

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique Et D'informatique  
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : **Automatique et Informatique  
Industrielle**

*Présenté par*  
**BOUZEGANE Mhenna**  
**GAOUAOUI Ferhat**

Mémoire dirigé par **Mlle. Wassila ISSAADI**

### Thème

**Alimentation d'un moteur à courant continu par une  
source photovoltaïque**

*Mémoire soutenu publiquement le 26 septembre 2018 devant le jury composé de :*

**Mr Boussad IDJERI**  
MCB, UMMTO, Président

**Mlle Wassila ISSAADI**  
MAB, UMMTO, Rapporteur

**Mr Ahcene TRIKI**  
MAA, UMMTO, Examineur

# *Remerciements*

*Le plus grand merci s'adresse au bon Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la volonté pour accomplir ce travail.*

*Nous remercions nos familles et tous nos amis qui nous ont toujours encouragé et soutenu durant toutes nos études.*

*Nous tenons également, à exprimer nos forts remerciements à notre promotrice, Mlle ISSAADI, pour sa disponibilité à tout instant et surtout ses orientations, qu'elles trouvent ici le témoignage de notre haute considération et de notre profond respect.*

*Nous remercions les membres de jury qui ont bien voulu accepter d'examiner ce mémoire et à cet égards nous leurs présentons nos profonds respects, et notre grande gratitude.*

*Nous rendons grâce à tous les enseignants du département Automatique, qui nous ont suivis durant notre cursus, et tous ceux qui ont contribué, à ce que ce travail prenne forme.*

*Nous exprimons aussi nos remerciements ou enseignants du département Electrotechnique.*

# *Dédicaces*

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifiques parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*A mon frère et mes sœurs pour leurs appuis et leur encouragement.*

*A tous mes amis et toute ma promotion, et en particulier mon binôme MHEENNA.*

*A tous ce qui de loin ou de près n'ont pas cessé de m'apporter leur soutien, pendant mes années d'études.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.*

*FERHAT*

# *Dédicaces*

*A toi seigneur DIEU tout puissant créateur du ciel et de la terre.*

*Je te remercie pour m'avoir donnée la volonté et surtout le  
courage de mener dans de bonnes conditions ce travail.*

*A celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu  
te garde dans son vaste paradis, À toi mon père.*

*A la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que  
j'adore.*

*A mes frères et ma sœur pour leurs appuis et leur  
encouragement.*

*A tous mes amis et toute ma promotion, et en particulier mon  
binôme FERHAT.*

*A tous ce qui de loin et de près n'ont pas cessé de m'apporter  
leur soutien, pendant mes années d'études.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués,  
et le fruit de votre soutien infailible.*

*MHENNA*

# Sommaire

---

<b>Introduction général.....</b>	<b>1</b>
----------------------------------	----------

## **Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïque**

I.1. Introduction.....	3
I.2. Généralités sur les systèmes solaires.....	3
I.2.1. Spectre solaire.....	3
I.2.2. Rayonnement solaire.....	4
I.2.3. L'énergie solaire.....	5
I.3. Cellule photovoltaïque.....	6
I.3.1. Historique.....	6
I.3.2. Structure physique.....	6
I.3.2. Rendement.....	7
I.3.3. Fonctionnement.....	7
I.4. Caractéristiques et modélisation de la cellule photovoltaïque.....	8
I.4.1. Modèle électriques d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.4.2. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.4.2.1. Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ).....	9
I.4.2.2. Tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ ).....	10
I.4.2.3. Puissance de la cellule PV.....	10
I.4.2.4. Puissance maximale d'une cellule PV.....	10
I.4.2.5. Rendement énergétique.....	11
I.4.2.6. Facteur de forme.....	11
I.5. De la cellule au générateur photovoltaïque.....	12
I.5.1. Modules photovoltaïques.....	12
I.5.2. Association de cellule photovoltaïque.....	12
I.5.2.1. Association série.....	12
I.5.2.2. Association en parallèle.....	13
I.5.2.3. Association en série/parallèle.....	13
I.6. Comportement d'un générateur photovoltaïque.....	14
I.6.1. Influence de l'ensoleillement.....	14
I.6.2. Influence de la température.....	15
I.7. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	16
I.7.1. Hacheur dévolteur (Buck).....	17
I.7.2. Hacheur survolteur (Boost).....	19
I.7.3. Hacheur dévolteur-survolteur.....	20
I.8. La charge.....	22
I.8.1. Moteur à courant continue.....	22
I.8.1.1. Constitution de la machine à courant continue.....	22
I.8.1.2. Principe de fonctionnement de la machine à courant continue.....	23
I.8.1.3. Caractéristiques du moteur à courant continue.....	23
I.9. Étude et Présentation d'un système de captage photovoltaïque.....	24
I.9.1. Architecture générale d'un système photovoltaïque (PV).....	24
I.10. Conclusion.....	25

# Sommaire

---

## Chapitre II : Généralité sur les systèmes photovoltaïque

II.1. Introduction.....	26
II.2. Commandes MPPT.....	26
II.3. Principe de la recherche du PPM.....	27
II.4. Techniques de commande MPPT.....	29
II.4.1. Méthodes indirectes.....	29
II.4.2. Méthodes directes.....	29
II.5. Différents types de commandes MPPT.....	30
II.5.1. Premières commandes MPPT.....	30
II.5.2. Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité.....	31
II.5.2.1. Commande en régulation de tension.....	31
II.5.2.2. Commande en régulation de courant.....	31
II.5.2.3. Commande en régulation de puissance.....	32
II.5.3. Les MPPT à implantation analogique.....	32
II.5.4. MPPT RCC (Ripple Corrélation Control).....	33
II.5.5. MPPT basé sur le balayage du courant (Current Sweeper).....	33
II.5.6. Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue.....	34
II.5.7. Les commande MPPT basées sur les réseaux de neurones.....	34
II.5.8. Méthode incrémentation de conductance.....	34
II.5.9. Méthode « <i>Hill Climbing</i> ».....	35
II.6. Algorithme Perturbation et Observation (P&O).....	35
II.6.1. Organigramme Perturber et Observer (P&O).....	36
II.7. Autres méthodes.....	37
II.8. Conclusion.....	38

## Chapitre III : Moteur à courant continue (MCC)

III.1. Introduction.....	39
III.2. Conversion d'énergie.....	39
III.3. Description des différent structure de la machine à courant continu.....	40
III.4. Principe de fonctionnement de la machine.....	41
III.5. Types de d'excitation de machine à courant continu.....	42
III.5.1. Moteur à excitation série.....	42
III.5.2. Moteur a excitation shunt.....	42
III.5.3. Moteur a excitation composée.....	43
III.5.3.1. Moteur composée à flux additif.....	43
III.5.3.2. Moteur composée à flux soustractif.....	43
III.5.4. Moteur a excitation séparée.....	44
III.6. Modélisation du moteur à courant continu.....	44
III.6.1. Equations électriques.....	45
III.6.2. Expression du couple électromagnétique.....	45
III.6.3. Equations mécanique.....	45
III.6.4. Moteur à courant continu à excitation constante.....	46
III.7. Commande en vitesse de la machine.....	46

# Sommaire

---

III.7.1 Système de commande.....	46
III.7.2 Choix de régulateur.....	47
III.7.3. Expression du régulateur PI.....	47
III.7.4. Fonction de transfert de la machine.....	47
III.7.5. Structure de la commande PI.....	50
III.8. Conclusion.....	51

## Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

IV.1. Introduction.....	52
IV.2. Modèle du système à dimensionner.....	52
IV.3. Dimensionnement d'un système PV avec moteur à courant continue .....	52
IV.3.1. Détermination du nombre de modules à installer.....	53
IV.3.1.1. Le courant total fourni par Groupe PV.....	53
IV.3.1.2. La tension totale fournie par Groupe PV.....	53
IV.4. Simulation des performances du module TP.160M-36.....	54
IV.5. Simulation du hacheur parallèle.....	56
IV.6. Le bloc de simulation de l'algorithme perturbation et observation (P&O).....	58
IV.7. Simulation d'un panneau photovoltaïque avec MPPT et convertisseur DC-DC.....	59
IV.7.1. Résultats à la sortie du générateur photovoltaïque.....	60
IV.7.2. Résultats de la simulation à la sortie de convertisseur.....	61
IV.8. Effet du changement simultané de l'ensoleillement.....	62
IV.8.1. Résultats à la sortie du générateur photovoltaïque.....	62
IV.9. Effet du changement simultané de la température.....	63
IV.9.1. Résultats à la sortie du générateur photovoltaïque.....	64
IV.10. Simulation globale (GPV, convertisseur, MPPT, MCC).....	65
IV.10.1. Simulation d'un moteur à courant continu à excitation constante.....	66
IV.10.1.1. Moteur à courant continu sans couple résistant.....	66
IV.10.1.2. Valeur en régime transitoire.....	67
IV.10.1.3. Valeur en régime permanent.....	67
IV.10.2. Résultat de Simulation globale du système.....	68
IV.10.2.1. Moteur à courant continu avec couple résistant.....	69
IV.10.2.2. Régulation de vitesse MCC.....	69
IV.11. Conclusion.....	70
<b>Conclusion général.....</b>	<b>71</b>

## Liste des symboles

- E : L'énergie d'un photon  
 $h$  : Constante de Planck [ $\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$ ].  
 $C$  : Vitesse de la lumière [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].  
 $\lambda$  : Longueur d'onde [ $\text{m}$ ].  
 $I_{ph}$  : Photo-courant (A).  
 $I_{sat}$  : Le courant de saturation (A)  
 $R_s$  : La résistance série ( $\Omega$ ).  
 $R_{sh}$  : La résistance parallèle shunt (A)  
 $I_D$  : Courant de jonction (A)  
 $I_{Rsh}$  : Courant dans la résistance parallèle Shunt (A)  
 $n$  : Facteur de non idéalité de la jonction  
 $V_t$  : Tension thermique à la température T (V).  
 $K_i$  : Constante ( $1.2 \text{ A} / \text{cm}^2 \text{ K}^3$ )  
T : Température effective de la cellule (K)  
G : L'ensoleillement en ( $\text{W} / \text{m}^2$ )  
 $q$  : Charge de l'électron ( $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ )  
 $E_g$  : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)  
K : Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/k}$ )  
 $I_{cc}$  : Courant de court-circuit (A)  
 $V_{co}$  : Tension de circuit-ouvert (V)  
P : Puissance fournie par la cellule (W)  
V : Tension ou borne de la cellule (V)  
I : Courant débitée par la cellule (A)  
 $P_{max}$  : Puissance maximal fournie par la cellule (W)  
 $V_{max}$  : Tension maximal fournie par la cellule (V).  
 $I_{max}$  : Courant maximal fournie par la cellule (A).  
 $P_{inc}$  : Puissance solaire incidente (W).  
 $n_s$  : Nombre de cellule en série  
 $n_p$  : Nombre de cellule en parallèle  
 $I_{SCC}$  : Courant de court-circuit du module PV série (A)  
 $V_{SCO}$  : Tension du circuit ouvert du module PV série (V)  
 $I_{pcc}$  : Courant de court-circuit du module PV parallèle (A)  
 $V_{pco}$  : Tension du circuit ouvert du module PV parallèle (V)  
 $T_s$  : La période de de commutation (s)  
d : Rapport cyclique du commutateur  
C : Capacité du condensateur (F)  
L : L'inductance (H)  
 $U_f$  : Tension d'excitation (V)  
 $R_f$  : Résistance d'inducteur ( $\Omega$ )  
 $I_f$  : Courant d'inducteur (A)  
 $L_f$  : Inductance de l'inducteur (H)  
 $U_a$  : Tension de l'induit (V)

## Liste des symboles et abréviations

---

$R_a$  : Résistance équivalente de l'induit ( $\Omega$ )  
 $I_a$  : Courant de l'induit (A)  
 $L_a$  : Inductance de l'induit (H)  
 $P$  : Le nombre de pair de pôles  
 $M_{fd}$  : Inductance mutuelle inducteur-induit (H)  
 $\Omega_r$  : Vitesse de rotation (rad /s)  
 $E$  : Force contre électromotrice FEM (V)  
 $C_{em}$  : Couple électromagnétique (Nm)  
 $C_r$  : Couple résistant (Nm)  
 $K_m$  : Constante du moteur ( $V/\text{rad}\cdot s^{-1}$ )  
 $J$  : Moment d'inertie ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^2$ )  
 $f$  : Coefficient de frottement ( $\text{Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$ )  
 $K_p$  : Gain proportionnel du correcteur PI  
 $K_i$  : Gain intégral de correcteur PI

### Abréviations

GPV : Générateur photovoltaïque.  
PV: Photovoltaïque.  
PPM : Point de puissance maximal.  
MPPT: Maximum Power Point Tracking.  
P&O: Perturbation et observation.  
DC: Courant Continu.  
MCC: Moteur à courant continue

# Liste des figures et des tableaux

---

## Liste des figures

### Chapitre I :

<b>Figure I.1</b> : Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	4
<b>Figure I.2</b> : Rayonnement solaire globale sur un collecteur photovoltaïque.....	5
<b>Figure I.3</b> : Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard.....	7
<b>Figure I.4</b> : Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.....	8
<b>Figure I.5</b> : Puissance maximale idéale et pratique.....	11
<b>Figure I.6</b> : la caractéristique résultante obtenue en association en série.....	12
<b>Figure I.7</b> : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles.....	13
<b>Figure I.8</b> : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.....	13
<b>Figure I.9</b> : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	14
<b>Figure I.10</b> : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ .....	15
<b>Figure I.11</b> : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	15
<b>Figure I.12</b> : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ .....	16
<b>Figure I.13</b> : Convertisseur DC/DC.....	16
<b>Figure I.14</b> : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur (buck).....	17
<b>Figure I.15</b> : Schémas équivalents du hacheur dévolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert.....	18
<b>Figure I.16</b> : Schéma de principe d'un convertisseur (Boost).....	19
<b>Figure I.17</b> : Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert.....	19
<b>Figure I.18</b> : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur-survolteur.....	20
<b>Figure I.19</b> : Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert.....	21
<b>Figure I.20</b> : Schémas équivalents de la partie interne de moteur à courant continue.....	22
<b>Figure I.21</b> : Evaluation de la grandeur du courant d'induit du (MCC).....	23
<b>Figure I.22</b> : Evaluation de la grandeur du couple électromagnétique de la (MCC).....	24
<b>Figure I.23</b> : Evaluation de la grandeur de la vitesse de rotation de la (MCC).....	24
<b>Figure I.24</b> : Evaluation de la grandeur de la vitesse de rotation de la (MCC).....	25

### Chapitre II :

<b>Figure II.1</b> : Schéma de principe du convertisseur MPPT.....	27
<b>Figure II.2</b> : Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (a) et la charge R (b).....	27
<b>Figure II.3</b> : Fluctuation du PPM avec l'intensité de la température (c).....	28
<b>Figure II.4</b> : Présentation de l'organigramme amenant le système à un fonctionnement à son PPM.....	28
<b>Figure II.5</b> : Principe de la première commande MPPT numérique.....	30
<b>Figure II.6</b> : Commande MPPT simple implantée en analogique.....	32
<b>Figure II.7</b> : Relation entre la puissance et le rapport cyclique.....	35
<b>Figure II.8</b> : Comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement.....	36
<b>Figure II.9</b> : Algorithme de la méthode P&O ( $C_p$ est la largeur du pas de perturbation).....	37

### Chapitre III :

<b>Figure III.1</b> : Conversion d'énergie.....	39
<b>Figure III.2</b> : Constitution d'une machine à courant continu.....	40

## Liste des figures et des tableaux

---

<b>Figure III.3</b> : Schéma électrique du moteur série.....	42
<b>Figure III.4</b> : Schéma électrique di moteur shunt.....	42
<b>Figure III.5</b> : Schéma électrique du moteur compound à flux additif.....	43
<b>Figure III.6</b> : Schéma électrique du moteur compound à flux soustractif.....	44
<b>Figure III.7</b> : Schéma électrique du moteur compound à excitation séparée.....	44
<b>Figure III.8</b> : Schéma électrique du modèle de moteur choisi.....	45
<b>Figure III.9</b> : Structure générale de la commande en boucle fermée.....	46
<b>Figure III.10</b> : Schéma bloc de la boucle du courant.....	48
<b>Figure III.11</b> : Schéma bloc de la boucle du couple.....	48
<b>Figure III.12</b> : Schéma bloc de la boucle de vitesse.....	48
<b>Figure III.13</b> : Schéma bloc de vitesse de rotation en fonction de la force Contre électromotrice.....	49
<b>Figure III.14</b> : Schéma fonctionnel du moteur à excitation séparée.....	49
<b>Figure III.15</b> : Schéma de commande utilisant la structure PI.....	50

### Chapitre IV :

<b>Figure IV.1</b> : Schéma synoptique du système PV contrôlé par MPPT.....	52
<b>Figure IV.2</b> : Modèle à une diode du générateur PV sous Matlab/Simulink.....	54
<b>Figure IV.3</b> : Schéma bloc du générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink.....	55
<b>Figure IV.4</b> : caractéristique $I = f(V)$ du module à $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ .....	55
<b>Figure IV.5</b> : Caractéristique $P = f(V)$ du module à $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ .....	56
<b>Figure IV.6</b> : Schéma block d'un convertisseur survolteur (BOOST).....	57
<b>Figure IV.7</b> : Signal commande DC/DC (gâchette- d'hacheur).....	57
<b>Figure IV.8</b> : Résultats de simulation de la tension (entrée/sortie) du hacheur survolteur.....	58
<b>Figure IV.9</b> : Schéma block de l'algorithme (P&O).....	58
<b>Figure IV.10</b> : Schéma bloc d'un système photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT «Perturbation et observationP&O».....	59
<b>Figure IV.11</b> : Les conditions de simulation STC ( $25^{\circ}C$ et $1000 W/m^2$ ).....	59
<b>Figure IV.12</b> : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.....	60
<b>Figure IV.13</b> : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.....	60
<b>Figure IV.14</b> : Caractéristiques $P=f(v)$ et $I=f(v)$ .....	60
<b>Figure IV.15</b> : Tension de sortie du convertisseur DC-DC.....	61
<b>Figure IV.16</b> : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC.....	61
<b>Figure IV.17</b> : Variations simultanée de l'ensoleillement et température constant.....	62
<b>Figure IV.18</b> : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.....	62
<b>Figure IV.19</b> : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.....	62
<b>Figure IV.20</b> : Résultats de la simulation $P=f(v)$ et $I=f(v)$ .....	63
<b>Figure IV.21</b> : Variations simultanée de la température et l'ensoleillement constant.....	63
<b>Figure IV.22</b> : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.....	64
<b>Figure IV.23</b> : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.....	64
<b>Figure IV.24</b> : Résultats de la simulation $P=f(v)$ et $I=f(v)$ .....	64
<b>Figure IV.25</b> : Schéma bloc du système global (GPV, convertisseur, MPPT, MCC).....	65

## Liste des figures et des tableaux

---

<b>Figure IV.26</b> : Bloc de simulation de la MCC.....	66
<b>Figure IV.27</b> : Caractéristique de courant et la vitesse en fonction du temps de la MCC sans couple résistant.....	67
<b>Figure IV.28</b> : puissance de sortie du générateur photovoltaïque.....	68
<b>Figure IV.29</b> : tension de sortie du convertisseur DC-DC.....	68
<b>Figure IV.30</b> : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC.....	68
<b>Figure IV.31</b> : Vitesse de la MCC avec application de couple résistant.....	69
<b>Figure IV.32</b> : Réponse de la vitesse avec la régulation.....	69

*Introduction*  
*générale*

## Introduction générale

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entrainera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources.

D'autant plus que la demande ne cesse de croître et tant dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole.

D'autre part, ce type de consommation énergétique n'est pas neutre sur l'impact environnemental. Pour les hydrocarbures le charbon par exemple, d'importantes émissions de gaz à effet de serre sont générées quotidiennement jouant un rôle prépondérant au niveau du dérèglement climatique et de l'augmentation de la pollution. Ce constat pousse à rechercher de plus en plus de solutions innovantes palliant le déficit énergétique et limitant l'impact négatif sur l'environnement. Ainsi, le développement des sources non-polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité à la fois par les producteurs d'énergie et les pouvoirs publics.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. À la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée, inépuisables et facilement exploitables. En effet, le secteur des énergies renouvelables est le seul qui se distingue par sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre et la pollution et à exploiter des sources d'énergie locales et décentralisées. Ces sources d'énergie ne sont pas touchées par la volatilité des marchés des combustibles fossiles et présentent l'avantage supplémentaire de stimuler l'emploi.

Le soleil fournit une énergie lumineuse grandiose à la Terre. Mais le problème réside dans le fait que la forme sous laquelle nous recevons l'énergie n'est pas nécessairement celle sous laquelle cette énergie est utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion de l'énergie. Par exemple, les cellules solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique.

Le photovoltaïque s'avère prometteur en raison de ses qualités intrinsèques : ses frais de fonctionnement sont très réduits (le combustible est gratuit), ses exigences d'entretien sont limitées, il est fiable, silencieux et relativement facile à installer. De plus, dans certaines applications autonomes, le photovoltaïque est très pratique comparé à d'autres sources d'énergie, en particulier dans les endroits difficiles d'accès et peu rentables pour l'installation de lignes électriques traditionnelles.

# Introduction Générale

---

Aujourd'hui, l'industrie mondiale du photovoltaïque (PV) repose essentiellement sur les besoins des régions éloignées en alimentation électrique fiable et peu coûteuse. Dans un grand nombre d'applications, le photovoltaïque est tout simplement la solution la plus rentable. Parmi ces applications, on peut citer les systèmes isolés alimentant des chalets ou des résidences éloignées, des services publics et de l'armée, le pompage de l'eau dans des fermes et les postes d'appel d'urgence sur les campus ou les autoroutes.

L'objectif de ce travail étant de simuler un système photovoltaïque qui alimente un moteur à courant continu (**MCC**) et cela à travers un étage d'adaptation Hacheur survolteur commandé par un algorithme de recherche du point de puissance maximale (**MPPT**).

De ce fait, le présent travail est décomposé en quatre parties séquentielles, dont chacune d'elle définit un chapitre.

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art et à la présentation du système de conversion photovoltaïque, dont un intérêt particulier est porté aux générateurs photovoltaïques, ces derniers ont été décrits en partant de l'élément de base qui est la cellule jusqu'aux modules constitutionnels qui sont une partie prenante dans la conception des centrales électriques à large spectre de puissances. Ensuite, en termine par une description de notre charge qui est un moteur à courant continu (**MCC**).

Il a été évoqué dans la littérature plusieurs visions à la philosophie de commande, comptant les techniques classiques ou rudimentaires, jusqu'aux nouvelles propositions des techniques modernes de pilotage de l'élément central, de ce fait, dans le deuxième chapitre un privilège particulier et une étude ciblée sont accordés à certaines techniques classiques qui feront l'objet de la partie commande.

Le présent mémoire traite la fonction de transfert et d'acheminement d'énergie d'une source d'alimentation photovoltaïque reliée à une charge particulière de notre système d'étude, qui présente un moteur à courant continu (**MCC**), ce qui nous a mené à consacrer le chapitre trois à présenter la machine à courant continu et ces différentes excitations ainsi que le model choisi, les équations mathématiques afférentes et le régulateur intégré (régulateur de vitesse).

Le quatrième chapitre traite un certain ensemble de tests effectués sur le système étudié et la capacité de la commande à pouvoir mener toujours le système central qui est le hacheur à mettre la structure en situation d'adaptation d'impédance en vue d'extraire le maximum d'énergie qui se trouve sur le générateur photovoltaïque.

Le présent travail se résume brièvement à travers une conclusion générale là où un balisage particulier des points essentiels, tout en parlant des éventuelles perspectives d'améliorations.

# *Chapitre I*

## *Généralité sur les systèmes photovoltaïque*

## I.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

L'association de plusieurs cellules en série /parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique produite est disponible sous forme d'électricité directe (alimenté une charge) ou stockée en batteries.

Pour bien comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur l'effet photovoltaïque, Le principe de la cellule photovoltaïque et leurs différents modèles et les convertisseurs DC /DC et la charge.

## I.2. Généralités sur les systèmes solaires

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique [1].

L'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie, elle représente un potentiel considérable. En effet, la terre reçoit plus de 3000 h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement. Avec une optimisation des angles de réception, la moyenne annuelle journalière est de 5 à 7 kWh /m<sup>2</sup>/jour [2].

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires.

### I.2.1. Spectre solaire

Le spectre solaire et la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) ou de la fréquence ( $n$ ).

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde qui varie entre de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$ .

La (figure I.1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 6,4% dans la bande des ultraviolets ( $0,20 < \mu < 0,38 \mu\text{m}$ ).
- 48% dans la bande visible ( $0,38 < \mu < 0,78 \mu\text{m}$ ).
- 45,6% dans la bande des infrarouges ( $0,78 < \mu < 10 \mu\text{m}$ ).

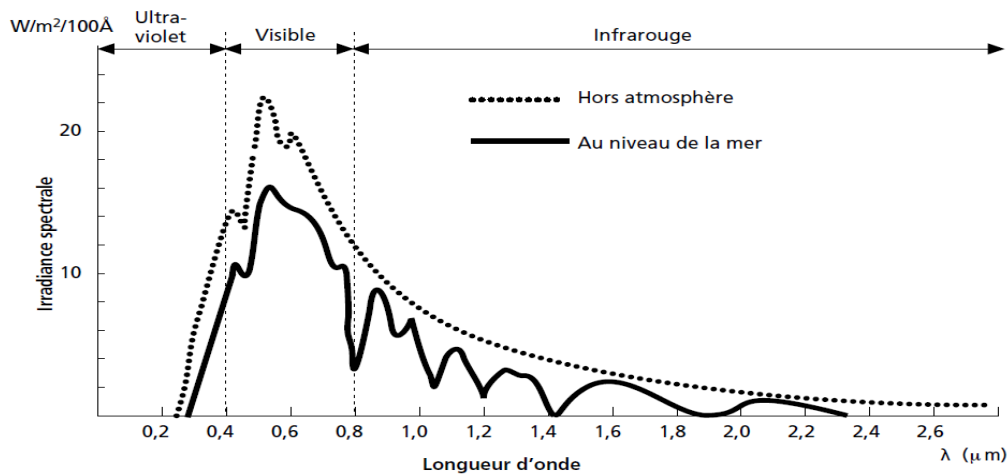


Figure I.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [3]

### I.2.2. Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Lavoisier et Laplace, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance.

Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius.

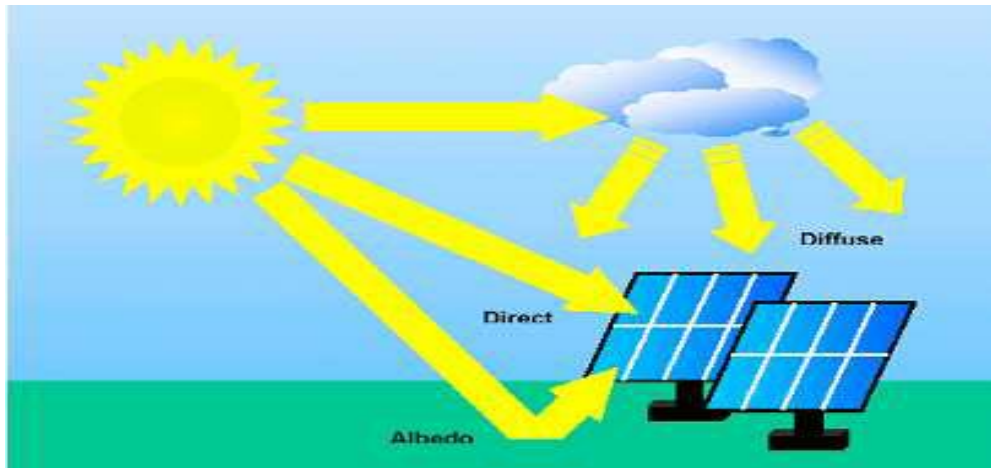
Ainsi, à chaque seconde le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [4].

- Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s.
- Met environ 8 minutes pour parvenir à la terre.
- Distance moyenne soleil-terre est de 150 million kilomètres.
- Sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0,5 m.
- La température de corps noirs à la surface du soleil est d'environ 5780° k [5].
- Diamètre de soleil  $D=1,39.10^9$  m.

Au sol, le rayonnement a au moins deux composantes : une composante directe et une composante diffuse (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuage, sol) Sa valeur dépend de la pression, l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. L'intégration de l'irradiance sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance  $P(W. m^2)$  fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notions suivantes.

- AM0 : Hors atmosphère (application spatial).  $P = 1.36$  KW.  $m^{-2}$ .
- AM1 : le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).
- AM2 : spectre standard, le soleil est à 45°.  $P = 1.36$  KW.  $m^{-2}$ .

Les conditions standard de caractérisation sont définies par la norme **IEC-609004** de **International Electrotechnical commission (IEC)** selon une distribution spectrale **AM2** globale (la somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité  $100 \text{ mW/cm}^2$  et pour une température de cellule de  $25^\circ\text{C}$  [6].



**Figure I.2 :** Rayonnement solaire globale sur un collecteur photovoltaïque

### I.2.3: L'énergie solaire

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. La valeur de l'éclairement est communément prise égale à  $1360 \text{ W/m}^2$ . Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à  $1000 \text{ W/m}^2$  à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet Photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

$h$  : la constante de Planck [ $\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

$c$  : la vitesse de la lumière [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

$\lambda$  : la longueur d'onde [ $\text{m}$ ].

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [6]. Une façon Commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (\text{I.2})$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de  $0,22$  à  $10$  microns ( $\mu\text{m}$ ) [7].

### I.3. Cellule photovoltaïque

#### I.3.1. Historique

Le physicien français Edmond Becquerel décrivit le premier l'effet photovoltaïque en 1839 et Einstein en expliqua les mécanismes en 1912, mais cela resta une curiosité scientifique de laboratoire jusque dans les années 50. Becquerel découvrit que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand on les expose à la lumière.

L'effet fut étudié dans les solides tels que le sélénium par Heinrich Hertz dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre [8].

De rapides progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes de *Bell Laboratoires* qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir du procédé de tirage Czochralski. L'industrie des semi-conducteurs contribua largement au développement des cellules solaires.

La taille des cellules PV accompagna la progression de la dimension des wafers de l'industrie des circuits intégrés, de 5,08 cm dans le début des années 70, à 7,62 cm à la fin des années 70, et à 10,16 cm au début des années 80, avant de s'émanciper par la découverte de la croissance de lingots multi cristallins parallélépipédiques qui donnèrent des plaquettes carrées de 10 cm de côté et qui atteignent aujourd'hui couramment 12.5 à 15 cm de côté [8].

#### I.3.2. Structure physique

La cellule est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

La cellule la plus commune d'aujourd'hui est une cellule simple au silicium de jonction PN avec un rendement qui arrive jusqu'à environ 17% [9]. Ce matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p (Figure I.3). Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%). La face arrière peut être entièrement métallisée.

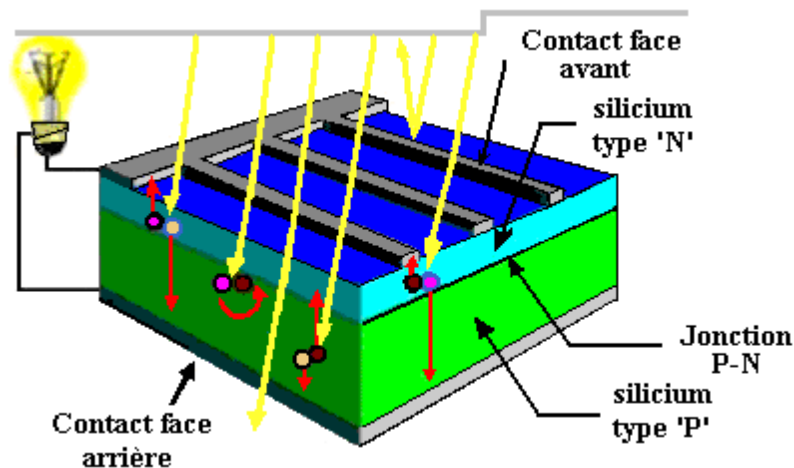


Figure 1.3 : Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard.

### I.3.2. Rendement

Le rendement de la cellule PV est un des critères de qualité de ce type de capteur. Ainsi, cette mesure est effectuée selon des normes précises en fixant un type de spectre lumineux, une pression et une température de fonctionnement. Nous parlons ici uniquement du rendement global de conversion d'énergie des photons en électrons traduit par la puissance électrique délivrée par les cellules PV, par rapport à un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  de type AM1.5 pour pouvoir ainsi effectuer des comparaisons objectives des diverses performances de cellules.

Le rendement dépend du matériau utilisé et des pertes liées à la technologie mise en œuvre pour réaliser une cellule. Parmi les matériaux les plus utilisés et en raison de son faible coût, on trouve le silicium (Si) sous ses différentes formes cristallines (monocristallin, polycristallin ou bien amorphe), Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, Ils sont composés de cristaux de silicium de grande pureté.

### I.3.3. Fonctionnement

Lorsque cette cellule sera exposée au rayonnement, les photons créent des paires d'électron trou avec une énergie plus grande que la bande d'énergie du semi-conducteur. Ceci s'appelle l'effet photovoltaïque, a été découvert par Edmond Becquerel en 1889[8]. Les porteurs de charge nouvellement créés dans la région d'épuisement sont séparés par le champ électrique existant. Ceci mène à une accumulation d'un potentiel de tension appelé photo-voltage. Dès qu'une charge sera reliée à la cellule, cette tension causera un courant (appelé le photo-courant) qui circulera dans le circuit.

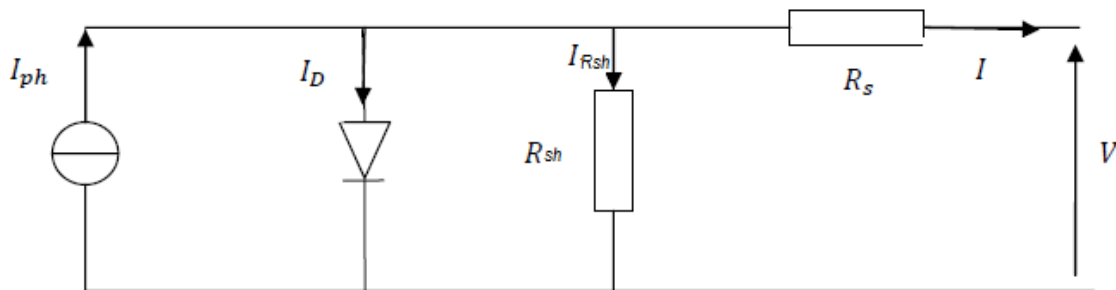
## I.4. Caractéristiques et modélisation de la cellule photovoltaïque

### I.4.1 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque

La (figure I.4) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant  $I_{ph}$  monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule [10] :

- La résistance montée en série ( $R_s$ ) représente la résistance de contacte et de connexion
- La résistance shunt ( $R_{sh}$ ) montée en parallèle représente le courant de fuite.
- Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN



**Figure I.4** : Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I \quad \text{Donc} \quad I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (\text{I.3})$$

L'expression résultante à une caractéristique courant-tension (I-V) après tout calcul est :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{V + (I \cdot R_s)}{nV_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + (I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (\text{I.4})$$

Les expressions de ( $I_{ph}$ ) et de ( $I_{sat}$ ) le courant de saturation de la diode sont donnés par :

$$I_{ph} = [I_{sc} + (K_i * (T - 298))] * \frac{G}{1000} \quad (\text{I.5})$$

$$I_{sat} = (I_{sc} * \exp\left[\left(\frac{V_{co}}{n \cdot V_t}\right)\right] - 1) * \left(\frac{T}{298}\right)^3 * \exp\left[\frac{q * E_g * \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T}\right)}{n \cdot K}\right] \quad (\text{I.6})$$

Dou :

$I_{ph}$  : Photo courant produit.

$I_{sat}$  : Courant de saturation de la diode

$R_s, R_{sh}$ : La résistance série et la résistance parallèle, respectivement.

$V_t = \frac{KT}{q}$  Tension thermique à la température T.

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

$K$  : Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} J/k$ )

$K_i$  : Constante ( $1.2 A / cm^2 K^3$ )

$n$  : Facteur de non idéalité de la jonction

$T$  : Température effective de la cellule en degré Kelvin

$E_g$  : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)

$G$  : l'ensoleillement en  $W / m^2$

#### I.4.2. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

Les plus usuels sont les suivantes :

##### I.4.2.1. Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ( $R_s$  nulle et  $R_{sh}$  infinie), ce courant se confond avec le photo-courant  $I_{ph}$  dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (I.4), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{q(I_{cc} * R_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{(I_{cc} * R_s)}{R_{sh}} \quad (I.7)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{q(I * R_s)}{nKT} \right) - 1 \right]$  devant  $I_{ph}$ . L'expression approchée du courant de court-circuit et alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (I.8)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule pratiquement

(  $I_{cc} = I_{ph}$  ).

**I.4.2.2. Tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ )**

C'est la tension  $V_{co}$  pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque)

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{q.V}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (\text{I.9})$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à :

$$V_{co} = V_t \ln \left[ \frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (\text{I.10})$$

**I.4.2.3. Puissance de la cellule PV**

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc...), la puissance électrique P(W) disponible aux bornes d'une cellule PV est :

$$P = VI \quad (\text{I.11})$$

P(w) : Puissance fournie par la cellule PV.

V(V) : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I(A) : Intensité débitée par la cellule PV.

**I.4.2.4. Puissance maximale d'une cellule PV**

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale  $P_{max}$  correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  multipliée par le courant de court-circuit  $I_{cc}$  :

$$P_{max} = V_{co} I_{cc} \quad (\text{I.12})$$

$P_{max}$  (W) : La puissance fournie par la cellule PV.

$V_{co}$ (V) : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

$I_{cc}$  (A) : L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie" (figure I.5), et la tension au point de puissance maximale  $V_{Pmax}$  est inférieure à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , de même que le courant fourni  $I_{Pmax}$  est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit  $I_{cc}$ . L'expression de la puissance en ce point est donnée par :

$$P_{max} = V_{Pmax} I_{Pmax} \quad (\text{I.13})$$

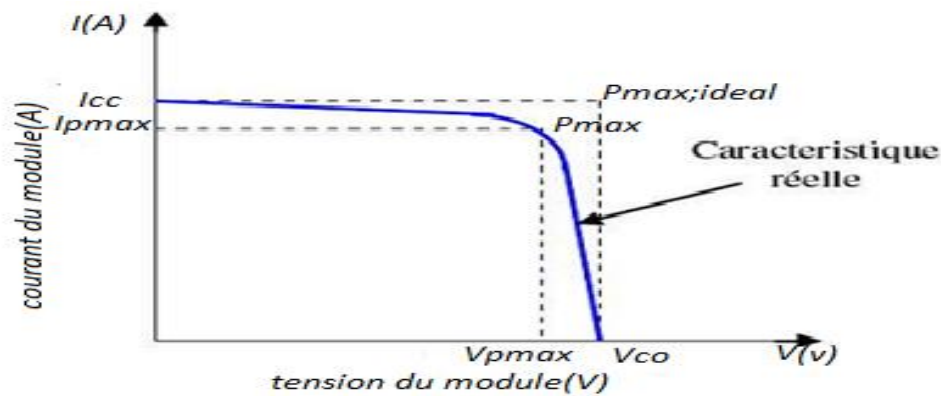


Figure I.5 : Puissance maximale idéale et pratique

#### I.4.2.5. Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule  $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$  et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{max}V_{max}}{P_{inc}} \quad (\text{I.14})$$

Avec  $P_{inc}$  est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

#### I.4.2.6. Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule  $P_{max}(I_{max}, V_{max})$  et le produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  par la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$ . Il est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{cc}V_{co}} \quad (\text{I.15})$$

### I.5. De la cellule au générateur photovoltaïque

La puissance électrique produite par une cellule industrialisée est très faible typiquement de 1 à 3W avec une tension de moins d'un volt [11].

Une cellule en tant que telle, étant donnée la faible tension à ses bornes ne suffit pas pour constituer à elle seule un générateur PV. Pour élever la tension, les cellules sont commercialisées sous forme des modules photovoltaïques. La plupart des fabricants de modules associent 36 cellules en série

#### I.5.1. Modules photovoltaïques

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge.

Le module photovoltaïque est donc un ensemble de cellules connectées en série, en parallèle ou en série parallèle. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

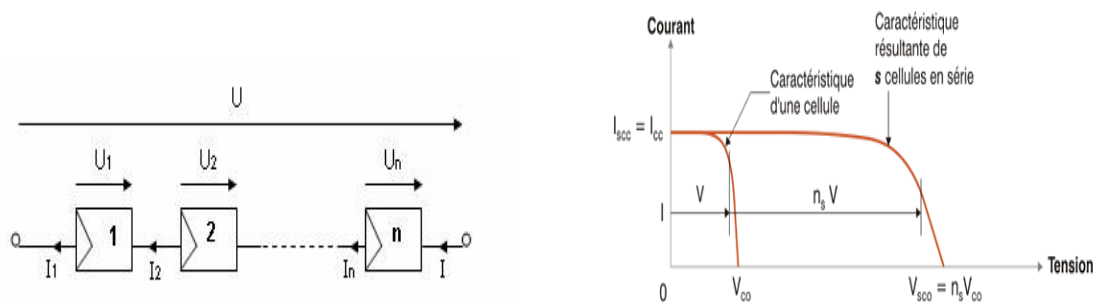
Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente.

#### I.5.2. Association de cellule photovoltaïque

##### I.5.2.1 Association série

Dans un groupement de  $N_s$  cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant des cellules reste le même. La (figure1.5) montre la caractéristique résultante ( $I_{sc}$ ,  $V_{sco}$ ) avec :

$$I_{sc} = I_{cc} \text{ et } V_{sco} = n_s * V_{co} \text{ [12]}$$

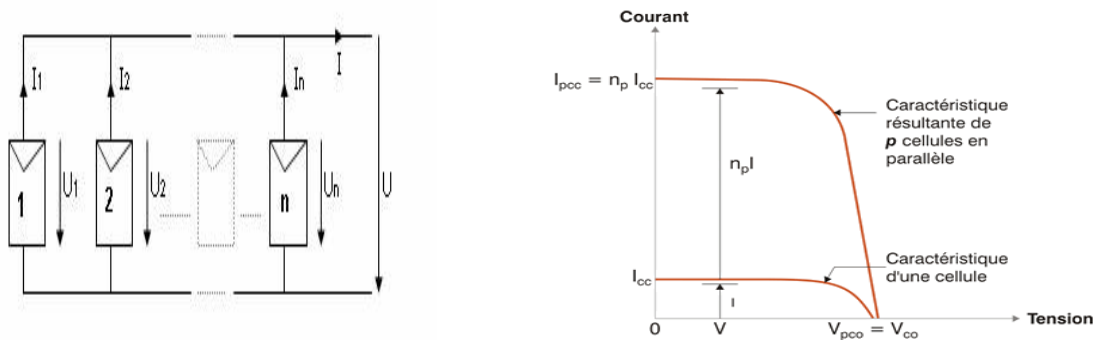


**Figure I.6** : la caractéristique résultante obtenue en association en série

**I.5.2.2 Association en parallèle**

Dans un groupement de  $N_p$  cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courant .la (figure 1.6) montre la caractéristique résultante ( $I_{pcc}$ ,  $V_{pco}$ ) Avec :

$$I_{pcc} = n_p * I_{cc} \text{ et } V_{pco} = V_{co} \text{ [12]}$$



**Figure I.7** : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles

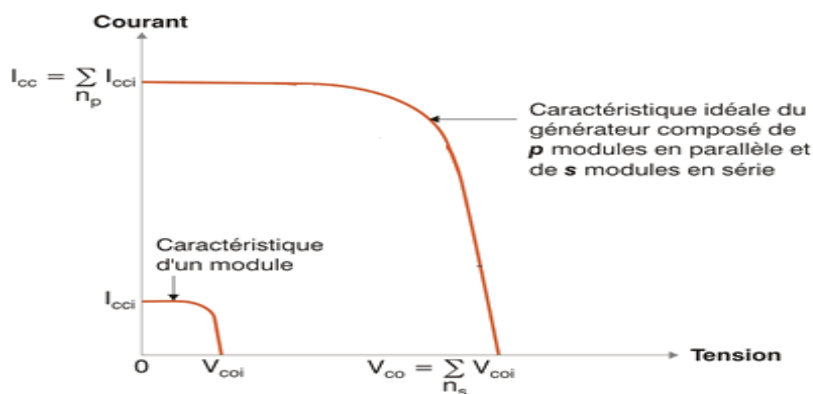
**I.5.2.3 Association en série/parallèle**

Selon l'association en série et en parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale son données par les relations suivant :

$$I_{spcc} = n_p * I_{cc} \text{ et } V_{spco} = n_s * V_{co} \text{ [12]}$$

$n_p$  : nombre de cellule en parallèle.

$n_s$  : nombre de cellule en série.



**Figure I.8** : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.

## I.6. Comportement d'un générateur photovoltaïque

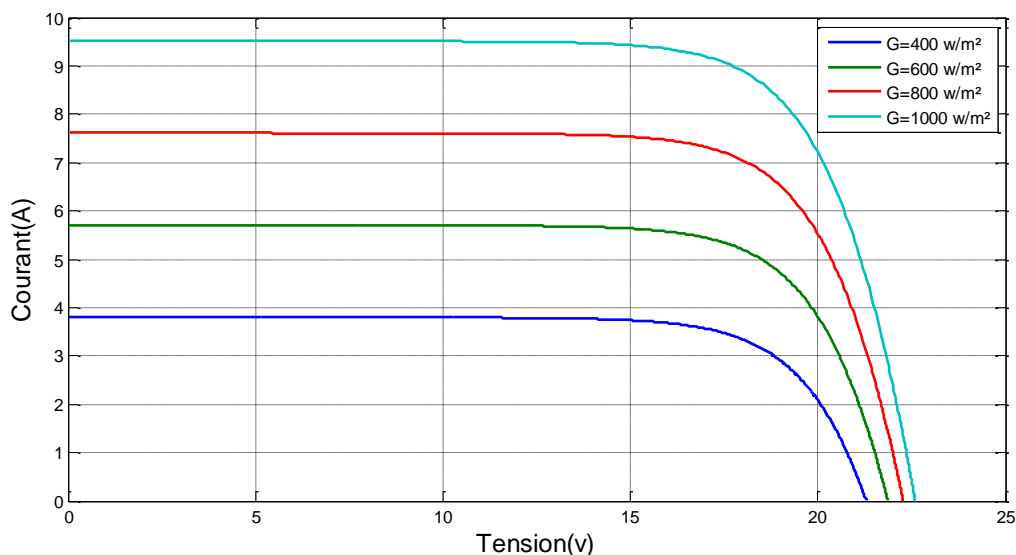
De par sa constitution, un générateur PV aura un comportement plus ou moins optimisé et pourra ainsi produire plus ou moins de puissance comme nous avons pu le constater dans une première analyse faite au paragraphe précédent.

L'objectif ici dans cette étude est de montrer l'influence de certain nombre de paramètres extérieurs telle que (l'ensoleillement ou irradiation, la température) sur le générateur PV.

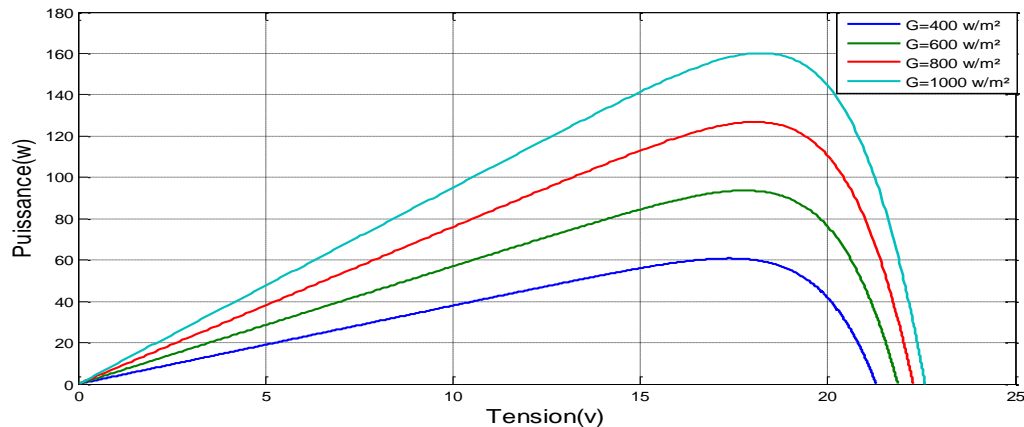
### I.6.1. Influence de l'ensoleillement

Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant changé à l'obscurité. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction de la photo courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire  $I_{cc}$  proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension  $V_{co}$  et donc un décalage du point  $P_{max}$  du panneau solaire vers les puissances inférieures.

Les graphes suivants représentent les caractéristiques P(V) et I(V) respectivement d'un générateur photovoltaïque pour une température constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) et un ensoleillement variable.



**Figure I.9 :** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$



**Figure I.10 :** L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement.

Ceci implique donc que :

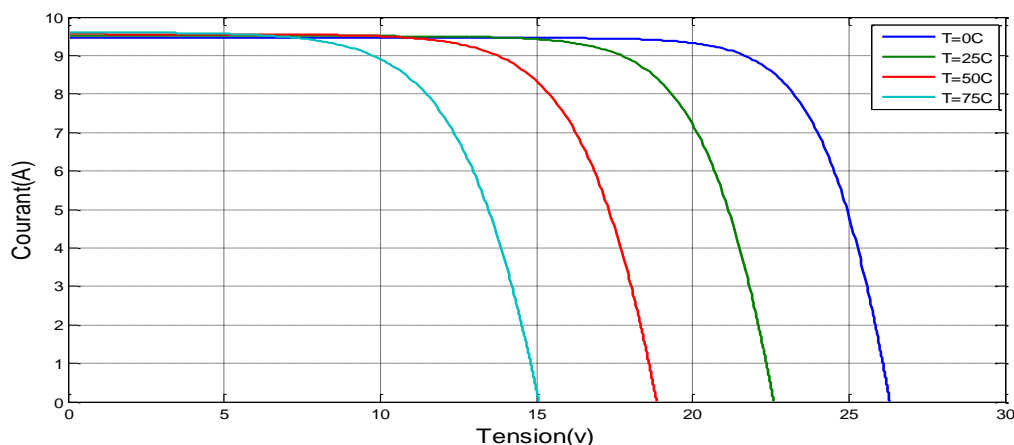
- La puissance optimale de la cellule ( $P_{\max}$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

### I.6.2. Influence de la température

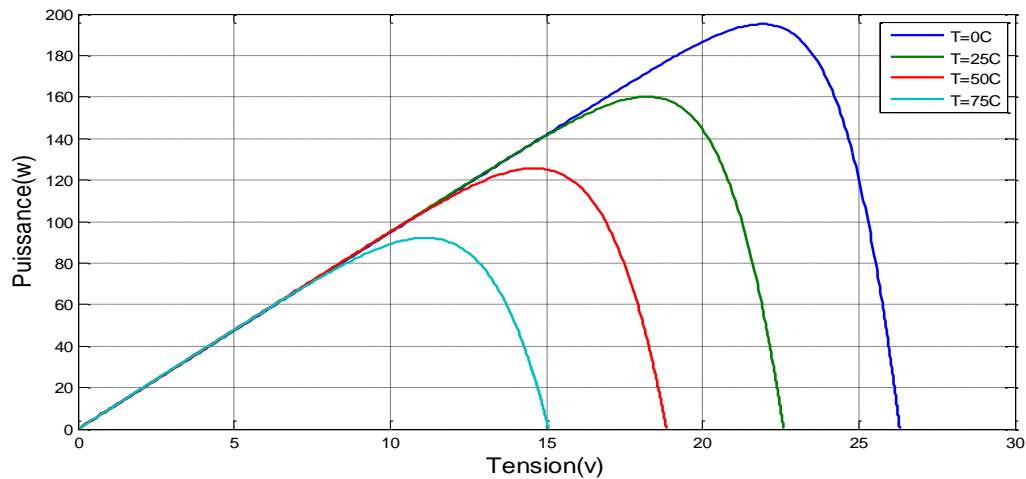
On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV.

Si on considère le réchauffement d'un module PV de  $0^{\circ}\text{C}$  à  $75^{\circ}\text{C}$  et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer l'influence de la température. On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV.

Les graphes suivant représentent des courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante.



**Figure I.11 :** L'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$



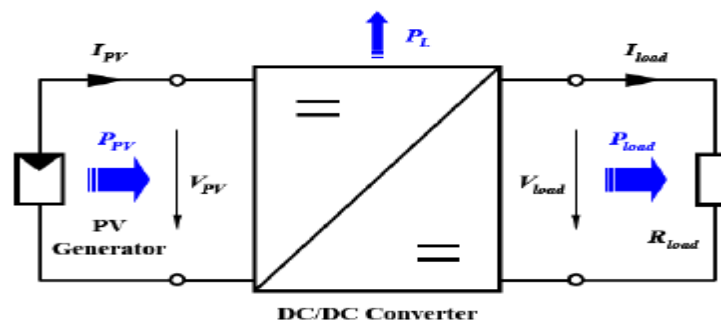
**Figure I.12** : L'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$

Nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente.

On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C.

### I.7. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

La (figure I.13) montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [13]



**Figure I.13** : Convertisseur DC/DC

Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de faire l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est fait en maintenant la puissance fournie sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.).

Contrairement au cas général où le convertisseur DC/DC est utilisé pour réguler la tension de sortie, ici c'est plutôt la tension d'entrée qui est régulée. La tension de référence (consigne) est alors constante ou imposée par un algorithme de commande.

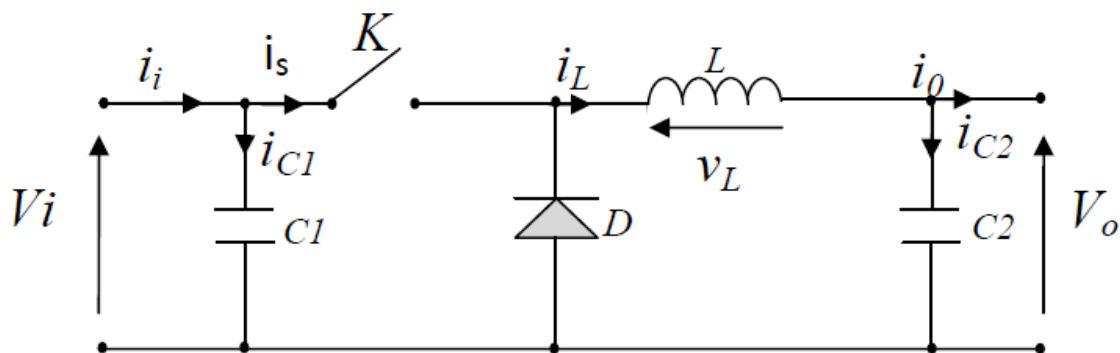
Si les pertes internes PL du convertisseur sont négligeables, alors les puissances d'entrée et de sortie sont égales.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trois types de convertisseur à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges.

### I.7.1. Hacheur dévolteur (buck)

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur buck ou hacheur série.

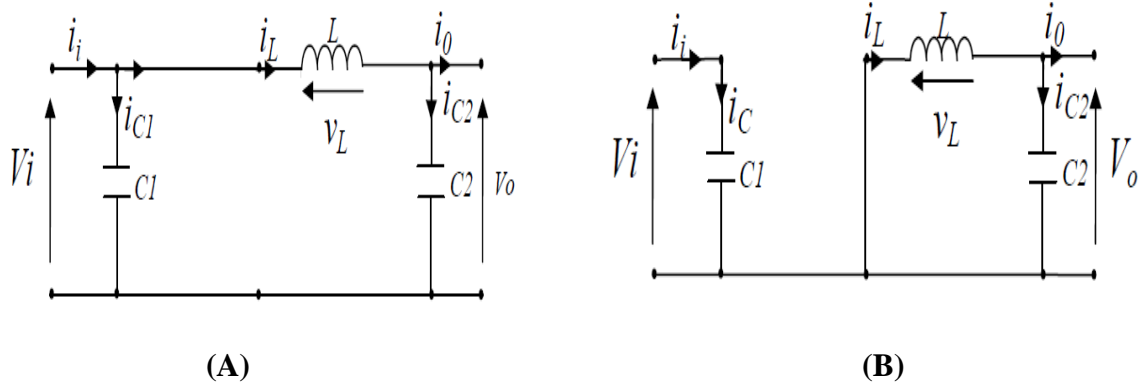
La (figure I.14) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur [14]. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion  $M = \frac{V_o}{V_i}$  change avec le rapport cyclique du commutateur.



**Figure I.14** : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur (buck).

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique.

Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La (figure I.15) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant  $d \cdot T_s$  et l'interrupteur ouvert pendant  $(1 - d) \cdot T_s$ .



**Figure I.15** : Schémas équivalents du hacheur dévolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la (figure I.15), on obtient les systèmes d'équations suivants :

Pour la première période  $d.T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (\text{I.16})$$

Pour la deuxième période  $(1-d).T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o(t) \end{cases} \quad (\text{I.17})$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période  $T_s$ , on utilise généralement l'expression suivante [14] :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) T_s = \frac{dx}{dt_{d.T_s}} d.T_s + \frac{dx}{dt_{(1-d).T_s}} (1-d).T_s \quad (\text{I.18})$$

En appliquant la relation (I.18) sur les systèmes d'équations (I.16) et (I.17), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

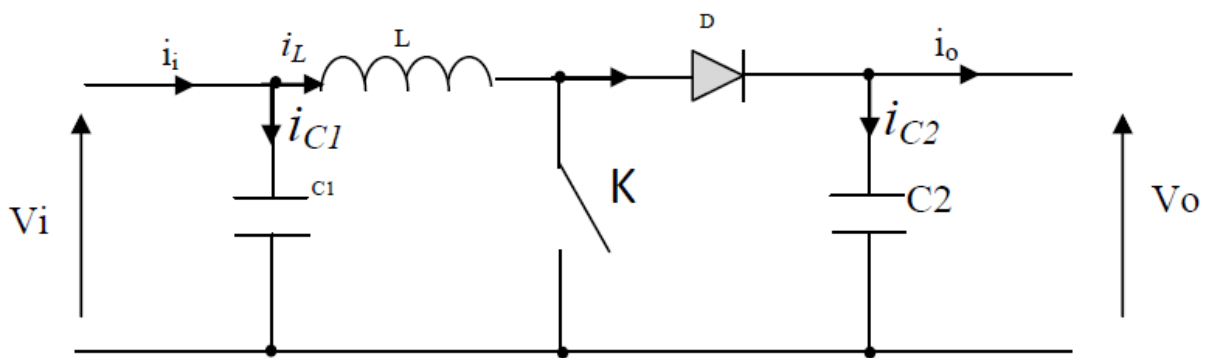
$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_L) + (1-d)T_s i_i \\ C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} T_s = dT_s(i_L - i_o) + (1-d)T_s(i_L - i_o) \\ L \frac{di_L(t)}{dt} = dT_s(V_i - V_o) + (1-d)T_s(-V_o) \end{cases} \quad (\text{I.19})$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} i_L(t) = \frac{1}{d} (i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt}) \\ i_o(t) = i_L(t) - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ V_i(t) = \frac{1}{d} (L \frac{di_L(t)}{dt} + V_o(t)) \end{cases} \quad (I.20)$$

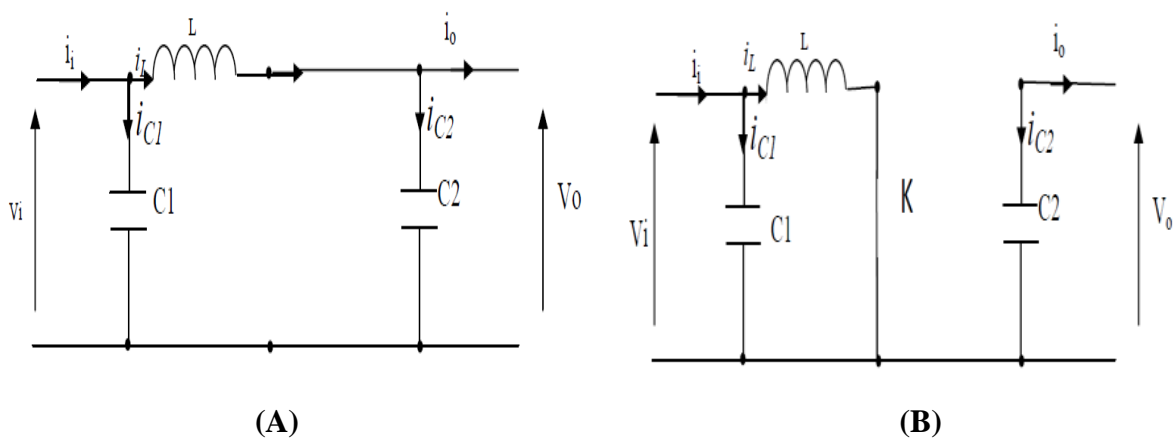
**I.7.2. Hacheur survolteur (boost)**

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle, son schéma de principe de base est celui de la (figure I.16). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [14].



**Figure I.16** : Schéma de principe d'un convertisseur (Boost)

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (figure I.17) des deux phases de fonctionnement donne [14] :



**Figure I.17** : Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert

Pour la première période  $d.T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_i(t) \end{cases} \quad (\text{I.21})$$

Pour la deuxième période  $(1 - d).T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (\text{I.22})$$

En appliquant la relation (I.18) sur les systèmes d'équations (I.21) et (I.22), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [14] :

$$\begin{cases} i_L(t) = i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_o(t) = (1 - d)i_L(t) - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ V_i(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1 - d)V_o(t) \end{cases} \quad (\text{I.23})$$

### I.7.3. Hacheur dévolteur-survolteur

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée, son schéma de base est illustré par la (figure I.18) [14] :

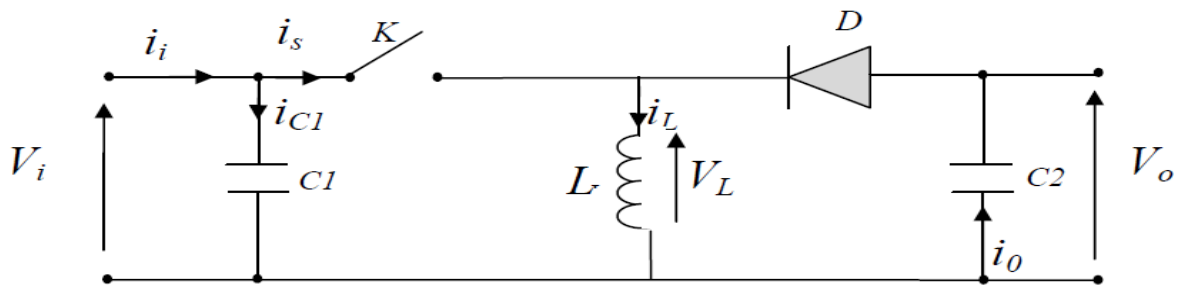
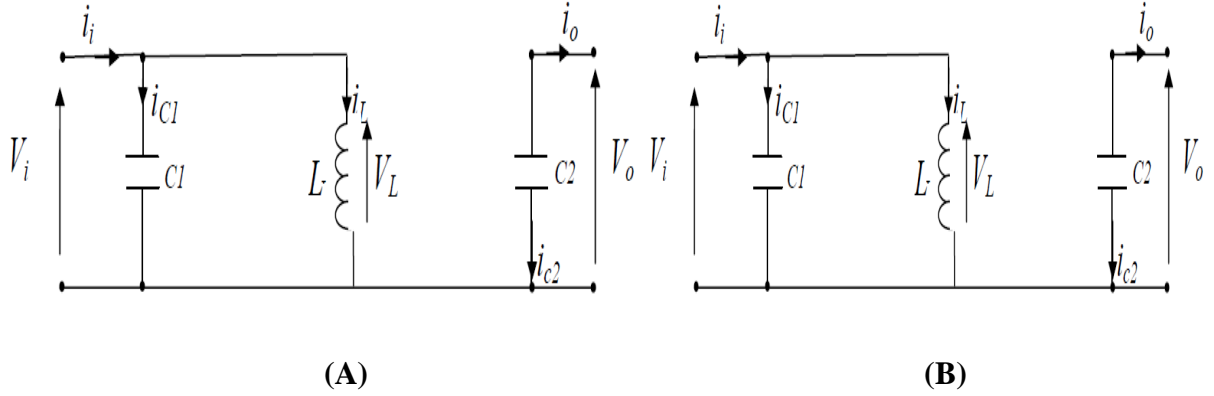


Figure I.18 : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur-survolteur

La (figure I.19) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles de fonctionnement [14].



**Figure I.19** : Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

Pour la première période  $d \cdot T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (\text{I.22})$$

Pour la deuxième période  $(1 - d) \cdot T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_o(t) \end{cases} \quad (\text{I.23})$$

En appliquant la relation (I.18) sur les systèmes d'équations (I.22) et (I.23), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur [14] :

$$\begin{cases} i_L(t) = \frac{1}{d} \left( i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \right) \\ i_o(t) = -(1 - d)i_L(t) - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ V_i(t) = \frac{1}{d} \left( -(1 - d)V_o(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} \right) \end{cases} \quad (\text{I.24})$$



### I.8.1.2.principe de fonctionnement de la machine à courant continu

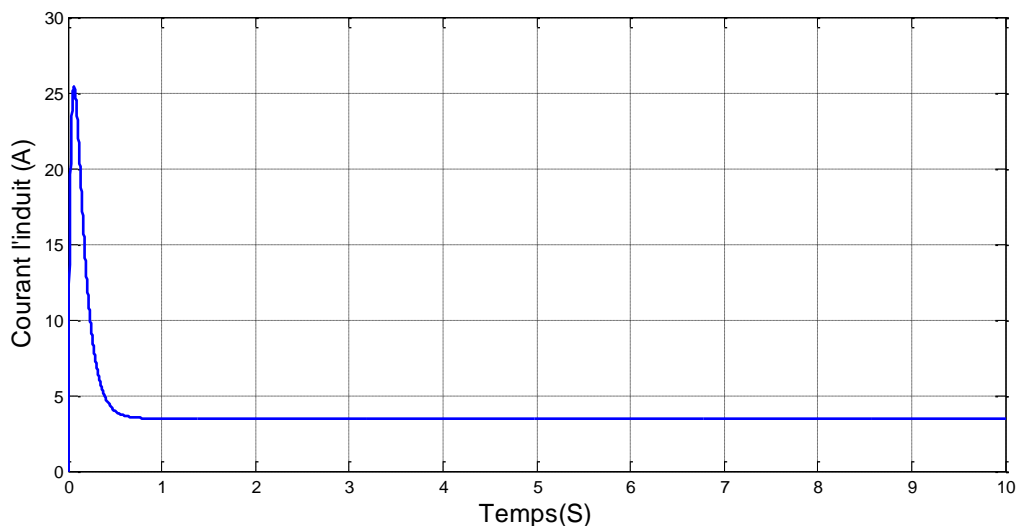
En fonctionnement moteur, lorsque l'inducteur est alimenté il crée un champ magnétique radial (flux d'excitation) dans l'entrefer, dirigé suivant les rayons de l'induit. Ce champs magnétique pénètre dans l'induit du coter du pôle nord de l'inducteur et sorte du l'induit du coter du pôle sud de l'inducteur.

Quand l'induit est alimenté, ses conducteurs situant sous un même pôle inducteur (même côte des balais) sont parcourus par un courant de même sens.

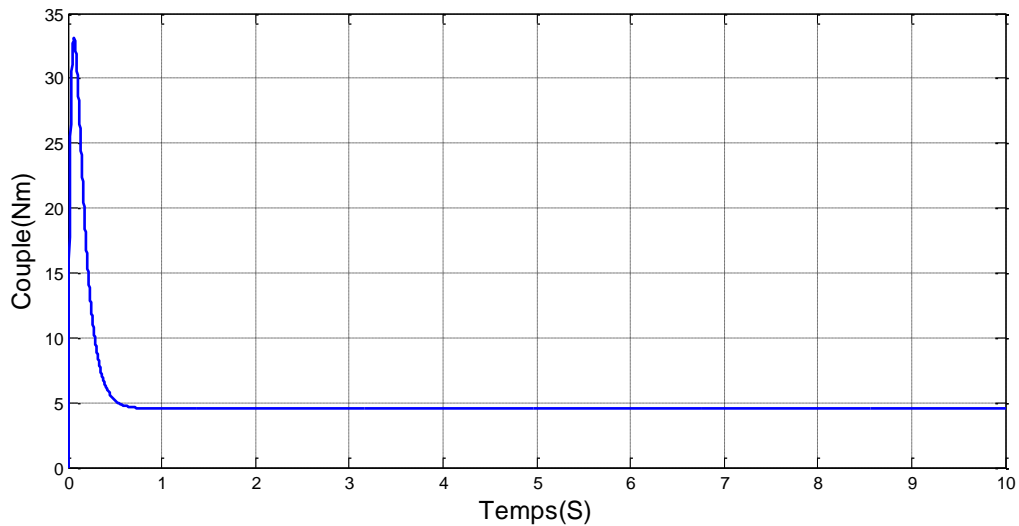
Les conducteurs situant sous l'autre pôle sont soumis à une force de même intensité et de sens opposer et les deux forces créent un couple de force qui fait tourner d'induit [17].

### I.8.1.3.Caractéristiques du moteur à courant continu

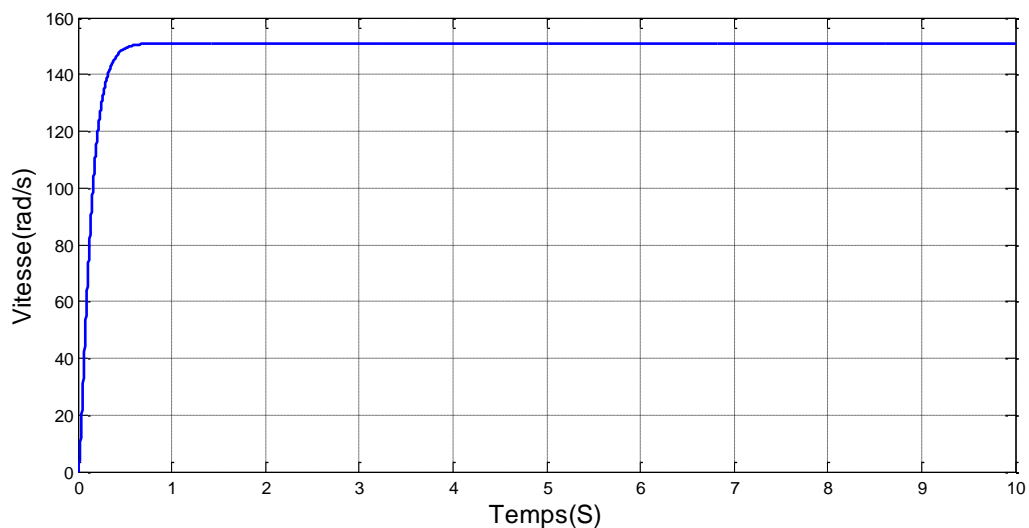
Les figures suivantes montrent les caractéristique du courant d'induit  $I_a(t)$ , et du couple électromagnétique  $C_{em}(t)$  et la vitesse de rotation  $W_r(t)$  du moteur à courant continu alimenté par une tension  $U=220$  v à vide  $C_r=0$



**Figure I.21** : Evaluation de la grandeur du courant d'induit du (MCC)



**Figure I.22** : Evaluation de la grandeur du couple électromagnétique de la (MCC)



**Figure I.23** : Evaluation de la grandeur de la vitesse de rotation de la (MCC)

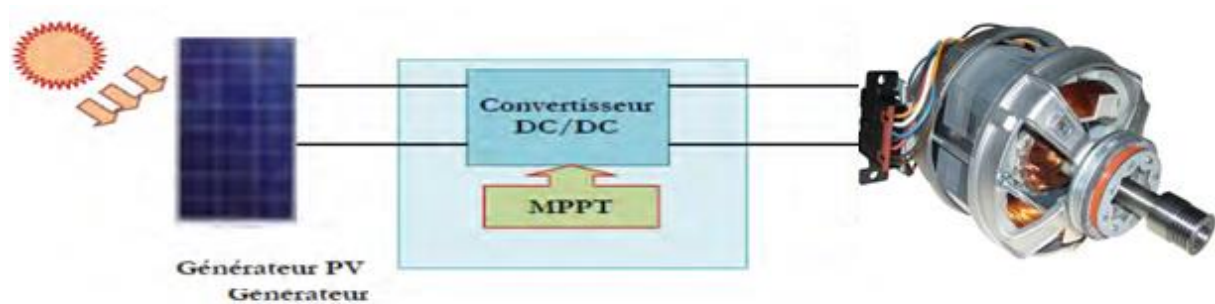
## I.9. Étude et Présentation d'un système de captage photovoltaïque

### I.9.1. Architecture générale d'un système photovoltaïque (PV)

L'intérêt essentiel des générateurs photovoltaïques est la possibilité d'autonomie énergétique qu'ils permettent. Les premiers générateurs ont été utilisés en 1958 pour les satellites, puis très largement par la suite pour l'exploration de l'espace. Les premières installations photovoltaïques utilisées au sol datent de 1956 et ont été conçues pour des applications en sites isolés et principalement dans les pays en voie de développement où les réseaux de distribution d'énergie sont généralement restreints aux grands centres urbains.

Un système photovoltaïque (PV) se compose dans son ensemble d'un champ de modules (générateur photovoltaïque) et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale.

Poser les modules, le câblage et un convertisseur continu/continu permettant d'alimenter le bus continu et de poursuivre le point de puissance maximum, et une charge (moteur à courant continu) La figure I.24) montre le schéma de principe d'un système photovoltaïque (PV) autonome.



**Figure I.24 :** Evaluation de la grandeur de la vitesse de rotation de la (MCC)

## I.10. Conclusion

Cet état de l'art préliminaire a permis de présenter les points qu'il faut améliorer sur les systèmes de conversion photovoltaïque (PV). En effet, étant donnée la recrudescence d'intérêts sur les énergies renouvelables, il est nécessaire, si l'on souhaite que le PV connaisse l'essor espéré dans l'avenir, d'améliorer et de sécuriser ce type de conversion d'énergie.

Dans la seconde partie de ce chapitre nous avons exposé brièvement quelques topologies de base des alimentations à découpages qui ne sont rien d'autre que des convertisseurs continus/continus. Ces dispositifs constituent une alternative aux anciennes alimentations stabilisées à caractéristique de sortie statique, où l'on aurait cherché à minimiser les défauts des alimentations stabilisées en terme de taille, d'encombrement, et de mauvais rendement en puissance, d'une part, et un apport de nouvelles fonctionnalités à la structure en terme d'adaptation à toute une gamme de valeurs désirées à la sortie du convertisseur d'autre part. Et cela par une incorporation d'un paramètre de commande d'adaptation, caractéristique qui leur confère une particularité intéressante dans la poursuite des consignes désirées.

Tout le long de ce travail, il est à noter qu'un effort important dans le domaine commence à se faire sentir, notamment du point de vue des publications scientifiques. Aujourd'hui, étant donnée la maturité des travaux dans ce domaine, un effort vers l'industrialisation dans un futur proche pourra être fait sur la base des derniers résultats de recherche.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à sa puissance maximal est différent MPPT rencontrées dans la littérature.

# *Chapitre II*

## *Commandes MPPT*

## II.1. Introduction

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique  $I(V)$  du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale.

A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale.

Ces commandes sont, connus sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking) c'est-à-dire poursuite du point à puissance maximale, associées à la commande du hacheur, les quelles assurent le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

Les techniques MPPT sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre. En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. Aussi, plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées.

Dans ce chapitre, on présentera plusieurs méthodes de commande MPPT basées sur la poursuite du point de puissance maximale. Notre travail est basé sur le développement de la méthode perturbation et observation (P&O). Cette commande utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

## II.2. Commandes MPPT

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour la commande du hacheur [15].

La technique de suivi du point de puissance maximal (MPPT : Maximum Power Point Tracking) a été développé depuis 1968, cette commande est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque [16].

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

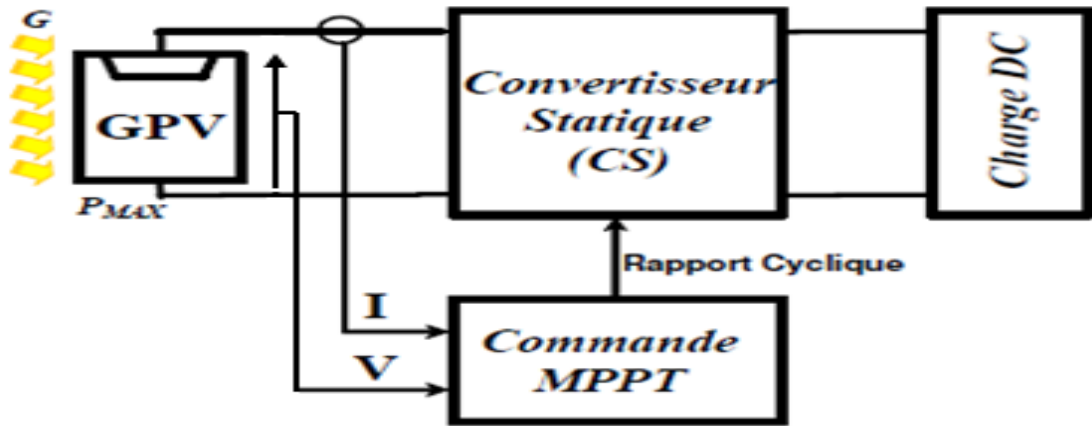


Figure II.1 : Schéma de principe du convertisseur MPPT [3].

### II.3. Principe de la Recherche du PPM

Ce principe assure que le système sera toujours amené à son optimum de puissance est décrit schématiquement par la (figure II.2 et figure II.3).

Les (figure II.2 et II.3) illustre trois cas de perturbation. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Dans ces cas, pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.

Dans le cas II.2(b) pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimal grâce à l'action d'une commande.

Enfin dans le dernier cas II.3 la variation du point de fonctionnement peut se produire lié à la variation de température de fonctionnement du GPV, bien qu'il faut également agir au niveau de la commande.

Dans le cas réel, cette variation est due aux trois cas précédents en même temps.

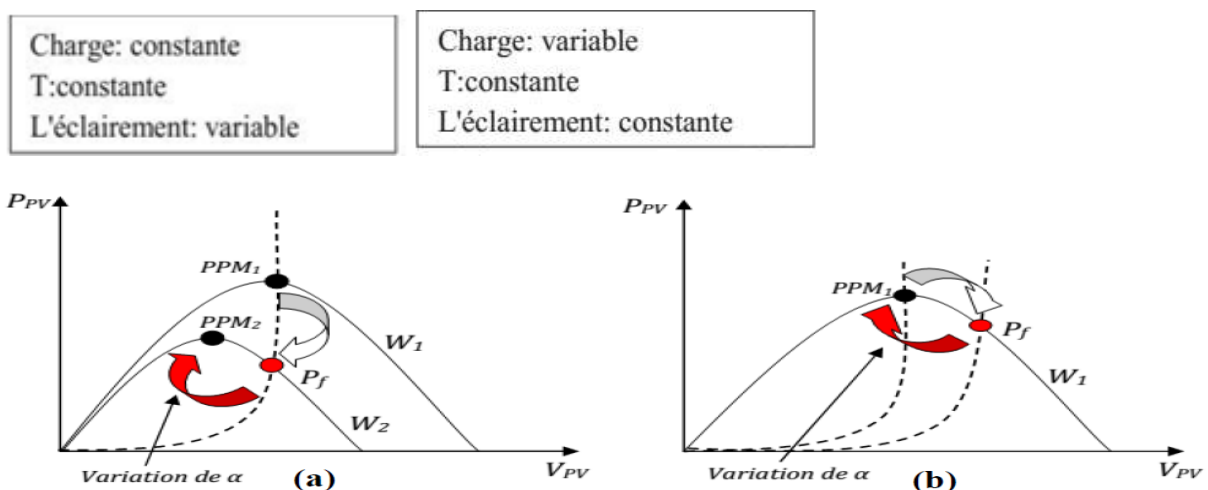


Figure II.2: Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (a) et la charge R (b).

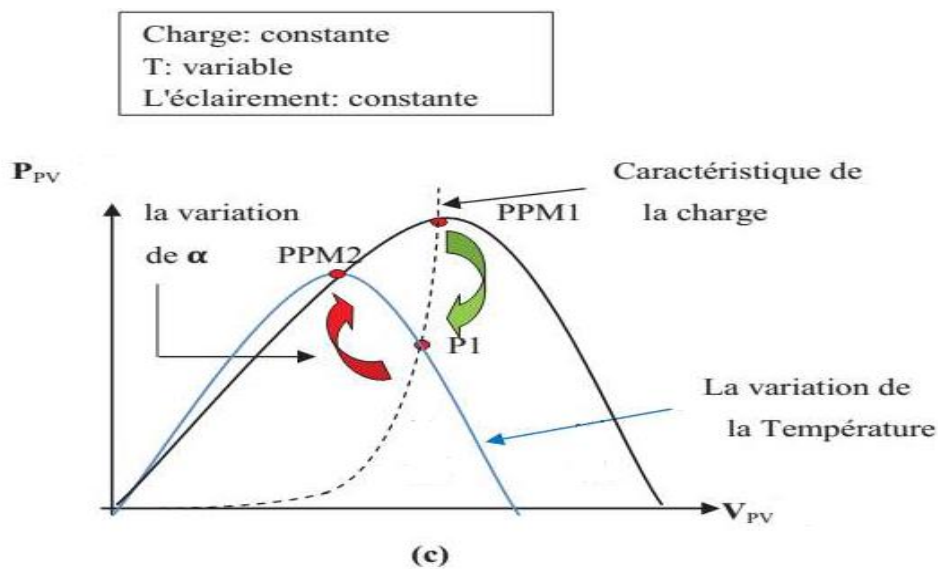


Figure II.3 : Fluctuation du PPM avec l'intensité de la température (c).

La comparaison des  $P_a$  et  $P_b$  mesurées respectivement aux instants (t-1) et (t) permet de chercher le point de la puissance maximale, (figure II.4) en incrémentant ou décrémentant le rapport cyclique  $\alpha$ . Si la dérivée est positive ( $P_a < P_b$ ), cela signifie que nous nous rapprochons du PPM en incrémentant  $\alpha$ , et si la dérivée de la puissance est négative ( $P_a > P_b$ ), cela veut dire que nous l'avons dépassé PPM nous devons décrémenter  $\alpha$ .

Une fois  $\alpha$  modifié, on prend sa valeur et on effectue une nouvelle mesure de  $I_{pv}$ ,  $V_{pv}$  pour calculer la nouvelle puissance.

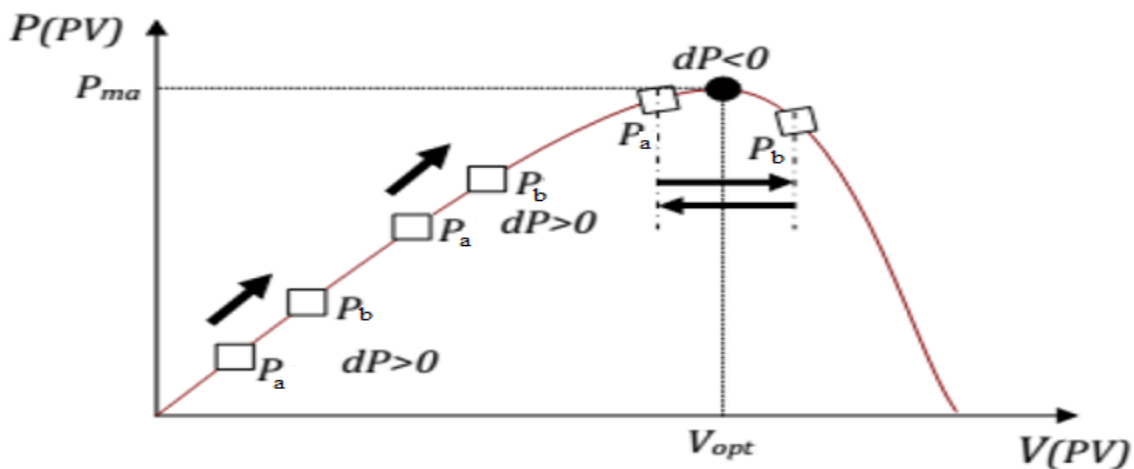


Figure II.4 : Présentation de l'organigramme amenant le système à un fonctionnement à son PPM.

## II.4. Techniques de commande MPPT

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPPT ont été développées. Ces techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la portée de l'efficacité, la vitesse de convergence, le suivi correct lors de l'irradiation ou le changement de température, le matériel nécessaire pour la mise en œuvre, entre autres [17].

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

### II.4.1. Méthodes indirectes

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{cc}$  ou  $V_{co}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes 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 pouvant 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...[18].

### II.4.2. Méthodes directes

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal MPP à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV.

Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une haute puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement.

La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, 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.

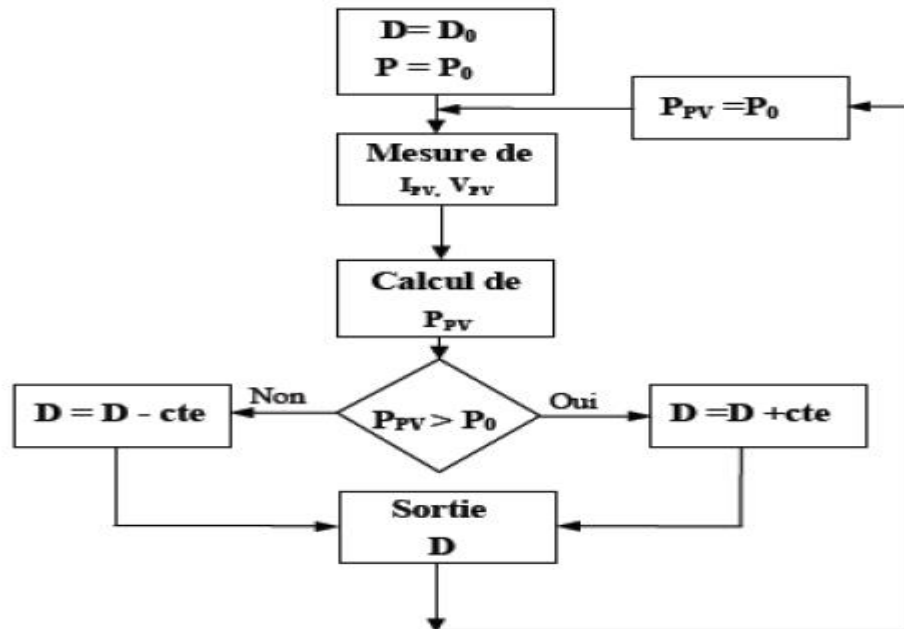
Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance, etc....[18]

## II.5. Différents types de commandes MPPT

Plusieurs publications sur les commandes de recherche du point de puissance maximale apparaissent dans la littérature, et ce depuis les années 1970. Ces commandes diffèrent par leur principe de fonctionnement, leur précision et leur rapidité de recherche. Dans ce qui suit, nous allons citer les principales commandes rencontrées dans la littérature.

### II.5.1. Premières commandes MPPT

En Janvier 1968, A.F. Boehringer a publié la première loi de commande MPPT adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. La commande, basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permet de maintenir le fonctionnement du système à son point de puissance maximale. A partir des mesures du courant délivré par le panneau photovoltaïque  $I_{pv}$  et de la tension  $V_{pv}$ , la méthode consiste à calculer la puissance à l'instant  $T_i$  et la comparer à la valeur mémorisée à l'instant  $T_{i-1}$ . Par la suite, un nouveau rapport cyclique est calculé et est appliqué au convertisseur statique [19].



**Figure II.5** : Principe de la première commande MPPT numérique.

Ce principe de commande est toujours valable, il est appliqué actuellement sur des algorithmes numériques plus performants, avec un temps de réaction et une précision de recherche PPM améliorés.

### II.5.2. Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité

Ces commandes sont basées sur des relations de proportionnalité entre les valeurs optimales du point de puissance maximale ( $V_{opt}$  et  $I_{opt}$ ) et les paramètres à vide et en court-circuit du module PV ( $V_{co}$  et  $I_{cc}$ ). Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension.

#### II.5.2.1 Commande en régulation de tension

Cette méthode consiste à comparer la tension délivrée par le panneau  $V_{PV}$  avec la tension optimale  $V_{OPT}$  considérée comme référence. L'erreur entre les deux tensions est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur statique dans le but d'avoir une tension égale à celle de référence. La tension de référence est obtenue à partir de la relation linéaire entre  $V_{OPT}$  et  $V_{co}$  du module PV :

$$V_{OPT} = K_V \cdot V_{co} \quad (\text{II. 1})$$

Où  $K_V$  est un facteur de tension qui dépend du GPV utilisé, généralement compris entre 0.71 et 0.78 [19].

L'inconvénient de cette technique, elle nécessite d'effectuer la mesure de  $V_{OC}$  de temps en temps. La charge doit être donc déconnectée pendant cette mesure, ce qui provoque une perte de puissance. Cette méthode est simple et robuste mais ne présente pas assez de précisions.

#### II.5.2.2. Commande en régulation de courant

Concernant cette méthode, le PPM peut être atteinte en comparant le courant de court-circuit  $I_{CC}$  mesuré à un courant de référence égal  $I_{OPT}$ . Ce courant est calculé par la relation suivante :

$$I_{OPT} = K_I \cdot I_{CC} \quad (\text{II.2})$$

$K_I$  Étant le facteur de courant qui dépend du GPV utilisé, généralement compris entre 0.78 et 0.92 [19].

Pendant la mesure du courant  $I_{CC}$ , il est nécessaire de court-circuiter le GPV, ce qui implique une perte de transfert de puissance.

Ces types de commandes nécessitent un seul capteur, ce qui les rend faciles à mettre en œuvre. Par contre, leur précision est faible à cause des procédés d'estimation des paramètres  $I_{CC}$  et  $V_{co}$ . De plus, à chaque mesure de courant ou de tension, un arrêt de transfert de puissance est obligatoire.

### II.5.2.3. Commande en régulation de puissance

Le principe de cette méthode est de mesurer les deux composantes principales, le courant  $I_{PV}$  et la tension  $V_{PV}$  de sortie du panneau. L'évaluation de la puissance instantanée de ce dernier est élaborée par une simple multiplication de ces deux composants  $P_{PV} = I_{PV} \cdot V_{PV}$  par un algorithme de recherche itératif qui se charge de trouver et de corriger en temps réel la position du PPM, en effectuant la recherche dans un sens [20].

L'algorithme maintient ce sens si la puissance de sortie augmente constamment et dans le cas contraire il change le sens de recherche, étant donné que l'opération toute entière est numérisée. On peut dire que le PPM à une certaine précision qui n'est jamais atteint, ce qui est dû d'une part aux valeurs arrondies par la carte d'acquisitions, des grandeurs mesurées à la sortie du panneau PV, et d'autre part, au calcul de la dérivée ( $dP$ ) qui est toujours approchée avec une certaine précision.

$$dP \approx \Delta P(k) = P(k) - P(k-1) \quad (\text{II.3})$$

### II.5.3. Les MPPT à implantation analogique

L'implantation de ce type de commande est effectuée avec des composants logiques et analogiques sans aucun calcul ne soit nécessaire, ceci permet aux commandes d'avoir une grande dynamique et donc d'être très rapides vis à vis des diverses perturbations, les temps de réponse étant limités uniquement par les temps de retard des différents éléments analogiques. De plus, leur principe est souvent moins complexe que l'équivalent en numérique. Ainsi, ce type de commande présente l'avantage de pouvoir fonctionner à des fréquences de découpage plus élevées que dans un circuit numérique classique. Elles peuvent notamment dépasser le MHz. Cela permet de réduire d'autant la taille des composants passifs des convertisseurs statiques assurant la conversion de puissance [20].

Les premiers travaux relatant une implantation analogique performante ont été décrits en 1988 par SALAMEH (figure II.6). Malgré un algorithme performant permettant l'oscillation du système autour du point de puissance maximum dans des conditions de variations lentes d'éclairement, cette commande nécessite d'effectuer un compromis entre rapidité et précision (faible taux d'oscillations et bonne dynamique en cas de changement d'éclairement ou de charge). À cause de cela, l'implantation analogique de ce type de commandes longtemps été exclue.

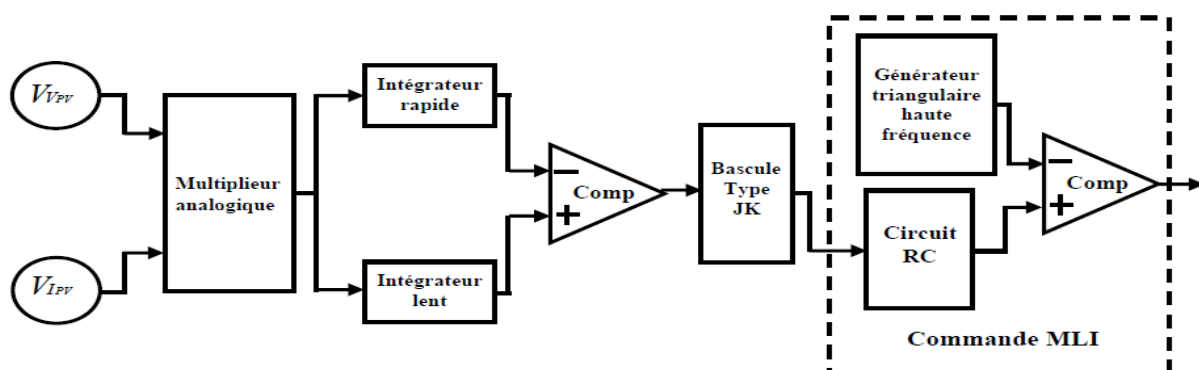


Figure II.6 : Commande MPPT simple implantée en analogique.

### II.5.4. MPPT RCC (Ripple Corrélation Control)

C'est une technique qui utilise les ondulations engendrées par le convertisseur statique dans les grandeurs mesurées du GPV (courant – tension et puissance).

Le principe est basé sur la dérivé de puissance par rapport au temps ( $\frac{d_p}{dt}$ ) au lieu de ( $\frac{d_p}{dv}$ ), le point maximum est obtenue directement par la relation analytique du rapport cyclique  $\alpha(t)$ .  
Où :

$$\alpha(t) = K \int \left( \frac{d_p}{dt} \cdot \frac{d_v}{dt} \right) dt \quad (\text{II. 4})$$

La relation montre que cette technique est facile à l'implantation analogique, la constante K dépend du gain du circuit de commande du convertisseur statique.

La réponse dynamique dépend aussi de la fréquence de hachage. Seule la perturbation du point de fonctionnement engendrée par les ondulations de courant ou de tension présente un inconvénient dans cette MPPT [21].

### II.5.5. MPPT basé sur le balayage du courant (CurrentSweep)

Cette méthode utilise le balayage du courant  $I_{PV}$  pour tracer la caractéristique (I, V) dans un intervalle fixe du temps, donc le  $V_{mpp}$  sera calculé à travers le tracé de cette courbe. La fonction de balayage est choisie de façon que [21] :

$$f(t) = k \frac{df(t)}{dt} \quad (\text{II. 5})$$

La puissance du GPV est donnée par

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = v(t) \cdot f(t) \quad (\text{II. 6})$$

Au PPM,  $\frac{dp}{dt} = 0$  et, en substituant (II.5) on obtient l'équation suivante :

$$\frac{dp}{dt} = \left[ v(t) + k \frac{dv}{dt} \right] \frac{df}{dt} = 0 \quad (\text{II. 7})$$

Or la solution de l'équation différentielle (II.5) est :

$$f(t) = C \cdot \exp\left(-\frac{t}{k}\right) \quad (\text{II. 8})$$

Pour avoir une exponentielle décroissante qui tend vers  $I_{max}$  on fait le choix ( $C = I_{max}$ ), l'équation (II. 8) peut s'implanter facilement avec un circuit capacitif en décharge.

### II.5.6. Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue

Les commandes basées sur la logique floue sont de plus en plus utilisées suite à l'évolution des microcontrôleurs. Dans notre cas, le principe est basé sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur et le changement d'erreur  $\Delta E$  et une variable de sortie  $\Delta D$  qui représente la variation du rapport cyclique servant à piloter le convertisseur statique pour chercher le PPM. La valeur de  $\Delta D$  est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée [19].

Cette méthode est performante surtout pendant le changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est liée à la complexité de la table de vérité employée, d'où la nécessité de choisir un microcontrôleur performant qui tient compte des différents paramètres électriques du panneau.

### II.5.7. Les commande MPPT basées sur les réseaux de neurones

Ces dernières années, la technique de réseaux de neurones est de plus en plus utilisée dans divers domaines d'application, permettant de résoudre des problèmes complexes. Le nombre de nœuds au niveau des différentes couches peut varier selon le degré de précision souhaitée de la commande. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées sont les paramètres caractéristiques d'un GPV associées à des données atmosphériques, la sortie est un signal représentant la valeur du rapport cyclique permettant de commander le convertisseur statique pour fonctionner au PPM [19].

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite un entretien et une maintenance régulière. En effet, pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau, l'apprentissage doit être révisé régulièrement.

### II.5.8. Méthode incrémentation de conductance

La méthode par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes : [22]

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{II. 9})$$

$$\frac{1}{V_{pv}} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{1}{dV_{pv}} \quad (\text{II. 10})$$

On définit la conductance de la source  $\frac{1}{V_{pv}}$  et incrémentation de la conductance  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$ .

Puisque la tension  $V_{pv}$  du panneau est toujours positive, le point de puissance maximale MPP est alors atteint si la conductance de la source égale l'incrément de la conductance de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance est supérieure il incrémente la conductance et vice-versa, comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \text{ si } \frac{1}{V_{pv}} > -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \\ \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \text{ si } \frac{1}{V_{pv}} = -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \\ \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \text{ si } \frac{1}{V_{pv}} < -\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \end{array} \right. \quad (\text{II. 11})$$

### II.5.9.Méthode « Hill Climbing »

La technique de commande « Hill Climbing » consiste à donner une perturbation sur le rapport cyclique qui se traduit par un déplacement du point de fonctionnement le long de la caractéristique puissance-rapport cyclique du générateur photovoltaïque. Théoriquement, la recherche doit s'arrêter lorsque le point de puissance maximale est atteint [23].

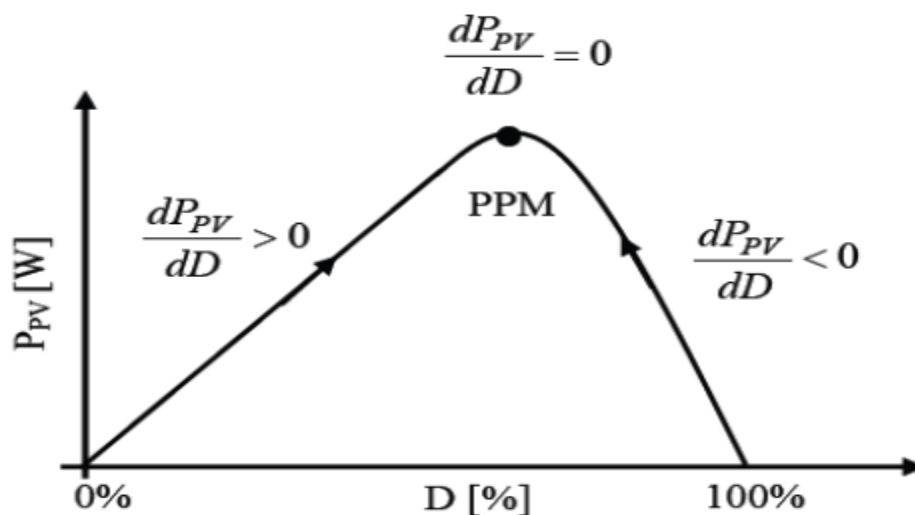


Figure II.7 :Relation entre la puissance et le rapport cyclique.

### II.6. Algorithme Perturbation et Observation (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, pour l'utiliser on considère que le PV fonctionne à un point qui n'est pas obligatoirement le MPP.

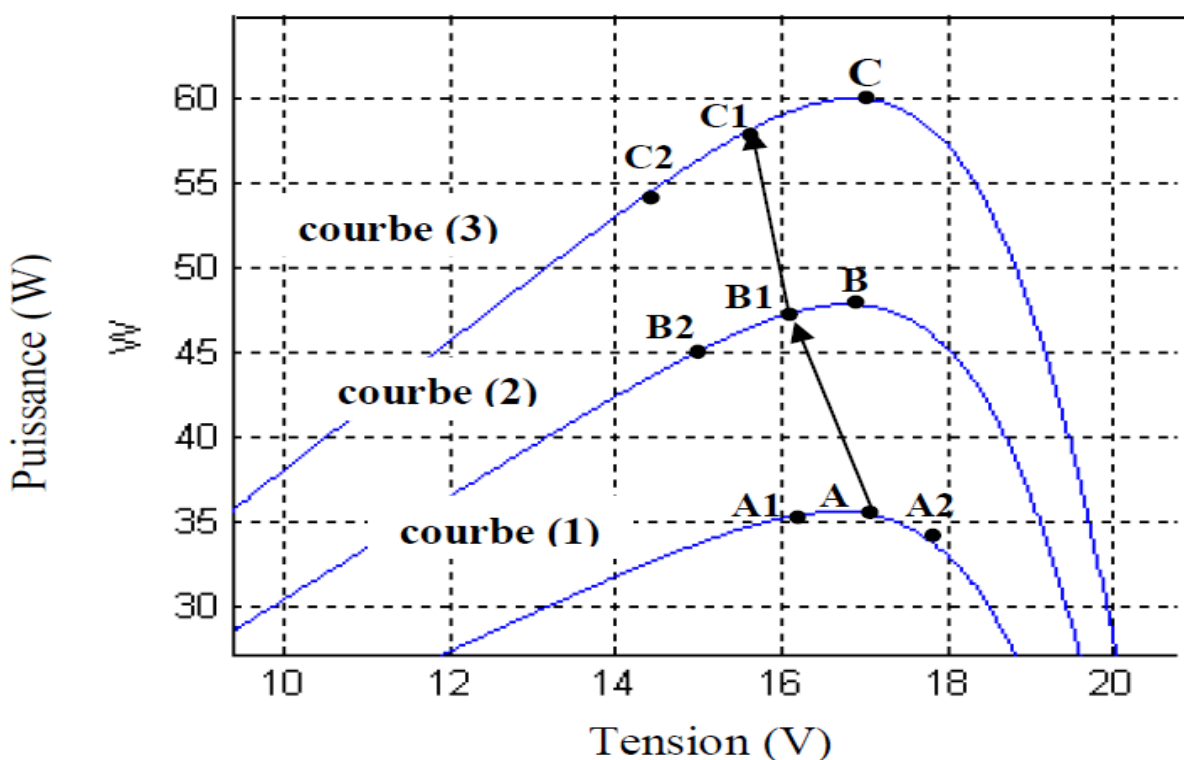
La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau  $V_{PV}$  avec un  $\Delta V$  et on observe la variation de l'énergie électrique délivrée à la sortie du PV.

- Si  $\Delta P > 0$  alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.
- Si  $\Delta P < 0$  le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

Sur la (figure II.8) on considère que le point de fonctionnement est sur la courbe (1), le MPPT oscille autour du MPP, du point  $A_2$  vers le point  $A$  puis vers le point  $A_1$  et vice versa, si la valeur de l'éclairement augmente la courbe  $P(V)$  du panneau se déplace vers la courbe (2) alors le MPPT perturbe le point de fonctionnement du point  $A$  vers le point  $B_1$  ce qui nous amène à  $\Delta P > 0$  avec  $[\Delta P = P(K) - P(K-1)]$  le MPPT continue à perturber les tensions dans la même direction c'est-à-dire vers le point  $B_2$ .

Si l'éclairement augmente toujours, le point de fonctionnement se déplace vers le point  $C_1$  de la courbe (3) au lieu du point  $B_2$  sur la courbe (2) alors le MPPT a toujours  $\Delta P > 0$  et il déplace le point de fonctionnement vers le point  $C_2$ .

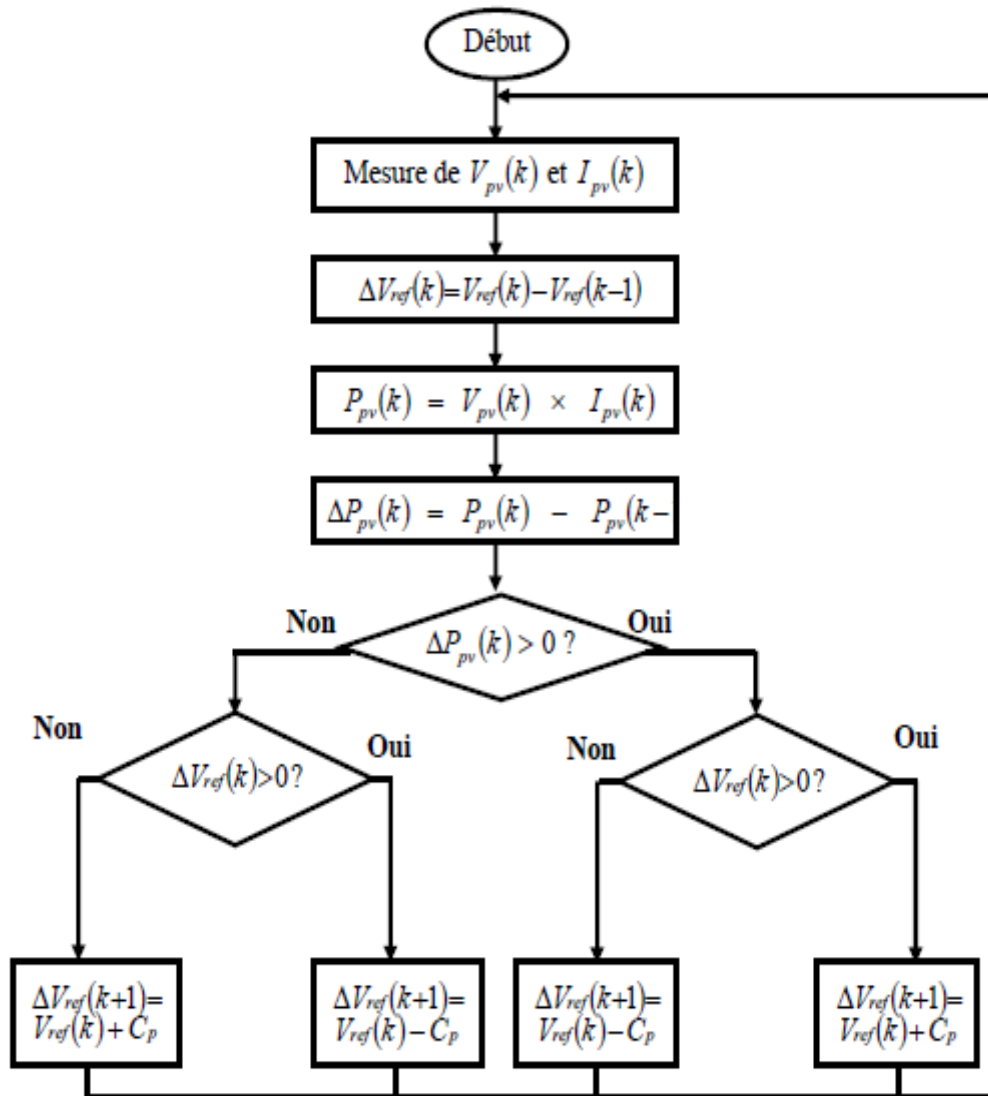
A partir des points  $A \rightarrow B_1 \rightarrow C_1 \rightarrow C_2$  l'algorithme P&O continue à s'éloigner du MPP ce qui donne une puissance qui sera perdue et le rendement diminue.



**Figure II.8 :** Comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement.

### II.6.1. Organigramme Perturber et Observer (P&O)

La figure II.9 illustre l'organigramme de la commande MPPT de type P&O. Pour déterminer la puissance à chaque instant, deux capteurs sont nécessaires pour mesurer les valeurs de la tension et du courant [15].



**Figure II.9:** Algorithme de la méthode P&O ( $C_p$  est la largeur du pas de perturbation).

A cause de la facilité de son implémentation, la méthode P&O est fréquemment utilisée bien qu'elle présente des problèmes d'oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM. En plus, et pour des variations brusques des conditions climatiques ou/et de la charge, cette méthode présente parfois des erreurs d'interprétation dans la direction qu'il faut suivre pour atteindre le PPM.

## II.7. Autres méthodes

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles, On peut citer : [24]

- les algorithmes d'identification en temps réel du MPP.
- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance).
- la méthode de l'oscillation forcée.

### II.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté plusieurs méthodes de commandes MPPT basées sur contre de réaction de puissance, comme la méthode de perturbation et observation ((P&O). Cette commande MPPT utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Nous avons constaté que l'algorithme P&O est mieux utilisé du fait de son efficacité de rapprocher le point de fonctionnement du générateur PV le plus près possible du PPM et de sa simplicité d'implantation.

Nous nous sommes basé sur la commande MPPT de type perturbation et observation (P&O) celle que nous allons utiliser au cours de notre travail.

# *Chapitre III*

*Les machines à courant  
continu (MCC) et leurs  
commandes*

# Chapitre III Les machines à courant continu (MCC) et leurs commandes

---

## III.1. Introduction

Les machines à courant continu (MCC) sont des machines électriques tournantes, elles sont des convertisseurs électromécaniques permettant la conversion bidirectionnelle entre une installation électrique à courant continu et un dispositif mécanique.

Dans l'industrie au sens large du terme sollicite de plus en plus des machines à vitesse variable, donc l'utilisation de la machine à courant continu (MCC) figure dans un grand nombre d'applications vu la simplicité de son fonctionnement son alimentation et sa commande, dans ce sens la machine à courant continu joue un rôle primordial, sur tout qu'un simple réglage de la tension d'alimentation permettrait un fonctionnement à vitesse variable.

## III.2. Conversion d'énergie

Une machine électrique est un dispositif électromécanique basé sur l'électromagnétisme permettant la conversion d'énergie électrique par exemple en travail ou énergie mécanique. Ce processus est réversible et peut servir à produire de l'électricité :

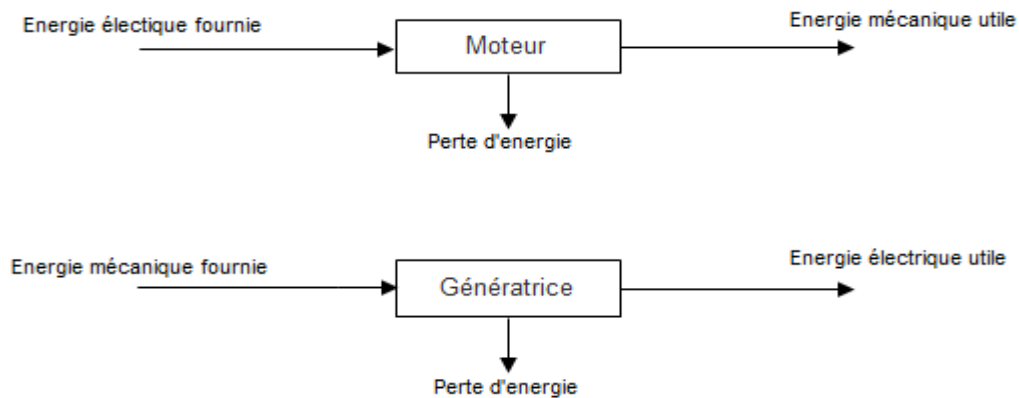


Figure III.1 : Conversion d'énergie.

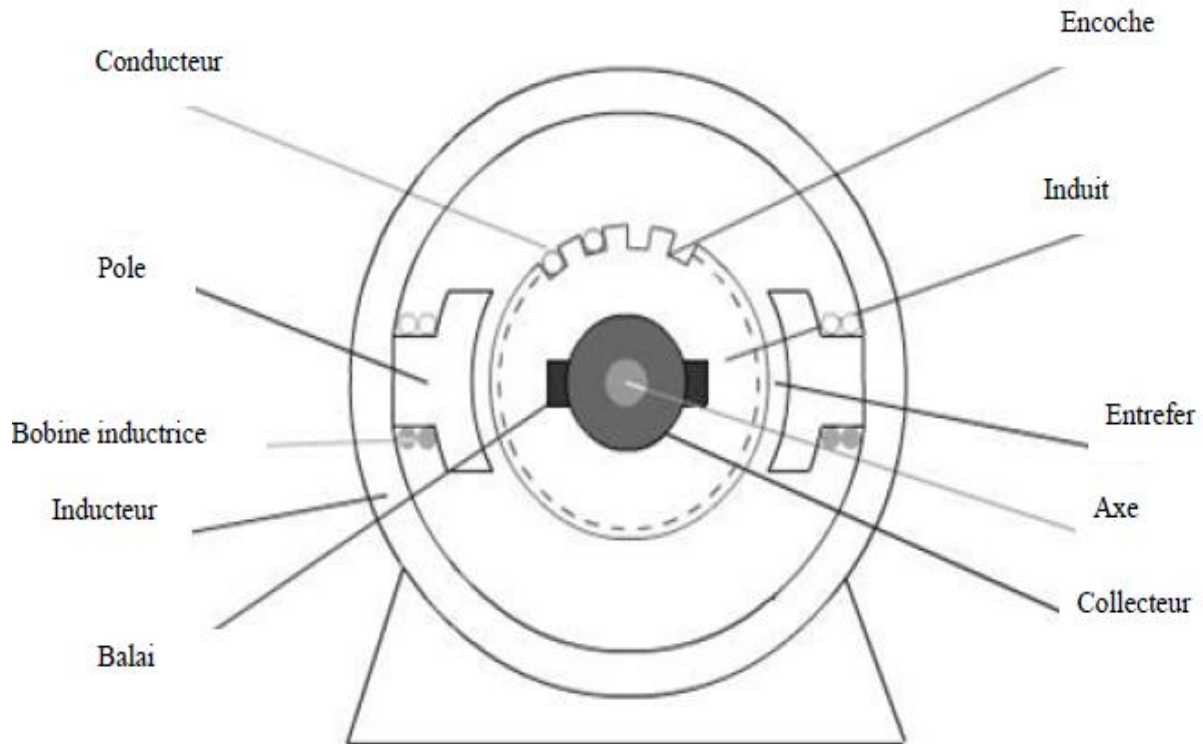
Les machines électriques produisant de l'énergie électrique à partir d'une énergie mécanique sont appelées des génératrices, dynamos ou alternateurs suivant la technologie utilisée.

Les machines électriques produisant une énergie mécanique à partir d'une énergie électrique sont appelées des moteurs.

Cependant, toutes ces machines électriques étant réversibles et susceptibles de se comporter soit en « moteur » soit en « générateur » dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse la distinction moteur/générateur se fait « communément » par rapport à l'usage final de la machine.

### III.3. Description des différent structure de la machine à courant continu

D'un point de vue structurel, une machine à courant continu comporte un induit tournant, un inducteur fixe créant un champ magnétique d'excitation, un redresseur mécanique (ballais-collecteur), les pôles de compensation et les pôles auxiliaires.



**Figure III.2 :** Constitution d'une machine à courant continu.

#### **Rotor (induit) :**

L'induit est la partie tournante de la machine composé d'un ensemble de bobinage identique reparti uniformément autour d'un noyau cylindrique.

Les conducteurs d'induit sont parcourus par des courants débités pas la machine, si le courant est plutôt faible on emploie des conducteur rond, on se sert de conducteurs rectangulaire qui permettent une meilleur utilisation du volume de l'encoche pour courant qui dépasse une cinquantaine d'ampères [25].

## Chapitre III Les machines à courant continu (MCC) et leurs commandes

---

### Stator (inducteur) :

L'inducteur (producteur de flux magnétique) c'est la partie fixe de la machine responsable de la production du champ magnétique d'excitation, pour des petites machine le bobinage de l'inducteur ou bien les bobinages d'excitation son remplacer par des aimant permanents.

L'inducteur comporte en générale deux pairs de pôle ( $2 * P$  pôles) :

$P=1$  : machine bipolaire (2 pôles)

$P=2$  : machine tétra-polaire (4 pôles)

$P=3$  : machine hexa-polaire (6 pôles)

$P=4$  : machine octal-polaire (8 pôles)

Ces pôles sont dits pôles principaux, constitués de noyaux massifs en acier doux, ils sont terminés par des épanouissements(ou cornes) polaires feuilletés pour réduire les pertes fer [26].

### Collecteur :

Placé à l'extrémité de l'induit et calé sur le même arbre, il est formé de lames de cuivre isolées entre elles par du mica. A l'arrière de la lame se trouve une ailette, usinée ou rapportée, dans laquelle sont soudées l'entrée d'une section et la sortie d'une autre. Il y a donc autant de lames que de sections.

### Balais :

Fixés sur l'inducteur par l'intermédiaire de porte-balais, ils sont en carbone et frottent sur le collecteur grâce à des ressorts .Puisque le collecteur tourne, le contact avec les balais est glissant et la densité de courant admise est relativement faible : 10 A /cm<sup>2</sup> environ. Les balais sont placés sur l'axe des pôles principaux. Il y a autant de balais que de pôles [26].

### III.4. Principe de fonctionnement de la machine

En fonctionnement moteur, lorsque l'inducteur est alimenté il crée un champ magnétique radial (flux d'excitation) dans l'entrefer, dirigé suivant les rayons de l'induit. Ce champs magnétique pénètre dans l'induit du coter du pôle nord de l'inducteur et sorte du l'induit du coter du pôle sud de l'inducteur.

Quand l'induit est alimenté, ses conducteurs situant sous un même pôle inducteur (même côte des balais) sont parcourus par un courant de même sens et donc d'après la «loi de LAPLACE»

$$\vec{dF} = I * \vec{dl} \wedge \vec{B} \quad \text{(III.1)}$$

Les conducteurs situant sous l'autre pôle sont soumis à une force de même intensité et de sens opposer et les deux forces créent un couple de force qui fait tourner d'induit [27]

## III.5. Types d'excitation de machine à courant continu

Il existe quatre types l'excitation de moteur à courant continu, qui se distinguent par le branchement de leur enroulement d'excitation :

### III.5.1. Moteur à excitation série

Le moteur a excitation série est constitué de deux enroulements, induit et inducteur montés en série (même courant). Il est alimenté par une source continue de tension « $U$ » et de courant « $I$ » qui débite sur un induit, de résistance « $R$ » d'inductance « $L$ » et de force contre électromotrice « $E$ » et d'un inducteur de résistance « $R_f$ » et d'inductance « $L_f$ » [28].

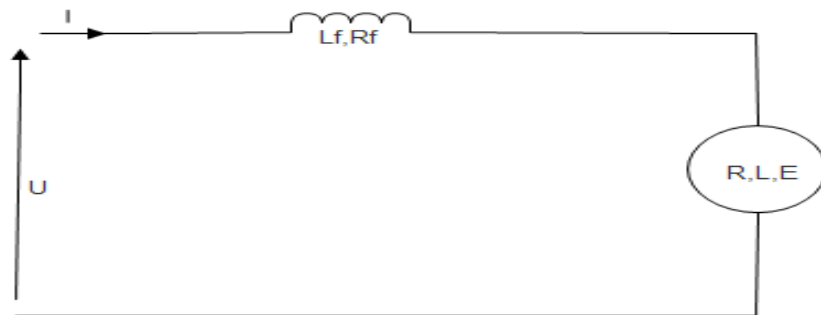


Figure III.3 : Schéma électrique du moteur série.

### III.5.2. Moteur à excitation shunt

Le moteur est à excitation parallèle ou dérivée (appelé couramment moteur shunt) lorsque son inducteur est aux bornes de l'induit. Il est alimenté par une source continue de tension « $U$ » et de courant « $I$ ». Le circuit inducteur constitué d'une self « $L_f$ » et d'une résistance « $R_f$ » est parcouru par un courant « $I_f$ », et celui de l'induit comportant une résistance, une inductance et une force contre électromotrice respectivement ( $R, L, E$ ) est parcouru par un courant « $I_a$ » [28].

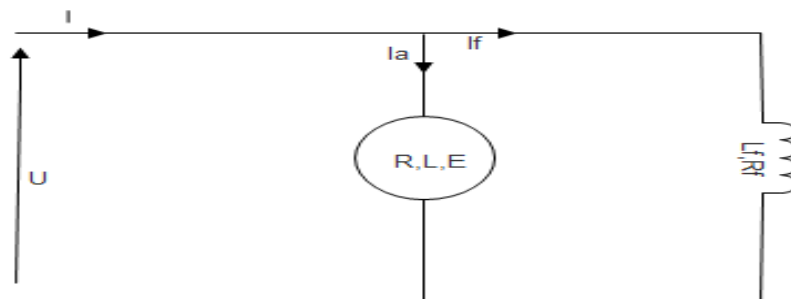


Figure III.4 : Schéma électrique du moteur à excitation shunt.

### III.5.3. Moteur à excitation composée

Le moteur est à excitation composée possède deux enroulements inducteur, série et shunt. Ce type de moteur à des propriétés intermédiaires entre celles du moteur série et shunt. Suivant le raccordement de l'enroulement inducteur shunt, on peut avoir deux types de composition, additionnelle ou différentielle.

#### III.5.3.1. Moteur composée à flux additif

Le moteur composée à flux additif est alimenté par une source de tension continue « $U$ », et le courant « $I$ ». L'inducteur série contenant une résistance « $R$ » et une inductance « $L$ » est parcourue par le même courant que l'induit qui comporte une résistance, une inductance et une force électromotrice respectivement ( $R, L, E$ ), et l'inducteur shunt de résistance « $R_f$ » et d'inductance « $L_f$ » est parcourue par un courant « $I_f$ » [28].

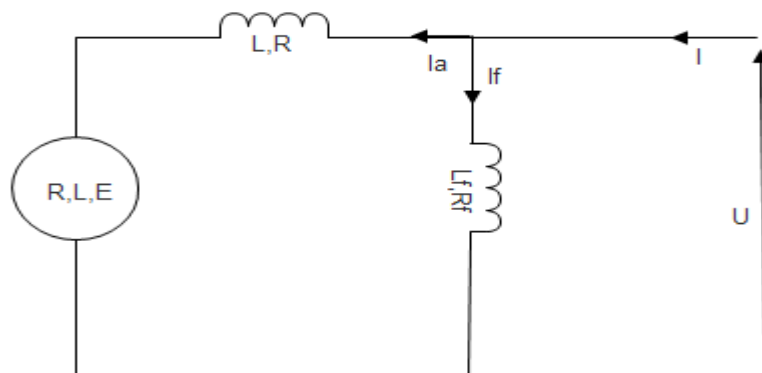


Figure III.5 : Schéma électrique du moteur composé à flux additif.

#### III.5.3.2. Moteur composée à flux soustractif

Le moteur composée à flux soustractif est alimenté par une source de tension continue « $U$ », et de courant « $I$ ». L'inducteur série qui comporte une résistance « $R$ » et une inductance « $L$ » est parcourue par le courant d'alimentation « $I$ » et l'inducteur shunt de résistance « $R_f$ » et d'inductance « $L_f$ » est traversé par un courant « $I_f$ » l'induit du moteur est constitué d'une résistance, d'une inductance et d'une force contre électromotrice respectivement ( $R, L, E$ ) [28].

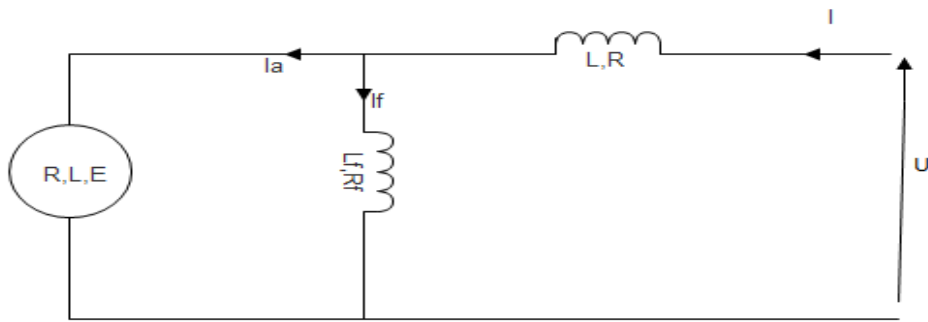


Figure III.6 : Schéma électrique du moteur compound à flux soustractif.

### III.5.4. Moteur à excitation séparée

Le moteur à excitation séparée est constitué de deux enroulements induit et inducteur qui sont alimentés séparément par deux sources distinctes. L'inducteur qui comporte une résistance « $R_f$ », et une inductance « $L_f$ » est excité par une source continue de tension « $V_f$ », et de courant « $I_f$ », et l'induit qui est constitué d'une résistance, d'une inductance et d'une force contre électromotrice respectivement ( $R, L, E$ ), est excité par une source continue de tension ( $V_a$ ) et de courant ( $I_a$ ) [28].

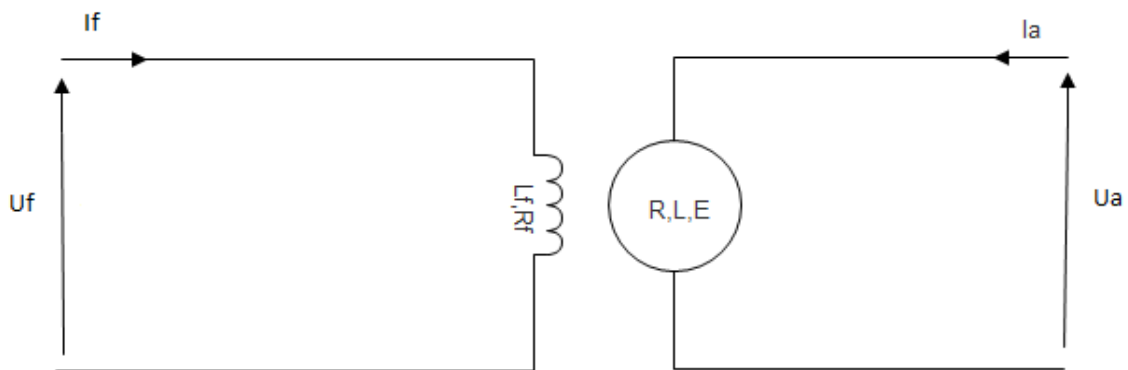
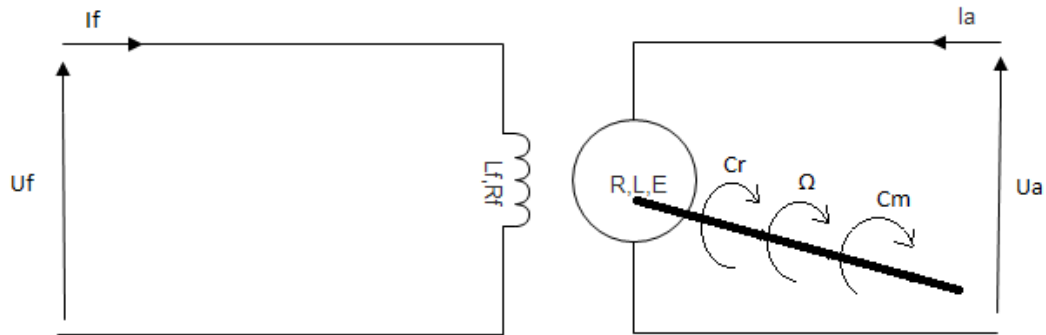


Figure III.7 : Schéma électrique du moteur à excitation séparée.

### III.6. Modélisation du moteur à courant continu

Le modèle du moteur au quelle nous allons nous intéresser et le moteur à excitation indépendante au quelle nous allons présenter ces expression mathématique, le schéma équivalent et représenté dans la (figure III.8)



**Figure III.8 :** Schéma électrique du modèle de moteur choisi.

### III.6.1. Equations électriques

Les équations électriques qui rigide de notre moteur à courant continue et :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_f = R_f \cdot I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \Rightarrow \frac{dI_f}{dt} = \frac{1}{L_f(U_f - R_f \cdot I_f)} \\ U_a = R_a \cdot I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \Rightarrow \frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{L_a(U_a - E - R_a \cdot I_a)} \end{array} \right. \quad \text{(III.2)}$$

En sachant que la force contre électromotrice E est :

$$E = P \cdot M_{fd} \cdot \Omega_r \cdot I_f \quad \text{(III.3)}$$

### III.6.2. Expression du couple électromagnétique

Sur le principe de la loi de Laplace, le rotor de la machine possède un couple qui en nomme couple électromagnétique.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = P \cdot M_{fd} \cdot I_f I_a \quad \text{(III.4)}$$

### III.6.3. Equations mécanique

D'après le principe fondamental de la dynamique, l'équation mécanique du moteur entrainant une charge de couple résistant est donnée par :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} + f \Omega_r \Rightarrow \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J(C_{em} - C_r - f \Omega_r)} \quad \text{(III.5)}$$

# Chapitre III Les machines à courant continu (MCC) et leurs commandes

## III.6.4. Moteur à courant continu à excitation constante

Si on prend  $I_f = C^{ste} \Rightarrow$  on pose  $K_m = P \cdot M_{fd} \cdot I_f$  le modèle du moteur s'écrit comme suite :

$$\begin{cases} \frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{L_a(U_a - K_m \cdot \Omega_r - R_a \cdot I_a)} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J(K_m \cdot I_a - C_r - f \cdot \Omega_r)} \end{cases} \quad \text{(III.6)}$$

## III.7. Commande en vitesse de la machine

### III.7.1. Système de commande

Le système de commande ou simplement la commande (contrôleur, régulateur) est un système permettant de générer l'action délibérée à appliquer à l'entrée de l'organe de commande afin de faire atteindre à la sortie du système à commander des objectifs définis en termes de durée et de la forme du régime transitoire ainsi que la valeur finale.

On peut commander le système de deux formes :

- Commande en boucle ouverte : le système ne dispose pas d'information sur la sortie du système.
- Commande en boucle fermée : lorsque le système reçoit une information sur la sortie à commander, dans ce cas il travaille en comparaison entre la sortie et la valeur de référence à lui faire attendre.

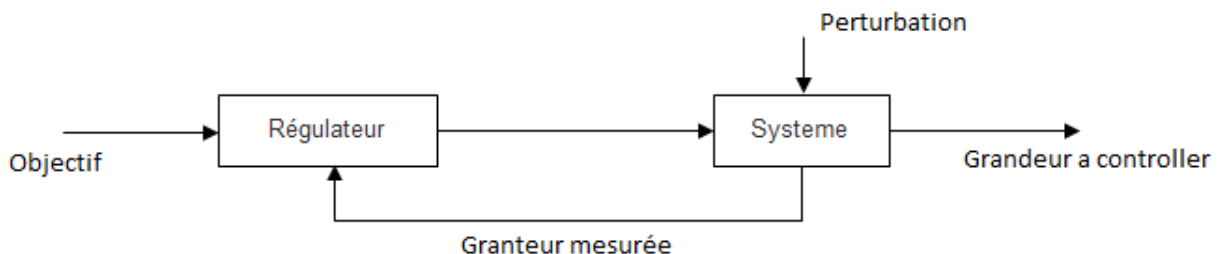


Figure III.9 : Structure générale de la commande en boucle fermée.

## III.7.2. Choix de régulateur

Le régulateur représente l'élément intelligent d'un système, il est ajouté à l'extérieur du système à commander, il permet d'améliorer les performances du système qu'il commande quel que soit de régime transitoire ou permanent.

Pour la régulation de notre vitesse en choisi le régulateur PI (régulateur proportionnelle intégral) car il améliore la précision de la boucle (erreur statique nul).

## III.7.3. Expression du régulateur PI

La structure générale d'un régulateur proportionnel intégral (PI) est composée de la fonction proportionnelle et de la fonction intégrale mis en parallèles.

Fonction de transfert est donnée par :

$$C(p) = K_p + \frac{K_i}{p} = \frac{K_p p + K_i}{p} = K \left( 1 + \frac{1}{\tau_i p} \right) \quad (\text{III.7})$$

Avec :  $\tau_i = \frac{K_p}{K_i}$

L'avantage principal d'un régulateur PI est qu'il annule l'erreur statique grâce à la fonction intégral et non pas en utilisant les coefficients  $K_p$  et  $K_i$ .

En effet, il calcule la commande  $U(t)$  à injecter au système en intégrant la grandeur d'erreur  $\varepsilon(t)$ .

Ainsi le signal de commande augment tant que le signal d'erreur est nul, la commande  $U(t)$  ne cesse de croître tant que l'erreur entre la sortie  $\Omega(t)$  et la référence  $\Omega_{ref}(t)$  n'est pas nulle.

## III.7.4. Fonction de transfert de la machine

En écrivant les équations du moteur dans le domaine opérationnel, et en supposant que les conditions initiales sont nulles.

$$U_a(p) = R_a \cdot I_a + p \cdot L_a(p) + E(p) \quad (\text{III.8})$$

$$C_{em}(p) - C_r(p) = J \cdot p \Omega_r(p) + f \Omega_r(p) \quad (\text{III.9})$$

$$E(p) = K_m \cdot \Omega_r(p) \quad (\text{III.10})$$

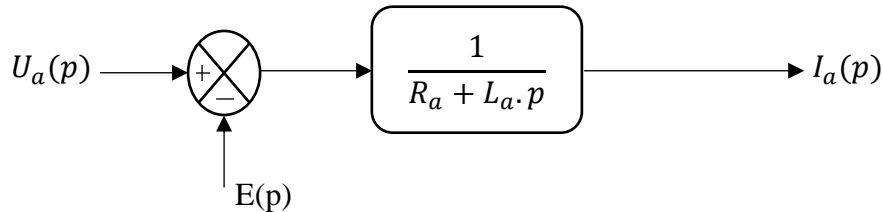
$$C_{em}(p) = K_m \cdot I_a(p) \quad (\text{III.11})$$

## Chapitre III Les machines à courant continu (MCC) et leurs commandes

---

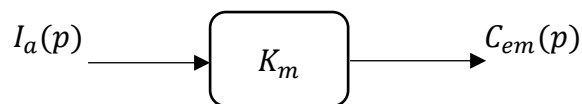
De l'équation (III.8) on peut déduire la relation entre la tension d'alimentation « $U_a(p)$ » et la force contre électromotrice « $E(p)$ » qui est donnée par :

$$U_a(p) - E(p) = (R_a + L_a \cdot p)I_a(p) \quad \text{(III.12)}$$



**Figure III.10 :** Schéma bloc de la boucle du courant.

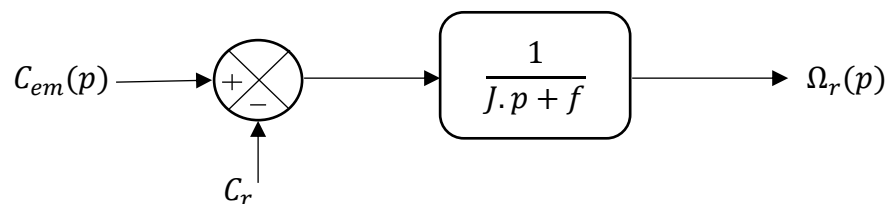
De l'équation (III.11) on déduit la relation entre le courant d'induit « $I_a(p)$ » et le couple électromagnétique « $C_{em}$ » (Figure III.11) :



**Figure III.11 :** Schéma bloc de la boucle du couple.

De l'équation (III.9) on déduit la relation entre la vitesse de rotation « $\Omega_r(p)$ » et le couple utile « $C_{em} - C_r$ » qui est donnée comme suit :

$$C_{em}(p) - C_r(p) = (J \cdot p + f) \cdot \Omega_r(p) \quad \text{(III.13)}$$

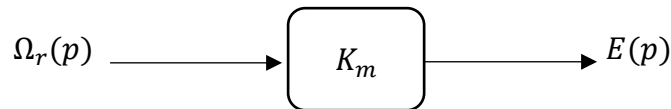


**Figure III.12 :** Schéma bloc de la boucle de vitesse.

## Chapitre III Les machines à courant continu (MCC) et leurs commandes

---

De l'équation (III.10) on déduit la relation entre la vitesse de rotation et la force contre électromotrice (Figure III.13) :

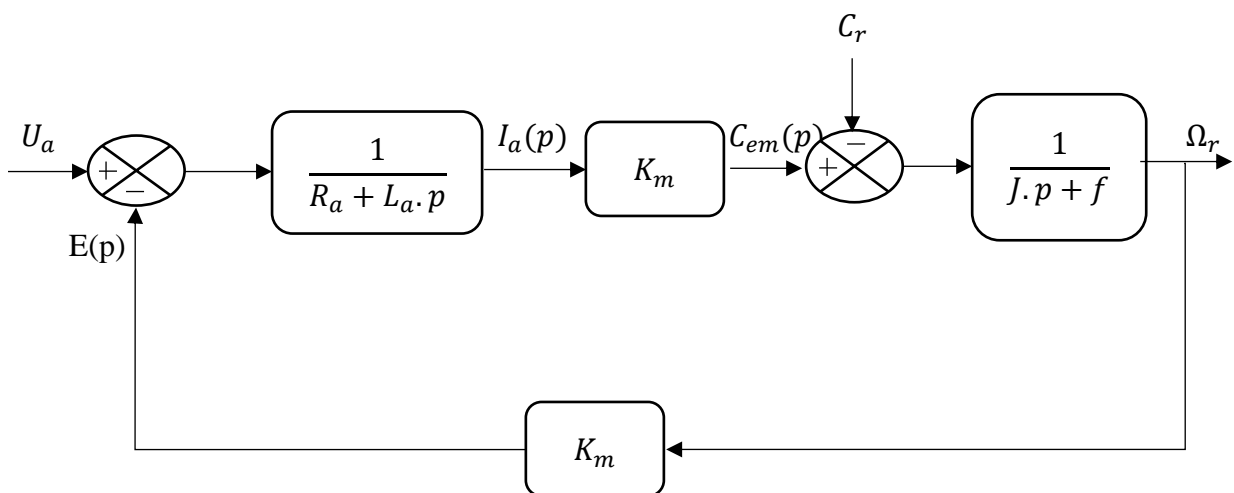


**Figure III.13** : Schéma bloc de vitesse de rotation en fonction de la force Contre électromotrice.

A partir des relations (III.8), (III.9), (III.10), (III.11) on obtient la fonction de transfert globale du moteur qui est comme suit :

$$T(p) = \frac{\Omega_r}{U_a} = \frac{\frac{K_m}{R_a f + K_m}}{(L_a \cdot J)p^2 + \left(\frac{L_a f + R_a J}{R_a f + K_m}\right)p + 1} \quad \text{(III.14)}$$

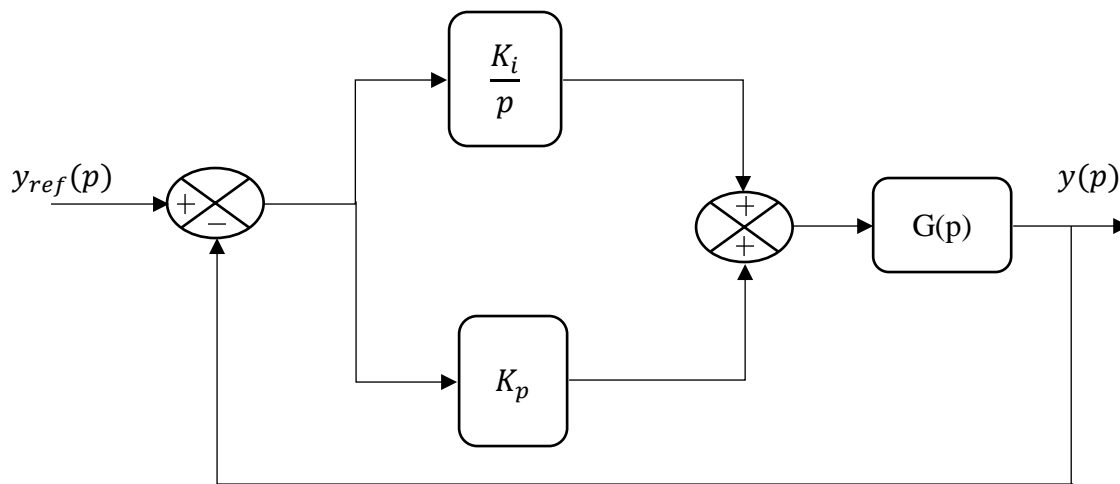
En reliant les différents blocs (Figure III.10), (Figure III.11), (Figure III.12), (Figure III.13) on obtient le schéma bloc global du moteur (Figure III.14) :



**Figure III.14** : Schéma fonctionnel du moteur à excitation séparée.

## III.7.5. Structure de la commande PI

Chaque boucle de régulation est dotée d'un régulateur proportionnel intégral PI classique présenté sur la (figure III.15). Il comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur réglée et sa propre consigne [29].



**Figure III.15 :** Schéma de commande utilisant la structure PI.

Soit  $G(p)$  la fonction de transfert d'un système de premier ordre donnée par :

$$G(p) = \frac{G_0}{(1+\tau.p)} \quad \text{(III.15)}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$FT_{bf}(p) = \frac{G_0.K_i(\frac{K_p}{K_i}p+1)}{(\tau p+1)(p+(\frac{K_p p+K_i}{\tau p+1})\frac{G_0}{\tau p+1})} \quad \text{(III.16)}$$

L'apport d'un zéro par le régulateur PI dans la fonction de transfert en boucle fermée peut modifier le régime transitoire du système. Pour remédier à ce problème, la méthode de compensation des pôles est plus adaptée pour le calcul des paramètres  $K_p$  et  $K_i$ . Elle consiste à imposer le zéro du régulateur égal à un pôle de la fonction de transfert du système à commander et une constante du temps  $FT_{bf}$  répondant aux objectifs fixés.

Le principe de cette méthode est illustré par les relations de l'équation suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{K_p}{K_i} p + 1 = (\tau p + 1) \Rightarrow \tau = \frac{K_p}{K_i} \\ FT_{bf} = \frac{G_o K_i}{p + G_o K_i} \Rightarrow \tau_{bf} = \frac{1}{G_o K_i} \end{array} \right. \quad \text{(III.17)}$$

Les paramètres du régulateur sont alors donnés par :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_i = \frac{1}{G_o \tau_{bf}} \\ K_p = \frac{\tau}{G_o \tau_{bf}} \end{array} \right. \quad \text{(III.18)}$$

### III.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la machine à courant continu (MCC) et ces différentes excitations et on a choisi le modèle qui correspond le mieux à notre application en la modélisant avec ces propres équations mathématiques et on lui a même intégré un régulateur de vitesse.

Les performances de la commande MPPT choisies pour être appliquées sur un générateur photovoltaïque PV qui alimente le moteur à courant continu (MCC) dont le but de notre travail sont exposées en détail en chapitre 4.

# *Chapitre IV*

## *Simulation et interprétation des résultats*

### IV.1. Introduction

Dans le présent chapitre nous allons montrer les différentes simulations effectuées sur un système PV constitué principalement d'un panneau PV, charge et hacheur. Ce dernier est piloté par la technique de commande MPPT Perturbation & Observation (P&O) permettant une meilleure adaptation source/charge, pour un transfert maximum de puissance. De ce fait, la simulation est la seule manière d'évaluer la performance d'un contrôleur numérique à rétroaction dans un système avant d'établir un prototype réel.

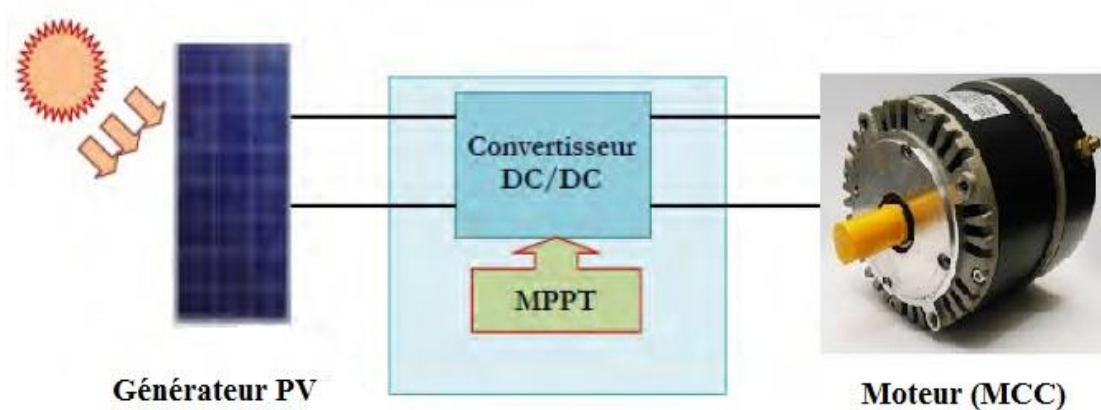
Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/SIMULINK.

### IV.2. Modèle du système à dimensionner

Le système étudié est constitué par le générateur PV, convertisseur DC-DC (hacheur de type survolteur) et un moteur à courant continu de puissance nominale  $P_n(w)$ .

Le convertisseur DC-DC est commandé suivant une stratégie qui a pour but la recherche permanente du point de puissance maximum (MPPT).

La (figure IV.1) illustre une disposition synoptique de l'ensemble du système.



**Figure IV.1** : Schéma synoptique du système PV contrôlé par MPPT

### IV.3. Dimensionnement d'un système PV avec moteur à courant continu

Le dimensionnement a pour but de déterminer d'une part le nombre de modules solaires à utiliser dans l'installation qui est déduit d'un calcul effectué sur la puissance crête des générateurs solaires, et d'autre part la puissance absorbée par le moteur (MCC), toute cette panoplie de paramètres est déduite à partir des données d'ensoleillement du site concerné, ainsi des besoins électriques de l'utilisateur. Le choix des composantes du système solaire doit permettre à l'utilisateur d'utiliser les équipements requis durant la période demandée (c'est à-dire période annuelle ou déterminée), et ce avec une disponibilité prédéterminée.

### IV.3.1. Détermination du nombre de modules à installer

Le nombre de modules photovoltaïques total est calculé en fonction des caractéristiques du module choisi et de la puissance crête du générateur, il est donné par l'équation suivante :

$$N = \frac{P_{pv}}{P_m} \quad (\text{IV.1})$$

Le nombre de modules connectés en série ( $N_s$ ) est égal à :

$$N_s = \frac{V_{pv}}{V_m} \quad (\text{IV.2})$$

Le nombre de modules connectés en parallèles ( $N_p$ ) sera égale à :

$$N_p = \frac{N}{N_s} \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

- $V_m$ : la tension crête de module choisi.
- $P_m$ : puissance crête de module.
- $N$ : nombre total de modules PV.

#### IV.3.1.1. Le courant total fourni par Groupe PV

Pour calculer le courant total fourni par les panneaux, il suffit d'appliquer les équations suivantes:

$$\begin{cases} I_{cc\ tot} = N_p \cdot I_{cc} \\ I_{pm\ tot} = N_p \cdot I_{pm} \end{cases} \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

- $I_{cc\ tot}$ : Courant total de court-circuit.
- $I_{pm\ tot}$ : Courant total au point de puissance Max.
- $I_{cc}$ : Courant de court-circuit du module.
- $I_{pm}$ : Courant au point de puissance Max du module.
- $N_p$ : Nombre de modules connectés en parallèle.

#### IV.3.1.2. La tension totale fournie par Groupe PV

Les expressions de la tension aux bornes du Groupe PV sont données par les équations suivantes:

$$\begin{cases} V_{co\ tot} = N_s \cdot V_{co} \\ V_{pm\ tot} = N_s \cdot V_{pm} \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

Avec :

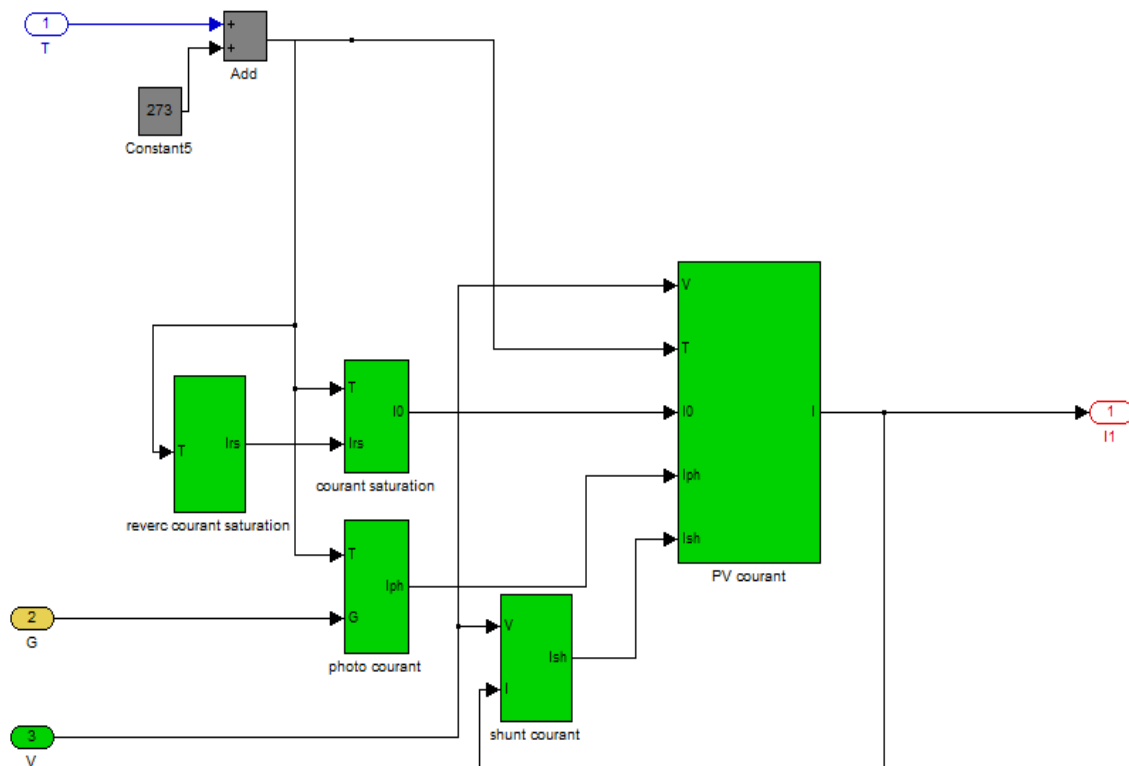
- $V_{co\ tot}$ : Tension totale en circuit ouvert.
- $V_{pm\ tot}$ : Tension totale au point de puissance Max.
- $V_{co}$ : Tension en circuit ouvert du module.
- $V_{pm}$ : Tension au point de puissance max du module.
- $N_s$ : Nombre de modules connectés en série.

### IV.4. Simulation des performances du module TP.160M-36

Le module photovoltaïque **TP.160M-36**, utilisé dans les installations solaires, est constitué de 36 cellules en silicium Monocristalline. Ce module peut produire une puissance maximale de 160 Watts à 17.7Volts.

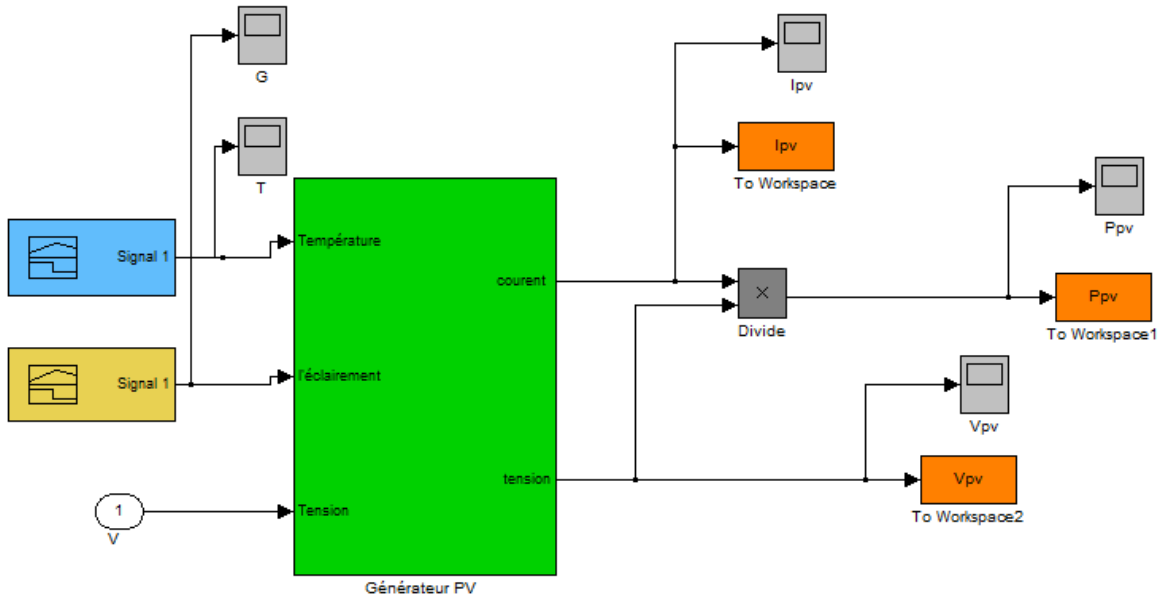
Pour simuler le comportement du générateur (PV), nous avons simulé le modèle présenté au chapitre I

Ceci nous a permis de déterminer l'allure des caractéristiques électriques  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  de ce dernier dans les conditions standard du test ( $G=1000W/m^2$  et  $T=25^{\circ}C$ ).



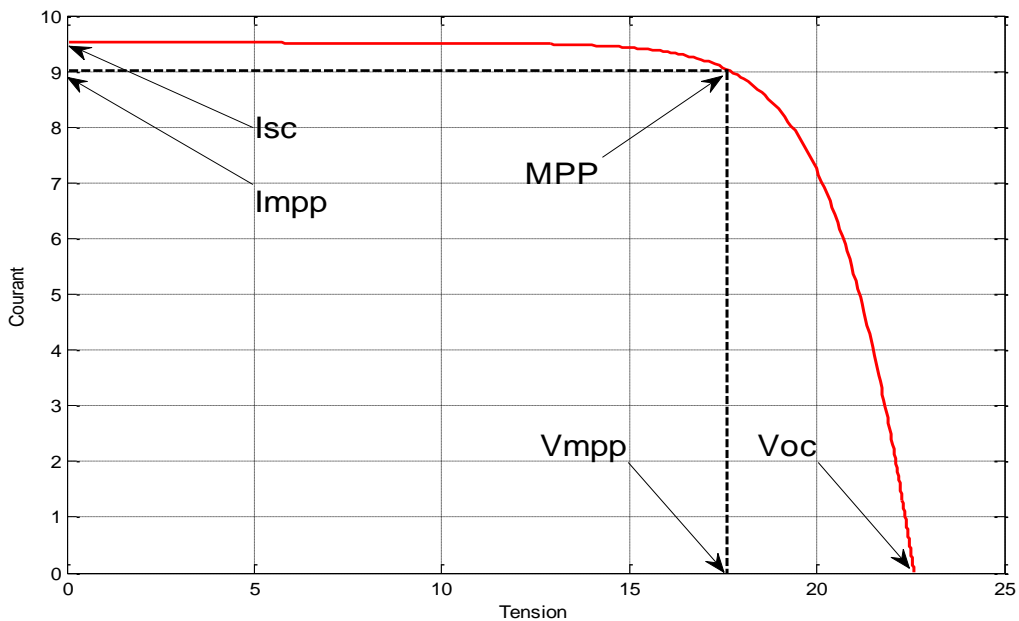
**Figure IV.2** : Modèle à une diode du générateur PV sous Matlab/Simulink.

Le bloc SIMULINK du modèle de générateur photovoltaïque (PV) est représenté par la (figure IV.3) :

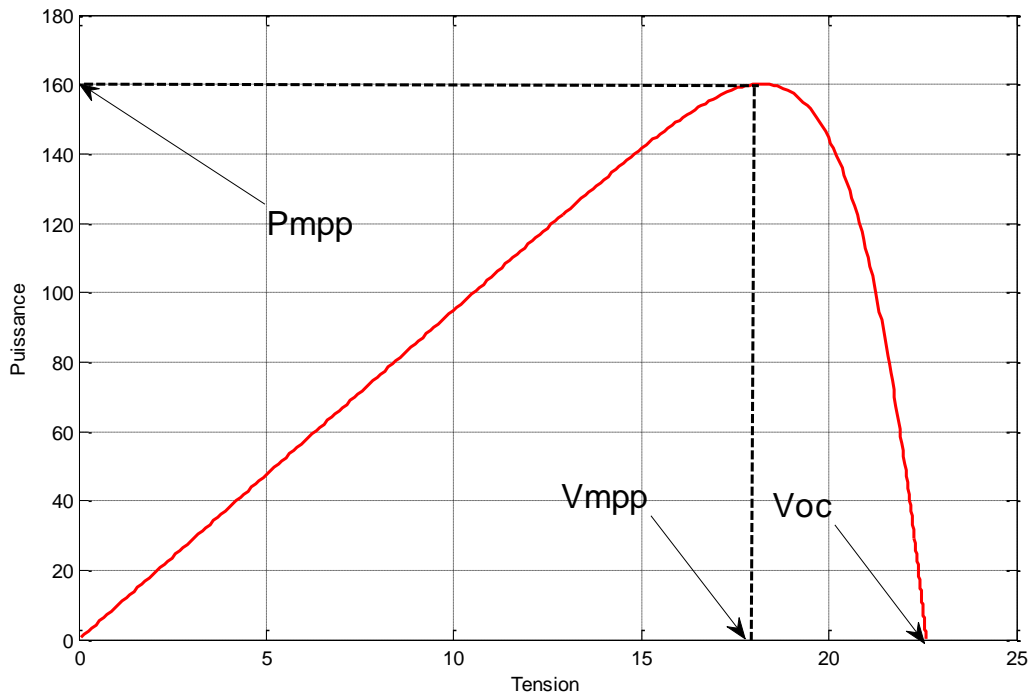


**Figure IV.3 :** Schéma bloc du générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink.

La simulation du modèle photovoltaïque **TP.160M-36** sous MATLAB-SIMULINK dans les conditions standard du test ( $G=1000W/m^2$  et  $T=25^\circ C$ ), nous a permis de tracer les graphes des (figures IV.4 et IV.5).



**Figure IV.4 :** caractéristique  $I= f(V)$  du module à  $G=1000W/m^2$  et  $T=25^\circ C$ .



**Figure IV.5 :** Caractéristique  $P = f(V)$  du module à  $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

En effet, le module photovoltaïque **TP.160M-36**, utilisé dans les installations solaires, avec une tension du circuit ouvert  $V_{co}=22.6$  et un courant de court-circuit  $I_{cc}=9.52$  peut produire une puissance maximale  $P_{mpp}=160$  W à une tension à puissance maximal  $V_{mpp}=17.7$  V et à un courant à puissance maximal  $I_{mpp}=9.04$  A.

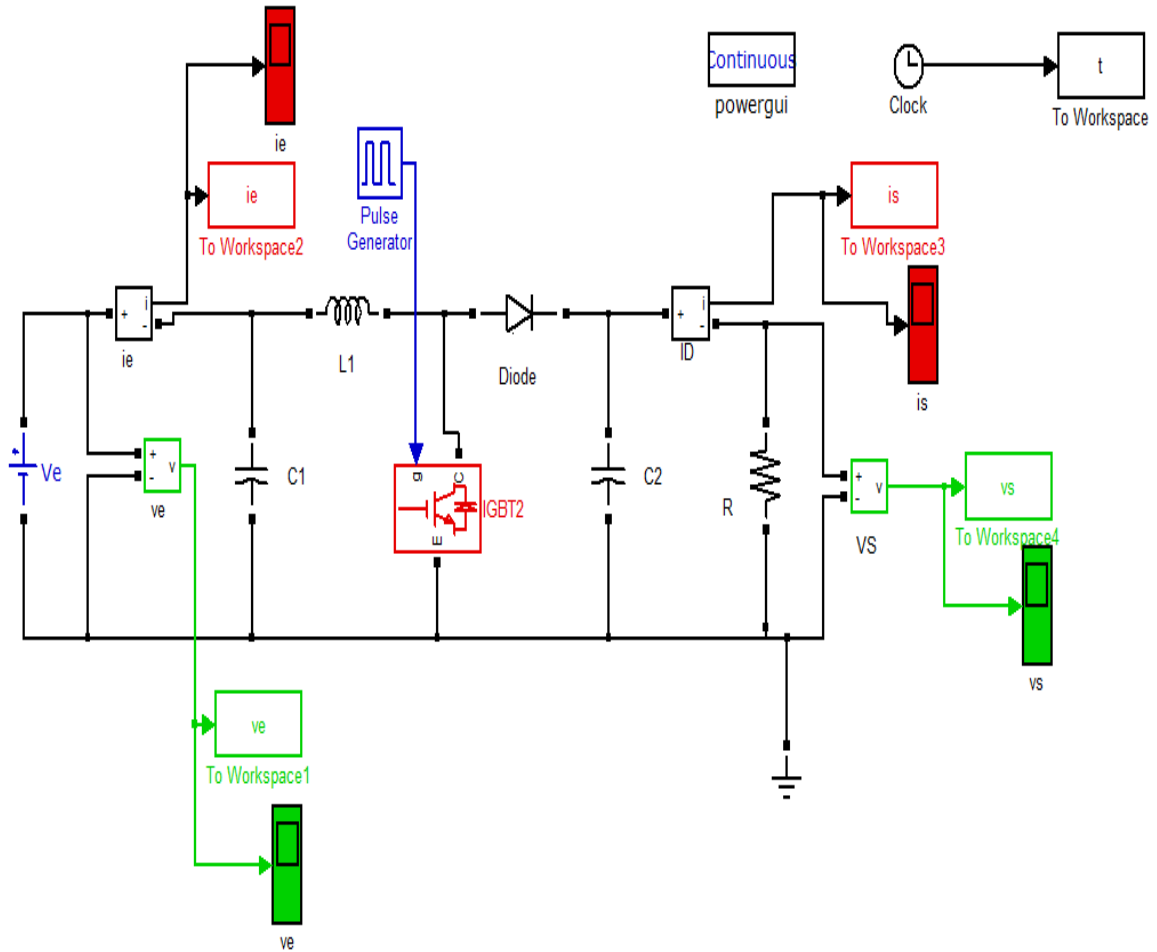
### IV.5. Simulation du hacheur parallèle

Dans ce qui précède, nous avons décrit le fonctionnement des convertisseurs BOOST (voir le chapitre I). Le convertisseur BOOST approprié à notre système photovoltaïque est commandé par le contrôleur (MPPT).

Le convertisseur BOOST est généralement employé pour obtenir une tension sortie plus élevée.

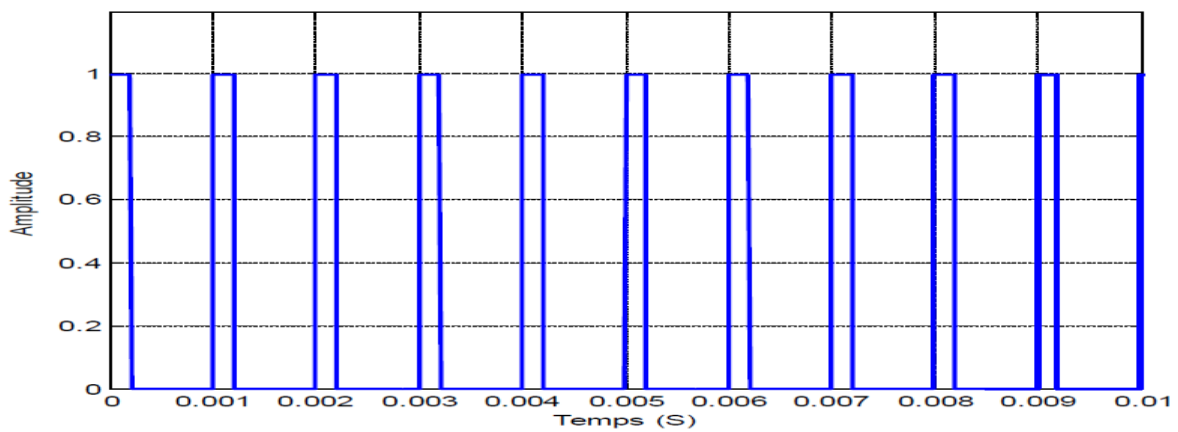
Pour montrer le comportement du convertisseur statique survolteur (BOOST), nous avons utilisé SIMULINK. Ce dernier intègre les composants de l'électronique de puissance (résistances, condensateurs, inductances, diodes...etc.) ce qui facilite la simulation du système.

La (figure IV.6) illustre le bloc schématique de SIMULINK du convertisseur statique (BOOST).

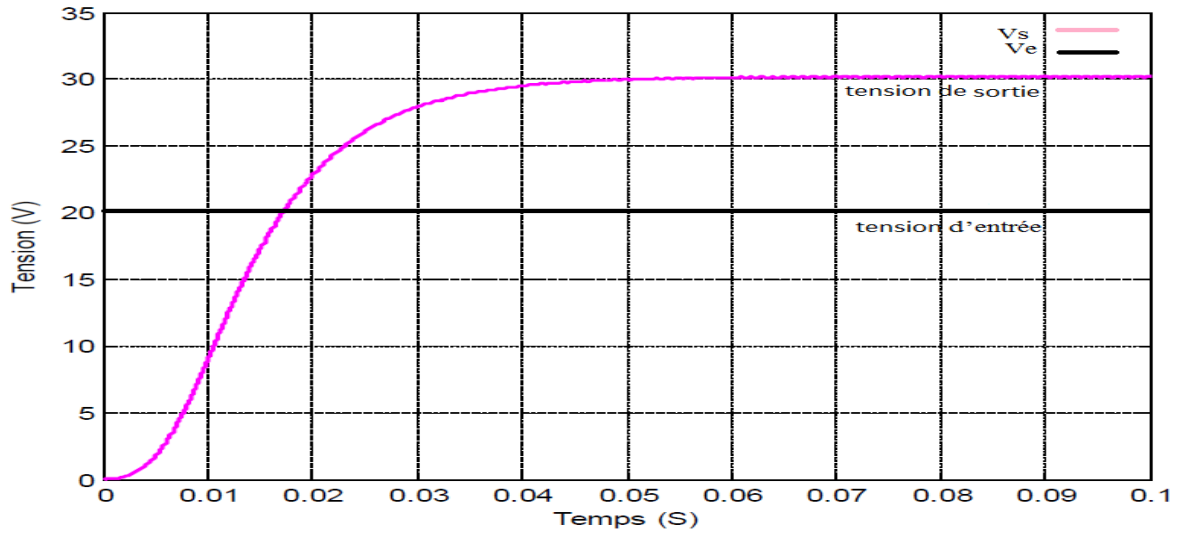


**Figure IV.6 :** Schéma block d'un convertisseur survolteur (BOOST).

Les résultats de simulation du convertisseur survolteur représentent par les (figures IV.7 et IV.8). Ces figures représentent le rapport cyclique (d) de commande sur la gâchette ainsi la tension d'entrée et de sortie du hacheur survolteur.



**Figure IV.7 :** Signal commande DC/DC (gâchette- d'hacheur).

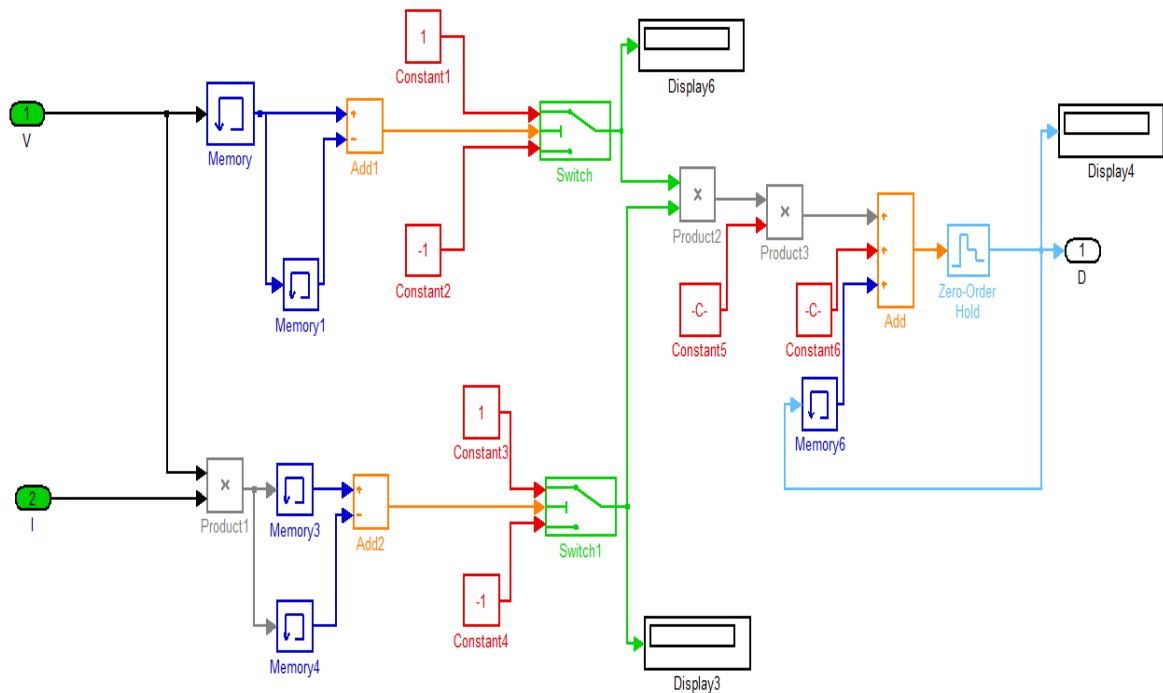


**Figure IV.8 :** Résultats de simulation de la tension (entrée / sortie) du hacheur survolteur.

Ces résultats montrent que la tension de sortie du hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée. Donc le hacheur survolteur effectue correctement son rôle.

#### IV.6. Le bloc de simulation de l'algorithme perturbation et observation (P&O)

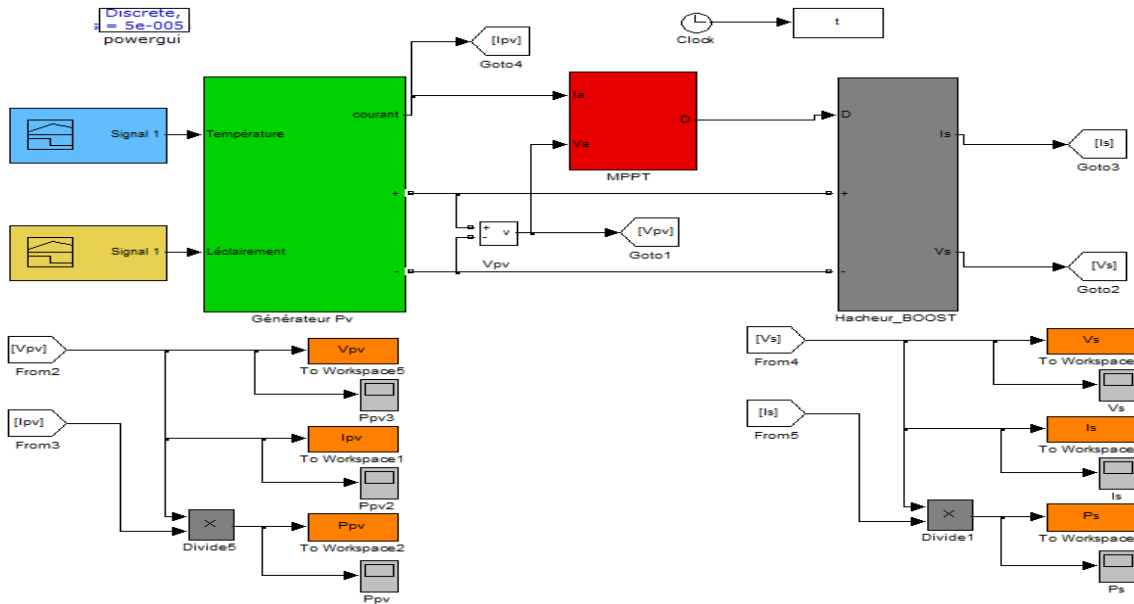
La (figure IV.9) illustre le bloc schématique de SIMULINK de l'algorithme perturbation et observation (P&O).



**Figure IV.9 :** Schéma block de l'algorithme (P&O).

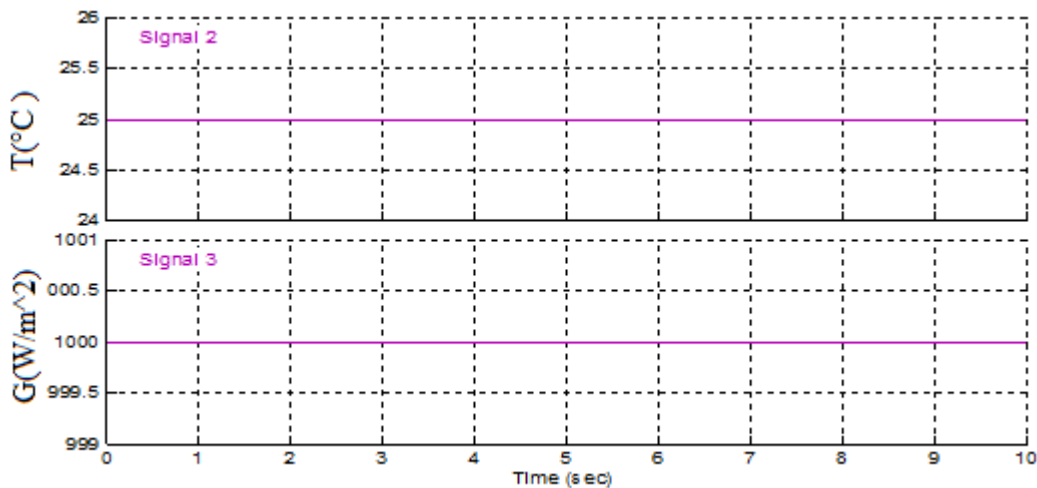
**IV.7. Simulation d'un panneau photovoltaïque avec MPPT et convertisseur DC-DC**

La (figure IV.10) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT « perturbation et observation P&O ».



**Figure IV.10 :** Schéma bloc d'un système photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT « perturbation et observation P&O ».

Les résultats de simulation du système photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT « perturbation et observation P&O», en utilisant les conditions STC (25°C et 1000 W/m<sup>2</sup>). Son représentés par les figures suivantes. Ces figures représentent la tension et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension et la puissance à la sortie du convertisseur.



**Figure IV.11 :** Les conditions de simulation STC (25°C et 1000 W/m<sup>2</sup>).

IV.7.1 Résultats à la sortie du générateur photovoltaïque

Les (figures IV.12, IV.13, IV.14) représentent la caractéristique  $P=f(V)$  et  $I=f(V)$  en utilisant les conditions standard (STC).

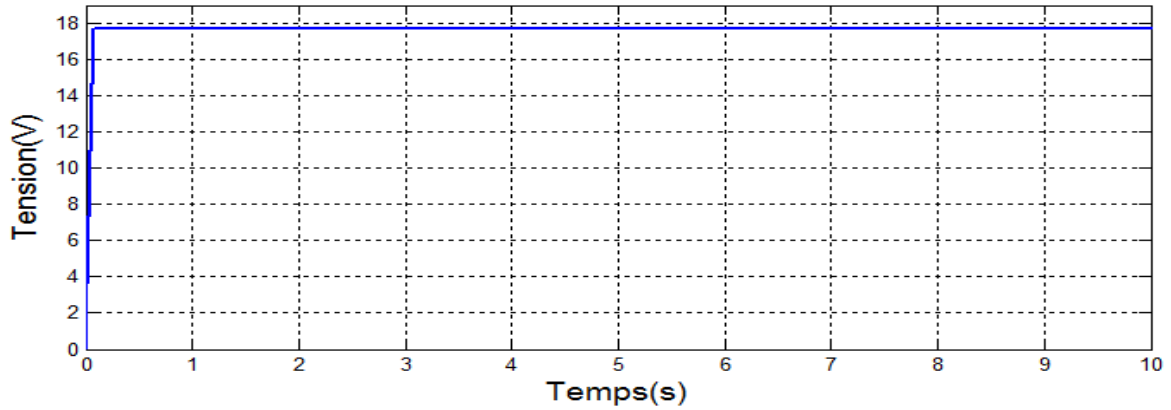


Figure IV.12 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.

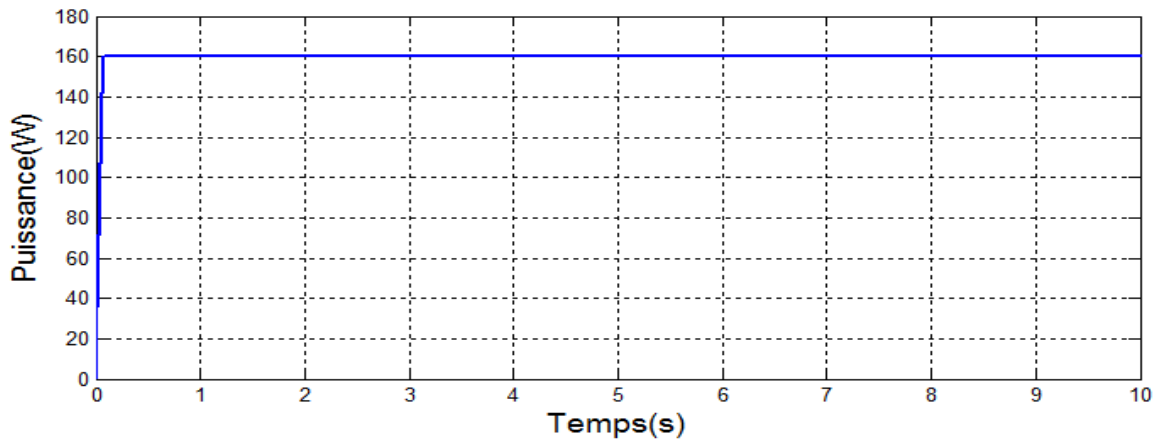


Figure IV.13 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.

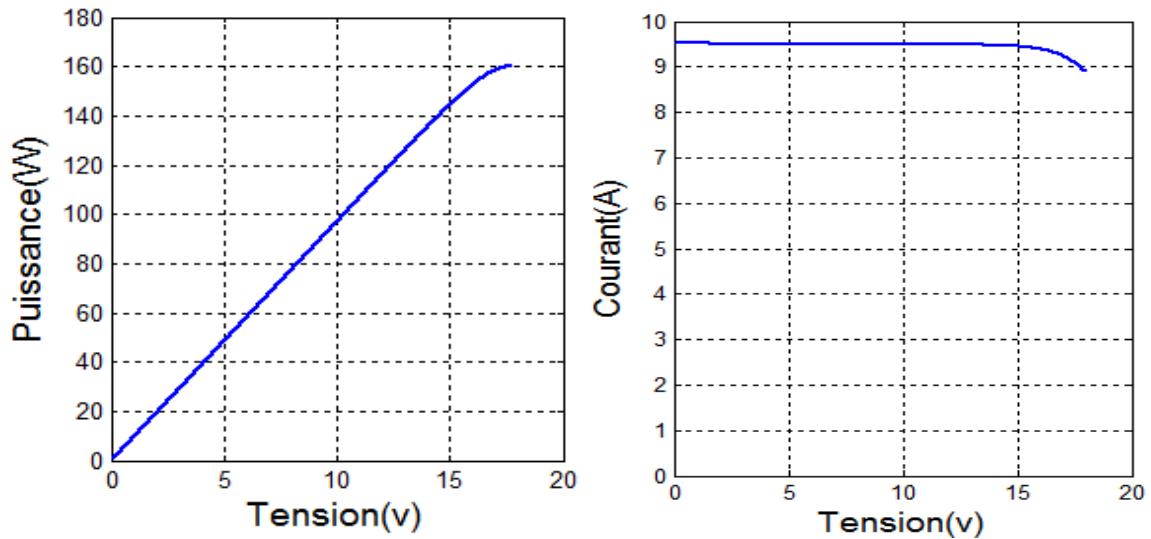


Figure IV.14 : Caractéristiques  $P=f(V)$  et  $I=f(V)$ .

### IV.7.2. Résultats de la simulation à la sortie de convertisseur

Les (figures IV.15, IV.16), représentent la tension et la puissance à la sortie du convertisseur.

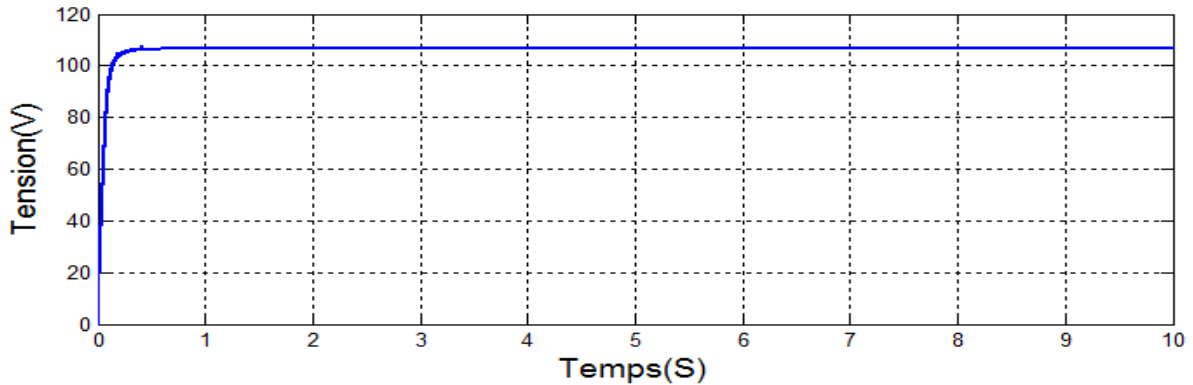


Figure IV.15 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC.

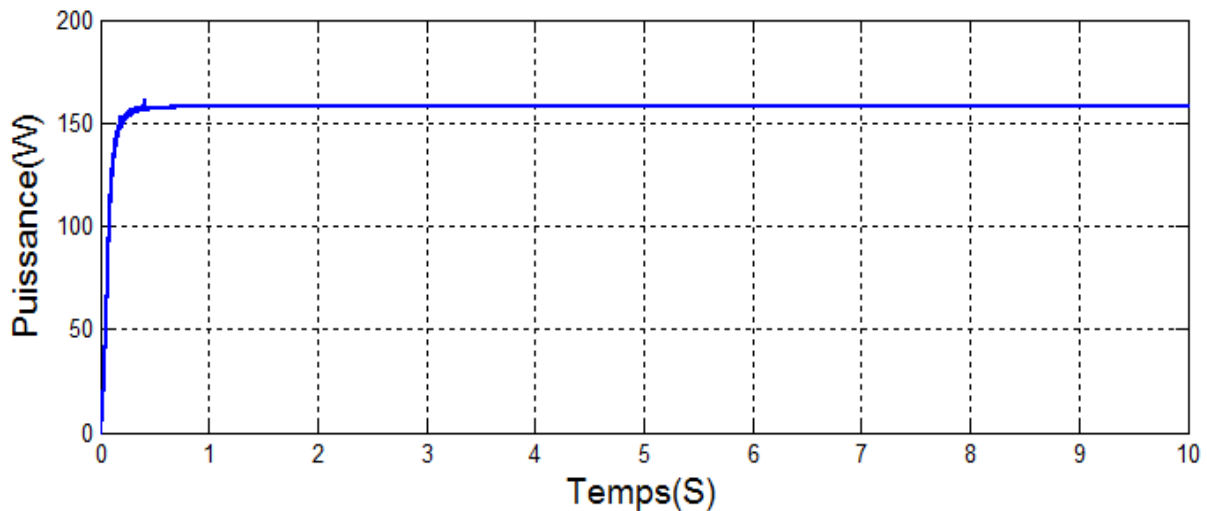


Figure IV.16 : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC.

#### ❖ Interprétation des résultats

Les (figures IV.11) présentent les conditions standard des tests (STC) ( $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $G=1000\text{ W/m}^2$ ) du système à fin de montrer l'action et la réaction de la commande P&O envers ces conditions. Cette dernière génère l'action de commande appropriée permettant au système de fonctionner au point de puissance maximale.

Les (figures IV.12, IV.13, IV.15, IV.16) représentent la tension et la puissance du panneau photovoltaïque. Ainsi, la tension et la puissance générées à la sortie du convertisseur BOOST. Ces résultats montrent que le hacheur survolteur et la commande MPPT « perturbation et observation P&O » effectuent correctement leurs rôles.

Le hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque. En gardant la même puissance, avec une faible diminution à cause des pertes au niveau des composants.

### IV.8. Effet du changement simultané de l'ensoleillement

Dans le but d'étudier les performances du système à une puissance maximale avec la méthode P&O, on a appliqué un ensoleillement variable qui diminue de  $1000\text{W/m}^2$  à  $400\text{W/m}^2$  puis augment vers  $1000\text{W/m}^2$ , une température fixée à  $25^\circ\text{C}$  (figure IV.17).

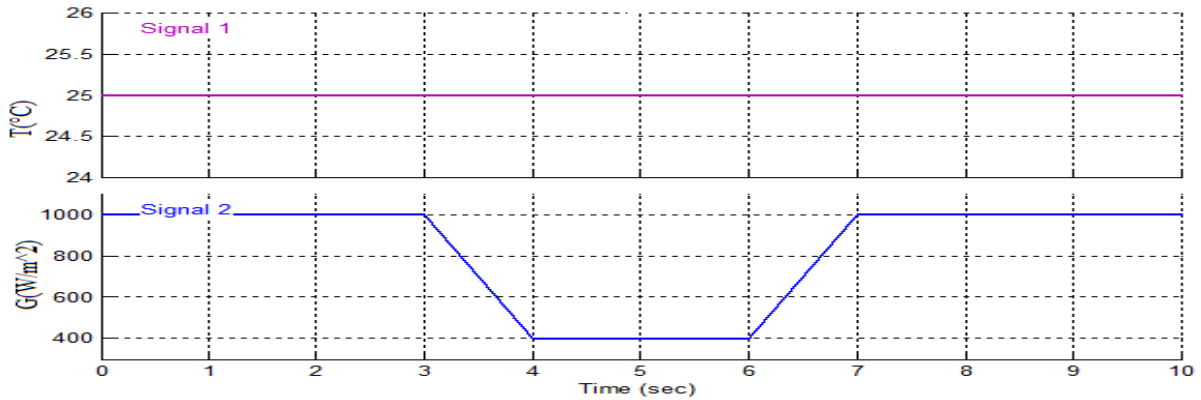


Figure IV.17 : Variations simultanées de l'ensoleillement et température constant.

#### IV.8.1. Résultats à la sortie du générateur photovoltaïque

Les (figures IV.18, IV.19, IV.20), représentent la caractéristique (P-V) lors de variation simultanée de l'éclairement, à une température constante.

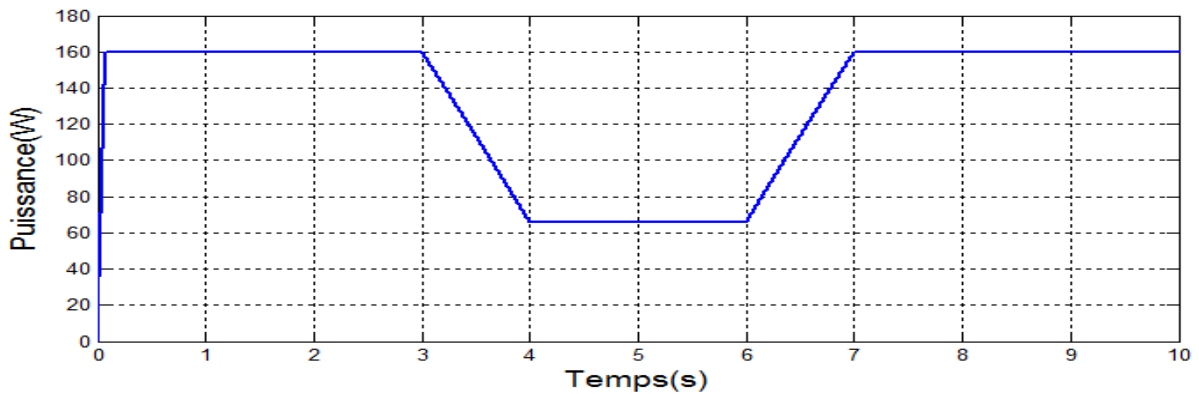


Figure IV.18 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.

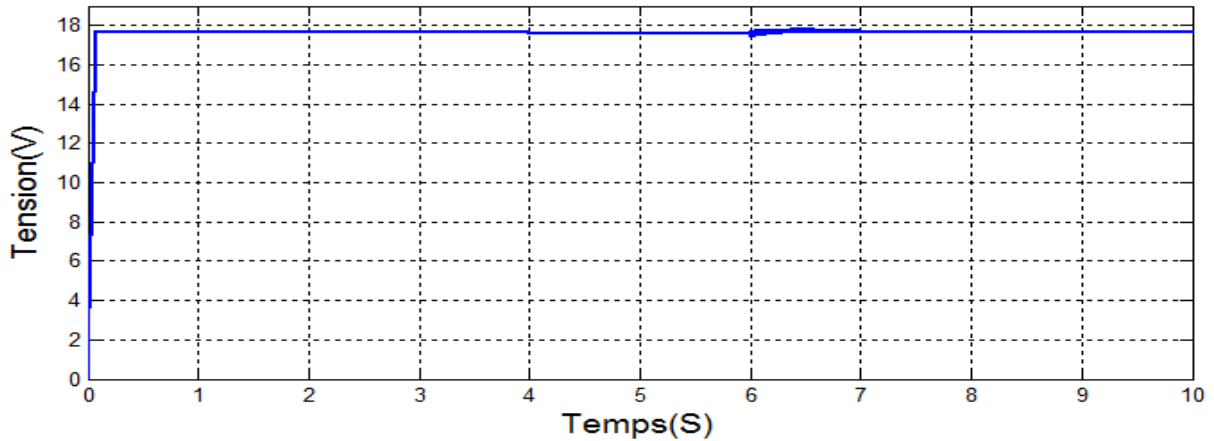


Figure IV.19 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.

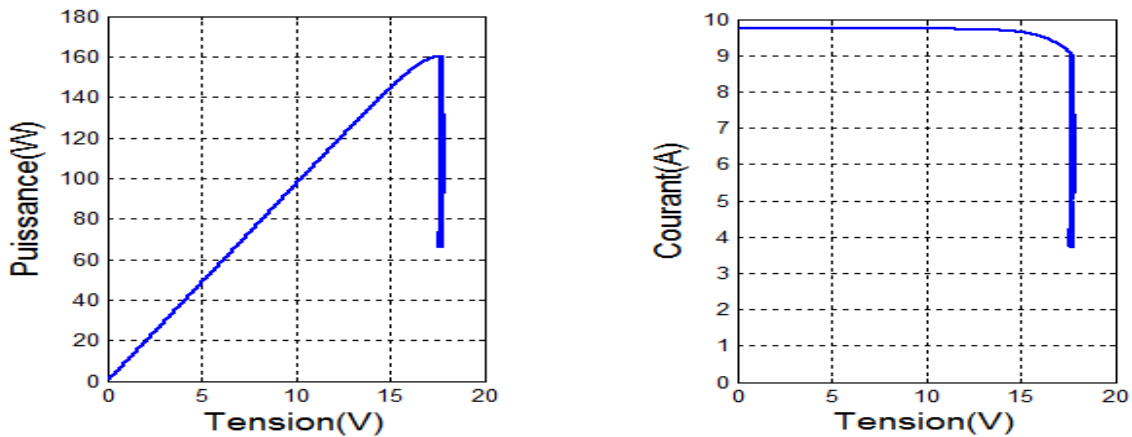


Figure IV.20 : Résultats de simulation  $P=f(V)$  et  $I=f(V)$ .

❖ **Interprétation des résultats**

L'allure de la puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque est montrée dans la (figure IV.18). Ces résultats de simulation montrent que la puissance du générateur photovoltaïque est proportionnelle à l'ensoleillement, tel que la diminution de l'irradiation implique une diminution de la puissance photovoltaïque produite.

La tension optimale correspondante, obtenue à partir de l'algorithme P&O est représentée sur la (figure IV.19) reste pratiquement inchangé. Le courant se développe suivant les variations d'ensoleillement et la caractéristique du générateur photovoltaïque  $P=f(v)$  et  $I=f(v)$  au point PPM est représentée avec les caractéristiques théoriques pour les variations du niveau de l'irradiation, (figures IV.20).

Donc le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette irradiation. L'algorithme P & O détermine continuellement la tension optimale qui donne la puissance maximale.

**IV.9. Effet du changement simultané de la température**

On applique maintenant un ensoleillement constant de  $1000W/m^2$  et une température variable. Initialement la température est à  $25^{\circ}C$ , à un instant elle augmente à  $50^{\circ}C$ , pour diminuer après à  $20^{\circ}C$  telle qu'elle est donné à (figure IV.21), pour montrer le fonctionnement au point PPM de l'algorithme P&O.

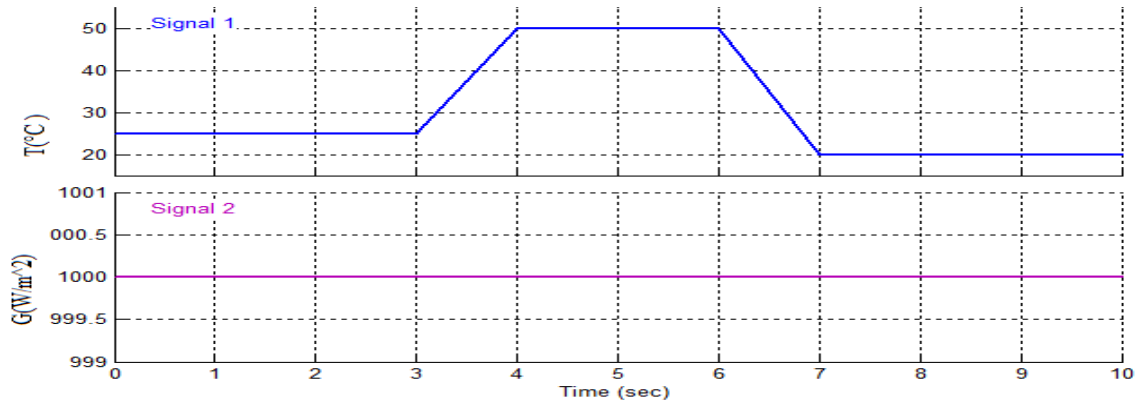


Figure IV.21 : Variations simultanée de la température et l'ensoleillement constant.

#### IV.9.1. Résultats à la sortie du générateur photovoltaïque

Les (figures IV.22, IV.23, IV.24) représentent les caractéristiques  $P=f(V)$  et  $I=f(V)$  lors de variation simultanée de température, à un enssoleillement fixé à  $1000\text{W/m}^2$ .

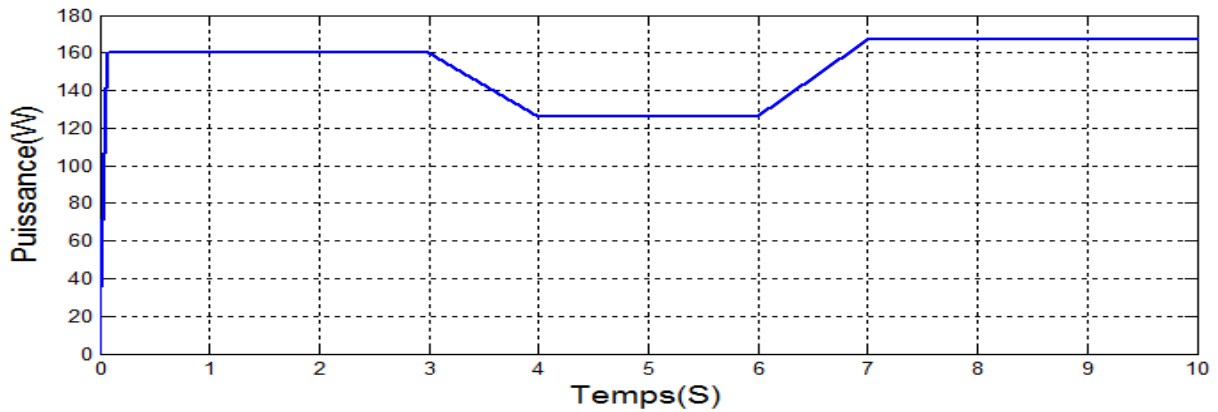


Figure IV.22 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.

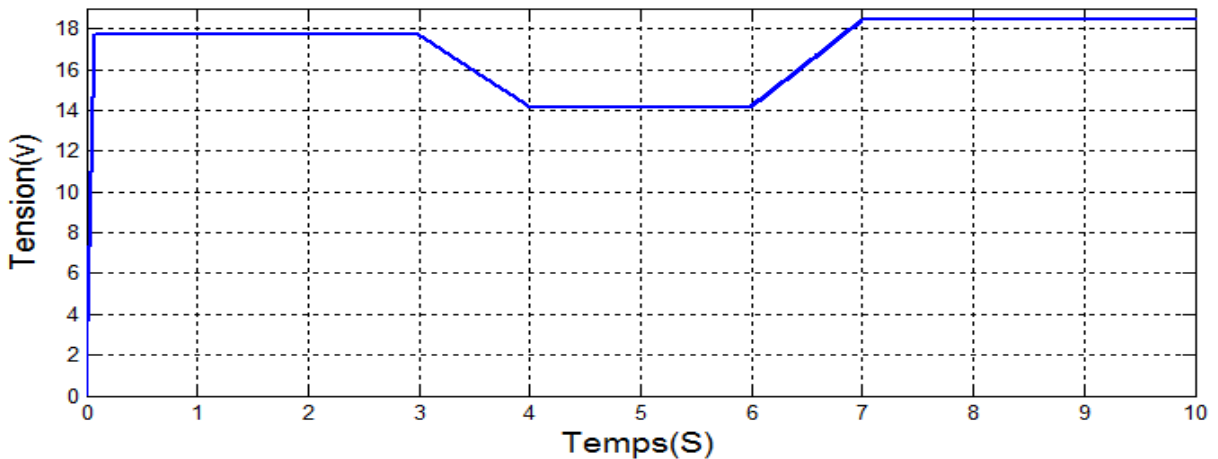
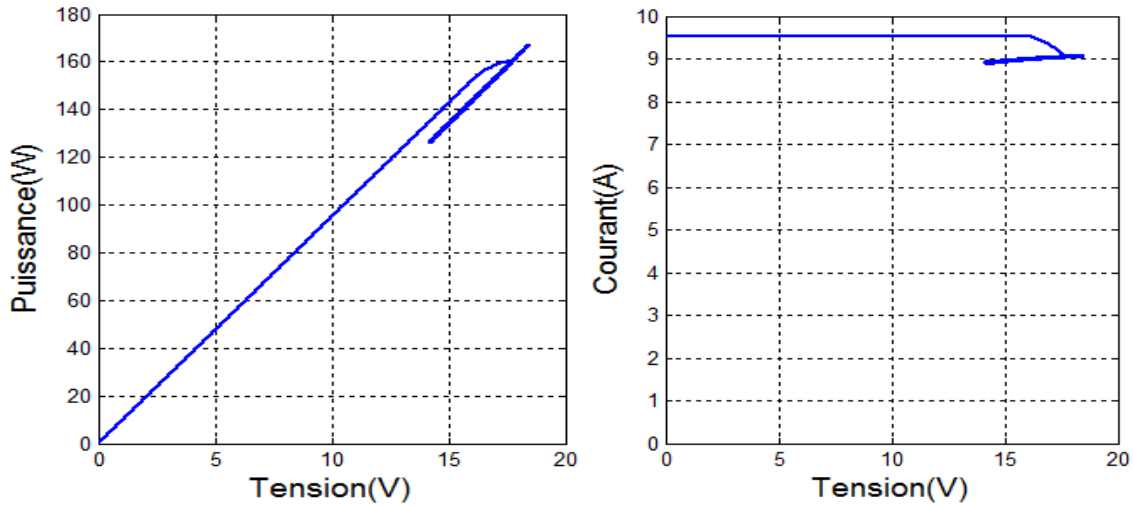


Figure IV.23 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.



**Figure IV.24 :** Résultats de la simulation  $P=f(V)$  et  $I=f(V)$

### ❖ Interprétation des résultats

L'allure de la puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque est montrée dans la (figure IV.22), ces résultats de simulation montrent que l'augmentation de la température produit une diminution de la puissance et une diminution de la température produit une augmentation de la puissance.

La tension optimale correspondante, obtenue à partir de l'algorithme P&O est représentée sur la (figure IV.23), on voit bien que la tension diminue avec l'augmentation de la température et augmente avec la diminution de la température, par contre le courant photovoltaïque reste pratiquement inchangé.

Les caractéristiques du générateur photovoltaïque  $P=f(V)$  et  $I=f(V)$  au point PPM est représentées avec les caractéristiques théoriques pour les variations de température, (figure IV.24).

Donc le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette température.

IV.10. Simulation globale (GPV, convertisseur, MPPT, MCC)

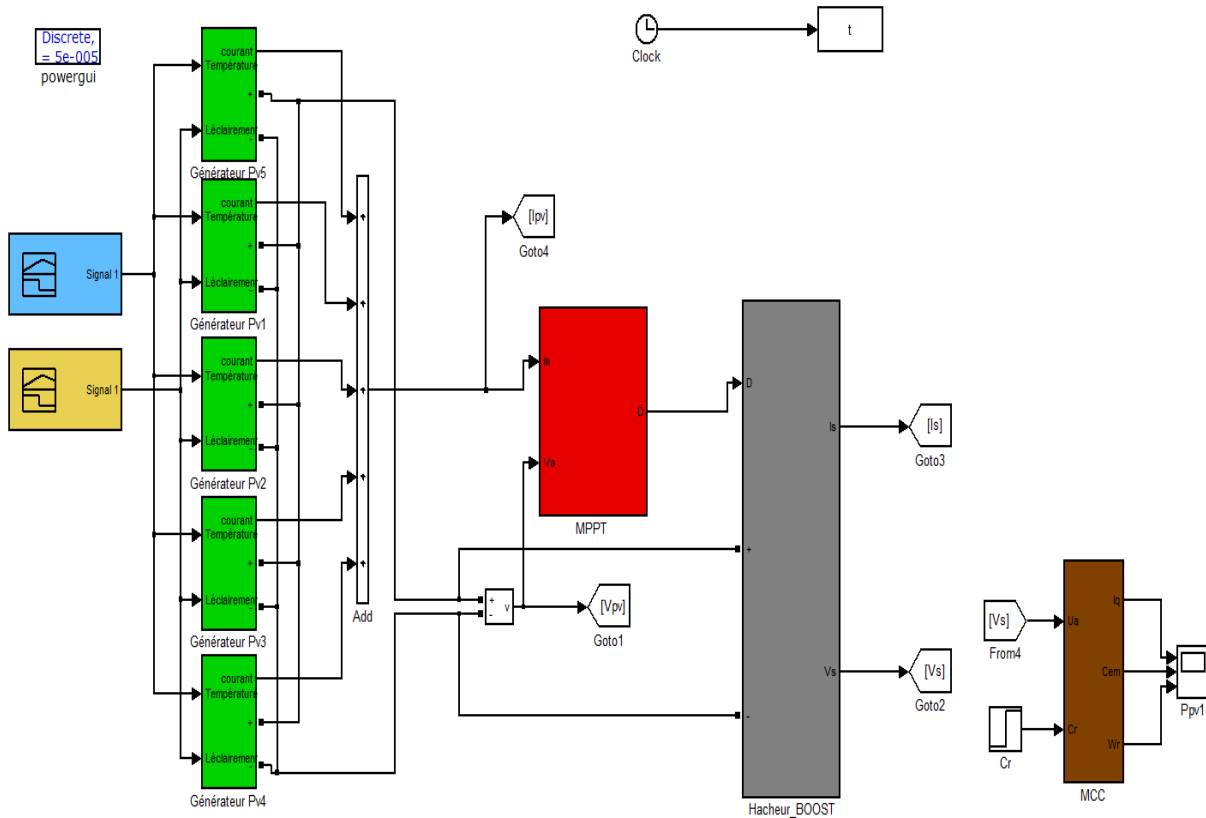


Figure IV.25 : Schéma bloc du système global (GPV, convertisseur, MPPT, MCC).

IV.10.1. Simulation d'un moteur à courant continu à excitation constante

Pour simuler la machine à courant continu à excitation constante, nous avons simulé le modèle présenté au (chapitre III)

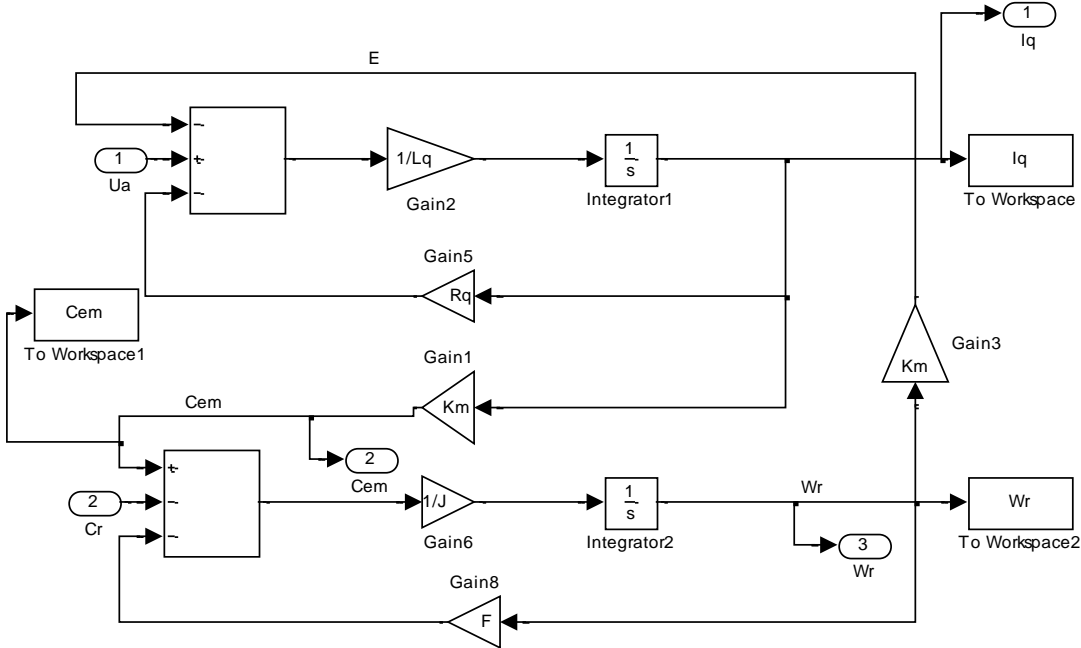
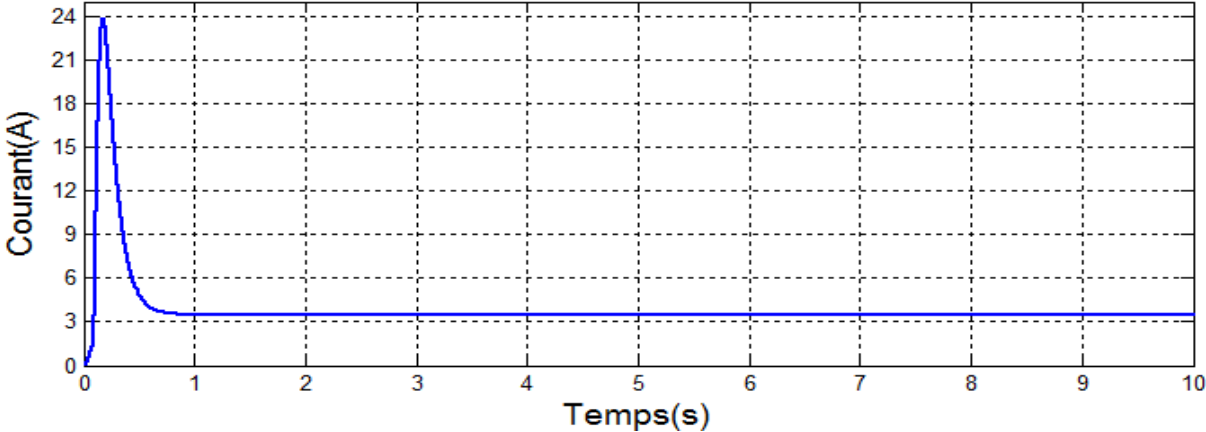
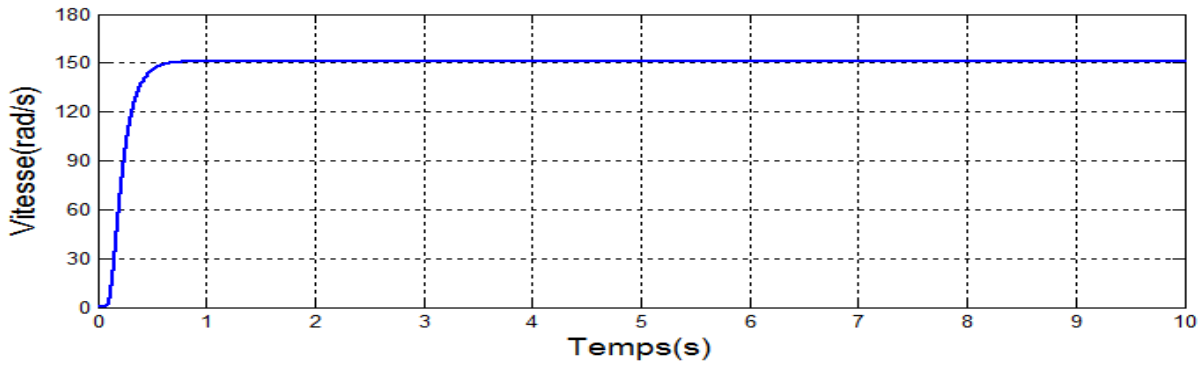


Figure IV.26 : Bloc de simulation de la MCC.

IV.10.1.1. Moteur à courant continu sans couple résistant

La (figure IV.27) représente la variation de courant et de la vitesse du MCC.





**Figure IV.27 :** Caractéristique de courant et la vitesse en fonction du temps de la MCC sans couple résistant.

#### IV.10.1.2. Valeur en régime transitoire

A partir des graphes obtenus on prélève les valeurs max suivantes :

- Courant de l'induit :

$$I_a = 24 \text{ A}$$

- Couple électromagnétique :

$$C_{em} = M_{fd} \cdot I_f \cdot I_a = K_m \cdot I_a = 1.303 \cdot 24 = 31.27 \text{ N.m}$$

#### IV.10.1.3. Valeur en régime permanent

A partir des graphes obtenus on prélève les valeurs suivantes :

- Courant de l'induit :

$$I_a = 3.47 \text{ A}$$

- Couple électromagnétique :

$$C_{em} = M_{fd} \cdot I_f \cdot I_a = K_m \cdot I_a = 1.303 \cdot 3.47 = 4.52 \text{ N.m}$$

- Vitesse de rotation :

$$\omega_r = 151 \text{ rad/s}$$

#### ❖ Interopération des courbes

Le moteur fait appel d'un courant important au démarrage pour amener sa vitesse à une vitesse nominale, par la suite il se stabilise en régime permanent, le moteur tourne à une vitesse constante (le moteur fonctionne à vide).

La vitesse augmente en fonction du temps puis il se stabilise à une valeur constante, le couple résistant est négligeable.

### IV.10.2. Résultats de simulation globale du système

Après avoir simulé la machine à courant continu à excitation indépendante et après avoir vue ses caractéristiques, on va la connecter directement au système. Pour avoir la tension d'alimentation nécessaire et pour satisfaire les caractéristiques de la machine à courant continu on a opté pour un panneau à cinq modules en parallèle avec un hacheur BOOST.

Les (figures IV.28, IV.29, IV.30) représentent la puissance de générateur ainsi la tension et la puissance de sortie du convertisseur DC-DC

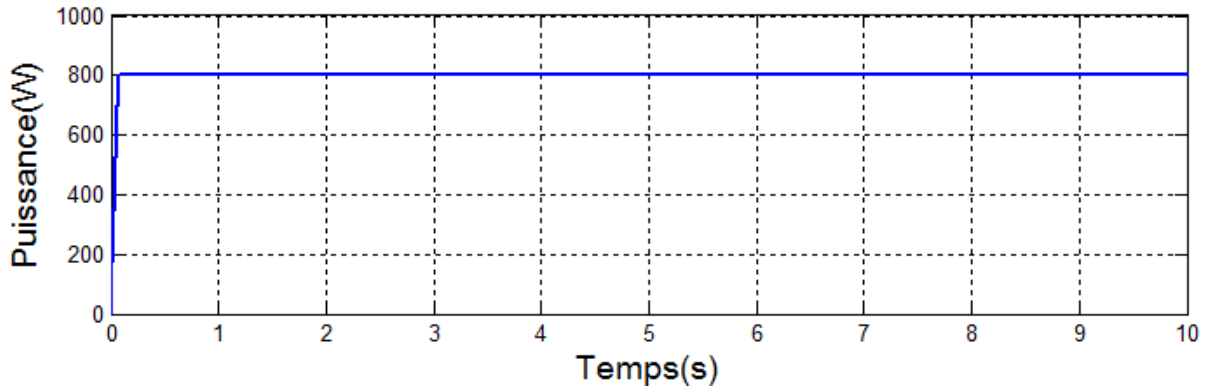


Figure IV.28 : puissance de sortie du générateur photovoltaïque.

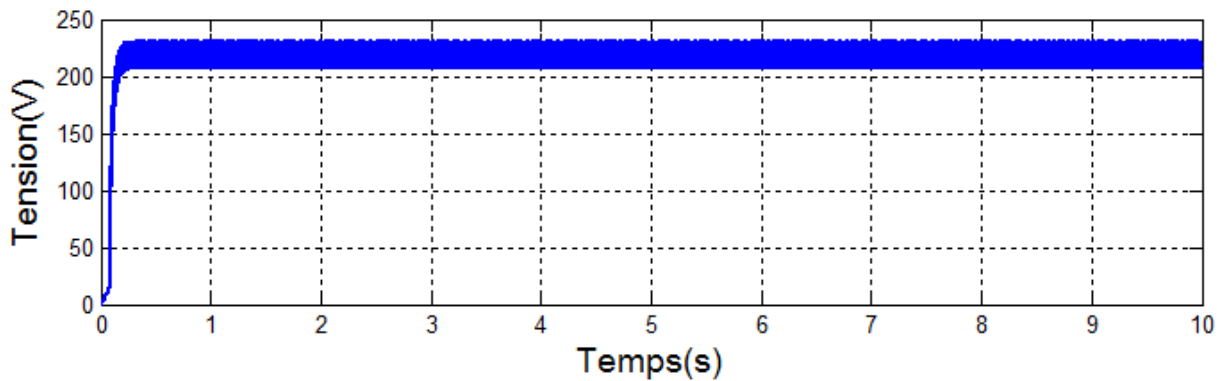


Figure IV.29 : tension de sortie du convertisseur DC-DC

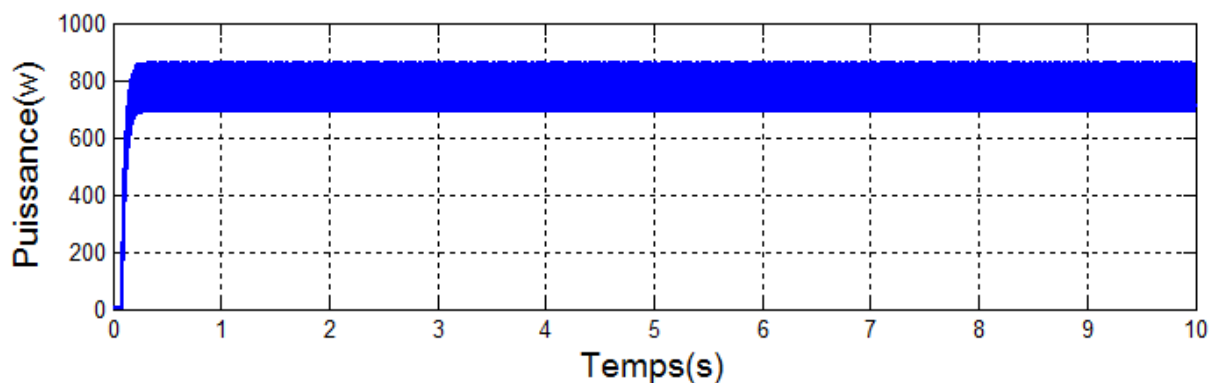


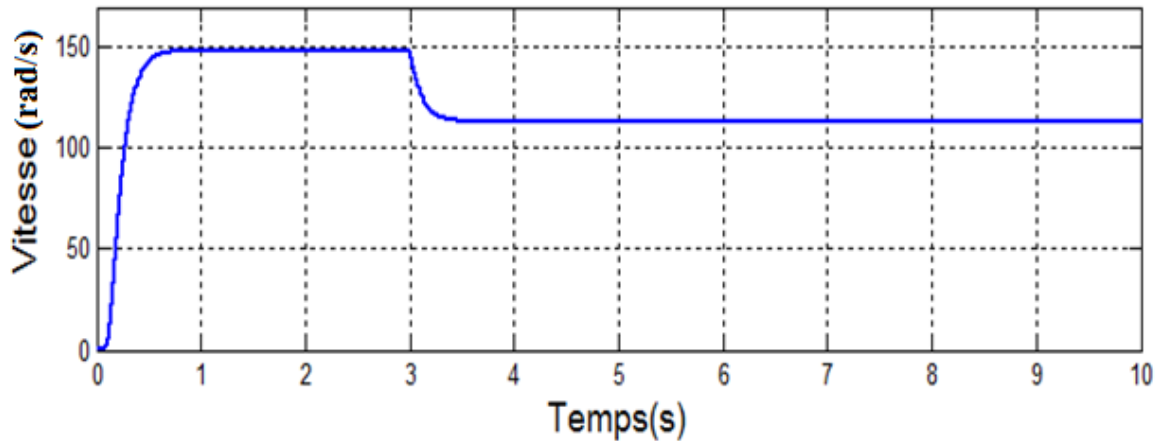
Figure IV.30 : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC

### ❖ Interopération des courbes

Après avoir utilisé cinq modules en parallèle, la puissance du générateur augmente avec une augmentation de la tension (220V) et la puissance du convertisseur ce qui nous permet d'alimenter le MCC.

#### IV.10.2.1. Moteur à courant continu avec couple résistant

On applique un couple résistant  $C_r=10$  N.m à l'instant  $T=3$  s pour bien illustrer son influence sur la vitesse, (Figure IV.31).

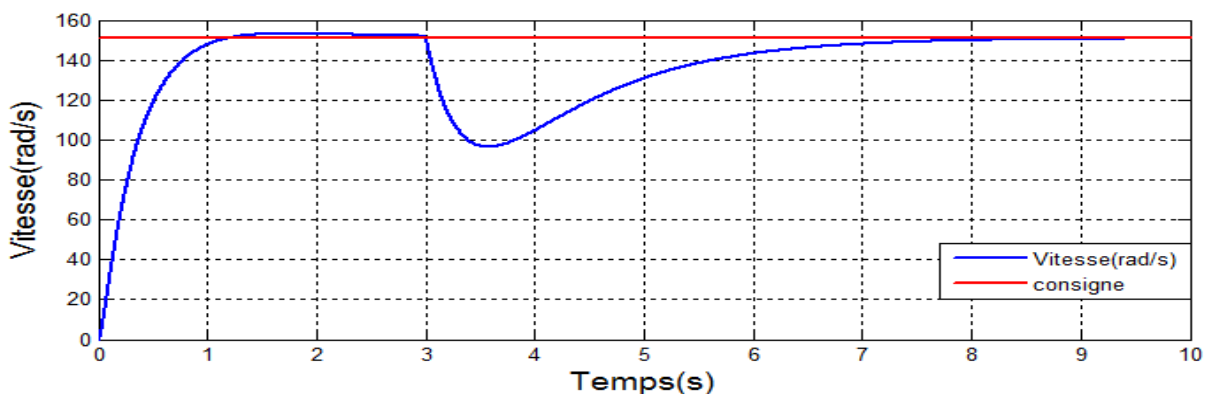


**Figure IV.31 :** Vitesse de la MCC avec application de couple résistant.

D'après la (figure IV.31) qui représente la vitesse de sortie du moteur on a appliqué un couple résistant  $C_r=10$  N.m à l'instant  $T=3$  s, on voit qu'on applique un couple, la vitesse va chuter, ce qui va changer le fonctionnement de la machine (MCC). C'est pour cela qu'on a utilisé un régulateur de vitesse (PI) pour pouvoir ramener la vitesse de la machine (MCC) à sa vitesse de référence quel que soit la charge appliquée.

#### IV.10.2.2. Régulation de vitesse MCC

Figure IV.32 représente la consigne et la vitesse de rotation du (MCC)



**Figure IV.32 :** Réponse de la vitesse avec la régulation.

D'après la (figure IV.32) qui représente la réponse de la vitesse avec une régulation, on remarque que la vitesse à chute après l'application du couple puis elle retourner vers la vitesse de référence, on conclut que le régulateur PI (proportionnel intégral) joue un rôle très important sur le système à commander (MCC) et aussi améliore les performances de notre machine (précision et stabilité).

### **IV.11.Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons testé par simulation la méthode de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) afin de visualiser le comportement de cette dernière sur un système photovoltaïque connecter a une moteur à courant continue (MCC). Les résultats de simulation ont prouvé que la méthode perturbation et observation (P&O) est robuste par rapport aux variations des conditions météorologiques (ensoleillement et température).

*Conclusion  
générale*

# Conclusion Générale

---

## Conclusion générale

Face à une industrialisation rapide des nations, à la modernisation de la société et à la croissance démographique continue des populations, la demande mondiale en énergie électrique ne cesse d'augmenter, alors que les sources d'énergie conventionnelles tendent à s'épuiser par effet de l'utilisation irrationnelle de l'humanité. Cette extraction incontrôlée des énergies naturelles va certainement conduire notre système écologique à l'instabilité.

Le recours systématique aux carburants fossiles, tel que le pétrole, le charbon et le gaz naturel dans la production de l'électricité a un impact désastreux sur l'environnement (la production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>).

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. À la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée, inépuisables et facilement exploitables. En effet, le secteur des énergies renouvelables est le seul qui se distingue par sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre et la pollution et à exploiter des sources d'énergie locales et décentralisées. Ces sources d'énergie ne sont pas touchées par la volatilité des marchés des combustibles fossiles et présentent l'avantage supplémentaire de stimuler l'emploi.

Ce présent travail a comme objectif primordial, l'amélioration du rendement d'un système d'alimentation photovoltaïque, cela ne peut être qu'à la présence d'un processus de poursuite de point de puissance maximale, connu sous le nom du contrôleur MPPT, ce dernier s'avérait indispensable pour une meilleure adaptation source/charge, permettant un transfert maximum de puissance.

En effet, afin d'extraire le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge est utilisé. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale. La solution fréquemment adoptée est l'incorporation d'un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge. Le choix de la structure de conversion est en fonction de la charge à alimenter.

Dans ce travail, il s'agit de modéliser, de simuler et de diagnostiquer un générateur photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC contrôlé par une commande MPPT, destiné à entraîner une machine à courant continu à travers un convertisseur DC-DC. Pour ce faire, nous avons commencé par une étude générale sur la conversion photovoltaïque, suivie de l'élaboration d'un modèle mathématique pour le panneau PV en se basant sur un circuit équivalent à une diode. L'objectif était la simulation du fonctionnement du générateur et l'étude de l'influence de la température et l'irradiation sur sa caractéristique courant-tension. A l'issue des simulations effectuées, nous avons constaté une forte dépendance des performances du module photovoltaïque en fonction des conditions climatiques (l'irradiation solaire et la température du module).

## Conclusion Générale

---

Pour utiliser un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, le convertisseur DC-DC associé doit être contrôlé par un algorithme traqueur du point de puissance maximale. A cet effet, nous nous sommes intéressés particulièrement à l'application de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation (P&O) dans le contrôle des convertisseurs DC-DC. Les résultats de simulation ont montrés des bonnes performances en termes de poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque.

La commande MPPT (P&O) permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle le force toujours à fonctionner au point de puissance maximale.

### **Perspectives**

Un travail de recherche n'est jamais fini...En effet, les perspectives de ce travail sont tellement nombreuses, qu'on va se limiter au niveau de celles qui ont un impact direct avec notre projet.

L'une des perspectives les plus importantes que nous avons pu réaliser dans ce travail est le concept d'adaptation source/charge, pour cela différentes méthodes de commandes MPPT ont été exposées dans la littérature, avec un intérêt particulier à la commande P&O, de ce fait, l'essor dans la compréhension de cette approche nous a qualifié à une certaine maturité, de pouvoir spécifier quelques améliorations dans le future, qu'on peut dénombrer dans les éléments suivants :

- ✓ Exploitation de nouveaux algorithmes MPPT.
- ✓ Utilisation de l'approche neuronale ou celle de la logique floue.
- ✓ Implémentation sur une carte DSP ou FPGA.
- ✓ Combiner la source photovoltaïque avec une autre énergie renouvelable pour former un système hybride.

## Annexe

---

- Les paramètres du module photovoltaïque de type (TP-160M-36)

<b>Eclairement standard : G</b>	<b>1000 W /m<sup>2</sup></b>
<b>Température standard : T</b>	<b>25°C</b>
<b>Puissance maximal (Pmax)</b>	<b>160 W</b>
<b>Tension maximal (Vmax)</b>	<b>17.7 V</b>
<b>Courant maximal (Imax)</b>	<b>9.04 A</b>
<b>Tension de circuit-ouverte (Vco)</b>	<b>22.6 V</b>
<b>Courant de court-circuit (Icc)</b>	<b>9.52 A</b>
<b>Nombre de cellule en séries</b>	<b>36</b>

- Paramètres de la machine à courant continu utilisée

<b>Paramètre d'une machine à courant continu à excitation constante</b>	
<b>Tension d'induit</b>	<b>V<sub>a</sub>=220 V</b>
<b>Résistance de l'induit</b>	<b>R<sub>a</sub>=6.67 Ω</b>
<b>Inductance de l'induit</b>	<b>L<sub>a</sub>=0.198 H</b>
<b>Coefficient du couple</b>	<b>K<sub>m</sub>=1.303</b>
<b>Coefficient de frottement</b>	<b>F=0.03 Nm.s/rad</b>
<b>Moment d'inertie</b>	<b>J=0.0398 Kg.m<sup>2</sup></b>
<b>Couple résistant</b>	<b>C<sub>r</sub>=0 N.m</b>

- Paramètres de correcteur PI

<b>Gain proportionnel</b>	<b>K<sub>p</sub>=0.6</b>
<b>Gain intégrale</b>	<b>K<sub>i</sub>=0.5</b>

## Bibliographie

---

### Bibliographie :

- [1] : Fellah Boumediene, «*Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah*» Thèse de Magister, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, Décembre 2012.
- [2] : Abdelmalek Bouden, «*Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque*». Mémoire de magistère, Université de Constantine, Algérie 2008.
- [3] : Éric Schiller« *le pompage photovoltaïque*» .Manuel de cours, Université d'Ottawa, Canada.
- [4] : K .Kassmi, M.Hamdaoui et F.Olivié, «*Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique*» Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences, Département de physique, LEPAS, Oujda, Maroc. Revue des énergies renouvelables, 451-462, 2007
- [5] : N. Chandrasekaran ,K .Thyagarajah,« *Modeling and matlab simulation of pumping system using motor powered by solar system*» European Journal of Scientific Research,6-13,2011.
- [6] : S .ABADA, « *Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic*» Mémoire maitre es Scianges, Université laval, Quebec Canada 2011.
- [7] : J .Royer, T. Djiako, E. Schiler et B. Sadasy, «*Le pompage photovoltaïque*» université d'ottawa ,1998.
- [8] : M.Orgeret, «*Les piles solaires, le composent et ces applications*» Préface de F.Allest.
- [9] : H.J. Möller. Semiconductors for Solar Cells. Artech House, Inc, Norwood, MA, 1993.
- [10] : S. M. Ait-Cheikh, «*Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques*», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [11] : C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi « *Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection l'observatoire Pierre Auger* ».2006.
- [12] : S.ABOUDA. «*Contribution à la commande des systèmes Photovoltaïque* » Thèse. Université de Reims Champagne-ardenne.2015
- [13] : Antonio Luque and Steven «*Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*», John Wiley & Sons Ltd, 2003

## Bibliographie

---

- [14] : N. Abouchabana, « *Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT* », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [15] : D. Boukhers, « *optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage* », Magister en électronique, Université de Constantine, 2007.
- [16] : H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, « *Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque* », Revue des Energies renouvelables vol.17 N: 3 (2014) 435-445, Tunisia.
- [17] : S. Sumathi, « *Solar PV and wind Energy conversion systems* », Springer, Switzerland, 2015.
- [18] : M. Belkacem, « *Etude et optimisation d'un transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance Maximale* », Mémoire Master, Université de Tlemcen, 2015.
- [19] : S. Abouda, « *contribution à la commande des systèmes photovoltaïques application aux systèmes de pompage* », Thèse doctorat, Université de Sfax, 2015.
- [20] : W. Issaadi, « *gestion d'une station de base d'un réseau mobile à l'aide d'un système photovoltaïque* », mémoire de magister, Université de Bejaïa, 2013.
- [21] : M. Amarouayache, « *contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque* », thèse doctorat, Université de Constantine 1, 2014.
- [22] : K. Ouabdelkader, H. Mersel, « *Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau* », Mémoire master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2014.
- [23] : L. Djellal, Y. Dib, « *Etude comparative de deux commandes MPPT appliquée à un système photovoltaïque* », Mémoire master, Université Abou-bekr Belkaid de Tlemcen, 2017.
- [24] : M. Boukli-hacene omar, « *Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique* », Thèse magister Université Abou-bekr Belkaid de Tlemcen, 2011.
- [25] : T. Wildi et G. Sybille, « *électrotechnique* » Canada, Decock, 2000
- [26] : René Le Dœuff et Mohammed El-Hadi Zaim, « *machines électriques tournantes* » Lavoisier, Paris, 2009.
- [27] : B. Lynda, M. Khalika, L. Samiha, « *modélisation et simulation d'une machine à courant continu* » mémoire de master, UMMTO, 2010.

## *Bibliographie*

---

[28] : Gay Seguir, Francis Notelet, «*Electrotechnique Industrielle, Technique et documentation (lavoisier)*», revu1987.

[29] : D, Benderradji, «*Contribution à la Commande Robuste de la Machine à Induction*»  
Thèse de doctorat, université de Batna 2010.

## *Résumé :*

L'alimentation correcte en énergie pour les moteurs, surtout dans les zones dépourvues de courant électrique, est un handicap pour les stations de pompage. C'est sur cette délicate problématique qu'a porté ce mémoire de master.

L'énergie photovoltaïque d'origine solaire apparaît donc comme la solution la plus attractive :

1. pour répondre aux besoins en énergie pour alimenter les moteurs.
2. pour satisfaire les besoins d'utilisations isolées, comme c'est le cas de beaucoup de régions de notre pays.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation, d'un panneau photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC contrôlé par MPPT, destiné à entraîner une machine à courant continu. Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique  $I(V)$  du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale et cela en utilisant la méthode perturbation et observation (P&O). Ces commandes connues sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking), sont associées au convertisseur DC-DC, lequel assure le couplage entre le générateur PV et la machine à courant continu en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

**Mots clés :** Générateur photovoltaïque, Hacheur, MPPT, P&O, Moteur à courant continu.