plus prometteuse pour l'avenir, énergie propre, libre et infinie. L'utilisation photovoltaïque de l'énergie solaire consiste à convertir directement le rayonnement lumineux en électricité. Elle emploie pour cette raison, des modules ou panneaux photovoltaïques.

Notre objectif de ce travail est modéliser et simuler la cellule photovoltaïque puis nous avons utilisé le logiciel MATLAB –Simulink pour étudier le comportement de la cellule dans des conditions standard ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ;  $T=25^\circ\text{C}$ ), nous avons également étudié l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule photovoltaïque ainsi que l'effet de l'association des cellules (série et parallèle, série-parallèle).

Les paramètres de température et de l'éclairement sont très importants dans le comportement des cellules solaires.

Les points les plus importants obtenus grâce à cette étude sont:

- L'augmentation de la température affecte négativement sur la tension de circuit ouverte et la puissance maximale, ce qui signifie que les cellules fonctionnent bien dans un environnement froid et un ciel dégagé.

- Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident.

Ensuite, On a étudié quelques types de convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme l'hacheur boost, l'hacheur back et l'hacheur mixte (back-boost). Et nous avons vu la simulation d'un convertisseur survolteur (Boost).

Dans le troisième chapitre On a étudié l'adaptation par le convertisseur DC-DC survolteur et on trouve les relations relient les grandeurs du convertisseur et le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur. Par la suite, Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT, et on a étudié les algorithmes d'optimisation du générateur solaire, perturber et observer (P&O), conductance incrémentale (INC), "Hill Climbing" et on a donné leurs performance et leur limite.

## *Conclusion générale*

---

Finalement, on a donné une étude détaillée sur l'algorithme PSO, on a étudié le comportement du système PV proposé dans le cas normale et sous ombrage partiel, en appliquant cette techniques pour trouver le GMPP.

# *Référence*

## *Bibliographique*



## *Références bibliographiques*

- [1] C.Cabal, "Optimisation Energétique De L'étage D'adaptation Electronique Dédie A La Conversion Photovoltaïque", Université De Toulouse, 2003.
- [2] ALLAGUI SALIM, LABIOD SALAH EDDINE Etude et simulation d'un système photovoltaïque UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA juin 2021
- [3] Fellah Nadia, Sidibé Oumar «Etude et dimensionnement de l'installation photovoltaïque du DECANAT de la faculté ST », Thèse de MASTER, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem (2018/2019).
- [4] Adnan Jouni, ALMEE «Photovoltaïque», Université Libanaise (24-28 February2020).
- [5] Jean jacques, Beziane (18 Nov.2012) – L'énergie solaire
- [6]Salim ARAB, Dalila TOUDERT «Etude d'un Système Photovoltaïque », Thèse de MASTER, Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- [7]Kamel Mokhtari, Youcef Larabi«Etude et simulation d'un système photovoltaïque». , Thèse deMASTER, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- [8] Alain Cheron – Le rayonnement solaire dans l'environnement terrestre, 2014
- [9] SLAMA fateh .modélisation d'un Sys multi générateurs PV interconnectes au réseau électrique. Magister en eth. ufasetif.
- [10] Belhadj Mohammed. Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome, Mémoire de Magister en Microélectronique-Photovoltaïque, Centre Universitaire de Bechar, Institut des Sciences Exactes, 2008.
- [11]Mr : KECIRI Massinissa, Mr : BENMESSAOUD Nassim « Etudes et maximisation de puissance d'un système photovoltaïque», Thèse deMASTER, UNIVERSITE Abderrahmane Mira de Bejaïa.
- [12] SOFIANE ABADA „étude et optimisation d'un générateur PV pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur“, Mémoire master es sciences, université LAVAL ,2011
- [13] A. Labouret, M. Viloz, “ Energie solaire photovoltaïque ”, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006
- [14] OWEIS EL MELKI Marielle, SALHAB Miled, SOUEID Tania. SYSTÈME DE CONTROLE D'ALIMENTATION : EDL-GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE POUR APPLICATION DOMOTIQUE, PROJET DE FIN D'ETUDES Présenté pour obtenir le titre d'Ingénieur en Génie Électrique de L'UNIVERSITE LIBANAISE – BRANCHE II, 2013

## *Références bibliographiques*

- [15] M. BACHI Mohamed, M. CHEBHI Hicham « Maximisation de puissance d'un générateur Photovoltaïque par les méthodes Classique », Thèse de MASTER, UNIVERSITE de Bouira.
- [16] Dione MBAYE, Merahi SAWSENE « Etude du fonctionnement et commande d'un système photovoltaïque raccordé au réseau », Thèse de MASTER, UNIVERSITE de Tlemcen (2018 – 2019).
- [17] KHAIR Oussama, « Etude et commande d'un système photovoltaïque soumis à uombage partiel », Thèse de MASTER, Université Mohamed Khider de Biskra (2018 – 2019)
- [18] Cylia TIGRINE, Ouerdia Ait Ouali « Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque », Thèse de MASTER, Université A. MIRA-BEJAIA (2018/2019)
- [19] H.abd el hafidh, L .idriss « Etude Technico-économique d'une centrale Photovoltaïque connectée au réseau du URER/MS », mémoire de master, Université ahmed draia ,2022
- [20] Narimen Debili, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque », mémoire de magister, université Constantine 1, 2015
- [21] M.Saoudi, M.salhi « Etude et optimisation d'un système photovoltaïque », mémoire de Master, Université A.MIRA de BEJAIA 15 Juin 2017
- [22] M. P. Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » thèse doctorat de l'université de Toulouse 20 Janvier 2009
- [23] A. MIRICKI « Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat de l'institut national de polytechnique de Toulouse France, 2005.
- [24] O. Gergoud « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat de l'ENS de Cachan France, 2002.
- [25] Meghellet Hanine, Hocine Lynda « contribution a l'étude d'un système photovoltaïque », Thèse de MASTER, Université colonel akli mohand-oulhadj Bouira (2016/2017).
- [26] L. Protin et al. Convertisseurs photovoltaïques, Technique de l'ingénieur, traité génie électrique, pp 3-360, (1992).



## *Références bibliographiques*

- [27] BENSAOUDI Mohamed Samir, ARAR Salah Eddine « Etude d'un convertisseur boost pour système photovoltaïque », Thèse de MASTER, Université de T L E M C E N (2019/2020)
- [28] GOAR Noureddine, MAHMOUDI Abdelkader « Réalisation d'un convertisseur DC/DC Dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », Thèse de MASTER, Université de Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi –(2016/2017)
- [29] Henri FOCH et autres, «*Electronique de Puissance*», Vol. D3000 à D3233, Ed. Techniques de l'Ingénieur, (1989)
- [30] M.boukli hacene omar, « conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique » thèse magister, Université De Tlemcen (2010).
- [31] Cylia TIGRINE, Ouerdia Ait Ouali « Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque », Thèse de MASTER, Université A. MIRA-BEJAIA (2018/2019).
- [32] BENSMAIL Wafa, ABDALLAH FATMAZOHRA « Etude et simulation de la commande MPPT basée sur l'approche Hill-Climbing Flou », Thèse de MASTER, Université SAAD DAHLAB DE BLIDA (2015/2016).
- [33] Z. Soheir Ibtissem et M. nour el houda « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque commandé par la commande MPPT (P&O) », thèse de MASTER, Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, (2019/2020)
- [34] Kh. Fatima Zohra, « Commande MPPT pour les panneaux photovoltaïques en ombrage », thèse de MASTER, Université Ahmed Draïa-Adrar, (2020-2021)

## *Références bibliographiques*

- [35] H. Abbes, H. Abid et A. Toumi, «Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque, Tunisie,» 2013.
- [36] Ben. YAAKOUB, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT», thèse de MASTER, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI, 22/06/2013
- [37] S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: Application aux systèmes de pompage » Thèse de doctorat, co-tutelle de l'Université De Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Avril 2015.
- [38] BEN. BILEL «ETUDE ET MODELISATION DE LA COMMANDE MPPT AVEC MATLAB» », thèse de MASTER, Octobre 2021
- [39] F. OUDIAI1, K.LAGHA-MENOUER2, A. HADJ ARAB 3 , R. ZIRMI4 « Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par Incrément de la Conductance » , Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou, RP 17, 1500, TiziOuzou, ALGERIE
- [40] YAAKOUB BENYAHY «Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque adapté par une commande MPPT», thèse de MASTER, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM
- [41] METIDJI ZINEB, «COMMANDE MPPT-PSO & MPPT-WOA D'UN PV SOUS CONDITION D'OMBRAJE PARTIEL», Thèse MASTER, UNIVERSITE DE YAHIA FARES DE MEDEA.
- [42] D. Hania, L. Lylia et M. Zoubir, «Synthèse des méthodes de commande MPPT sous ombrage total et partiel», Thèse MASTER, Université de A.MIRA-BEJAIA (2019/2020)
- [43] N.Mancer, « Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence De dispositifs de compensation dynamique (FACTS) », Magister en : Electrotechnique Université Mohamed Khider – Biskra : 2012