



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE MASTER

Réalisé par : MIZAT Manel

DOMAINE : science et Technologie

FILIERE : Electrotechnique

OPTION : Energie Renouvelables en Electrotechnique

Thème

**Etude et modélisation avec simulation de l'efficacité
Énergétique d'une chaîne de conversion
Photovoltaïque pour l'alimentation d'un moteur à
Courant continu.**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mdm CHETIH Saliha	Prof	Président
Mr.HAMDI Abdelwahab	MAA	Examineur
Mr. BIRANNE Mouhoub	MCA	Promoteur
Mr.LAHDEB Mohamed	MCA	Co-Promoteur

Promotion : 2020/2021

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu ALLAH le tout puissant et miséricordieux qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail

En second lieu, je remercie mon encadreur Mr BIRANNE Mouhoub et mon Co-encadreur Mr LAHDEB Mohamed pour leurs précieux conseils, leurs aides et pour leurs orientations tout au long de ma recherche

Je remercie chaleureusement l'ensemble des membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer mon travail.

Mme CHETTIH Saliha (président du jury)

Mr HAMDI Abdelwahab (examineur)

Je tiens à saisir cette occasion pour adresser mes profonds remerciements et mes profondes reconnaissances à

Tous les enseignants du département « Électrotechnique »

Je tiens à remercier très sincèrement tous les membres de ma famille et mes amis pour leurs soutiens et leurs encouragements

Je tiens à remercier toutes personnes qui ont participé de près ou de loin à l'exécution de ce modeste travail.

Dédicace

*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 mes sœurs pour leurs appuis et leur encouragement.

A tous mes amis et toute ma promotion.

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

*A L'âme de ma chère amie HAFSA Kaltoum, qu'Allah
lui fasse miséricorde.*

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

Mizat Manel

Remerciement	
Dédicaces	
Sommaire	
Listes des figures	
Listes des tableaux	
Listes des Symboles et d'abréviations	
Introduction générale	01
Chapitre I : généralités sur les générateurs photovoltaïques	
I.1. Introduction	05
I.2. Généralité sur les rayonnements solaire	05
I.2.1. Spectre solaire	06
I.2.2. Rayonnement solaire	06
I.2.2.1. Rayonnement direct	07
I.2.2.2. Rayonnement diffus	07
I.2.2.3. Rayonnement réfléchi	07
I.2.2.4. Rayonnement globale	07
I.2.3. L'énergie solaire	08
I.3. Cellule photovoltaïque	09
I.3.1. Structure physique	09
I.3.2. Fonctionnement	10
I.3.3. Les types de technologie de fabrication des cellules PV	10
I.4. Caractéristique et modélisation de la cellule PV	11
I.4.1. Modèle électrique d'une cellule PV	11
I.4.2. Caractéristique électrique d'une cellule PV	12

I.4.2.1.	Courant de court-circuit (I_{cc}).....	12
I.4.2.2.	Tension de circuit ouvert (V_{co}).....	13
I.4.2.3.	Puissances de la cellule PV.....	13
I.4.2.4.	Puissance maximale d'une cellule PV.....	13
I.4.2.5.	Rendement énergétique.....	14
I.4.2.6.	Facteurs de forme.....	15
I.5.	De la cellule au générateur photovoltaïque.....	15
I.5.1.	Module photovoltaïque.....	15
I.5.2.	Association des cellules PV.....	16
I.5.2.1.	Association série.....	16
I.5.2.2.	Association en parallèle.....	16
I.5.2.3.	Associations en série / parallèle.....	17
I.6.	Effet d'ombrage.....	18
I.7.	Comportement d'un générateur PV.....	19
I.7.1.	Caractéristique I(V).....	19
I.7.2.	Caractéristique P(V).....	20
I.7.3.	Influence d'ensoleillement.....	20
I.7.4.	Influence de la température.....	22
I.8.	Batterie.....	23
I.8.1.	Composition.....	24
I.8.2.	Principe de fonctionnement.....	25
I.8.3.	Caractéristiques.....	26
I.8.3.1.	Tension.....	26
I.8.3.2.	Charges.....	26
I.8.3.3.	Décharges.....	27
I.8.3.4.	Capacités.....	27

I.8.3.5. Example.....	27
I.9. Conclusion.....	28
Chapitre II : les différents types des convertisseurs	
II.1. Introduction	30
II.2. Constitution d'un système photovoltaïque	30
II.2.1. Cas d'étage d'adaptation DC/DC.....	30
II.2.1.1. Convertisseur série (Buck).....	31
II.2.1.2. Convertisseur boost	33
II.2.1.3. Convertisseur Buck-boost	35
II.2.2. Cas d'un étage d'adaptation DC/AC.....	37
II.2.2.1. L'onduleur centrale	36
II.2.2.2. L'onduleur string	39
II.2.2.3. Les Onduleurs intégrés aux panneaux.....	40
II.2.2.4. Les onduleurs multi-string.....	42
II.3. Conclusion.....	44
Chapitre III : Étage d'adaptation de chaine de conversion photovoltaïque	
III.1. Introduction.....	46
III.2. Étage d'adaptation.....	46
III.3. Méthode de perturbation et Observation (P&O)	49
III.4. Autre méthode.....	51
III.5. Introduction des moteurs.....	51
III.6. Conversion d'énergie.....	51
III.7. Description des différentes structures de la MCC.....	52
III.8. Principe de fonctionnement de la machine MCC.....	54
III.9. Types d'excitation de la machine MCC.....	55
III.9.1. Moteur à excitation série.....	55

III.9.2.	Moteur à excitation shunt.....	55
III.9.3.	Moteur à excitation composée.....	56
III.9.3.1.	Moteur composée à flux aditif.....	56
III.9.3.2.	Moteur composée à flux soustractif.....	56
III.9.4.	Moteur à excitation séparée.....	57
III.10.	Modélisation du MCC.....	57
III.10.1.	Équations électriques.....	58
III.10.2.	Expression du couple magnétique.....	58
III.10.3.	Équations mécaniques.....	58
III.10.4.	Moteur à courant contenu à excitation constante.....	59
III.11.	Commande en vitesse de la machine.....	59
III.11.1.	Système de commande.....	59
III.11.2.	Choix de régulateur.....	60
III.11.3.	Expression du régulateur PI.....	60
III.11.4.	Fonction de transfert de la machine.....	61
III.11.5.	Structure de la commande PI.....	63
III.12.	Conclusion.....	65
Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats		
IV.1.	Introduction.....	68
IV.2.	L'outils MATLAB/Simulink.....	68
IV.3.	Modèle du système à dimensionner.....	69
IV.4.	Dimensionnement d'un système PV avec MCC.....	70
IV.4.1.	Détermination du nombre de module à installer.....	70
IV.4.2.	Le courant totale fourni par groupe PV.....	71
IV.4.3.	La tension totale fournis par groupe PV.....	72
IV.5.	Système PV proposé.....	72

IV.6.	Simulation du GPV.....	72
IV.6.1.	Influence de la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	74
IV.6.2.	Influence de l'éclairement sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	75
IV.7.	Le bloc de simulation de l'algorithme P&O.....	76
IV.8.	Simulation de l'hacheur BOOST.....	77
IV.9.	Simulation d'un panneau PV avec MPPT et convertisseur DC/DC.	79
IV.10.	Simulation de convertisseur dans le cas centrale.....	82
IV.11.	Simulation de convertisseur dans le cas string parallèle.....	85
IV.12.	Simulation globale (GPV, Convertisseur, MPPT, MCC)	89
IV.12.1.	Simulation d'un moteur à courant continu à excitation constante...	89
IV.12.1.1.	Moteur à courant continu sans couple résistant.....	90
IV.12.1.2.	Valeur en régime transitoire.....	91
IV.12.1.3.	Valeur en régime permanent.....	91
IV.12.2.	Résultats globaux du système.....	92
IV.12.2.1.	MCC avec couple résistant.....	94
IV.12.2.2.	Régulation de vitesse MCC.....	95
IV.13.	Conclusion.....	96
Conclusion générale.....		98
Bibliographie		
Résumé		

Listes des figures

Figure I.1 : répartition spectrale du rayonnement solaire.....	06
Figure I.2 : rayonnement solaire globale.....	08
Figure I.3 : représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard...	09
Figure I.4 : schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque à une diode ...	11
Figure I.5 : puissance maximale idéale et pratique.....	14
Figure I.6 : la caractéristique résulte obtenue en association série.....	16
Figure I.7 : la caractéristique résulte obtenue en association parallèle.....	17
Figure I.8 : la caractéristique résulte obtenue en association série/parallèle.....	18
Figure I.9 : Architecture d'un panneau photovoltaïque avec une diode de protection et activation de la diode by-pass lors de la défaillance d'une cellule.....	18
Figure I.10 : caractéristique courant -tension d'un module photovoltaïque.....	19
Figure I.11 : caractéristique puissance -tension d'un module photovoltaïque.....	20
Figure I.12 : l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(v)$	21
Figure I.13 : l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $p=f(v)$	21
Figure I.14 : l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(v)$	22
Figure I.15 : l'influence de la température sur la caractéristique $p=f(v)$	23
Figure I.16 : composition interne d'une batterie plomb-acide.....	24
Figure I.17 : cellule électrochimique à plomb de base.....	25
Figure I.18 : comportement de l'accumulateur au plomb vis-à-vis.....	26
Figure II.1 : convertisseur DC/DC.....	30
Figure II.2 : schéma de base d'un convertisseur Buck.....	31
Figure II.3 : schéma équivalent de l'hacheur série S : fermé.....	32
Figure II.4 : schéma équivalent de l'hacheur série S : ouvert.....	33
Figure II.5 : schéma de base d'un convertisseur boost	33

Figure II.6 : schéma équivalent de l' hacheur parallèle S :fermé	34
Figure II.7 : schéma équivalent de l'hacheur série S : ouvert	35
Figure II.8 : schéma de base d'un convertisseur Buck -boost	36
Figure II.9 : Onduleur centrale	38
Figure II.10 : Onduleur string	39
Figure II.11 : Onduleur intégré au panneau	41
Figure II.12 : Onduleur structure de conversion multi-string	42
Figure III.1 : chaine élémentaire de conversion photovoltaïque	46
Figure III.2 : recherche et recouvrement du point de puissance maximale	48
Figure III.3 : Organigramme de la méthode de perturbation et Observation	50
Figure III.4 : conversions d'énergie	52
Figure III.5 : constitutions d'une machine à courant continu	53
Figure III.6 : schéma électrique d'un moteur à excitation série	55
Figure III.7 : schéma électrique du moteur à excitation shunt	56
Figure III.8 : schéma électrique du moteur composé à flux aditif	56
Figure III.9 : schéma électrique du moteur compound à flux soustractif	57
Figure III.10 : schéma électrique du moteur à excitation séparée.....	57
Figure III.11 : schéma électrique du modèle de moteur choisi	58
Figure III.12 : structure générale de la commande en boucle fermé	60
Figure III.13 : schéma bloc de la boucle du courant	61
Figure III.14 : schéma bloc de la boucle de couple	62
Figure III.15 : schéma bloc de la boucle de vitesse	62
Figure III.16 : schéma bloc de vitesse de rotation en fonction de la force contre électromotrice	62
Figure III.17 : schéma fonctionnel du moteur à excitation séparée	63

Figure III.18 : schéma de commande utilisent la structure PI.....	64
Figure IV.1 : Bibliothèque Simulink	69
Figure IV.2 : schéma synoptique du système photovoltaïque contrôlé par la MPPT.	70
Figure IV.3 : schéma de générateur photovoltaïque en MATLAB-Simulink	73
Figure IV.4 : caractéristique $I=f(v)$ du module à ($G=1000 \text{ w/m}^2$ et 25°C)	73
Figure IV.5 : caractéristique $P=f(v)$ du module à ($G=1000 \text{ w/m}^2$ et 25°C)	74
Figure IV.6 : caractéristique tension-courant pour différentes valeurs de la température.....	74
Figure IV.7 : caractéristique puissance-tension pour différentes valeurs de température	75
Figure IV.8 : caractéristique tension-courant pour différentes valeurs de l'éclairement	75
Figure IV.9 : caractéristique puissance-tension pour différentes valeurs de l'éclairement	76
Figure IV.10 : schéma bloc de l'algorithme (P&O)	76
Figure IV.11 : schéma bloc d'un convertisseur survolteur BOOST.....	77
Figure IV.12 : signal de commande le rapport cyclique (D).....	78
Figure IV.13 : la tension d'entrée et de sortie du convertisseur survolteur.....	79
Figure IV.14 : schéma bloc d'un système photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT « perturbation et Observation »	79
Figure IV.15 les condition de simulation STC ($G=1000 \text{ w/m}^2$, 25°C)	80
Figure IV.16 : tension de sortie du système.....	80
Figure IV.17 : puissance de sortie du système.....	81
Figure IV.18 : courant de sortie du système.....	81
Figure IV.19 . Schéma MATLAB SIMULINK globale des générateurs PV avec convertisseur central.....	82
Figure IV.20 . Résultats de simulation de la tension d'entrée et la tension de sortie du système.....	83
Figure IV.21 : résultats de simulation du courant de sortie du système	84
Figure IV.22 : résultats de simulation de la puissance de sortie du système	84
Figure IV.23 : résultats de simulation de la puissance d'entrée su système.....	85

Listes des figures

Figure IV.24 : schéma MATLAB-Simulink globale du générateur PV avec convertisseur parallèle	86
Figure IV.25 : résultats de simulation de la tension d'entrée et tension de sortie du système	87
Figure IV.26 : résultats de simulation du courant de sortie du système	87
Figure IV.27 : résultats de simulation de la puissance d'entrée du système	88
Figure IV.28 : résultats de simulation de la puissance de sortie du système	88
Figure IV.29 : schéma bloc du système globale (GPV, convertisseur, MPPT, MCC)	89
Figure IV.30 : Bloc de simulation de la MCC.....	90
Figure IV.31 : Caractéristique du courant et la vitesse en fonction du temps de la MCC sans couple résistant	91
Figure IV.32 : puissance de sortie du générateur photovoltaïque	93
Figure IV.33 : tension de sortie du convertisseur DC/DC	93
Figure IV.34 : puissance de sortie du convertisseur DC/DC	94
Figure IV.35 : vitesse de la MCC avec l'application de couple résistant	94
Figure IV.36 : réponse de la vitesse avec la régulation	95

Liste des tableaux

Tableau I.1: performance des différentes filières de silicium.....	10
Tableau II.1 : Caractéristique technique de différent configuration	42
Tableau II.2 Synthèse des différentes architectures des système PV raccordé au réseau	43

Liste des symboles

- E_{ph} : L'énergie d'un photon
- h : Constante de Planck [$j. s^{-1}$].
- C : Vitesse de la lumière [$m. s^{-1}$].
- λ : Longueur d'onde [m].
- I_{ph} : Photo-courant (A).
- I_{sat} : Le courant de saturation (A)
- R_s : La résistance série (Ω).
- R_{sh} : La résistance parallèle shunt (Ω)
- 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 ($1.2 A / cm^2 K^3$)
- T : Température effective de la cellule (K)
- G : L'ensoleillement en (W / m^2)
- q : Charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} C$)
- E_g : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)
- K : Constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23} J/k$)
- 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 (Ω)
 I_f : Courant d'inducteur (A)
 L_f : Inductance de l'inducteur (H)
 U_a : Tension de l'induit (V)
 R_a : Résistance équivalente de l'induit (Ω)
 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)
 Ω_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 ($V/rad.s^{-1}$)
 J : Moment d'inertie ($Kg.m^2$)
 f : Coefficient de frottement ($N.m.s/rad$)
 K_p : Gain proportionnel du correcteur PI
 K_i : Gain intégral de correcteur PI.

Listes des Abréviation

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

Introduction

Générale

Introduction générale

L'augmentation de la consommation mondiale d'électricité au cours des dernières décennies a été fortement liée à l'avancement de l'industrie, des transports et des technologies de communication. De nos jours, une grande partie de la production d'électricité provient de ressources non renouvelables telles que le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Cela impliquera un risque non négligeable d'épuisement de ces ressources dans un avenir proche.

En conséquence, la demande continue d'augmenter et tend dès à présent être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par un changement de fluctuation du prix mondial du pétrole.

D'autre part, ce type de consommation d'énergie a un impact négatif sur l'environnement. Pour les hydrocarbures de charbon, par exemple, des quantités importantes d'émissions de gaz à effet de serre sont produites quotidiennement ; ce qui joue un rôle important dans le changement et le dérèglement climatique et l'augmentation de la pollution. Ce constat motive les chercheurs à chercher des méthodes plus innovantes, palliant le déficit énergétique tout en limitant l'impact négatif sur l'environnement. Ainsi, le développement de sources d'énergie non polluantes à base d'énergies renouvelables est de plus en plus recherché, tant par les producteurs d'énergie que par les autorités gouvernementales.[19]

L'énergie renouvelable fait référence à l'énergie dérivée du soleil, du vent, de l'eau, de la chaleur de la terre ou de la biomasse. Contrairement aux combustibles fossiles, les énergies renouvelables ont un approvisionnement illimité, sont inépuisables et facilement exploitées. 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, tout en utilisant des sources d'énergie locales et décentralisées. Ces sources d'énergie ne sont pas affectées par la volatilité des marchés des combustibles fossiles et ont l'avantage supplémentaire de stimuler l'emploi.

Le soleil fournit de grandes quantités d'énergie lumineuse à la Terre. Cependant, le problème est que la forme sous laquelle nous recevons de l'énergie n'est pas toujours la même que la forme sous laquelle cette énergie peut être utilisée. Par conséquent, nous devons

INTRODUCTION GENERALE

utiliser des processus de conversion de l'énergie. Les cellules solaires photovoltaïques, par exemple, permettent la conversion de l'énergie lumineuse solaire en énergie électrique.

Le système photovoltaïque se distingue par ses qualités intrinsèques : ses coûts d'exploitation sont très diminués (le combustible est gratuit), ses exigences d'entretien sont limitées, il est silencieux, fiable et relativement facile à installer. En plus de cela, dans certains cas d'applications dans des sites isolés, le photovoltaïque est assez pratique par rapport à d'autres sources, en particulier dans les endroits difficiles d'accès où l'installation de lignes électriques traditionnelles est peu rentable.

L'électricité solaire est en train de s'imposer depuis que les panneaux solaires sont devenus très disponibles avec un rendement acceptable. En parallèle la technologie des composants semi-conducteurs de grande puissance a nettement évolué par l'introduction de composants de puissance très performants du point de vue rendement et puissance de fonctionnement.[19]

Le but essentiel de notre travail est l'étude avec simulation d'un système photovoltaïque qui alimente une machine électrique tournante (MCC), au biais d'un étage d'adaptation DC/DC hacheur BOOST commandé par la méthode de recherche du point de puissance maximale MPPT.

Ce manuscrit s'organise selon le plan de travail suivant :

Dans le premier chapitre nous présenterons les principales caractéristiques d'un générateur photovoltaïque (GVP) ainsi que la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, on ira miser la lumière sur les différents convertisseurs statiques DC/DC et DC/AC appliqués sur le système photovoltaïque.

Par la suite le troisième chapitre sera consacré aux principaux algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT) d'un GPV développé et les plus répandus. En particulier ceux émergents sur la technique P&O ensuite termine par une description de notre charge la machine électrique tournante (MCC)

Dans le dernier chapitre on présentera les résultats obtenus par la simulation du système PV, les différentes topologies avec la commande MPPT (P&O) et notre charge continue.

INTRODUCTION GENERALE

Nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale dans laquelle nous donnerons les perspectives et les améliorations qui peuvent être prises en compte pour la continuité de ce travail.

Chapitre I

Généralité sur les générateurs

Photovoltaïques

I.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette transformation s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) fondé sur un phénomène physique connu sous le nom effet photovoltaïque qui implique la création d'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 parallèle / série donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale P_{max} . De nos jours et selon l'utilisation globale, l'énergie électrique générée est disponible sous forme d'électricité directe (alimenter une charge) ou stockée en batteries.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous vous rappelons dans ce chapitre quelque notion de base sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi que le générateur solaire PV et leurs performances sur le rendement énergétique de conversion.

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 /m²/jour [2].

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

I.2.1. Spectre solaire

Le spectre solaire et la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde (λ) ou de la fréquence (ν).

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde qui varie entre de 0,22 à 10 μm .

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 ($0,78 < \mu < 10 \mu\text{m}$).

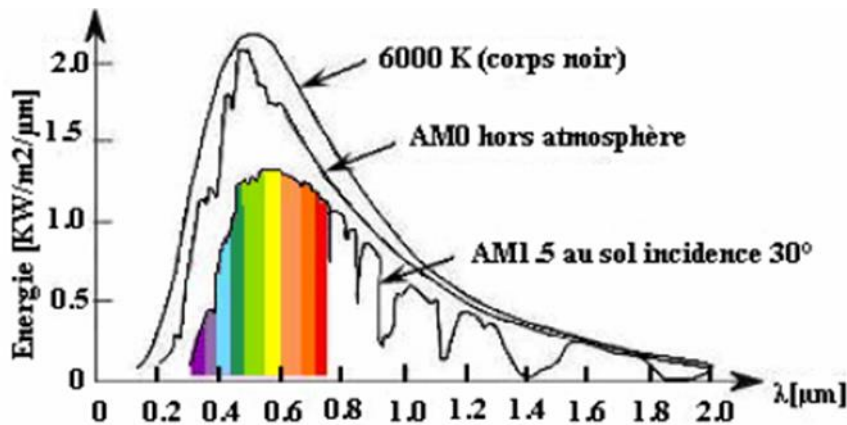


Figure I.1. Répartition spectrale du rayonnement solaire, [3]

Dans les conditions AM0 : hors atmosphère à haute altitude.

Dans les conditions AM2 : pour atmosphère terrestre, le soleil étant à 30° sur l'horizon.

I.2.2. Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile formée de gaz extrêmement chauds, il est constitué de 75% d'hydrogène, 23% d'hélium et 2% d'autres molécules. Les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. La masse est alors transformée en énergies selon la formule d'Einstein ($E=mc^2$). Cette réaction maintient la surface du soleil à une température approximative de 5800 K. L'énergie du soleil est transformée sous forme de rayonnement dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsqu'elle a parcouru 150 millions de kilomètres du soleil vers la terre, sa

densité extraterrestre totale diminue à 1367 W/m^2 . Cette valeur est connue sous le nom de constante solaire. En une heure, la terre reçoit suffisamment d'énergie du soleil ($1,2.10^{17} \text{ W}$) pour combler ses besoins pour presque une année. Les panneaux photovoltaïques permettent de profiter de cette énergie gratuite en la transformant en énergie électrique [21] [22].

Le rayonnement solaire est une propagation d'ondes de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10^{-6} [m] . Il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité. Il existe plusieurs types de rayonnement [23] :

I.2.2.1. Rayonnement direct

Est un rayonnement qui est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux et peuvent être mesurés par un pyromètre.

I.2.2.2. Rayonnement diffus

Il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa diffusion engendre un phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet « éclatement » des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

I.2.2.3. Rayonnement solaire réfléchi

Rayonnement solaire réfléchi ou « l'albédo » du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement réfléchi peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

I.2.2.4. Rayonnement global

Rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyromètre ou un « Solari mètre » sans écran. Ainsi :

$$\text{Rayonnement Globale} = \left\{ \begin{array}{l} \text{rayonnement direct} \\ + \\ \text{rayonnement diffus} \\ + \\ \text{rayonnement réfléchi} \end{array} \right.$$

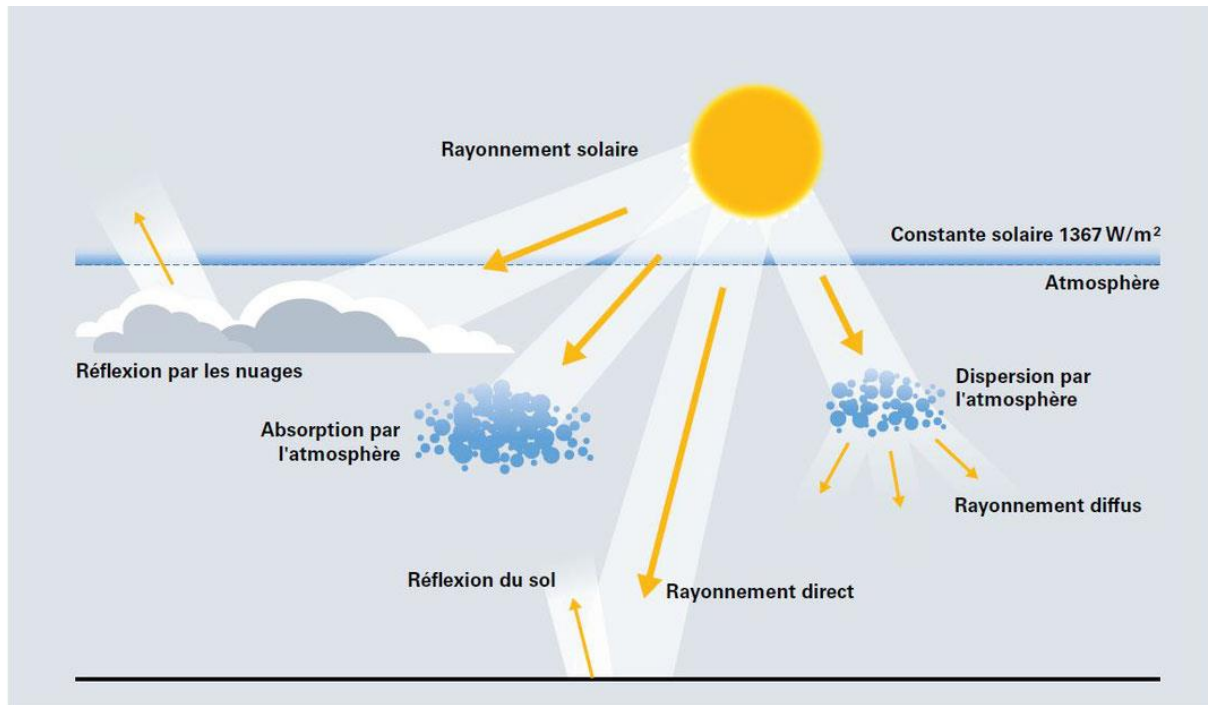


Figure I.2 : Rayonnement solaire globale

I.2.3. L'énergie solaire

Il a été démontré que le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle-même, à la relation suivante :

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

Avec :

h : la constante de Planck [j.s^{-1}].

C : la vitesse de la lumière [m.s^{-1}].

λ : la longueur d'onde [m].

D'après la relation (I.1), on voit que cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est alors transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'ondes sont assez différentes du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre telle quelle le montre la figure I.1. Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère [3].

I.3. Cellule photovoltaïque

I.3.1. 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.

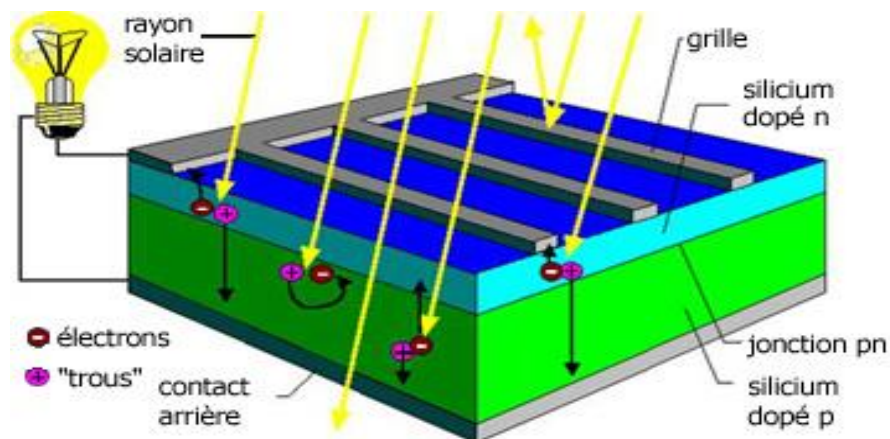


Figure I.3 : Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard.

I.3.2. 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 ($h\nu > E_g$). Ceci s'appelle l'effet photovoltaïque. Les porteurs de charge nouvellement créés dans la région d'épuisement sont séparés par le champ électrique existant. Ceci mène à une polarisation de la jonction PN et accumule 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.3.3. Les types de technologies de fabrication des cellules photovoltaïques

Différents types de technologies de fabrication des cellules photovoltaïques existent sur le marché, en effet les cellules photovoltaïques basés sur le silicium cristallin dominent le marché avec plus de 90%. On distingue deux catégories des cellules fabriquées à partir du silicium cristallisé, celles à partir de silicium monocristallin et celles à partir de silicium polycristalline. Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium polycristallin mais de rendement plus élevé. Le silicium est aussi utilisé dans la technologie dite amorphe, lors de sa transformation, le silicium produit un gaz, qui sera projeté sur une feuille de verre. Ce type de cellules présente l'avantage d'être intégré sur des supports souples ou rigides, il est utilisé généralement pour les calculatrices et les montres. Le tableau I.1 montre les performances des différentes filières silicium présentent actuellement sur le marché [4].

Table I.1. Performances des différentes filières silicium.

Technologie	Rendement typique	Influence de la température	Taux de dégradation
Monocristallin	25 à 27%	-0.442% par °C	-0.38% par an
Poly cristallin	21 à 23 %	-0.416% par °C	-0.35% par an
Amorphe	9 à 11%	-0.175% par °C	-1.15% par an

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 sont insérées dans ce schéma.

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

- La résistance 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.

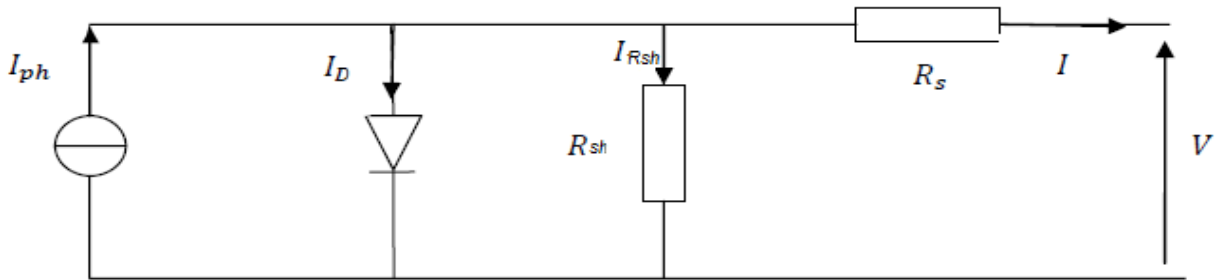


Figure I.4: Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.

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

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I \quad \text{Donc} \quad I = I_{ph} - I_{Rsh} - I_D \quad (\text{I.2})$$

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

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V + (I * R_s)}{nV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + (I * R_s)}{R_{sh}} \quad (\text{I.3})$$

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

$$I_{ph} = [I_{Sc} + (K_i * (T - 298))] * \frac{G}{1000} \quad (\text{I.4})$$

$$I_{sat} = \left(I_{Sc} * \exp \left[\left(\frac{V_{co}}{nV_t} \right) \right] - 1 \right) * \left(\frac{T}{298} \right)^3 * \exp \left[\frac{q * E_g * \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T} \right)}{nk} \right] \quad (\text{I.5})$$

D`où :

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 nul. 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.3), on obtient :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{(I_{cc} * R_s)}{nV_t} \right) - 1 \right] - \frac{(I_{cc} * R_s)}{R_{sh}} \quad (I.6)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_{sat} \left[\exp \left(\frac{(I_{cc} * R_s)}{nV_t} \right) - 1 \right]$ devant I_{ph} L'expression approchée du courant de court-circuit et alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (I.7)$$

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 ou la cellule est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque)

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{nKT} - 1\right) - \frac{V}{R_{sh}} \right] \quad (\text{I.8})$$

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

$$V_{co} = V_t \ln\left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1\right] \quad (\text{I.9})$$

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 :

$$P = VI \quad (\text{I.10})$$

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} :

$$P_{max} = V_{co} I_{cc} \quad (\text{I.11})$$

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.6), 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 :

$$P_{max} = V_{max} I_{pmax} \quad (I.12)$$

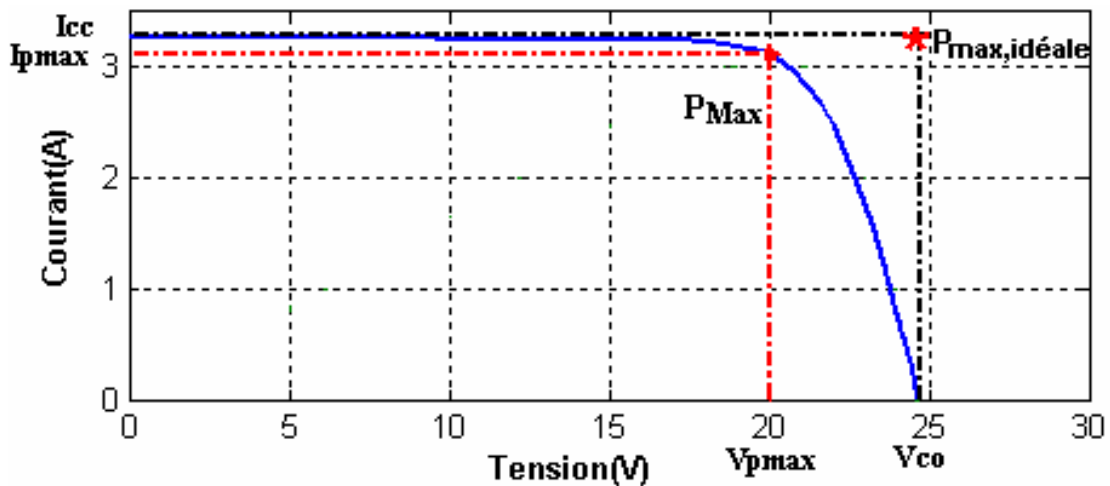


Figure I.5 : Puissance maximale idéal et pratique

I.4.2.5. Rendement énergétique

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

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{V_{max} I_{max}}{P_{inc}} \quad (I.13)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles.

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 $P_{max} (V_{max}I_{max})$ 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 :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{cc}V_{co}} \quad (\text{I.14})$$

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 augmenter 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'élever 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 parallèle, en série ou en parallèle série. Les connections en parallèle de plusieurs cellules accroît le courant pour une même tension, tandis que la mise en série augmente la tension en conservant le courant.

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 (figure1.6) montre la caractéristique résultante (I_{scc}, V_{co}) avec :

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

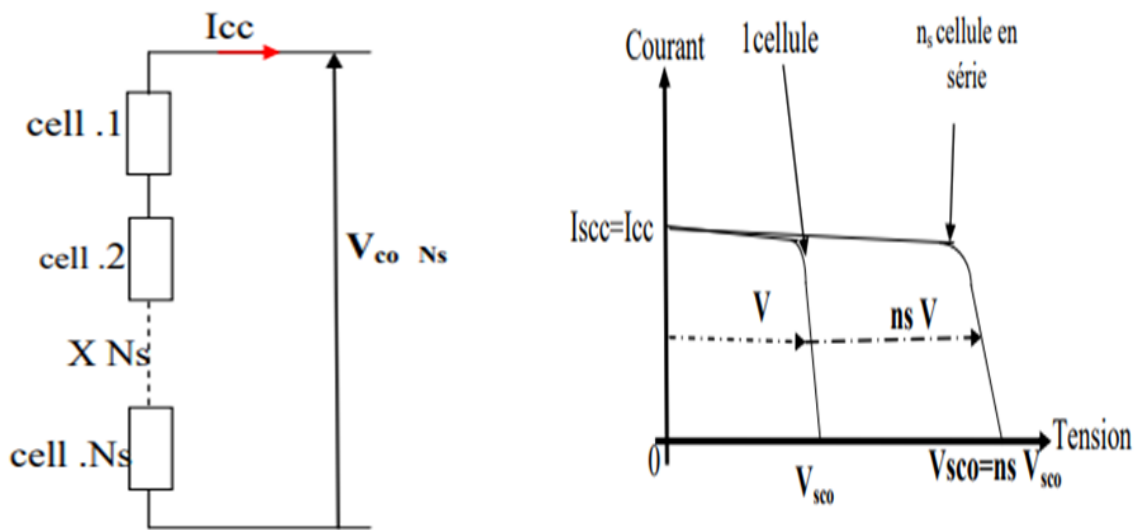


Figure I.6 : la caractéristique résultante obtenue en association en série

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 1.7) montre la caractéristique résultante (I_{pcc}, V_{pco}) Avec :

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

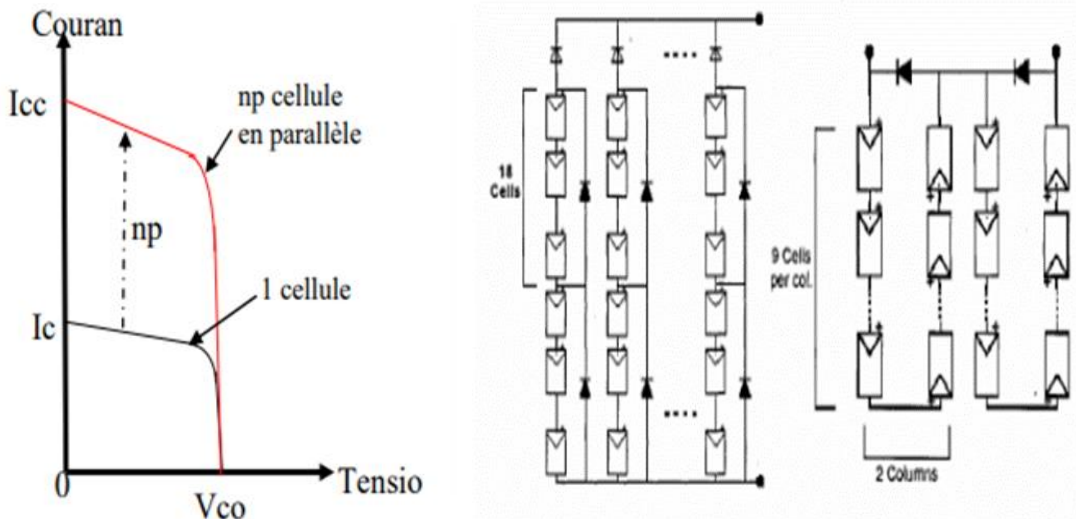


Figure I.7 : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles

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 :

$$I_{spcc} = np * I_{cc} \quad \text{et} \quad V_{spco} = ns * V_{co} \quad [12]$$

np : nombre de cellule en parallèle.

ns : nombre de cellule en série.

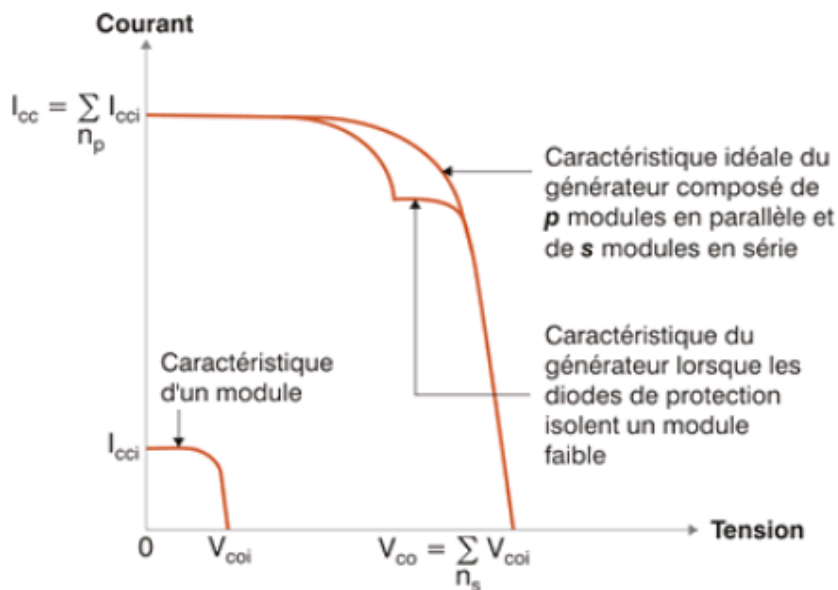


Figure I.8 : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.

I.6. L'effet d'ombrage

Une installation photovoltaïque est destinée à produire de l'énergie électrique pendant des années, il est donc indispensable d'ajouter des protections électriques aux modules pour éviter des pannes destructrices liées à l'association en série et en parallèle des cellules. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés :

- La diode anti-retour : empêche la circulation d'un courant négatif dans les GPV lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle. Cette diode est indispensable lorsque la charge est une batterie pour qu'elle ne débite pas sur le module PV pendant la nuit.
- Les diodes by-pass : servent à isoler un ensemble de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène pour éviter l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

La figure (I.9) montre l'architecture d'un panneau photovoltaïque avec les diodes de protection, et la mise en évidence du courant de circulation dans le cas de la défaillance d'une cellule [4].

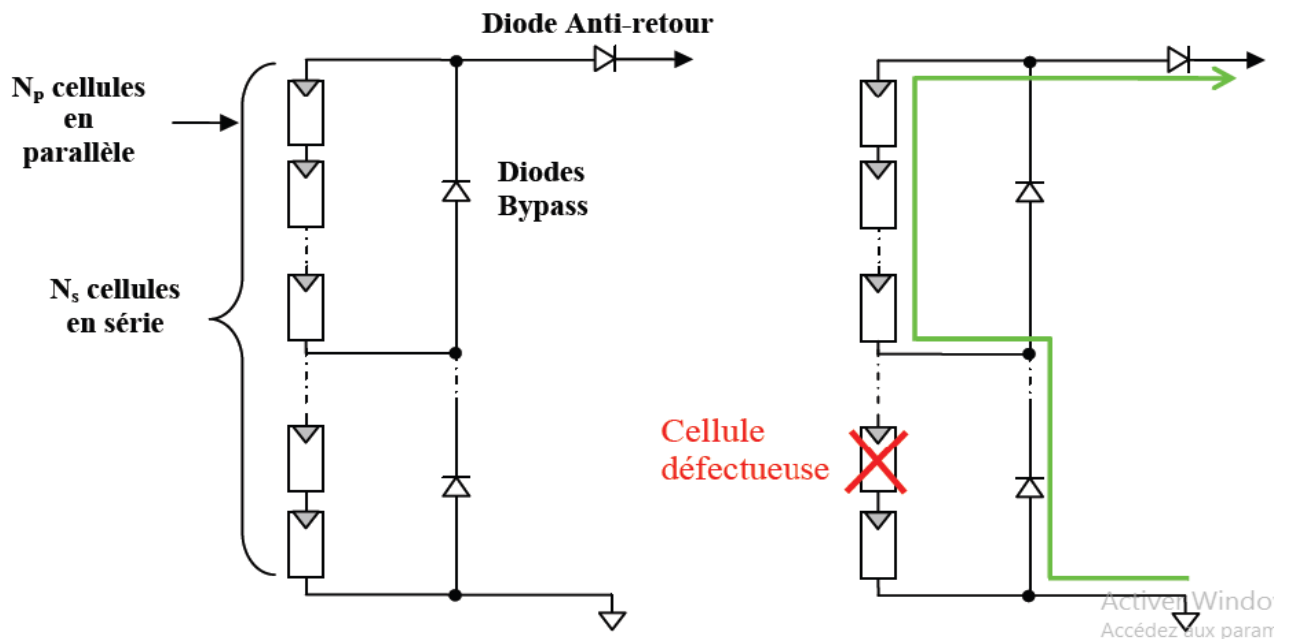


Figure I.9. Architecture d'un panneau photovoltaïque avec diodes de protection, et activation de la diode by-pass lors de la défaillance d'une cellule [3].

I.7. Comportement d'un générateur photovoltaïque

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

I.7.1. Caractéristique Courant-Tension

La figure (I.10) représente la courbe $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

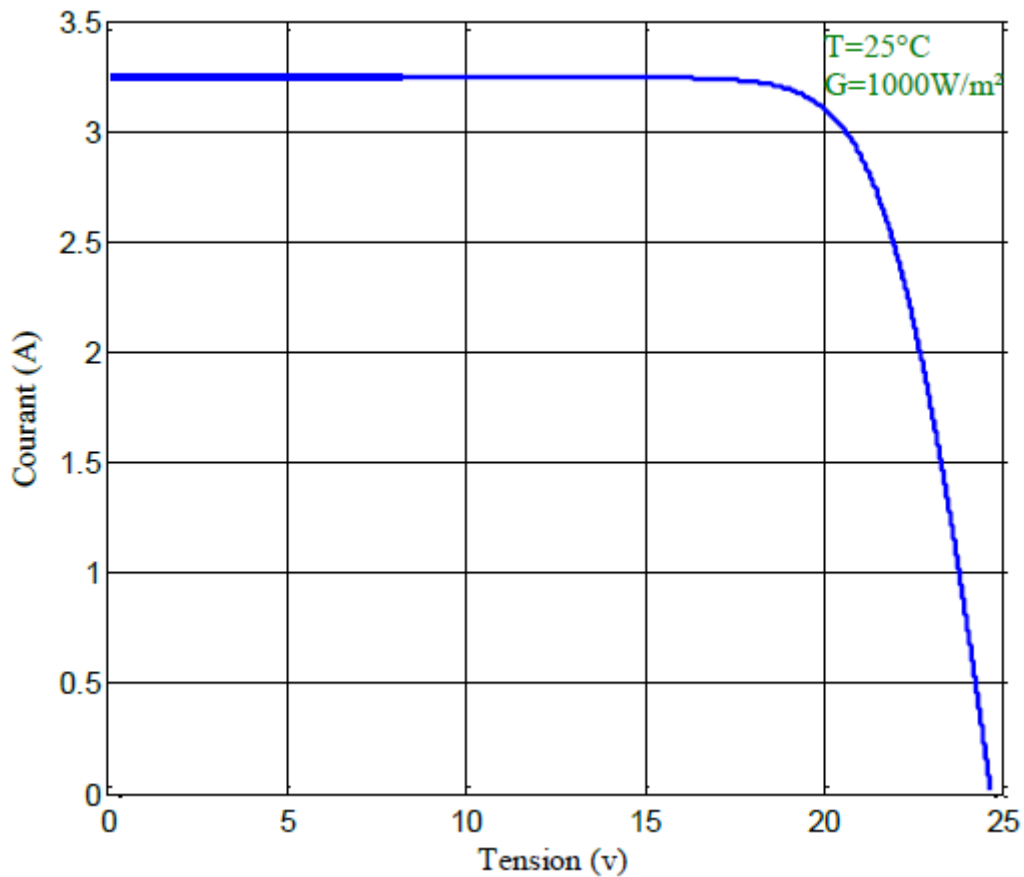


Figure I.10. Caractéristique Courant –Tension d'un module photovoltaïque.

I.7.2. Caractéristique Puissance-Tension

La figure (I.11) représente la courbe $P = f(V)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

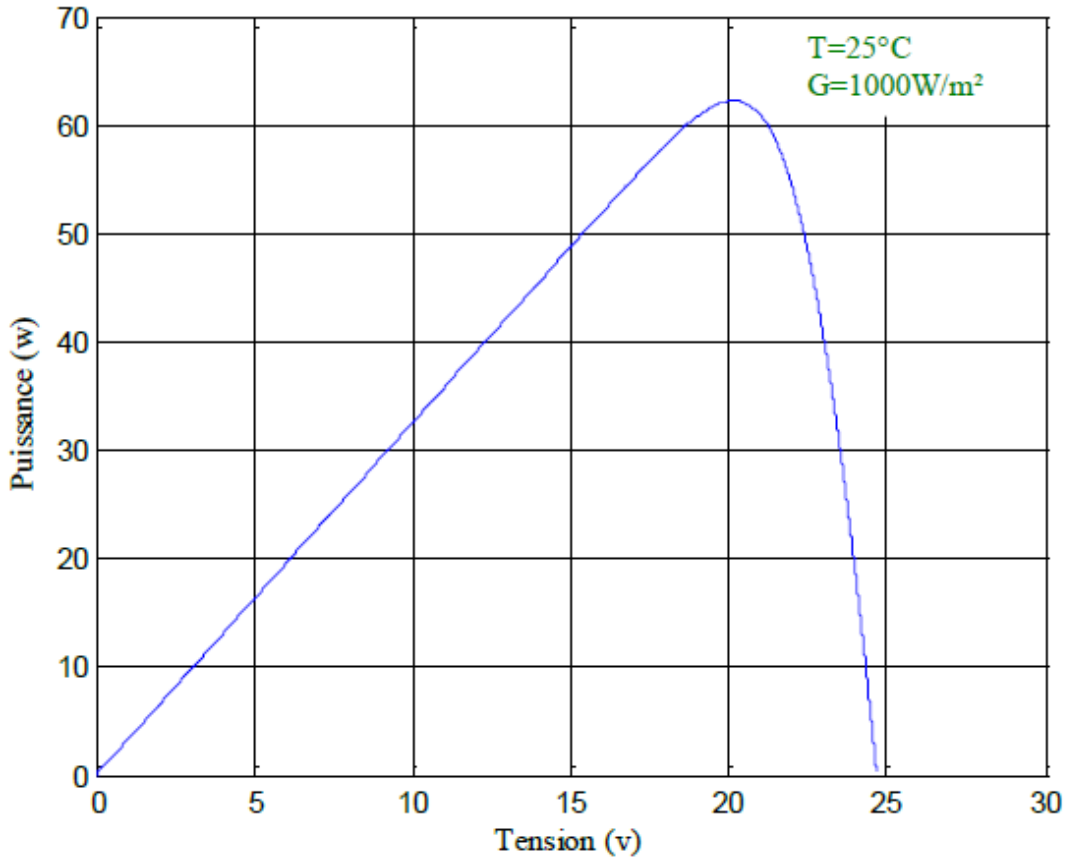


Figure. I.11. Caractéristique Puissance –Tension d'un module photovoltaïque.

I.7.3. Influence de l'ensoleillement

Une diminution de l'ensoleillement provoque une baisse de la création de paires électron-trou avec un courant changé à l'obscurité. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du courant de diode et de la photo courant 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.

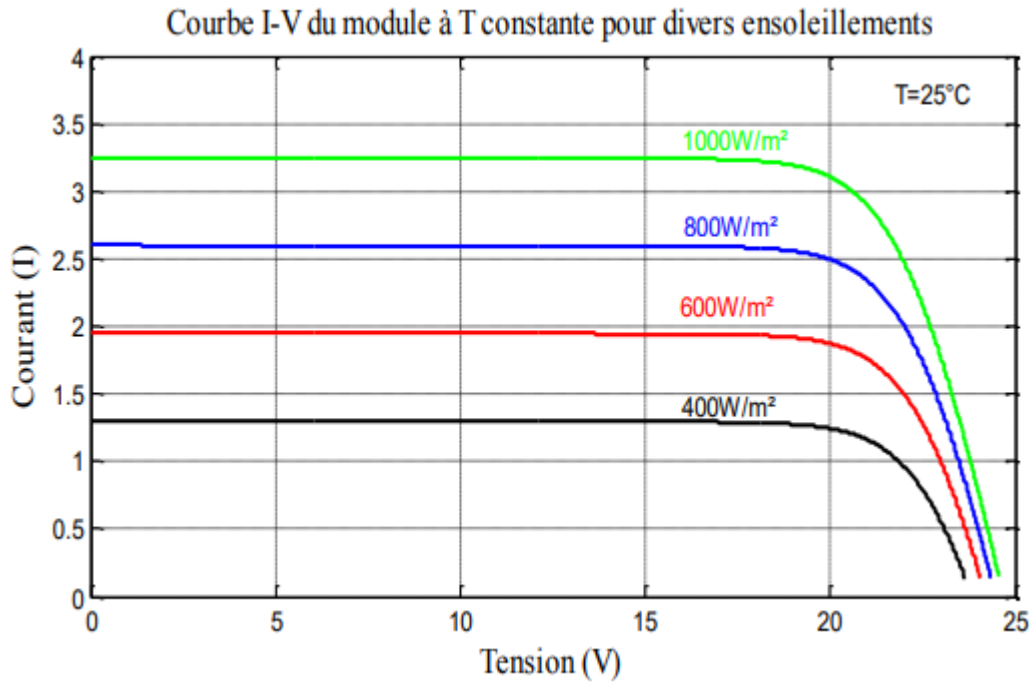


Figure I.12 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$

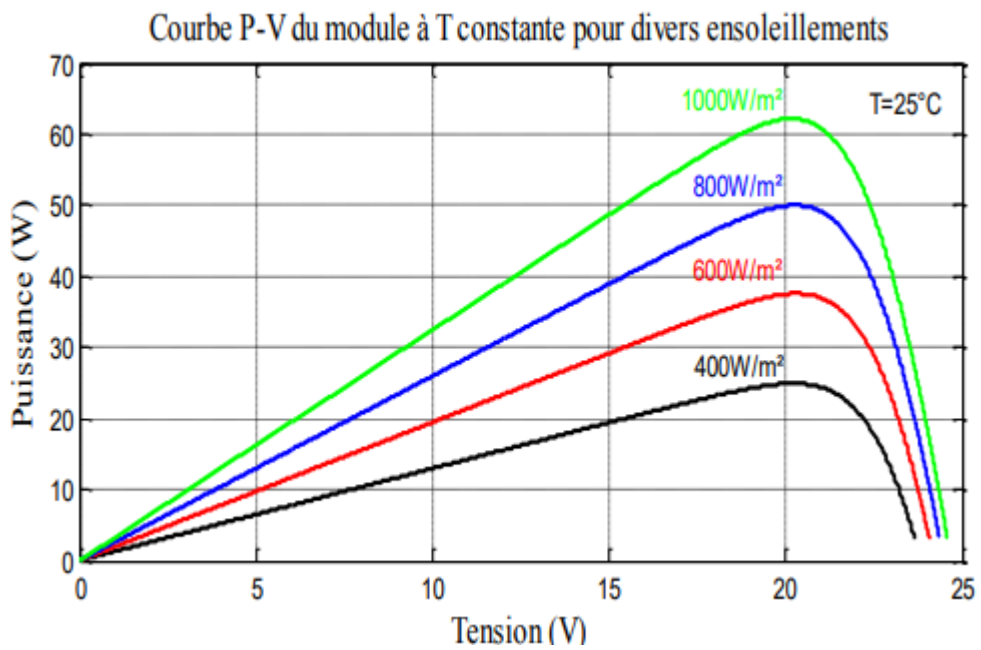


Figure I.13 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$

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

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.7.4. 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°C à 75°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 suivants représentent des courbes I(V) et P(V) pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante.

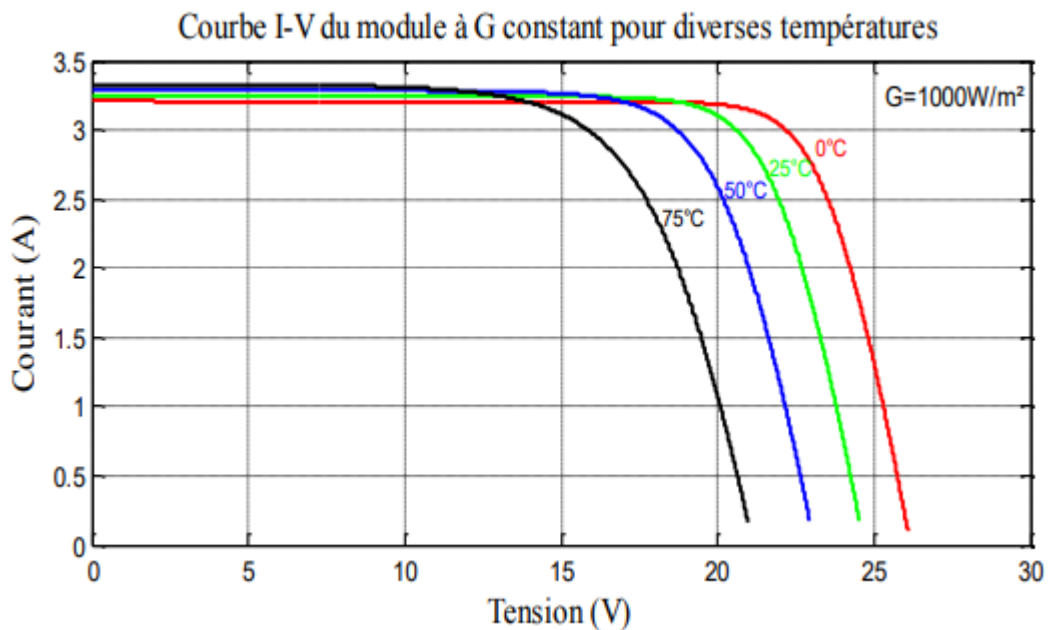


Figure I.14 : L'influence de la température sur la caractéristique I=f(V)

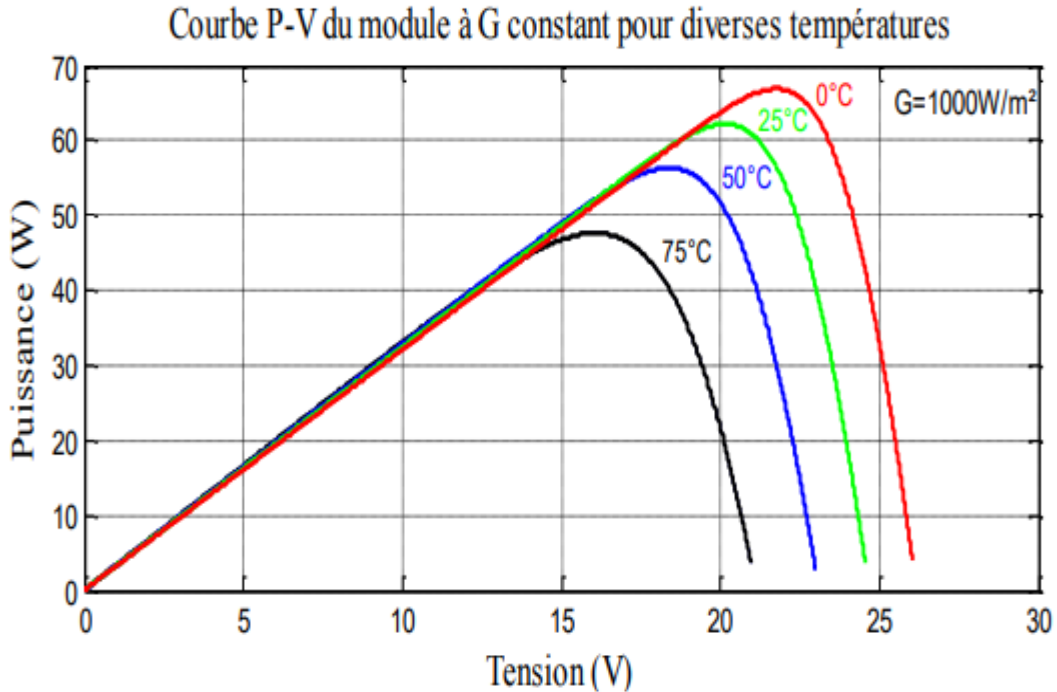


Figure I.1 5 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$

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.8. Batterie

L'un des inconvénients majeurs des systèmes photovoltaïques réside dans les pénuries permanentes de l'énergie solaire, qui sont dues aux diverses raisons. Parmi lesquelles on dénote ; l'apport périodique de l'énergie solaire (alternances jour/nuit, été/hiver) et l'effet météorologique aléatoire, la durée d'ensoleillement qui est subordonnée aux différentes saisons (position du soleil par rapport au zénith), ...etc.

En conséquence, chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport solaire, le stockage de l'électricité se révèle alors très important.

Pour cela le système tampon le plus couramment utilisé pour les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques bien connue dans le domaine automobile.

Les accumulateurs électrochimiques sont des générateurs "réversibles" c'est-à-dire pouvant stocker l'énergie électrique sous forme chimique puis la restituer à tout moment sur demande grâce à la réversibilité de la transformation. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes, le courant circulant sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie de nombreux types d'accumulateurs électrochimiques existent (Pb, CdNi, NiZn,...), toutefois un des plus anciens et des plus couramment utilisés dans l'automobile est l'accumulateur au plomb. Celui-ci subit des perfectionnements constants pour améliorer ses performances en vue de l'utilisation la mieux adaptée au photovoltaïque [25].

I.8.1. Composition

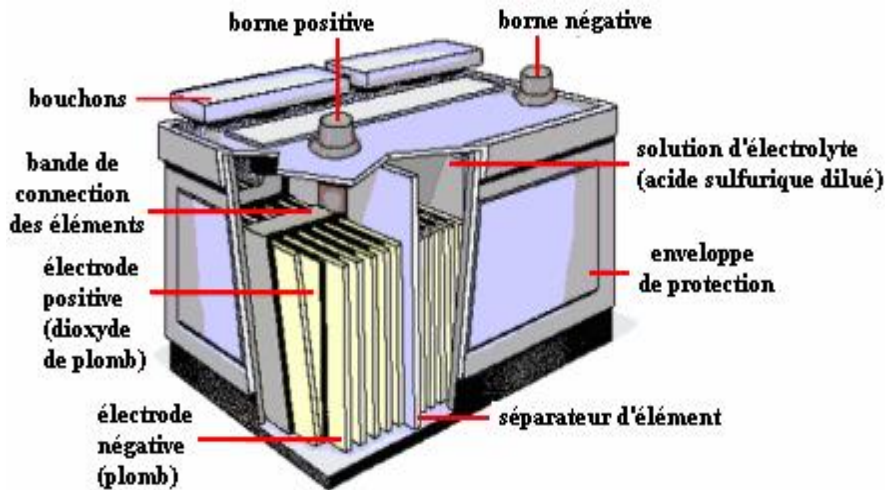


Figure 1.16. Composition interne d'une batterie plomb-acide [25]

Une batterie plomb-acide est généralement composée de :

1. L'électrode positive est une plaque rectangulaire en plomb renforcée par des nervures entre lesquelles sont disposées des lamelles ou des tubes constitués par des oxydes de plomb.
2. L'électrode négative est une plaque de plomb à surface gaufrée dont les alvéoles sont garnis de plomb spongieux.
3. L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique dont la densité varie en fonction de l'état de charge de la batterie.
4. Organisation : L'énergie qu'on peut emmagasiner dans un accumulateur étant proportionnelle à la surface des électrodes, on a intérêt à augmenter leurs dimensions. Pour éviter un trop grand encombrement, on constitue deux faisceaux de plaques parallèles positives et négatives intercalées. L'ensemble des plaques est immergé dans l'électrolyte contenu dans un bac en matière isolante (verre ou matière plastique).

I.8.2. Principe de fonctionnement

Pendant la décharge, la concentration de l'acide sulfurique décroît. Inversement, l'acide sulfurique se reforme pendant la charge. Le moyen le plus sûr de vérifier l'état de charge est de mesurer la densité de l'électrolyte, ce qui permet de connaître la concentration en acide

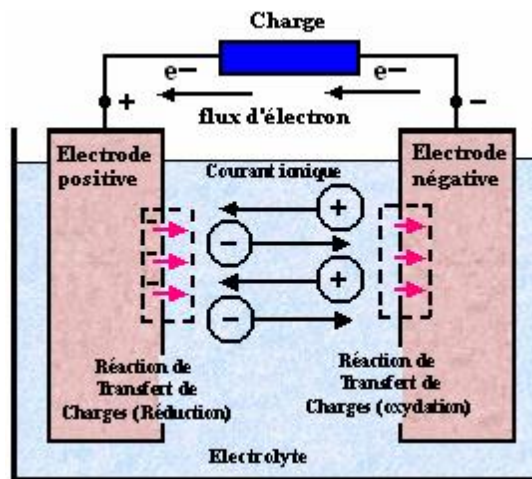


Figure 1.17. Cellule électrochimique à plomb de base

En fin de charge, si on prolonge le passage du courant, l'hydrogène et l'oxygène résultant de la décomposition de l'eau finissent par se dégager à l'état gazeux sur les électrodes (Electrolyse). Si la décharge se produit trop longtemps, ou si on ne surveille pas la concentration d'acide sulfurique, celui-ci peut attaquer les plaques en donnant du sulfate de plomb qui n'est plus détruit par la suite. L'accumulateur se sulfat, il finit par devenir inutilisable.

I.8.3. Caractéristiques

I.8.3.1. Tension

La tension aux bornes d'un élément d'accumulateur au plomb est voisine de 2V. Sa valeur varie entre 1,8 V et 2,2 V suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement [25].

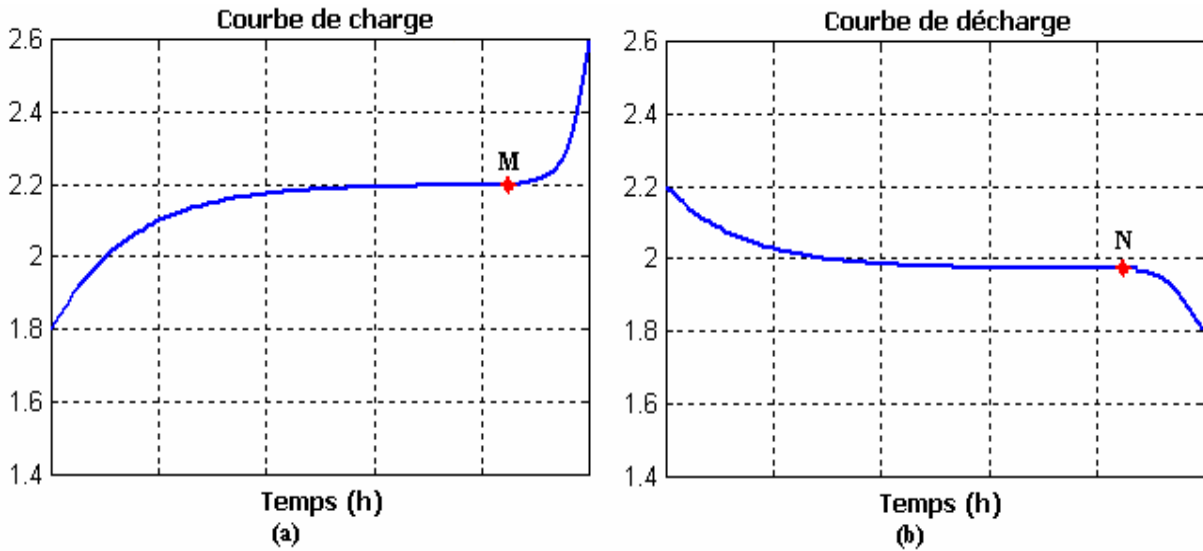


Figure 1.18. Comportement de l'accumulateur au plomb vis-à-vis

Le phénomène de charge et décharge, (a) Courbe de charge, (b) Courbe de décharge.

I.8.3.2. Charge

Pendant la charge, l'accumulateur est un récepteur. Si on trace graphiquement la différence de potentiel à ses bornes en fonction du temps, on constate qu'après un court régime transitoire elle s'établit aux environs de 2,2 V.

En fin de charge (point **M**) figure 1.18. (a), on note un accroissement rapide de la tension. Les plaques, complètement polarisées, ne retiennent plus l'oxygène et l'hydrogène dégagés. La fin de charge est atteinte à 2,6 V en charge cyclique.

En charge flottante (régulation de charge) on se limite entre 2,25 V et 2,35 V par élément.

I.8.3.3. Décharge

Pendant la décharge, la force électromotrice varie, en fonction du temps comme l'indique la figure 1.18. (b). Pendant une assez longue durée d'utilisation, elle reste remarquablement constante à la valeur de 2V environ. À partir du point **N**, elle diminue brusquement (1,8 V), il faut alors recharger l'accumulateur, sous peine de voir apparaître la sulfatation des plaques.

En pratique, on ne descend pas en général en dessous de 20 % de la capacité batterie.

Sinon, la sulfatation entraîne une perte de capacité et une augmentation de la résistance interne d'où baisse de tension.

I.8.3.4. Capacité

On appelle capacité la quantité d'électricité, évaluée habituellement en ampères-heures (Ah), qu'un accumulateur chargé peut faire circuler pendant la période de décharge.

La capacité d'un élément est fonction du régime de décharge, la capacité nominale (C_n) d'une batterie étant donnée, généralement,

- Pour un régime de décharge en 10 h ($C/10$).
- Pour un régime de décharge plus élevé ($I > C/10$) la capacité diminue.
- Pour un régime de décharge plus faible ($I < C/10$) la capacité augmente.

Le courant de décharge est évalué en fractions de la capacité exprimée en Ah (ex : $C/100$).

I.8.3.5. Exemple :

Un accumulateur de 100 Ah à $C/10$ peut fournir un courant de 10 A pendant 10h. Sa capacité sera réduite à 80 Ah pour un régime de décharge à $I = C/5 = 20$ A tandis que la capacité pourra être augmentée à 140 Ah pour un régime de décharge à $I = C/100 = 1$ A.

La capacité d'un élément est fonction de sa température : ses variations vont dans le même sens que celles de la température.

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre on s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. On a appris le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite on a fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et les convertisseurs DC-AC (onduleurs) d'un système photovoltaïque.

Chapitre II

Les différentes

Types de convertisseur

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous étudierons le problème de connexion GPV-charge et la nécessité d'un étage d'adaptation. En effet, pour que le GPV fonctionne à sa puissance maximale, un étage d'adaptation doit être inséré entre la source et la charge. Cet étage peut être un convertisseur DC-DC abaisseur ou élévateur de tension ou même dans le cas de besoin de courant alternatif, un onduleur. Pour cela, différentes topologies de convertisseurs DC-DC, DC-AC seront étudiées dans ce chapitre.

II.2. Constitution d'un système photovoltaïque

La sensibilité du module photovoltaïque aux conditions météorologiques et ses caractéristiques non linéaires engendrent des pertes énergétiques. Pour remédier à ce problème, un étage d'adaptation est utilisé pour optimiser la production de l'énergie à chaque instant [4].

II.2.1. Cas d'un étage d'adaptation DC-DC

La (figure II.1) montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [13]

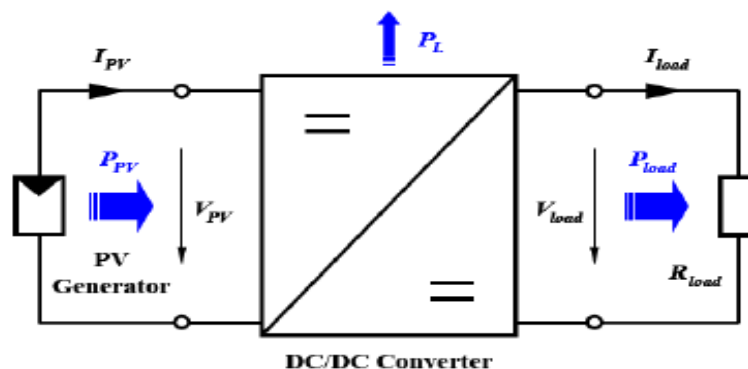


Figure II.1: Convertisseur DC/DC

En courant continu, un système photovoltaïque est principalement constitué d'un GPV, d'un étage d'adaptation DC-DC muni d'une commande MPPT et d'une charge. Cette structure autonome permet généralement d'alimenter une charge à courant continu ou une batterie qui sert pour le stockage d'énergie [4].

La conception d'un étage d'adaptation DC-DC permet de relier aisément un générateur photovoltaïque GPV à une charge de type continu (DC) avec un rendement de conversion assez important. En fait, La conception d'un étage d'adaptation DC-DC correspond à la modélisation des fonctions de base d'un convertisseur DC-DC (ou hacheur), à travers la notion de conservation de la puissance transférée par un convertisseur statique, correspondant aux relations entre les quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie [4].

Le rôle du convertisseur DC-DC est de faire l'adaptation entre le GPV et une charge DC pour avoir un transfert de puissance maximal. Le point de fonctionnement est donc maintenu au voisinage du PPM quelles que soient les conditions de fonctionnement (ensoleillement, température, variation de charge, etc.) [4].

Les types de convertisseurs DC-DC généralement utilisés sont : le convertisseur élévateur de tension (hacheur parallèle ou boost), abaisseur de tension (hacheur série ou buck) et élévateur-abaisseur de tension (hacheur série-parallèle ou buck-boost). Dans ce qui suit nous rappelons brièvement leur principe de fonctionnement en mode de fonctionnement continu [4].

II.2.1.1. Convertisseur série (buck)

Un convertisseur buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus faible. Le schéma de base d'un convertisseur boost est représenté par la figure II.2 [4].

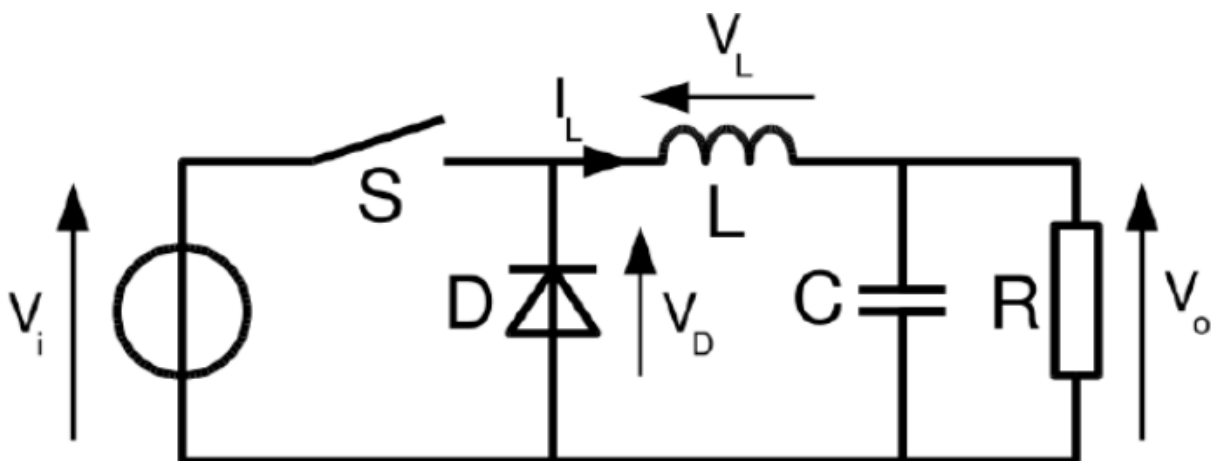


Figure II.2. Schéma de base d'un convertisseur Buck [4].

Le principe de base du fonctionnement de ce type de convertisseur est le suivant :

- Lorsque l'interrupteur S est fermé, la tension aux bornes de l'inductance est égale à $V_l = V_i - V_0$ Le courant I_L croit linéairement et la diode se trouve bloquée. La tension aux bornes de l'inductance L est :

$$V_l = L \frac{dI_L}{dt} \quad \text{(II.1)}$$

L'augmentation du courant I_L est donné par :

$$\Delta I_{lon} = \int_0^{DT} dI_L = \int_0^{DT} \frac{V_L dt}{L} = \frac{(V_i - V_0) \cdot D \cdot T}{L} \quad \text{(II.2)}$$

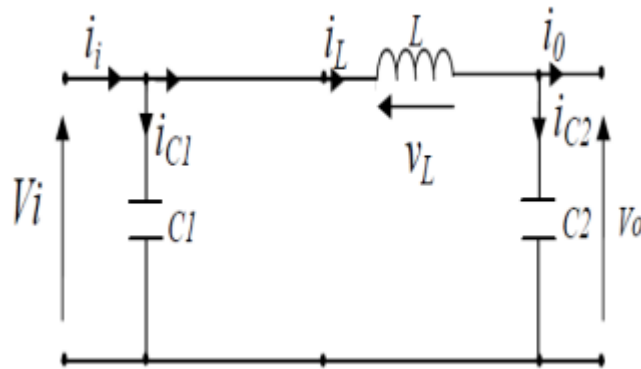


Figure II.3 : Schémas équivalents de l'hacheur série S : fermé

- Lorsque l'interrupteur S est ouvert, La diode devient alors passante pour assurer la continuité du courant I_L . La tension V_L est donc égale à $V_L = -V_0$ et le courant I_L décroît.

La diminution du courant I_L dans l'inductance est :

$$\Delta I_{loff} = \int_{DT}^T dI_L = \int_{DT}^T \frac{V_L dt}{L} = \frac{-V_0(T - DT)}{L} \quad \text{(II.3)}$$

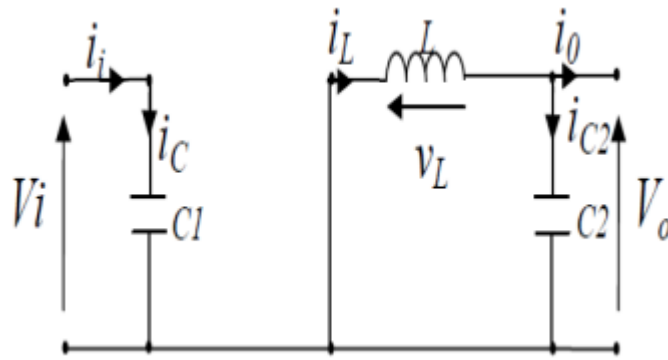


Figure II.4 : Schémas équivalents de l’hacheur série S : ouvert

Vu que l’énergie emmagasinée dans les composants et le courant IL ont les mêmes valeurs au début et à la fin de chaque cycle de commutation, on peut écrire :

$$\Delta I_{lon} + \Delta I_{loff} = \frac{(V_i - V_o) \cdot D \cdot T}{L} - \frac{V_o (T - DT)}{L} = 0 \quad \text{(II.4)}$$

D’où l’expression de V_o :

$$V_o = D \cdot V_i \quad \text{(II.5)}$$

II.2.1.2. Convertisseur boost

Un convertisseur boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus forte. La figure II.1 représente le schéma de base d’un convertisseur boost [4].

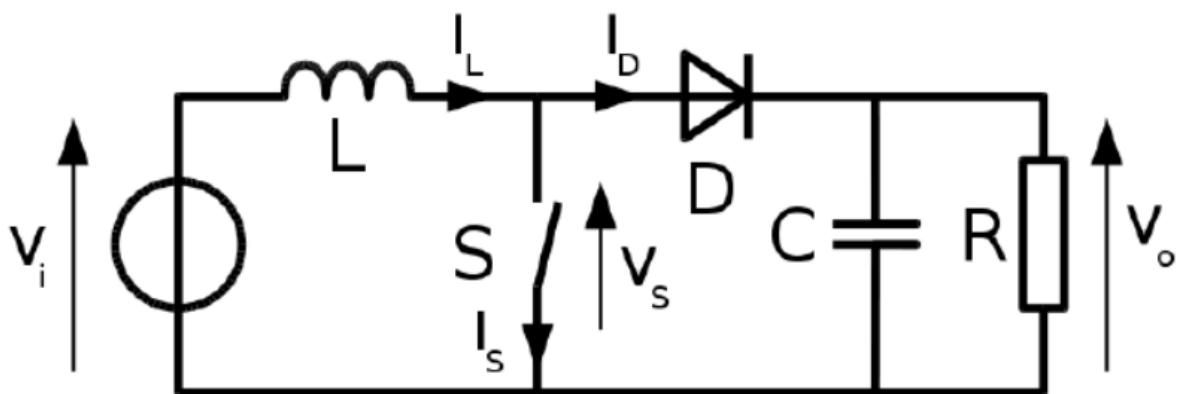


Figure II.5. : Schéma de base d’un convertisseur boost [4].

Le principe de fonctionnement d'un convertisseur boost est divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur S :

- Lorsque l'interrupteur S est fermé (état passant), le courant dans l'inductance va augmenter, et une énergie sous forme d'énergie magnétique est stockée. La diode est donc bloquée, et la charge sera déconnectée

L'expression de V_i est donc :

$$V_i = L \frac{dI_L}{dt} \tag{II.6}$$

A la fin de l'état passant, le courant I_L a augmenté de la valeur ΔI_{Lon} exprimée par :

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{DT} dI_L = \int_0^{DT} \frac{V_L dt}{L} = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{L} \tag{II.7}$$

D est le rapport cyclique qui représente la fraction de la période T lorsque l'interrupteur S est passant. $0 < D < 1$.

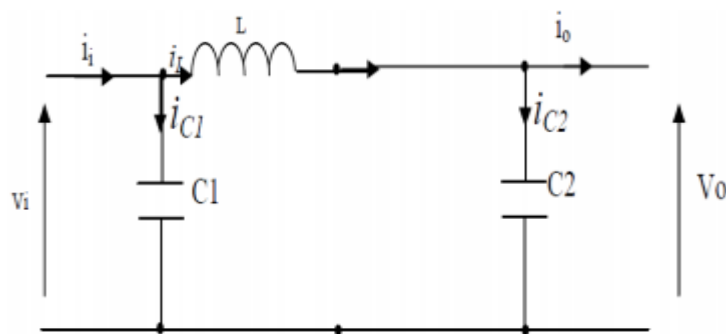


Figure II.6: Schémas équivalents de l'hacheur parallèle S : fermé

- Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance est alors en série avec le générateur et sa tension va s'ajouter à celle du générateur : c'est l'effet survolteur. L'énergie cumulée dans l'inductance va être donc transférée vers la capacité.

L'expression de V_i est alors :

$$V_i - V_0 = L \frac{dI_L}{dt} \tag{II.8}$$

La variation de I_L durant l'état bloqué sera donc égale à :

$$\Delta I_{Loff} = \int_0^{(1-D)} dI_L = \int_0^{(1-D)} \frac{(V_i - V_0)dt}{L} = \frac{(V_i - V_0)(1 - D)T}{L} \quad (\text{II.9})$$

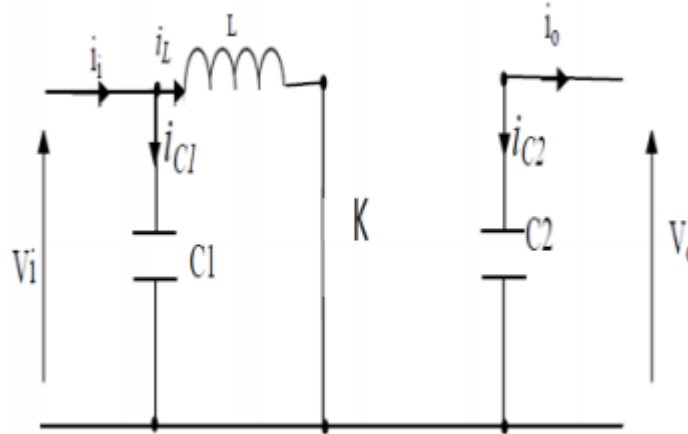


Figure II.7 : Schémas équivalents de l'hacheur parallèle S : ouvert

La quantité d'énergie emmagasinée dans chacun de ces composants est la même au début et à la fin d'un cycle de fonctionnement. Par conséquent, le courant IL est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui permet d'écrire :

$$\Delta I_{Ion} + \Delta I_{Loff} = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{L} + \frac{(V_i - V_0)(1 - D)T}{L} \quad (\text{II.10})$$

D'où l'expression de V_0 :

$$V_0 = DV_i \quad (\text{II.11})$$

II.2.1.3. Convertisseur buck-boost

Le convertisseur buck-boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus faible ou plus grande, mais de polarité inverse. Le schéma de principe d'un convertisseur buck-boost est représenté par la figure II.3 [4].

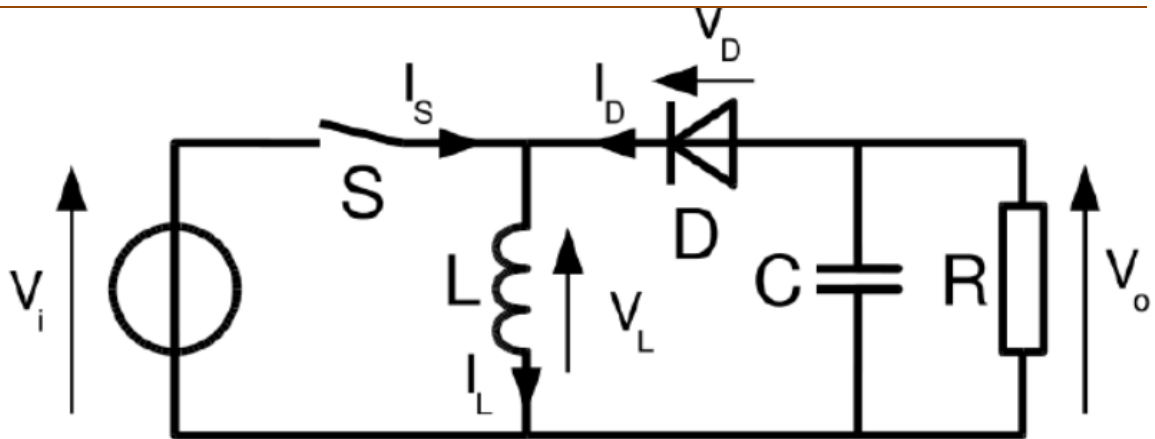


Figure II.8. Schéma de base d'un convertisseur buck-boost [4].

Le fonctionnement du convertisseur buck-boost peut être expliqué selon l'état de l'interrupteur S.

- Lorsque l'interrupteur S est fermé, l'énergie stockée dans la bobine va augmenter. La valeur de la tension V_i est alors :

$$V_i = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II.12})$$

L'augmentation du courant I_L à la fin de l'état passant est définie par :

$$\Delta I_{lon} = \int_0^{DT} dI_L = \int_0^{DT} \frac{V_i dt}{L} = \frac{V_i dt}{L} \quad (\text{II.13})$$

- Lorsque l'interrupteur S est ouvert, l'inductance se trouve alors reliée à la charge et à la capacité. L'énergie stockée dans l'inductance va être transférée vers la capacité et la charge. La valeur de la tension V_o est alors :

$$V_o = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II.14})$$

Par conséquent, la variation de I_L durant l'état bloqué est alors :

$$\Delta I_{off} = \int_0^{(1-D)T} dI_L = \int_0^{(1-D)T} \frac{V_o dt}{L} = \frac{V_o(1-D)T}{L} \quad (\text{II.15})$$

Si on considère que l'énergie stockée dans chaque composant et le courant I_L ont la même valeur au début et à la fin de chaque cycle de commutation, on peut donc écrire :

$$\Delta I_{lon} + \Delta I_{Loff} = \frac{V_i dt}{L} + \frac{V_0(1-D)T}{L} = 0 \quad (\text{II.16})$$

Le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée est alors :

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{-D}{1-D} \quad (\text{II.17})$$

Par comparaison aux convertisseurs boost et buck, la tension V_0 est de polarité inverse par rapport à V_{in} , en plus elle peut varier de 0 à $-\infty$.

II.2.2. Cas d'un étage d'adaptation DC-AC :

Pour alimenter une charge à courant alternatif à partir d'un GPV, un onduleur doit être utilisé comme étage d'adaptation. En effet, un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance qui permet de délivrer une tension alternative à partir d'une source à courant continu.

La structure d'un onduleur est généralement constituée d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, transistors de puissance ou thyristors. Pour avoir un signal alternatif de fréquence bien déterminée, on module la source à l'aide des commutations commandées généralement par modulation de largeur d'impulsion (MLI) [4].

Actuellement, les installations destinées à l'alimentation du réseau électrique public, représentent les applications photovoltaïques les plus bénéfiques. En effet, différentes méthodes existent pour monter ses installations dont le principe est basé sur un GPV raccordé au réseau à travers un ou plusieurs onduleurs. Ces onduleurs permettent de transformer la tension continue délivrée par le GPV en une tension alternative en le forçant à fonctionner à sa puissance maximale. En plus, ils assurent une protection du réseau contre les défauts qui peuvent survenir de ce dernier ou de l'installation. Pour la gestion de ces installations, les différentes topologies qui existent sont : l'onduleur central, les onduleurs strings, les onduleurs intégrés aux panneaux et les onduleurs multi-string que nous décrivons dans ce qui suit [3].

II.2.2.1. L'onduleur central

Dans le cas d'onduleur central, les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10kW) sont montés en rangées pour former une chaîne (String en anglais), elle-même couplée en parallèle avec des diodes anti-retours à plusieurs autres, (Figure II.9). Le générateur PV de forte puissance ainsi structuré est relié du côté DC à un seul onduleur. Cet onduleur central présente une grande efficacité énergétique à des coûts réduits. La fonction principale de cet appareil est de créer une tension alternative à partir d'une tension continue la plus compatible avec le réseau et d'examiner en permanence la présence ou non du réseau pour autoriser l'injection du courant. La structure classique de l'onduleur est souvent un circuit en pont permettant de relier chacun des deux pôles d'entrée à chacun des deux pôles de sortie par le biais d'interrupteurs de puissance [5]

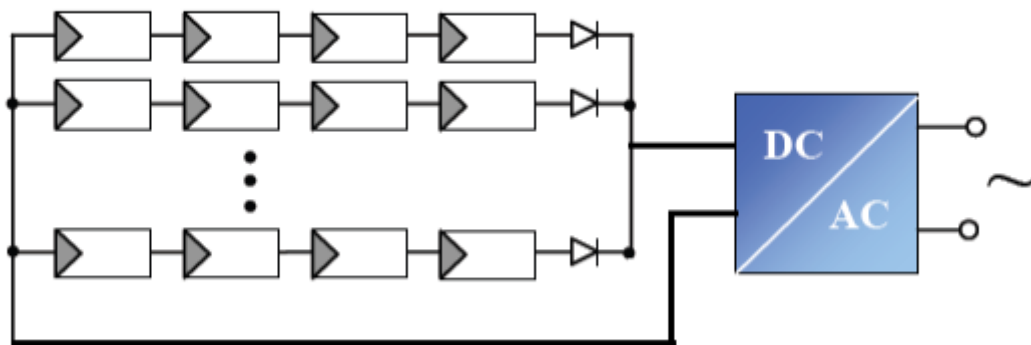


Figure II.9. Onduleur central [4].

Le couplage direct des installations PV avec des onduleurs sans transformateur gagne en importance. En effet, ils sont peu onéreux et offrent un rendement énergétique imbattable (entre 95% et 97% pour les fortes puissances). Pour pouvoir alimenter le réseau, la tension d'entrée doit toujours dépasser la tension crête de la tension réseau redressée. Soit, pour une valeur de tension efficace réseau de 250V, une source de tension minimale de 354V est nécessaire pour pouvoir injecter un courant sinusoïdal dans le réseau. Par conséquent, un panneau mal adapté ou encore un ombrage partiel porte préjudice à une exploitation optimale de chaque chaîne PV et entraîne une réduction du rendement énergétique. L'onduleur central possède de plus en plus souvent au moins un système de contrôle MPPT lui permettant de fonctionner à son PPM. Cela marche parfaitement tant que les panneaux sont identiques et qu'ils fonctionnent sous un ensoleillement homogène.

Mais lorsque les caractéristiques électriques entre les panneaux diffèrent, dues à des ombrages, des salissures, au vieillissement ou au stress, la commande MPPT devient incertaine et le champ photovoltaïque ne produit pas autant qu'il le pourrait. En outre, la fiabilité de l'installation est limitée parce qu'elle dépend d'un seul onduleur. Ainsi, lorsqu'une panne de l'onduleur central se produit, elle entraîne l'arrêt complet de l'installation et donc de la production [5]

II.2.2.2. Les onduleurs strings :

De même que pour l'onduleur central, le champ PV est, ici aussi constitué de strings (chaînes). Chaque string est toutefois relié à un onduleur (Figure II.10). Chaque string peut ainsi fonctionner à son PPM. Cette technologie réduit considérablement le risque de problèmes d'adaptation ainsi que les pertes dues aux effets d'ombrage, tout en éliminant celles occasionnées par les diodes anti-retours et un câblage prolongé vers le générateur DC. Ces propriétés techniques avantageuses accroissent la fiabilité de l'installation ainsi que sa production énergétique. Mais il faut prendre en compte l'augmentation du nombre d'onduleurs de moyenne puissance disposant de rendement compris entre 92% et 96% [5].

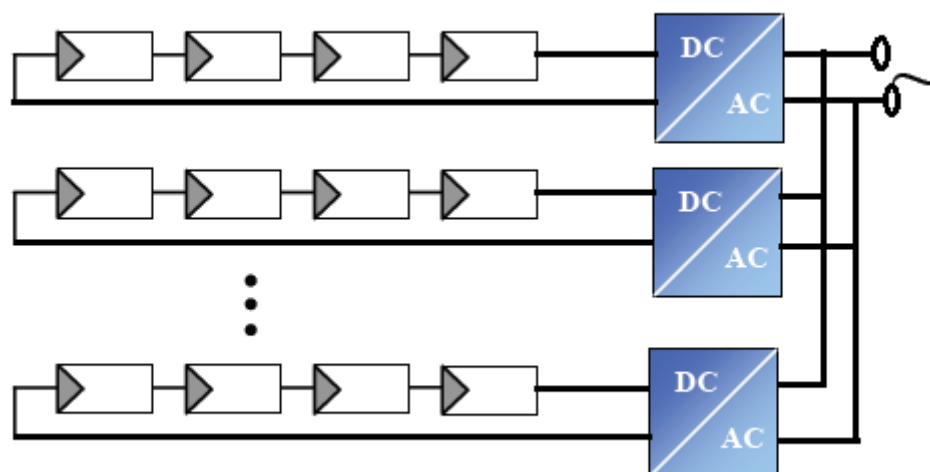


Figure II.10. Onduleur string [4].

Une étude théorique développée explore les avantages et les bénéfices à utiliser une architecture string comparée à une architecture centralisée. Ces travaux sont focalisés sur l'évaluation des performances des deux types de systèmes en prenant en compte les pertes dans les dispositifs d'électronique de puissance, les dissipations dans les câbles et les

sensibilités des GPV vis-à-vis de l'irradiance et des effets d'ombrages. Il en résulte que l'architecture string apporte un gain en rendement de 1.5% par rapport à une conception centralisée. Cependant, l'aspect économique n'est pas pris en compte ici. Une autre étude en montre que, pour une installation inférieure à 5kWc sur 25 ans, l'architecture string n'est financièrement pas intéressante du fait de son surcoût à l'installation et du coût de la maintenance.

Les auteurs intègrent une variable MTTF très intéressante (Mean Time To Failure of inverter). Elle permet d'évaluer le taux de pannes d'un onduleur sur une durée déterminée et donc permet d'estimer plus précisément l'aspect économique d'une architecture par rapport à une autre. Dans certains cas, il est même économiquement plus avantageux de ne pas remplacer un onduleur string défectueux dans un ensemble de grande puissance [5].

Cependant, un paramètre reste toujours incertain dans le contrôle MPPT lorsque la caractéristique de puissance du string possède plusieurs pics de puissance. Dans ce cas, l'onduleur peut fonctionner à un faux point de puissance maximum comme pour les architectures DC présentées précédemment et par conséquent, la puissance délivrée ne sera pas la puissance maximale disponible. Cette configuration peut arriver lors de différentes configurations. Une partie des panneaux peut être sale ou cachée par des ombres ou de la neige ou bien l'orientation des panneaux d'un même string n'est pas identique pour tous les panneaux. Une disposition non optimale des panneaux implique donc qu'un string peut recevoir une irradiance inhomogène pouvant perturber la recherche du PPM. La solution en termes de gain énergétique est d'aller vers une gestion plus individuelle des panneaux en intégrant par exemple un étage d'adaptation par GPV [5].

II.2.2.3. Les onduleurs intégrés aux panneaux

Chaque panneau dispose ici de son propre onduleur (Figure II.11), ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut. Le rendement des onduleurs intégrés aux panneaux reste cependant en-deçà de celui de l'onduleur string à cause de la grande différence des tensions entre les GPV et la charge. De plus, les onduleurs intégrés aux panneaux induisent des coûts de câblage supplémentaires du côté AC, étant donné que chaque panneau de l'installation doit être relié au réseau 220 V. Le nombre nettement supérieur d'onduleurs intégrés aux

panneaux nécessaires dans cette architecture entraîne un travail de couplage nettement plus conséquent.

Ce concept ne s'applique donc généralement qu'aux installations PV d'une puissance modeste allant de 50 W à 400 W [5].

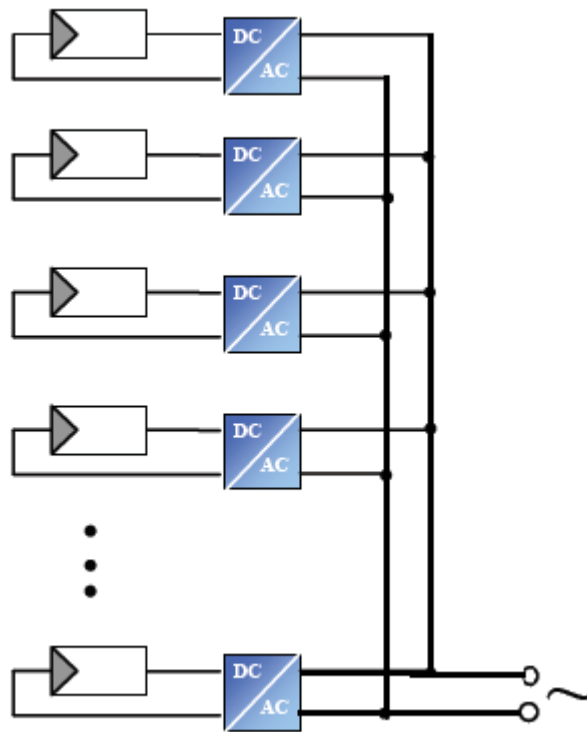


Figure II.11. Onduleur intégré au panneau [4]

Récemment, on a vu apparaître un nouveau concept hybride se basant sur les avantages et les inconvénients de chacune des méthodes citées précédemment. Habituellement, les onduleurs strings et intégrés sont reconnus pour leur meilleure réponse aux variations d'ensoleillement et aux inhomogénéités lumineuses mais aussi pour leur facilité d'installation. D'autre part, l'onduleur central est souvent moins cher en termes d'équipement électronique qui est, somme toute, très modeste, il dispose d'un meilleur rendement et est, en plus, plus fiable (Tableau II.1). Les dernières données correspondant aux onduleurs intégrés aux panneaux s'affranchissent en grande partie des problèmes d'ombrage et optimisent la production d'un GPV de façon remarquable. Il reste encore pas mal de développement technologique pour les rendre aussi fiables que les onduleurs centralisés [5].

Tableau II.1 Caractéristiques techniques de différentes configurations [5].

	Onduleur Central	Onduleur String	Onduleur Intégré
Tension PV	340-800V	150-800V	17-90V
Pertes DC (Ohmique)	~1-5% en fonction de la tension et de la distance	~1% en fonction de la tension et de la distance	Négligeable
η_{CONV}	95-97%	92-96%	87-93%
Maintenance et réparation	Simple	Difficile (recherche dysfonctionnement)	Difficile (recherche dysfonctionnement)

II.2.2.4. Les onduleurs multi-string

En fait, la gestion multi-string est née de la combinaison entre la gestion par onduleur central et la gestion par strings. Comme illustré en (Figure II.12), le principe de la conversion multi-string est basé sur de nombreux convertisseurs DC-DC modulables connectés à un onduleur central via un bus continu. Chaque convertisseur DC-DC dispose de sa propre commande MPPT permettant à chaque string de fonctionner à son PPM. Par conséquent, le dysfonctionnement d'un GPV peut être rapidement détecté et localisé. Le fonctionnement de l'ensemble du champ ne sera donc pas affecté par le dysfonctionnement d'un seul GPV. Grâce aux convertisseurs DC-DC, il est possible de travailler sur une plus large gamme de tension PV (tension plus faible en entrée des DC/DC) optimisant ainsi la production photovoltaïque [5].

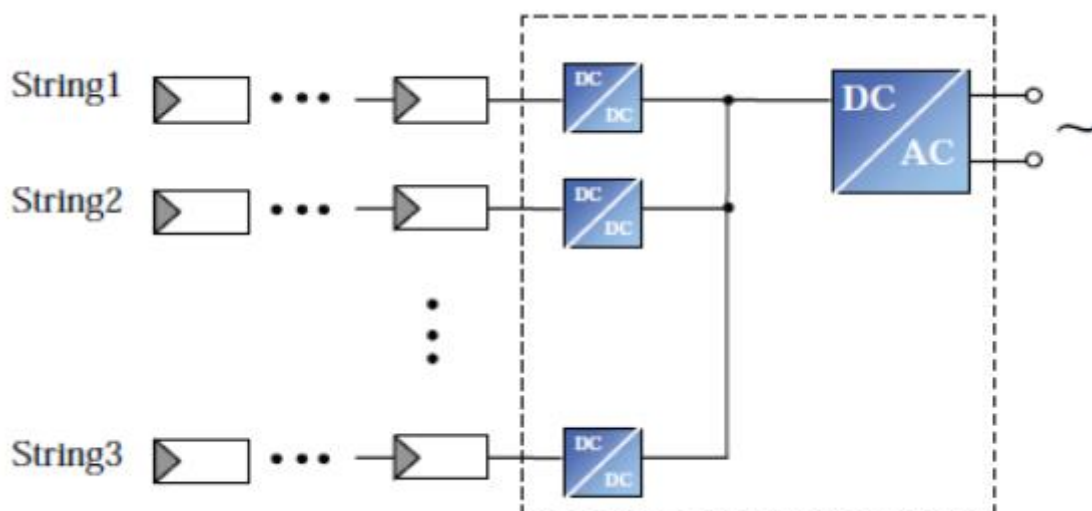


Figure II.12. Nouvelle structure de conversion multi-string [5].

Tableau II.2 Synthèse des différentes architectures des systèmes PV raccordé au réseau [6]

Structure	Avantages	Inconvénients
Onduleur Central	<ul style="list-style-type: none"> • Peu coûteuse ; • Simple à surveiller ; • Maintenance simple et rapide ; 	<ul style="list-style-type: none"> • Un seul MMPT pour l'ensemble du champ ; • Pertes de conversion ; • Pertes et risques électriques ; • Aucune évolutivité ; • Aucune continuité ;
Onduleur String	<ul style="list-style-type: none"> • MPPT sur chaque string : amélioration contrôle puissance ; • Performance meilleure que l'onduleur central en cas de d'ombrage ; • Panne d'un onduleur n'engendre pas l'arrêt total du système ; • Evolutif : string indépendant ; 	<ul style="list-style-type: none"> • Pertes par couplage série des modules d'un même string ; • A faible puissance des modules : mauvais rendement de l'onduleur ;
Onduleur Multi string	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction coût par rapport à l'onduleur string ; • Pas d'intégration de contrôle commande AC dans l'hacheur ; • Pas de détection de courant continu résiduel sur le réseau dans l'hacheur 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de continuité en cas de panne de l'onduleur ;

II.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence les problèmes dus à la connexion directe entre GPV et la charge. Dans ce sens, et dans le but d'optimiser la puissance fournie par le GPV, un étage d'adaptation doit être introduit entre la source et la charge. Cet étage d'adaptation doit être associé à une commande de recherche du point de puissance maximum.

Dans un second lieu, nous avons présenté la constitution du système photovoltaïque pour le cas d'un convertisseur DC-DC puis pour le cas d'un onduleur convertisseur DC-AC. Pour cela, nous avons défini les différentes topologies utilisées dans les deux cas. Les convertisseurs DC-DC les plus utilisés comme étage d'adaptation sont les convertisseurs boost, buck et buck-boost. Ce chapitre contient une brève description de ces convertisseurs. Concernant les convertisseurs DC-AC, nous avons présenté les différentes architectures pour les monter dans ces installations.

Nous utilisons dans cette étude, le convertisseur Boost.

Dans le chapitre prochain, nous présenterons une étude sur la Recherche du point de puissance maximale (MPPT) d'un GPV et étudierons les différentes méthodes MPPT basées sur la méthode de perturbation et observation et notre charge machine tournante (moteur courant continue) et ces caractéristiques électriques avec sa régulation.

Chapitre III

*Etage d'adaptation de la chaîne de
conversion photovoltaïque*

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons une étude sur l'étage d'adaptation qui constitue le générateur GPV et le convertisseur DC/DC commandé par une commande de recherche de point de puissance maximale pour assurer le bon fonctionnement de chaîne de conversion et leur application.

III.2. Etage de conversion

La figure III.1 représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge.

Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P_{Max}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.

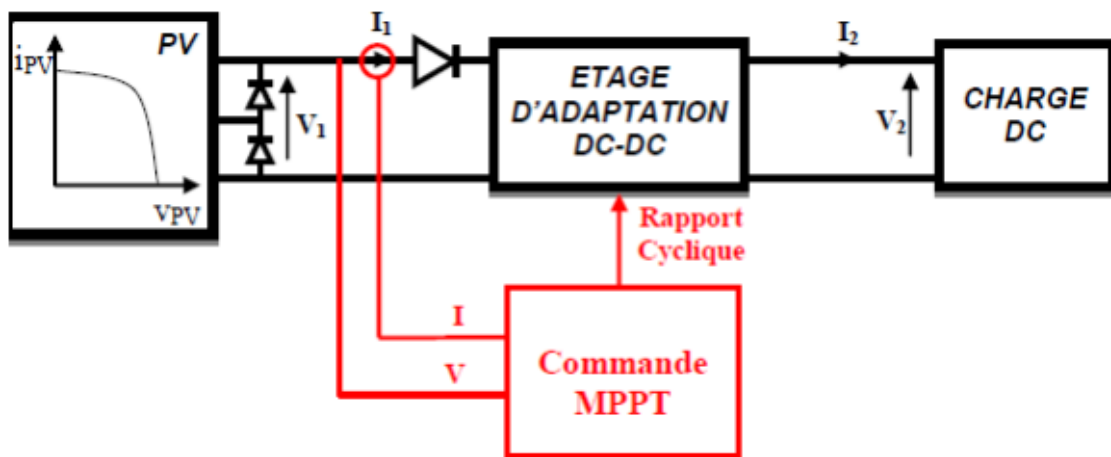


Figure III.1. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque [5].

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure III.2 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV [5].

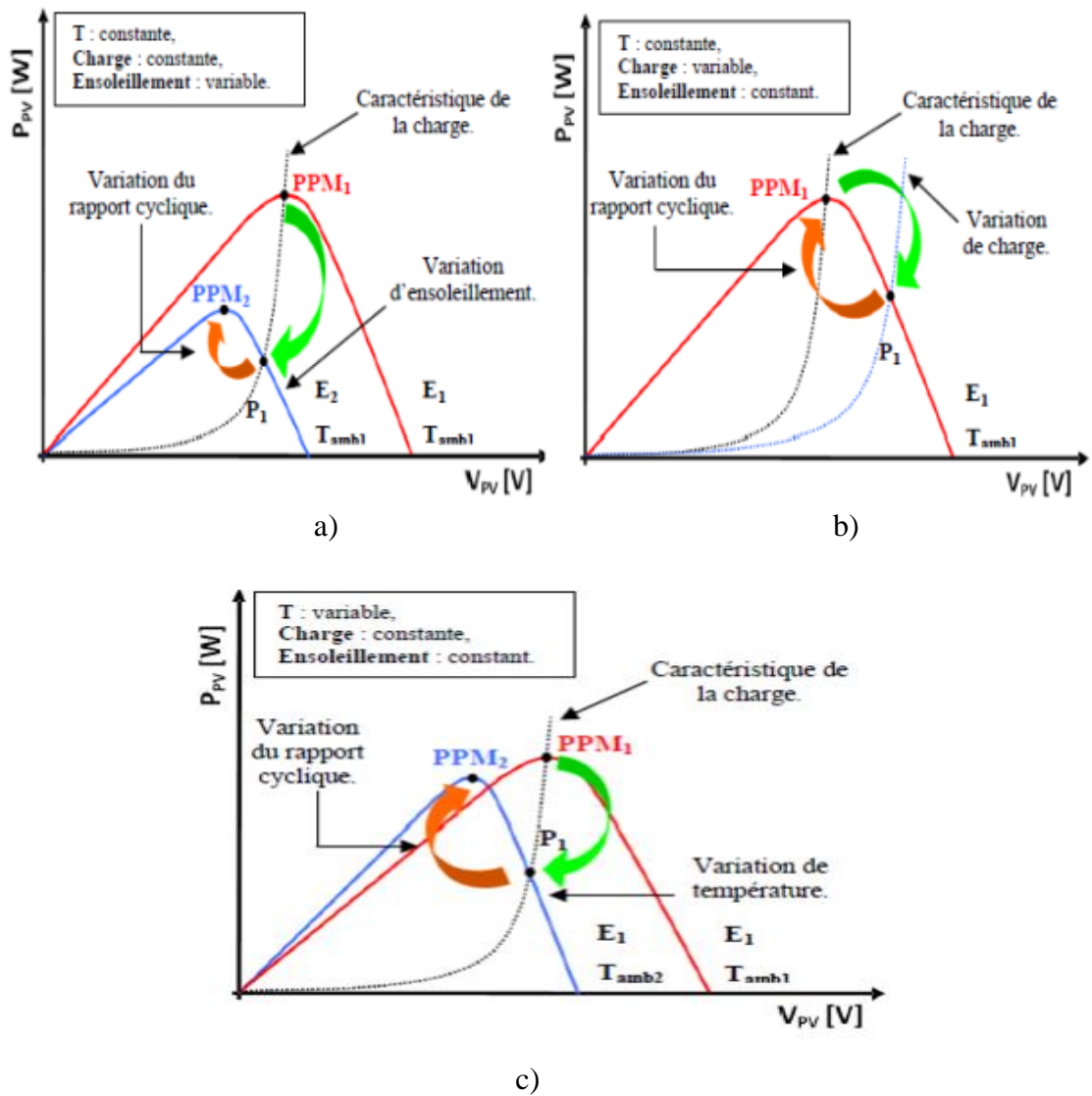


Figure III.2. Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal [5]

- a) suite à une variation d'ensoleillement,
- b) suite à une variation de charge,
- c) suite à une variation de température.

III.3. Méthode de perturbation et d'observation (P&O) :

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque VPV et IPV respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température.[20]

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.

La figure III.3 représente l'algorithme de la méthode P&O. À chaque cycle, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés pour calculer $P_{pv}(k)$. Cette valeur de $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k-1)$ calculée au cycle précédent.

Si la puissance de sortie a augmenté, V_{pv} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, V_{pv} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. V_{pv} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale V_{op} . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrémentation de la perturbation. Si ce pas d'incrémentation est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement.[20]

D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins [7].

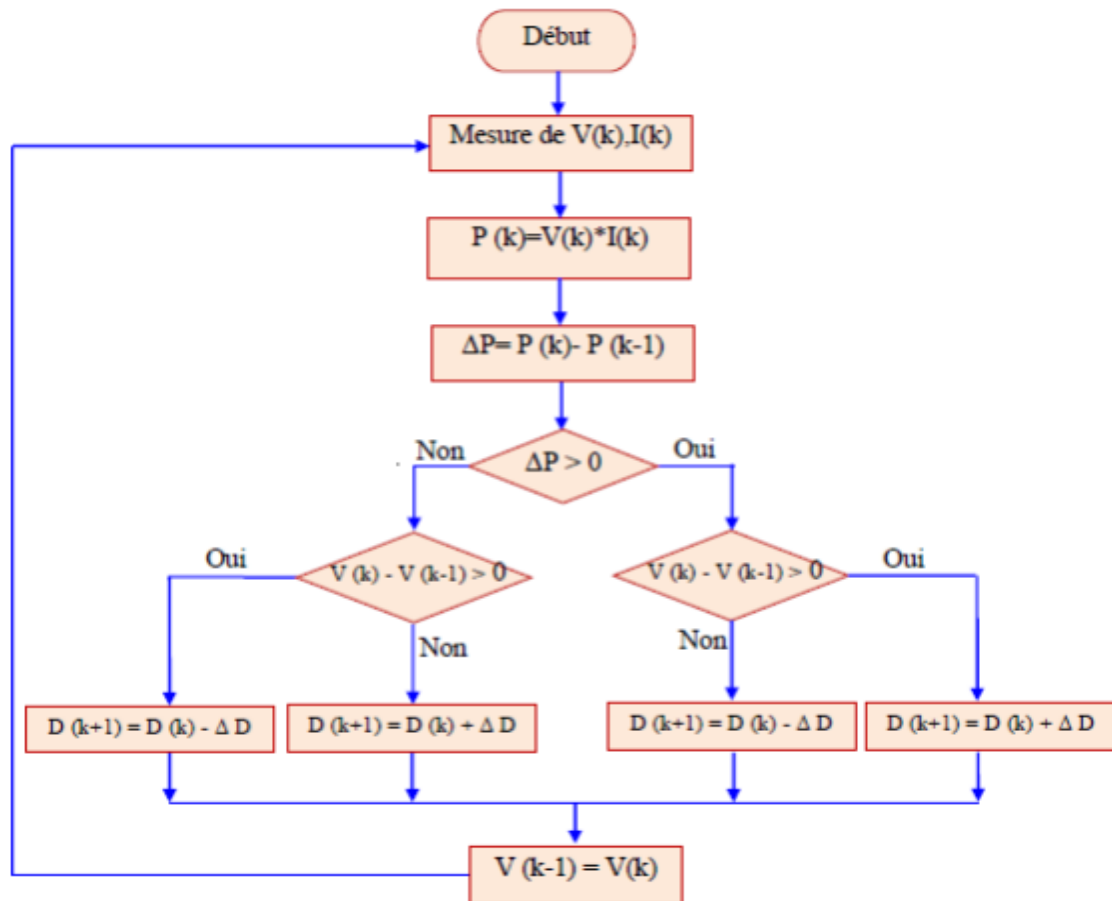


Figure III.3. Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation [8].

Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite, on aura une augmentation de la puissance du panneau.

L'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui l'éloigne du vrai point de puissance maximale.

Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains de fonctionnement et des pertes de puissance.

Pour remédier à l'inconvénient majeur de la déviation de cette méthode lors de la recherche du MPP durant l'augmentation rapide des niveaux d'insolation, une version améliorée de cet algorithme est proposée, où on introduit une nouvelle condition dans la branche « **Oui** » de condition $\Delta P(k) > 0$ dans la structure de l'organigramme de l'algorithme de **P&O** [7].

III.4. 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
- MPPT à base de logique floue
 - Fuzzification - Base de règles - La défuzzification.
- MPPT à base de Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)
 - L'architecture des Réseaux de Neurones Artificiels.
 - La méthode de rétro propagation.

III.5. Introduction des moteurs :

Les machines électriques tournantes sont des machines à courant continu (MCC), elles sont des convertisseurs électromécaniques permettant la transformation bidirectionnelle entre un dispositif mécanique et une installation électrique à courant continu. En raison de la simplicité de son fonctionnement, de son alimentation et de son contrôle, l'utilisation d'une machine à courant continu (MCC) devient populaire dans l'industrie, en ce sens la machine électrique tournante de jouer un rôle important, malgré le fait qu'un simple réglage de la tension d'alimentation permettrait un fonctionnement à vitesse variable.

III.6. Conversion d'énergie :

Une machine est un dispositif électromécanique basé sur l'électromagnétisme qui permet la conversion de l'énergie électrique, telle que le travail ou l'énergie mécanique. Cette technique est réversible et peut être utilisée pour produire de l'électricité :

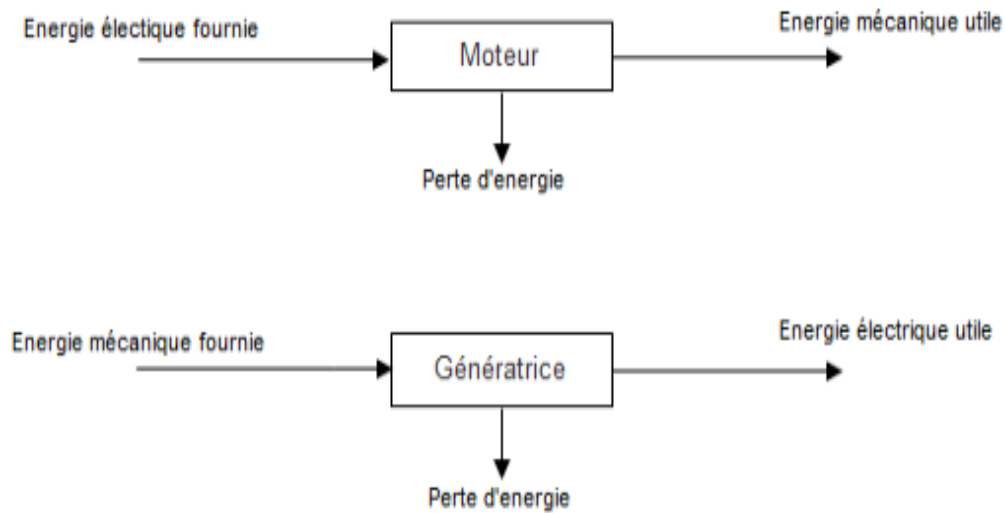


Figure III.4 : Conversion d'énergie.

Selon la technologie utilisée, les dispositifs électriques qui produisent de l'électricité à partir d'énergie mécanique sont appelés générateurs, dynamos ou alternateurs.

Les machines qui génèrent de l'énergie mécanique à partir de l'énergie électrique sont connues sous le nom de moteurs.

Cependant, étant donné que toutes ces machines électriques sont réversibles et peuvent être configurées comme un « moteur » ou un « générateur » dans les quatre quadrants du couple vitesse de plan, la différence entre le moteur et le générateur est rendue « communément » dans par rapport à l'utilisation finale de la machine.

III.7. Description des différentes structures de la machine à courant continu :

D'un point de vue structurel, une machine à courant continu se compose d'un induit rotatif, d'un inducteur fixe qui créant un champ magnétique d'excitation, d'un redresseur mécanique (ballais-collecteur), de pôles de compensation et de pôles accessoires.

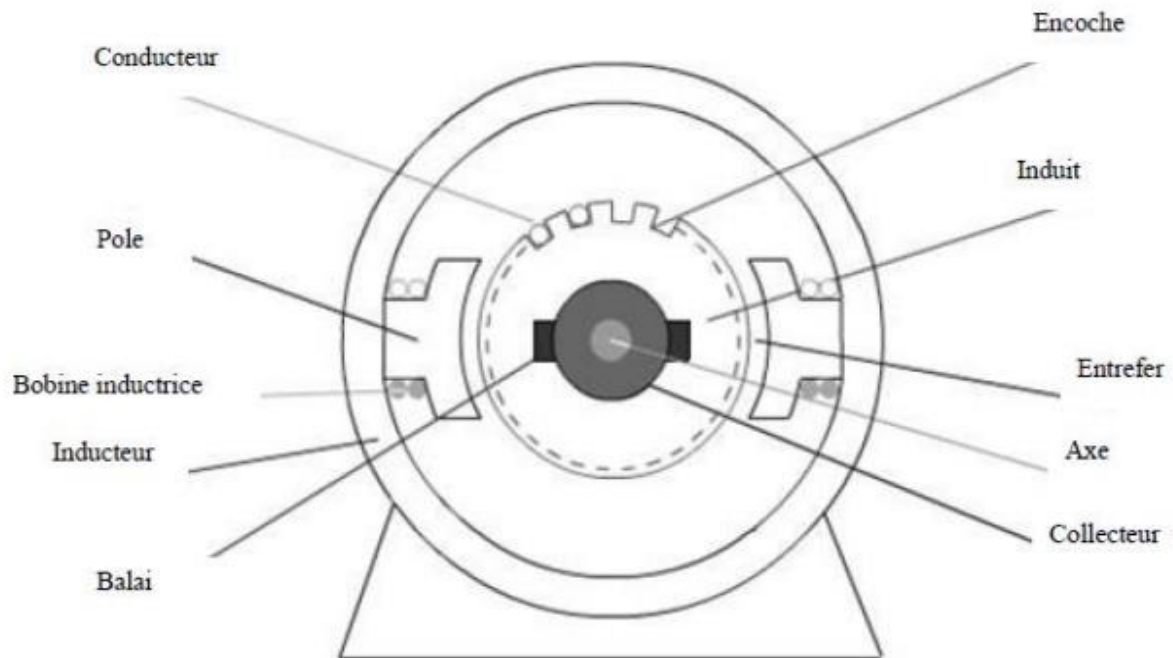


Figure III.5 : Constitution d'une machine à courant continu.

a. Rotor (induit) :

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

Les conducteurs d'induit sont parcourus par des courants ne débités pas la machine, si le courant est plutôt faible on emploie des conducteurs ronds, on se sert de conducteurs rectangulaires qui permettent une meilleure utilisation du volume de l'encoche pour courant qui dépasse une cinquantaine d'ampères [14].

b. Stator (inducteur) :

L'inducteur (producteur de flux magnétique) est la partie fixe de la machine responsable de la création du champ magnétique d'excitation ; pour les petites machines, le bobinage de l'inducteur ou les bobinages d'excitation peuvent être remplacés par des aimants permanents.

L'inducteur comporte en générale deux paires de pôle ($2 \cdot P$ pôles) :

P=1 : machine bipolaire (2 pôles)

P=2 : machine tétrapolaire (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 [15].

c. 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.[19]

d. 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 /cm² environ. Les balais sont placés sur l'axe des pôles principaux. Il y a autant de balais que de pôles [15].

III.8. 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 champ magnétique pénètre dans l'induit du côté du pôle nord de l'inducteur et sort de l'induit du côté 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 »

$$d\vec{f} = I * d\vec{l} \wedge \vec{B} \quad \text{(III.1)}$$

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 [16].

III.9. 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.9.1. Moteur à excitation série

Le moteur a excitation série est constitué de deux enroulements, induit et inducteurs montés en série (même courant). Il est alimenté par une source continue de tension « U » et de coutant « I » qui débite sur un induit, de résistance « R » d'inductance « L » et de force contre électromotrice « E » et d'un inducteur de résistance « Rf » et d'inductance « Lf » [17].



FigureIII.6 : Schéma électrique du moteur série

III.9.2. 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 « Lf » et d'une résistance « Rf » est parcouru par un courant « If », et celui de l'induit comportant une résistance, une inductance et une force contre électromotrice respectivement (R, L, E) est parcouru par un courant « Ia » [17].

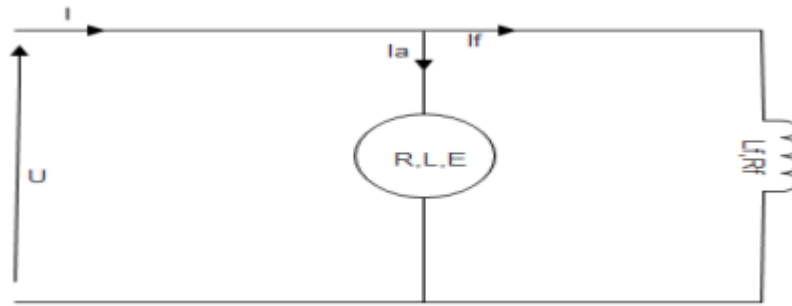


Figure III.7 : Schéma électrique du moteur à excitation shunt.

III.9.3. Moteur à excitation composée :

Le moteur est à excitation composée possède deux enroulements inducteurs, 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.9.3.1. Moteur composée à flux additif

Le moteur composé 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 « Rf » et d'inductance « Lf » est parcourue par un courant « If » [17].

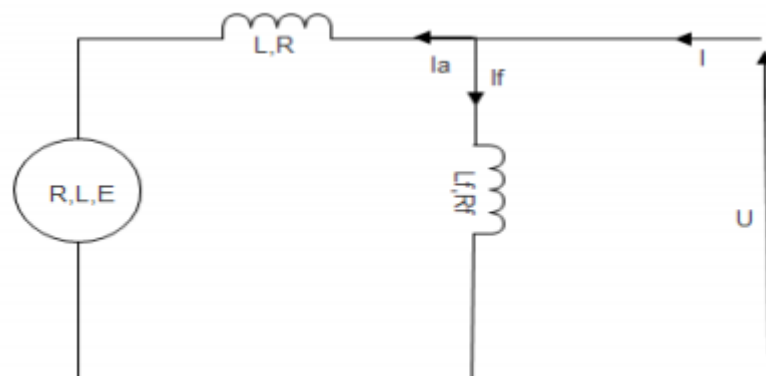


Figure III.8 : Schéma électrique du moteur composé à flux additif.

III.9.3.2. Moteur composée à flux soustractif :

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) [17].

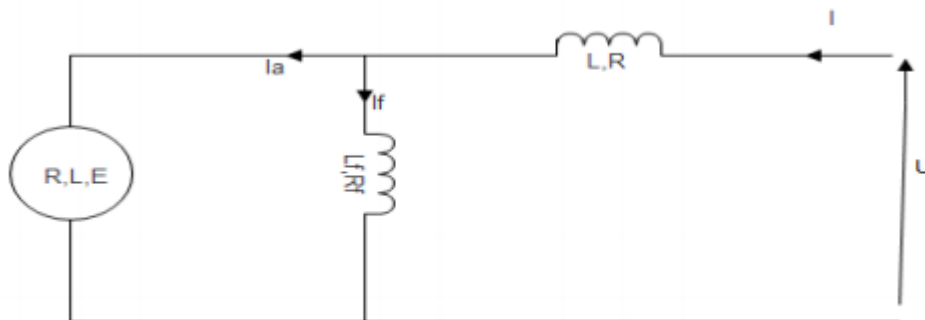


Figure III.9 : Schéma électrique du moteur compound à flux soustractif.

III.9.4. 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) [17].

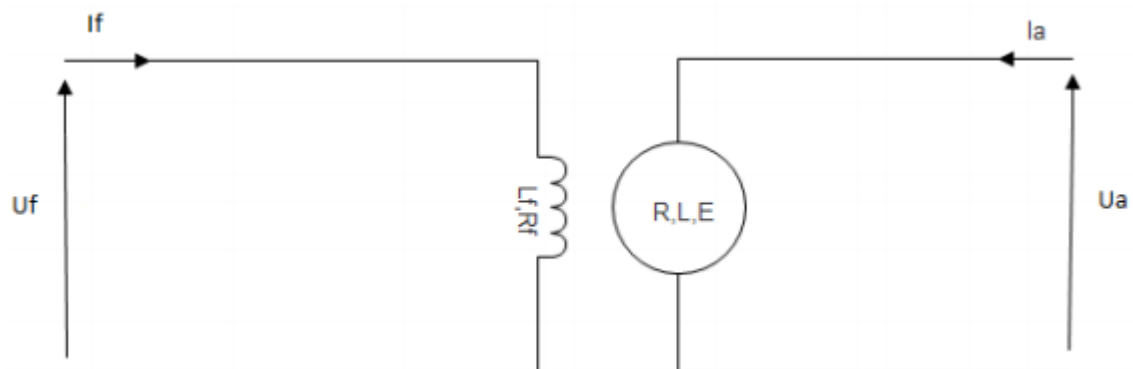


Figure III.10: Schéma électrique du moteur à excitation séparé.

III.10. 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 expressions mathématiques, le schéma équivalent et représenté dans la (figure III.11)

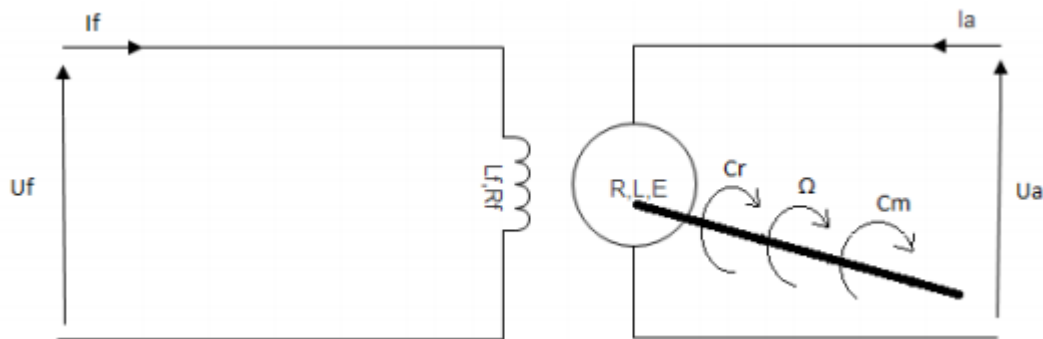


Figure III.11 : Schéma électrique du modèle de moteur choisi.

III.10.1. 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 :

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

III.10.2. 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 :

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

III.10.3. Equations mécanique :

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

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

III.10.4. Moteur à courant continu à excitation constante :

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{J(K_m \cdot I_a - C_r - f\Omega_r)} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J(K_m \cdot I_a - C_r - f\Omega_r)} \end{array} \right\} \quad (\text{III.6})$$

III.11. Commande en vitesse de la machine :

III.11.1. Système de commande

Le système de commande, ou simplement commande (contrôleur, régulateur), est un système qui permet la génération d'action irrationnelle à appliquer à l'entrée de l'organe de commandement afin que le système atteigne les objectifs à la sortie du système. La durée et la structure du régime transitoire, ainsi que la valeur finale.[19]

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.

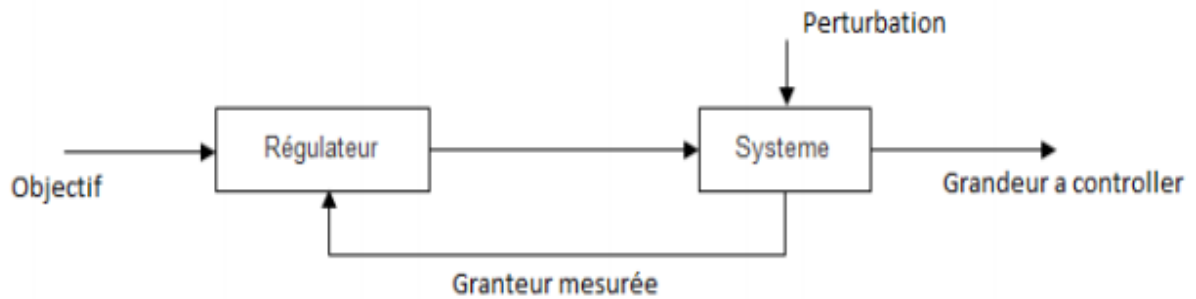


Figure III.12 : Structure générale de la commande en boucle fermée

III.11.2. 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 choisissant le régulateur PI (régulateur proportionnel intégral) car il améliore la précision de la boucle (erreur statique nulle).[19]

III.11.3. 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 [19]:

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

Avec :

$$\tau = \frac{K_p}{K_i}$$

L'avantage principal d'un régulateur PI est qu'il annule l'erreur statique grâce à la fonction intégrale 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.11.4. 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.

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

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

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

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

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 :

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

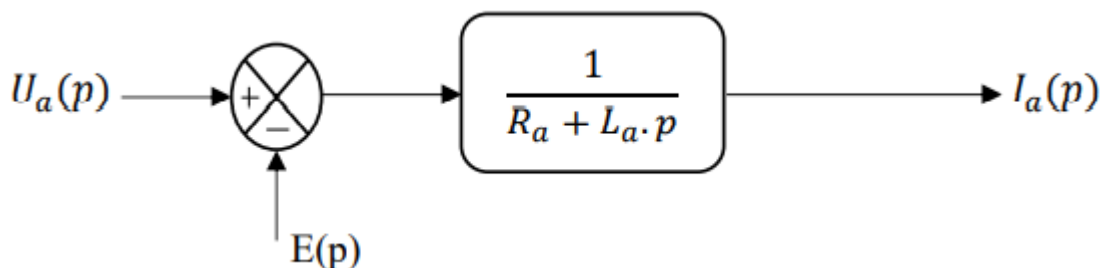


Figure III.13 : Schéma bloc de la boucle du courant

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.14) :

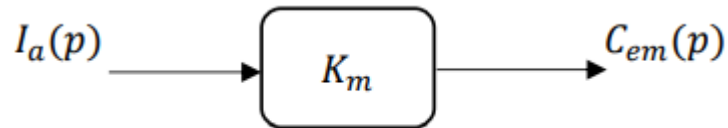


Figure III.14 : Schéma bloc de la boucle du couple.

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 :

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

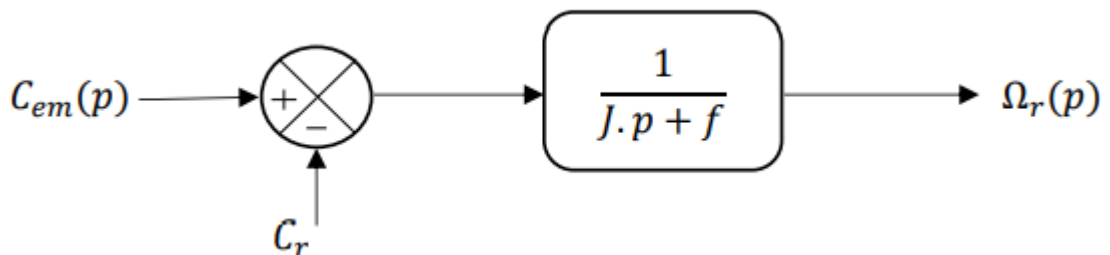


Figure III.15 : Schéma bloc de la boucle de vitesse.

De l'équation (III.10) on déduit la relation entre la vitesse de rotation et la force contre électromotrice (Figure III.16) :

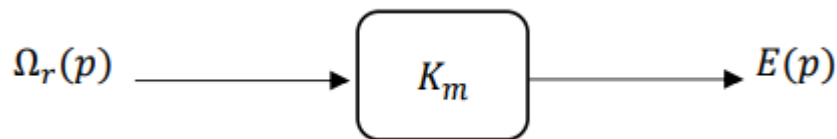


Figure III.16 : Schéma bloc de vitesse de rotation en fonction de la force Contre électromotrice

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 :

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

En reliant les différents blocs (Figure III.13), (Figure III.14), (Figure III.15), (Figure III.16) on obtient le schéma bloc global du moteur (Figure III.17) :

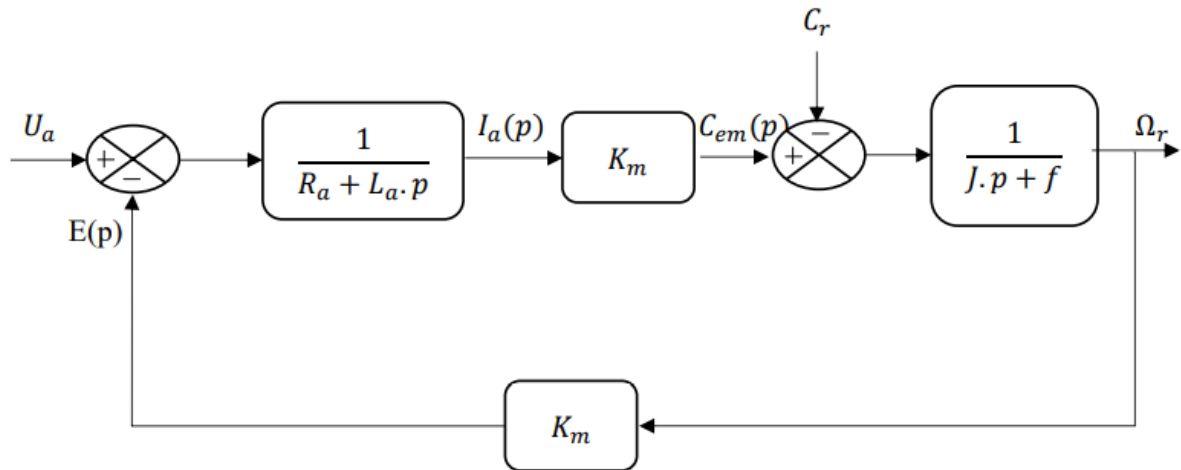


Figure III.17 : Schéma fonctionnel du moteur à excitation séparée.

III.11.5. Structure de la commande PI

Chaque boucle de régulation est dotée d'un régulateur proportionnel intégral PI classique présenté sur la (figure III.18). 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 [18].

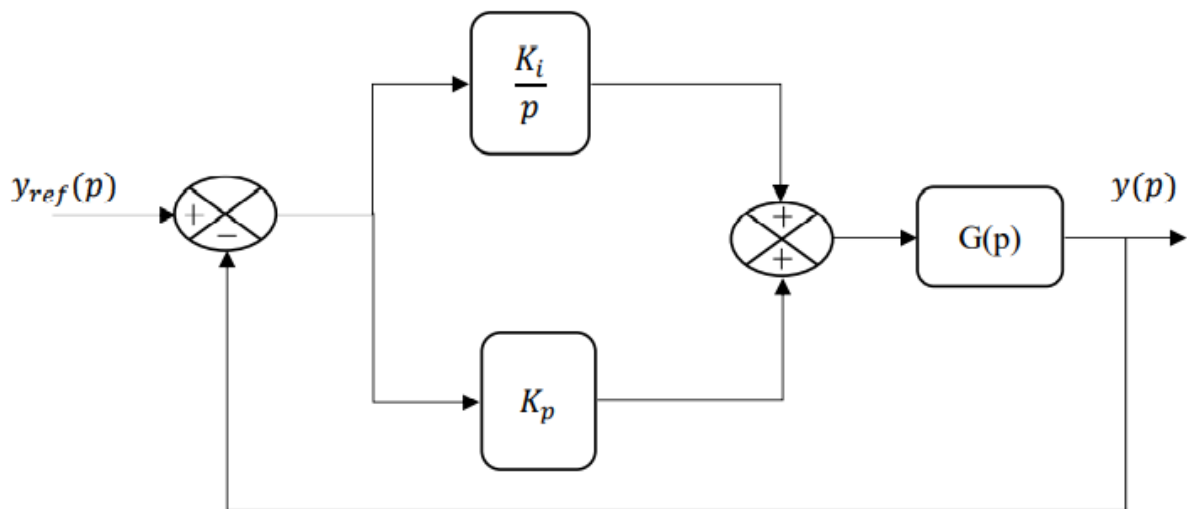


Figure III.18 : Schéma de commande utilisant la structure PI

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

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

La fonction de transfert en boucle fermée est :

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

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 :

$$\begin{cases} \frac{K_p}{K_i} p + 1 = (\tau p + 1) \implies \tau = \frac{K_p}{K_i} \\ FT_{bf} = \frac{G_0 \cdot K_i}{p + G_0 \cdot K_i} \implies \tau_{bf} = \frac{1}{G_0 \cdot K_i} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Les paramètres du régulateur sont alors donnés par :

$$\begin{cases} K_i = \frac{1}{G_0 \cdot \tau_{bf}} \\ K_p = \frac{\tau}{G_0 \cdot \tau_{bf}} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

III.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la commande MPPT des convertisseurs statiques DC-DC pour rechercher le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque, sous différentes conditions de fonctionnement. Nous utilisons dans cette étude, la méthode de perturbation et d'observation.

Dans la seconde partie nous avons présenté le principe de fonctionnement de la machine électrique tournante (MCC) avec ces types d'excitation et nous avons choisi le modèle qui correspond le mieux à nos applications en le modélisant en nos propres équations mathématique.

Chapitre IV

Simulation et évaluation des résultats

IV.1. Introduction

Dans ce présent chapitre, nous présenterons les différentes simulations effectuées sur un système photovoltaïque constitué principalement d'un générateur PV, d'une charge et d'un convertisseur survolteur « boost ». 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

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

IV.2. L'outil Matlab/Simulink

Simulink est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation de systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal. Simulink est intégré à MATLAB, fournissant ainsi un accès immédiat aux nombreux outils de développement algorithmique, de visualisation et d'analyse de données de MATLAB. qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble

Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).

- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

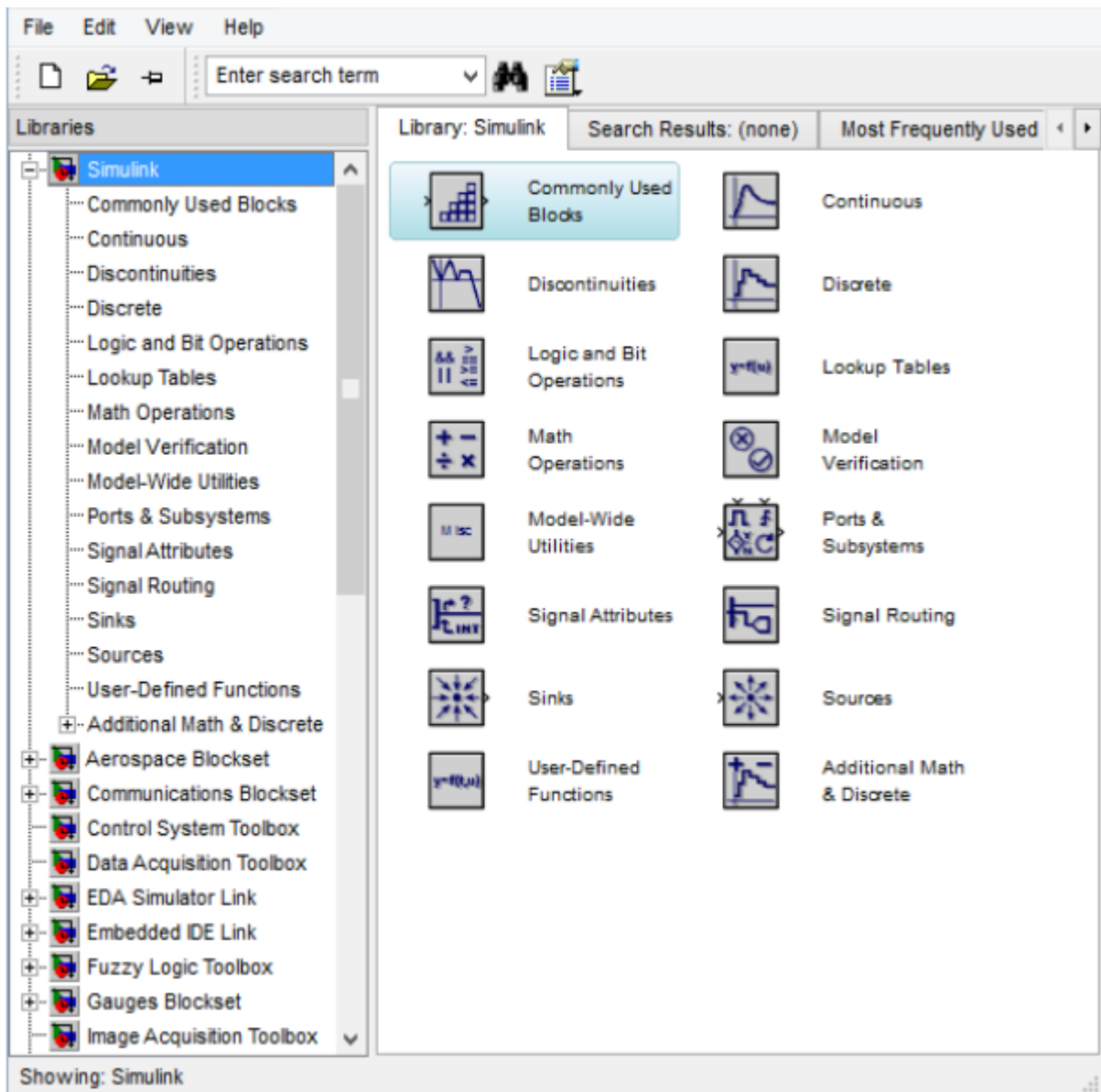


Figure IV.1. Bibliothèque SIMULINK.

IV.3. Modèle du système à dimensionner :

Le système étudié est constitué par le générateur Photovoltaïque, convertisseur statique DC-DC (hacheur de type survolteur) et la machine électrique tournante (moteur à courant continu MCC) de puissance nominale P_n (w). Le convertisseur DC-DC est commandé suivant une stratégie qui a pour l'objectif de la recherche permanente du point de puissance maximum (MPPT).

La (figure IV.2) illustre une disposition synoptique de l'ensemble du système

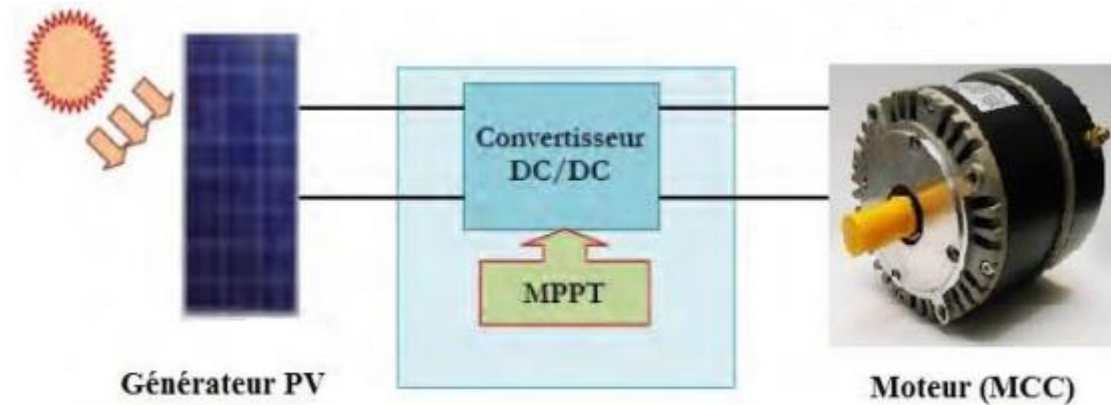


Figure IV.2 : Schéma synoptique du système PV contrôlé par MPPT.

IV.4. Dimensionnement d'un système PV avec moteur à courant continu

Le dimensionnement a pour l'objectif de déterminer d'une part le nombre de modules (série, parallèle) 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 la machine (MCC), toute cette panoplie de paramètres est déduite à partir des données d'éclairement du site concerné, ainsi des besoins électriques du consommateur. 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.4.1. 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 :

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

a. Détermination du nombre de modules série à installer :

Pour trouver la tension convenable à l'alimentation d'une charge donnée par la mise en série de plusieurs modules PV, le nombre de ces modules est calculé par l'expression suivante :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_M} \quad (\text{IV.2})$$

Avec

V_{ch} : la tension nominale de la charge.

V_m : la tension nominale du module.

b. Détermination du nombre de modules parallèle à installer :

La mise en parallèle de module donne l'intensité nécessaire à la charge. Le nombre de branches est calculé par l'équation suivante :

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

IV.4.1.1. Le courant total fourni par Groupe PV

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

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{cctot} = N_p \cdot I_{cc} \\ I_{pmtot} = N_p \cdot I_{pm} \end{array} \right\} \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

- ❖ I_{cctot} : 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.4.1.2. 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.5. Système photovoltaïque proposée :

Le générateur photovoltaïque utilisé dans l'installation solaire est en silicium monocristallin est constitué de 36 cellules, avec un courant de court-circuit $I_{cc}=3.25A$ et une tension du circuit ouvert $V_{co}=24.9V$ peut délivrer une puissance maximale $P_{mpp}=60\ W$ à un courant à puissance maximal $I_{mpp}= 3.1A$ et à une tension à puissance maximal $V_{mpp}=20V$. pour simuler le comportement du générateur PV, nous avons simulé le modèle présenté au chapitre I.

Ceci nous a permis de déterminer les propriétés électriques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ de ce dernier dans les conditions standard du test STC ($G=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$).

IV.6. Simulation du générateur PV

Le schéma de générateur photovoltaïque en l'environnement Matlab-Simulink est représenté par :

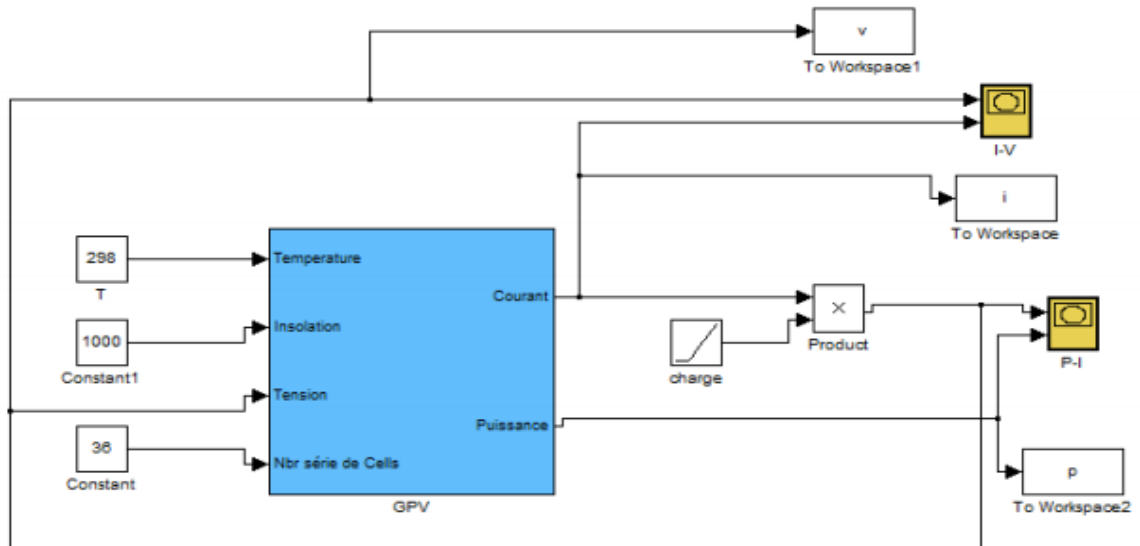


Figure IV.3. Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK

La simulation du générateur photovoltaïque sous MATLAB-SIMULINK dans les conditions standard du test STC ($G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$), nous a permis de tracer les graphes des (figures IV.4 et IV.5).

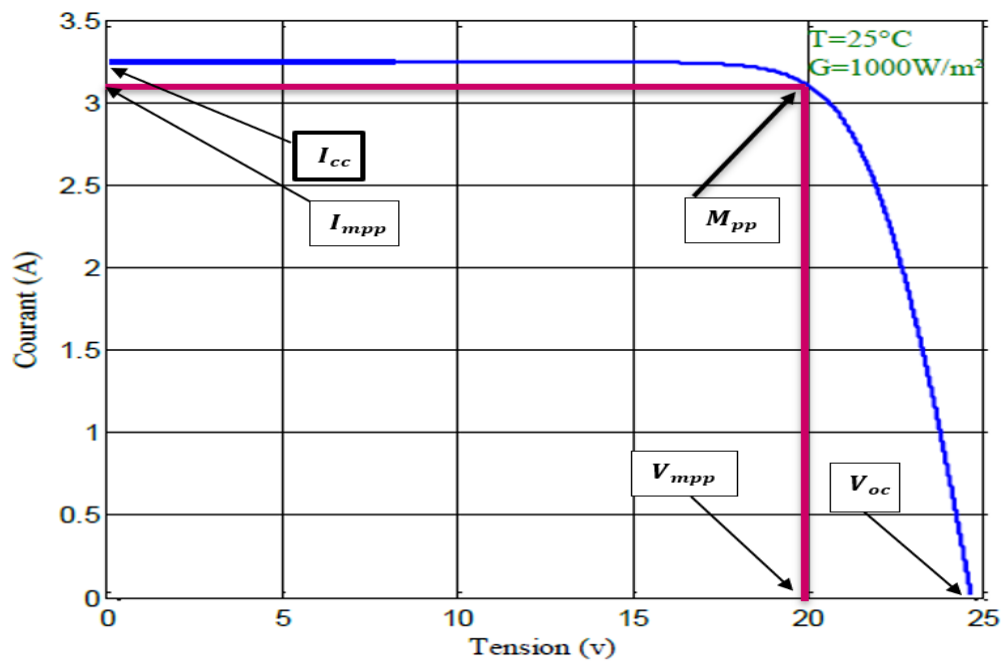


Figure IV.4 : caractéristique $I=f(V)$ du module à $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

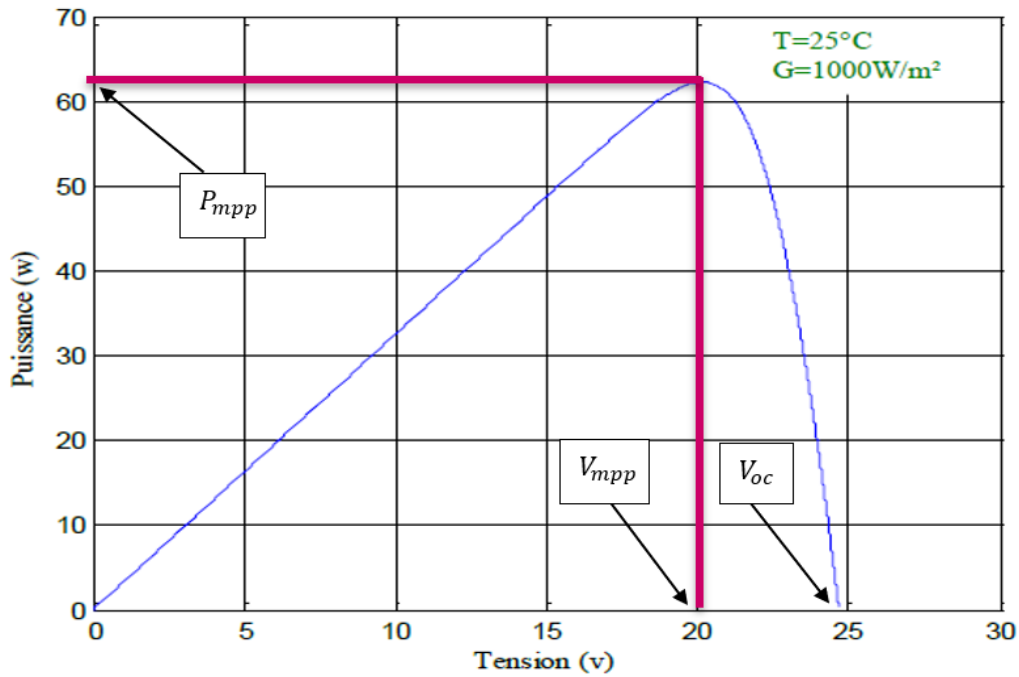


Figure IV.5 : Caractéristique $P= f(V)$ du module à $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$.

IV.6.1. Influence de la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

Sur la Figure IV.6, nous montrons les caractéristiques I-V et la figure IV.7 P-V d'un module photovoltaïque à un certain niveau d'ensoleillement G et à différentes températures

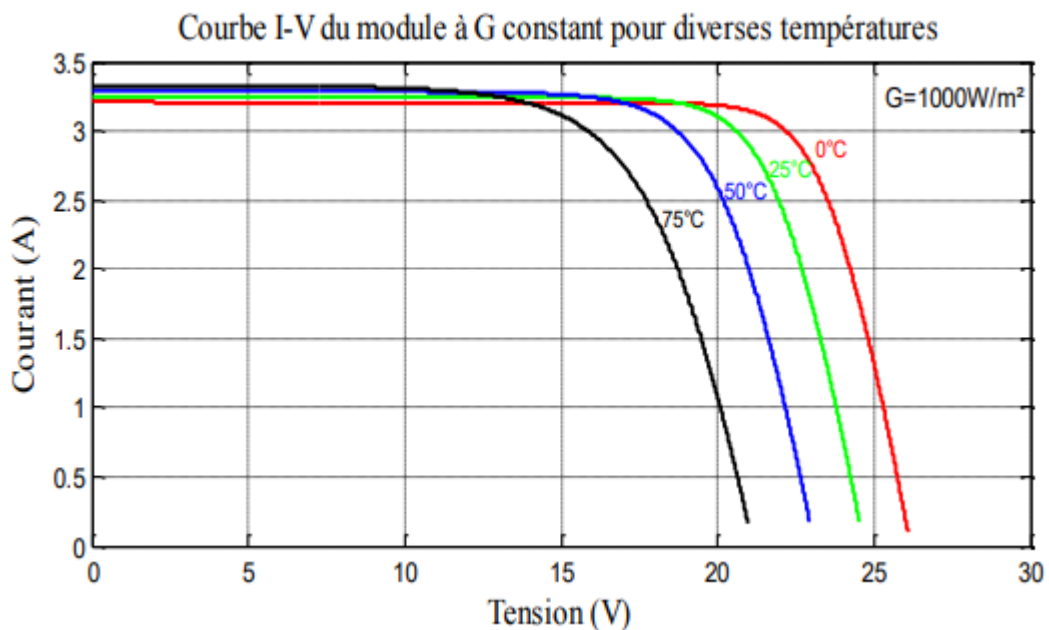


Figure IV.6. Caractéristique courant-tension pour différentes valeurs de la température.

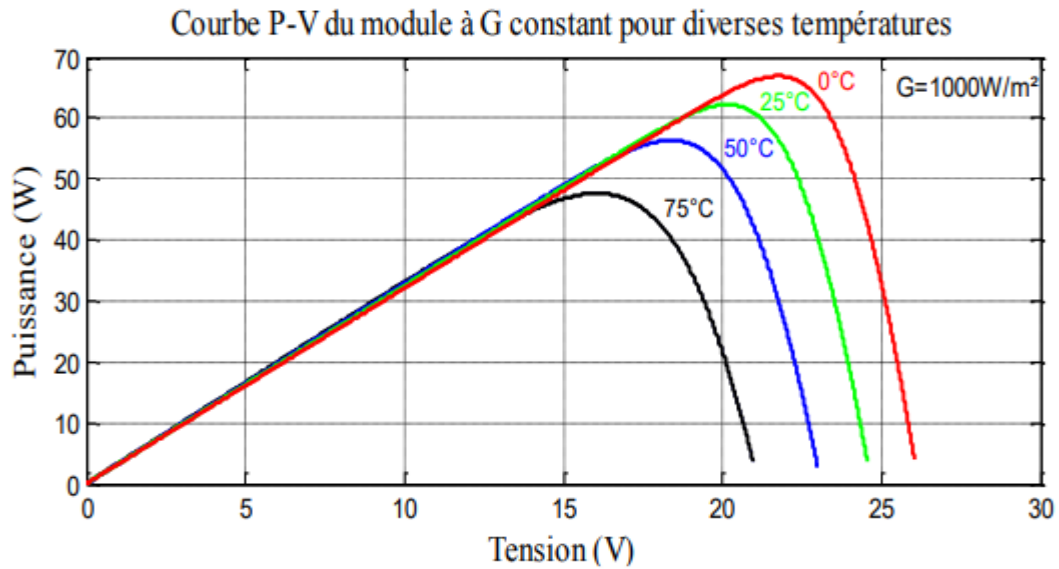


Figure IV.7. Caractéristique puissance-tension pour différentes valeurs de la température.

IV.6.2. Influence de l'éclairement sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

Nous présentons la figure IV.6 la caractéristique I-V et la caractéristique P-V dans la figure IV.7 d'un module photovoltaïque pour un niveau de température T donné et pour différents éclairements :

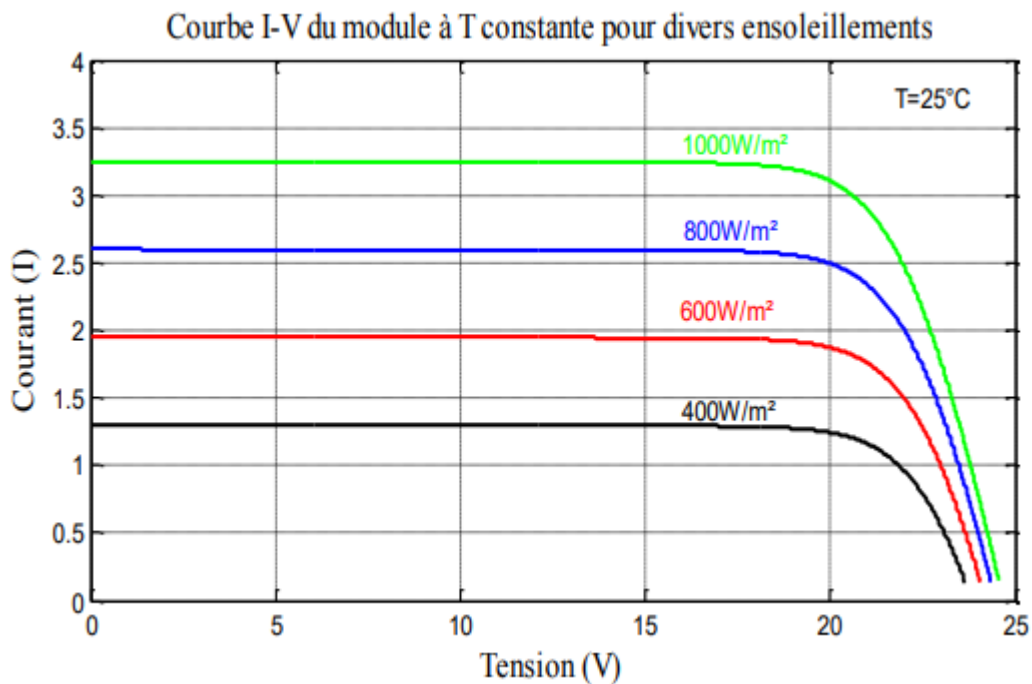


Figure IV.8. Caractéristique courant-tension pour différentes valeurs d'éclairement

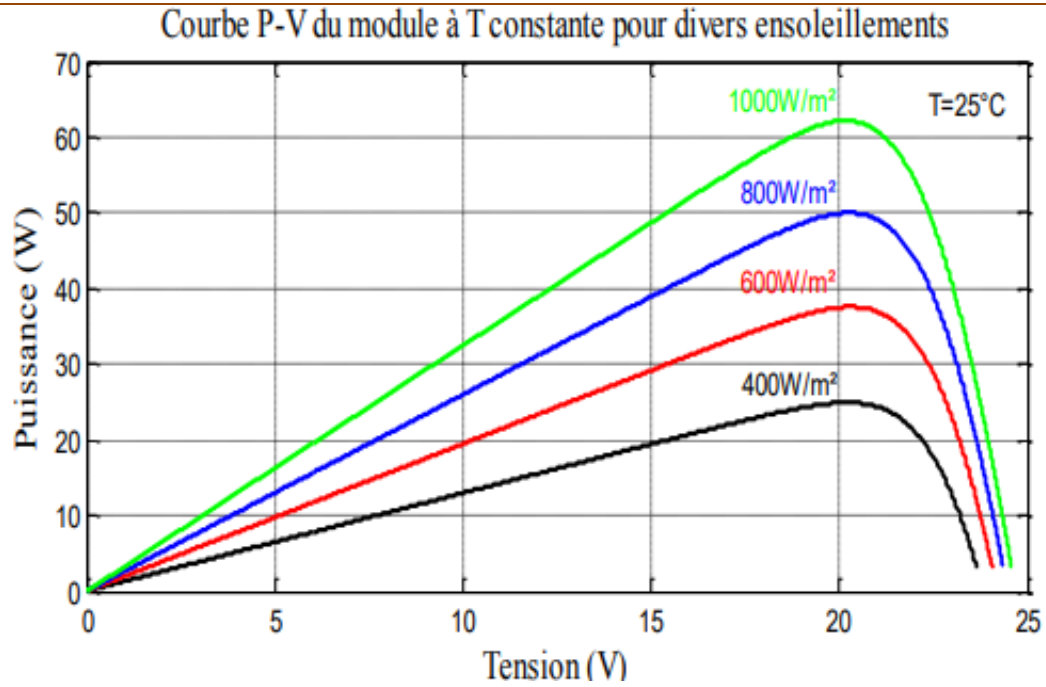


Figure IV.9. Caractéristique puissance-tension pour différentes valeurs d'éclairement

IV.7. Le bloc de simulation de l'algorithme perturbation et observation (P&O)

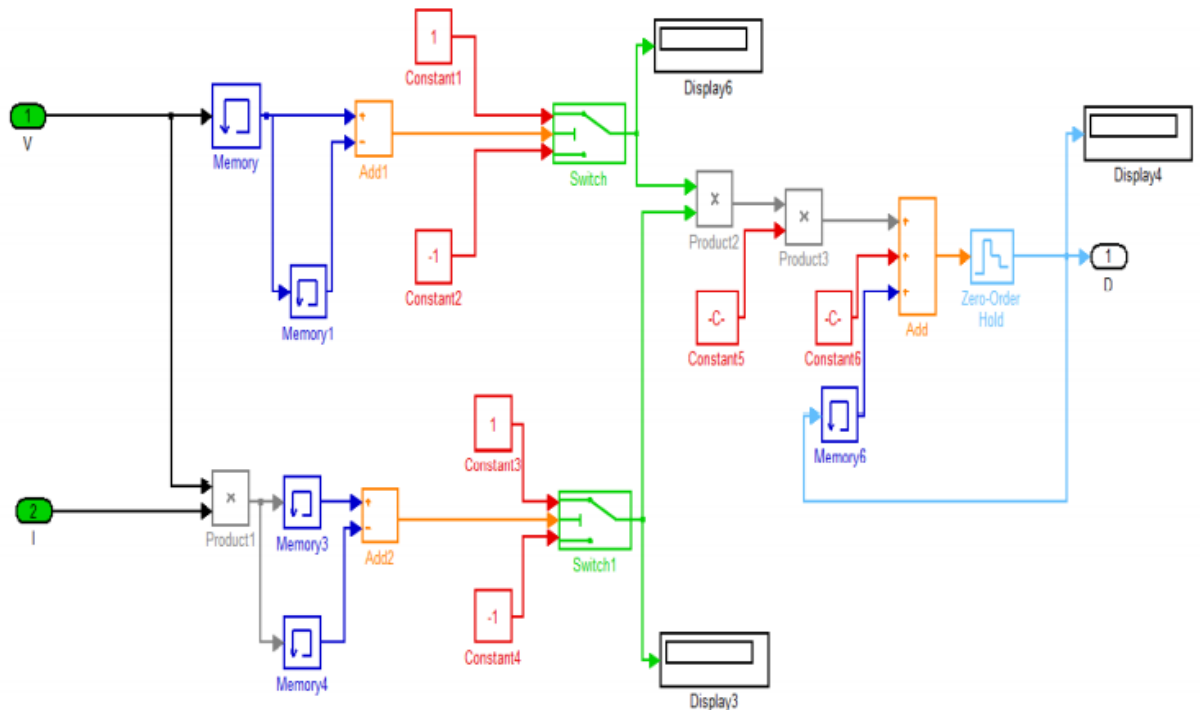


Figure IV.10: Schéma block de l'algorithme (P&O).

IV.8. Simulation de l'hacheur parallèle (BOOST)

Dans ce qui précède, nous décrivons le fonctionnement des convertisseurs statiques BOOST (voir le chapitre II). Le convertisseur statique survolteur approprié à notre système photovoltaïque est commandé par la commande (MPPT).

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

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

Le schéma bloc de SIMULINK du convertisseur statique survolteur (BOOST) représenté par la figure IV.11.

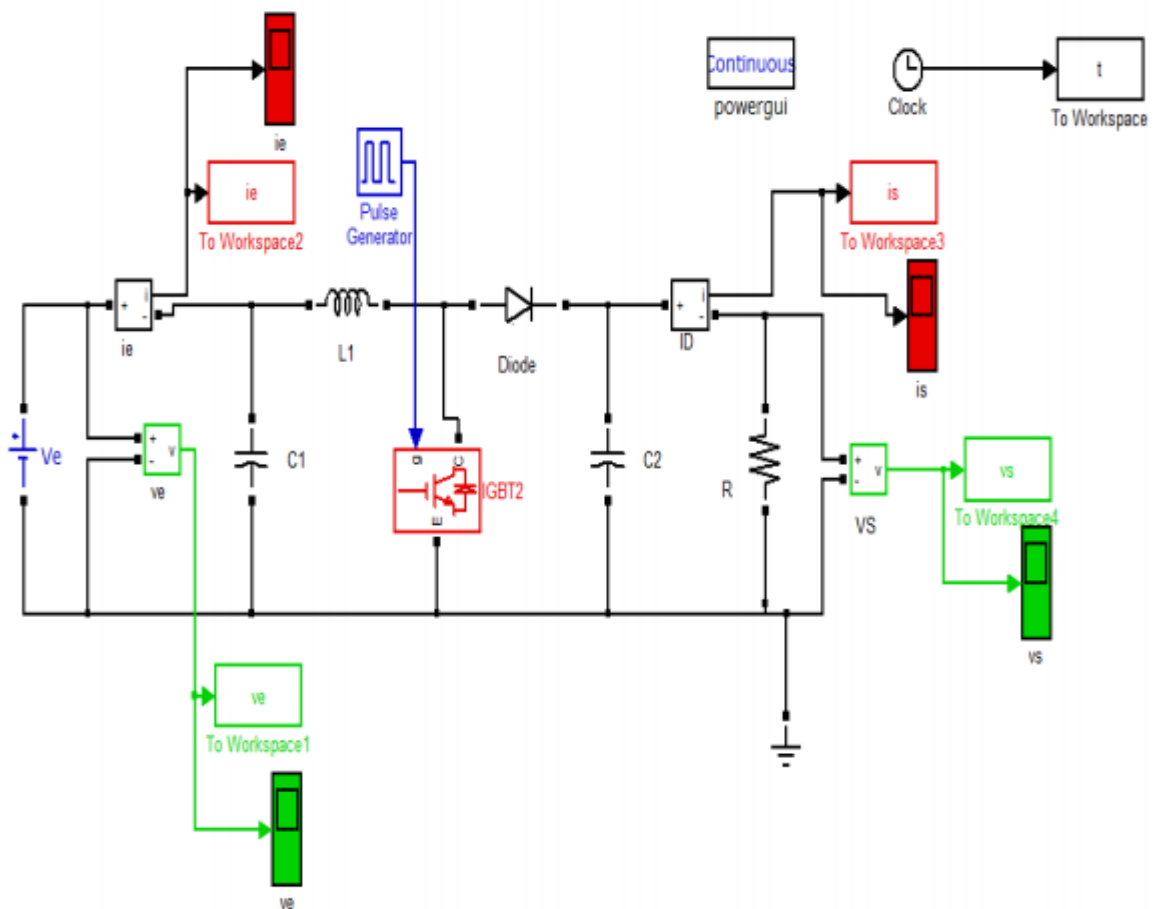


Figure IV.11 : Schéma bloc d'un convertisseur survolteur (BOOST).

Les résultats de simulation de l'hacheur BOOST représentent par les (figures IV.12 et IV.13). Ces figures représentent respectivement le rapport cyclique (d) de commande sur la gâchette ainsi la tension d'entrée et de sortie du convertisseur survolteur.

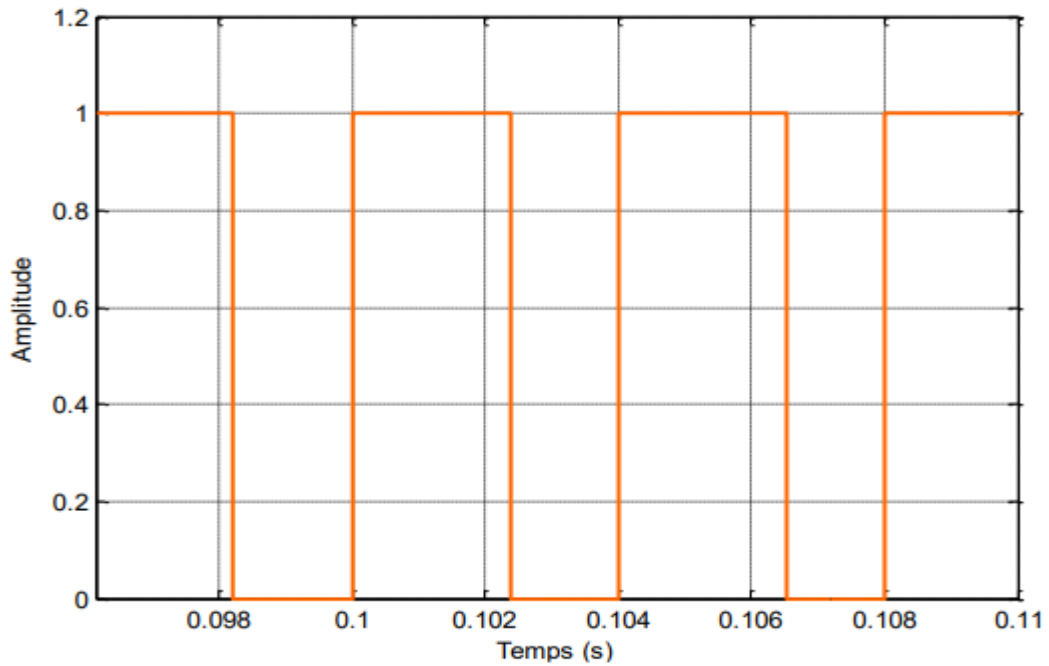


Figure IV.12. Signal de commande le rapport cyclique (D).

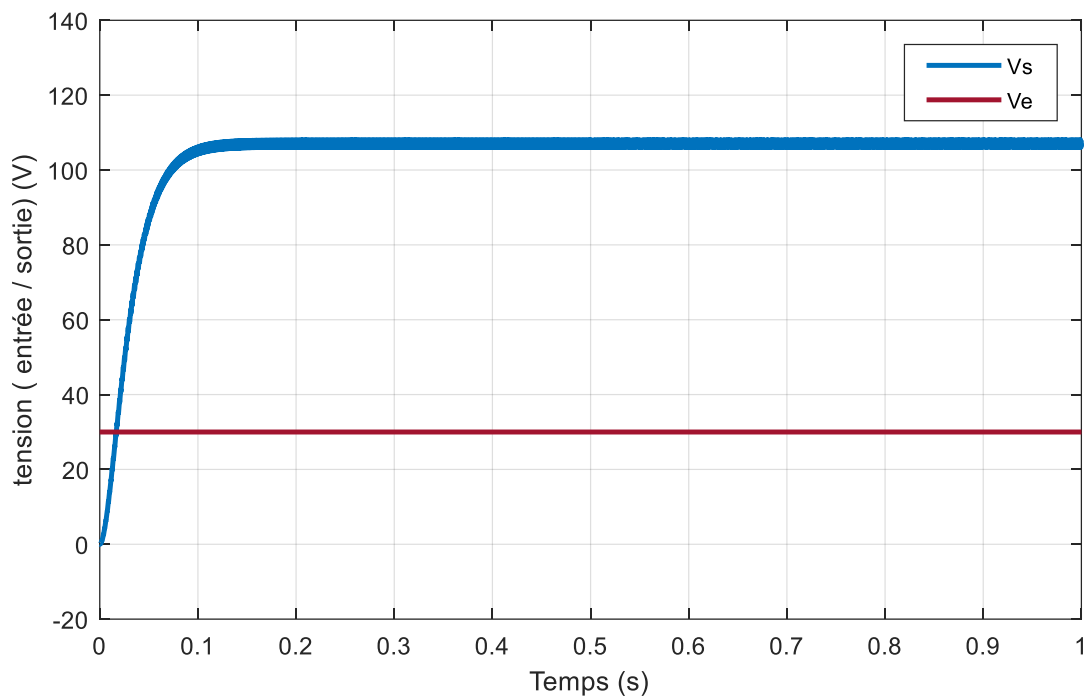


Figure IV.13 : la tension d'entrée et de sortie du convertisseur survolteur.

Ces résultats montrent que la tension de sortie $V_0 \approx 108\text{v}$ d'hacheur survolteur est supérieur à celle d'entrée $V_i = 30\text{v}$. Donc l'hacheur survolteur effectue correctement son rôle.

IV.9. Simulation d'un panneau photovoltaïque avec MPPT et convertisseur DC/DC

La (figure IV.14) montre le schéma bloc (SIMULINK) d'un système photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT « perturbation et observation P&O ».

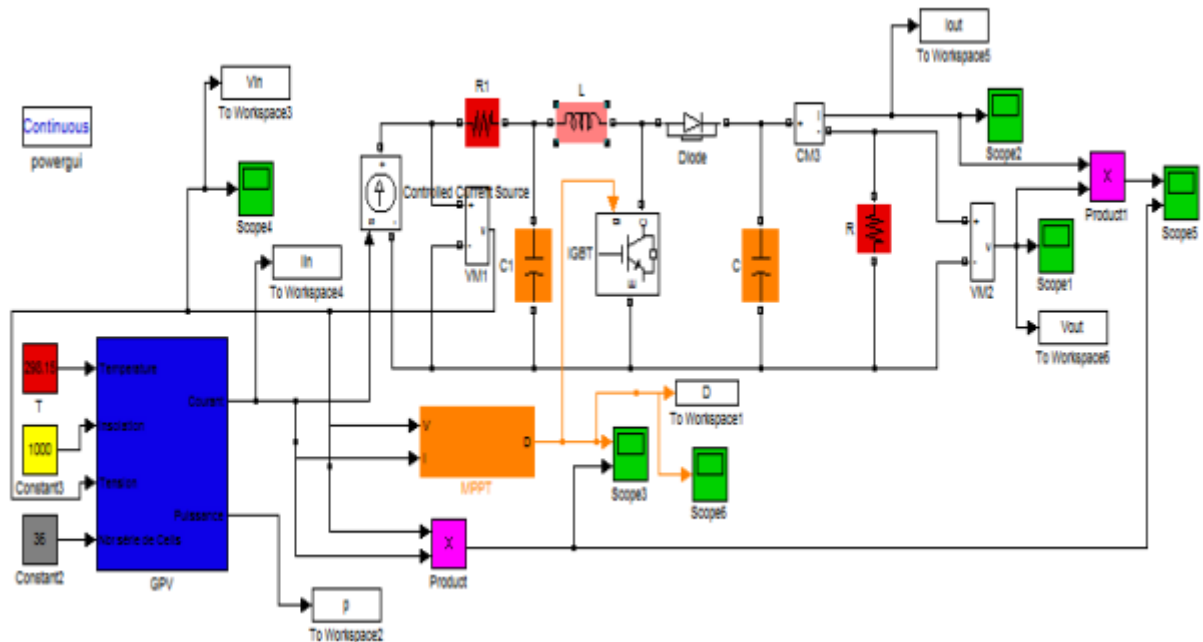


Figure IV.14: Schéma bloc d'un système photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT « perturbation et observation P&O ».

Les résultats de la simulation d'un système photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT « perturbation et observation P&O », sous les conditions standard STC (25°C et 1000 W/m²). Son représentés par les figures suivantes :

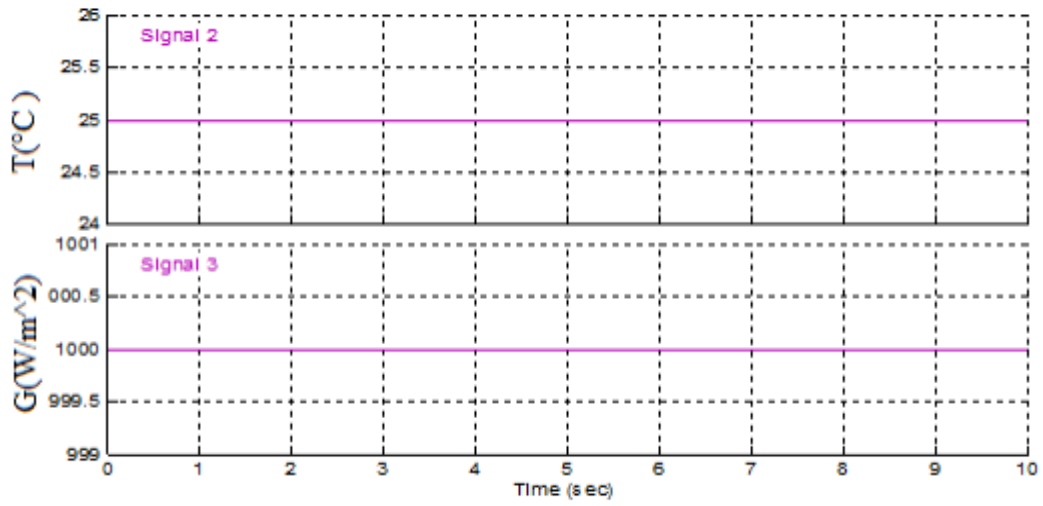


Figure IV.15: Les conditions de simulation STC (25°C et 1000 W/m²).

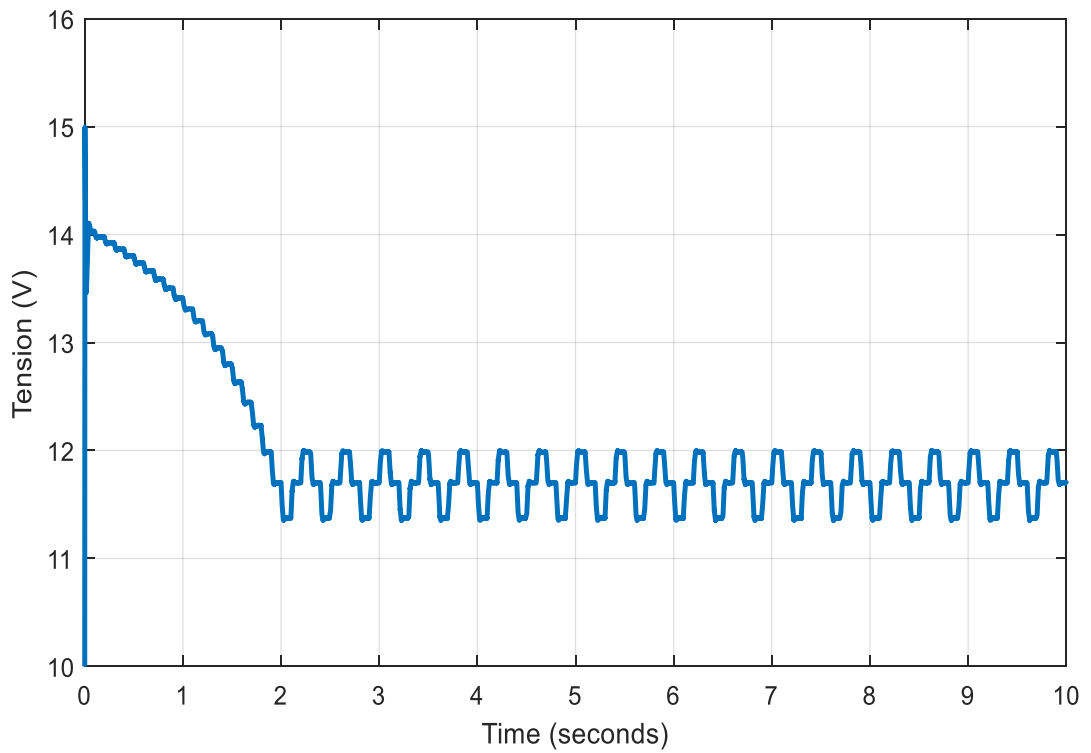


Figure IV.16 : Tension de sortie du système

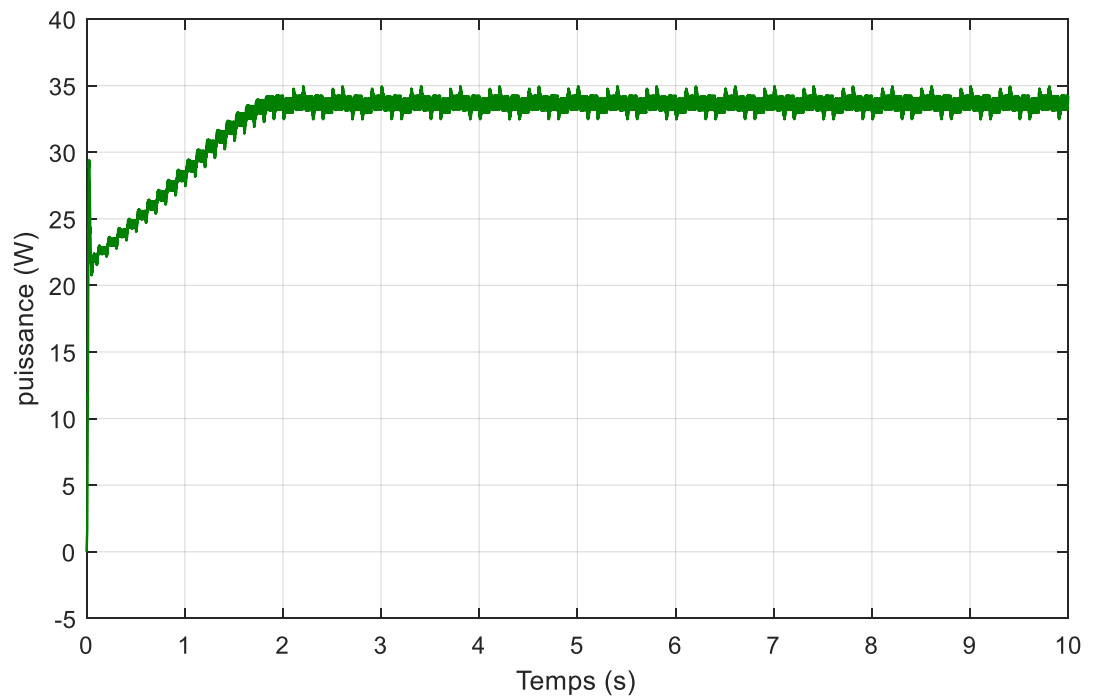
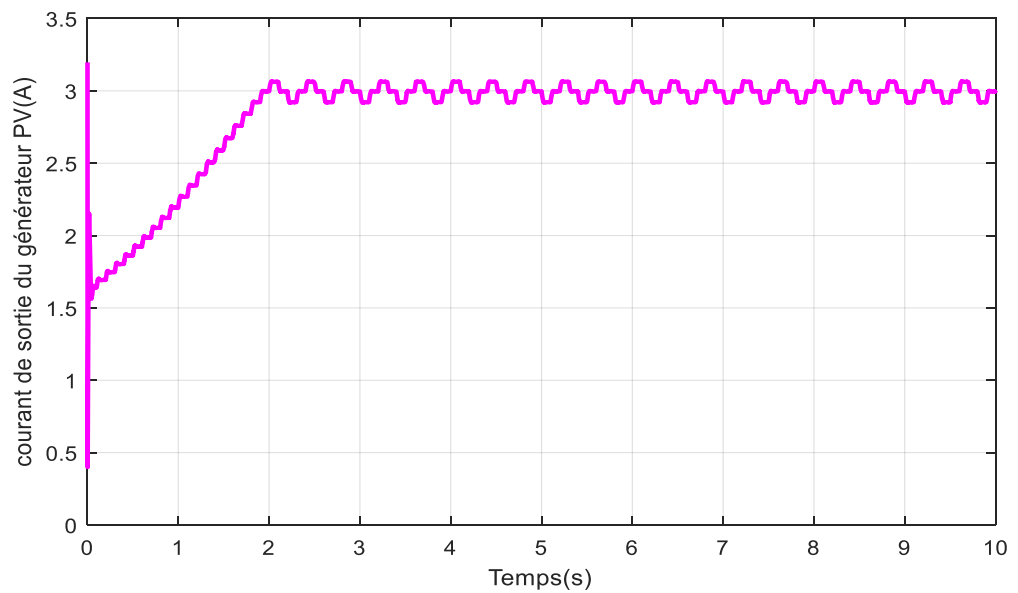


Figure IV.17 : Puissance de sortie du système.



FigureIV.18 : courant de sortie du système

IV.10. Simulation de convertisseur dans le cas central

La figure IV.19 représente le schéma block globale des trois générateurs PV avec un seul Convertisseur central commandé par la MPPT.

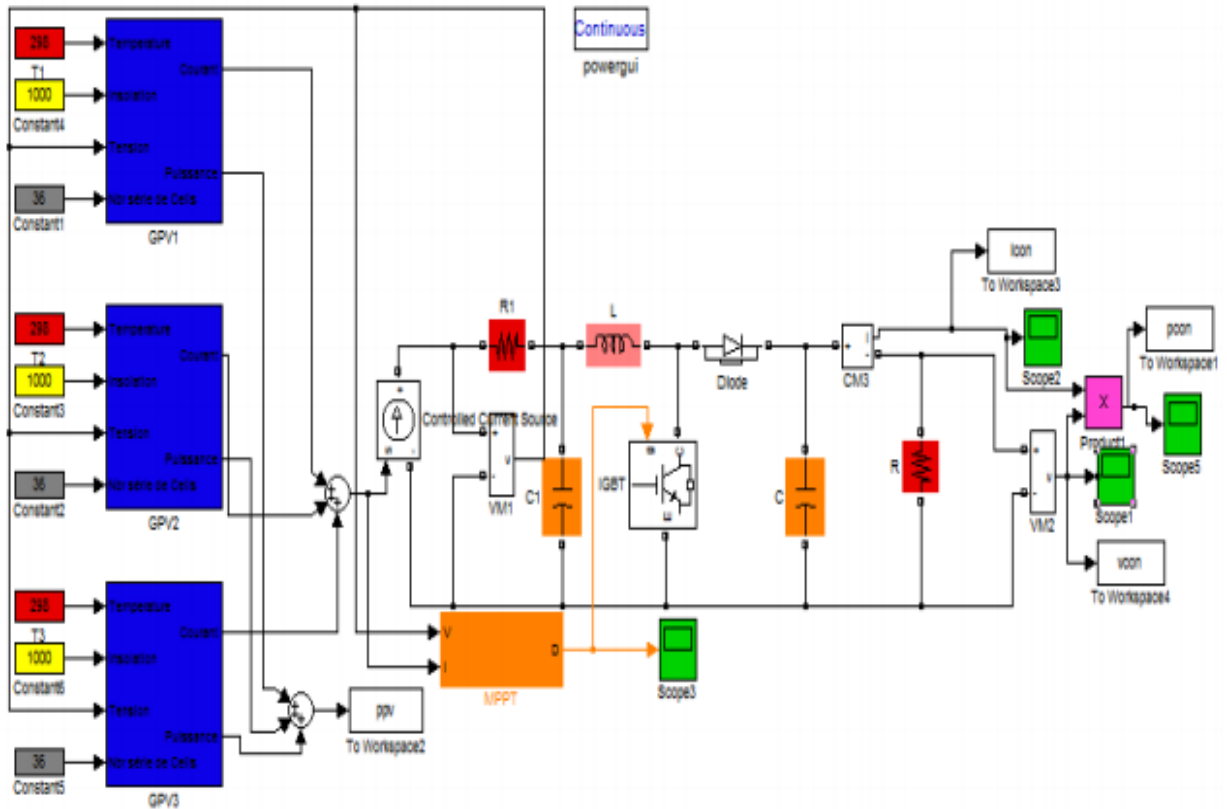


Figure IV.19. Schéma MATLAB SIMULINK globale des générateurs PV avec convertisseur central.

Les résultats de simulation du convertisseur central avec trois générateurs photovoltaïques sous un éclairage de 1000 W/m², une température de 25°C. Ces figures représentent la tension de sortie et la tension d’entrée, le courant de sortie, la puissance de sortie et la puissance d’entrée de convertisseur central.

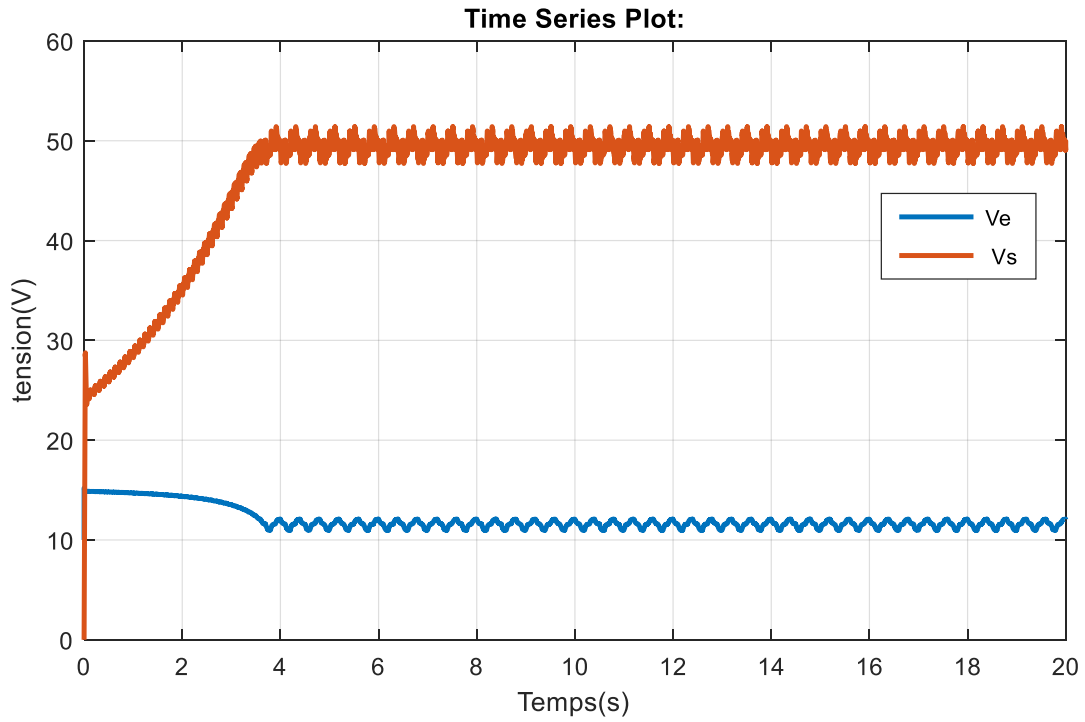


Figure IV.20. Résultats de simulation de la tension d'entrée et la tension de sortie du système.

La tension de sortie augmentée de $0s < t < 4s$ est (0v à 50v), et d'après 4s la tension de sortie est stable (50v) dans cette valeur par rapport la tension d'entrée augmentée de 0s jusqu'à 3.8s est instable et d'après 3.8s la tension d'entrée est stable.

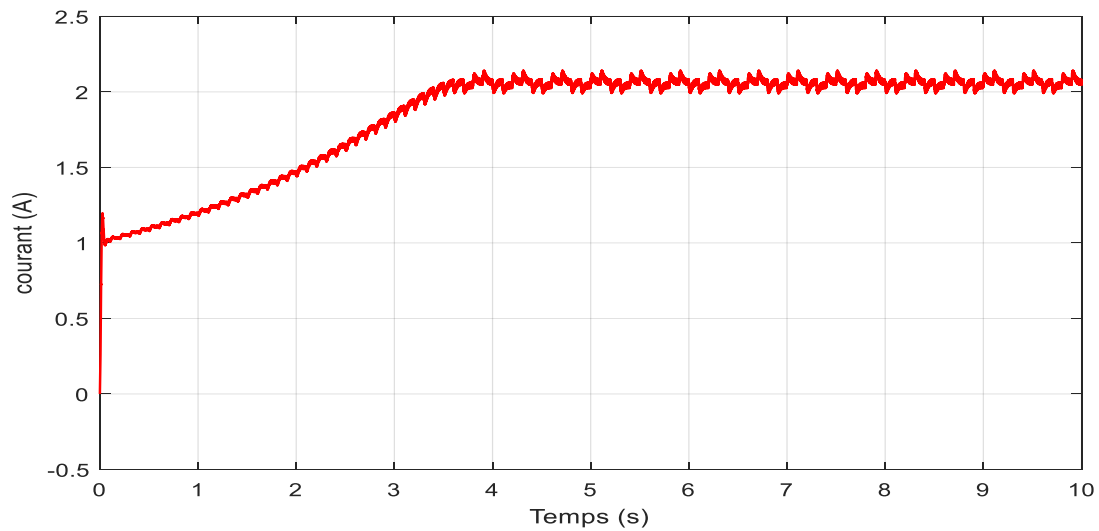


Figure IV.21. Résultats de simulation du courant de sortie du système.

Le courant de sortie augmentée de $0s < t < 3.75s$ est (0A à 2A), et d'après 3.75 s le courant se stabilise (2 A) dans cette valeur.

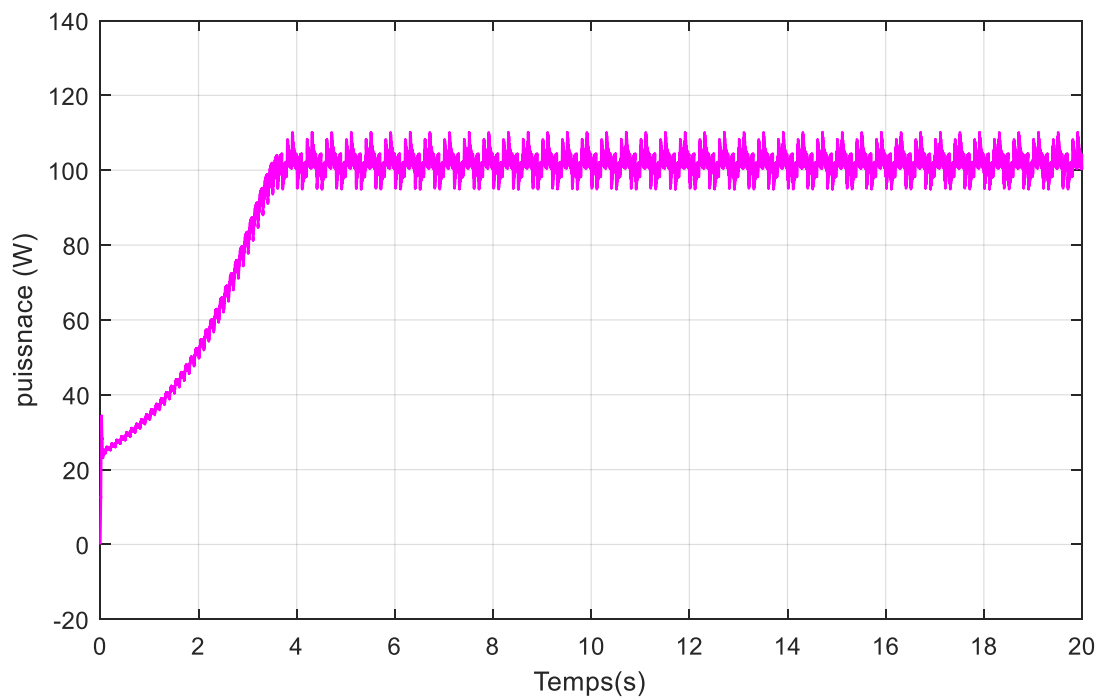


Figure IV.22. Résultats de simulation de la puissance de sortie du système.

La puissance de sortie augmentée de $0s < t < 4s$ est (0w à 104w), et d'après 4s la puissance est stable (104w) dans cette valeur.

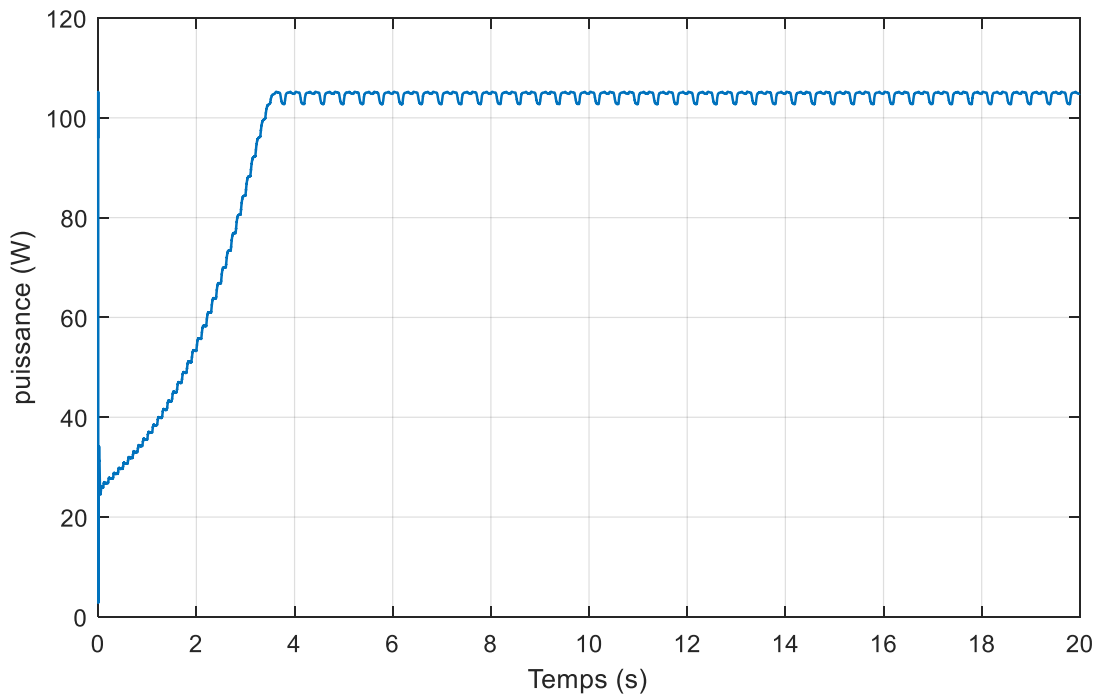


Figure IV.23. Résultats de simulation de la puissance d'entrée du système.

La puissance moyenne d'entrée augmentée de $0s < t < 4s$ est instable et d'après 4s la puissance moyenne d'entrée est stable (105w). Le rendement dans le cas central est 98%.

IV.11. Simulation de convertisseur dans le cas string parallèle

Le schéma bloc globale des trois générateurs photovoltaïques avec des convertisseur statique associe en parallèle avec commande de MPPT représenté par la figure (IV.24)

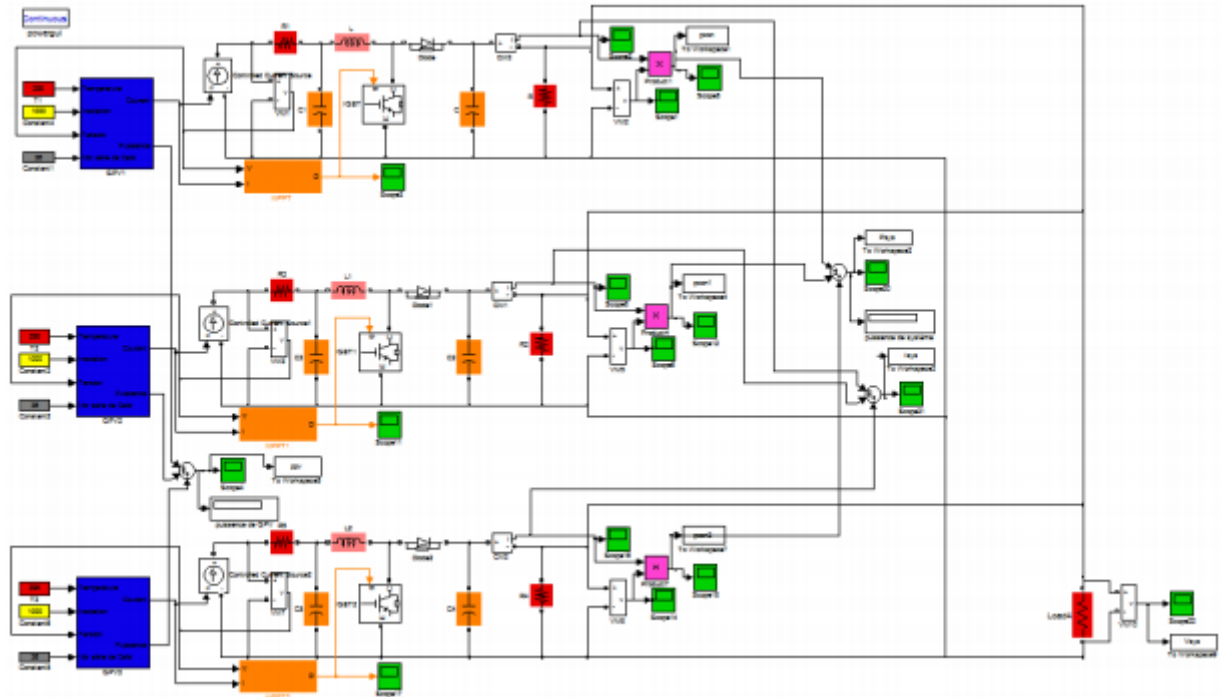


Figure IV.24. Schéma MATLAB SIMULINK globale des générateurs PV avec convertisseur string on parallèle.

Les résultats de simulation du convertisseur string on parallèle avec générateur photovoltaïque sous les condition standard STC (éclairage $G=1000 \text{ W/m}^2$ et une température de 25°C). Représentent par les figures ci-dessous. Ces figures représentent la tension de sortie et la tension d'entrée, le courant de sortie, la puissance de sortie et la puissance d'entrée de convertisseur string on parallèle.

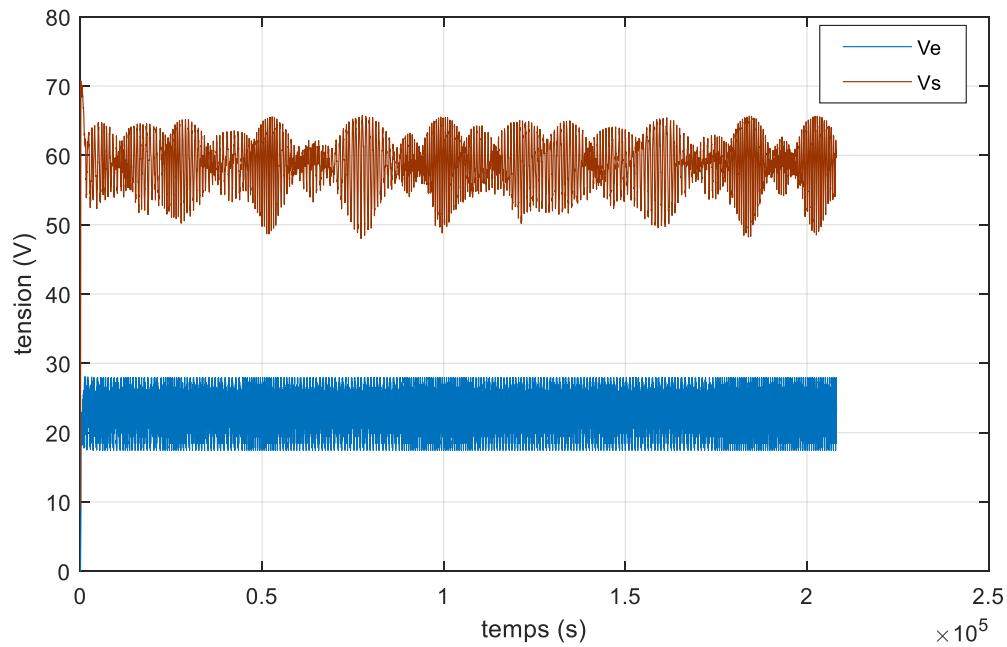


Figure IV.25. Résultats de simulation de la tension d'entrée et de la tension de sortie du système

La tension de sortie augmentée de $0s < t < 4,33 \cdot 10^{-6}$ est (0v à 70v), et d'après $4,33 \cdot 10^{-6}$ s la tension de sortie est stable (70v) dans cette valeur par apport la tension d'entrée augmentée de $0s$ jusqu'à $0,52 \cdot 10^{-6}$ s est instable et d'après $0,52 \cdot 10^{-6}$ s la tension d'entrée est stable (28v).

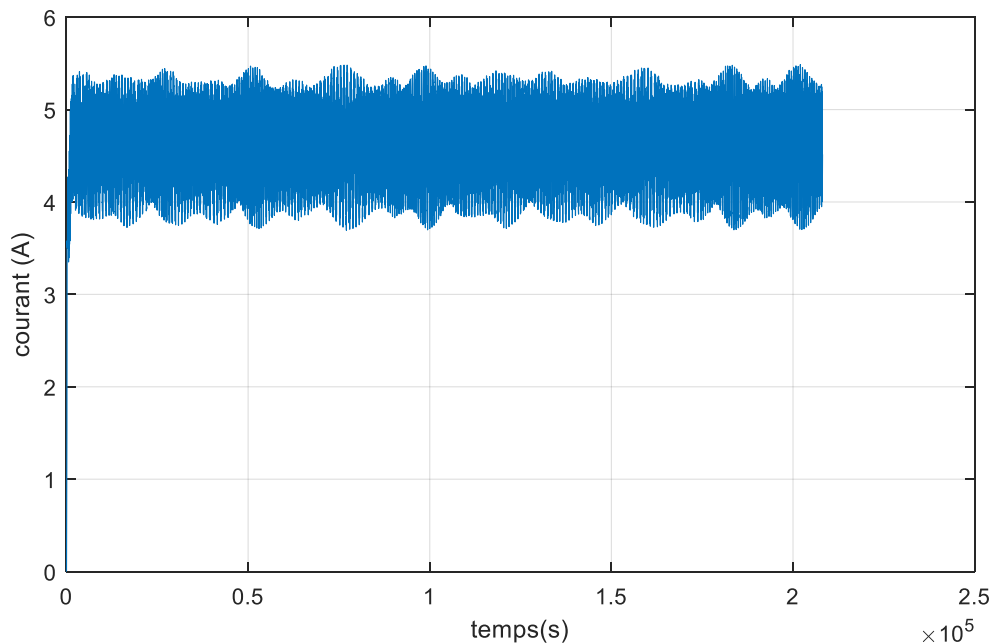


Figure IV.26. Résultats de simulation du courant de sortie du système.

Le courant de sortie augmentée de $0s < t < 4,32 \cdot 10^{-6}$ s est (0A à 5.2A), et d'après $4,32 \cdot 10^{-6}$ s le courant est stable (5.2A) dans cette valeur.

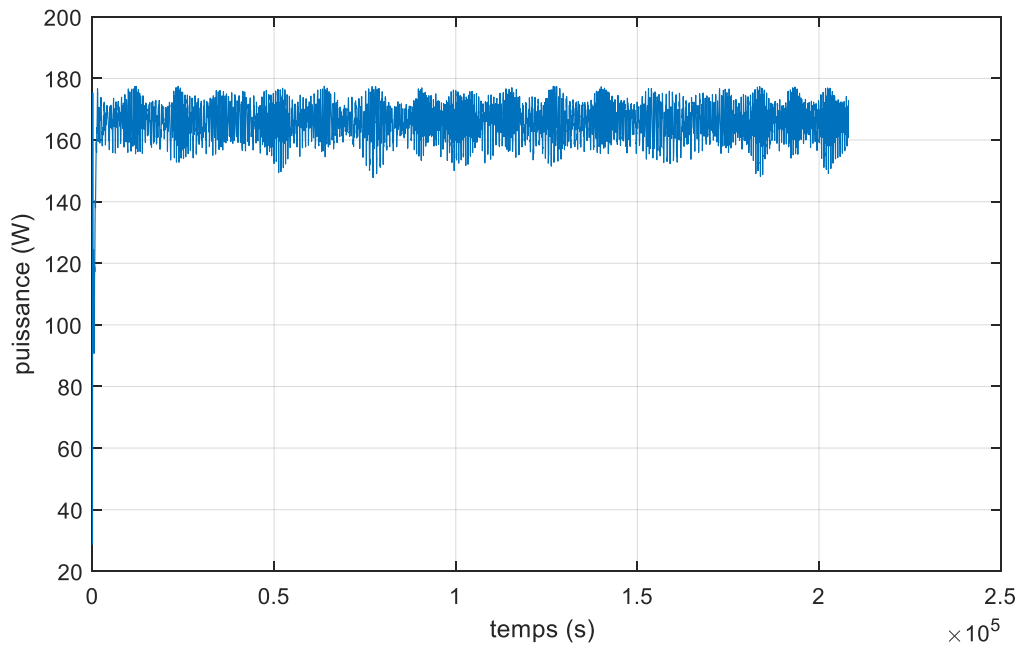


Figure IV.27. Résultats de simulation de la puissance d'entrée du système

La puissance de sortie augmentée de $0s < t < 4,32 \cdot 10^{-6}s$ est (0A à 178W), et d'après $4,32 \cdot 10^{-6}s$ le courant est stable (178 W) dans cette valeur

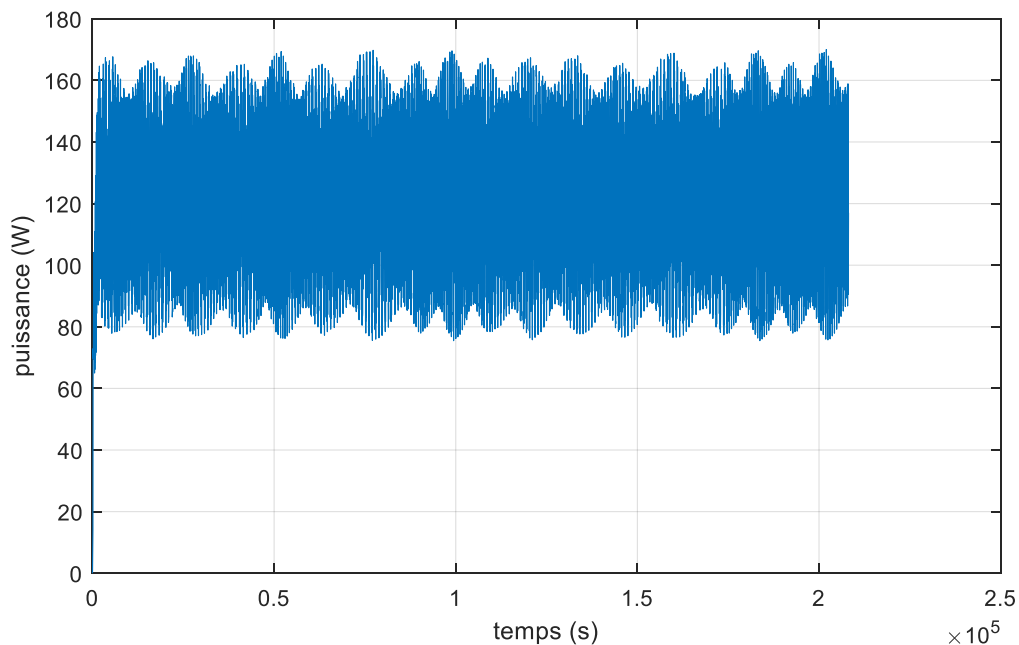


Figure IV.28. Résultats de simulation de la puissance de sortie du système.

La puissance de sortie augmentée de $0s < t < 4,32 \cdot 10^{-6}s$ est (0A à 164W), et d'après $4,32 \cdot 10^{-6}s$ le courant est stable (164W) dans cette valeur

Le rendement dans le cas string en parallèle est 92 %

IV.12. Simulation globale (GPV, convertisseur, MPPT, MCC)

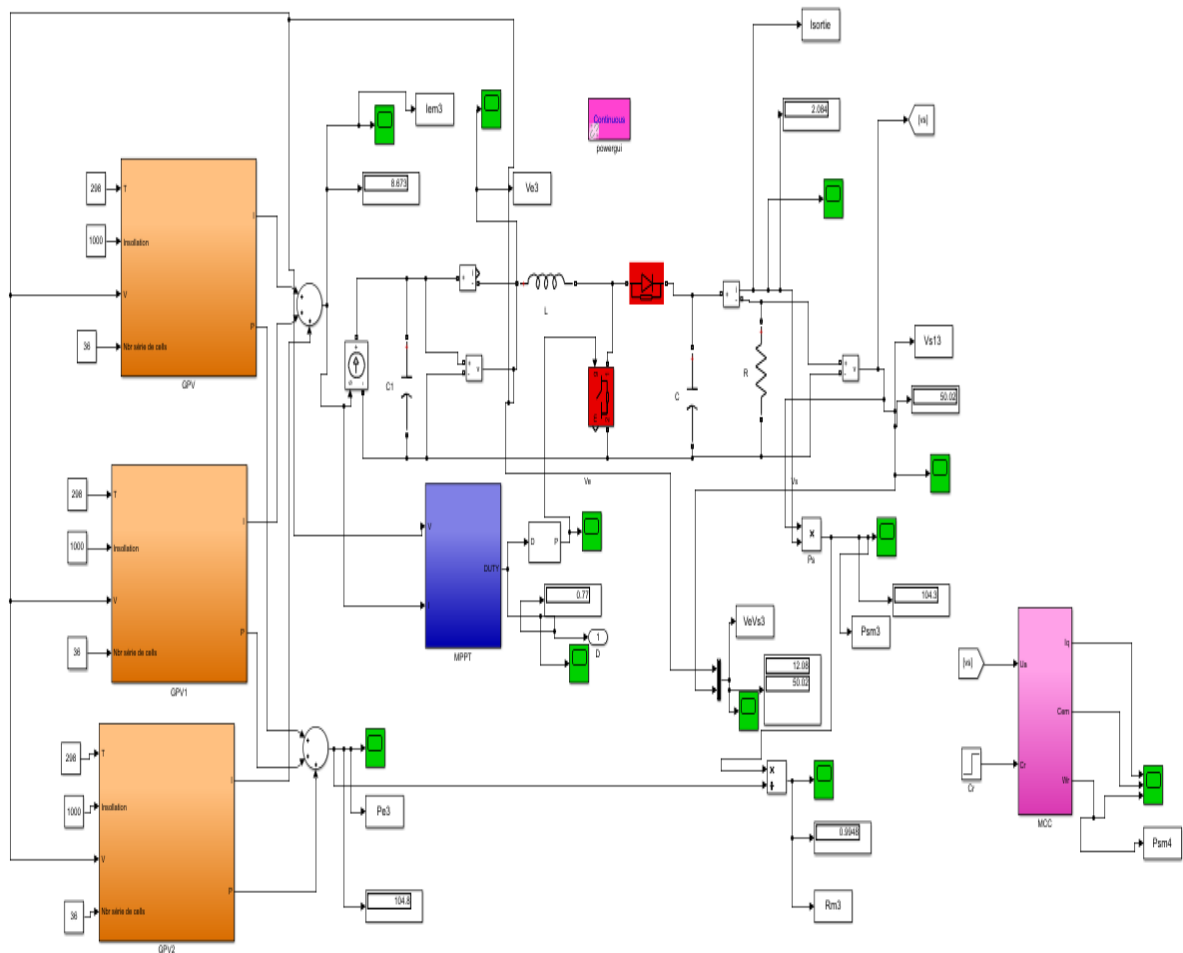


Figure IV.29 : Schéma bloc du système global (GPV, convertisseur, MPPT, MCC).

IV.12.1. 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).

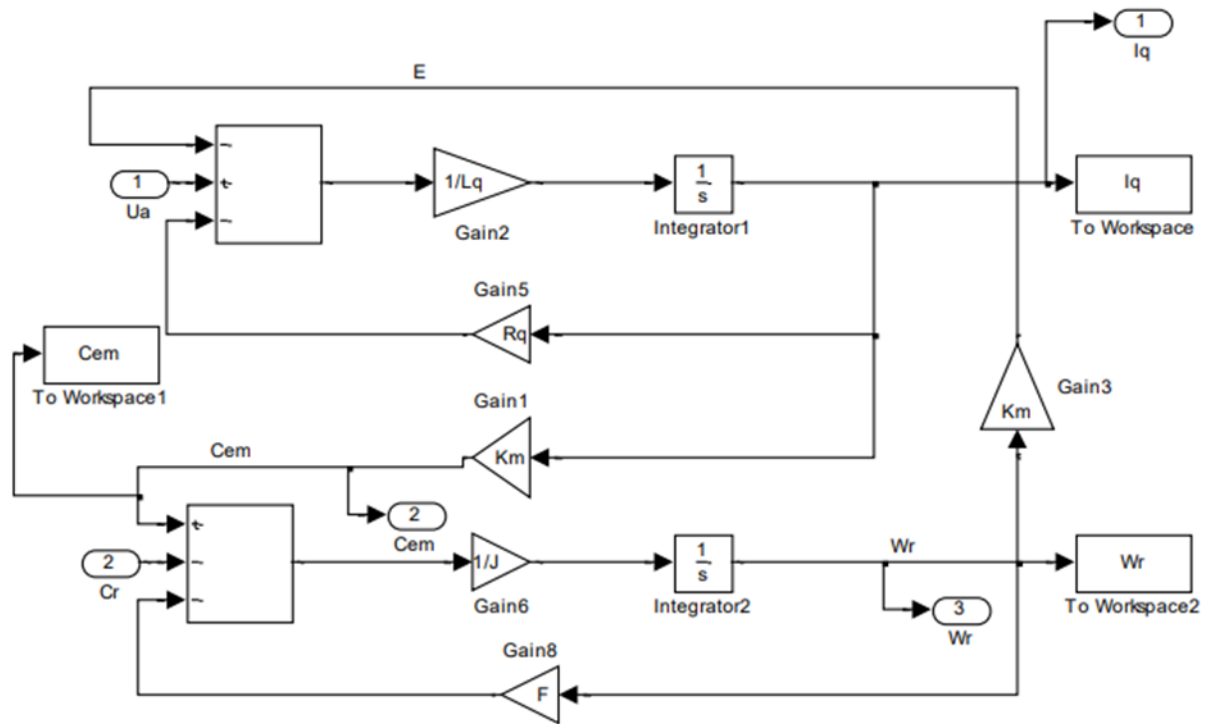
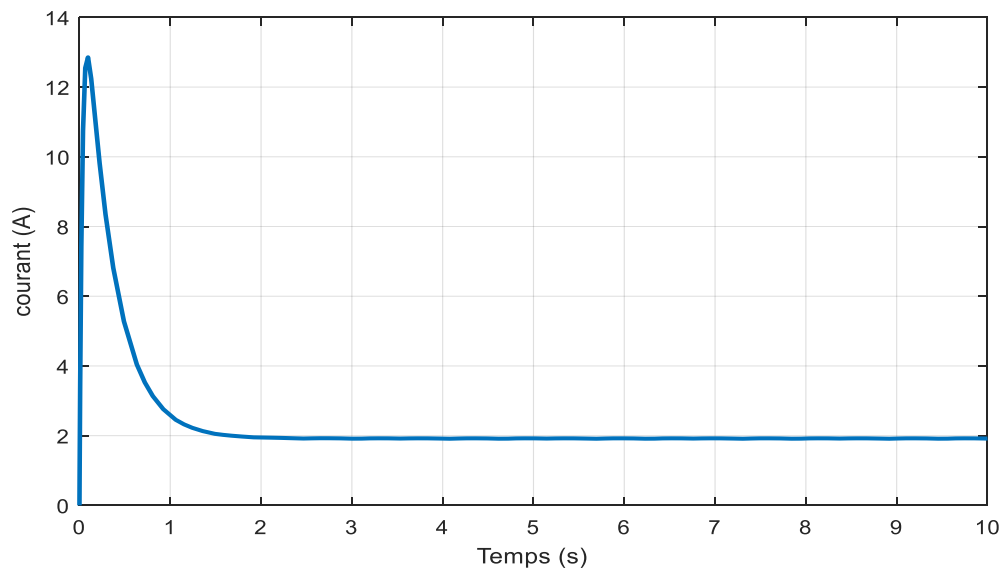


Figure IV.30 : Bloc de simulation de la MCC

IV.12.1.1. Moteur à courant continu sans couple résistant

La (figure IV.29) représente la variation de courant et de la vitesse du MCC.



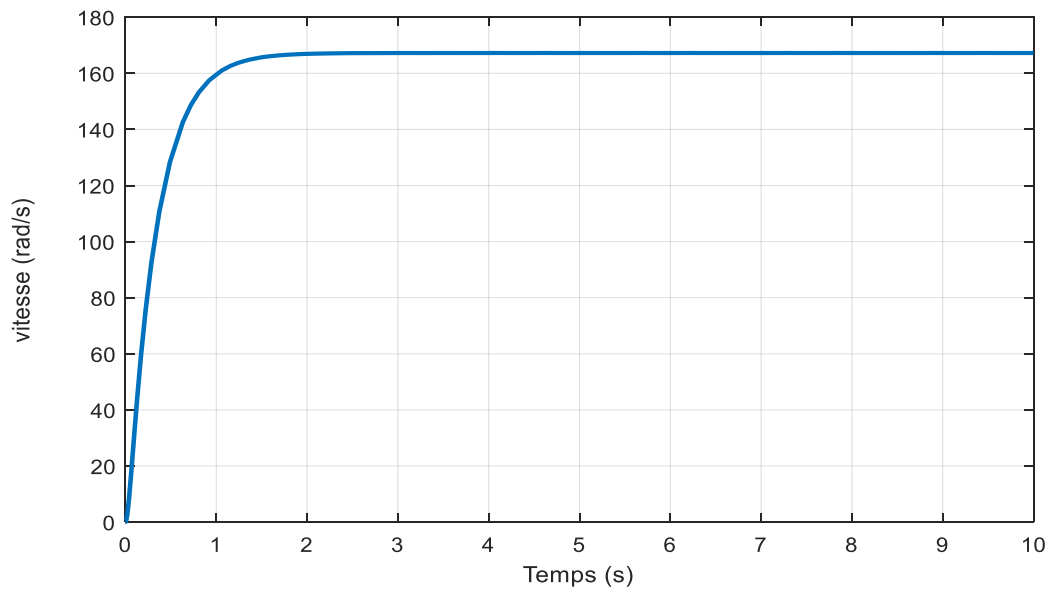


Figure IV.31 : Caractéristique du courant et la vitesse en fonction du temps de la MCC sans couple résistant.

IV.12.1.2. Valeur en régime transitoire

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

- Courant de l'induit :

$$I_a = 12.85 \text{ A.}$$

- Couple électromagnétique :

$$C_{em} = P \cdot M_{fd} \cdot I_a \cdot I_f = K_m \cdot I_a = 0.2606 \cdot 12.85 = 3.3487 \text{ N.m}$$

IV.12.1.3. Valeur en régime permanent

A partir des graphes obtenus on prélève les valeurs suivantes :

- Courant de l'induit :

$$I_a = 2 \text{ A.}$$

- Couple électromagnétique :

$$C_{em} = P \cdot M_{fd} \cdot I_a \cdot I_f = K_m \cdot I_a = 0.2606 * 2 = 0.5204 N.m$$

- Vitesse de rotation :

$$\omega_r = 166.9 \text{ rad/s}$$

❖ **Interprétation des courbes**

Le moteur fait un pic du courant important au démarrage pour amener sa vitesse à une vitesse nominale, par la suite il se stabilise en régime permanent. La machine tourne à une vitesse constante (essai à vide).

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

IV.12.1.4. Résultats de simulation globale du système

Après avoir simulé la machine à courant continu à excitation indépendante et après avoir vu 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 trois modules en parallèle avec un hacheur BOOST.

Les (figures IV.32, IV.33, IV.34) représentent la puissance sortie de générateur ainsi la tension et la puissance de sortie du convertisseur DC-DC

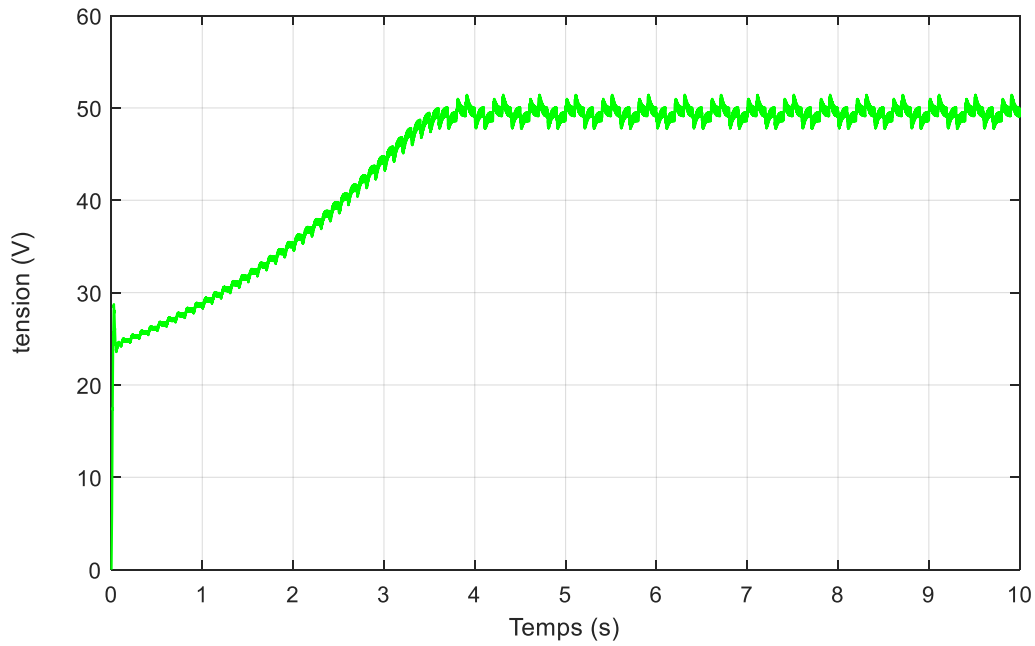


Figure IV.32 : puissance de sortie du générateur photovoltaïque

La puissance de sortie augmentée de $0s < t < 3.5 s$ est (0A à 104.8 W), et d'après 3.5 s la puissance est stable (104 W) dans cette valeur.

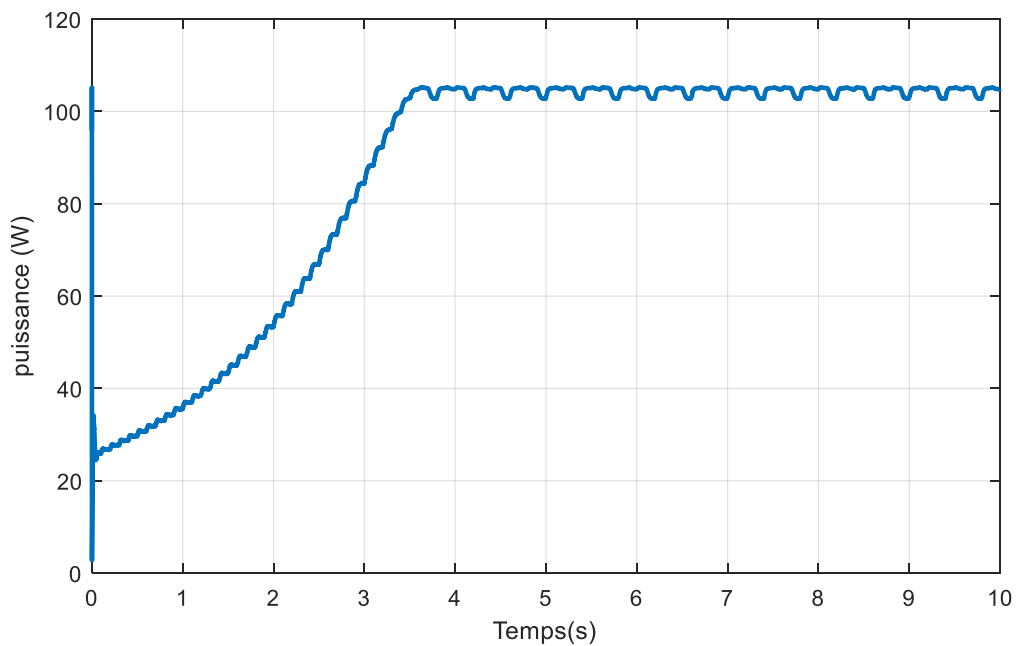


Figure IV.33: tension de sortie du convertisseur DC-DC

La tension de sortie du convertisseur DC/DC augmentée de $0s < t < 4s$ est (0A à 50 V), et d'après 4 s la puissance est stable (50 V) dans cette valeur.

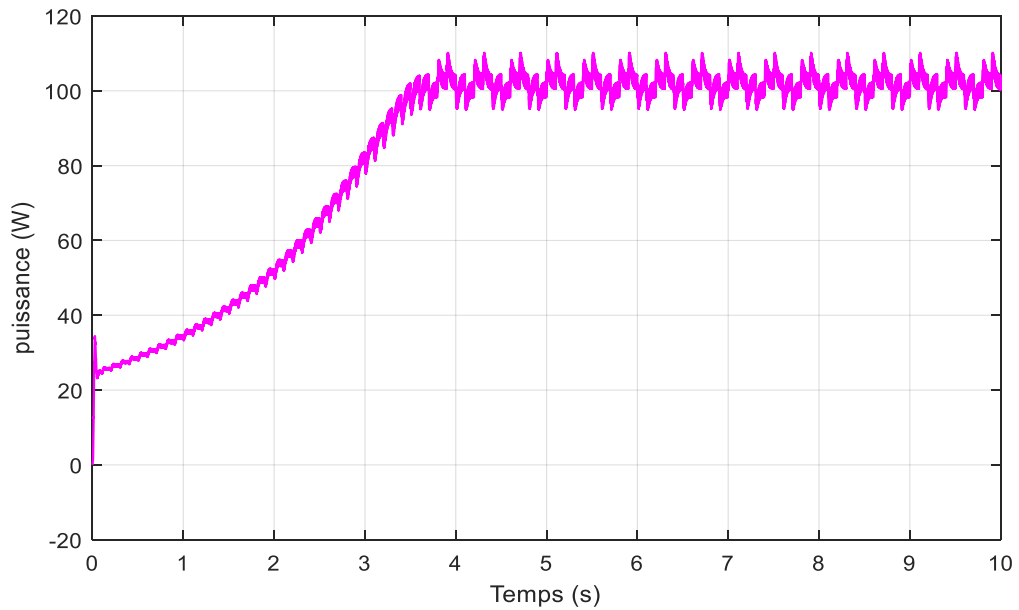


Figure IV.34 : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC

La puissance de sortie du convertisseur DC/DC augmentée de $0s < t < 4s$ est (0A à 104 W), et d'après 4 s la puissance est stable (104 W) dans cette valeur.

IV.12.1.5. Moteur à courant continu avec couple résistant

On applique un couple résistant $C_r=2$ N.m à l'instant $T=6$ s pour bien illustrer son influence sur la vitesse, (Figure IV.35).

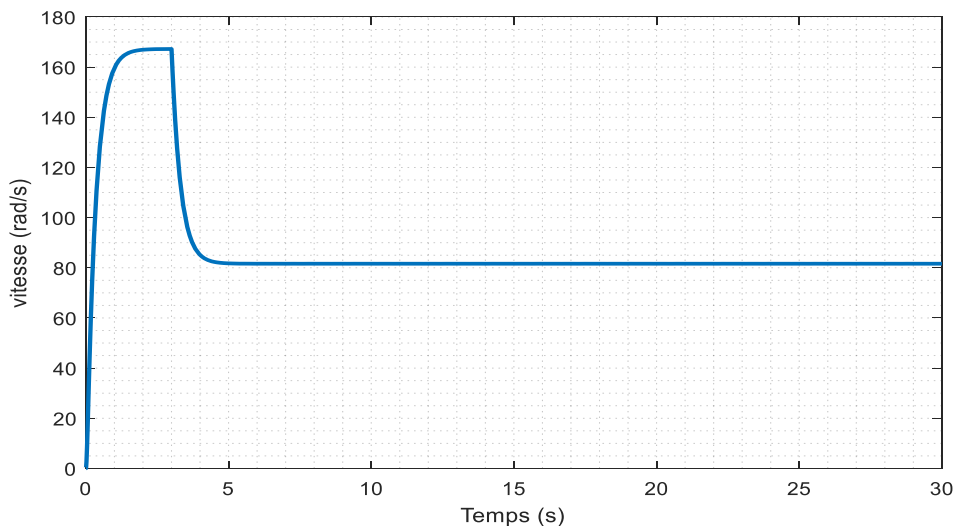


Figure IV.35 : Vitesse de la MCC avec application de couple résistant.

D'après la (figure IV.35) qui représente la vitesse de sortie du moteur on a appliqué un couple résistant $C_r=2 \text{ N.m}$ à l'instant $T=6 \text{ s}$, on voit qu'on applique un couple, la vitesse va chuter, ce que va changer le fonctionnement de la machine (MCC). C'est pour celle 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.12.1.6. Régulation de vitesse MCC

Figure IV.34 représente la consigne et la vitesse de rotation du (MCC)

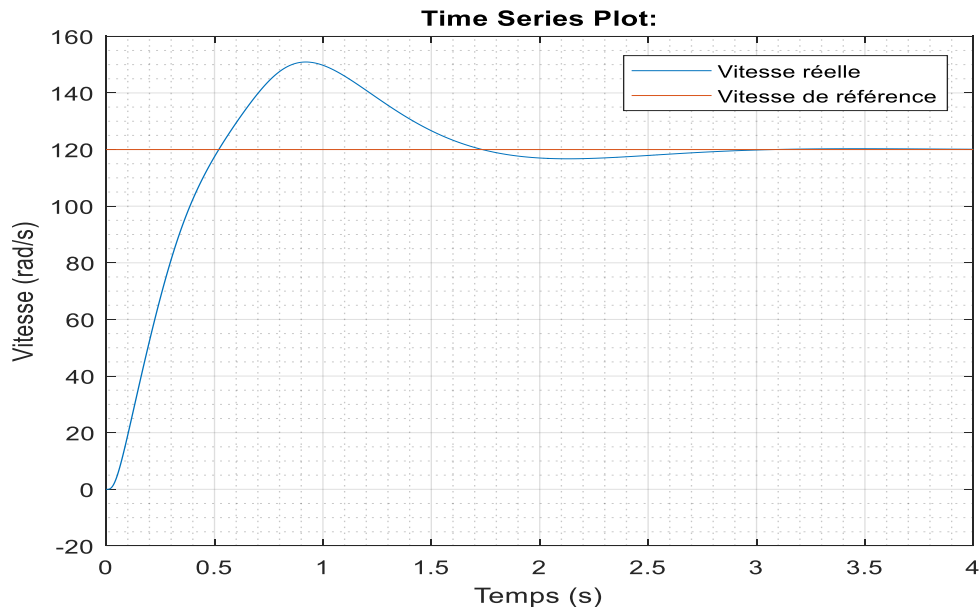


Figure IV.36 : Réponse de la vitesse avec la régulation.

D'après la (figure IV.36) 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.13. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons testé par simulation la méthode de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) afin de visualiser comment elle se comporte sur un système photovoltaïque connecté à une machine tournante (MCC). Les résultats de simulation que nous obtenons montrent que la méthode perturbation et observation P&O fonctionne, ainsi la comparaison des rendements énergétiques de deux topologies (string- centralisée) de convertisseurs et leurs performances sur la chaîne de conversion photovoltaïque.

Conclusion

Générale

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a comme objectif primordial l'amélioration du rendement d'un système d'alimentation photovoltaïque. Cela n'est possible qu'en présence d'un processus continu de puissance maximale, ce dernier s'avérait indispensable pour une meilleure adaptation source/charge, permettant un transfert maximum de puissance au système qui alimente une machine électrique tournante (MCC) par l'intermédiaire d'un étage d'adaptation DC/DC hacheur BOOST commandé par la méthode de recherche du point de puissance maximale MPPT.

Nous avons fait une étude détaillée de la synthèse du modèle électrique du module photovoltaïque, à savoir les cellules PV formant le module, le raccordement (en série, en parallèle et composé) et l'effet d'ombrage.

Pour cela, nous nous sommes attachés surtout à présenter notre étude de travail, de modéliser, de simuler et de diagnostiquer un générateur photovoltaïque associé à un convertisseur statique BOOST commandé par la commande MPPT, destiné à entraîner une machine électrique tournante à travers un hacheur survolteur.

Pour ce faire, nous avons commencé par une étude générale sur la conversion photovoltaïque, suivie par une démonstration mathématique d'un panneau PV basée sur un circuit équivalent à une diode. Le but était de simuler le fonctionnement du générateur et d'étudier l'influence de la température et de l'éclairement sur sa caractéristique courant-tension. A partir des résultats de simulation, nous avons constaté une forte dépendance des performances d'un module photovoltaïque en fonction des conditions climatiques.

Les résultats de la simulation démontrent les bonnes performances en termes de poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque qui alimente une machine électrique tournante (MCC) par le biais d'un étage d'adaptation DC/DC hacheur BOOST commandé par la méthode de recherche du point de puissance maximale MPPT.

Comme perspective à ce travail, il serait intéressant de réaliser l'étage de puissance de l'hacheur et de tester le contrôleur MPPT et d'ajouter un étage d'adaptation DC/AC ainsi que la démonstration des différentes structures d'étages d'adaptation sur la chaîne de conversion photovoltaïque.

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] :S. Astier, P. Chapoulie, D. Harribey. Modélisation et contrôle d'un système autonome à générateur photovoltaïque. Application à l'énergisation d'un véhicule électrique solaire. Journées CPGE ENSEEIHT 20/05/99.
- [4] : Salim ABOUDA « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : Application aux systèmes de pompage », Thèse de Doctorat d'état, L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax Tunisie le 14 avril 2015.
- [5] : CABAL Cédric « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la Conversion photovoltaïque » Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2008
- [6] : BRESSAN Michael « Développement d'un outil de supervision et de contrôle pour une Installation solaire photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, France, 2014.
- [7] : Bensaci Wafa « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une Commande MPPT », projet de fin d'études, Université Kasdi Merbah–Ouargla, Algérie, 2011/2012.
- [8] : Mohamed Lakhdar LOUAZENE « Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla », Thèse de Doctorat en Sciences, Université El Hadj Lakhdar-Batna, Algérie,2015.
- [9]: H.J. Möller. Semiconductors for Solar Cells. Artech House, Inc, Norwood, MA, 1993.

BIBLIORAPIE

- [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.
- [14] : T.Wildi et G.Sybille, «électrotechnique» Canada, Decock, 2000.
- [15] : Rene le Doeuff et Mohammed El-Hadi Zaim, « machines électriques tournantes » Lavoisier, paris,2009.
- [16] : B.Lynda, M.Khalika, L.Samiha, «modélisation et simulation d’une machine à courant Continu » mémoire de master, UMMTO ,2010
- [17] : Gay Seguir, Francis Notelet, « Electrotechnique Industrielle, Technique et documentation (lavoisier)», revu1987.
- [18] : D, Benderradji, « Contribution à la Commande Robuste de la Machine à Induction » Thèse de doctorat, université de Batna 2010.
- [19] : M. BOUZEGANE, F. GAOUAOU,« Alimentation d’un moteur à courant continu par une Source photovoltaïque » Mémoire de Fin d’Etudes De MASTER ACADEMIQUE Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 2018
- [20] : A. TOUAL, AM. BOUKHALKHAL, « Étude comparative de rendement énergétique pour différentes topologies de convertisseurs appliquées aux systèmes photovoltaïques » MEMOIRE DE MASTER Université Amar Thelidji- Laghouat
- [21] F. Kininger, "photovoltaic systems technology", university of Kassel, 2003.
- [22] Mr. Bensalah Belqassim et Mr. Filali Mohammed, étude et réalisation d'un circuit de

BIBLIORAPIE

Commande avec MPPT d'un hacheur pour système photovoltaïque.

[23] B. Ramdane, b. Dabouz, contribution à l'étude et la commande d'un moteur asynchrone alimenté par un système solaire. Application au pompage photovoltaïque. Enp 203

[24] : : Éric Schiller « le pompage photovoltaïque ». Manuel de cours, Université d'Ottawa Canada.

[25] : M. ISSAADI Salim « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones » MEMOIRE MAGISTER Ecole Nationale Polytechnique Département d'Electronique Laboratoire LDCC 2006.

Annexes :

- **Les paramètres du module photovoltaïque**

Eclairement standard : G	1000 W /m ²
Température standard : T	25 °C
Puissance maximal (P _{max})	60 W
Tension maximal (V _{max})	20 V
Courant maximal (I _{max})	3.1 A
Tension de circuit-ouverte (V _{co})	24.9 V
Courant de court-circuit (I _{cc})	3.25 A
Nombre de cellule en séries	36

- **Paramètres de la machine à courant continu utilisée**

Paramètre d'une machine à courant continue à excitation constante	
Tension d'induit nominale	V _{an} =50 V
Résistance de l'induit	R _a =3.335 Ω
Inductance de l'induit	L=0.198 H
Coefficient du couple	K _m =0.2606
Coefficient de frottement	F=0.003 N.m.s/rad
Moment d'inertie	J=0.00796 Kg.m ²
Couple résistant	C _r =0 N.m

- **Paramètres de régulateur PI**

Gain proportionnel	K _p =0.6
Gain intégrale	K _i =0.5

الملخص

في هذا العمل، قمنا بتحليل تصميم ومحاكاة الاشتغال الكهربائي للنظام الكهروضوئي وفق الآلية الرقمية " الاضطراب والملاحظة " لضمان مقارنة المردودية الطاقوية للمحولات المستمر-المستمر الذي يهدف لتشغيل محرك كهربائي مستمر. على الرغم من ان المولد الكهروضوئي يمكن ان يعمل في نطاق واسع من تيار-جهد الخارج، الا انه يمكنه فقط توفير اقصى طاقة لقيم معينة لهما. تعتمد الخاصية تيار-جهد واستطاعة -جهد للمولد على الاشعة الشمسية ودرجة الحرارة حيث تتسبب التغيرات المناخية في تذبذب أقصى نقطة للطاقة. للتصدي لهذا، غالبًا ما قمنا بالتداخل بين المولد والمستقبل، او المزيد من المحولات الساكنة التي يتم التحكم فيها، لهذا نستخدم طريقة الاضطراب والمراقبة. ترتبط هذه الاوامر باسم (الحد الاقصى لتتبع نقطة الطاقة) بمحول مستمر-مستمر الثابت، الذي يتضمن الاقتران بين المولد الكهروضوئي وجهاز التيار المباشر عن طريق اجبار الاول على توفير اقصى طاقته.

الكلمات المفتاحية: مولد الطاقة الكهروضوئية، ومحول التيار المستمر / التيار المستمر، وتتبع أقصى نقطة للطاقة، والاضطراب والمراقبة، ومحرك التيار المباشر المفتاحية.

Résumé

Le travail présenté dans ce manuscrit concerne la simulation et la modélisation d'un panneau photovoltaïque associé à un convertisseur statique DC-DC BOOST commandé par la commande MPPT, destiné à entraîner une machine électrique tournante. Quoiqu'un générateur photovoltaïque puisse fonctionner dans une large gamme de courant et de tension de sortie, il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières de courant et de tension. La caractéristique $I(V)$, $P(v)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température dont les variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. Pour contrecarrer celle-ci, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale, pour cela on utilise la méthode perturbation et observation (P&O). Ces commandes connues sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking), sont associées au convertisseur statique DC-DC, lequel assure le couplage entre le générateur PV et la machine à courant continu (MCC) en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink montrent la performance du contrôle dans le comportement dynamique des systèmes photovoltaïques.

Mots clés : Générateur photovoltaïque, Convertisseur statique DC/DC, MPPT, P&O, Moteur à courant continu.

Abstract

The work presented in this dissertation concerns the simulation and modeling of a photovoltaic panel associated with a static DC-DC BOOST converter controlled by the MPPT command, intended to drive a rotating electrical machine. Although a photovoltaic generator can operate over a wide range of output current and voltage, it can only deliver maximum power for particular values of current and voltage. The characteristic $I(V)$, $P(v)$ of the generator depends on the solar illumination and the temperature where the climatic variations cause the fluctuation of the maximum power point. To counteract this, we often interposed, between the generator and the receiver, one or more controlled static converters, making it possible to pursue the maximum power point; for this, we use the perturbation and observation (P&O) method. These commands known as MPPT (Maximum Power Point Tracking), are associated with the static DC-DC converter, which ensures the coupling between the PV generator and the direct current machine (MCC) by forcing the former to deliver its maximum power.

The simulation results obtained with MATLAB / Simulink show the performance of the control in the dynamic behavior of photovoltaic systems

Keywords: Photovoltaic generator, Static DC / DC converter, MPPT, P&O, Direct current motor