REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : **E**lectrotechnique

Spécialité : **E**nergies **R**enouvelables en **E**lectrotechnique

Implémentation sur FPGA d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un contrôleur basé sur des réseaux de neurones

Présentés par :

BENKHELFA Ahmed Cherif

BOUAICHA Ayoub

Proposés et Dirigés par :

Dr. MORSLI Abedelkader

Dr. AMOKRANE Zouhir

Promotion 2023-2024

ملخص

الهدف من هذا العمل يصف السياق العام للتحسينات في أداء النظام الكهروضوئي (PV) .وانطلاقًا من المبدأ الذي ينص على أنه في ظل ظروف بيئية معينة : يمكن للمولد الكهروضوئي توفير أقصى قدر من الطاقة فقط لقيم معينة من التيار والجهد، تمكنا من تطوير تصميم أمثل، والذي أعقبه تنفيذ الأجهزة على دائرة رقمية قابلة للبرمجة من نوع"FPGA" ، وحدة تحكم تتتبع تلقائيًا وفوري نقطة الطاقة القصوى هذه والتي يطلق عليها عادة "MPPT" بواسطة وحدة تحكم الشبكات العصبية.

كلمات مفتاحية : محول تصعيدي DC-DC، FPGA، الاضطراب والمراقبة، الكهروضوئية، الشبكات العصبية.

RESUME

L'objectif de ce travail décrit le contexte global d'amélioration des performances d'un système photovoltaïque (PV). Et partant du principe selon lequel dans des conditions environnementales données : un générateur photovoltaïque ne peut fournir une puissance maximale que pour des valeurs particulières de courant et de tension, nous avons réussi à développer une conception optimisée, qui a été suivie d'une implémentation matérielle sur un circuit numérique programmable de type « FPGA », d'un contrôleur suivant automatiquement et instantanément ce point de puissance maximale communément appelé « MPPT » par contrôleur de Réseaux de Neurones.

Mots clés **:** Convertisseur DC-DC boost, FPGA, Perturbation et Observation, Photovoltaïque, Réseaux de Neurones.

ABSTRACT

The objective of this work describes the overall context of improvements in the performance of a photovoltaic (PV) system. And starting from the principle stipulating that under given environmental conditions: a photovoltaic generator can only deliver maximum power for particular values of current and voltage, we managed to develop an optimized design, which was followed by a hardware implementation on a programmable digital circuit of the "FPGA" type, of a controller automatically and instantly tracking this maximum power point commonly called "MPPT" by neural Networks controller.

Key words **:** boost DC-DC Converter, FPGA, Perturb and Observe, Photovoltaic, neural Networks.

DÉDICACES

Avec l'aide de dieu, le très puissant, nous avons achevé cemodeste travail que dieu je dédie.

A mon dieu Merci.

Ma chère et adorable pour son amour et ses sacrifices.

A machère mère qui a été toujours chaleureuses et présent avec beaucoup d'amour et tendresse dans les moments les plus importantes dans ma vie.

Mon cher père qui m'a beaucoup soutenu, et qui m'a permisde donner le meilleur de moi.

Merci papa.

Mes sincères remerciements et mes sentiments de gratitudess'en vont à mes chères sœurs.

A toute la famille sans exception.

A tous ceux qui occupent nos pensé.

A tous mes amis.

AHMED CHERIF

AYOUB

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions ALLAH le tout puissant quidonné le courage, la volonté, et la patience pour faire ce travail.

Avant d'exposer les résultats de ce travaille, nous tiendronsà présenter nos vifs remerciements et leurs aides pour la réalisation de ce travail en particulier :

A Mr MORSLI A. et Mr AMOKRANE Z. pour avoir proposé etdirigé ce travail et pour ses conseils judicieux qui ont amélioré la réalisation de ce travail.

A Mr DALI M. pour leurs aides.

Au tous les enseignants qui nous ont tenues lors de notre scolarité.

A tous les personnes d'Université Dr Yahiya Fares deMédéa.

Table des matières

RESUME ..... **I**

DÉDICACES ..... **II**

REMERCIMENTS ..... **III**

Table Des Matières ..... **IV**

LISTES DES FIGURES ..... **VII**

LISTES DES TABLEAUX ..... **X**

LISTES DES ACRONYMES ET DES SYMBOLES ..... **XI**

INTRODUCTION GENERAL **1**

CHAPITRE (I) : *Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque*

I.1 Introduction **3**

I.2 Le gisement solaire **3**

I.3 L'effet photovoltaïque **6**

I.3.1 La cellule photovoltaïque **6**

I.3.2 La jonction PN **7**

I.3.3 Types des cellules **8**

I.4 Association des cellules PV **9**

I.4.1 Association série **9**

I.4.2 Connexion en parallèle **9**

I.4.3 Association mixte (hybride) **10**

I.5 Protection des cellules PV **10**

I.5.1 La diode de blocage « anti-retour » **10**

I.5.2 La diode by-pass **11**

I.6 Les paramètres importants des cellules PV **11**

I.7 Influence de l'éclairement et de la température **12**

I.7.1 L'influence de l'éclairement **12**

I.7.2 Influence de la température **13**

I.8 Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque **14**

I.8.1 Avantages **14**

I.8.2 Inconvénients **14**

I.9 Conclusion **14**

CHAPITRE (II) : *Etat de l'art et modélisation de la chaine de conversion photovoltaïque*

II.1 Introduction **16**

II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque 16
II.2.1 Modèle électrique 17
II.2.2 Modèle mathématique 17
II.3 Modélisation de convertisseur DC/DC (les hacheurs) 18
II.3.1 Etude théorique 18
II.3.2 Hacheur dévolteur «Buck » 18
II.3.3 Hacheur survolteur «Boost » 19
II.4 Modélisation d'une batterie 20
II.4.1 Modèle électrique 20
II.5 Conclusion 22

CHAPITRE (III) :*Techniques de commande du contrôleur MPPT photovoltaïque et Résultats de simulation*

III.1 INTRODUCTION 23
III.2 Fonctionnement d'un générateur photovoltaïque (GPV) à sa Puissance Maximale ... 24
III.2.1 Connexion directe GPV-Charge 24
III.2.2 Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation 24
III. 3 Commandes MPPT 25
III.3.1 Principe de la commande PPM 26
III.3.2 Variation et trajectoire du PPM 26
III.3.3 Les Algorithmes de Point de Puissance Maximales (PPM) 27
III.4 La Commande de Perturbation et Observation « P&O » 28
III.5 Les Commande « Réseaux de Neurones Artificiels » 29
III.5.1 Historique 29
III.5.2 Le neurone biologie 30
III.5.3 Le neurone artificiel 31
III.5.4 Les composants d'un réseau de neurone 31
III.5.5 Les différentes structures des réseaux de neurones 32
III.5.5.1 Réseau de neurones multicouches 32
III.5.5.2 Réseau à connexions locales 32
III.5.5.3 Réseau à connexions récurrentes 33
III.5.5.4 Réseau à connexions complètes 33
III.5.6 Les fonctions d'activations 34
III.5.7 Les techniques d'apprentissage 34
III.5.7.1 Apprentissage supervisé 34
III.5.7.2 Apprentissage non supervisé 34
III.6 Résultats de simulation et interprétations 35
III.6.1 Architecture du contrôleur de Réseau de Neurone Artificiel 35

III.7 Conclusion 48

CHAPITRE (IV) :*Développement du Système par le circuit FPGA*

IV.1 Introduction 49

IV .2 Les circuits FPGA 49

IV.3 L'architecture des circuits FPGA 50

IV.3.1 les blocs logiques CLBs 51

IV.3.2 Les blocs d'entrée/sortie 51

IV.3.3 le réseau d'interconnexions dans un circuit FPGA 52

V.4 Méthode de programmation 53

IV.5 Simulation temporelle 54

IV.5.1Outils de conception par le XSG 54

VI.5.2La communication entre les blocs SIMULINK et les blocs XSG 55

IV.6 La simulation de commande MPPT sous système génération 55

IV.7 Avantages et inconvénients des FPGA 57

IV.7.1 Avantages 57

IV.7.2 Inconvénients 57

IV.8 Réalisation et implémentation de PandO dans un circuit FPGA 57

IV .8.1 Logiciels et outils utilises 57

IV .9 implémentation de l'algorithmeP&O 58

IV.9.1 Schéma block 58

IV.10 Conclusion 58

CHAPITRE (V) :*Réalisation pratique*

V.1 Introduction 59

V.2 Implémentation du système 59

V.3 conclusion ..... .62

…...CONCLUSION GENERALE……..63

Annex……..64

Reference bibliographies……73

Liste Des Figures

Figure I.1 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire reçue sur une surface horizontale, période 1992/2002……4

Figure I.2 : Irradiation directe journalière reçue sur le plan normal au mois de juillet en 1999…4

Figure I.3 : Irradiation directe journalière reçue sur le plan normal au mois de décembre en 1999…….…….…….5

Figure I.4 : L'effet photovoltaïque. ……..……....6

Figure I.5 : Jonction P-N. ……....7

Figure I.6 : Description de principe de fonctionnement de la jonction P-N……7

Figure I.7 : Les trois types des cellules photovoltaïques. ……8

Figure I.8 : Association série des cellules PV. ……9

Figure I.9 : Association parallèle des cellules PV……9

Figure I.10 : Association mixte des cellules PV……..10

Figure I.11 : Protection de cellule solaire dans un module PV par la diode anti-retour…….10

Figure I.12 : Protection de cellule solaire dans un module PV par la diode by-pass……..11

Figure I. 13 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V…….12

Figure I. 14 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V……13

Figure I. 15 : L'influence de la température sur la caractéristique I-V……...13

Figure I. 16 : L'influence de la température sur la caractéristique P-V……..13

Figure II.1 : composants d'un GPV……..……17

Figure II.2 : Schéma électrique équivalent d'un groupe de panneaux, modèle à 1 diode……...17

Figure II. 3 : Schéma électrique d'un hacheur Buck……19

Figure II. 4 : Schéma électrique d'un hacheur Boost……...20

Figure II. 5 : Modèle d'un circuit équivalent de batterie plomb-acide…….……20

Figure III.1 : Connexion directe GPV-Charge……24

Figure III.2 : Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour……24

Figure III.3 : Connexion indirecte GPV-charge……..25

Figure III.4 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC)……...25

Figure III.5 : Chaine de conversion photovoltaïque…….…26

Figure III.6 : Principe de la commande PPM……26

Figure III.7 : Cas de perturbations……..…….27

Figure III.8: Les 4 cas possibles lors du suivi du PPM…….…..28

Figure III.9 : L'algorithme de la commande PPM de type P&O……30

Figure III.10 Le modèle d'un neurone biologique…….31

Figure III.11 : Neurone Artificiel……32

Figure III.12 : Réseau de neurones multicouche……..……..33

Figure III.13 : Réseau à connexions locales……...……...……...33

Figure III.14 : Réseau à connexions récurrentes. ……...……...……...……..33

Figure. III.15 : Réseau à connexions complètes……..34

Figure III.16 : Quelque fonction d'activations……36

Figure III.17 : Architecture de contrôleur de ANN proposé, a) modèle Simulink et b) Principes des couches neuronales……37

Figure III.18 : Performances de formation des réseaux neuronaux……38

Figure III.19 : Etat de formation des réseaux neuronaux……39

Figure III.20 : Comparaison des performances des modèles……...40

Figure III1.21: Puissance en fonction du temps avec ANN et P&O……40

Figure III.22 : Courant en fonction du temps avec ANN et P&O……41

Figure III.23 : Tension en fonction du temps avec ANN et P&O……42

Figure III.24 : Puissance en fonction de la tension avec ANN et P&O……42

Figure III.25 : Courant en fonction de la tension avec ANN et P&O……..43

Figure III.26 : Rapport cyclique en fonction du temps……44

Figure III.27 : Tensions d'entrée et de sortie de l'hacheur avec MPPT-P&O en fonction du temps……..44

Figure III.28 : Tensions d'entrée et de sortie de l'hacheur avec MPPT-ANN en fonction du temps……..45

Figure III.29: Puissance en fonction de la tension (T=25 ºC et G variable)……46

Figure III.30 : Courant en fonction de la tension (T=25 ºC et G variable)……...47

Figure III.31: Puissance en fonction de la tension (G=1000 W/m^2 et T variable)……...47

Figure IV.1 : Architecture des circuits FPGA……..50

Figure IV.2 : Schéma d'un bloc d'entrée/sortie (IOB……..52

Figure IV.3 : interconnexion interne d'un FPGA…….53

Figure IV.4 : Architecture du contrôleur MPPT (P&O) adopté dans l'environnement XSG……...56

Figure IV.5 : Générateur de PWM utilisant Xilinx Blockset……56

Figure IV.6 : Synoptique de l'application MPPT P&O…….……58

Figure V.1 : Hacheur boost…….....59

Figure V.2: Implémentation expérimentale du convertisseur boost……..60

Figure V.3: MLI avec α = 0,16……..61

Figure V.4 : MLI avec α = 0,5……...61

Figure V.5 : MLI avec α = 0,75…….62

Liste Des tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques…….5

Chapitre V :

Tableau V.1: Liste des composants……..59

Liste des acronymes et des symboles

DC/DC Conversion continu/continu

GPV Générateurs photovoltaïques

IncCond Incrémentation de conductance

PPM Point de puissance maximale

DC Direct current

MPPT Maximum Power Point Tracking

P&O Perturbation et observation

NNA Réseau de neurone

PV Photovoltaïque

FF Le facteur de forme

I-V Courant-tension

P-V Puissance-tension

PS Panneaux solaire

CST Condition standard

Iph : Le courant généré par la cellule solaire [A].

I_C: Le courant de sortie de la cellule PV [A].

V_C : La tension de sortie de la cellule PV [V].

I_D: Le courant de diode [A].

G : les rayonnements solaire

Tc : la température [C°]

Rs : Résistance Série [Ω].

Rp : Résistance parallèle [Ω].

Id1 : Le courant de diode 1

[A].Id2 : Le courant de diode

2 [A].

I_{Rp} : Le courant de résistance parallèle [A].

Pmax : Puissance maximale aux bornes de la cellule PV [W].

Vco : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV

[V].Icc : L'intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV

[A]. Vcc : La tension de court-circuit [V].

Pinc : La puissance incidente

[W].En : L'ensoleillement

[W/m^2].

S : La surface du module PV

[m^2].η : Le rendement

énergétique [%].

V_{Pmax} : La tension au point de puissance maximale

[V]. I_{Pmax} : Le courant au point de puissance

maximale [A]. D : Le rapport cyclique

I_S: Courant de saturation de la cellule

[A].T_{ck} : Température de la cellule [K°].

S : Pourcentage d'insolation [%].

C_{bp} : Dérivée de l'expression générale de l'énergie dans un

condensateur.C: La capacité du condensateur [F].

V_c: La tension contrairement à un condensateur

[V].E : L'erreur

ΔE : Le changement d'erreur

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'industrie moderne a des besoins de plus en plus importants en énergie. Les sources classiques d'énergie, qui sont les sources fossiles tel que le charbon et les hydrocarbures, laissent progressivement la place aux énergies renouvelables. L'augmentation fulgurante du prix du pétrole ces dernières années a en effet contraint les pays développés à investir dans ce type d'énergies telles que l'énergie solaire, éolienne, marémotrice ou géothermique. Ces énergies, en plus d'être inépuisables, représentent un secteur porteur permettant un développement durable tout en préservant l'environnement.

L'énergie solaire représente certainement la source d'énergie renouvelable la plus élégante. En plus d'être silencieuse, elle s'intègre parfaitement aux constructions (façades, toitures …), et du fait qu'elle n'intègre pas de pièces mécaniques mobiles, elle ne nécessite pas un entretien particulier et reste fiable longtemps, c'est la raison pour laquelle elle est devenue une référence dans les applications spatiales et dans les sites isolés. Elle est en train de s'imposer comme une valeur sure dans les applications à petite et moyenne consommation d'énergie, surtout depuis que les panneaux solaires sont devenus moins chers pour des rendements meilleurs.

Les panneaux solaires, bien qu'ils soient de plus en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles (autour de 20%), c'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissance qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie.

Une caractéristique importante de ces panneaux est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé « Maximum Power Point » (MPP), défini par une tension et un courant donnés, et ce point se déplace en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, température, etc.) ainsi que des variations de la charge. Extraire le maximum de puissance nécessite donc un mécanisme de poursuite de ce point qu'on appelle MPP Tracker (MPPT).

Il existe plusieurs méthodes MPPT, allant de la plus simple qui utilise une adaptation manuelle aux plus complexes qui font appel à des algorithmes compliqués. On va s'intéresser à deux d'entre elles : La première est la méthode Perturbation et Observation

(P&O), bien connue par les spécialistes de ce domaine, alors que la seconde utilise la réseaux de neurone (ANN).

D'autre part, les circuits FPGA (Field Programmable Gate Array), qui sont des circuits programmables standard, et qui peuvent être adaptés à des besoins divers, deviennent incontournables dans les applications nécessitant un temps de développement rapide et une modularité garantie. Ils sont surtout utilisés dans les systèmes embarqués (avionique, automobile, espace, …) et tendent à se généraliser dans le domaine des applications on chip.

L'objet de ce projet de fin d'études consiste en l'implémentation des deux méthodes MPPT suscités sur circuit FPGA. Ce travail nécessite plusieurs étapes, il commence par la programmation en langage VHDL, la synthèse, le test et la simulation temporelle, et enfin le chargement du programme sur la carte FPGA[1].

Ce mémoire a été divisé en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre est une introduction à l'énergie photovoltaïque, on y explique brièvement les différents composants d'un système photovoltaïque avec batterie : le champ de modules photovoltaïques, le convertisseur continu-continu et les batteries ;

Le second chapitre, on a fait la modélisation de les composant utilisant dans la chaine et la simulation ont été effectués dans l'environnement MATLAB/SIMULINK;

Dans le troisième chapitre, , on présentera l'aspect théorique de ces méthodes pour le suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque

Dans quatrième chapitre étudies et l'implémentation de la méthode MPPT sur un circuit FPGA. Il commence par la conception du contrôleur, suivi de tests de comportement sous Matlab / Simulink, et se conclut par la description du programme en langage VHDL pour son chargement sur le FPGA ;[1]

Le dernier chapitre on fait un réalisation pratique au niveau d'université Yahia Fares

CHAPITRE (I)

Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux en électricité.

Il utilise pour ces modules photovoltaïques qui comprennent des cellules solaires ou des cellules solaires qui font cette conversion d'énergie. L'utilisation des modules photovoltaïques comme source d'énergie électrique.

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu. Leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu /avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Ce chapitre est consacré à la présentation des cellules photovoltaïques et de leurs propriétés électriques. Nous y présentons également une modélisation d'une cellule photovoltaïque.

I.2 Le gisement solaire

Par sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. Le Sahara représente environ 87% de la surface globale de l'Algérie, ce qui représente la majeure partie du territoire Algérien, situé entre les latitudes 20° N et 34° N. Ainsi, la durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien, de l'ordre de 3500h/an, est la plus importante au monde [2], elle est toujours supérieure à 8 h/j et peut arriver jusqu'à 12 h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [3].

L'Algérie est un pays potentiellement intéressant pour l'exploitation de l'énergie solaire, suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque [4].

La figure (I-1) montre la moyenne annuelle de l'irradiation solaire reçue sur une surface horizontale, période 1992-2002. Les figures (I-2) et (I-3) représentent respectivement l'irradiation directe journalière reçue sur le plan normal au mois de juillet et décembre en 1999.

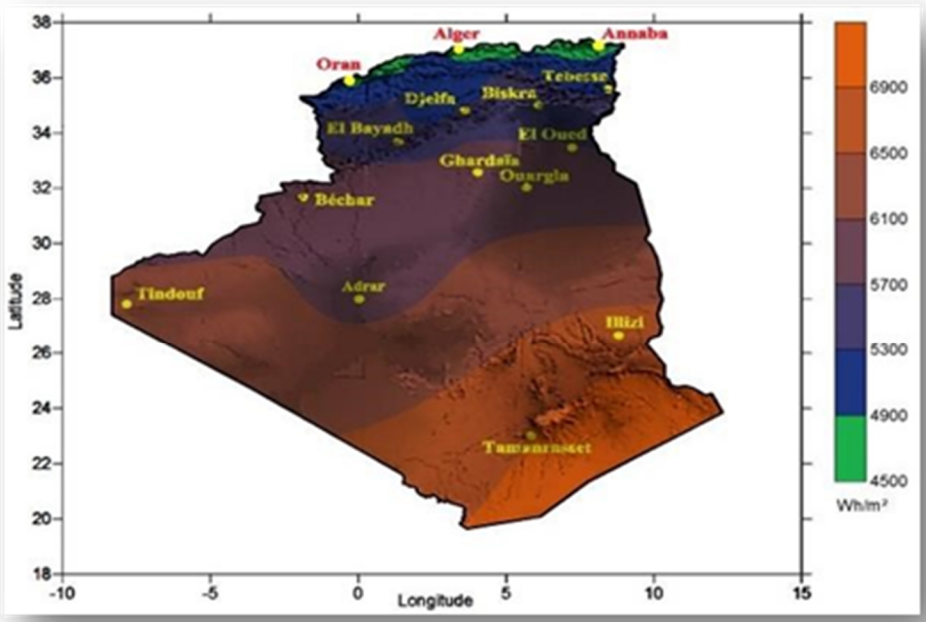


Figure I.1 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire reçue sur une surface horizontale, période 1992/2002.

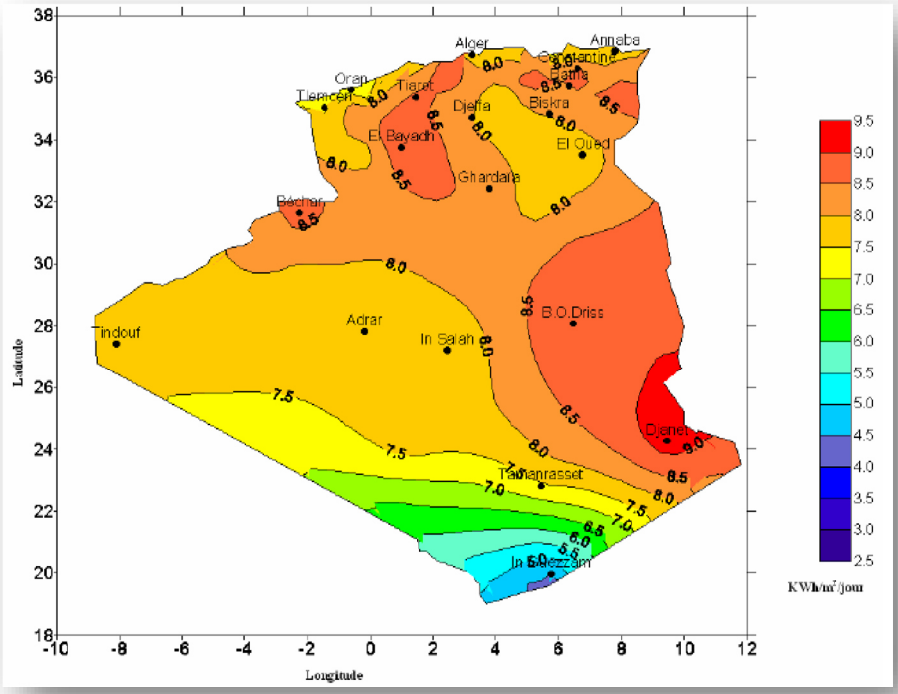


Figure I.2 : Irradiation directe journalière reçue sur le plan normal au mois de juillet en 1999.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau (I-1) selon l'ensoleillement reçu annuellement [5] :

Tableau I.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.

Région	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moy. D'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m²/an)	1700	1900	26500

A partir de ces illustrations, on trouve que la zone autour de la ville de Djanet, willaya d'Illizi, représente la valeur moyenne maximale annuelle d'irradiation solaire reçue sur une surface horizontale dans les quatre années (1992-2002) qui attient 6.9 kWh/m2, ainsi que la valeur maximale d'irradiation directe journalière reçue sur le plan normal en 1999 avec 9.0 kWh/m2/jour au mois du juillet, tandis que au mois de décembre la zone de Tamanrasset garde la valeur maximale avec 8.0 kWh/m2/jour dans la même année.

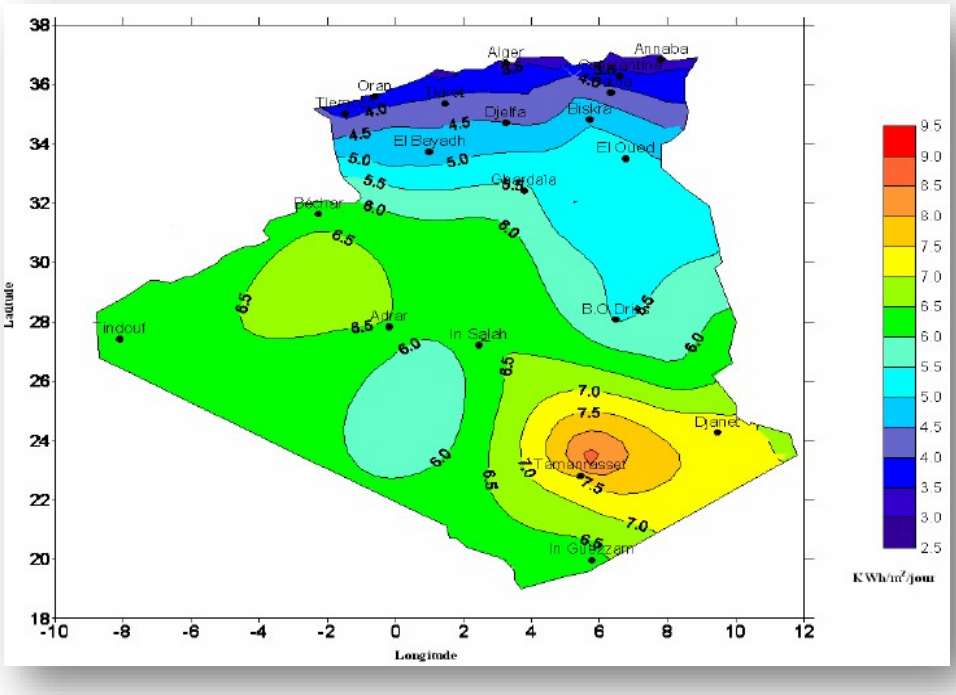


Figure I.3 : Irradiation directe journalière reçue sur le plan normal au mois de décembre en 1999.

Ces figures indiquent donc que l'Algérie se caractérise par un gisement solaire très considérable ce qui la classe permis les pays qui disposent du plus grand gisement solaire au monde.

I.3 L'effet photovoltaïque

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

- « **Phots** », qui signifient lumière.
- « **Volta** », du nom du physicien Alessandro Volta (inventeur de la pile électrique).

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire (les photons) en énergie électrique (les électrons) au moyen de cellules photovoltaïque (photopile) [6].

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi- conducteur avant qu'il soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique) [7].

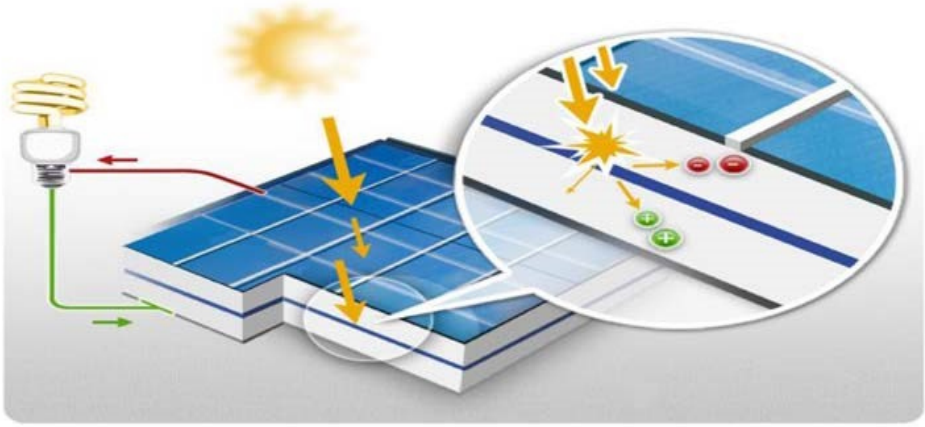


Figure I.4 : L'effet photovoltaïque.

I.3.1 La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur, absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique.

Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs [8].

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [6].

I.3.2 La jonction PN

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopé P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition [7].

À l'interface entre les deux régions dopées, il y a migration d'une partie des électrons excédentaires de la zone N vers la zone P. La recombinaison locale des charges entraîne la formation d'une différence de potentiel au niveau de l'interface qui bloque la suite du phénomène de migration des électrons [2].

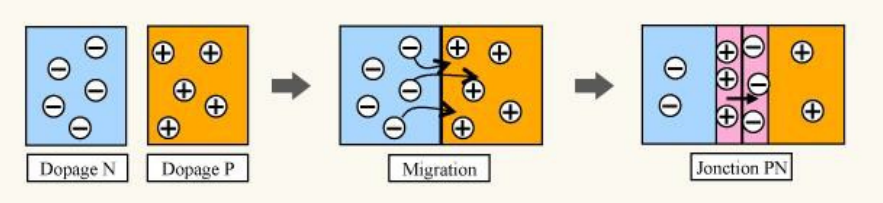


Figure I.5 : Jonction P-N.

L'absorption d'un photon dans le matériau semi-conducteur entraîne la formation d'une paire électron-trou.

L'électron et le trou sont séparés sous l'effet de la différence de potentiel dans la jonction.

Si on ferme le circuit par une charge, un courant électrique circule.

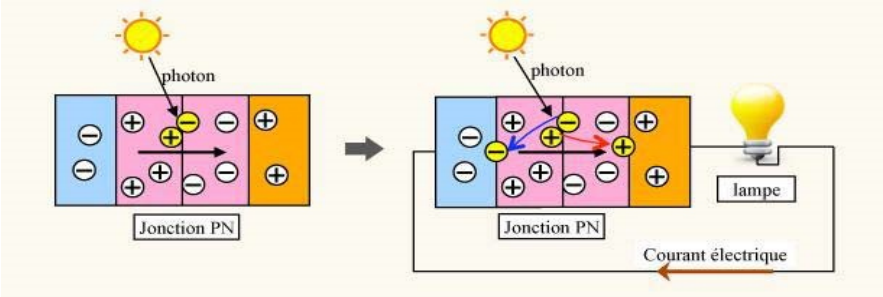


Figure I.6 : Description de principe de fonctionnement de la jonction P-N.

I.3.3 Types des cellules

Il existe trois grands types de silicium : mono cristallin, poly cristallin et amorphe.

a) Cellule au silicium monocristallin

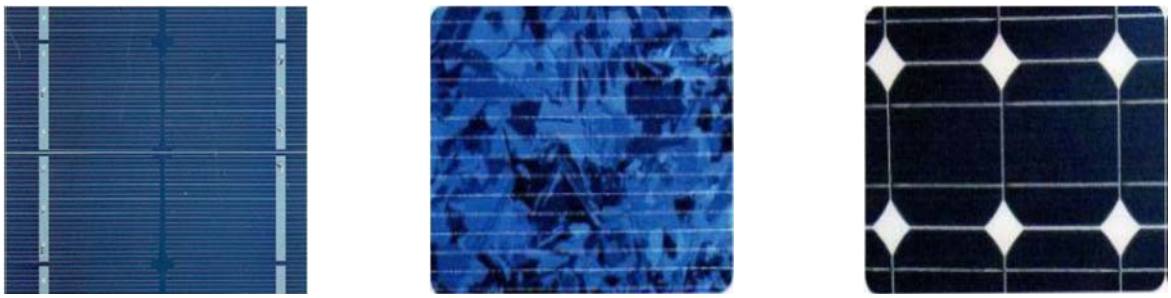
- La première génération de photopiles.
- Un taux de rendement excellent (15-20%) (en 2020).
- Le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique, donc une méthode de fabrication laborieuse et difficile et Il faut une grande quantité d'énergie.
- Coût de production moins élevé.

b) Cellule au silicium polycristallin

- Rendement 13-16% (en 2020).
- Le silicium polycristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage, donc procédé nécessitant moins d 'énergie.
- Coût de production moins élevé.

c) Cellule au silicium amorphe

- Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo).
- Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin.
- les cellules sont constituées par des couches très minces.
- Durée de vie plus faible (entre 15-20 ans).
- Coût de production bien plus bas.



(a) (b) (c)

Figure I.7 : Les trois types des cellules photovoltaïques.

De plus, les cellules mono et polycristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production).

I.4 Association des cellules PV

La puissance produite par la cellule photovoltaïque élémentaire est très faible par rapport aux besoins des applications domestiques ou industrielles [9]. Pour satisfaire les besoins des charges couramment utilisées, il faut envisager un assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques soit en série soit en parallèle [11]. Cet assemblage forme ce qu'on appelle « Module photovoltaïque » [10].

I.4.1 Association série

Pour un groupement en série de Ns cellules, la tension résultante est la somme des tensions de toutes cellules, tandis que le courant de sortie maintient sa valeur :

$$UNs=Ui1+Ui2+\cdots\ UiNs=Ns*Ui \text{ et } INs=Ii \quad \text{.....(I.1)}$$

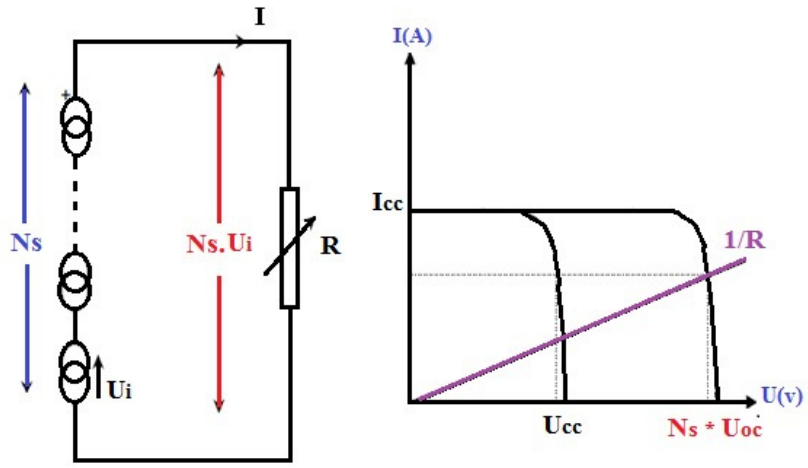


Figure I.8 : Association série des cellules PV.

I.4.2 Connexion en parallèle

Pour un groupement en parallèle de Np cellules, on obtient à la sortie un courant égal à la somme de tous les courants des branches, avec une tension égale à celle d'une seule cellule :

$$INp = Ii1 + Ii2 + \cdots + IiNp = NP * Ii \text{ et } UNp=Ui \quad \text{.....(I.2)}$$

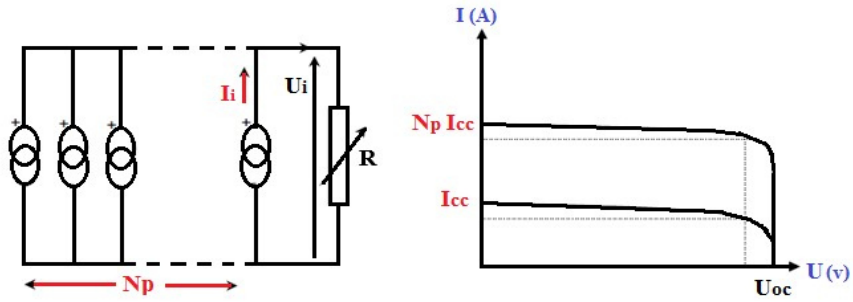


Figure I.9 : Association parallèle des cellules PV.

I.4.3 Association mixte (hybride)

Dans une association en série/parallèle, le courant s'ajoute proportionnellement au nombre des cellules en série et la tension s'ajoute proportionnellement au nombre des cellules en parallèle [12].

$$UNp=Ui \qquad \text{et} \qquad INs = Ii$$

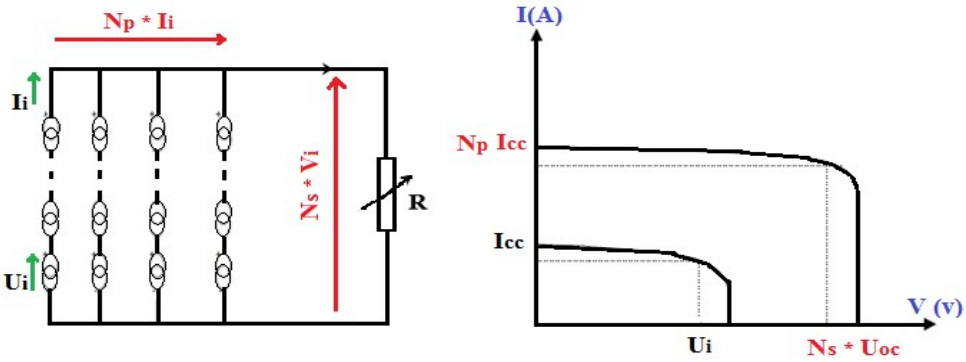


Figure I.10 : Association mixte des cellules PV.

I.5 Protection des cellules PV

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 les pannes le plus dangereuses. Généralement, deux types de diodes de protections sont placés dans les installations PV [13].

I.5.1 La diode de blocage « anti-retour »

Les diodes de blocage sont utilisées dans des panneaux photovoltaïques quand il y a deux ou plusieurs branches parallèles où chaque branche contient ensemble des cellules connectées en série [14]. Leur rôle est d'assurer un seul sens de circulation de courant électrique qui va de la source PV vers la charge connectée en série avec le PV. Ils sont aussi appelés les diodes séries, les diodes d'isolements ou encore les diodes anti-retours.

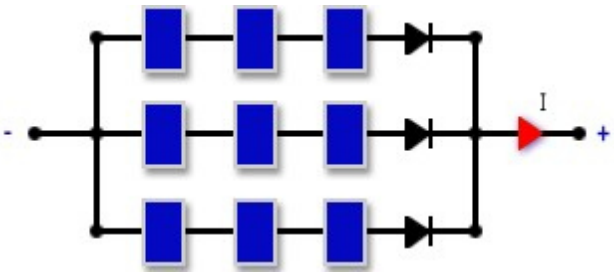


Figure I.11 : Protection de cellule solaire dans un module PV par la diode anti-retour [13].

I.5.2 La diode by-pass

Les diodes de by-pass permettant d'éviter les problèmes liés à l'ombrage [15]. Quand il y a des cellules solaires qui produisent moins d'énergie, le courant qui doit traverser ces cellules est détourné par la diode by-pass [16]. Ainsi, le panneau est protégé quand il y a de l'ombre sur une partie [17].

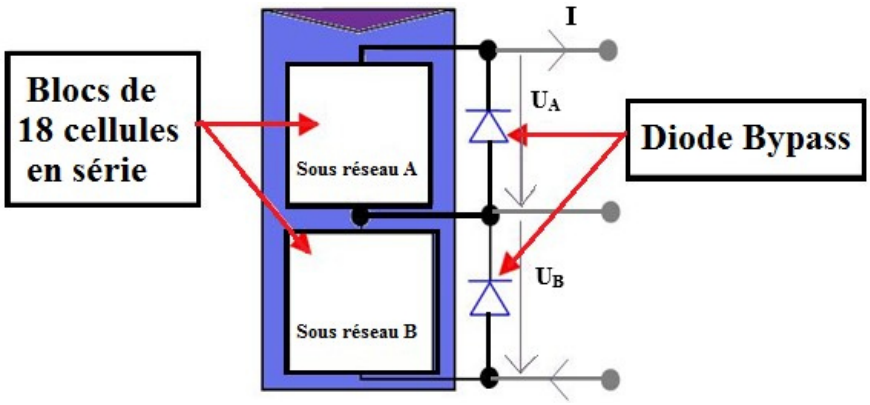


Figure I.12 : Protection de cellule solaire dans un module PV par la diode by-pass [13].

I.6 Les paramètres importants des cellules PV

✓ **Courant de court-circuit I_{cc}**

L'intensité est maximale lorsque les deux extrémités du circuit sont connectées différemment et que la différence de potentiel est nulle. Le courant dans ce cas est appelé courant de "court-circuit ". Le courant de court-circuit Est causé par la collection de porteurs de charge produits par la lumière.

✓ **La tension en circuit ouvert V_{co}**

Lorsque la cellule n'est connectée à aucune charge, aucun courant ne circule et la tension à travers la cellule PV atteint son maximum. C'est ce qu'on appelle la "tension en circuit ouvert". Quand la charge est connectée à la cellule PV le courant circule dans le circuit et la tension diminue.

✓ **La puissance maximale P_m**

Nous obtenons l'alimentation CC de la cellule solaire. La puissance de la cellule solaire augmente avec la tension, atteins son maximum (P_m) et diminue à nouveau.

$$P_m = V_{mpp} \times I_{mpp} \quad \text{.....(I.3)}$$

✓ **Le facteur de Forme FF**

C'est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule sur le produit du courant de court-circuit et de la tension à vide

(I_{cc} * V_{co}). Il est essential de vérifier la qualité de la cellule. Pour un bon panneau FF est compris entre 0,7 et 0,8 alors que pour un mauvais panneau, il peut être de 0,4.

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} * I_{cc}} \quad \text{.....(I.4)}$$

✓ **Le rendement ɳ**

L'efficacité Est définie comme le rapport entre la production d'énergie de la cellule solaire et l'énergie d'entrée du soleil.

$$\eta = \frac{puissance\ maximale\ des\ cellules}{intensité\ de\ la\ lumière\ incidente} = \frac{V_{co}.I_{cc}.FF}{P_{in}} \quad \text{.....(I.5)}$$

L'efficacité est le paramètre le plus couramment utilisé pour comparer les performances d'une cellule solaire à une autre. L'efficacité dépend du spectre solaire, de l'intensité de la lumière solaire et de la température de la cellule solaire.

I.7 Influence de l'éclairement et de la température

I.7.1 L'influence de l'éclairement

L'éclairement est le paramètre le plus influant sur le module photovoltaïques (Figure I.13 et I.14) a une température constante, le courant subit une variation importante, par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [18], [19].

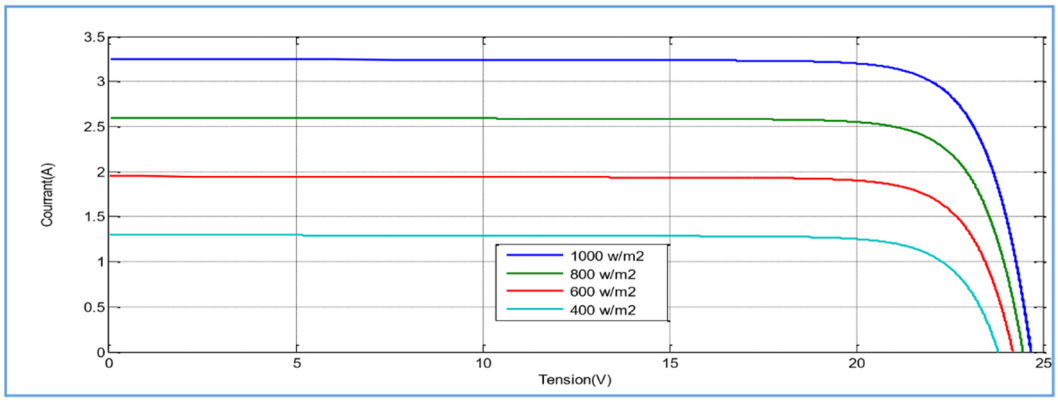


Figure I. 13 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V.

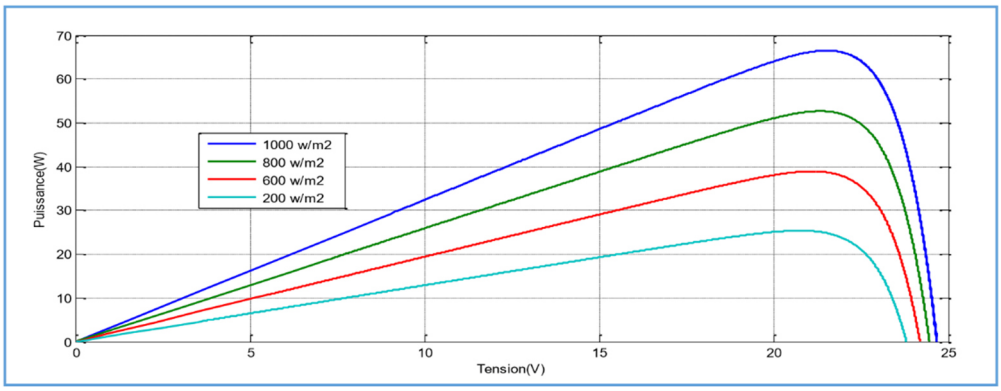


Figure I. 14 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V.

I.7.2 Influence de la température

La température est le second paramètre le plus important dans le comportement du module photovoltaïque.

Les figures (I.15 et I.16) illustrent respectivement les caractéristiques I-V et P-V du module PV simulée sous un éclairement de 1000 W/m^2 et différentes températures. Nous remarquons que le courant du court-circuit reste très peu sensible à la variation de la température mais la tension du circuit ouvert diminue en augmentant la température ce qui cause une diminution de la puissance à la sortie du module [20].

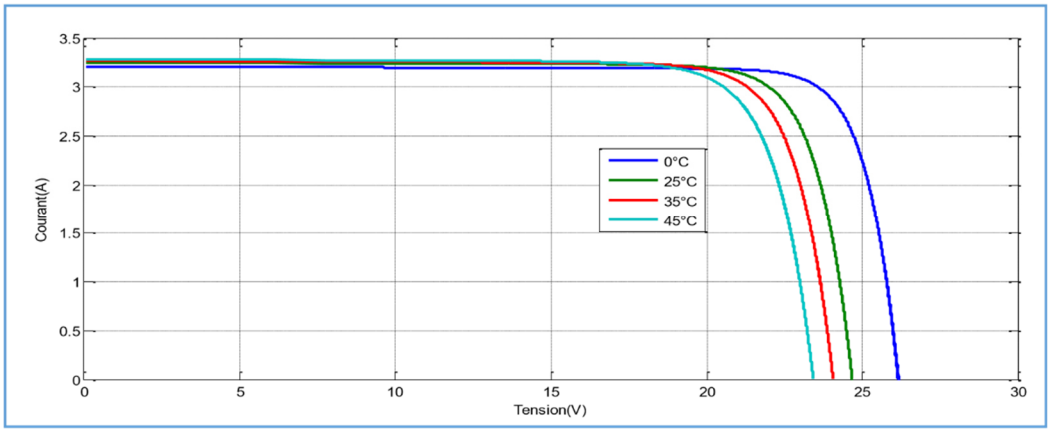


Figure I. 15 : L'influence de la température sur la caractéristique I-V.

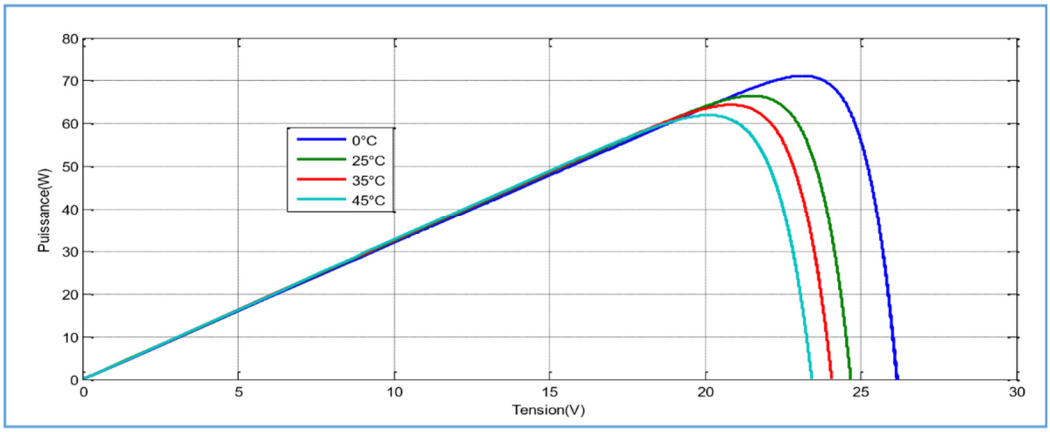


Figure I. 16 : L'influence de la température sur la caractéristique P-V.

I.8 Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.8.1 Avantages

Une haute fiabilité ; les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs.

- Elle ne comporte pas de pièces mobiles, qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit final est non polluant, silencieux, peu de déchet [21].

I.8.2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ; L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [22].

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'avenir des énergies renouvelables. Ensuite le fonctionnement d'une cellule solaire en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque (L'effet photovoltaïque), ainsi que les paramètres photovoltaïques et l'influence des différents

paramètres extérieurs sur les caractéristiques électriques des modules photovoltaïques. Enfin, nous avons présenté les différents systèmes photovoltaïques.

CHAPITRE (II)

Etat de l'art et modélisation de la chaine de conversion photovoltaïque

II.1 Introduction

L'électricité « solaire » est obtenue par conversion photovoltaïque de l'énergie solaire ou transformation du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de modules photovoltaïques ainsi la quantité d'énergie produite par le module dépend de la quantité du rayonnement qu'il reçoit.

Nous présentons dans ce chapitre, les modèles sélectionnés pour notre outil desimulation. De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique portent sur le développement de modèles pour chacun des composants du système. Les résultats obtenus seront en partie réutilisés pour la modélisation de notre système [23]

Les composants modélisés sont :

- Le système champ photovoltaïque : modélisation des modules PV et du moduleMPPT ;
- Le système de stockage d'énergie électrique concernant le pack batteries (plomb-acide) ;
- Les convertisseurs électriques : DC/DC (les hacheurs) est dimensionnement.

II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque

Dans cette partie, nous essayons de présenter le modèle du générateur photovoltaïque Pour cela, nous utilisons le model électrique d'une seule cellule présentée dans le premier chapitre qui donne le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque par l'équation suivant : [24].

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0\left[e^{\left(\frac{q(V_{pv}+R_{s,1c}.I)}{n.N_S.K.T}\right)} - 1\right] - \frac{V_{pv}+R_{s1,c}.I_{pv}}{R_{sh,1c}} \text{.....(II.1)}$$

Pour une association en série de Ns cellules, l'expression du courant de sortie du PV devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0\left[e^{\left(\frac{q(V_{pv}+N_sR_{s,1c}.I)}{n.N_S.K.T}\right)} - 1\right] - \frac{V_{pv}+N_sR_{s,1c}.I_{pv}}{N_sR_{\square}} \text{.....(II.2)}$$

Finalement, on aura :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0\left[e^{\left(\frac{q(V_{pv}+R_S.I)}{n.N_S.K.T}\right)} - 1\right] - \frac{V_{pv}+R_S.I_{pv}}{R_{sh}} \text{.....(II.3)}$$

R_S : résistance série des N_S cellules séries ($R_s = N_sR_{s,1c}$).

R_{sh} : résistance parallèle des N_S cellules séries ($R_{sh} = N_sR_{sh,1c}$).

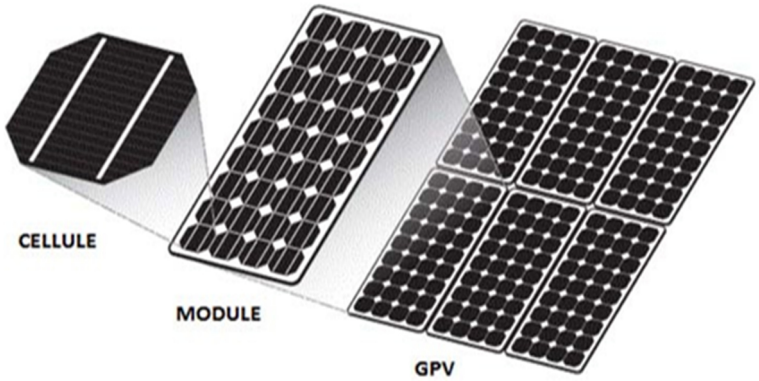


Figure II.1 : composants d'un GPV [25].

II.2.1 Modèle électrique

Chaque group de panneau est une association série/parallèle de NS.NP panneauélémentaires. Si tous les panneaux sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le GPV suivant [26] :

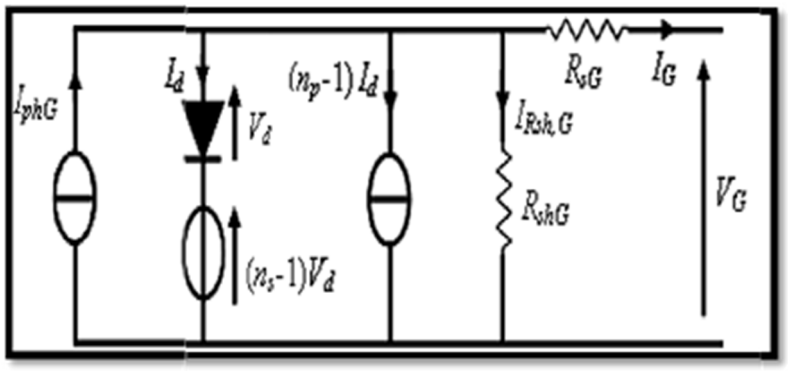


Figure II.2 : Schéma électrique équivalent d'un groupe de panneaux, modèle à 1 diode.

II.2.2 Modèle mathématique

L'expression du photo-courant en fonction du rayonnement solaire G et de la température T_i et donnée par [24] :

$$I_{ph} \approx I_{SC} = ((I_{SC} + K_i(T_i - T_{STC}))\frac{G}{G_{STC}} \quad \text{.....(II.4)}$$

I_{sc} : le courant de court-circuit à la température T_i ;

$I_{sc\ STC}$: le courent de court-circuit dans les condition STC (1000 W/m^2, masse de l'aire AM=1,5 et T_i =25 °C) ;

G_{STC}: Rayonnement solaire de référence (1000 W/m^2) ;

K_i : Constante de température du courant qui est très faible ;

T_{STC} : Température nominale ou bien de référence en [°K].

L'équation du courant de la diode pour N_s cellules en séries est donné par est donné par:

$$I_D = I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V_{pv}+R_S.I)}{n.K.N_S.T}\right)} - 1 \right] \text{.....(II.5)}$$

Le courant de saturation inverseI0, nécessaire pour le calcul du courant de la diode, est donné, dans les conditions STC et PV en circuit ouvert, par la formule suivante :

$$I_0 = \frac{I_{ph} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{\frac{V_{oc}}{V_T}} - 1} \text{.....(II.6)}$$

Pour une température quelconque, ce courant peut être calculé par l'équation (II.7).

$$I_0 = I_{0\,stc} \left(\frac{T^3}{{T_n}^3}\right) e^{\frac{qEg0}{nK}\left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)} \text{.....(II.7)}$$

L'équation de courant I_{sh} sont les suivantes :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv}+R_s I_{pv}}{R_{sh}} \text{.....(II.8)}$$

Le courant de sortie du module PV est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \text{.....(II.9)}$$

II.3 Modélisation de convertisseur DC/DC (les hacheurs)

II.3.1 Etude théorique

Dans cette partie nous présentons le principe des deux types de convertisseurs DC/DC (Buck, Boost), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités.

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la Puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande Souplesse et un rendement élevé [27].

II.3.2 Hacheur dévolteur «Buck »

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur(S) à amorçage commandé (transistor, bipolaire, transistor MOS ou IGBT…) et en série avec la source, et une diode de roue libre. Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T, comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le MOSFET passant et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à DT, avec D : est appelé rapport cyclique, et compris entre 0 et 1. Lors de la seconde, on bloque le MOSFET. La diode devient passante. Cette phase dure de DT à T [28].

Son schéma de principe est présenté sur la figure (II.3).

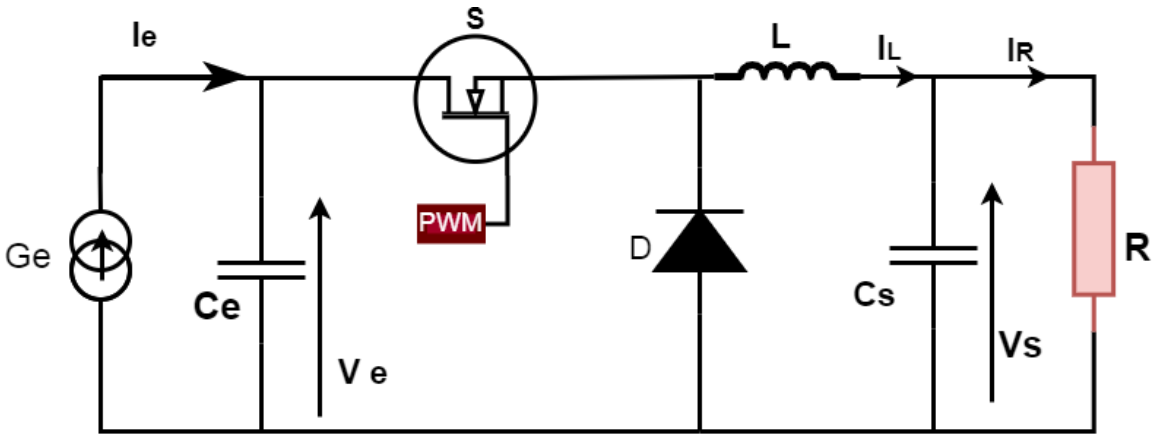


Figure II. 3 : Schéma électrique d'un hacheur Buck.

Le système des équations de l'hacheur Buck est donnée par :

$$\begin{cases} L\frac{di_L}{dt} = -V_s + D * V_e \\ C_s\frac{dV_s}{dt} = i_L - \frac{V_s}{R} \\ C_e\frac{dV_e}{dt} = i_e - D * i_L \end{cases} \quad \text{.....(II.10)}$$

II.3.3 Hacheur survolteur «Boost »

Le convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « Boost » ou hacheur parallèle. Il est utilisé pour convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [29].

Dans cet hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la source. Le montage le plus simple consiste à mettre périodiquement en court- circuit la résistance R pendant une durée $t_f = DT$ bien déterminée ; cette mise en court- circuit est assurée par un hacheur branché en parallèle avec la résistance [28].

Son schéma de principe est présenté sur la figure (II. 4)

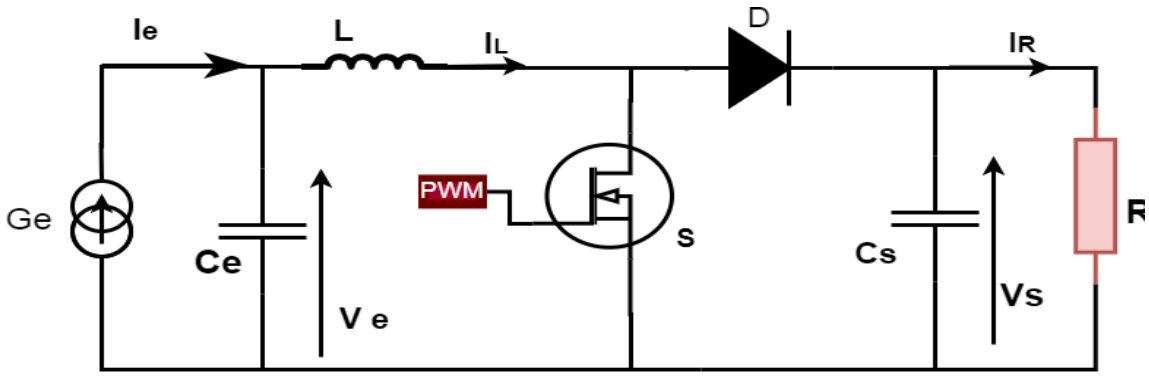


Figure II. 4 : Schéma électrique d'un hacheur Boost.

Le système des équations de l'hacheur Boost est donnée par :

$$\begin{cases} L\frac{di_L}{dt} = -(1-D) * V_s + V_e \\ C_s\frac{dV_s}{dt} = (1-D)i_L - \frac{V_s}{R} \\ C_e\frac{dV_e}{dt} = i_e - i_L \end{cases} \quad \text{.....(II.11)}$$

II.4 Modélisation d'une batterie

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est en général assuré par des batteries, composants utilisés dans la majorité des cas. Seules quelques applications utilisant l'énergie au fil du soleil comme par exemple du pompage ou de la ventilation peuvent se passer d'accumuler l'énergie ;aussi, bien connaître les batteries, est un élément essentiel au succès des systèmes autonomes.

Les batteries utilisées dans les systèmes solaires autonomes sont en général de type plomb-acide. Lesbatteries au cadmium-nickel ne sont plus que rarement utilisées car leur prix est beaucoup plus élevé et elles contiennent du cadmium (toxique) [31].

II.4.1 Modèle électrique

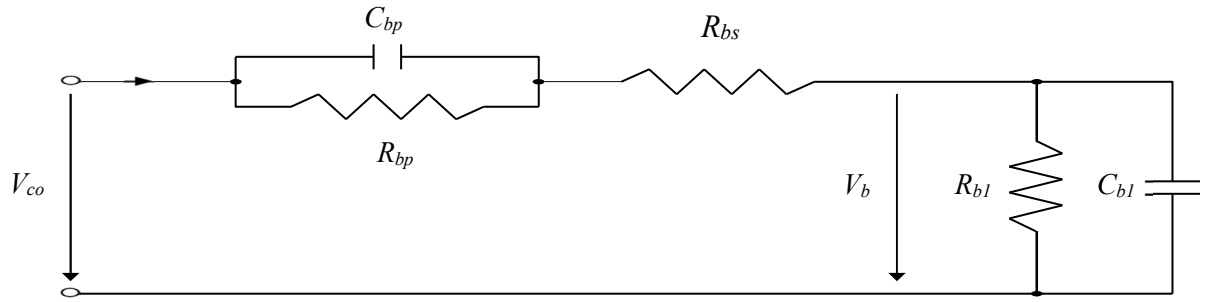


Figure II. 5 : Modèle d'un circuit équivalent de batterie plomb-acide [32].

Ce nouveau modèle de batterie comprend des éléments équivalents pour toutes les grandes

caractéristiques de fonctionnement d'une batterie plomb-acide : La capacité électrochimique de la batterie estreprésentée par le condensateur dont la charge C_{bp} dont le résultat d'un flux d'électrons au cours du temps et est linéaire pour les conditions d'un courant constant dans une région de 10 à 90 pour cent du niveau de charge maximum. La valeur du C_{bp} est dérivée de l'expression générale de l'énergie dans un condensateur :

$$E_c = \frac{1}{2} C V_c^2 \quad \text{.....(II.12)}$$

Avec C étant la capacité du condensateur et V_c étant la tension. Contrairement à un condensateur,une tension de batterie ne sera pas égale à zéro à son état le plus bas de charge.

Ceci est équivalent à un condensateur dont le niveau minimum de charge égale à l'énergie $E_{c,min}$. La capacité de la batterie entièrement chargée est représentée par un niveau maximum de charge de l'énergie $E_{c,max}$.

Ceci est indiqué par l'équation suivante pour l'ensemble de l'énergie stockable dans une batterie.

$$E_b = E_{c.max} - E_{c.min} = \frac{1}{2} C V_{max}^2 - \frac{1}{2} C V_{min}^2 = \frac{1}{2} C_{bp} (V_{max}^2 - V_{min}^2) \quad \text{.....(II.13)}$$

L'énergie E_b est soit donnée par le fabricant de la batterie directement en kilowattheures (kWh), soitil est spécifié en ampères-heures (Ah - qui doit être transformé dans les unités utilisées pour la production d'énergie (kWh) par multiplication de la tension spécifiée de fonctionnement).

Les tensions V_{max} et V_{min} sont la charge maximale et la charge minimale de la batterie en circuitouvert respectivement. D'après l'équation (II-13) on a :

$$C_{bp} = \frac{2E_b}{V_{max}^2 - V_{min}^2} \quad \text{.....(II.14)}$$

La résistance interne de la batterie est représentée par les deux résistances série R_{bs} et R_{b1}. La résistance en bloc d'électrolyte et de plaque est représentée par la résistance R_{bs}, alors que la résistance R_{b1} représente la diffusion de l'électrolyte.

Les modèles également R_{b1} (avec le petit condensateur C_{b1}) l'effet de surtension ou de polarisation dela batterie. Ce que représente le phénomène de chutes de tension en circuit ouvert de la batterie dès que la charge est connectée.

De même, un saut brusque de tension peut être observée avec l'application d'un courant de charge. Utilisation de la notation indiquée sur la figure (II.6) la surtension peut être exprimé comme la différence entre la tension de la batterie en circuit ouvert V_{co} et la tension terminale de la batterie

V_b. R_{b1} et C_{b1} formentun réseau RC parallèle avec une constante de temps $\tau = R_{b1}C_{b1}$ de sorte que :

$$V_b = V_{co} + R_{b1}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) i_b + R_{bs}.I_b \quad \text{……..……...(II.15)}$$

Une autre caractéristique très importante d'une batterie est d'auto-décharge, représentée par la résistance R_{bp} en parallèle avec le condensateur principal C_{bp}. Elle est causée par l'électrolyse de l'eau à hautetension et par des fuites lentes à travers les bornes de la batterie à basses tensions. Le circuit de la figure (II.6) décrit les caractéristiques d'une batterie plomb-acide d'une manière complète mais pourtant très simplifiée.

L'impédance équivalente d'une d'entrée d'une batterie plomb-acide est représentée par :

$$Z(s) = R_{bs} + \left(R_{b1} \| C_{b1}\right) + \left(R_{bp} \| C_{bp}\right)$$

$$= R_{bs} + \frac{R_{b1}}{R_{b1}+b_1 s+1} + \frac{R_{bp}}{R_{bp}.C_{bp}.s+1} \quad \text{……..….(II.16)}$$

Pour l'utilisation dans le système du modèle mathématique, il est nécessaire de transformer (II-16) en unseul terme de la forme suivante :

$$Z(s) = \frac{a_2 s^2+a_1 s+a_0}{b_2 s^2+b_1 s+b_0} \quad \text{…….…….(II.17)}$$

Ou les coefficients a_i et $b_i$sont employés pour représenter les différents composants [26,33] :

$$\begin{cases} a_{2=} R_{bs}R_{b1}R_{bp}C_{b1}C_{bp} \\ a_1 = R_{bs}R_{b1}C_{b1} + R_{bs}R_{bp}C_{bp} + R_{b1}R_{bp}C_{bp} + R_{bp}R_{b1}C_{b1} \\ a_0 = R_{bs} + R_{b1} + R_{bp} \\ b_2 = R_{b1}R_{bp} + C_{b1}C_{bp} \\ b_1 = R_{b1}C_{b1}+R_{bp}C_{bp} \\ b_0 = 1 \end{cases} \quad \text{……...(II.18)}$$

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation d'une chaine de conversion photovoltaïque constituée d'un panneau solaire, d'un hacheur Boost et une batterie.

Une démarche de dimensionnement des convertisseurs Boost, assez précise, a été aussi présentée et appliquée pour deux puissances différentes.

CHAPITRE (III)

Techniques de commande du contrôleur MPPT photovoltaïque et Résultats de simulation

III.1 INTRODUCTION

La demande sur l'énergie électrique ne cesse d'augmenter ces dernières années ainsi que les contraintes liées à sa production, Dans ce contexte, les systèmes photovoltaïques (PV) offrent une solution très concurrentielle.

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

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

Ces commandes sont connues sous le nom PPM c.-à-d. poursuite du point de puissance maximale, associées à la commande de l'hacheur.

En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches.

Aussi, plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées, parmi les techniques les plus utilisées :

- Perturbation et Observation (P&O).
- Réseaux de Neurones Artificiels.

Dans ce chapitre, on présentera l'aspect théorique de ces méthodes pour le suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque.

III.2 Fonctionnement d'un générateur photovoltaïque (GPV) à sa Puissance Maximale

III.2.1 Connexion directe GPV-Charge

Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et letrès haut degré de fiabilité, dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût. La figure (III.1) montre ce cas. Si cette charge était une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur, la batterie pourrait donc se décharger sur le générateur PV et en plus l'endommager irréversiblement [12].

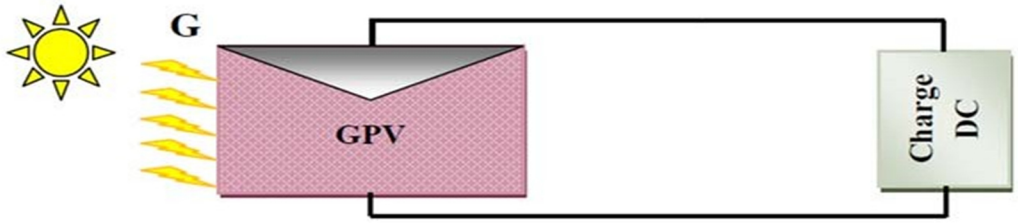


Figure III.1 : Connexion directe GPV-Charge.

Ainsi, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge. Cette configuration est illustrée à la figure (III.2). L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de la puissance maximale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti [13].

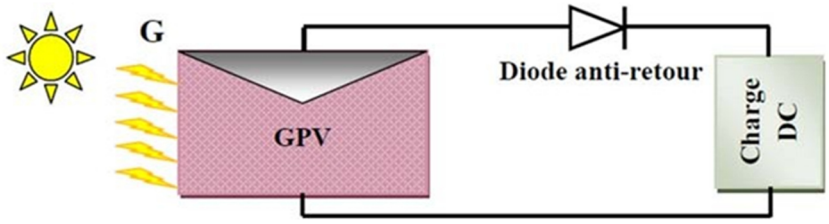


Figure III.2 : Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.

En effet, une charge de type alternative n'est pas du tout compatible avec la connexion directe car le GPV fournit un courant continu.

III.2.2 Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation

Un GPV présente des caractéristiques I-V non linéaires avec de point de puissance maximum PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV,la technique utilisée est d'utiliser un étage d'adaptation comme décrit dans la figure (III.3).

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle.

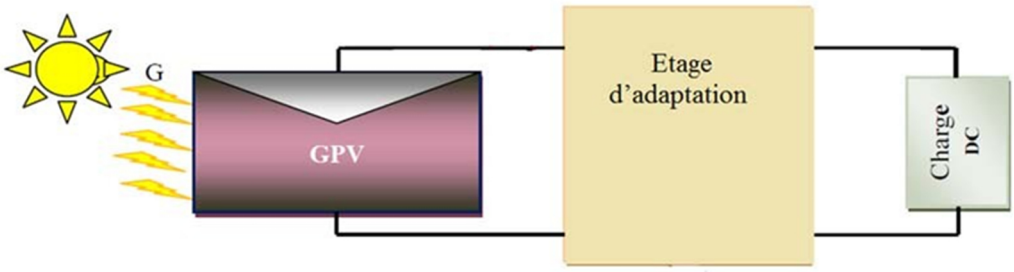


Figure III.3 : Connexion indirecte GPV-charge.

Pour que le générateur PV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique commandée qui joue le rôle d'adaptateur GPV-charge comme décrit dans la figure (III.4). Le rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner le GPV à son point de puissance optimale, en ajustant le rapport cycliqueα de cette convertisseur [12].

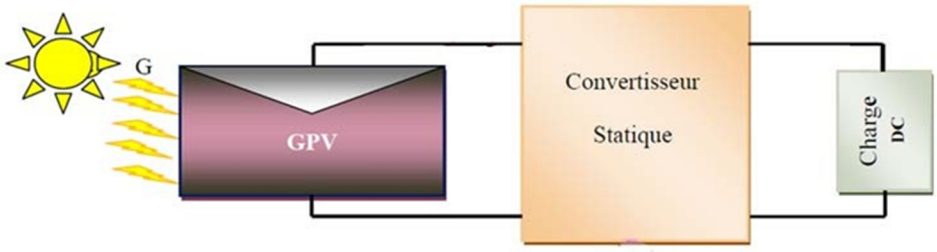


Figure III.4 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC).

III. 3 Commandes MPPT

Pour obtenir la puissance maximale de GPV, un algorithme de suivi du point de puissance maximum PPPM ou (MPPT : Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour la commande de convertisseur statique comme décrit dans la figure (III.5).

La technique de suivi du point de puissance maximale a été développé depuis 1968, cette commande est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque [5].

Par définition, la commande PPM est associée à un étage intermédiaire d'adaptation.

Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande PPM place le système photovoltaïque au point de fonctionnement maximal.

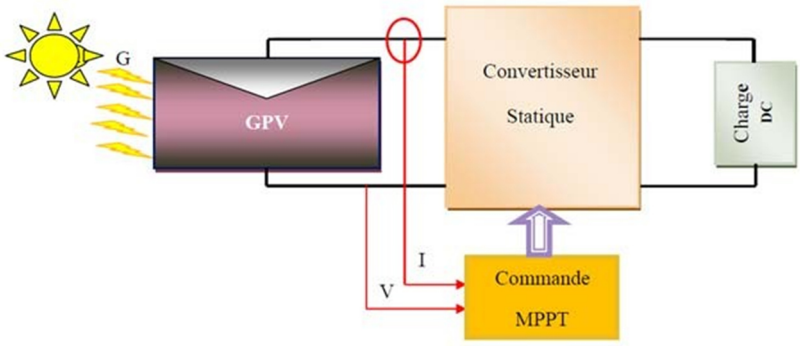


Figure III.5 : Chaine de conversion photovoltaïque.

III.3.1 Principe de la commande PPM

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

La commande PPM fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le PPM.

Il peut être représenté par le schéma de la Figure (III.6).

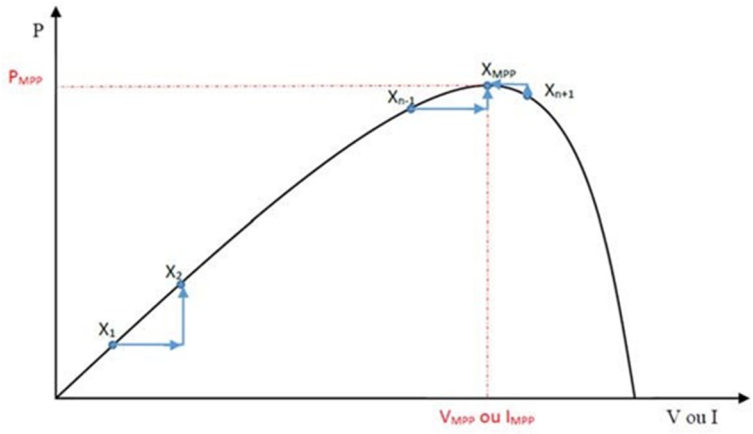


Figure III.6 : Principe de la commande PPM.

III.3.2 Variation et trajectoire du PPM

La figure (III.7) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximale PPM_1 vers un nouveau point P_1 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 PPM_2.

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 (Cas c) de variation du point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV.

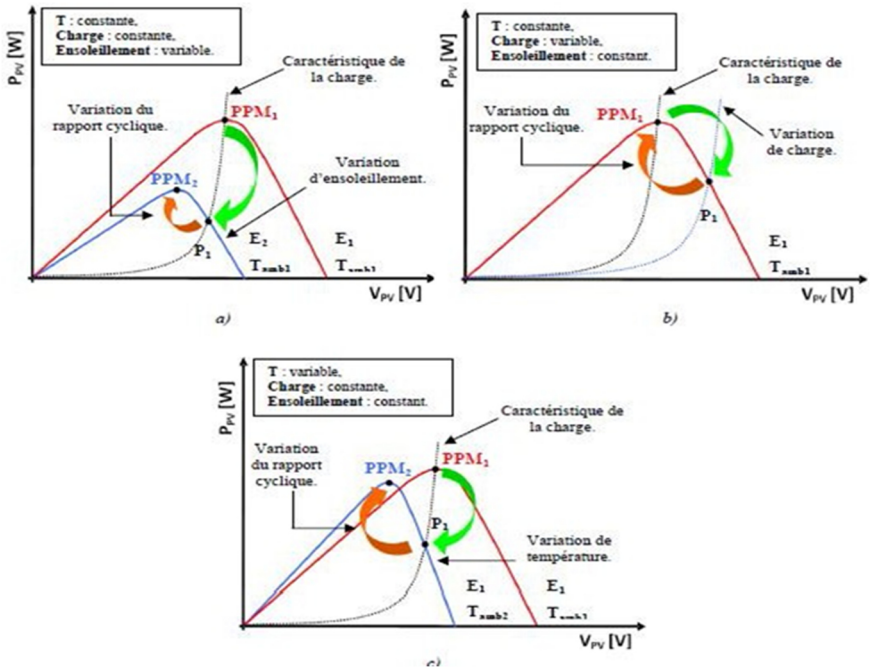


Figure III.7 : Cas de perturbations.

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

III.3.3 Les Algorithmes de Point de Puissance Maximales (PPM)

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

Entre autres il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes PPM plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux concernant les

simulations dans le chapitre suivant.

III.4 La Commande de Perturbation et Observation « P&O »

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. L'algorithme P&O consiste à modifier le point de fonctionnement du GPV en augmentant ou en diminuant le rapport cyclique d'un convertisseur continu-continu afin de mesurer la puissance de sortie avant et après la perturbation, et l'observation de la conséquence decette perturbation sur la puissance mesurée (P=VI) [14].

Si la puissance augmente, l'algorithme perturbe le système dans le même sens. Sinon, le système est perturbé dans la direction opposée. La figure (III.8) montre les 4 options possibles présentées lors du suivi du PPM, le point 1 étant la position précédente et le point 2 la position actuelle de chaque cas (A, B, C et D).

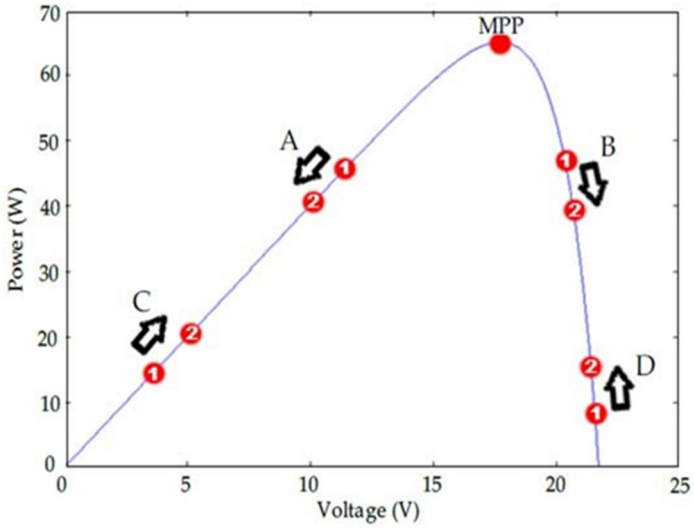


Figure III.8: Les 4 cas possibles lors du suivi du PPM.

Dans les cas A et C, le rapport cyclique doit diminuer, entraînant une augmentation de la tension du module PV. Alors que dans les cas B et D, le rapport cyclique doit être augmenté afin que la tension du module PV diminue.

La Figure (III.9) représente l'algorithme classique d'une commande PPM de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

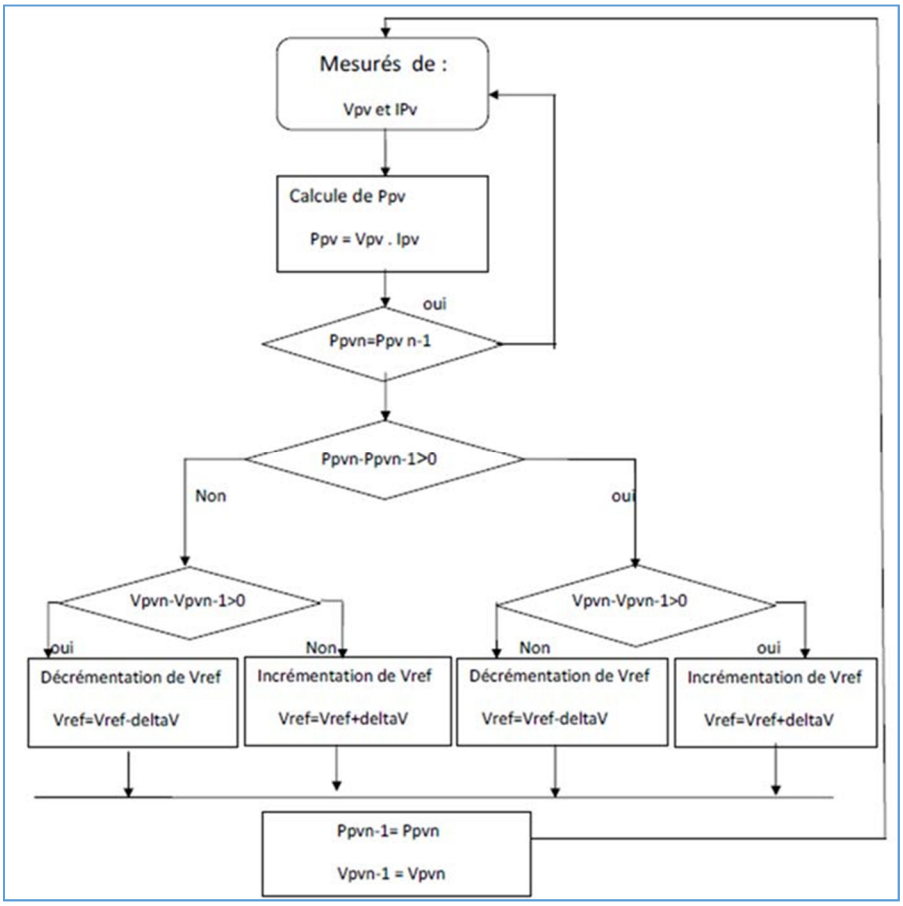


Figure III.9 : L'algorithme de la commande PPM de type P&O.

III.5 Les Commande « Réseaux de Neurones Artificiels »

Le cerveau se compose d'environ 1012 neurones interconnectes entre eux, avec 1000 à 10000 synapses par neurone. Les neurones ne sont pas tous identiques et ils n'ont pas lemême comportement.

III.5.1 Historique

En 1948, deux chercheures Américains, Mac Culloch et Pitts, ont donné naissance au premier modèle mathématique de neurone biologique, qu'ils ont appelé : neurone formel. L'idée principale des réseaux de neurones est la suivante : On se donne une unité simple, un neurone, qui est capable de réaliser quelques calculs élémentaires. On relie ensuite un certain nombre de ces unités sous forme d'un réseau capable de résoudre un problème plus complexe.

La structure, la taille du réseau et le mécanisme d'apprentissage utilise dépendent du type etde la complexité de l'application en question.

III.5.2 Le neurone biologie

Un neurone est une cellule particulièrement complexe spécialisée dans le traitement des signaux électriques. Son rôle est de recevoir, stocker et transmettre l'information. On peut décomposer le neurone en trois régions principales : le corps cellulaire, les dendrites et l'axone[37].

- **Le corps cellulaire**

Il contient le noyau du neurone ainsi que la machine biologique nécessaire à la synthèse des enzymes. Ce corps cellulaire de forme sphérique ou pyramidale contient ainsi les autres molécules essentielles à la vie de la cellule. Sa taille est de quelques microns diamètre.

1. Les dendrites

Ce sont des fines extensions qui se ramifient autour du neurone et forment une sortie de vaste arborescence. Les signaux envoyés sont captés par les dendrites. Leur taille est de quelques dizaines de micromètres de longueur.

2. L'axone

L'information traitée est transmise vers l'extérieur, le long de l'axone, les signaux partent du neurone grâce à l'arborescence terminale que possède l'axone ; contrairement aux dendritesqui se ramifient autour du neurone, l'axone est plus long et se ramifie à son extrémité où il se connecte aux dendrites des autres neurones. Sa taille peut varier entre quelques millimètres à plusieurs mètres. La notion de synapse explique la transmission des signaux entre un axone et une dendrite. Au niveau de la jonction, il existe un espace à travers lequel le signal électrique ne peut pas se propager. Les transmissions se font alors par l'intermédiaire des substances chimiques (Les neurotransmetteurs). Quand un signal arrive de la synapse, il provoque l'émission des neurotransmetteurs qui vont se fixer sur des récepteurs de l'autre cotede l'espace inter synaptique. Quand suffisamment de molécules se sont fixés, un signalélectrique est émis de l'autre cote, il y a donc une transmission [37].

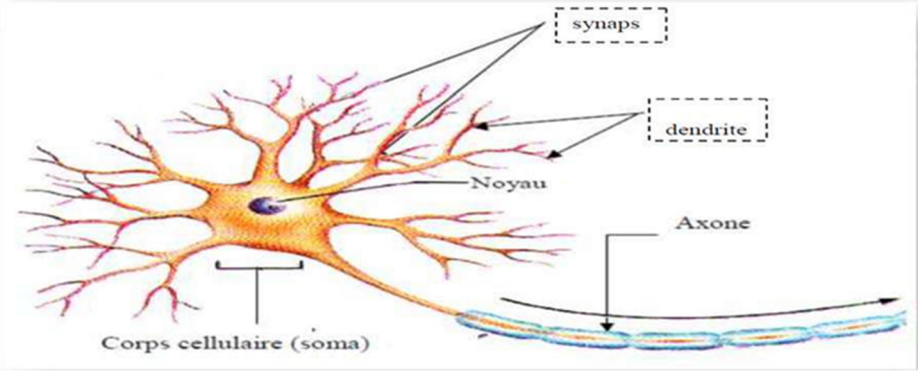


Figure III.9 Le modèle d'un neurone biologique

III.5.3 Le neurone artificiel

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs (neurones) élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseauxest évidemment un réseau [12].

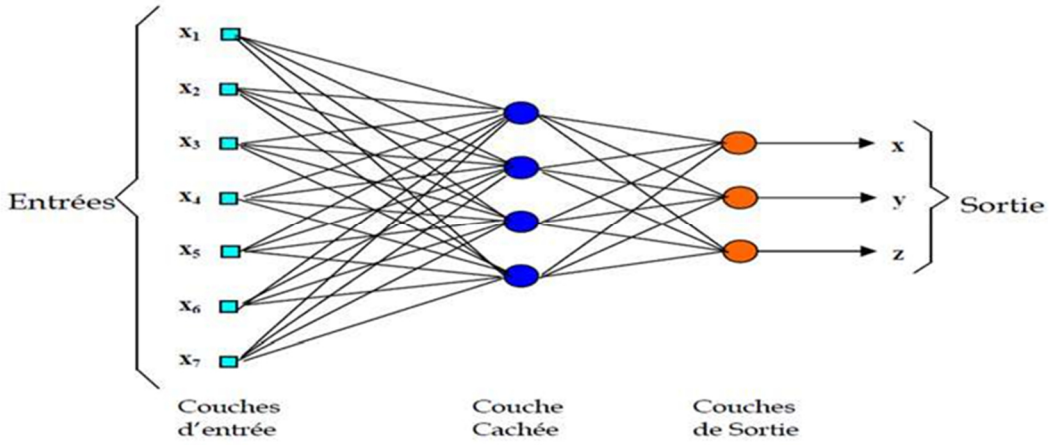


Figure III.10 : Neurone Artificiel

III.5.4 Les composants d'un réseau de neurone

Le réseau de neurone se compose en huit éléments sont :

- Un ensemble de neurone.
- Un état d'activation pour chaque neurone (actif, inactif).
- Une fonction de sortie pour chaque neurone [F(s)].
- Un modèle de connectivité entre les neurones (chaque neurone est connecté à tous lesautres).
- Une règle de propagation pour propager les valeurs d'entrée à travers le réseau vers lessorties.
- Une règle d'activation pour combiner les entrées d'un neurone.
- Une règle d'apprentissage.
- Un environnement d'opération (le système d'exploitation, par exemple) [37].

III.5.5 Les différentes structures des réseaux de neurones

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle qui peut être, mais le plus souvent il est possible de distinguer une certaine régularité

III.5.5.1 Réseau de neurones multicouches

Les neurones sont arrangés par couche, il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne sont font qu'avec les neurones des couches en aval. Habituellement, chaque neurone est connecté à tous les neurones de la couche suivante etcelle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc de définir les concepts de neurone d'entrée et de neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées cachées.

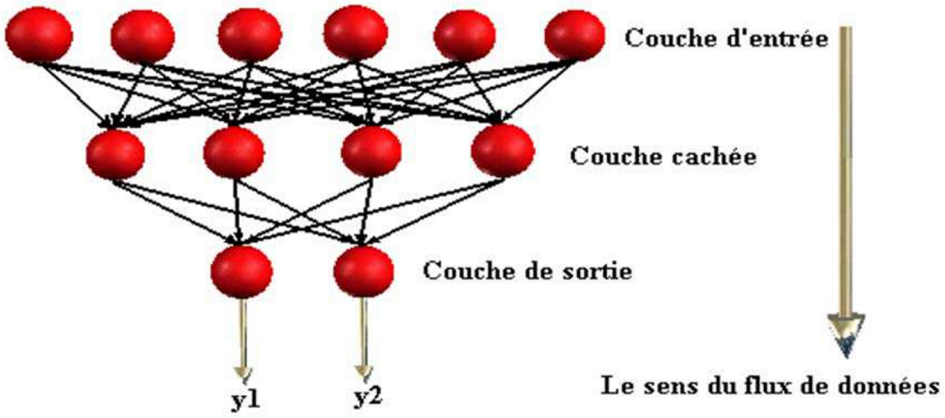


Figure III.11 : Réseau de neurones multicouche

III.5.5.2 Réseau à connexions locales

Il s'agit d'une architecture multicouche, mais qui à l'image de la rétine, conserve une certaine topologie. Chaque neurone est connecté avec un nombre réduit et localisé de neurone de la couche aval. Les connexions sont donc moins nombreuses que dans le cas d'un réseau multicouche classique.

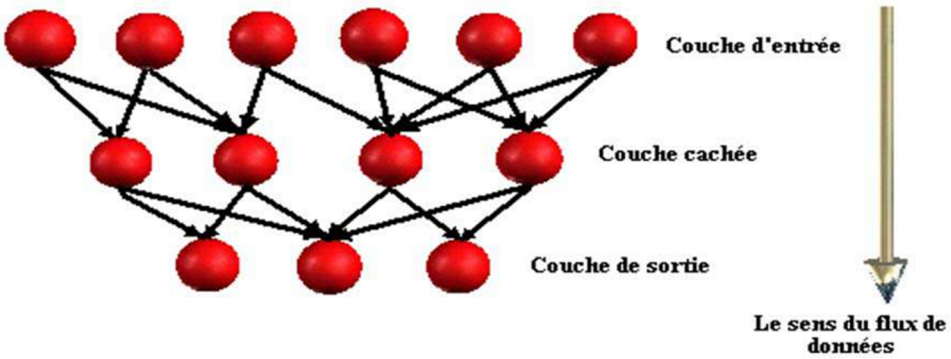


Figure III.12 : Réseau à connexions locales

III.5.5.3 Réseau à connexions récurrentes

Les connexions récurrentes ramènent en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont le plus souvent locales.

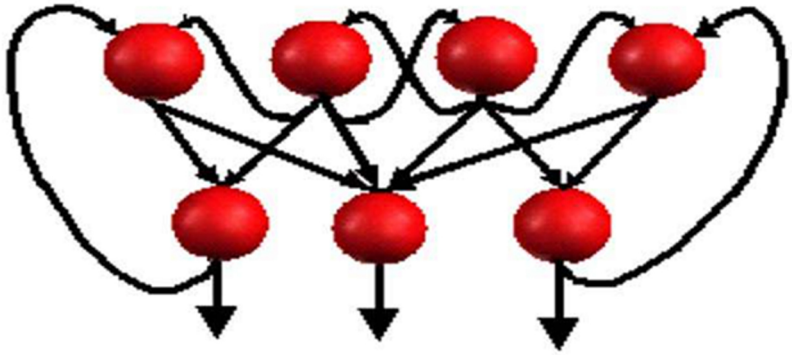


Figure III.13 : Réseau à connexions récurrentes.

III.5.5.4 Réseau à connexions complètes

C'est la structure d'interconnexions la plus générale (figure III.13). Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau et à lui-même.

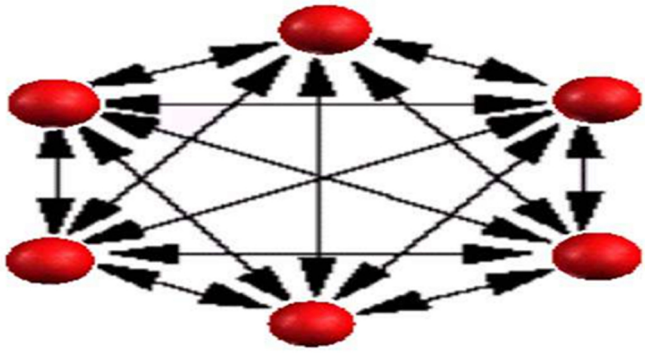
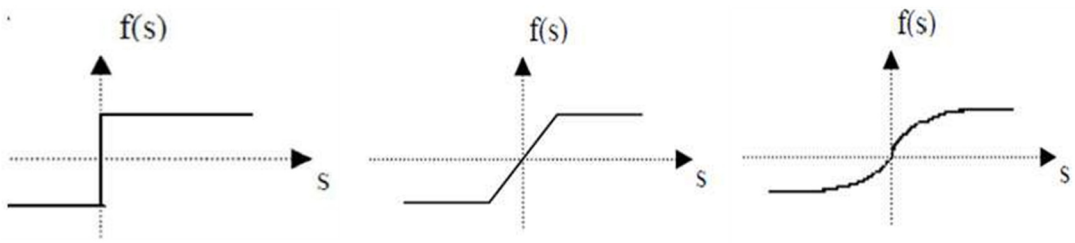


Figure. III.14 : Réseau à connexions complètes.

III.5.6 Les fonctions d'activations

C'est une fonction non-linéaire qui définit l'état interne (A) du neurone en fonction de son entrée totale (E) elle peut être une fonction binaire à seuil, linéaire à seuil ou multi-seuil sigmoïde stochastique ou une autre fonction généralement choisie croissante et impaire [38].



Fonction à seuil Fonction à saturation Fonction sigmoïde

Figure III.15 : Quelque fonction d'activations.

III.5.7 Les techniques d'apprentissage

On a deux techniques d'apprentissage : supervisé et non supervisé

III.5.7.1 Apprentissage supervisé

Un apprentissage supervisé est lié à la disponibilité d'exemples, ou de modèles de réponses. L'ensemble des exemples utilisés pour l'apprentissage se présente sous forme de couples (X, Y*) ou y* est la réponse désirée du réseau à l'entrée X. Lorsque le réseau apprend à mimer une fonction multi variable, il utilise des exemples d'entrée/sortie. Ses poids sont ajustés sous l'influence d'un signal d'erreur qui représente la différence entre la sortie estimée par le réseau et la sortie désirée par le modèle. Les caractéristiques de l'algorithme neuronallui permettent ensuite de généraliser et de répondre à une entrée quelconque, même si elle n'appartient pas au jeu d'apprentissage. Le réseau réalise une approximation de la fonction qui lui a servi de professeur [12].

III.5.7.2 Apprentissage non supervisé

L'hypothèse d'existence d'un maître qui supervise l'apprentissage n'est pas toujours possible. Dans ce cas, on ne connaît pas les sorties désirées y* des exemples d'apprentissage.

Le réseau doit donc apprendre de lui-même et on parle d'apprentissage non supervisé. Ce type d'apprentissage permet au réseau d'extraire des propriétés contenues implicitement dans un ensemble de données, représentées par des vecteurs de grande dimension, et l'on cherche à les regrouper, selon des critères de ressemblance qui sont inconnus a priori [38].

III.6 Résultats de simulation et interprétations

Les performances des algorithmes MPPT basés sur ANN et MPPT basés sur P&O dans un système PV autonome avec un convertisseur élévateur sont comparées à l'aide d'une simulation dans MATLAB/Simulink. L'ANN est formé à l'aide de données collectées via la méthode de Perturbation et Observation sur un assortiment de circonstances du système incluses dans l'ensemble de données.

III.6.1 Architecture du contrôleur de Réseau de Neurone Artificiel

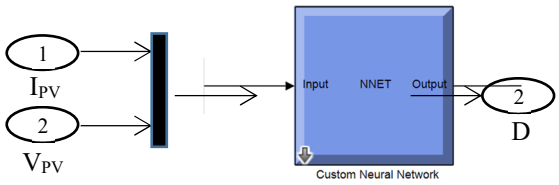
Le Réseau de Neurone Artificiel est formé en utilisant la tension VPV et le courant I_{PV} des panneaux photovoltaïques, l'irradiation solaire et la température. Le Réseau de Neurone apprend en modifiant les poids à l'aide de l'algorithme de rétro-propagation "Feed-Forward" de "Levenberg-Marquardt" avec la tension et le courant photovoltaïques comme entrées dans l'ANN. La couche cachée comprend quinze neurones et génère une sortie de couche cachée en utilisant une fonction d'activation sigmoïde tangente, tandis que les neurones de la couche de sortie produisent une sortie de la couche de sortie en utilisant une fonction d'activation linéaire.

Dans ce mémoire, le (ANN) proposé vise à prédire le point de puissance maximale (MPP) du générateur photovoltaïque. Les quatre étapes de conception de l'ANN peuvent être résumées par :

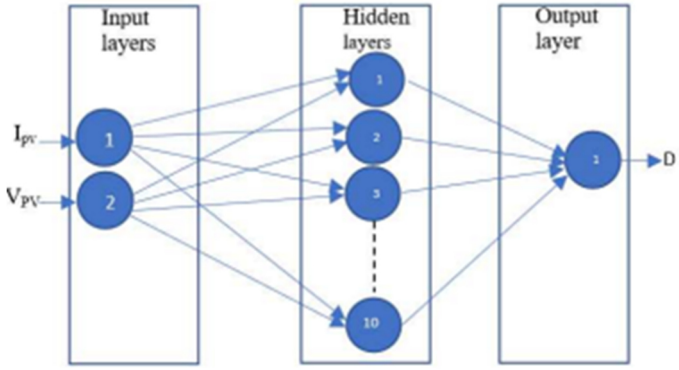
- Sélection de l'architecture ANN ;
- Collecte de données ;
- Formation de l'ANN ;
- Test de l'ANN.

Nous avons utilisé un réseau Perceptron multicouche (MLP), contenant trois couches, comme le montre la Figure (III. 16) [12,13] :

- La première couche : où les entrées du réseau sont le courant PV (*Ipv*) et la tension (*Vpv*) du système PV enregistrés sous la température et l'irradiation fixes (25 ^{o}C et 1000 W/m^2) ;
- La deuxième couche : est la couche cachée, contient 10 neurones cachés qui reçoivent les données de la couche d'entrée et les envoient à la couche de sortie. Ses fonctions d'activation sont les fonctions sigmoïdes (Tansig) ;
- La troisième couche : est la couche de sortie, contient un rapport cyclique neuronal (D) dont la fonction d'activation est une fonction linéaire (Purelin) ;
- Fonction d'activation est une fonction linéaire (Purelin).



(a)



(b)

Figure III.16 : Architecture de contrôleur de ANN proposé, a) modèle Simulink et b) Principes des couches neuronales.

Le principal avantage de l'approche suggérée est qu'elle suit le Point de Puissance Maximale « MPP » plus rapidement. Étant donné que les paramètres d'un champ photovoltaïque changent avec le temps, il est nécessaire de recycler fréquemment le réseau neuronal pour assurer un suivi précis du MPP. Cette simulation nous permet d'évaluer l'efficacité du contrôleur moderne (Réseau Neuronal Artificiel, ANN » par rapport au contrôleur classique (Perturbation et Observation, P&O » comme le montre les Figures ci-dessous.

À la 11ème itération (époque), l'algorithme de Levenberg – Marquardt a produit les meilleurs résultats en termes d'efficacité de calcul, comme le montre la Figure (III.17). La période qui comportait le moins d'erreurs de validation était celle qui produisait les meilleurs résultats. Les performances du réseau neuronal sont améliorées par la combinaison des valeurs obtenues lors des tests de formation, de validation et de test.

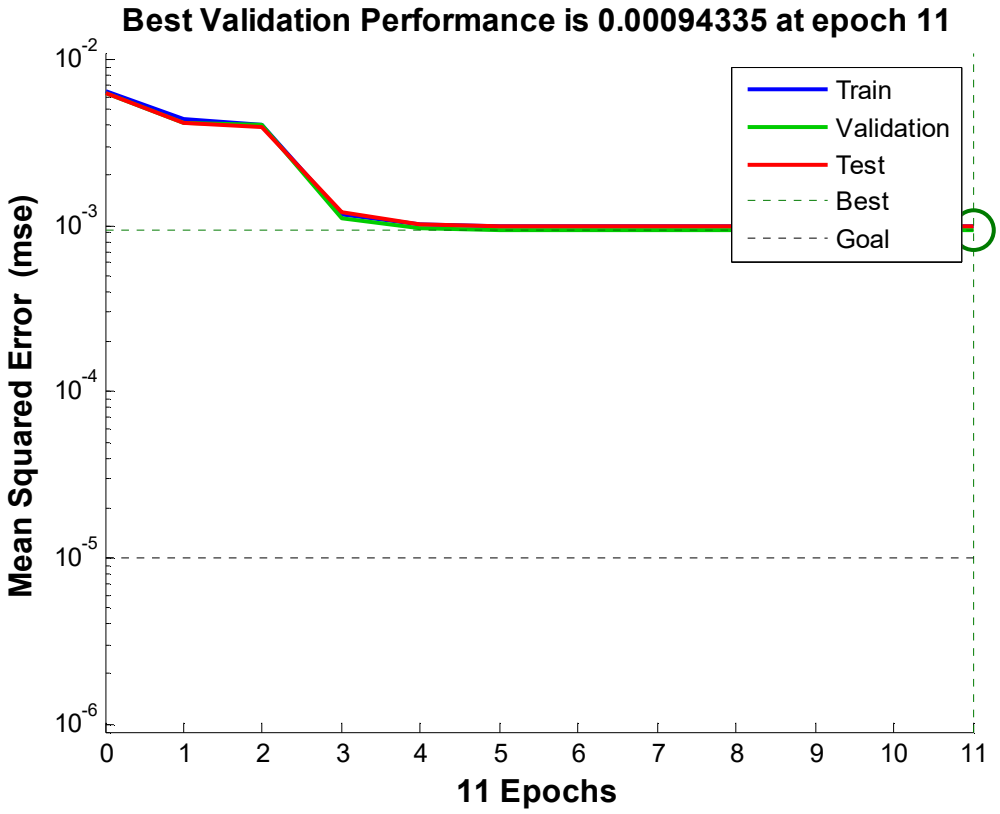


Figure III.17 : Performances de formation des réseaux neuronaux.

Sur la Figure (III.18), l'état d'entraînement du réseau au point des meilleures performances est décrit à travers le gradient, mu et le contrôle de validation de la valeur.

À partir de l'état d'entraînement, nous pouvons voir que la valeur du gradient est de 6,7736 × 10^{-8}, la valeur Mu est de 1 × 10^{-13} et aucune valeur n'échoue au test de validation jusqu'à la meilleure itération de performance.

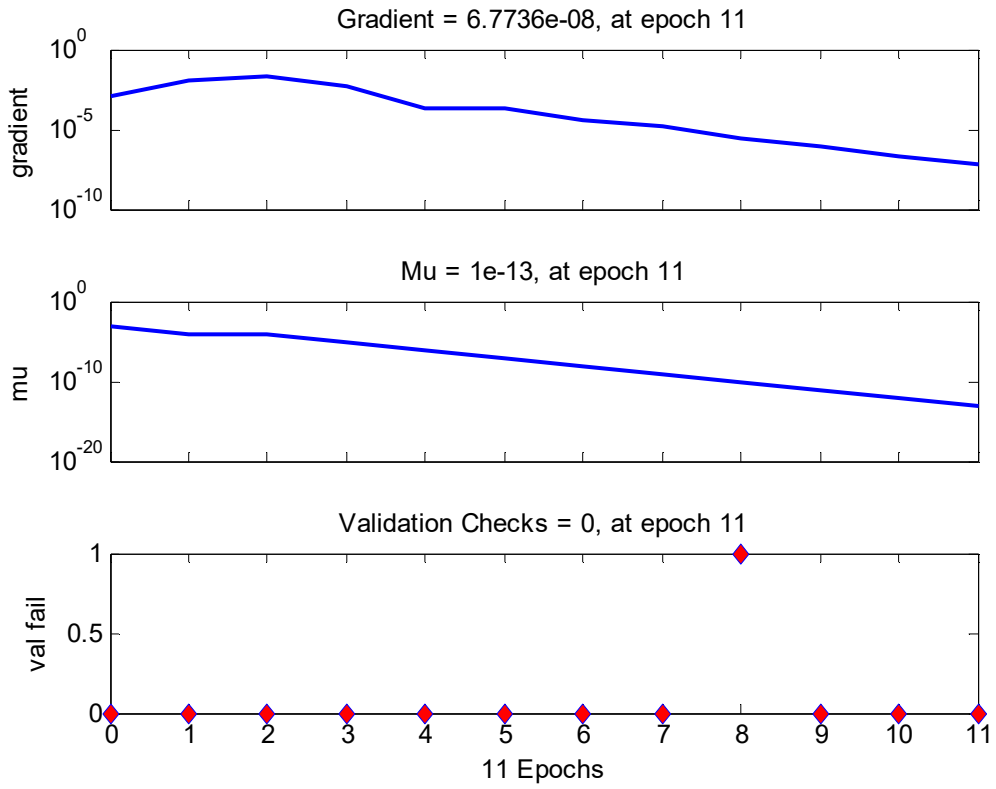


Figure III.18 : Etat de formation des réseaux neuronaux.

La Figure (III.19) représente une comparaison visuelle des performances du modèle pour prédire le point de puissance maximale (MPP) pour les systèmes photovoltaïques. Le graphique illustre dans quelle mesure le modèle ANN s'aligne sur les valeurs cibles (Y = T) pour la formation, les tests, la validation et tous les ensembles de données.

Chaque courbe représente une équation de régression différente adaptée aux données :

- Training : R=0,28649 (Sortie ~= 0,081 * Target + 0,39) ;
- Validation : R=0,22908 (Sortie ~= 0,065 * Target + 0,4) ;
- Test : R=0,21053 (Sortie ~= 0,062 * Target + 0,4) ;
- AII : R=0,26715 (Sortie ~= 0,076 * Target + 0,39) ;

Le coefficient de détermination (R) est indiqué pour chaque ensemble de données, reflétant la qualité de l'ajustement.

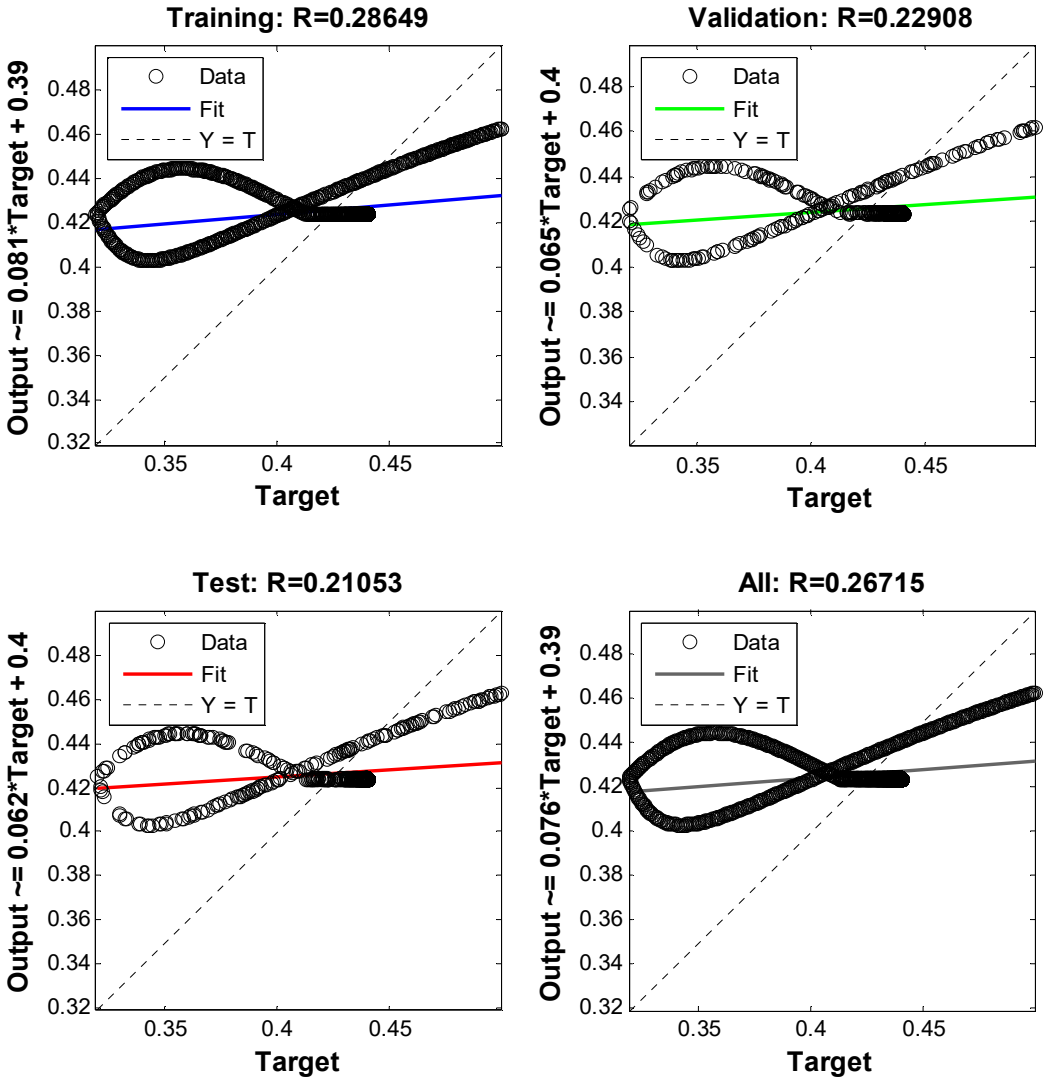


Figure III.19 : Comparaison des performances des modèles.

La Figure (III.20) montre la puissance P_{PV} produite par le module PV en utilisant les deux contrôleurs P&O et ANN dans le même Simulink pour pouvoir visualiser les deux graphes dans une même Figure. Nous constatons que :

- L'ANN est plus rapide (1,42 secondes) que P&O (7,38 secondes) pour atteindre une puissance environ 20 Watts ;
- L'ANN est plus stable, ce qui donne une puissance de valeur fixe (20,0191 Watts), tandis que P&O donne une puissance de valeur variable et oscillante autour de la (20,0245 Watts).

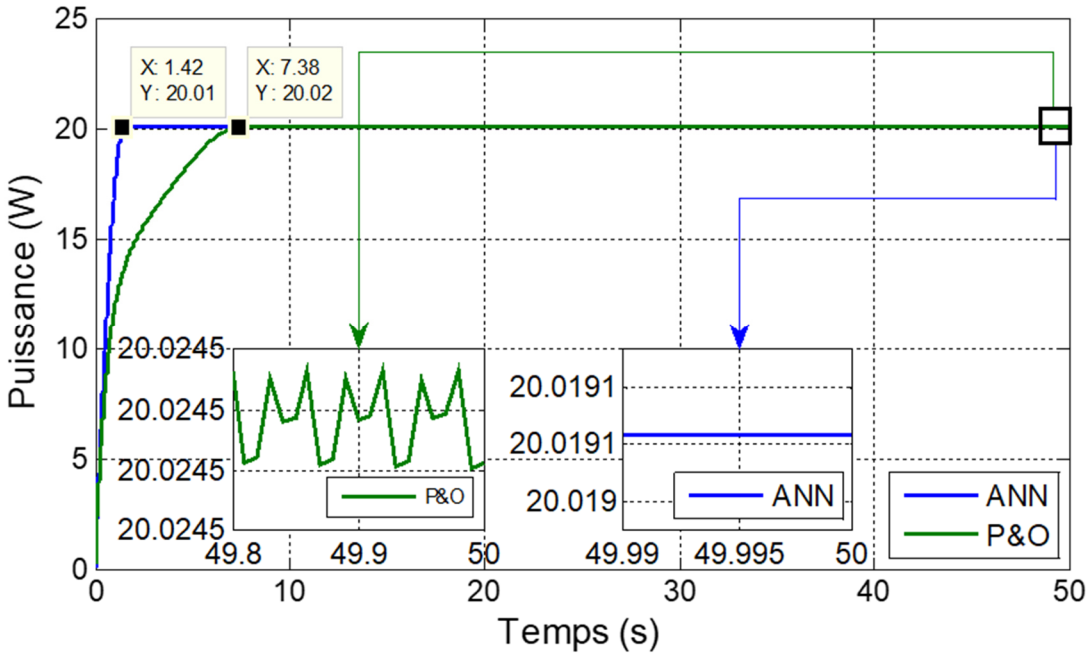


Figure III1.20 : Puissance en fonction du temps avec ANN et P&O.

La Figure (III.21) montre le courant photovoltaïque I_{PV} en fonction du temps. Nous constatons que :

- Le courant de court-circuit I_{CC} est égal à 1,3 A et le courant PV I_{PV} se diminue avec le lancement de la simulation jusqu'à la valeur I_{MPP} qui est égal à 1,21 A ;
- Le temps de réponse est le même qu'on a trouvé pour la puissance.

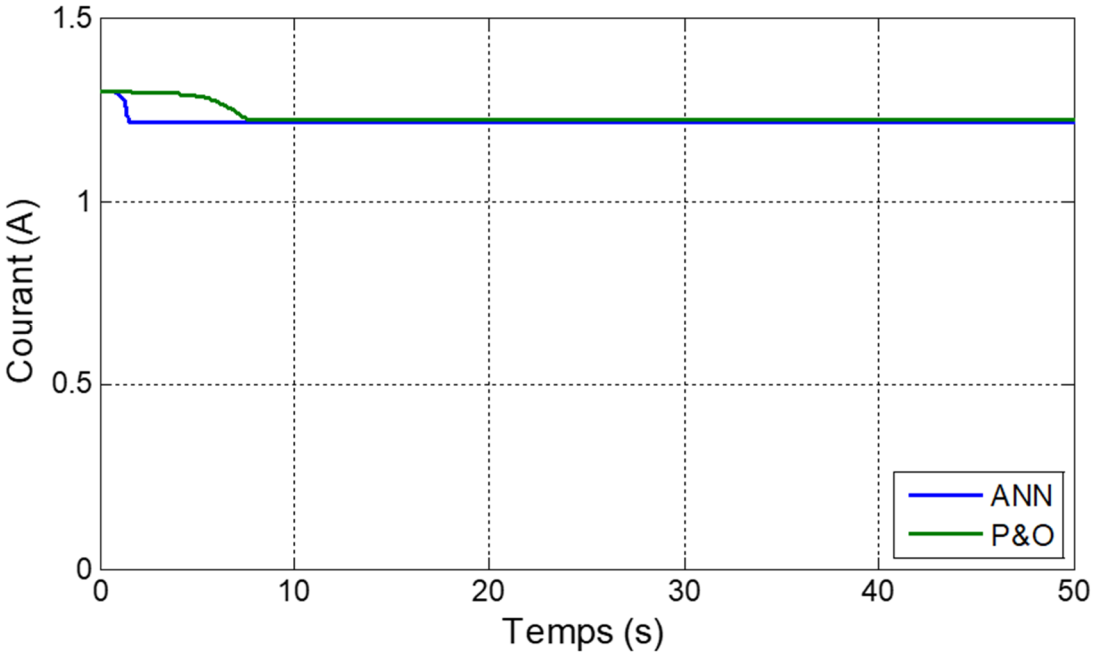


Figure III.21 : Courant en fonction du temps avec ANN et P&O.

La Figure (III.22) montre la tension photovoltaïque V_{PV} en fonction du temps. Nous constatons que :

- La tension PV V_{PV} s'augmente avec le lancement de la simulation jusqu'à la valeur V_{MPP} qui est égal à 16,53 V ;
- Le temps de réponse est le même qu'on a trouvé pour la puissance.

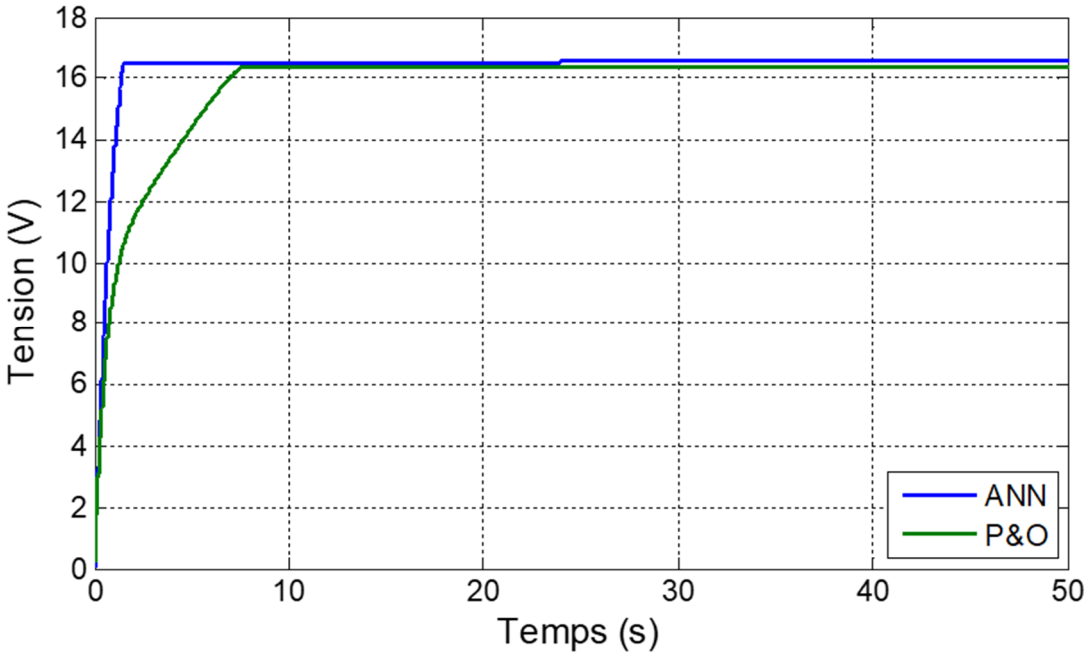


Figure III.22 : Tension en fonction du temps avec ANN et P&O.

La Figure (III,23) montre la puissance P_{PV} produite par le module PV en utilisant les deux contrôleurs P&O et ANN dans le même Simulink pour pouvoir visualiser les deux graphes dans une même Figure. Nous constatons que :

- La puissance P_{PV} pour les deux contrôleurs ANN et P&O s'augmente presque linéairement jusqu'attendre la valeur maximale MPPT (20 Watts) ;
- et la tension d'une valeur de 16,53 V.

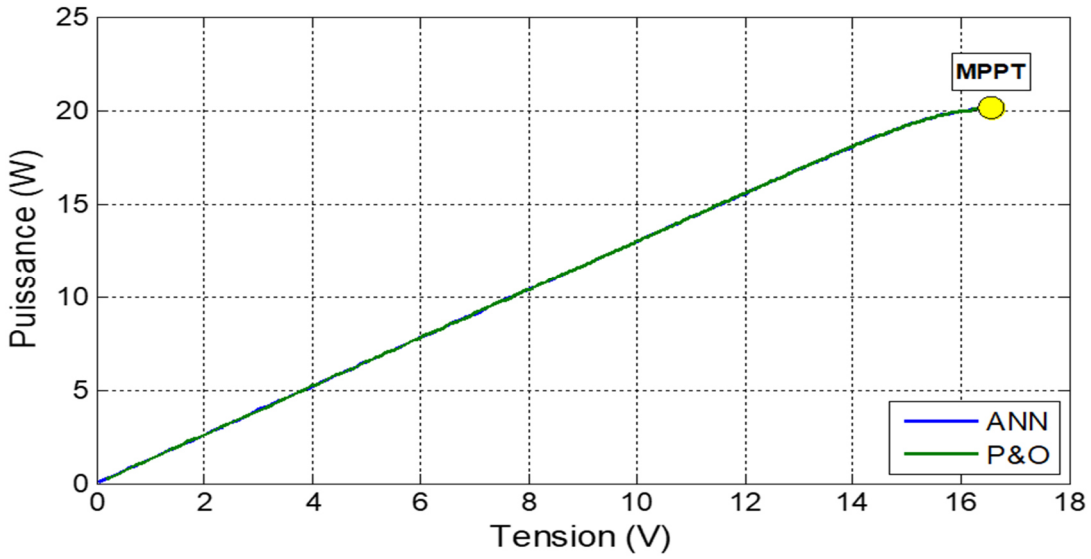


Figure III.23 : Puissance en fonction de la tension avec ANN et P&O.

La Figure (III.24) montre le courant photovoltaïque I_{PV} en fonction de la tension. Nous constatons que :

- Le courant de court-circuit I_{CC} est égal à 1,3 A et le courant PV I_{PV} reste fixe jusqu'à la valeur de la tension de 13,8 V. Apres cette valeur IPV s'atténue jusqu'à la valeur I_{MPP} de 1,21 A ;

- Cette linéarité horizontale entre 0 et 13,8 Volts signifie que le module fonctionne comme un générateur de courant et sa résistance série très faible (dans notre cas 1 μΩ).

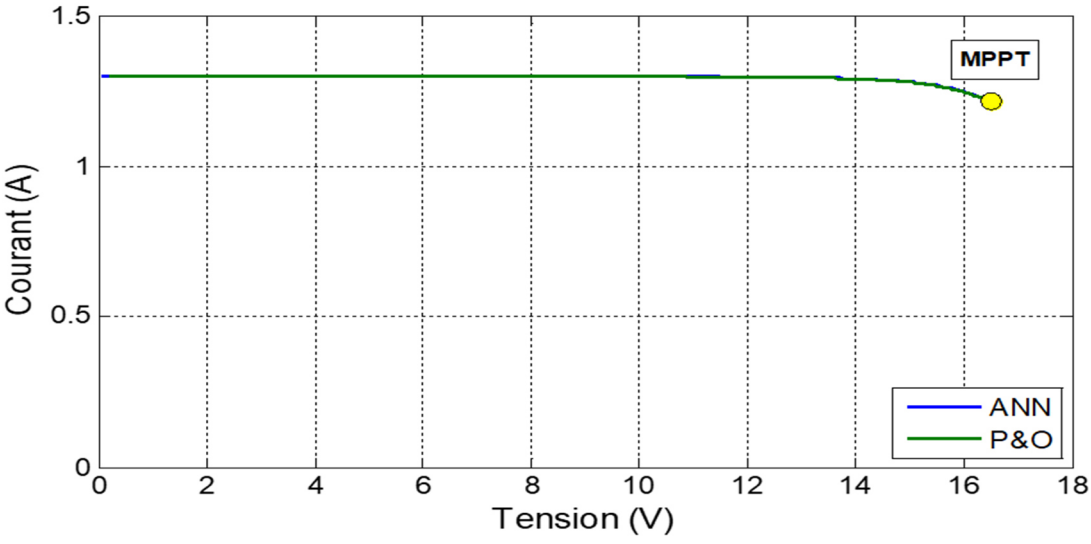


Figure III.24 : Courant en fonction de la tension avec ANN et P&O.

La Figure (III.25) montre le rapport cyclique D en fonction du temps. Nous constatons que :

- D démarre avec une valeur de 0,5 qui a programmé dans le Simulink puis se diminue et stabilise à la valeur de 0,35 pour les deux contrôleurs ANN et P&O ;
- Le temps de réponse est le même qu'on a trouvé pour la puissance.

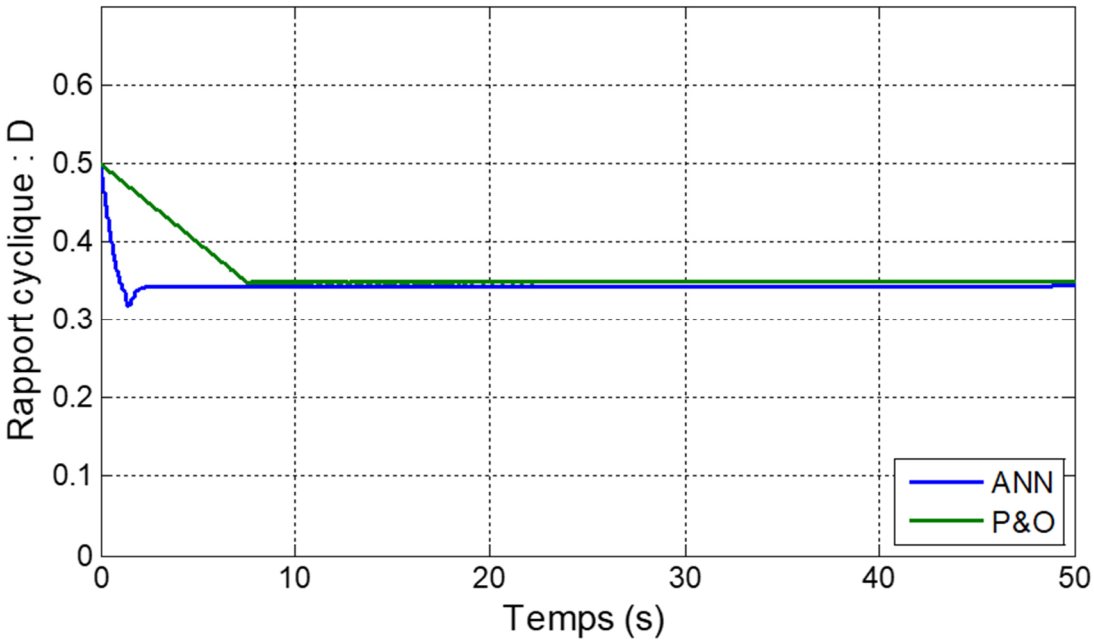


Figure III.25 : Rapport cyclique en fonction du temps.

La Figure (III.26) montre les deux tensions d'entrée V_{in} et de sortie V_{out} de l'hacheur boost en fonction du temps avec le contrôleur P&O. Nous constatons que :

- La tension d'entrée V_{in} s'augmente avec le lancement de la simulation jusqu'à la valeur V_{MPP} qui est égal à 16,395 V, tandis que la tension de sortie V_{out} s'augmente jusqu'à la valeur 25,215 V ;
- Le temps de réponse est le même qu'on a trouvé pour la puissance (cas de P&O).

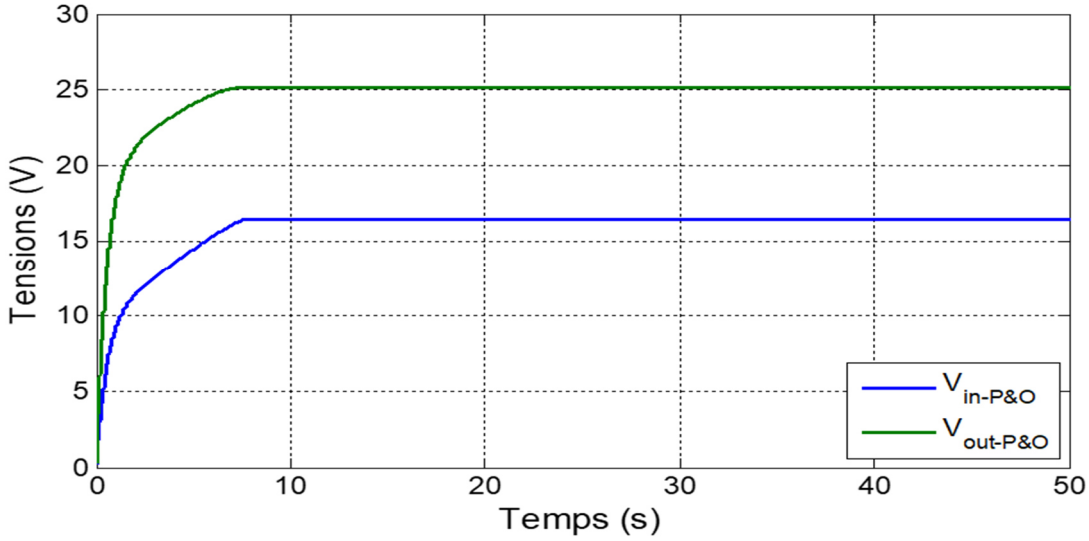


Figure III.26 : Tensions d'entrée et de sortie de l'hacheur avec MPPT-P&O en fonction du temps.

La Figure (III.27) montre les deux tensions d'entrée V_{in} et de sortie V_{out} de l'hacheur boost en fonction du temps avec le contrôleur ANN. Nous constatons que :

- La tension d'entrée V_{in} s'augmente avec le lancement de la simulation jusqu'à la valeur V_{MPP} qui est égal à 16,536 V, tandis que la tension de sortie V_{out} s'augmente jusqu'à la valeur 25,211 V ;
- Le temps de réponse est le même qu'on a trouvé pour la puissance (cas de ANN).

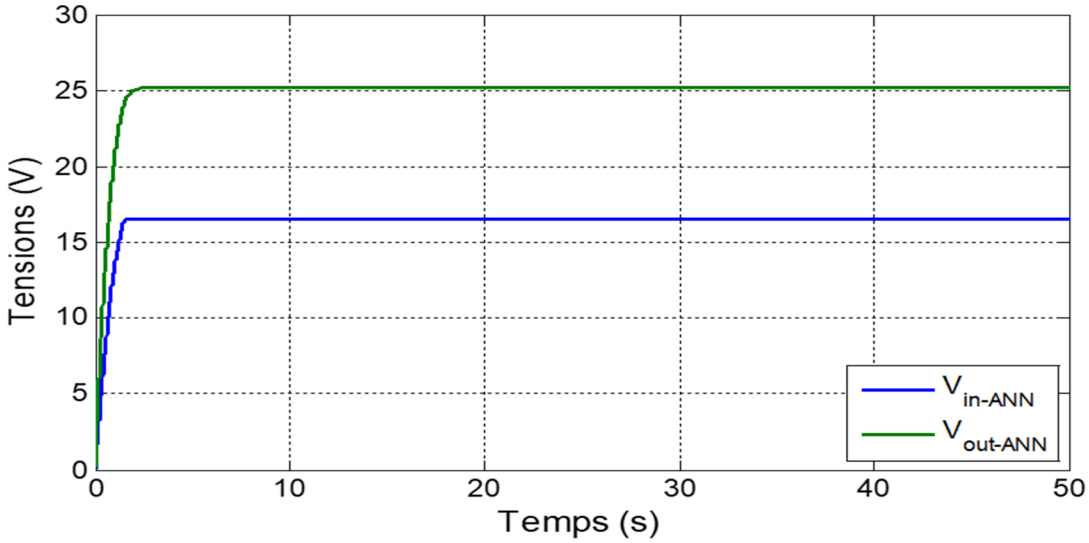


Figure III.27 : Tensions d'entrée et de sortie de l'hacheur avec MPPT-ANN en fonction du temps.

Les Figures (III.28) et (III.29) montrent l'influence de l'irradiation solaire sur la puissance PV P_{PV} et sur le courant PV I_{PV} en gardant la température fixe (25 °C) et en variant l'éclairement. Nous constatons que :

- On peut le voir dans les deux figures qu'une perturbation dans un sens conduira à un point de fonctionnement loin de la réalité du MPPT. Ce processus continue jusqu'à ce que la diminution de l'insolation ralentit où se termine ;
- Dans un environnement de l'évolution rapide des conditions atmosphériques et des changements fréquents des niveaux d'ensoleillement (de 1000 W/m^2 à 700 W/m^2 puis à 400 W/m^2), cette déviation du MPPT peut causer des pertes importantes de puissance ;
- La diminution des courbes du courant PV I_{PV} est strictement proportionnelle avec celle de l'irradiation solaire G ;

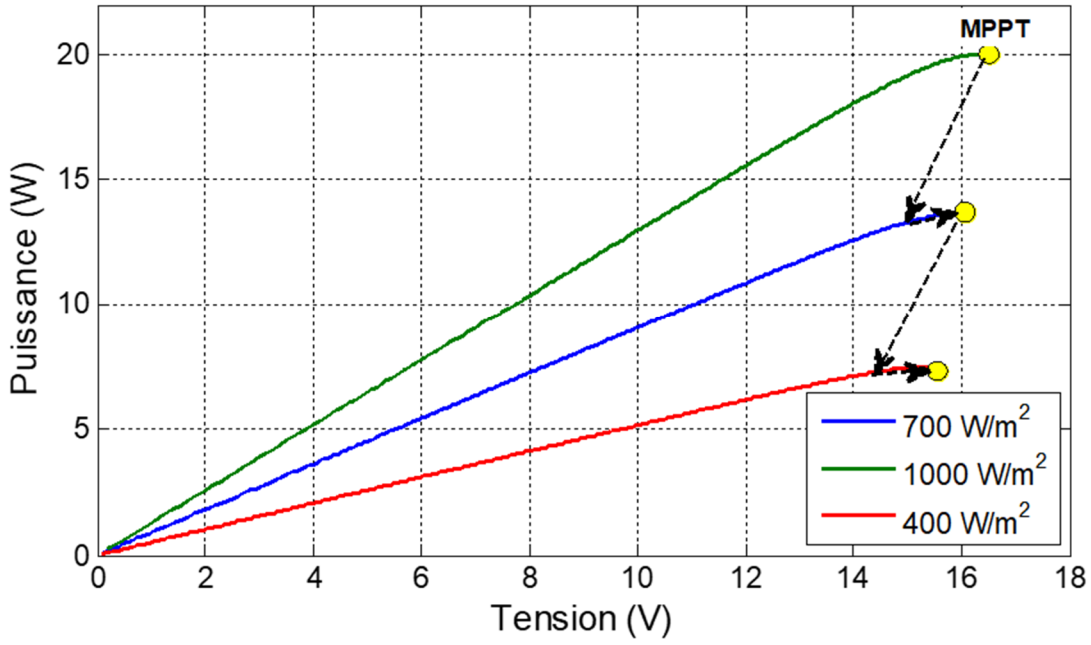


Figure III.28: Puissance en fonction de la tension (T=25 °C et G variable).

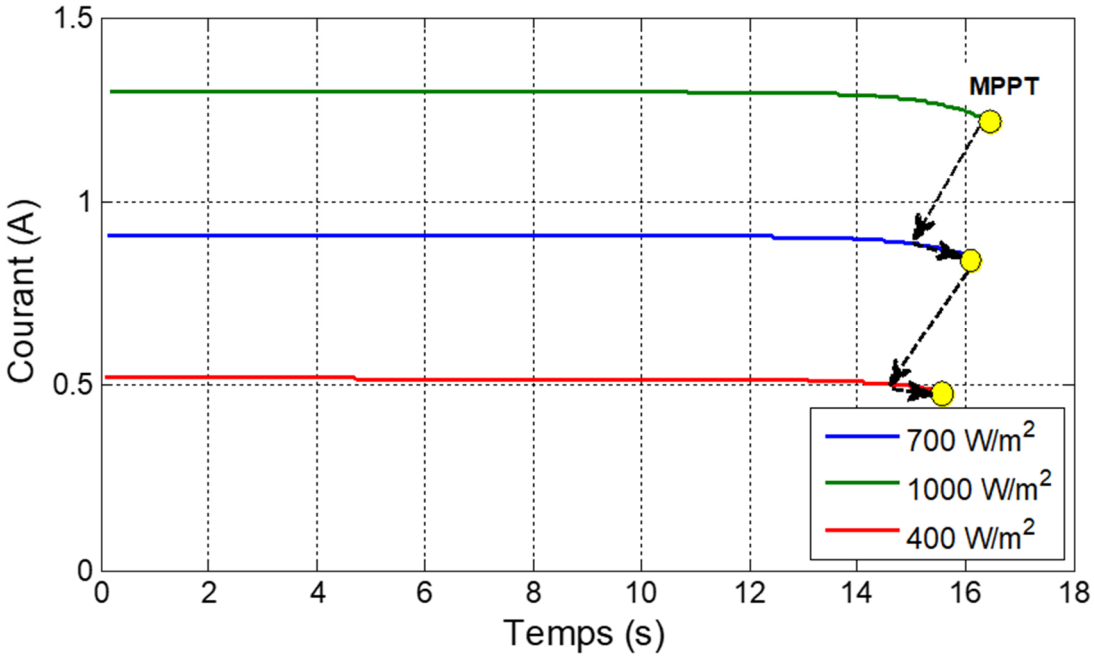


Figure III.29 : Courant en fonction de la tension (T=25 °C et G variable).

L'efficacité des panneaux solaires peut varier considérablement entre les environnements chauds et froids en raison de l'influence de la température sur les performances des cellules photovoltaïques (PV). Comprendre ces différences est essentiel pour évaluer l'adéquation des panneaux photovoltaïques à différents climats et optimiser la production d'énergie.

Les Figures (III.30) et (III.31) montrent l'influence de l'irradiation solaire sur la puissance PV P_{PV} et sur le courant PV I_{PV} en gardant la température fixe (25 °C) et en variant l'éclairement. Nous constatons que :

- Quand la température s'augmente, la tension de sortie d'un panneau solaire diminue (environ - 2.2 mV/°K, soit une variation relative de -0.4 %/°K) ;
- Le photo-courant s'augmente de l'ordre de 25 µA /cm². °K, ce qui traduit au total par une baisse relative de la puissance disponible de -0.35 % / °K.

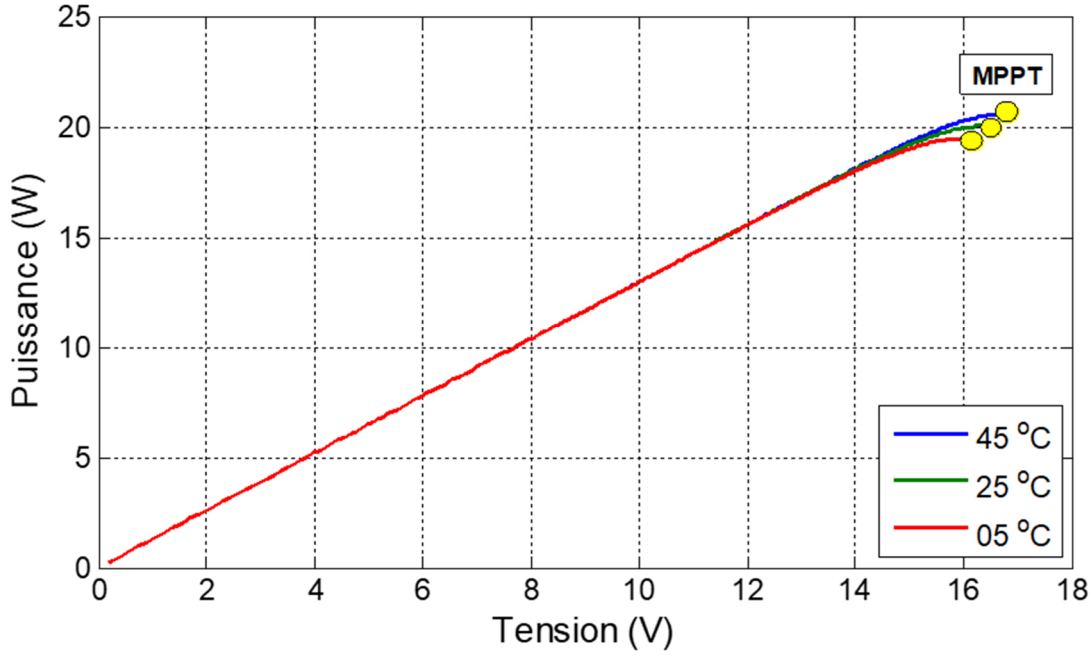


Figure III.30: Puissance en fonction de la tension (G=1000 W/m^2 et T variable).

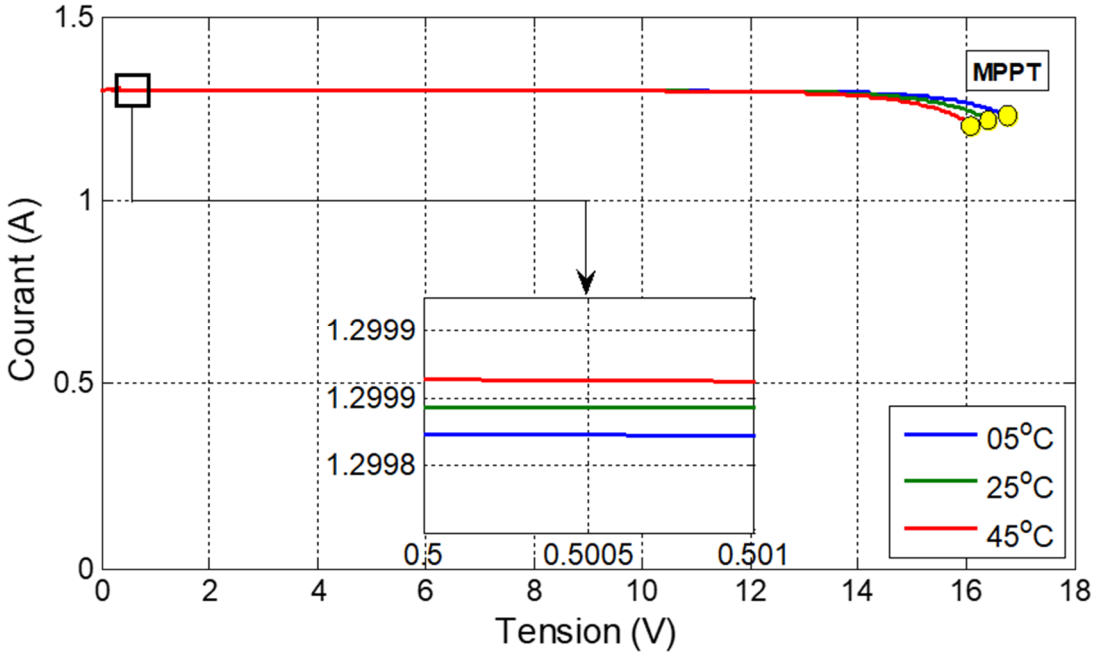


Figure III.31 : Courant en fonction de la tension (G=1000 W/m^2 et T variable).

III.7 Conclusion

Cette étude met en évidence les avantages apportés par la technique du Réseau Neuronal Artificiel pour le suivi de la puissance maximale dans un système solaire autonome avec un convertisseur DC-DC Boost par rapport à l'approche P&O. L'ANN est robuste face aux changements de conditions météorologiques et aux environnements d'irradiation, démontrant la précision dans la détermination du point de puissance maximale. La meilleure performance dynamique du modèle ANN dans le suivi MPPT est une découverte cruciale. Grâce à sa formation et à sa connaissance intégrée des points de puissance maximale attendus qui correspondent aux apports environnementaux, l'ANN surpasse la technique P&O. Grâce à sa flexibilité accrue, le Réseau de Neurones Artificiels (ANN) peut suivre les changements du point de puissance maximale plus précisément et plus rapidement. En conséquence, en confirmant les avantages utiles de l'utilisation d'approches basées sur l'ANN dans les systèmes solaires autonomes.

CHAPITRE (IV)

Développement du Système par le circuit FPGA

IV.1 Introduction

Les progrès technologiques continus dans le domaine des circuits intégrés ont permis la réduction des coûts et de la consommation. Les circuits intégrés spécifiques ont permis une réduction de la taille des systèmes numériques ainsi que la réalisation de circuits de plus en plus complexes, tout en améliorant leurs performances et leur fiabilité. Aujourd'hui les techniques de traitement numérique occupent une place majeure dans tous les systèmes électroniques modernes grand public, professionnel ou de défense. De plus, les techniques de réalisation de circuits spécifiques, tant dans les aspects matériels (composants reprogrammables, circuits précaractérisés et bibliothèques de macrofonctions) que dans les aspects logiciels (placement-routage, synthèse logique) font désormais de la microélectronique une des bases indispensables pour la réalisation de systèmes numériques performants. Elle impose néanmoins une méthodologie de développement très structurée.

Les circuits FPGA (Field Programmable Gate Array) sont certainement les circuits reprogrammables ayant le plus de succès. Ce sont des circuits entièrement configurables par programmation qui permettent d'implanter physiquement, par simple programmation, n'importe quelle fonction logique. De plus, ils ne sont pas limités à un mode de traitement séquentiel de l'information comme avec les microprocesseurs ; et en cas d'erreur, ils sont reprogrammables électriquement sans avoir à extraire le composant de son environnement.

IV .2 Les circuits FPGA

Les FPGA sont des circuits à architecture programmable qui ont été inventés dans les années quatre-vingt par la société XILINX. Ils sont entièrement reconfigurables et ne demandent donc pas de fabrication spéciale en usine, ni de systèmes de développement coûteux, ceci permet de les reprogrammer à volonté afin d'accélérer notablement certaines phases de calculs. Un autre avantage de ces circuits est leur grande souplesse qui permet de les réutiliser à volonté dans des algorithmes différents en un temps très court (quelques millisecondes).

« Field Programmable Gate Array » ou réseau de portes programmable par l'utilisateur, c'estun ensemble de blocs logiques élémentaires que l'utilisateur peut interconnecter pour réaliser les fonctions logiques de son choix, on distingue deux types :

- FPGA à SRAM (Static Read Only Memory) : ou encore LCA (Logic Cell Array) introduiten 1985 par XILINX à base des cellules SRAM pour configurer les connexions entre les blocs logiques.

➢ FPGA à anti-fusible : programmables électriquement par l'utilisateur, non effaçables[11].

On peut utiliser les FPGA dans de nombreuses applications comme :

- ❖ Adaptation aux besoins rencontrés lors de l'utilisation.
- ❖ Fabrication de composants spéciaux en petite série.
- ❖ Les systèmes de commande à temps réel.
- ❖ Prototypage de nouveaux circuits.
- ❖ DSP (Digital Signal Processor).
- ❖ Dans l'imagerie médicale.

IV.3 L'architecture des circuits FPGA

Les circuits Field Programmable Gate Arrays - FPGAs sont des circuits FPD, construits autour d'une matrice régulière constituée d'un grand nombre des cellules logiques élémentaires programmables appelées CLB, et les cellules d'entrées/sorties appelées IOB [26], ces différentes cellules sont reliées entreelles par un réseau d'interconnexions configurable Donc les trois blocs principaux sont les blocs logiquesconfigurables, les blocs d'entrées/sorties et les ressources de communications.

La disposition des différents éléments qui composent un circuit est illustrée schématiquement à lafigure IV.1.

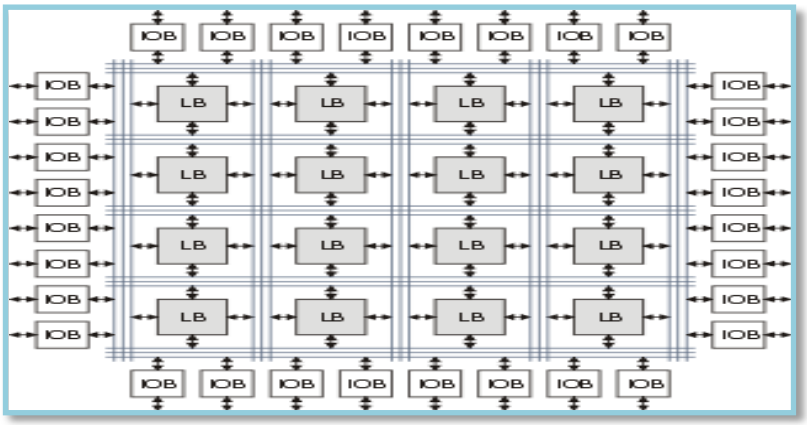


Figure IV.1 : Architecture des circuits FPGA. [26]

IV.3.1 les blocs logiques CLBs

Une cellule logique de base se compose toujours de quelques mots d'un bit, généralement quelques bits d'adresse.

Ces mémoires sont destinées à stocker la différence réelle des fonctions logiques définies par le circuit à générer. Chaque cellule logique est également équipée de stabilisateurs bidirectionnels programmables pour réaliser des circuits synchrones. [26]

L'architecture d'une cellule logique élémentaire varie d'un concepteur et d'une famille de FPGA à l'autre, Il existe 4 types de blocs logiques :

- Les macro-cellules.
- Les blocs à multiplexeurs.
- Les LUT.
- Les cellules symétriques.

IV.3.2 Les blocs d'entrée/sortie

Ces blocs d'entrée/sortie ou IOB (Input Output Bloc) permettent l'interface entre les broches du composant FPGA et la logique interne développée à l'intérieur du composant. Ils sont présents sur toute lapériphérie du circuit FPGA.

Les IOB permettent de connecter la logique interne aux entrées et sorties du FPGA. Les IOBs ont leur propre mémoire de configuration, elles stockent les standards de tension et la direction des ports. Ces blocs sont présents sur tous les périphériques FPGA. Chaque bloc IOB contrôle une broche du composant et peut être reconfiguré comme entrée ou sortie, bidirectionnelle ou inutilisée (haute impédance). [27]

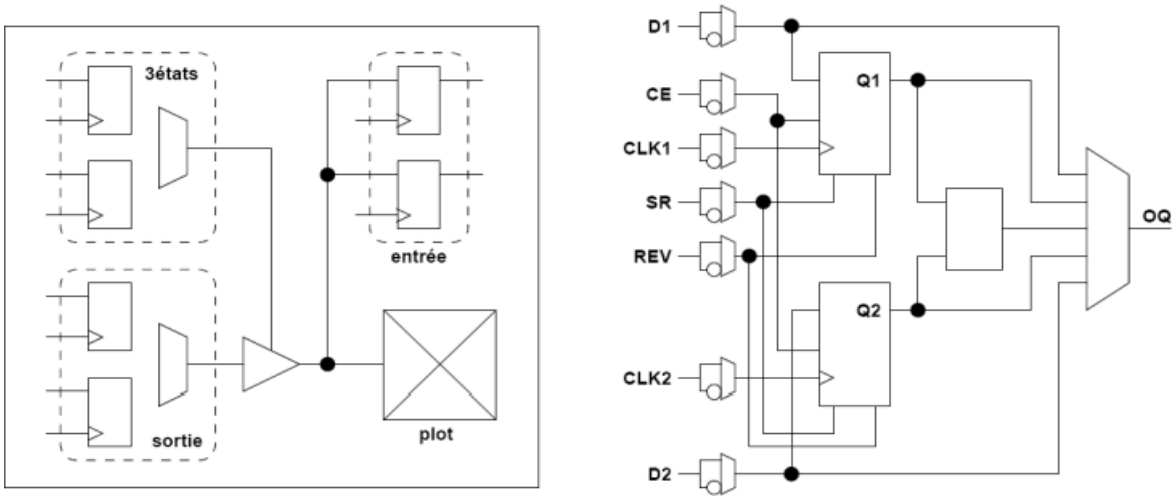


Figure IV.2 : Schéma d'un bloc d'entrée/sortie (IOB) [28].

IV.3.3 le réseau d'interconnexions dans un circuit FPGA [29]

Les ressources d'interconnexion au sein d'un FPGA permettent la connexion arbitraire des CLBet des IOB. Les connexions internes dans les circuits FPGA sont composées de segments métallisés.

Parallèlement à ces lignes, nous trouvons des matrices programmables réparties sur la totalité du circuit, horizontalement et verticalement entre les divers CLB. Elles permettent les connexions entre les diverses lignes, celles-ci sont assurées par des transistors MOS dont l'état est contrôlé par des cellules de mémoirevive ou RAM. Le rôle de ces interconnexions est de relier avec un maximum d'efficacité les blocs logiques et les entrées/sorties afin que le taux D'utilisation dans un circuit donné soit le plus élevé possible.

Il existe trois type d'interconnections entre les différents blocs des circuits FPGA comme lemontre la Figure

- **Interconnexion directe**

Ces interconnexions permettent l'établissement des liaisons entre les CLB et les IOB. Il est possibleaussi de connecter directement certaines entrées d'un CLB aux sorties d'un autre.

- **Interconnexions par le biais d'une matrice**

Ce sont des aiguilleurs situés à chaque intersection. Leur rôle est de relier les longues lignes médianesdans différentes configurations. Ces interconnexions sont utilisées pour relier un CLB à n'importe quel autre CLB sur le FPGA pour assurer la communication des signaux. Pour éviter l'affaiblissement des signaux traversant les longues lignes, des buffers sont

implantés dans chaque matrice d'interconnexion.

o **Les longues lignes**

Ils surpassent le FPGA dans toute sa longueur et sa largeur, et permettent une transmission de signalavec retard entre différents éléments pour obtenir la synchronisation la plus parfaite possible.

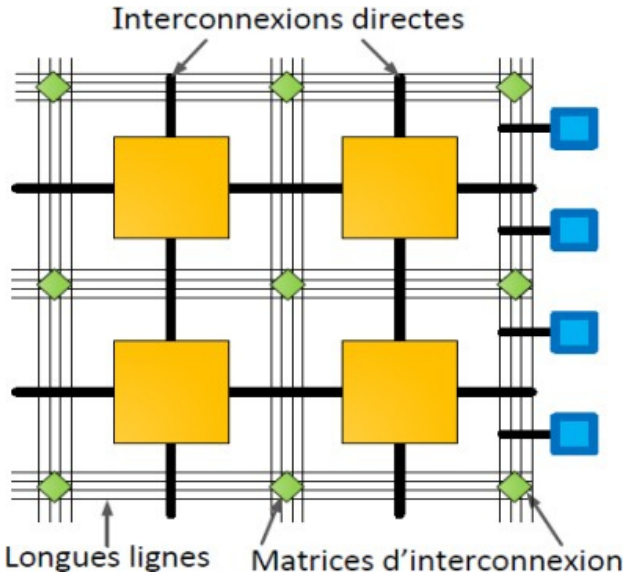


Figure IV.3 : interconnexion interne d'un FPGA.

V.4 Méthode de programmation

Il existe un bon nombre de langage HDL (Hardware Description Language), bien que très différents du point de vue syntaxique, répondent aux des besoins similaires. [11] Parmi eux :

- **VHDL** : VHDL est le sigle de VHSIC HDL ; (Very-High-Speed Integrated Circuits), une initiative de la Défense américaine dans les années 1980 visant la construction de circuits intégrés très rapides. Le VHDL est un langage de description du matériel utilisé en électronique et en tant que standard, il est indépendant du logiciel utilisé pour la compilation, la programmation des composants, la simulation, etc.
- **Verilog** : il a été inventé par Gateway Design Automation Inc en 1984. La syntaxe de verilog est proche du langage de programmation C, ce qui explique en partie son succès et sa diffusion rapide dans la communauté des ingénieurs qui ont déjà appris le langage C.

- **XSG** : pour (Xilinx System Generator) est un plug-in pour MATLAB/SIMULINK qui permet aux ingénieurs de développer des systèmes DSP de hautes performances pour les FPGAs de Xilinx. Les ingénieurs peuvent concevoir et simuler un système utilisant MATLAB/SIMULINK et la bibliothèque de Xilinx, L'outil génère ensuite automatiquement unCode HDL synthétisable mappé à des algorithmes pré-optimisés de Xilinx.
- **Saisie de schéma** : La saisie de schéma à partir de cellules de base permet un développement " bas niveau " qui rend difficile la réalisation de circuits complexes où chaquechangement ou amélioration remet en cause toute la description. Cette contrainte a conduità étudier des techniques de génération de circuits à partir de spécifications de " haut niveau" tel que le VHDL.

IV.5 Simulation temporelle

Elle consiste à faire une simulation en prenant compte les contraintes de fonctionnement ainsi que des composants à utiliser. Après cette vérification le programme peut être implémenté sur FPGA et tester.

IV.5.1Outils de conception par le XSG

Pour avoir la possibilité de faire la conception hardware des systèmes sous l'environnement MATLAB/SIMULINK, XILINX a développé un Toolbox spécifique qui est intégré dans le Simulink, Cette Toolbox contient les bibliothèques suivantes :

- Xilinx Blockset.
- Xilinx Référence Blockset.
- Xilinx Xtreme DSP Kit.
- XP Target.

VI.5.2La communication entre les blocs SIMULINK et les blocs XSG

Étant donné que les données des deux environnements Simulink et XSG sont de forme Différent il doit y avoir certain protocole de communication entre eux. En effet, les signaux dans Simulink sont de type à virgule flottante (double), tandis qu'ils sont de type à virgule fixe (Point fixe) dans le XSG. Pour assurer la communication, certains genres de convertisseurs Sont utilisés. Il existe deux convertisseurs ou ' *Gateway* '.

- ***Gateway-IN*** : c'est un convertisseur analogique numérique (double=>fixe), Permettent le passage de Simulink vers l'environnement XSG.il faut bien spécifier le Nombretotal de bits et la position du point fixe.
- ***Gateway-out*** : c'est un convertisseur numérique analogique (fixe=>double), Permettent le passage de l'environnement XSG à l'environnement Simulink.

IV.6 La simulation de commande MPPT sous système génération

Dans le cadre de cette simulation, de commande MPPT (P&O), le développement de ce prototype s'effectue avec le logiciel System Generator (XSG). Il s'agit d'un toolbox développé par XILINX pour être intégré dans l'environnement MATLAB /SIMULINK et qui laisse l'usagercréer des systèmes hautement parallèles pour FPGA. Les modèles créés sont affichés sous forme de blocs, et peuvent être raccordés aux autres blocs et autres toolbox de MATLAB/Simulink. Une fois le système complété, le code VHDL est générée par l'outil XSG est reproduit exactement le même comportement observé dans MATLAB. Le choix de cet outil est facilement explicable car Le système de contrôle est vérifié et simulé souvent et rapidement pendant tout le développement, il est beaucoup plus simple d'analyser les résultats avec MATLAB qu'avec les outils habituellement associés au VHDL, tel que Modelsim (ISE) de XILINX.

Pour assurer que notre commande marche d'une manière correcte sous XSG il faut que les courbes et les résultats obtenue de la simulation, sont exactement les même de celle de la simulation sous MATLAB/Simulink.

LA figure (VI.4) représente l'architecture du contrôleur MPPT (P&O) dans l'environnent XSG.

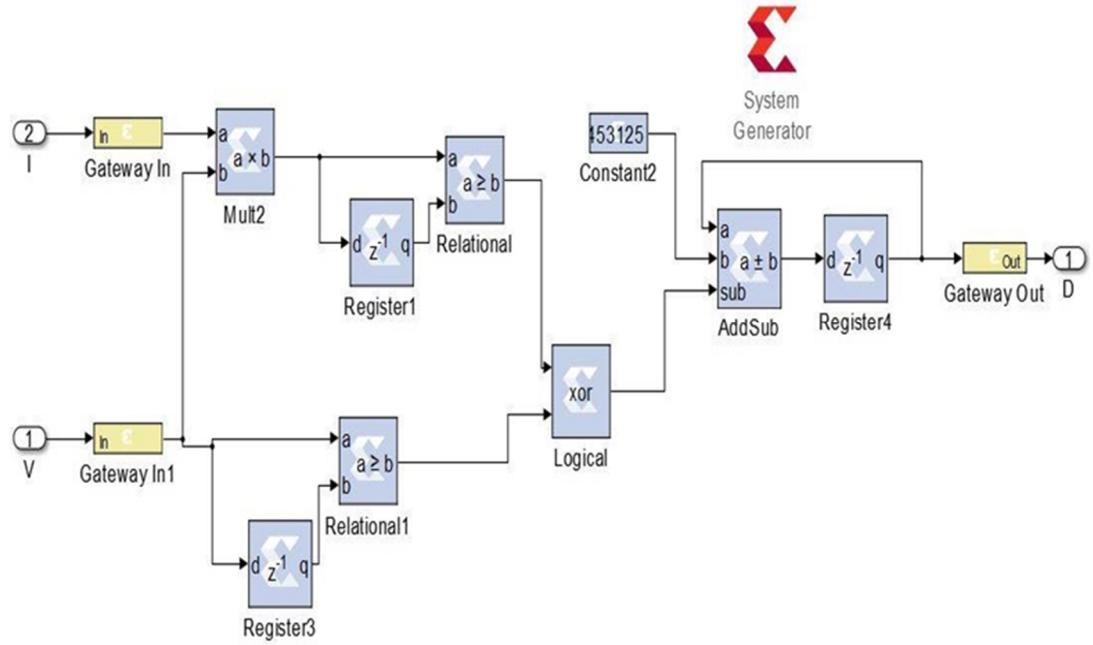


Figure IV.4 : Architecture du contrôleur MPPT (P&O) adopté dans l'environnement XSG.

Le MPPT P&O fournit le rapport cyclique en tant que sortie. Ce rapport cyclique est ensuite converti en impulsions de commutation à l'aide d'un générateur PWM. Le générateur PWM compare le rapport cyclique avec une forme d'onde en dent de scie et génère en sortie l'impulsion de commutation correspondant au rapport cyclique. Le générateur PWM développé dans MATLAB à l'aide du jeu de blocs Xilinx est représenté dans la Figure IV.5.

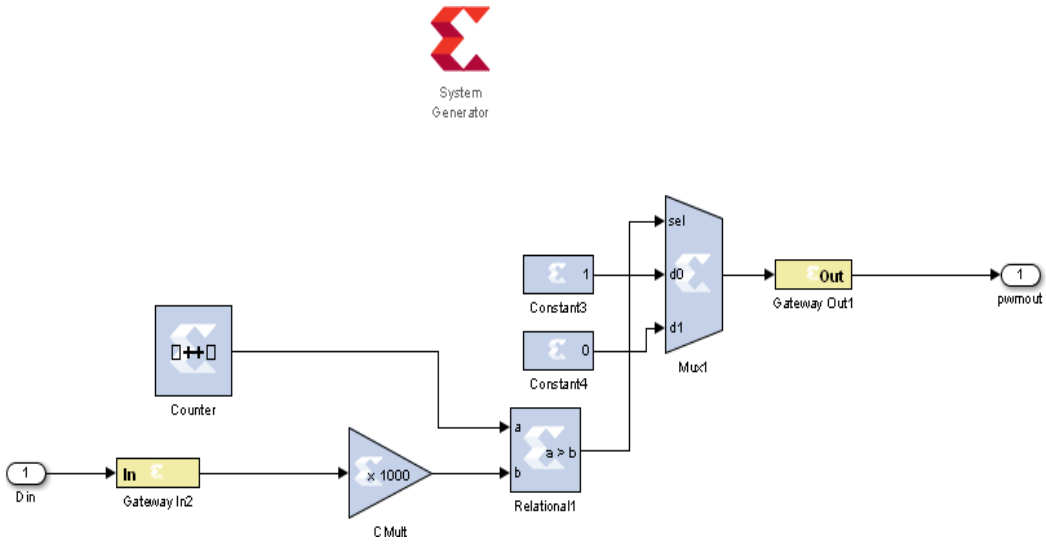


Figure IV.5 : Générateur de PWM utilisant Xilinx Blockset.

IV.7 Avantages et inconvénients des FPGA

IV.7.1 Avantages

- Facile à maîtriser.
- Reprogrammable.
- Coût potentiellement élevé.
- Reconfiguration en temps réel.
- Idéal pour le prototypage.

IV.7.2 Inconvénients

- Performance non optimale.
- Temps de réponse plus long par rapport aux ASIC.
- Rapidité limitée par le parallélisme comparé aux circuits numériques.

IV.8 Réalisation et implémentation de PandO dans un circuit FPGA

IV .8.1 Logiciels et outils utilises

Chaque étape du développement d'un projet sur FPGA nécessite un outil logiciel différent.

Nous allons présenter brièvement les outils et logiciels utilisés dans ce projet (figure IV.11)

Xilinx ISE 14.5

Ce logiciel offre un environnement convivial et regroupe tous les outils nécessaires à la réalisation des différentes étapes du projet. Le code VHDL des différents modules est saisi dans un éditeur de texte. L'étape de synthèse est réalisée par l'outil XST, l'étape de placement et routage par l'outil FPGA Editor et l'étape de configuration du composant par l'outil iMPCAT. Xilinx ISE permet ainsi de suivre l'évolution du projet étape par étape.

ModelSim Simulator

Ce logiciel permet de faire la simulation du design à différentes étapes du projet. Pour faire une simulation, on doit créer des fichiers test-bench, qui décrivent la variation des entrées du design dans le temps. La simulation permet de visualiser les sorties et de les comparer par rapport aux résultats attendus, afin de faire une première validation du design.

IV .9 implémentation de l'algorithmeP&O

IV.9.1 Schéma block

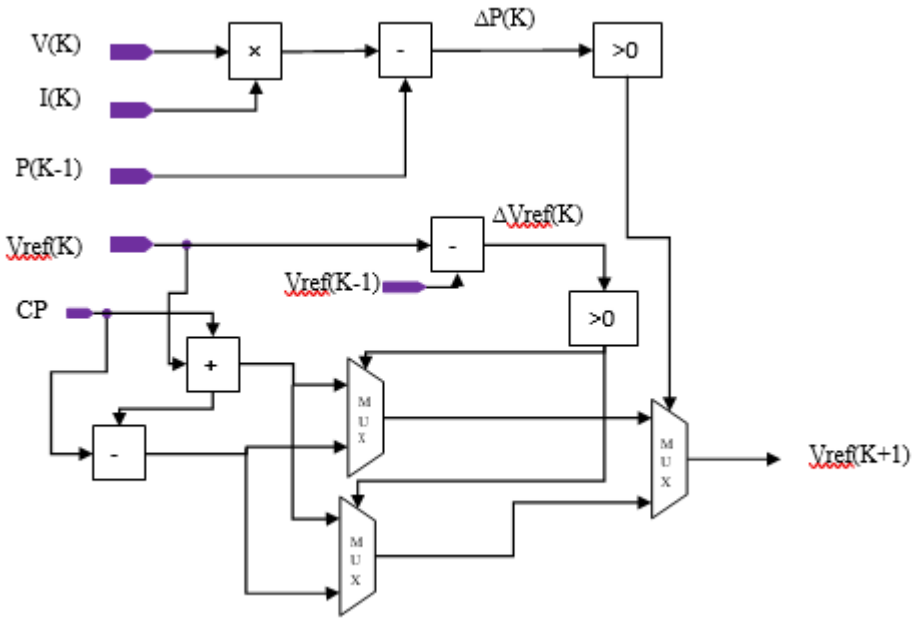


Figure IV.6 : Synoptique de l'application MPPT P&O.

IV.10 Conclusion

Ce chapitre offre un aperçu des circuits FPGA, incluant leur structure, leur principe de fonctionnement, leur programmation à travers le langage de description VHDL, ainsi que les étapes clés pour implémenter un circuit sur une cible FPGA. Nous avons également exploré les différents fabricants et domaines d'application de ces circuits. Cette approche nous permet de nous familiariser avec la technologie FPGA.

CHAPITRE (V)

Réalisation pratique

V.1 Introduction

Les modèles mathématiques du système photovoltaïque faites dans la théorie sont valides expérimentalement dans le laboratoire FPGA de l'université de Médéa.

Nous avons d'abord réalisé le convertisseur DC-DC boost, puis nous avons relevé les valeurs d'entrée et de sortie de l'hacheur. Enfin les différents cas du MLI.

V.2 Implémentation du système

Réalisation du convertisseur boost

Le tableau (V.1) montre la liste des composants utilisés dans la réalisation du convertisseur boost.

Tableau V.1: Liste des composants.

Nº	**Composant**	**Valeur**
1	Condensateur d'entrée *Cin*	470 µF
2	Condensateur de sortie *Cout*	222 µF
3	*L*, r	1,125 mH ; 348 mΩ
4	Diode *D*	D23E60
5	Transistor *T*	IRFZ44N
6	Charge résistive *R*	40 Ω

Le circuit du convertisseur DC-DC Boost illustré `a la figure (V.2), L'interrupteur statique, le transistor *T*, l'inductance *L,r*, la diode *D* et les condensateurs d'entrée *Cin et* de sortie *Cout* sont les principaux composants du convertisseur Boost qui alimente la charge résistive *R*. *Vm*, *Vref* et *Uc* respectivement sont la tension de mesure, la référence et le signal de commande.

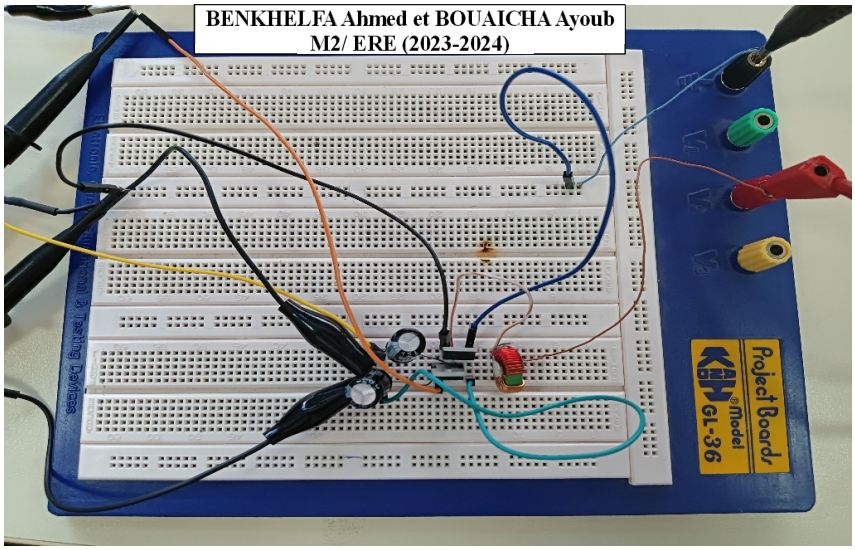


Figure V.2 : Hacheur boost.

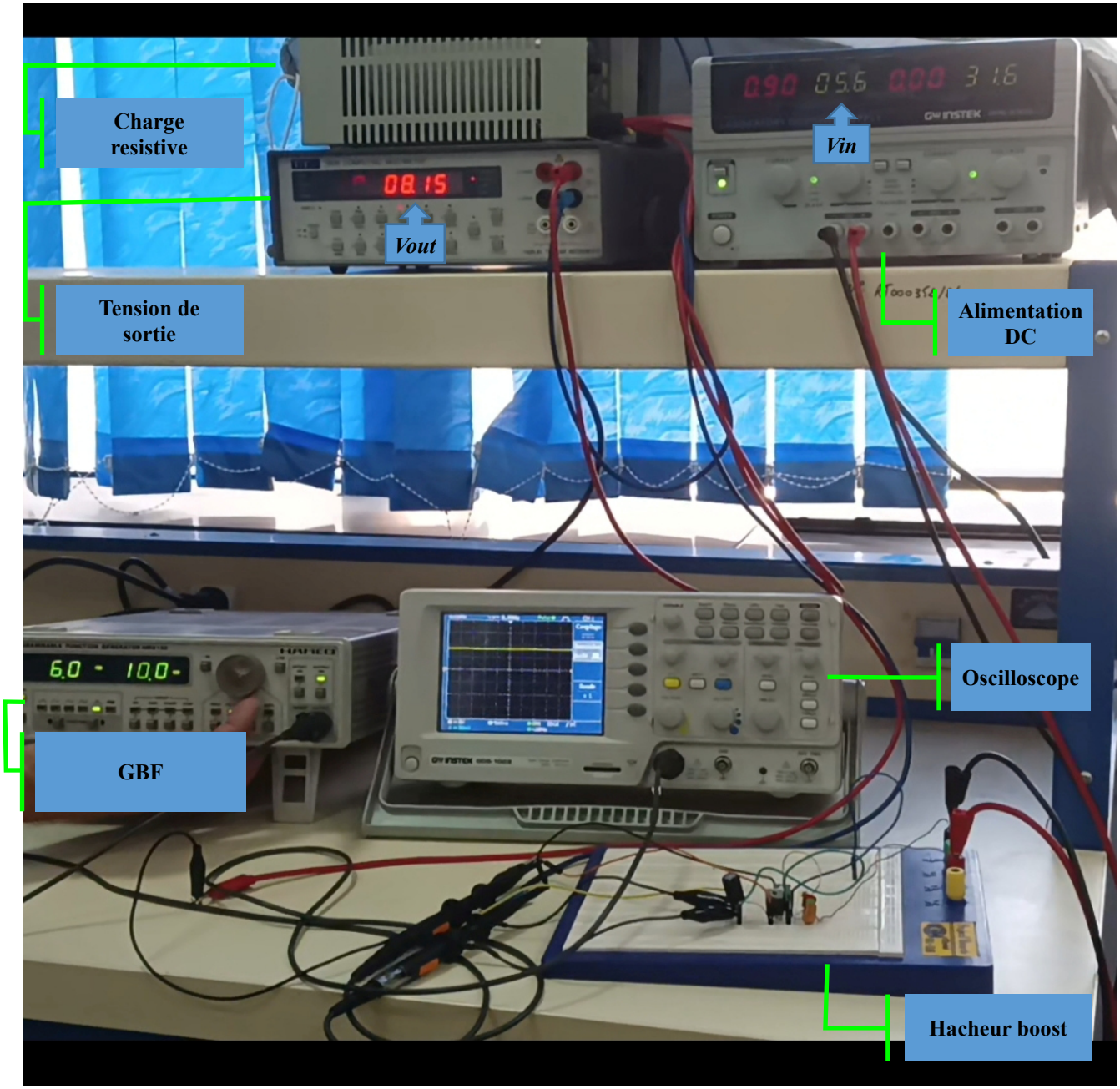


Figure V.3 : Implémentation expérimentale du convertisseur boost.

Signaux de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

Les figures (V.4), (V.5), et (V.6) représentent les signaux relevés par l'oscilloscope avec différents rapports cycliques et une fréquence de commutation suivante f = 17,3015 kHz.

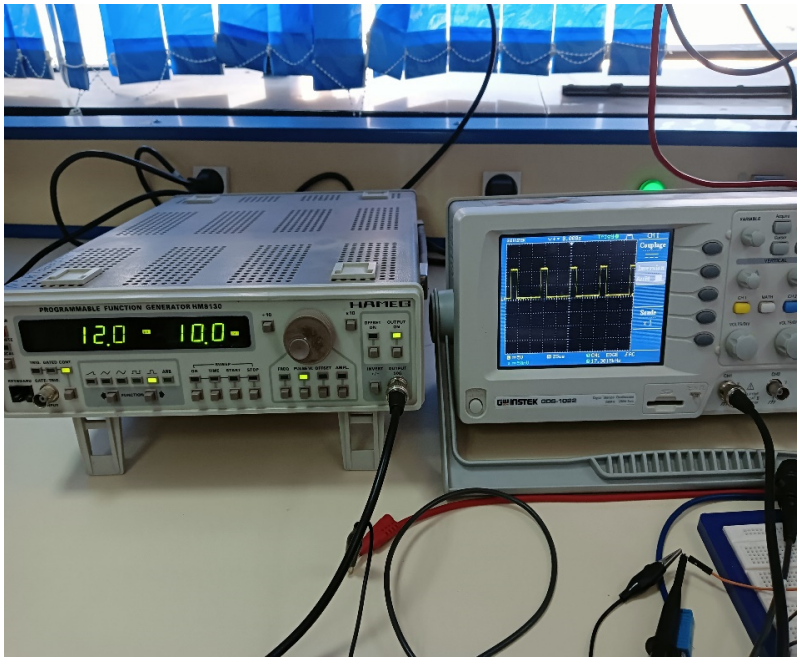


Figure V.4 : MLI avec α = 0,16.

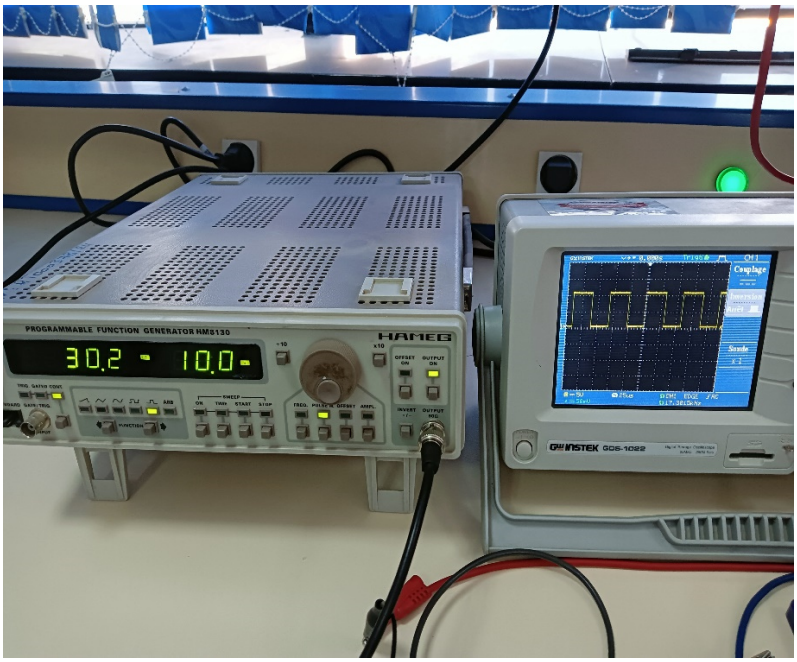


Figure V.4 : MLI avec α = 0,5.

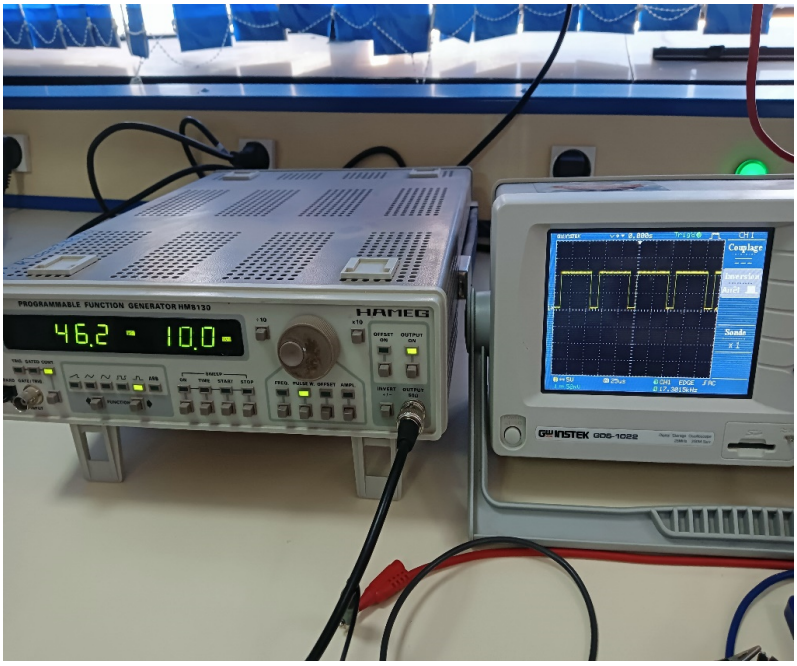


Figure V.4 : MLI avec α = 0,75.

CONCLUSION GENERAL

Conclusion générale

Ce projet a exploré l'efficacité des panneaux solaires à travers l'implémentation d'une méthode MPPT sur un circuit FPGA, une avancée significative dans le domaine des énergies renouvelables. L'objectif principal était d'optimiser la production d'énergie solaire en minimisant les pertes de puissance grâce à un contrôleur MPPT, essentiel pour suivre et maximiser le point de puissance maximale malgré les variations de charge et de conditions climatiques.

En commençant par une base théorique sur l'énergie photovoltaïque et la méthode MPPT P&O, cette étude a ensuite exploré les capacités des circuits FPGA. Les phases de synthèse, simulation, placement, routage et programmation ont été détaillées pour assurer une implémentation efficace de la méthode MPPT.

Les résultats de simulation ont validé la performance du contrôleur MPPT basé sur l'approche P&O, démontrant son efficacité non seulement dans la maximisation de la puissance mais aussi en termes de temps de réponse et de stabilité. L'utilisation d'un oscilloscope pour visualiser les signaux de sortie a confirmé la faisabilité et la précision des commandes MPPT.

Ce projet représente ainsi une introduction prometteuse au développement de solutions énergétiques durables utilisant des circuits FPGA. Il est espéré qu'il servira de ressource précieuse pour ceux intéressés par l'innovation technologique dans le domaine des énergies renouvelables, facilitant ainsi le développement de futurs travaux dans ce domaine crucial pour l'avenir énergétique mondial.

A.I.1 Modèle mathématique du module solaire

Les donnes standard $P_{max,0}^{M}$, $I_{CC,0}^{M}$, $V_{CO,0}^{M}$, N_S et N_P.

Les paramètres standard de la cellule :

$P_{max,0}^{C} = \frac{P_{max,0}^{M}}{N_S \cdot N_P}$: Puissance maximale de la cellule pour des conditions standard ;

$V_{CO,0}^{C} = \frac{V_{CO,0}^{M}}{N_S}$: Tension en circuit ouvert ;

$I_{CC,0}^{C} = \frac{I_{CC,0}^{M}}{N_P}$: Courant de court-circuit ;

$V_{th,0}^{C} = \frac{nkT_{Ck}}{q}$: Tension thermique ;

$V_{CO,0} = \frac{V_{CO,0}^{C}}{V_{th,0}^{C}}$;

;

$FF_0 = \frac{P_{max,0}^{C}}{V_{CO,0}^{C} \cdot I_{CV,0}^{C}}$;

$R_S = (1 - FF)FF_0$;

$R_S^C = R_S \frac{V_{CO,0}^{C}}{I_{CC,0}^{C}}$.

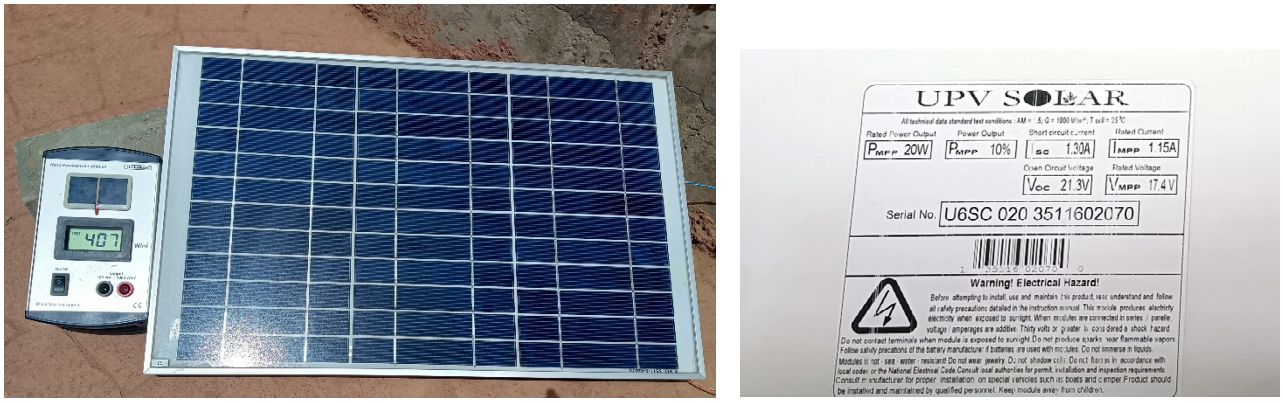
Le courant du panneau en fonction de la tension pour les conditions opérationnelles :

$$I^M = N_P I_{CC}^{C} \left[1 - e^{\frac{V^M - N_S V_{CO}^{C} + I^M R_S^C \frac{N_S}{N_P}}{N_S V_{th}^{C}}} \right]$$

A.I.2 Implémentation de différents modèles par le Simulink

A.I.2.1 Le module solaire photovoltaïque

La figure (A.1) montre le module solaire photovoltaïque utilise dans la simulation du système.



(a) (b)

Figure A.1 : Module solaire (a) et ses caractéristiques (b).

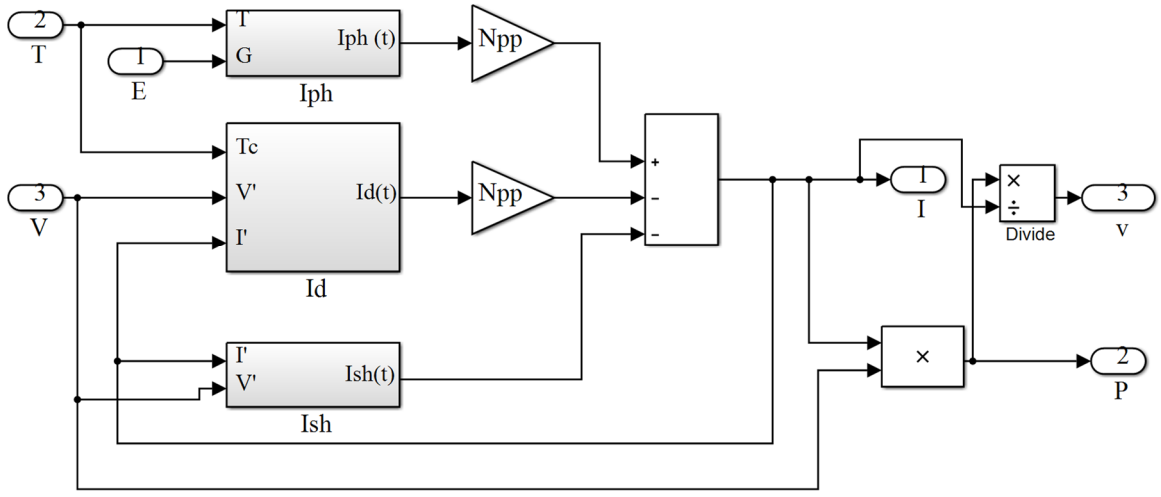


Figure A.2 : Modèle Simulink du Module Photovoltaïque.

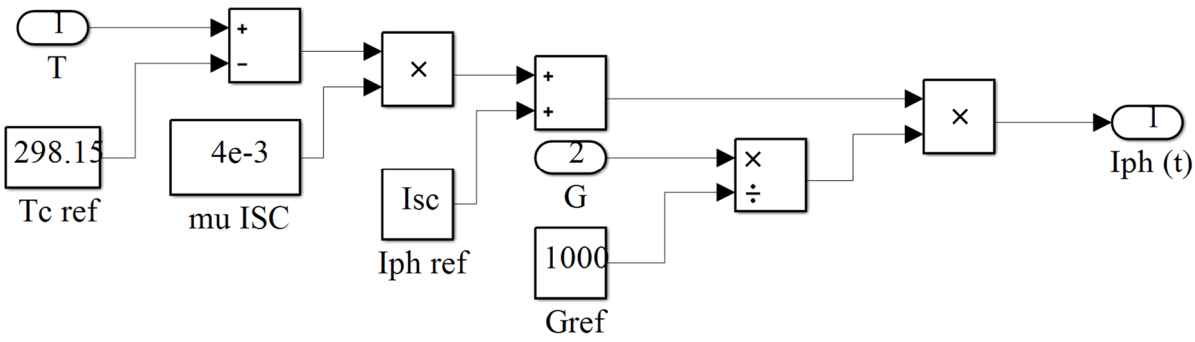


Figure A.3 : Photo-courant en fonction de la température et de l'irradiation solaire.

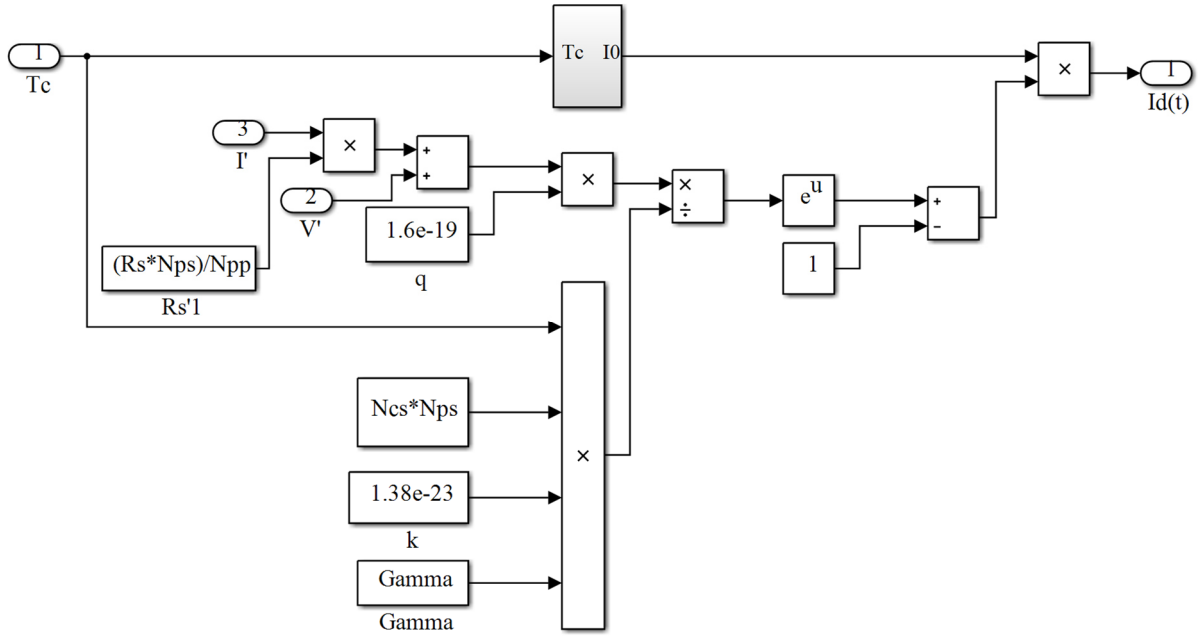


Figure A.4 : Courant de diode.

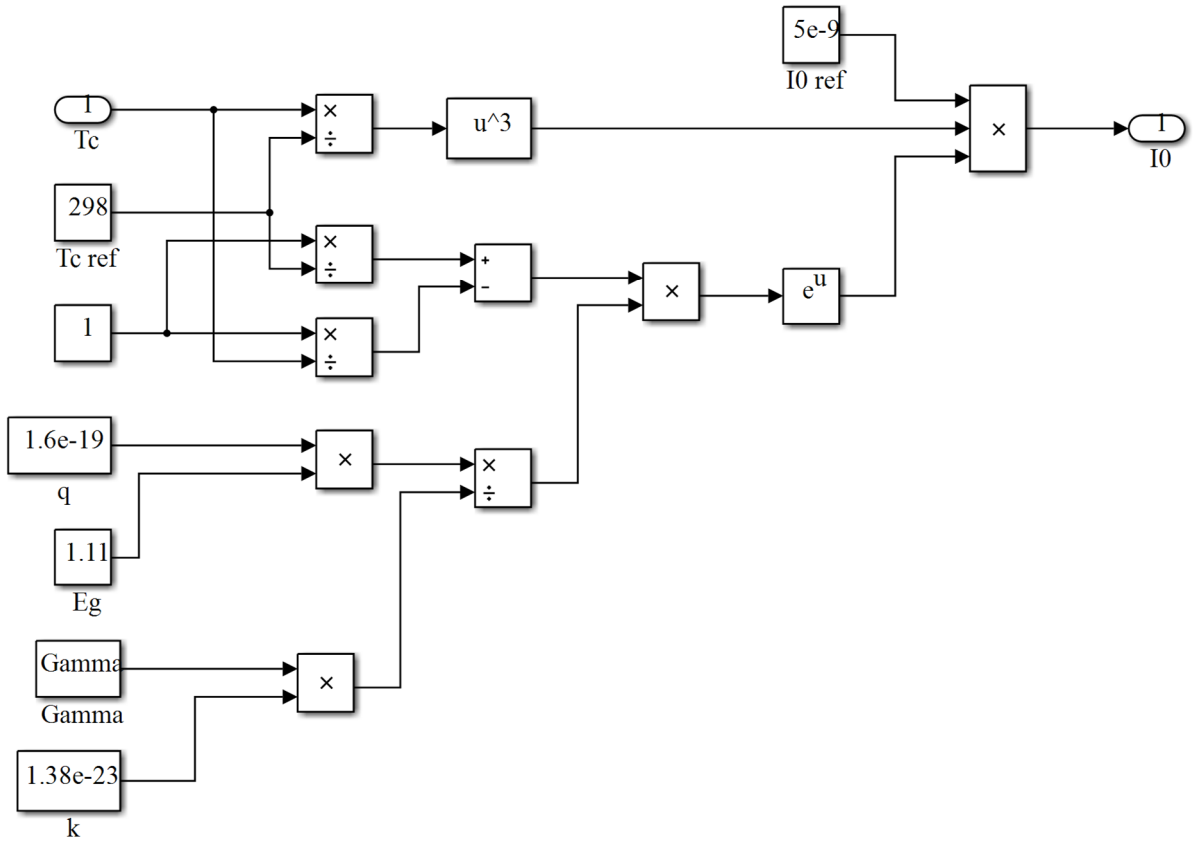


Figure A.5 : Courant de saturation.

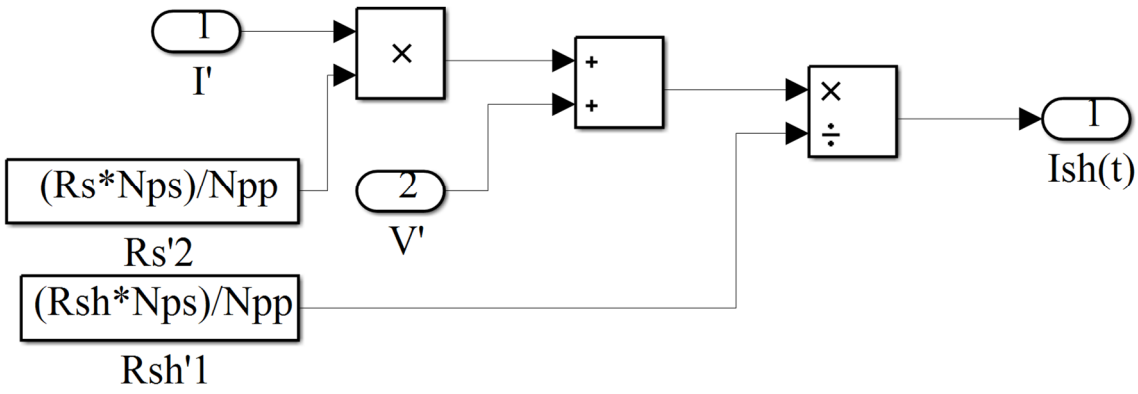


Figure A.6 : Courant parcouru la résistance shunt.

A.I.2.2 Le contrôleur MPPT (Perturbation et Observation – P&O)

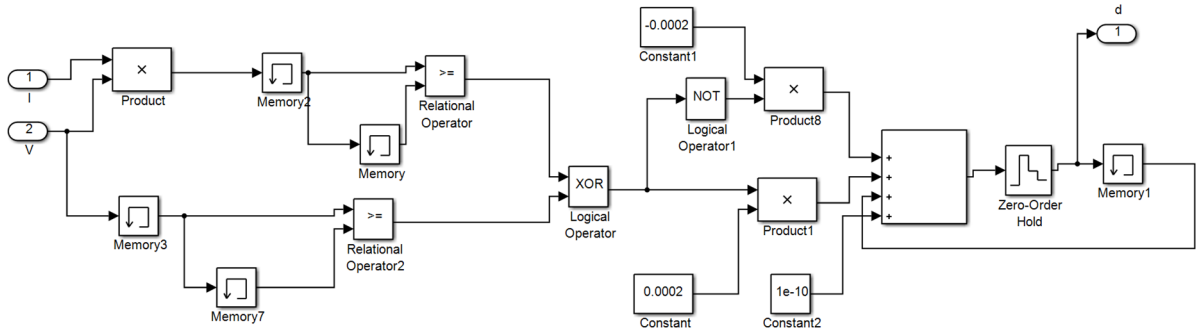


Figure A.7 : Le contrôleur MPPT (P&O).

A.I2.3 Le convertisseur DC-DC (Hacheur boost)

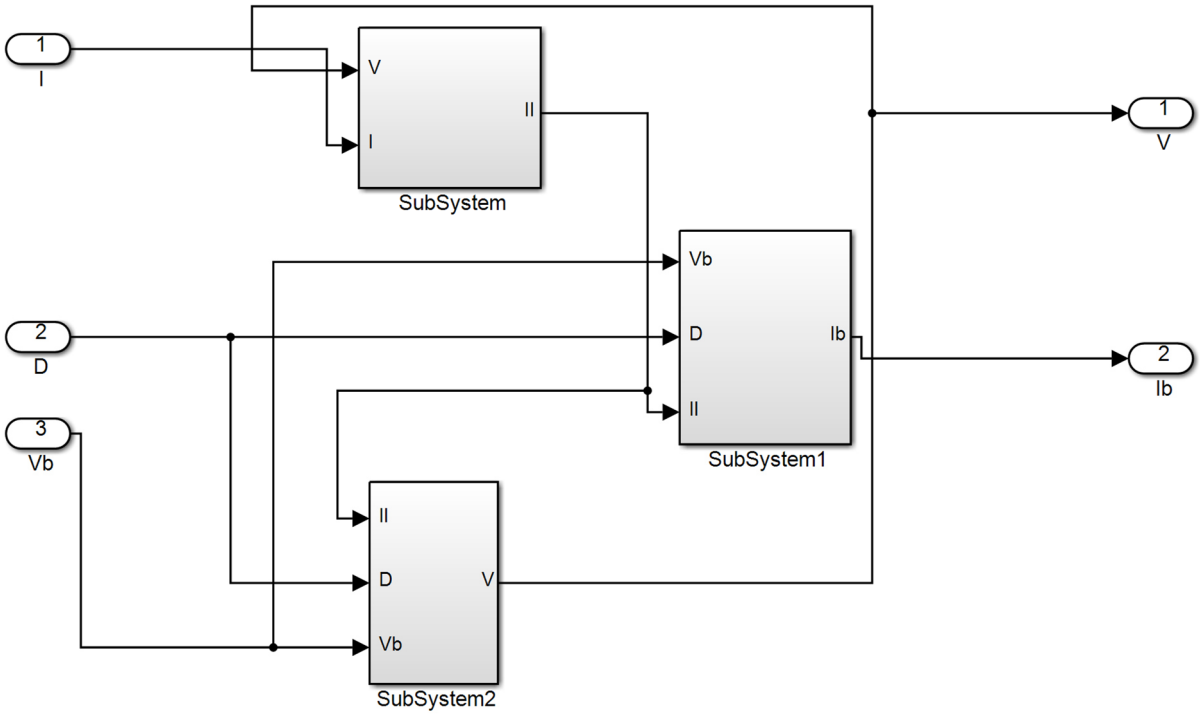


Figure A.8 : Modèle Simulink du convertisseur Boost.

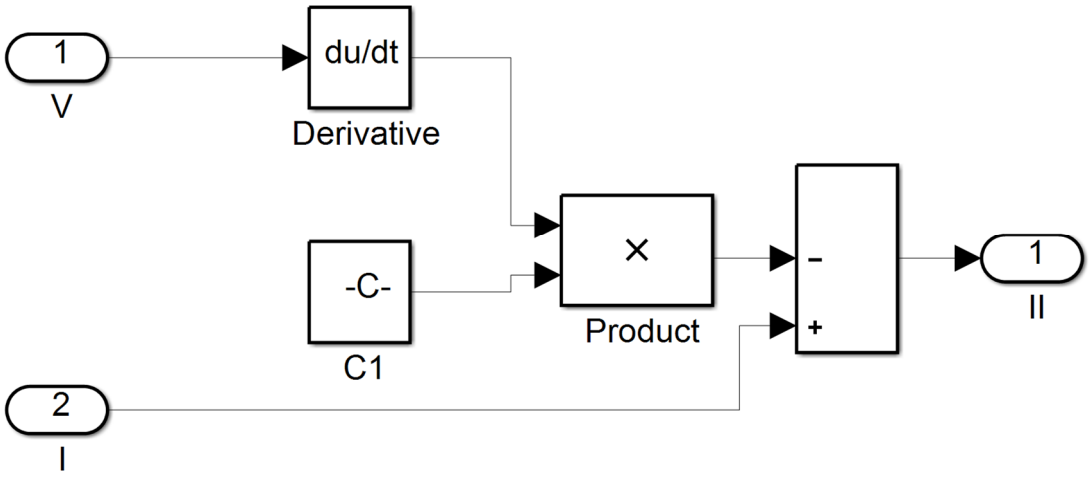


Figure A.9 : Courant de l'inductance.

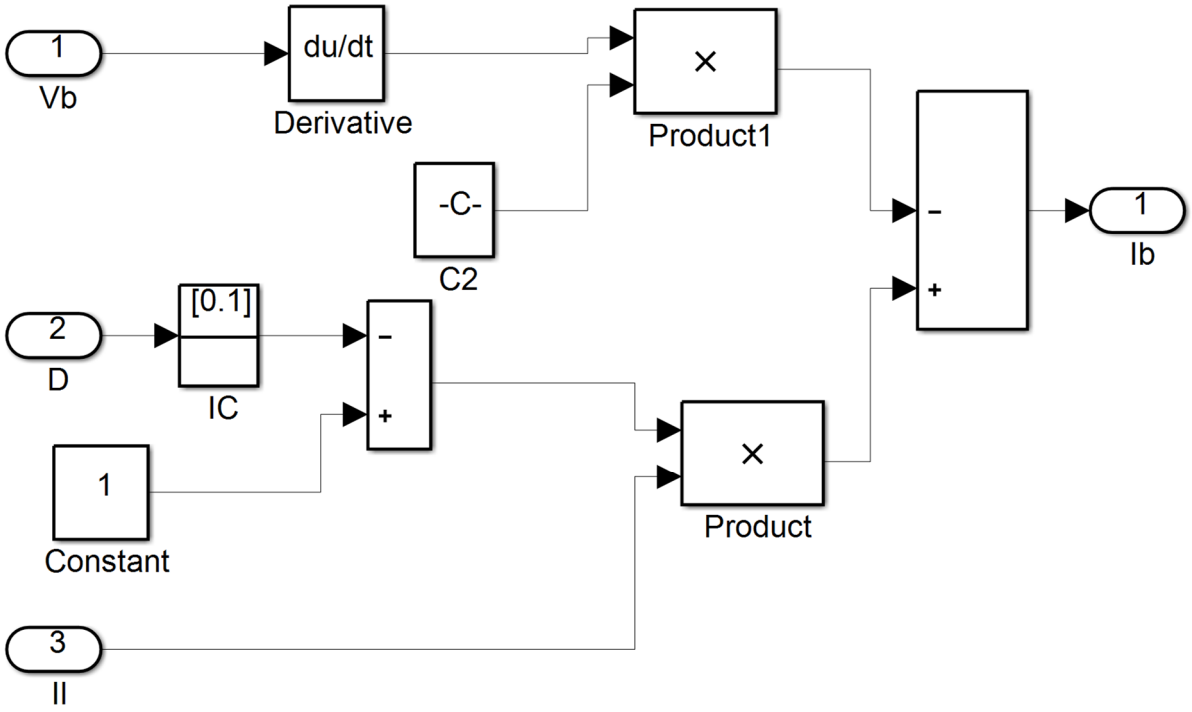


Figure A.10 : Courant de sortie de la batterie.

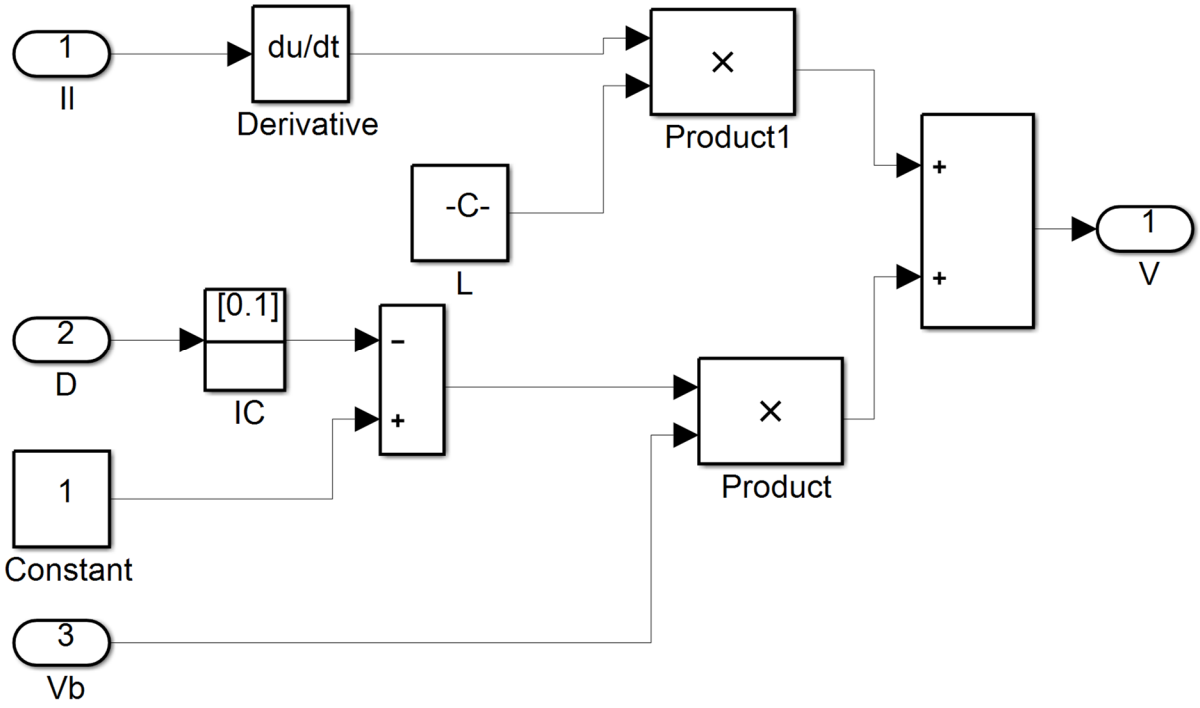


Figure A.11 : Tension d'entrée du convertisseur Boost.

A.I.2.4 La batterie

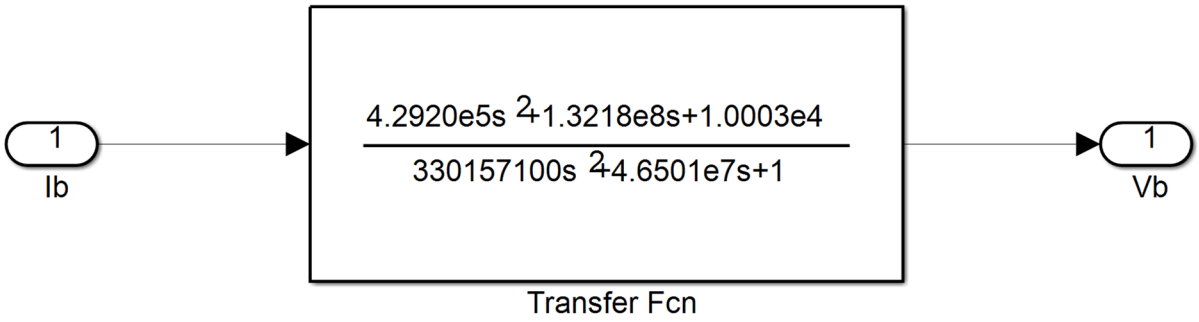


Figure A.12 : Fonction de transfert de la batterie.

ANNEXE II : Dimensionnement du système photovoltaïque

A.II.1 Dimensionnement de l'hacheur BOOST

Dans cette partie, nous allons voir comment choisir les éléments qui permettent de constituer et d'assurer le fonctionnement du système. Pour dimensionner les composants d'un convertisseur, il faut connaître la puissance d'entrée et la puissance de sortie souhaitée, le courant d'entrée et le courant de sortie, ainsi que la tension d'entrée.

Pe : Puissance d'entrée = 20 W ;

Ps : Puissance de sortie = 20 W ;

Ve : Tension d'entrée = entre 0 et 20 V ;

Vs = entre 20 V et 40 V ;

D : Rapport cyclique = entre 5 % et 95 %.

A.II.2 Dimensionnement de l'inductance

Le calcul de l'inductance débute par le calcul du courant d'entrée maximal.

On impose la fréquence de découpage en haute fréquence (20 kHz) et on vérifie si l'ondulation de courant est correcte en basse fréquence (20 kHz).

Calcul du courant d'entrée

$$I_e = \frac{P_e}{V_e} = \frac{20}{17.4} = 1.15A$$

Calcul du courant de sortie.

$$I_s = \frac{P_s}{V_s} = \frac{20}{34.8} = 0.5747A$$

ΔI_L=20 % Afin de diminuer les pertes par hystérésis [30].

$$\Delta I_L = 0.2 * I_s * \frac{V_s}{V_e} = 0.2 * 0.5747 * \frac{34.8}{17.4} = 0.23A$$

On dimensionne *L* ainsi :

$$\boldsymbol{L} = \frac{V_e.(V_s - V_e)}{\Delta I_L.f.V_s} = \frac{17.4 * (34.8 - 17.4)}{0.23 * 20000 * 34.8} = 1.89\boldsymbol{mH}$$

Après calcul, la self utilisée doit être au minimum 1.89 mH, l'inductance peut se trouver dans le marché ou bien être fabriquée, dans notre cas on a utilisé une bobine de 2.2mH qui est la seule bobine qui existe.

A.II.3 Dimensionnement du condensateur

On admet une ondulation de tension ΔVs.

$$\Delta V_s = \frac{V_s}{I_s}\left(\frac{I_s}{1 - D_{min}} + \frac{\Delta I_L}{2}\right) = \frac{34.8}{0.5747}\left(\frac{0.5747}{1 - 0.05} + \frac{0.23}{2}\right) = 43.6V$$

On dimensionne C ainsi [30] :

$$\boldsymbol{C} = \frac{I_s . D_{min}}{\Delta V_s . f} = \frac{0.5747 * 0.05}{43.6 * 20000} = 0.0033\ \mu\mathbf{F}$$

Après calcul, le condensateur utilisé doit être au minimum 0.0033 µF.

Un condensateur de sortie de 0.004 µF 34.8V suffit pour obtenir une tension de sortie continue acceptable.

Un condensateur de filtrage (0.004 μF 34.8V) placé en parallèle avec la source afin d'assurer l'équilibrage des tensions.

Le Business Model Canvas

réalisé par : benkhelfa Ahmedcherif et Bouaicha Ayoub

Partenaires clés

- Fabricants de panneaux solaires
- Entreprises d'énergie solaire
- Fournisseurs de composants électroniques
- Universités et centres de recherche pour la collaboration en R&D

Activités clés

- Recherche et développement pour l'amélioration continue du contrôleur MPPT
- Conception et fabrication de prototypes
- Tests en laboratoire et sur le terrain
- Formation des partenaires et des clients

Ressources clés

- Expertise en FPGA et conception de circuits
- Développeurs de logiciels spécialisés dans les algorithmes MPPT
- Équipe de support technique
- Installations de test et de validation

Proposisions de Valeur

- Contrôleur MPPT efficace et adaptable
- Amélioration de l'efficacité des systèmes solaires
- Réduction des coûts de maintenance
- Flexibilité de conception grâce à l'utilisation de FPGA

Relation avec le client

- Service client personnalisé pour les installations et l'intégration
- Formation des clients sur l'utilisation du contrôleur MPPT
- Suivi après-vente pour garantir la satisfaction et recueillir des retours

Canaux de distribution

- Ventes directes
- Partenariats avec les fabricants de panneaux solaires
- Distribution à travers des revendeurs spécialisés
- Marketing en ligne ciblé

Segments de clientèle

- Installateurs de systèmes solaires
- Fabricants de panneaux solaires
- Entreprises d'énergie renouvelable
- Recherche et développement dans le domaine de l'énergie solaire

Structure des couts

- Coûts de R&D
- Coûts de fabrication des prototypes
- Salaires du personnel technique et de soutien
- Coûts marketing et promotionnels

Sources de revenues

- Ventes directes
- Partenariats avec les fabricants de panneaux solaires
- Distribution à travers des revendeurs spécialisés
- Marketing en ligne ciblé

- Frais généraux et administratifs	- Licences logicielles pour les mises à jour et les améliorations - Frais de consultation pour des projets sur mesure

Reference bibliographies

[1] Benmosbah.a et Mecheraoui.A « implémentation sur FPGA des méthodes MPPT : (P&O et floue optimisée par les algorithmes génétique), mémoire d'ingénieur d'état en électronique. Ecole nationale polytechnique, Algérie,2006.

[2] **M.E.M- Brahimi**, "Situation des énergies renouvelables en Algérie», Conférence sur la maitrise de l'énergie et de l'environnement dans un contexte d'économie, 2001.

[3] **Zaamta Souad**, " Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs ", Thèse de magister, Université Oum El Bouaghi, 2008.

[4] **Baadji.a et Chergui.i,** « Extraction des Paramètres du Module Photovoltaïque» ; Mémoire de Master, Université de M'silla, 2018/2019.

[5] **M, Capderou.** 'Atlas solaire de l'Algérie', O.P.U, Alger 1985.

[6] **Harendi Amine, Arbaoui Ali**, «calcul de l'MPPT par réseaux de neurone pour un système photovoltaïque », mémoire de master, université Kasdi Merbah-Ouargla, 2015.

[7] **Messaoudi Mohammed Tahar**, «simulation d'un système photovoltaïque autonome régulé par logique floue », mémoire de master, université Kasdi Merbah-Ouargla, 2015.

[8] **Amar ouayache Mohamed,** «contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », thèse de doctorat, université Constantine 1, 2014.

[9] **Litim Ahlam Abid Zouleykha**, « Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque », mémoire de master, université Tahar Moulay-Saïda, 2017.

[10] **Boucheritte wafa** « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau ", Thèse de magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2012.

[11] **Petibon Stéphane**, " Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ", Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

[12] **Ayache Khedidja,** " Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque couplé à un réseau électrique", Thèse de magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia Souk-Ahras.

[13] **Amrani Mohamed Nader**, « Conception d'un onduleur solaire avec MPPT intégré ». Thèse de doctorat, Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, Janvier 2018 .

[14] **Aouissi.i et Berkous.m**, «Commande MPPT d'un système photovoltaïque utilisant différents structures de convertisseur statique DC/DC », Mémoire de master, Université de Guelma, 20018.

[15] **Azeddine Houari**, "Contribution à l'étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques", Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2012.

[16] **Stéphane Vighetti**, "Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion ", Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2010.

[17] J. P. David, J. Duveau, J. Guerin and A. Michel, "Electrical and thermal testing and modelling of breakdown in space solar cells and generators", 23rd Photovoltaic Specialists Conference, 1993.

[18] **Cedric Cabal,** "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat, Université de Toulouse III – Paul Sabatier, 2008.

[19] **Mabrouk Adouane.** Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique. PhD thesis, Ecole Nationale Polytechnique, 2008

[20] **Adelkader Morsli**. Etude d'un système solaire photovoltaïque utilisant des supercondensateurs. PhD thesis, Ecole nationale polytechnique, 2010.

[21] **Azzoug.** Commande de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïque. PhD thesis, Université du Québec à Trois-Rivières, 2008.

[22] **Bahtoun hicham**, NOUIRI Abdelkader. Etude des différents montages et différents branchements des panneaux solaires. Master, Université l'arbi ben m'hidi (Oum el bougi), 2014.

[23] **Houamed abdelkamel**, HARIZ Abdelkader Abdelhak. Application des réseaux artificils des neurons pour controler la tendion d'un système photovoltaique connecté à un réseau local. Master Académique, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.

[24] A.MORSLI « Etude d'un système solaire photovoltaïque utilisant des super condensateurs » Magister en Electricité Solaire Université Médéa.2010

[25] TATI.F et BEN LAMOUDI.O. «Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue», Mémoire de master, Université KasdiMerbah Ouargla, 2018.

[26] R.Merahi, «modélisation d'un dispositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateur photovoltaïques », mémoire de master, Annaba 2010 ;

[27] Phatiphat Thounthong, Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs -Thèse Doctorat en génie électrique, 2005- L'Institut National Polytechnique de Lorraine.

[28] **B. Wafa** « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Mémoire de master, Université Ouargla, 2012.

[29] **M. AISSA**, « Modélisation-et-commande-dune-chaine-de-pompage-photovoltaïque», Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2011.

[30] **S.Latreche et KH.Bouzid**, « Etude et Réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduino Uno », Mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2016.

[31] Application de calcule pratique de l'inductance et la capacité du hacheur

[32] **Hannes Knopf.** ***Analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle.*** Master of Science in Electrical and Computer Engineering. Portland State University 1999.

[33] **R. Gottschalg, M. Rommel, D.G. Ineld, and H. Ryssel,** ***Comparison of different methods for the parameter determination of the solar cell's double exponential equation,*** In 14th European Photo- voltaic Science and Engineering Conference (PVSEC), Barcelona, Spain,

1997.

[34] **M. Slama Fateh,** «modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïque interconnectés au réseau électrique », mémoire de magistère, université FerhatAbbas – Setif, 2010.

[35] **A. C. Pastor,**«conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques »,institut national de science appliquée de Toulouse thèse de doctorat.

[36] Amarouayache Mohamed, «contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », thèse de doctorat, université Constantine 1, 2014.

[37] Hajar Bagheri, «advances in electric power engineering», Publisher: lulu (usa), 2015.

[38] C.TOUZET «Les réseaux de neurones artificiel introduction et connexionnisme » LivrePDF 1992

[39] A.BETACHE, Y. ACHOUR « Application de la technique du mode glissant pour la poursuite du point maximale MPPT d'un générateur photovoltaïque » Master en Automatique des systèmes, université Médéa.2014.

[40] «T. Kohonen. Self organization and associative memory. Springer Series in informationsciences, Vol.8, Springer-Verlag, 1984; and second edition, 1987.»

[41] T.NACHEF, 'Implémentation d'une instrumentation sur FPGA', mémoire de magister,université Mouloud Maamri tizi-ouzou-Algerie, 2011.

[42] Dragomir Milojevic, "Implémentation des filtres non-linéaires de rang sur des architectures universelles et reconfigurables " These de Doctorat en Sciences Appliquées, Université Libre deBruxelles, 2004.

[43] DESIGN FOR EMBEDDED IMAGE PROCESSING ON FPGAS Donald G. Bailey MasseyUniversity, New Zealand.pdf.

[44] Génétiques", BENMOSBAH Amine MECHERAOUI Choukri Adel Thème : Implémentationsur FPGA des méthodes MPPT : "P&O" et "floue optimisée par les Algorithmes.

[45] Nicolas MARQUES « Méthodologie et architecture adaptative pour le placement efficace detaches matérielles de tailles variables sur des partitions reconfigurables ». L'Université de de Lorraine, le 26 novembre 2012.

[46] T.NACHEF, 'Implémentation d'une instrumentation sur FPGA', mémoire de magister,université Mouloud Maamri tizi-ouzou-Algerie, 2011.