

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة سعد دحلب البليدة
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



كلية الهندسة - دائرة الإلكترونيك
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

**MEMOIRE DE
PROJET DE FIN D'ETUDES
POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN ELECTRONIQUE**

Option: traitement d'information et système électronique

**Implémentation d'un modèle simple d'une cellule
photovoltaïque sur FPGA**

Présenté par :

Mr.: Zaidi Nabil

Mr.: Annane Mohamed

Proposé par et diriger par :

Mr.: Tadrist Rezki

Mr.: Mamoune Montassar

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents, pour leur patience, leurs encouragements et leur soutien inconditionnel.

Ainsi, à toute ma famille de Bejaia en particulier ma grande mère

Je tien aussi dédier ce travail à mon binôme Mohamed.

Et mes amis et camarades de la classes TISE : Hakim, Abdelkader, Hamza, Hamouda, Oussama, Moumen, Taki, Imad, Tayeb, Ali, Mustapha, Amara, Raouf, Bilel et l'autres

Et à mes amis du quartier AADL de Ouled Yaïch: Raouf, Sidahmed, Samir, Foued, Ouassim, Mourad et Ahmed

Nabil

REMERCIEMENTS

Grâce à dieu le tout puissant nous avons pu accomplir ce modeste travail.

*Nous adressons nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation, nous citons en particulier nos promoteurs **Mr Tadrist Rezki et Mr Maamoun Mountassar**, qui nous ont orientés tout au long de ce travail, par ses conseils, et ses informations qui nous ont beaucoup aidées.*

*Nous exprimons notre plus sincère gratitude au **Mr Nadjmi.O**, qui nous a permis de travailler au sein de son labo.*

Nous remercions aussi les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en évaluant notre modeste travail.

Nous tenons à remercier particulièrement les enseignants de département D'ELECTRONIQUE pour tout ce qui nous ont transmis, leurs efforts et leur disponibilité.

Nous tenons à remercier tous nos amis et camarades pour leurs soutien .

résumé

L'électricité solaire est vue comme étant une importante source d'énergie renouvelable. Les cellules photovoltaïques ou photopiles sont des composants électroniques à semi conducteur qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Dans ce projet nous avons étudié les caractéristiques de cellule photovoltaïque en déterminant son modèle mathématique et obtenir les courbes de puissance-tension et courant-tension qui la caractérise en vu de l'implémenter dans circuit FPGA. Les circuits FPGA sont particulièrement utiles grâce à leurs faible temps de développement, leur puissance de calcul et leur flexibilité.

Mots clés : Cellule photovoltaïque, System generator, Circuit FPGA

Abstract

Solar electricity is seen as an important source of renewable energy. Photovoltaic cells or solar cells are semiconductor electronic components that convert sunlight directly into electricity. In this project we have studied the characteristics of solar cell by determining the mathematical model and obtain the curves of power-voltage and current-voltage characteristic in the view of the implement in FPGA. FPGAs are particularly useful due to their lower development time, computing power and flexibility.

Key words: Photovoltaic cells, FPGA circuit, System generator

ملخص

ينظر للكهرباء الشمسية على أنها مصدرا هاما من مصادر الطاقة المتجدددة. الخلايا الضوئية أو الخلايا الشمسية هي مكونات نصف نوافل الالكترونية التي تحول ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء. في هذا المشروع درسنا خصائص الخلايا الشمسية من خلال تحديد النموذج الرياضي والحصول على مميزات المحننات استطاعة - توفر و استطاعة - شدة لكي يتم برمجته على دارة FPGA المتميزة بسرعة التنفيذ و مرونة الاستعمال المستخدمين

كلمات مفاتيح: الخلايا الضوئية, برمجة على دارة FPGA ,Generator System

Introduction

Introduction:

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter ; des années 60 à nos jours celle ci a triplé. Actuellement, les principales sources d'énergie proviennent des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et du nucléaire. Cependant, depuis les crises successives du pétrole des années 70, le problème de la conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Cet intérêt s'est accru face à l'épuisement inéluctable des énergies fossiles, à leur impact sur l'environnement et aux déchets qu'elles engendrent on peut citer l'exemple du dernier tsunami qui a frappé le japon ce qui a causé des dégâts importants notamment la pollution de l'environnement. Cependant et afin de décoloniser et de diversifier l'origine de la production d'électricité, des nouvelles énergies dites «renouvelables», ont émergés telles la biomasse, l'éolien, la géothermie, la marémotrice et le solaire. Elles ont toutes l'immense avantage d'être d'origine naturelle et renouvelables, inépuisable et non polluante. Parmi celles-ci, l'énergie solaire est la mieux partagée par tous les habitants du globe terrestre. Son exploitation permettrait de fournir en électricité des sites isolés des réseaux électriques et éviterait la création de nouvelles lignes électriques qui demandent généralement un lourd investissement.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde et en particulier de la région MENA. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays.

Les réalisations en matière d'installations photovoltaïques concernent en plus grande partie les applications liées à l'électrification rurale avec près de 60%. En effet, avec un taux d'électrification au niveau national avoisinant les 98%, les foyers restants à électrifier sont très épars et éloignés du réseau. La solution la plus adéquate techniquement et la plus compétitive financièrement est l'électrification à l'énergie photovoltaïque. Un premier programme d'électrification a été réalisé durant la période 1995-2002 et a concerné l'alimentation de 18 villages du sud de l'Algérie en énergie électrique, soit l'électrification de près de 1000 foyers. Pour faire bénéficier ces foyers d'un minimum de confort, une quantité d'énergie de 02 kWh par jour et par foyer a été mise à leur disposition, ce qui correspond à la

Introduction

consommation de 05 réglettes d'éclairage, un réfrigérateur, une télévision avec récepteur numérique, un poste radio et un ventilateur.

Plusieurs applications ont été réalisées comme les installations pour les systèmes de télécommunication, l'éclairage public, le pompage d'eau, les protections cathodiques et l'alimentation des systèmes de télémétrie au niveau des gisements d'hydrocarbures.

L'objectif de ce projet de fin d'études consiste à implémenter la cellule photovoltaïque sur la carte FPGA. Ce projet nécessite plusieurs étapes, il commence par une étude, une simulation sur logiciel matlab simulink et enfin une simulation sur logiciel system generator de la cellule. Notre mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre est une introduction au système photovoltaïque, on y explique les différents composants d'un système photovoltaïque autonome: l'effet photovoltaïque, la commande MPPT, le convertisseur continu-continu et la batterie;

Ensuite nous allons aborder dans le deuxième chapitre la description de la cellule solaire et définir ses différents modèles mathématiques qui existent, les paramètres qui influent sur ses caractéristiques et les méthodes de groupement des panneaux pour augmenter le courant et la tension;

En troisième chapitre, on simule avec Matlab/Simulink le système photovoltaïque avec le modèle de cellule à une seule diode et à résistance équivalente;

En quatrième chapitre, nous avons développé notre système sous Xilinx System Generator en vu de l'implémenter sur FPGA;

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale où nous avons décrit les différentes étapes de notre projet et les difficultés que nous avons rencontrées et solution proposées.

Sommaire

Résumé

Remerciement

Dédicaces

Sommaire

Nomenclature

Liste des figures & tableaux

Introduction Générale..... 1

Chapitre I : systèmes photovoltaïque

I.1. Introduction	3
I.2.L'effet photovoltaïque.....	4
I.3.La connexion directe GPV-charge	5
I.3.1.La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation.....	5
I.3.2.Les Avancées.....	6
I.4.Méthodes MPPT	7
I.4.1. Méthode Perturbation et Observation (P&O).....	8
I.4.2.Méthode d'incrémentation de l'inductance.....	9
I.5.Convertisseurs continu/continu (DC/DC).....	11
I.5.1.Type de convertisseurs.....	12
I.5.1.1.Hacheur dévolteur «Buck»	12
I.5.1.2.Hacheur survolteur « Boost ».....	15
I.5.1.3.Hacheur dévolteur/surveolteur « Buck-Boost ».....	16
I.6.Stockage de l'énergie(Les Batterie)	16

Sommaire

I.6.1.Les différents types de batterie.....	17
I.6.2.Modèle mathématique des batteries au plomb.....	17
I.7.Conclusion.....	19

Chapitre II: les cellules solaires

II.1. Introduction.....	20
II.2. Principe de fonctionnement.....	20
II.3. Les différents types des cellules solaires.....	22
II.3.1.Le silicium monocristallin.....	22
II.3.2. Le silicium multicristallin.....	22
II.3.3. Le silicium amorphe.....	23
II.3.4. Nouvelles technologie photovoltaïque	23
II.4.Circuit équivalent et modèle mathématique de la cellule photovoltaïque.....	24
II.4.1. Modèle idéal de la cellule photovoltaïque.....	24
II.4.2. Modèle réel d'une cellule photovoltaïque.....	25
II.4.2.1. Modèle a une seule diode.....	25
II.4.2.1.1. amélioration du modèle.....	28
II.4.2.2. Modèle a deux diodes.....	29
II.4.3. Modèle a résistance équivalente d'une cellule photovoltaïque.....	30
II.5.Paramètres des cellules photovoltaïques.....	31
II.5.1.Courant de court-circuit I_{cc}	31
II.5.2.Tension a circuit ouvert V_{oc}	32
II.5.3.Facteur de qualité.....	32

Sommaire

II.5.4.Facteur de forme.....	32
II.5.5.Rendement d'une cellule solaire.....	32
II.6. Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.....	32
II.7. Les paramètres qui influent sur la caractéristique I(V).....	33
II.7.1. Influence de l'éclairement.....	33
II.7.2.Influence de la température.....	34
II.7.2.Influence de la résistance série.....	35
II.7.2.Influence de la résistance parallèle.....	35
II.8. Les modules photovoltaïques.....	36
II.9. Les panneaux photovoltaïques.....	37
II.9.1. Association en série.....	37
II.9.2. Association en parallèle.....	38
II.9.1. Association en mixte (série + parallèle).....	39
II.10. La protection des cellules.....	40
II.10.Conclusion.....	41

Chapitre III: Simulation du système photovoltaïque

III.1. Introduction.....	42
III.2 .blocs de simulation.....	42
III.2.1.Schéma global de la simulation.....	42
III.2.2.Le Générateur photovoltaïque.....	43
III.2.2.1.Le panneau solaire Kyocera KC200GT.....	43
III.2.2.1.1.Caractéristiques électriques.....	43
III.2.2.1.2.Specification.....	44

Sommaire

III.2.2.1.3.Solution itérative de R_s et R_p	45
III.2.2.2.Schéma de la Simulation de générateur pv à une seule diode.....	46
III.2.2.3.Simulation du modèle à résistance équivalent du panneau PV	46
III.2.3. Le convertisseur DC/DC.....	49
III.2.4. L'algorithme MPPT.....	49
III.2.5. le modèle de batterie.....	50
III.3. Résultats de simulation.....	50
III.3.1. Résultats de simulation du panneau solaire à une seule diode.....	50
III.3.2.Résultats de simulation du panneau solaire à résistance équivalente.....	51
III.3.3. Résultats de simulation du système photovoltaïque.....	52
III.4. Conclusion.....	55
 <i>Chapitre IV: Développement du système sous system generator</i>	
 IV.1. Introduction.....	56
IV.2. Circuit FPGA.....	56
IV.2.1. Langage de description VHDL.....	57
IV.2.2. Le logiciel Xilinx System Generator.....	59
IV.2.2.1. Principe de création de la conception.....	59
IV.2.2.2. Définition de la frontière FPGA.....	60
IV.3. Simulation sous system generator.....	61
IV.3.1. Description du système.....	62
IV.3.1.1. Affectation des bits aux blocs.....	62
IV.3.1.2. Black box.....	64
IV.3.1.3. Soustraction des bits.....	65

Sommaire

IV.4. Résultats de simulation sous system generator.....	66
IV.4.1.Comparaison des résultats.....	67
IV.5.Conclusion.....	69
Conclusion générale.....	70

Sommaire

Introduction Générale..... 1

Chapitre I : systèmes photovoltaïque

I.1. Introduction	3
I.2.L'effet photovoltaïque.....	4
I.3.La connexion directe GPV-charge	5
I.3.1.La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation.....	5
I.3.2.Les Avancées.....	6
I.4.Méthodes MPPT	7
I.4.1. Méthode Perturbation et Observation (P&O).....	8
I.4.2.Méthode d'incrémentation de l'inductance.....	9
I.5.Convertisseurs continu/continu (DC/DC).....	11
I.5.1.Type de convertisseurs.....	12
I.5.1.1.Hacheur dévolteur «Buck»	12
I.5.1.2.Hacheur survolteur « Boost ».....	15
I.5.1.3.Hacheur dévolteur/surveolteur « Buck-Boost ».....	16
I.6.Stockage de l'énergie(Les Batterie)	16
I.6.1.Les différents types de batterie.....	17
I.6.2.Modèle mathématique des batteries au plomb.....	17
I.7.Conclusion.....	19

Chapitre II: les cellules solaires

II.1. Introduction.....	20
-------------------------	----

Sommaire

II.2. Principe de fonctionnement.....	20
II.3. Les différents types des cellules solaires.....	22
II.3.1.Le silicium monocristallin.....	22
II.3.2. Le silicium multicristallin.....	22
II.3.3. Le silicium amorphe.....	23
II.3.4. Nouvelles technologie photovoltaïque	23
II.4.Circuit équivalent et modèle mathématique de la cellule photovoltaïque.....	24
II.4.1. Modèle idéal de la cellule photovoltaïque.....	24
II.4.2. Modèle réel d'une cellule photovoltaïque.....	25
II.4.2.1. Modèle a une seule diode.....	25
II.4.2.1.1. amélioration du modèle.....	28
II.4.2.2. Modèle a deux diodes.....	29
II.4.3. Modèle a résistance équivalente d'une cellule photovoltaïque.....	30
II.5.Paramètres des cellules photovoltaïques.....	31
II.5.1.Courant de court-circuit I_{cc}	31
II.5.2.Tension a circuit ouvert V_{oc}	32
II.5.3.Facteur de qualité.....	32
II.5.4.Facteur de forme.....	32
II.5.5.Rendement d'une cellule solaire.....	32
II.6. Les zones de caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.....	32
II.7. Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I(V)$	33
II.7.1. Influence de l'éclairement.....	33
II.7.2.Influence de la température.....	34

Sommaire

II.7.2.Influence de la résistance série.....	35
II.7.2.Influence de la résistance parallèle.....	35
II.8. Les modules photovoltaïques.....	36
II.9. Les panneaux photovoltaïques.....	37
II.9.1. Association en série.....	37
II.9.2. Association en parallèle.....	38
II.9.1. Association en mixte (série + parallèle).....	39
II.10. La protection des cellules.....	40
II.10.Conclusion.....	41

Chapitre III: Simulation du système photovoltaïque

III.1. Introduction.....	42
III.2 .blocs de simulation.....	42
III.2.1.Schéma global de la simulation.....	42
III.2.2.Le Générateur photovoltaïque.....	43
III.2.2.1.Le panneau solaire Kyocera KC200GT.....	43
III.2.2.1.1.Caractéristiques électriques.....	43
III.2.2.1.2.Spécification.....	44
III.2.2.1.3.Solution itérative de R_s et R_p	45
III.2.2.2.Schéma de la Simulation de générateur pv à une seule diode.....	46
III.2.2.3.Simulation du modèle à résistance équivalent du panneau PV	46
III.2.3. Le convertisseur DC/DC.....	49
III.2.4. L'algorithme MPPT.....	49
III.2.5. le modèle de batterie.....	50
III.3. Résultats de simulation.....	50
III.3.1. Résultats de simulation du panneau solaire à une seule diode.....	50

Sommaire

III.3.2.Résultats de simulation du panneau solaire à résistance équivalente.....	51
III.3.3. Résultats de simulation du système photovoltaïque.....	52
III.4. Conclusion.....	55
<i>Chapitre IV: Développement du système sous system generator</i>	
IV.1. Introduction.....	56
IV.2. Circuit FPGA.....	56
IV.2.1. Langage de description VHDL.....	57
IV.2.2. Le logiciel Xilinx System Generator.....	59
IV.2.2.1. Principe de création de la conception.....	59
IV.2.2.2. Définition de la frontière FPGA.....	60
IV.3. Simulation sous system generator.....	61
IV.3.1. Description du système.....	62
IV.3.1.1. Affection des bits aux blocs.....	62
IV.3.1.2. Black box.....	64
IV.3.1.3. Soustraction des bits.....	65
IV.4. Résultats de simulation sous system generator.....	66
IV.4.1.Comparaison des résultats.....	67
IV.5.Conclusion.....	69
Conclusion générale.....	70

Sommaire

Chapitre I: Systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction:

Bien que les bases théoriques de l'effet photovoltaïque fussent connues depuis le début du siècle, ce n'est qu'à partir de 1954, dans les laboratoires de la Bell telephone à new jersey, que la première cellule ayant un rendement raisonnable a été mise au point. Depuis la deuxième moitié du siècle précédent, le processus de purifications de monocristaux de silicium a émergé. [1]

En 1956 Loferski publiait différentes tables de conversion de rendement photovoltaïque pour tous les matériaux semi conducteur. Puis, c'est au début des années 70 que l'on a pu obtenir en laboratoire un rendement de 20 % en travaillant des cellules de monocristal d'arsenic de gallium (GaAs). Le rendement est sensiblement inférieur lorsque ces cellules se font à l'échelle industrielle. [2]

Aussi, des expériences ont été faites avec des cellules composées de deux couches: une de sulfure de cadmium (SCd) et une autre de sulfure de cuivre (SCu2). Ces cellules présentent l'avantage d'utiliser très peu de matière active et permettent un processus de fabrication plus simple. Cependant, leur faible rendement ne permet pas de les utiliser a l'échelle industrielle.

La commercialisation de cellules solaires photovoltaïque a commencé des l'apparition du silicium monocristallin et elles occupent encore la première place du marché. Plus tard, apparaissent les matériaux polycristallins, de fabrication plus économique, mais présentant encore de faibles rendements.

Les premières applications pratiques de l'électricité photovoltaïque se firent dans les véhicules spatiaux, permettant l'alimentation des équipements de commande, de mesure, ou de retransmission de données. Ensuite, la production industrielle de premiers panneaux ayant des applications terrestres domestique a débuté. Bien qu'au début des années 80 ces panneaux n'aient pas été suffisamment compétitifs pour la production a grande échelle, ils ont tout de même permis l'électrification de logement isolés.

Les recherches pour faire des produits plus efficaces et économiques continuent à bon rythme s'il existe peu d'entreprise au niveau mondial ayant la capacité de supporter des couts élevés de recherche.

Chapitre I: Systèmes photovoltaïques

I.2. L'effet photovoltaïque:

C'est la conversion de l'énergie que transportent les photons de lumière lorsqu'ils rentrent en collision avec des matériaux semi-conducteurs convenablement traités, en énergie électrique capable de créer un courant d'électrons à travers un circuit extérieur, en réalisant un travail utile. [2]

La clé pour produire un courant électrique utile est d'arriver à extraire les électrons libres. Une procédure pour faire cela est d'introduire dans le matériau semi-conducteur des éléments chimiques qui contribuent à produire un excès d'électrons et des trous. Ces éléments, qui altèrent notablement les propriétés intrinsèques du semi-conducteur, s'appellent les dopants et le matériau est dit dopé lorsque le processus d'incorporation au semi-conducteur est achevé.

Un dopant approprié pour le silicium est le bore. La structure créée s'appelle un semi-conducteur de type P (positif).

Un autre dopant possible pour le silicium est le phosphore. Le semi-conducteur est dit de type N (négatif).

Si les photons de la lumière incidente communiquent de l'énergie aux électrons du semi-conducteur, quelques électrons peuvent traverser la barrière de potentiel, en étant expulsés hors du semi-conducteur dans un circuit extérieur. Ceci génère un courant électrique. Les électrons, après avoir parcouru le circuit externe, retournent dans le semi-conducteur par la face opposée.

Le matériau semi-conducteur ne stocke donc pas d'énergie électrique mais la génère, en transforme l'énergie incidente.

La physique quantique prédit un rendement théorique pour la cellule de silicium de 26%, mais les cellules commerciales obtenues de manière industrielle ne montrent pas au dessus de 17%. Ces valeurs, impliquant une limitation sur la puissance électrique pouvant être obtenue, montrent que seulement une petite partie de l'énergie solaire peut générer de l'électricité.

I.3. La connexion directe GPV-charge:

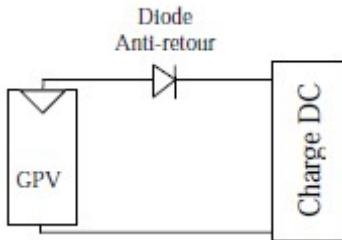


Figure I.1: Connexion directe GPV-Charge via une diode anti-retour.

La connexion directe du panneau solaire photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu, Figure I.1. Bien sûr, il faut s'assurer auparavant que la charge accepte bien la connexion directe au générateur de puissance continue qu'est le panneau solaire. En effet, le GPV est une source d'énergie continue qui ne peut être connecté à une charge alternative que via un étage d'adaptation de type onduleur.

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique $I(V)$ du GPV et celle de la charge. La puissance transmise directement à une batterie ou une charge résistive de type lampe ou bien même un moteur (MCC), n'est pas toujours effectuée à la puissance maximale PMAX (PPM = point de puissance maximale) que peut fournir le panneau solaire. La solution la plus utilisée actuellement est de créer généralement un GPV par association de cellules pour obtenir une puissance nominale donnée proche de celle nécessaire pour l'utilisation. Cette solution est valable pour les charges DC de type batterie recueillant le courant PV sous des tensions proches de V_{opt} . [3]

I.3.1. La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation:

La figure I.2 présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stock d'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension (ballast,...). Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en

Chapitre I: Systèmes photovoltaïques

fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé. [3]

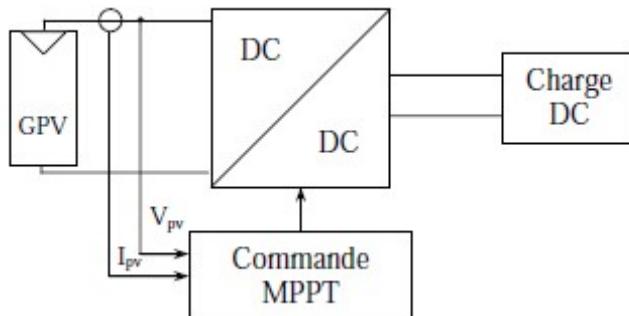


Figure I.2: Chaine de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT sur charge DC.

I.3.2 Les Avancées:

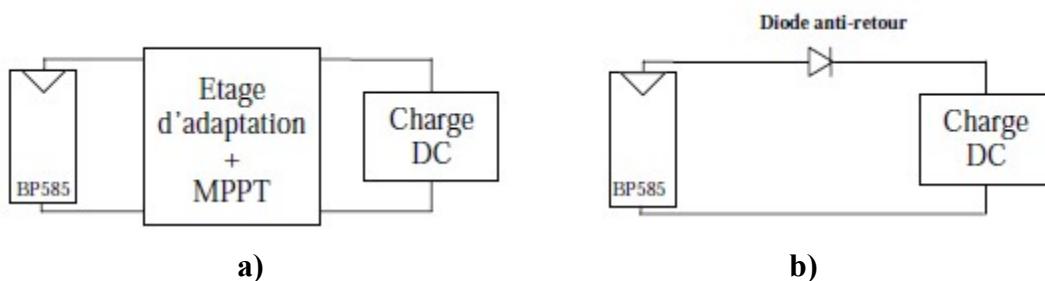


Figure I.3: Schémas de principe d'une connexion via a) un étage d'adaptation avec MPPT et b) d'une connexion directe.

Un exemple de résultats de ses travaux est consigné en Figure I.4. Il représente la superposition des rendements MPPT des deux types de connexion. Cela permet de constater que le η_{MPPT} de l'étage d'adaptation avec fonction MPPT est toujours supérieur à celui de la diode. De plus, le η_{MPPT} de l'étage est indépendant du niveau tension de la batterie contrairement au cas d'une connexion directe. [3,4]

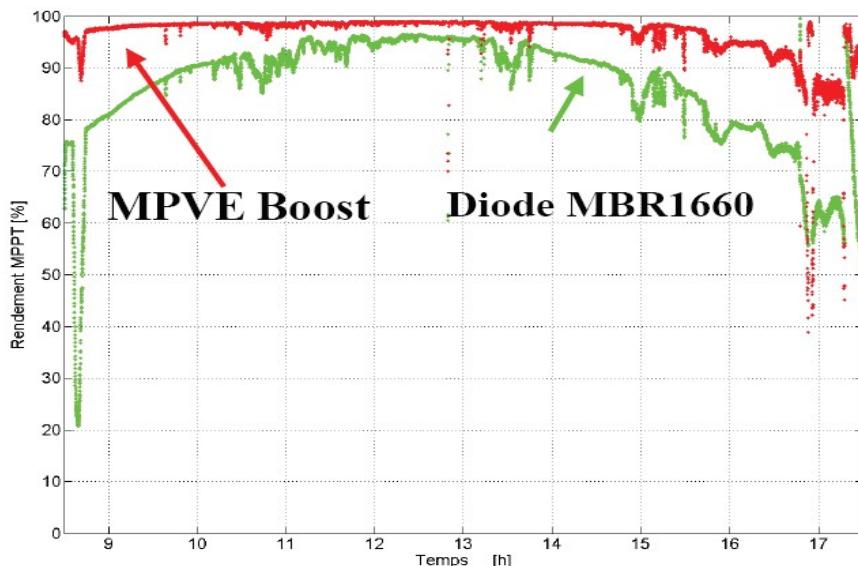


Figure I.4: Comparaison de η_{MPPT} pour une connexion directe (Diode) et à l'aide d'un étage d'adaptation de type Boost avec MPPT (MPVE).

Ces tests sont réalisés sur un module PV référencé BP585 constitué de deux fois 18 cellules en séries, et le convertisseur de type MPVE et de diode de type MBR 1660.

I.6. Méthodes MPPT:

Il existe plusieurs méthodes de poursuite du point de puissance maximale. Les références [5] et [6] expliquent en détail un grand nombre de ces méthodes. On en donne dans ce qui suit un bref aperçu :

- Adaptation manuelle : Elle consiste à adapter manuellement la charge au générateur photovoltaïque, c'est-à-dire choisir la charge suivant la valeur du courant et de la tension obtenus expérimentalement pour des conditions normales de fonctionnement;
- Méthodes à contre réaction de tension: la tension de référence peut être fixe, variable en fonction de la tension à circuit ouvert V_{oc} , ou externe par l'utilisation d'une cellule pilote;
- Méthodes à contre réaction de courant: là aussi le courant peut être variable en fonction du courant de court circuit I_{cc} , ou externe par l'utilisation d'une cellule pilote;
- Méthodes à contre réaction de puissance : Plusieurs algorithmes sont utilisés comme l'algorithme « Perturbation et Observation » (P&O) et l'algorithme « Incremental Conductance » ;
- Méthode de poursuite analogique;
- Utilisation d'un contrôleur flou.

Chapitre I: Systèmes photovoltaïques

Les deux méthodes qui nous intéressent et qui sont les plus utilisées dans l'industrie sont la méthode Perturbation et Observation (P&O) et la méthode d'incrémentation de l'inductance. Nous allons expliquer dans ce qui suit le principe de chacune d'elles

I.6.1. Méthode Perturbation et Observation (P&O):

C'est une méthode à contre réaction de puissance et c'est la méthode MPPT la plus utilisée vu la simplicité de son principe et la facilité de son implémentation. Elle est basée comme son nom l'indique, sur l'introduction d'une perturbation sur le système et l'observation de son effet sur la puissance. La perturbation du système est introduite par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence V_{ref} en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC. L'observation de la puissance permet ensuite de prendre une décision sur la prochaine perturbation à introduire, s'il y'a eu une augmentation de la puissance, la perturbation continuera dans le même sens, sinon elle est inversée.

L'algorithme de cette méthode est donné dans la figure I.5. On explique dans ce qui suit son fonctionnement brièvement;

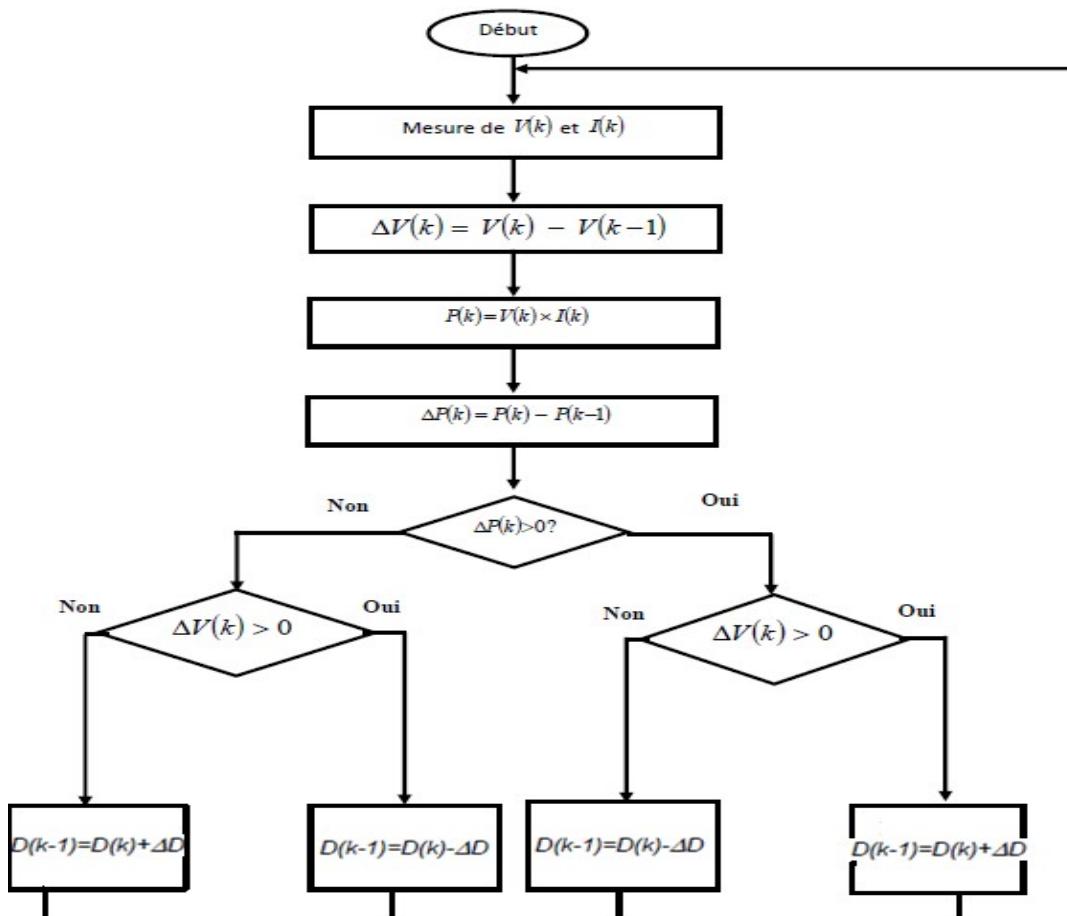


Figure I.5: Organigramme de l'algorithme P&O.

Chapitre I: Systèmes photovoltaïques

Tout d'abord, une mesure du courant I et de la tension V est effectuée pour calculer la puissance à l'instant actuel $P(k)$, cette valeur est ensuite comparée à celle de l'instant passé $P(k-1)$. La différence ΔP permet de déterminer le sens de variation de la puissance, si celle-ci est positive la prochaine perturbation doit suivre le même sens que la précédente, sinon elle doit être dans le sens opposé. Pour cela un test est effectué sur $\Delta V=V(k)-V(k-1)$ et la décision est alors prise sur la prochaine valeur du rapport cyclique, soit par son incrémentation ($D(k+1)=D(k)+\Delta D$), ou au contraire par sa décrémentation ($D(k+1)=D(k)-\Delta D$).

Par exemple, si ΔP est positive alors la puissance a augmenté au cours du dernier cycle, et si en plus ΔV est négative, cela veut dire qu'il y'a eu une décrémentation du rapport cyclique durant le dernier cycle, la décision à prendre dans ce cas sera alors une autre décrémentation du rapport cyclique : $D(k+1)=D(k)-\Delta D$.

Un des inconvénients de la méthode P&O est que son algorithme ne répond pas instantanément aux variations de puissance dues aux changements brusques de l'ensoleillement. En effet, une augmentation brutale de l'insolation produit une augmentation de la puissance, l'algorithme considérera cette augmentation comme étant due à la perturbation introduite durant le dernier cycle, il continuera alors dans la même direction qui peut être la mauvaise direction, ce qui l'éloigne du point MPP. L'algorithme ne commencera à rechercher normalement le point MPP qu'une fois l'état de stabilité de l'ensoleillement atteint. Ce phénomène cause un retard de la réponse de l'algorithme et produit des pertes de puissance, il représente le plus grand inconvénient de la méthode P&O. [5]

I.6.2. Méthode d'incrémentation de l'inductance:

Dans cette méthode on calcul la dérivée de la puissance de sortie du panneau. Cette Dérivée dP/dV est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche et négative à droite du point MPP.

La dérivé partielle dP/dV est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (\text{I.1})$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (\text{I.2})$$

Chapitre I: Systèmes photovoltaïques

On définit la conductance de la source $G=I/V$ et l'incrémentale conductance $\Delta G = dI/dV$.

Puisque la tension V du panneau est toujours positive, la relation (I.2) explique que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source G égale l'incrémentale conductance ΔG de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance G est supérieure à l'incrémentale conductance ΔG et vice-versa, comme suit :

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ si } \frac{I}{V} > -\frac{dI}{dV} \quad (\text{I.3})$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ si } \frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV} \quad (\text{I.4})$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ si } \frac{I}{V} < -\frac{dI}{dV} \quad (\text{I.5})$$

Pour éviter que la différentielle dV de la tension du panneau ne devienne nulle, lorsque le MPP est atteint dans les précédents cycles ou par une stabilisation du point de fonctionnement, ce qui conduirait à une division par zéro, l'algorithme fait un test de dV . S'il est nul il teste si le $dI=0$ si c'est le cas alors le PPM est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement, dans le cas contraire l'algorithme teste le signe de dI pour déterminer la position du PPM et ajuste la tension de référence correspondante. La figure I.6 donne l'organigramme de cet algorithme.

L'avantage de cet algorithme est qu'il n'oscille pas autour du MPP, à cause du test de $dI=0$. L'algorithme se stabilise une fois le PPM atteint et le signe de dI donne la vraie direction à emprunter pour la poursuite du PPM une fois le système stable, ce qui conduit à une réponse rapide du système pour des changements brusques des conditions atmosphériques. Mais à cause de l'approximation des dérivées dV et dI et l'utilisation d'un pas d'action

constant, la condition ($\frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV}$) est rarement vraie ce qui conduit à des oscillations autour du PPM. Pour remédier à ce problème une erreur marginale ε est ajoutée aux conditions du MPP, c'est à dire que le MPP est atteint si $|\frac{I}{V} + \frac{dI}{dV}| \leq \varepsilon$, la valeur de ε est limitée entre le problème de non fonctionnement dans le MPP exact et le problème de l'amplitude des oscillations.[6]

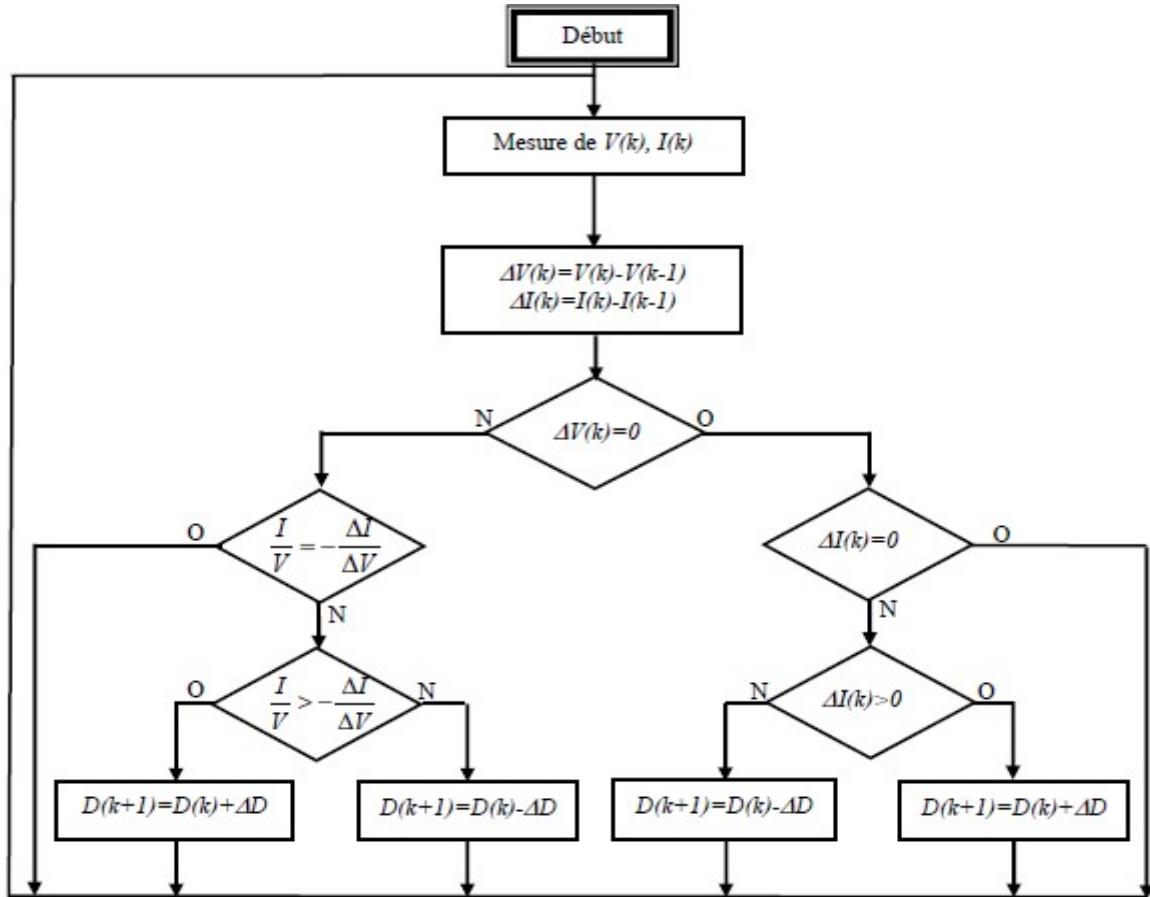


Figure I.6: Organigramme de l'algorithme incrémentation de l'inductance.

I.7. Convertisseurs continu/continu (DC/DC):

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension fixe. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance dans le cas idéal, c'est pour cette raison que les hacheurs ont de bons rendements.

Généralement le commutateur est un transistor MOSFET qui travaille en mode bloqué-saturé. Si le commutateur est bloqué, son courant est nul, il ne dissipe donc aucune puissance ; s'il est saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très petite.

Le commutateur du convertisseur est commandé par un signal PWM (*Pulse Width Modulation*) ou MLI (*Modulation Largeur d'Impulsion*), avec une fréquence de commutation F_s fixe et un rapport cyclique D variable. La figure II.1 montre le signal de commande PWM du commutateur. D'abord on ferme le commutateur pendant un temps de fermeture égal à $D.T_s$, [6] ensuite on l'ouvre durant un temps d'ouverture égal à $(1-D).T_s$, où:

- ✓ T_s est la période de commutation qui est égale à $1/F_s$;
- ✓ D est le rapport cyclique du commutateur $D \in [0,1]$.

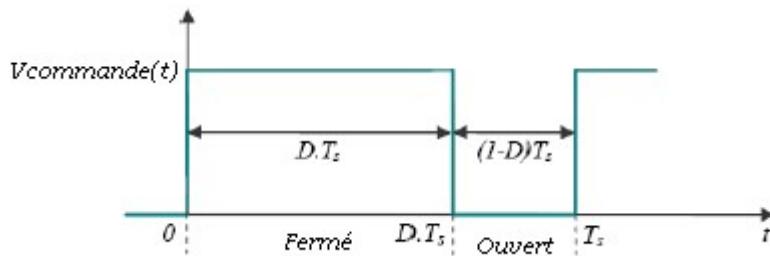


Figure I.7: Représentation de la sortie d'un commutateur en ouverture/fermeture sur une période.

I.7.1. Type de convertisseurs: [7]

Il y a différents types de convertisseurs DC-DC. Une première distinction est à faire entre le convertisseur à isolement galvanique entre la sortie et l'entrée et le convertisseur qui présente une borne commune entre l'entrée et la sortie (Notez que dans le cas de l'isolement galvanique le rendement se verra affecté d'au moins 10%, ce qui est inadmissible dans le cas par exemple des applications en énergie photovoltaïque).

Dans les convertisseurs à stockage d'énergie, on distingue :

- Les élévateurs (BOOST) dans lesquels $VS > Ve$.
- Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $VS < Ve$.

Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents: c'est « FLYBAC » traduction: volant sur le dos, car VS est inversée par rapport à Ve .

I.7.1.1. Hacheur dévolteur « Buck »:

Le convertisseur dévolteur (figure I.8) peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série. Ce dernier qui est un interrupteur ne peut relier que deux sources de type différent courant/tension ou l'inverse.

L'utilisation du Buck dans les systèmes de conversions photovoltaïques est tout à fait adéquate, étant donné que le générateur photovoltaïque est une source de courant continu, tandis que le récepteur qui est généralement la batterie, a la nature d'une source de tension. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion $M = Vs / V_{change}$ avec le rapport cyclique D du commutateur.

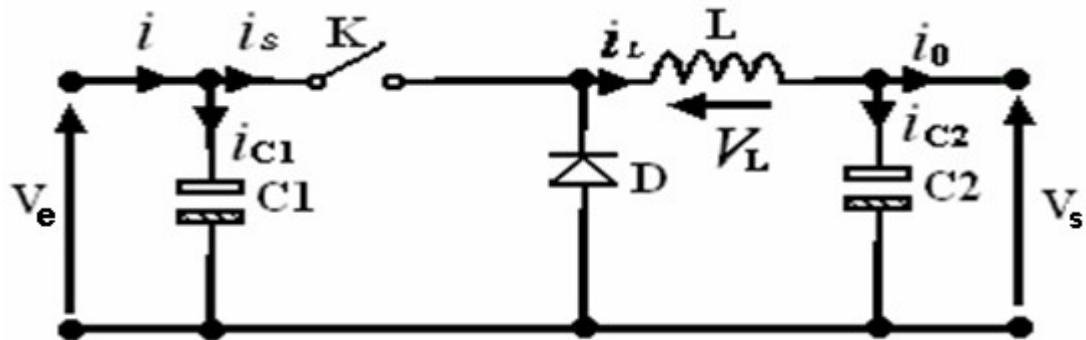


Figure I.8: Circuit idéal du hacheur série.

Et puisque c'est le type qu'on a choisi dans notre travaille, on détaille ses équations:

à l'état conducteur de l'interrupteur K , pendant la durée t_{ON} c-à-d $d \in [0, D TS]$, la diode se bloque et un courant circulera dans la charge à travers l'inductance, cette dernière stocke une énergie: [7]

$$W = \frac{1}{2} L I_L^2 \quad (I.6)$$

Lors des commutations successives de l'interrupteur K , le courant à l'intérieur de l'inductance aura deux composantes l'une est constante égale à la valeur moyenne du courant sur une période du hachage, tandis que la composante variable est égale à :

Lorsque K est fermé :

$$(\Delta I_L)_{ON} = \frac{V_e - V_s}{L} t_{ON} \quad (I.7)$$

Lorsque K est ouvert, la self se décharge dans la charge de sortie pendant le temps t_{OFF} :

$$(\Delta I_L)_{OFF} = \frac{V_s}{L} t_{OFF} \quad (I.8)$$

Ces variations du courant sur un cycle du hachage engendrent des ondulations donc des harmoniques, mais on peut écrire en régime permanent, pour dire qu'à une exactitude près, les ondulations peuvent être négligées et le signal peut être rapproché à sa composante constante.

$$(I_s = \frac{V_s}{R_L}) \Rightarrow (\Delta I_{ON}) + (\Delta I_{OFF}) = 0 \quad (I.9)$$

On obtient alors l'expression fondamentale:

$$V_s = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} V_e \quad (I.10)$$

En appelant que T est la périodicité de l'état de K , on peut écrire $T = t_{ON} + t_{OFF}$ ce qui permet d'écrire :

$$V_s = \frac{t_{ON}}{T} V_e \quad (I.11)$$

Chapitre I: Systèmes photovoltaïques

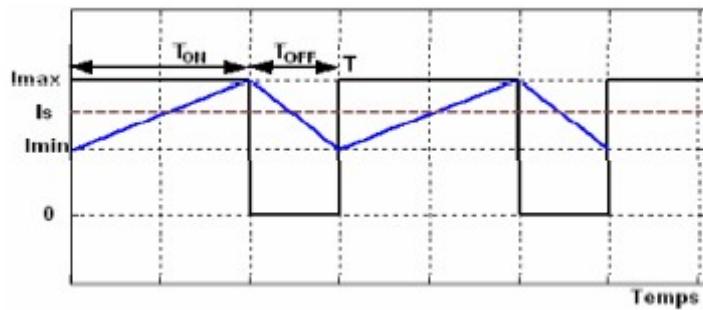


Figure I.9: Courant dans la self du hacheur série.

Ce régime de conduction de courant est appelé le régime continu.

Lorsque $T > t_{ON} + t_{OFF}$, le régime est appelé conduction discontinu (figure I.10). Dans ce cas le courant de sortie vaut :

$$I_S = \frac{IM}{2T}(t_{ON} + t_{OFF}) = \frac{V_e - V_s}{2TL} t_{ON} (t_{ON} + t_{OFF}) = \frac{V_s}{RL} \quad (I.12)$$

Et aussi ;

$$V_s = \frac{1}{1 + \frac{2L}{t_{ON} V_e} I_S} \quad (I.13)$$

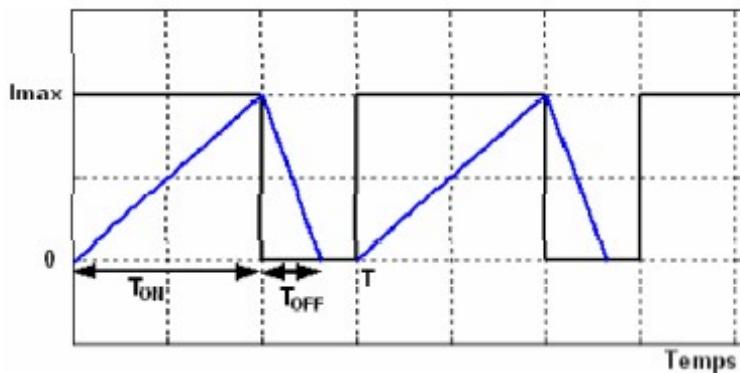


Figure I.10: Courant en discontinuité dans la self du hacheur série.

Pour savoir le comportement réel de ce convertisseur, il est nécessaire de connaître en détail son modèle mathématique, pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par la suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure I.11 montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure II.6 représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant (1-D) TS.

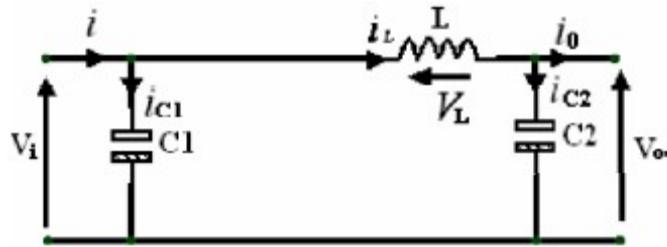


Figure I.11: Schéma équivalent du hacheur série quand $t \in [0, D T_s]$.

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes :

$$\begin{aligned} i_{c1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) &= L \frac{diL(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{aligned} \quad (\text{I.14})$$

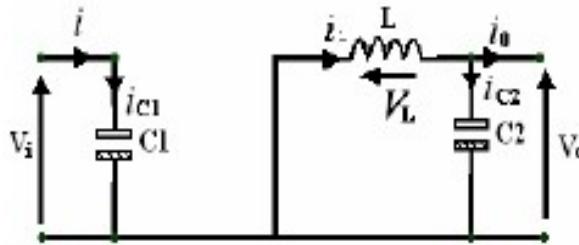


Figure I.12: Schéma équivalent du hacheur série quand $t \in [D.T_s, T_s]$.

Les équations suivantes sont déduites de la figure ci-dessus :

$$\begin{aligned} i_{c1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i(t) \\ i_{c2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) &= L \frac{diL(t)}{dt} = -V_o(t) \end{aligned} \quad (\text{I.15})$$

Les équations (I.14) représentent les équations de base du hacheur dévolteur.

On déduit donc le rapport de conversion d'un hacheur dévolteur est donné par la relation (I.16) en considérant que le convertisseur est idéal (sans pertes).

$$M(D) = \frac{V_o}{V_i} = D \quad (\text{I.16})$$

I.7.1.2. Hacheur survolteur « Boost »:

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de Boost ou hacheur parallèle et son circuit de base est celui de la figure I.13.

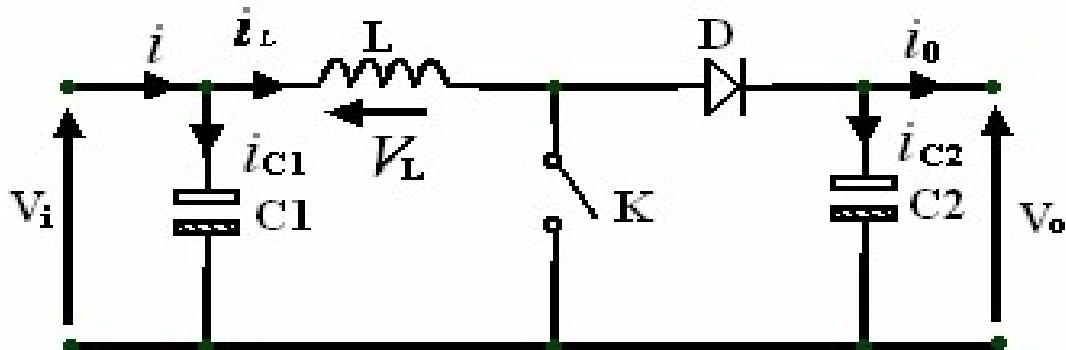


Figure I.13: Schéma de principe d'un boost.

I.7.1.3. Hacheur dévolteur/survolteur « Buck-Boost »:

Ce dernier a acquis les caractéristiques et les propriétés électriques des deux types évoqués précédemment, appelé aussi « Flyback ». Il présente donc une sorte d'un transformateur hybride (abaisseur/élévateur) pour une tension d'entrée/sortie continue, son schéma de base est illustré par la figure I.14.

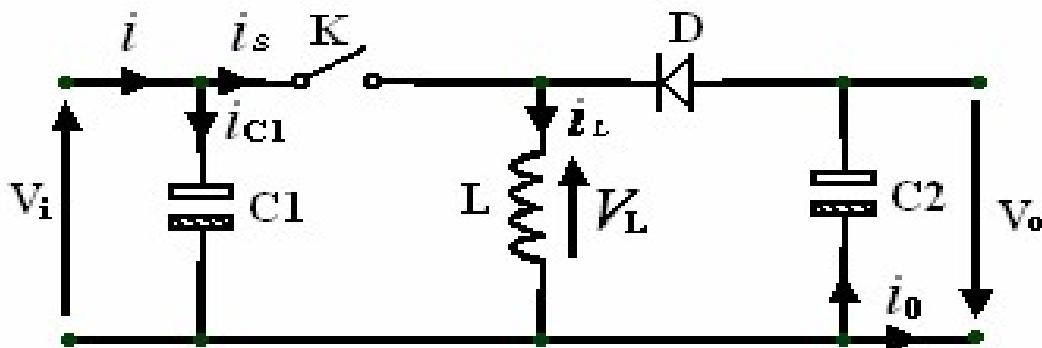


Figure I.14: Circuit de base d'un buck boost.

I.8. Stockage de l'énergie(Les Batteries):

Le stockage de l'énergie produite se fera dans des batteries. Il existe de nombreux types de batteries, chacune d'entre elles ayant été conçue pour un usage particulier. Elles sont définies par un ensemble de caractéristiques: tension nominale, capacité de stockage, aptitude au cycle, tenue en décharge profonde, taux d'autodécharge, variation avec la température, maintenance, prix, etc. Ces caractéristiques sont fournies par le fabricant.

Pour l'usage spécifique du photovoltaïque, une batterie doit remplir les conditions suivantes [6]: un nombre de cycles de charge et de décharge élevé sans altération, une faible autodécharge, un rendement électrique élevé et une maintenance légère.

I.8.1. Les différents types de batterie:

Il est globalement possible de séparer les batteries en 2 types:

- Les batteries au plomb (pb): étanches, à plaques plane minces, à plaques plane épaisses, à plaques tubulaire;
- les batteries au cadmium-nickel (Cd-Ni).

Les batteries étanches au cadmium-nickel supportent sans problème des décharges profondes (100 %), contrairement aux batteries au plomb qui ne doivent jamais être déchargées à plus de 50-80 % selon leur type. On recommande même pour les batteries au cadmium-nickel, une décharge complète périodique à des fins de maintenance. Leur prix est par contre beaucoup plus élevé que pour les batteries au plomb. Pour les systèmes photovoltaïques, on préconise d'utiliser des batteries au plomb à plaque tubulaires.

Dans ce qui suit on va étudier le modèle mathématique des batteries au plomb.

I.8.2. Modèle mathématique des batteries au plomb:

Dans la littérature [8], des auteurs ont utilisé le modèle représenté sur la figure I.15. Le modèle décrit le comportement primaire d'une batterie correctement, mais n'explique pas les propriétés lentement changeantes d'une batterie telles que l'augmentation et la diminution de la tension de fonctionnement provoquée par le processus de la charge et de la décharge.

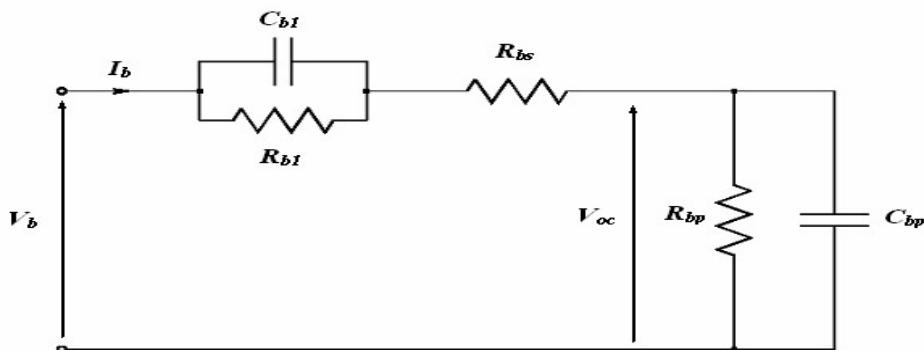


Figure I.15: Modèle équivalent de la batterie.

Ce modèle inclut les composants équivalents pour toutes les caractéristiques de fonctionnement principales d'une batterie plomb-acide:

La capacité électrochimique de la batterie est représentée par le condensateur C_{bp} et sa valeur est donnée par l'expression générale de l'énergie :

$$Ec = \frac{1}{2} CV_c^2 \quad (\text{I.17})$$

Avec : C la capacité et V_c la tension du condensateur.

Chapitre I: Systèmes photovoltaïques

A la différence d'un condensateur, la tension d'une batterie ne sera pas égale à zéro à son plus bas état de charge. C'est équivalent à un condensateur ayant un niveau minimum de charge égal à l'énergie $E_{c,min}$. La capacité entièrement chargée de la batterie est représentée par un niveau maximum de charge $E_{c,max}$. Ceci est indiqué par l'équation suivante [8]:

$$E_b = E_{c,max} - E_{c,min} = \frac{1}{2} C_{bp} (V_{max}^2 - V_{min}^2) \quad (\text{I.18})$$

L'énergie E_b est donnée par le constructeur de la batterie directement en kilowatt par heure (kWh). Les tensions V_{max} et V_{min} sont la tension maximale et la tension minimale de la batterie en circuit ouvert respectivement. D'après (I.15) on a :

$$C_{bp} = \frac{2 E_b}{V_{max}^2 - V_{min}^2} \quad (\text{I.19})$$

C_{bp} est la capacité de la charge de la batterie.

La résistance interne de la batterie est représentée par les deux résistances R_{bs} et R_{b1} en série. La résistance en bloc d'électrolyte et de plaque est représentée par la résistance R_{bs} tandis que la résistance R_{b1} représente la diffusion d'électrolyte. Ceci représente la tension du circuit ouvert de la batterie dès qu'une charge sera reliée. De même on peut observer un saut soudain de tension avec l'application d'un courant de remplissage En utilisant la notation indiquée sur la figure I.15 on peut exprimer la tension de batterie V_b en fonction de la tension de batterie en circuit ouvert et les autres composants R_{b1} , R_{bs} et C_{b1}

avec la constante de temps $\tau = R_{b1} \cdot C_{b1}$

$$V_p = V_{co} + R_{b1}(1 - \exp(-t/\tau)) \cdot i_b + R_{bs} \cdot i_b \quad (\text{I.20})$$

Une autre caractéristique très importante d'une batterie est la décharge spontanée, représentée par la résistance R_{bp} parallèle avec le condensateur principal C_{bp} . Elle est provoquée par électrolyse de l'eau aux tensions élevées et par la fuite lente à travers les bornes de batterie aux basses tensions. [8]

Le circuit sur la figure I.15 décrit les caractéristiques d'une batterie plomb-acide d'une manière complète mais pourtant très simplifiée.

Ce circuit exprime l'impédance équivalente d'entrée d'une batterie plomb-acide par :

$$Z(s) = R_{bs} + \frac{R_{b1}}{R_{b1} C_{b1} s + 1} + \frac{R_{bp}}{R_{bp} C_{bp} s + 1} \quad (\text{I.21})$$

$$Z(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (\text{I.22})$$

Chapitre I: Systèmes photovoltaïques

Les coefficients a_i et b_j sont employés pour représenter les différents composants:

$$\begin{aligned} a_2 &= R_{bs} R_{b1} C_{b1} R_{bp} C_{bp}; \\ a_1 &= R_{bs} R_{b1} C_{b1} + R_{bs} R_{bp} C_{bp} + R_{b1} R_{bp} C_{bp} + R_{bp} R_{b1} C_{b1}; \\ a_0 &= R_{bs} + R_{b1} + R_{bp}; \\ b_2 &= R_{b1} R_{bp} C_{b1} C_{bp}; \\ b_1 &= R_{b1} C_{b1} + R_{bp} C_{bp}; \\ b_0 &= 1. \end{aligned} \tag{I.23}$$

I.7. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence que la conception de systèmes photovoltaïques optimisés est par nature difficile. En effet, côté source, pour un générateur photovoltaïque, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système. Côté charge, que ce soit de nature continue (DC), ou bien alternative (AC), comme dans le cas du réseau électrique, chacune a son comportement propre qui peut être aléatoire. En effet il a été montré pour qu'un tel générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur source-charge. La commande MPPT permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quelque soit la tension de la batterie, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{OPT} - I_{OPT}),

Dans ce contexte plusieurs méthodes de poursuite et algorithmes ont été mis en application, chacune présente des avantages et des inconvénients.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de la cellule photovoltaïque, on particulier les différentes types et modèles mathématique puisque c'est le but de notre projet.

II.1. Introduction:

À la différence d'une pile classique dont l'énergie est stockée et restituée selon la volonté de l'utilisateur, une cellule solaire, autrement appelée photopile, est un semi-conducteur qui ne produit de l'électricité que si elle est exposée à la lumière. Ce phénomène est appelé « conversion photovoltaïque ».

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « phôtos » signifiant lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui en 1800 découvrit la pile électrique. Mais c'est en 1839 que le français Antoine Becquerel fut le premier à mettre en évidence cette conversion particulière d'énergie. Ce phénomène est dû à la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière.[3]

II.2. Principe de fonctionnement:

La conversion photovoltaïque met simultanément en jeu trois phénomènes physiques :

- l'absorption de la lumière dans le matériau;
- le transfert d'énergie des photons aux charges électriques ;
- la collecte des charges.

Pour cela, le matériau doit avoir des propriétés électriques et optiques spécifiques, c'est pourquoi les cellules solaires sont constituées d'un matériau semi-conducteur, généralement du silicium. Contrairement aux conducteurs électriques tels que les métaux, dans lesquels il existe une forte concentration en électrons libres, le phénomène de photoconductivité est spécifique à ces matériaux semi-conducteurs dont les électrons ne sont que « libérables ». Pour générer un courant à partir d'un semi-conducteur, il faut réussir à libérer des électrons de l'attraction de leurs noyaux et à les attirer ensuite vers l'extérieur. Pour cela, il faut leur fournir une énergie suffisamment forte:

C'est le rôle des photons constituant la lumière. Figure II.1

Il existe un seuil d'énergie minimum nécessaire à cette libération des électrons par les photons, au-delà duquel l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction (niveau énergétique supérieur). Ce seuil est appelé gap optique ou largeur de bande interdite et dépend du matériau utilisé. L'énergie nécessaire à la séparation

est mesurée en électrons-volts (eV) et varie en fonction du semi-conducteur. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin et de 1,77 eV pour le silicium amorphe [9].

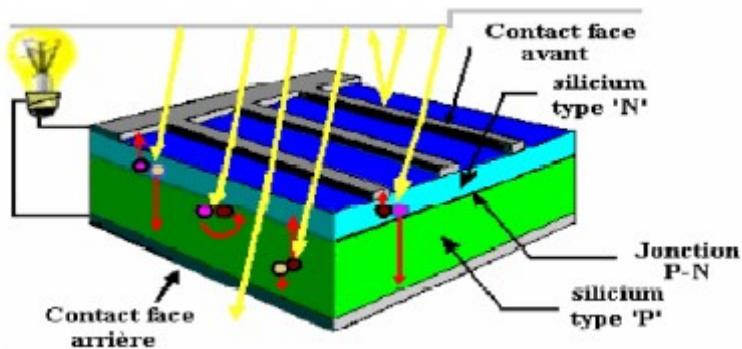


Figure II.1: Absorption de la lumière et transfert de l'énergie des photons aux électrons.

Ensuite, pour que les charges libérées soient génératrices d'énergie, il faut qu'elles circulent. Autrement dit, elles doivent être attirées hors du semi-conducteur, sinon elles se recombinent. Cette extraction de charges est réalisée grâce à une jonction créée volontairement dans le matériau.

On va alors engendrer un champ électrique qui va entraîner les charges négatives d'un côté et les positives de l'autre. Ceci n'est possible que grâce au dopage du semi-conducteur par des impuretés. Ce dopage est de deux types:

- un dopage de type « n » (négatif), réalisé par adjonction de phosphore (P), dont les atomes possèdent un électron périphérique de plus que ceux du silicium;
- un dopage de type « p » (positif), réalisé par adjonction de bore (B), dont les atomes possèdent un électron périphérique de moins que ceux du silicium.

La mise en contact de ces deux zones au dopage opposé constitue un élément fort utile en électronique qui est la diode. Comme le montre la figure II.2, les charges électriques générées et ainsi attirées vont faire apparaître un photo-courant indépendant de la tension et proportionnel à la fois au flux lumineux et à la surface de la cellule.

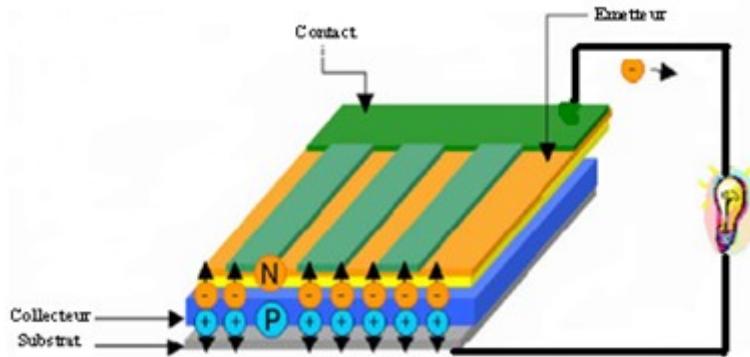


Figure II.2: La collecte des charges.

II.3. Les différents types des cellules solaires: [10]

On distingue deux grandes familles de matériaux photovoltaïques utilisées dans des installations:

- les matériaux cristallisés, d'épaisseur de 0,15 à 0,4 mm;
- les couches minces, d'épaisseur faible de l'ordre du micron.

Le matériau le plus répandu de nos jours est le silicium, semi-conducteur tétravalent.

Le silicium est soit cristallin, soit amorphe.

II.3.1. Le silicium monocristallin:

Les cellules qui en sont composées sont les plus performantes sur le marché: elles présentent un bon rendement à fort et moyen éclairement. Toutefois, leur prix reste élevé.

- Rendement électrique des panneaux : 15% STC;
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc;
- Gamme d'éclairement: 100 à 1000 W/m².

Usage: tous usages extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais, habitat....).

II.3.2. Le silicium multicristallin:

Il est le plus répandu actuellement et les caractéristiques électriques des cellules multicristallines sont similaires aux monocristallines. Toutefois, il est un peu moins

Chapitre II: Les cellules solaires

performant, essentiellement aux éclairements modérés, et également moins onéreux du fait d'une fabrication moins complexe.

- Rendement électrique des panneaux: 12 à 14% STC;
- Puissance des panneaux: 5 à 150 Wc;
- Gamme d'éclairement: 200 à 1000 W/m².

Usage: même usage que le silicium monocristallin.

II.3.3. Le silicium amorphe:

Malgré un gap optique plus élevé que le silicium cristallin et donc une tension plus forte, son courant est nettement plus faible à cause de sa moins bonne collecte et de sa faible épaisseur.

Il est donc moins puissant que le silicium cristallin. Par contre, en couche très mince, il répond à tous les éclairements extérieur et intérieur.

Sa technologie de fabrication est moins onéreuse et permet de réaliser de petits formats de panneaux.

- Rendement électrique des panneaux: 5 à 7 % STC (jusqu'à 9 % pour les multijonctions);
- Puissance des panneaux extérieurs: 0,5 à 60 Wc ;
- Gamme d'éclairement: de 20 lux à 1000 W/m² l'arsénure de gallium (GaAs) ainsi que le disélénure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements 38 % au laboratoire.

Usage: électronique professionnelle et grand public (montres, calculatrices....), électronique de faible consommation en extérieur.

II.3.4. Nouvelles technologies photovoltaïques:

Le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre. [3]

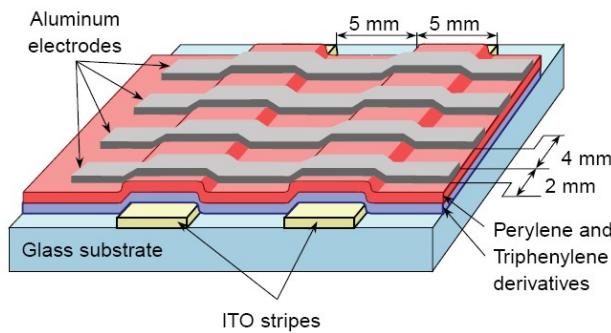


Figure II.3. Schéma de principe d'une cellule organique

Comme les semi-conducteurs, ils possèdent des niveaux d'énergies susceptibles d'absorber les photons en créant des paires électron-trou utilisables grâce à des transitions entre les niveaux dits HOMO (Highest occupied molecular orbital) et des niveaux dits LUMO (Lowest unoccupied molecular orbital). Les paires électron-trou peuvent se recombiner (pas de séparation) en émettant des photons de la longueur d'onde plutôt que de se convertir en chaleur (au contraire des filières inorganiques). La séparation des charges reste toujours un point bloquant. Si elles peuvent être séparées et transportées vers un circuit extérieur grâce à deux phases adjacentes, on obtient alors des cellules photovoltaïques d'un nouveau type tel que celle présentée en Figure II.3.

II.4. Circuit équivalent et modèle mathématique de la cellule photovoltaïque:

II.4.1. Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque:

La cellule photovoltaïque peut être étudiée à partir du circuit équivalent donné par la figure II-4 composé d'un générateur de courant et d'une diode en parallèle.

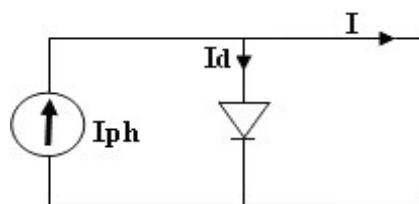


Figure II.4: Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque.

Donc le courant aux bornes de la cellule est: [11]

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.1})$$

Chapitre II: Les cellules solaires

I_{ph} : photo- courant. I_d : courant traversant la diode.

$$I_d = I_0 * \left[\exp\left(\frac{V}{U_t}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Avec } Ut = \frac{k*T}{q} \quad (\text{II.3})$$

q: charge de l'électron (1.9×10^{-19} coul);

k: la constante de boltzman. [$1.3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K];

Ut: tension thermique;

I_0 : courant de saturation;

V: tension aux bornes de la diode;

T: température absolue (en kelvin).

Si on trace le courant (I) en fonction de la tension (V) en a une soustraction de deux courbes:

I_{ph} : le photo-courant.

I_d : la caractéristique de la diode $I(V)$.

La figure II-5 représente les différentes courbes citées ci-dessus [10]:

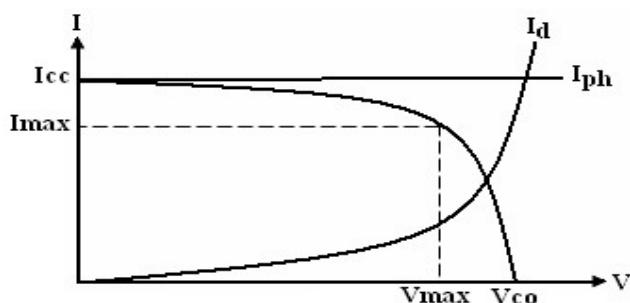


Figure II.5: La caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque

II.4.2. Modèle réel d'une cellule photovoltaïque:

II.4.2.1. Modèle à une seul diode:

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs, des recombinaisons, des fuites vers les bords, doivent être pris en considération.

Ce modèle mathématique de la cellule photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent. Ce circuit est représenté sur la figure II.6 par un générateur de courant I_{ph} , une diode et deux résistances R_s et R_p . [11]

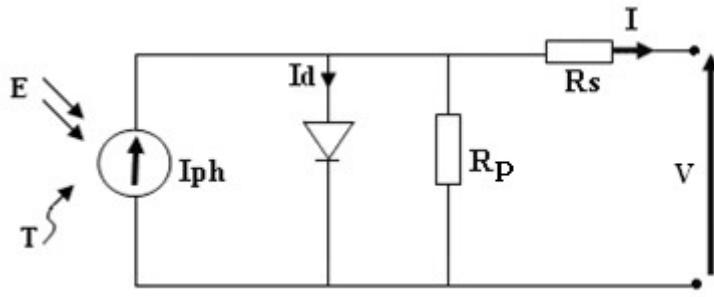


Figure II.6: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque à une seule diode.

- R_s est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe courant-tension au point V_{oc} représente l'inverse de la résistance série ($1/R_s$).
- R_p est une résistance parallèle (shunt) liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe courant-tension au point I_{cc} représente l'inverse de la résistance shunt ($1/R_p$).

L'équilibre des courants est exprimé par la relation suivante : [11]

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{II.4})$$

Dont:

- I_{ph} : le photo-courant créé dans la structure par une partie de rayonnement absorbé (ce courant est pratiquement le courant de court circuit de la cellule) ;
- I_d : Le courant direct est la saturation inverse ou courant de fuite de la diode ;
- I_p : Le courant généré par la cellule et fourni à la charge ;
- I : Le courant correspond au courant des connexions parallèles.

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire dans La figure II.5 on a:

$$\begin{aligned} I &= I_{ph} - I_d - \left(\frac{V + I R_s}{R_p} \right); \\ \Rightarrow I &= I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{aKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

Où les I_{ph} et I_0 sont les courants photovoltaïques et de saturation du panneau et $U_t = N_s kT / q$ est la tension thermique de la gamme avec des cellules reliées en série N_s , a est la constante d'idéalité des diodes. Les cellules connectées en parallèle augmentent le courant et les cellules connectées en série fournissent des tensions de sortie plus grande. Si le panneau est composé de N_p connexions parallèles de cellules

Chapitre II: Les cellules solaires

les courants photovoltaïques et de saturation peuvent être exprimés comme suit:

$$I_{Ph} = I_{Ph} Np , I_0 = I_0 Np.$$

Cette équation (II.5) est originale de la courbe I-V vu dans la figure II.5, où trois points remarquables sont à souligner: le court-circuit ($0, I_{cc}$), point de puissance maximale (V_{mp}, I_{mp}) et la tension à circuit ouvert ($V_{oc}, 0$).

L'équation (II.5) décrit le modèle à diode unique présenté sur la Figure II.6. Certains auteurs ont proposé des modèles plus sophistiqués qui présentent une meilleure précision et servir à des fins différentes. Par exemple, dans [12] une diode supplémentaire est utilisée pour représenter l'effet de la recombinaison des porteurs. Dans [13] une à trois diodes modèle est proposé d'inclure l'influence des effets qui ne sont pas considérées par les modèles précédents. Pour plus de simplicité le modèle à diode unique de la Figure II.6 est étudié dans ce projet. Ce modèle offre un bon compromis entre simplicité et précision et a été utilisé par plusieurs auteurs dans les travaux précédents, avec parfois des simplifications, mais toujours avec la structure de base composée d'une source de courant et une diode en parallèle.

Les fabricants de panneaux photovoltaïques ne fournissent que quelques données expérimentales sur les caractéristiques électriques et thermiques du panneau. Malheureusement, d'autres paramètres nécessaires pour ajuster les modèles photovoltaïques ne figurent pas sur les fiches techniques des fabricants, tels que le courant photovoltaïque, les résistances série et shunt (parallèle), la constante d'idéalité des diodes, le courant de saturation inverse de la diode, et l'énergie du gap du semi-conducteur. Toutes les fiches techniques photovoltaïques portent essentiellement les informations suivantes: la valeur nominale de tension en circuit ouvert $V_{oc,n}$, la valeur nominale du courant court-circuit $I_{cc,n}$, la tension au point de puissance maximale V_{mp} , le courant au point de puissance maximale I_{mp} , le coefficient K_V la tension en circuit ouvert/température, le coefficient K_i courant court-circuit/température, et la valeur maximale expérimentale de pointe de puissance $P_{max,e}$. Cette information est toujours fournie en référence aux conditions d'essai nominales ou standard (STC) de la température et l'irradiation solaire. Certains fabricants fournissent des courbes I-V pour plusieurs conditions de l'irradiation et de température. Ces courbes facilitent l'ajustement et la validation de l'équation mathématiques I-V désirée.

Fondamentalement, il s'agit de toutes les informations qu'on peut obtenir à partir des fiches techniques des panneaux photovoltaïques.

$$I_{ph} = (I_{ph,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (\text{II.6})$$

Où le $I_{ph,n}$ [A] est le courant généré par la lumière au condition nominale (habituellement 25 °C et 1000W/m²), $T = T - T_n$ (étant T et T_n les températures réelles et nominales [K]), G [W/m²] est l'irradiation sur la surface du dispositif, et G_n est l'irradiation nominale. Le courant de saturation de la diode I_0 et sa dépendance à la température peut être exprimée par [11]:

$$I_0 = I_{0,n} \left(\frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{aK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (\text{II.7})$$

Où E_g est l'énergie de gap du semi-conducteur ($\approx 1,12$ eV Par exemple pour le silicium polycristallin à 25 °C), et $I_{0,n}$ est le courant de saturation nominal [11]:

$$I_{0,n} = \frac{I_{sc,n}}{\exp \left(\frac{V_{oc,n}}{aV_{t,n}} \right) - 1} \quad (\text{II.8})$$

Avec $V_{t,n}$ étant la tension thermique de N_s cellules connectées en série à la température nominale T_n .

II.4.2.1.1. Amélioration de modèle:

Le modèle photovoltaïque décrit dans la section précédente peut être amélioré si l'équation (II.7) est remplacé par: [11]

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{\exp \left(\frac{V_{oc,n} + K_I \Delta T}{aV_t} \right) - 1} \quad (\text{II.9})$$

Cette modification vise à répondre aux tensions en circuit ouvert du modèle avec les données expérimentales pour une très large gamme de températures. L'équation (II.9) est obtenue à partir de (II.8) en incluant dans l'équation du courant et de tension coefficients K_V et K_I . Le I_0 courant de saturation est fortement dépendant de la température, et l'équation (II.9) propose une approche différente pour exprimer la dépendance de I_0 de la température de telle sorte que l'effet net de la température est la variation linéaire de la tension en circuit ouvert selon le coefficient pratique de tension/température. Cette équation simplifie le modèle et annule l'erreur du modèle

aux proximités des tensions en circuit ouvert et par conséquent à d'autres régions de la courbe I-V.

$$E_g = - \ln \left[\frac{\left(\frac{I_{sc,T_{max}}}{I_{0,n}} \right) \left(\frac{T_n}{T_{max}} \right)^3}{\exp \left(\frac{qV_{oc,T_{max}}}{aN_s k T_{max}} \right) - 1} \right] \cdot \frac{a k T_n T_{max}}{q(T_n - T_{max})} \quad (\text{II.10})$$

Où $I_{sc,T_{max}} = I_{sc,n} + K_I \Delta_T$ et $V_{oc,T_{max}} = V_{oc,n} + K_V \Delta_T$, avec $\Delta_T = T_{max} - T_n$

II.4.2.1.2. Modèle à deux diodes:

Les mesures réelles sur de vraies cellules dans des conditions de fonctionnement diverses montrent le besoin de modèles sophistiqués. En particulier la résistance interne du dispositif doit être prise en compte. Ceci mène au "modèle de deux diode" largement répandu, représenté sur la figure (II.7)[14].

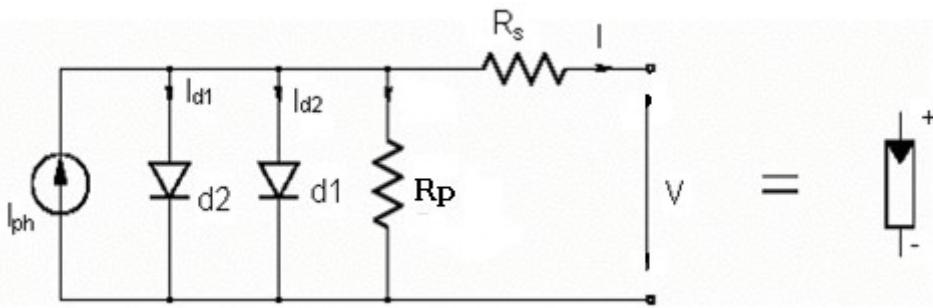


Figure II.7: Modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque et son symbole.

La figure (II.7) est une représentation du modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension qui est donnée par [14]:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{(V+Rs I)}{A Ut} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{(V+Rs I)}{A Ut} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V+I Rs}{R_p} \right) \quad (\text{II.11})$$

Il est évident de l'équation (II.11), que la caractéristique courant-tension dépend fortement de l'insolation et de la température. La dépendance de la température est encore amplifiée par les propriétés du photo-courant I_{ph} et les courants de saturation inverse des diodes qui sont donnés par :

$$I_{ph} = I_{ph} |(T = 298) [1 + (T + 298) \cdot (5 \cdot 10^{-4})] \quad (\text{II.12})$$

$$I_{01} = K_I T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (\text{II.13})$$

$$I_{D2} = K_2 T^2 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (II.14)$$

Où E_g est la bande d'énergie du semi-conducteur, $K_1 = 1.2 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^3$ et $K_2 = 2.9 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^{5/2}$.

II.4.3. Modèle à résistance équivalente d'une cellule photovoltaïque:

Diverses méthodes de simulation de cellules photovoltaïques peuvent être trouvées [11-13-12]. La plupart d'entre eux sont basés sur le modèle de diodes d'une cellule photovoltaïque. L'équation décrivant la diode est représentée par une exponentielle, celle-ci malgré sa bonne fiabilité, elle est difficile d'être décrite en langage VHDL. Pour cela dans [16] un modèle très approprié d'une cellule photovoltaïque non linéaire est présenté comme une source de courant avec une résistance connectée en parallèle dont la valeur varie en fonction de l'éclairement et la température Figure II.8. La variation de la résistance de la cellule est simulée comme une résistance de commutation.

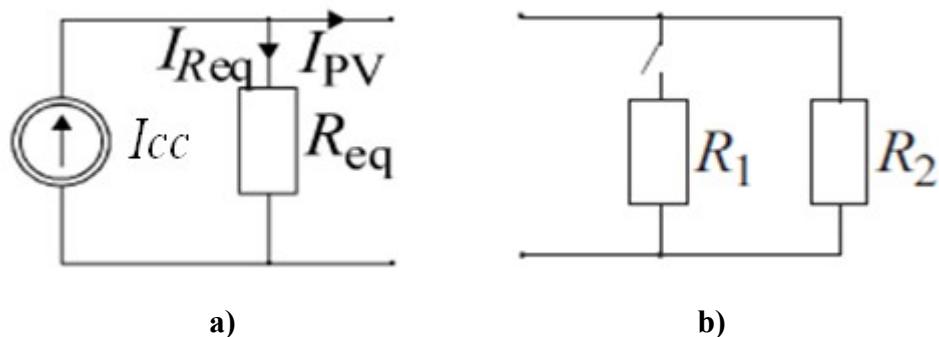


Figure II.8: Modèle de source PV non linéaire après [15] et la résistance de commutation.

La Source de tension PV est décrite par l'équation suivante [16]:

$$V_{pv} = R_{eq} \cdot (I_{cc} - I_{pv}) \quad (II.15)$$

Où U_{pv} est la tension de la cellule photovoltaïque, I_{cc} est le courant de court circuit de la cellule photovoltaïque proportionnel au niveau de l'éclairement, I_{pv} est le courant de cellule PV et R_{eq} est la résistance variable équivalente.

La résistance équivalente est une connexion en parallèle de la R_2 et commuté

Chapitre II: Les cellules solaires

résistances R1 Figure II.8: [15]

$$R_{eq} = \frac{R1R2}{R1+R2 K} \quad (\text{II.16})$$

Le paramètre K est l'équivalence du rapport cyclique D utilisée dans [16]. La valeur du paramètre K est calculée numériquement, il prend la valeur 0 lorsque la cellule photovoltaïque est court-circuitée et 1 lorsque elle fonctionne en circuit ouvert. Ainsi, K peut être défini comme:[15]

$$K = 1 - \frac{I_{pv}}{I_{cc}} \quad (\text{II.17})$$

Dans les équations (II.15), (II.16) et (II.17) la variation de la tension V_{oc} est proportionnelle au changement du niveau d'éclairement. Par contre dans les panneaux photovoltaïques, la tension en circuit ouvert ne pas affectée par les variations du niveau d'irradiation solaire. Pour ajuster le modèle, un facteur d'échelle M est mis en œuvre à l'équation (II.16):

$$R_{eq} = \frac{R1R2}{R1+R2 K \cdot M} \quad (\text{II.18})$$

Le facteur M est proportionnelle à la différence entre le niveau d'éclairement maximale ($I_{cc,max}$) et une diminution du niveau d'éclairement (I_{cc}) (II.19).[15]

$$M \approx I_{cc,max} - I_{cc} \quad (\text{II.19})$$

II.5. Paramètres des cellules photovoltaïques:

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{cc} , V_{oc} , A , ff et η), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

II.5.1. Courant de court-circuit I_{cc} :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

On peut écrire: $I_{cc} (V = 0) = I_{ph}$

II.5.2. Tension à circuit ouvert V_{oc} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

On peut écrire:

$$V_{oc} (I=0) = A \cdot U_t \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1 \right) \quad (\text{II.20})$$

II.5.3. Facteur de qualité:

C'est un paramètre dépendant de la qualité de la diode compris entre 1 et 2.

II.5.4. Facteur de forme:

On appelle facteur de forme *ff*(*filling factor*) le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($P_{max} = I_{max} \cdot V_{max}$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $I_{cc} \times V_{oc}$ où: [3]

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{cc}} \quad (\text{II.21})$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

II.5.5. Rendement d'une cellule solaire:

Le rendement est donné par le rapport de la puissance électrique maximale générée à la puissance du rayonnement solaire incident: [3]

$$\eta_c = \frac{V_{max} * I_{max}}{P_{solaire}} \quad (\text{II.22})$$

II.6. Les zones de Caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque:

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque pour un éclairement et une température données, n'imposent ni le courant ni la tension de fonctionnement, pour une courbe $I = f (V)$ donnée. C'est la valeur de la charge aux

bornes du générateur qui détermine le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure II.9 représente trois zones essentielles: [2]

- a) La zone (1): où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant;
- b) La zone (2): correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé;
- c) La zone (3): qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

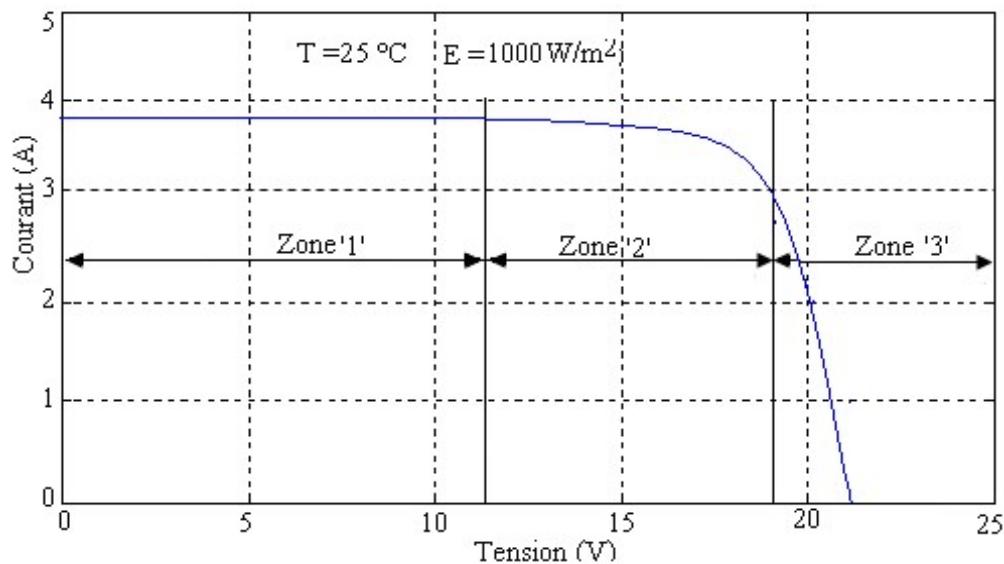


Figure II .9: Les différentes zones de Caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.

II.7. Les paramètres qui influent sur la caractéristique $I = f(V)$:

II.7.1. Influence de l'éclairement:

La figure II.10 représente la caractéristique courant-tension et d'un module PV solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes:

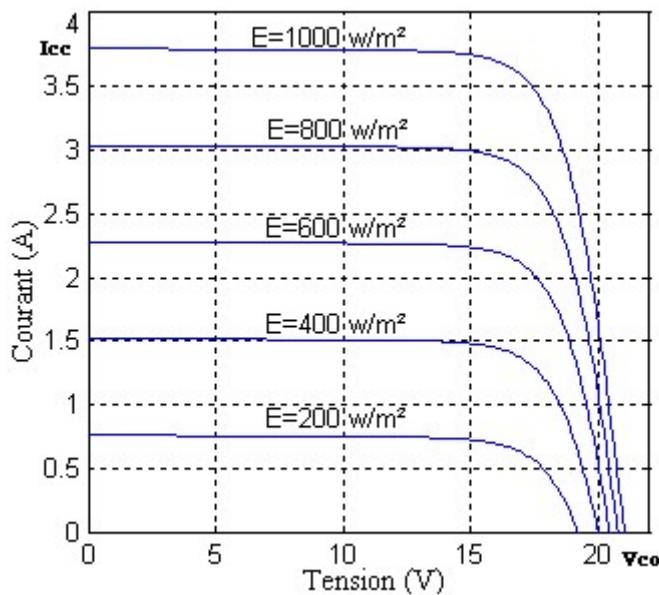


Figure II.10: Influence de l'éclairement sur le module.

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

Les conditions standards internationales pour mesurer la réponse d'un panneau photovoltaïque sont convenues comme suit: une intensité rayonnante de 1000 W/m² et une température de 25 °C.

II.7.2. Influence de la température:

La figure II.11 représente la caractéristique courant-tension d'un module PV solaire en fonction de la température à un éclairement constant:

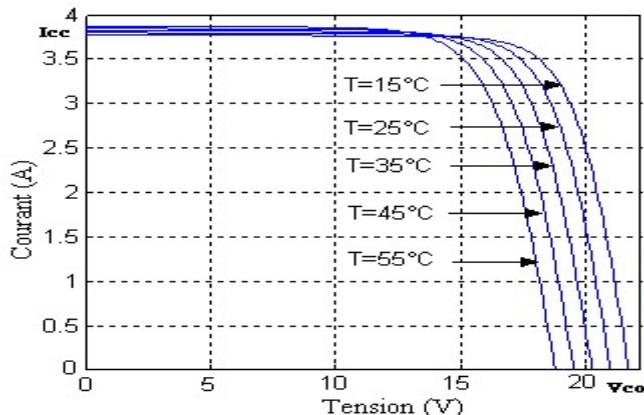


Figure II.11: Influence de la température sur le module.

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte.

Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue de 0.5 % par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25 °C.

II.7.3. Influence de la résistance série:

La résistance série de la cellule dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. [11]

Cette résistance agit sur la pente de la caractéristique dans la zone de la photodiode où il se comporte comme un générateur de tension [15]. Par contre pour des valeurs élevées, le courant de court circuit diminue Figure II.12.

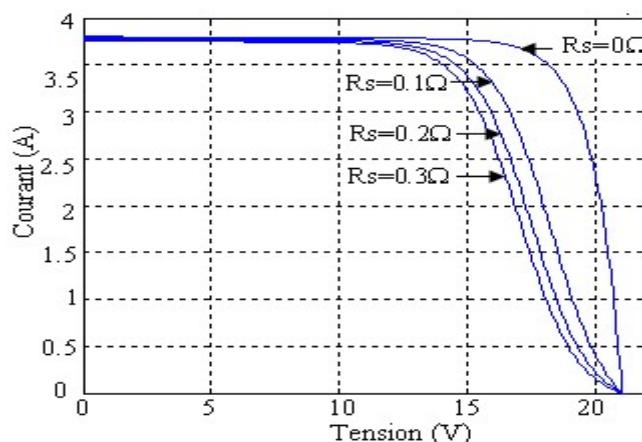


Figure II.12: L'influence de la résistance série R_s sur la caractéristique $I(V)$.

II.7.4. Influence de la résistance parallèle:

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes opposées positives d'une photopile. [11] En général, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant.

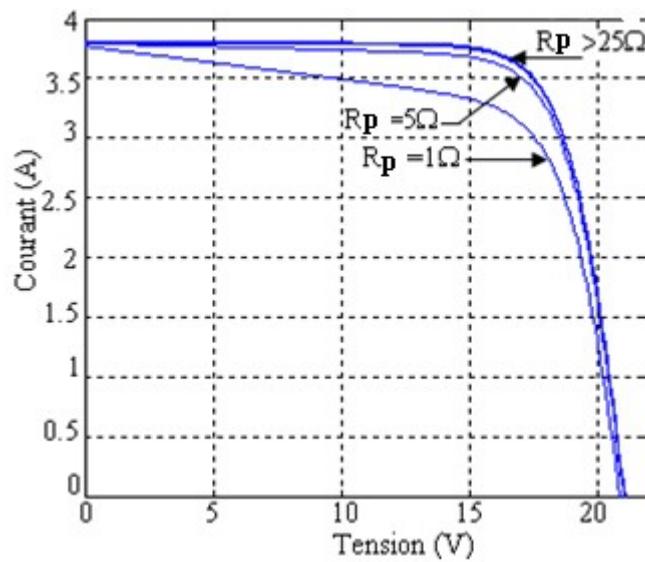


Figure II.13: L'influence de la résistance parallèle R_p sur la caractéristique $I(V)$.

II.8. Les modules photovoltaïques:

Les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, donc par définition le module photovoltaïque est un groupement de cellules connecté entre elles en série pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière.

Ce module est protégé en face avant par une plaque de verre et en face arrière par un autre matériau (verre ou résine) et installé sur un cadre en aluminium anodisé.

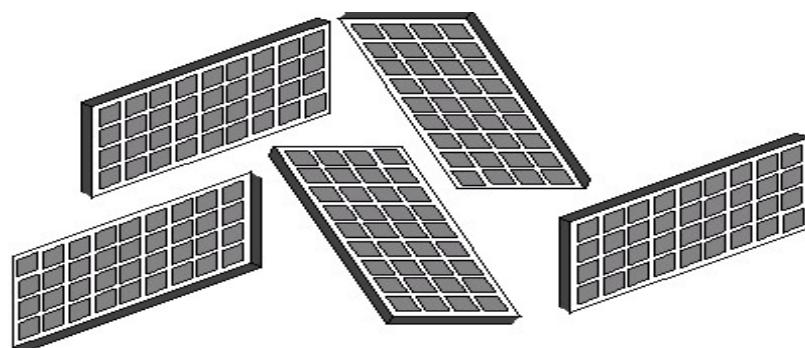


Figure II.14: les modules photovoltaïques.

II.9. Les panneaux photovoltaïques:

Un panneau photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules qui sont constitués par l'association de cellules en série. La mise en série et en parallèle des panneaux permet d'obtenir la tension et le courant exigés dont les performances dépendent de l'association des cellules et de la matière qui les compose. Le point de fonctionnement de cet ensemble de panneaux photovoltaïques est défini par l'intersection de sa caractéristique courant-tension avec la ligne de charge.

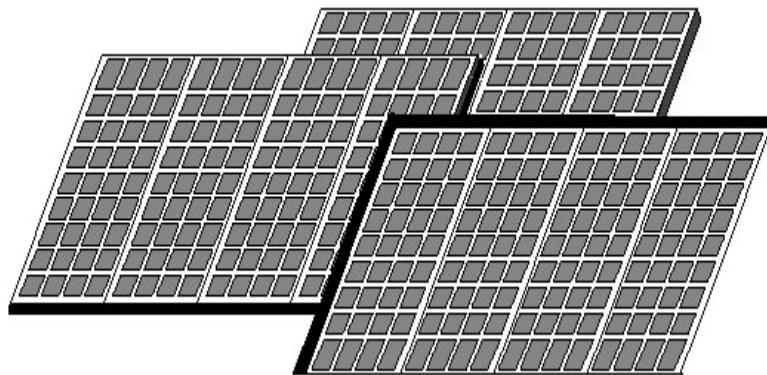


Figure II.15: Panneaux photovoltaïques.

Donc pour quelque soit les nombres des modules en série et parallèle, l'équation (II.5) est devient sous la fourme suivant:[11]

$$I = I_{ph} \cdot N_p - I_o \cdot N_p \left[\exp \left(\frac{V + R_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) I}{U_{TA} N_s} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) I}{R_p \left(\frac{N_s}{N_p} \right)} \quad (\text{II.23})$$

Le rendement η_g de conversion du générateur photovoltaïque est donné par la relation suivante;

$$\eta_g = \frac{P_S}{P_e} \quad (\text{II.24})$$

Avec:

P_e : la puissance d'entré du champ PV est donnée par:

$$P_e = G \cdot N_s \cdot N_p \cdot S \quad (\text{II.25})$$

Les trois types d'association des modules solaires sont:

II.9.1. Association série:

L'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. [17]

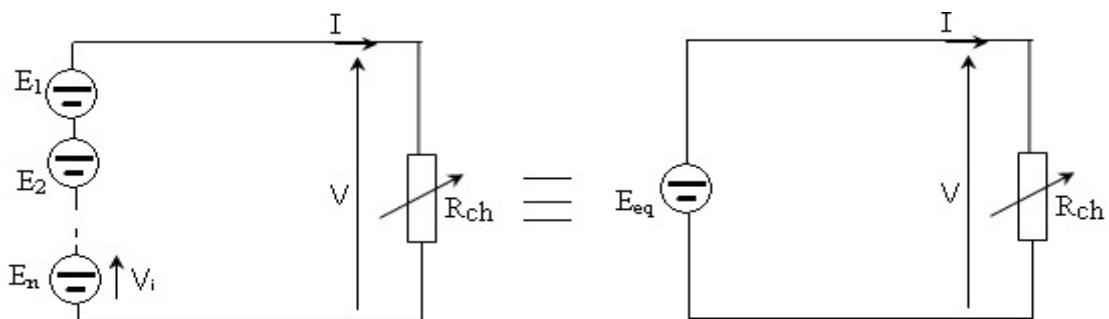


Figure II.16: Association de N_s modules solaires en série.

La caractéristique d'un groupement de n_s modules solaires en série est représentée par la figure suivante;

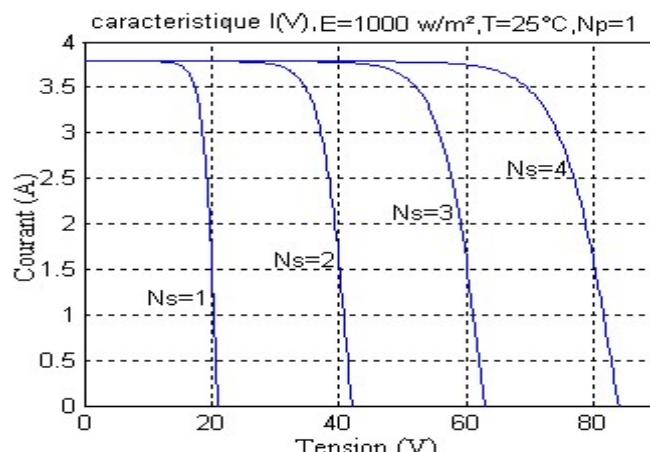


Figure II.17: Caractéristique de nombre des modules en série

II.9.2. Association Parallèle:

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égale à la somme des courants individuels et une tension égale à celle d'une seule cellule. [17]

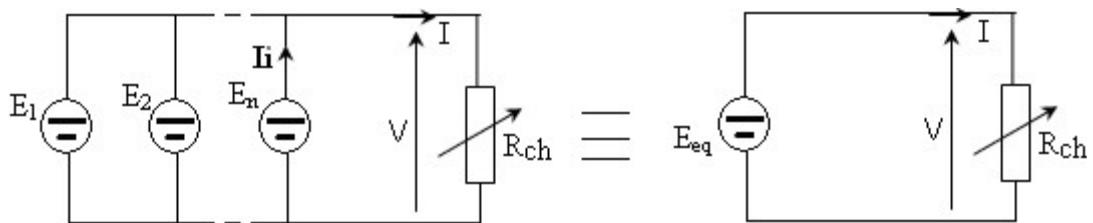


Figure II.18: Association de N_p modules solaires en parallèle.

La caractéristique d'un groupement de N_p modules solaires en parallèle est représentée par la figure suivante:

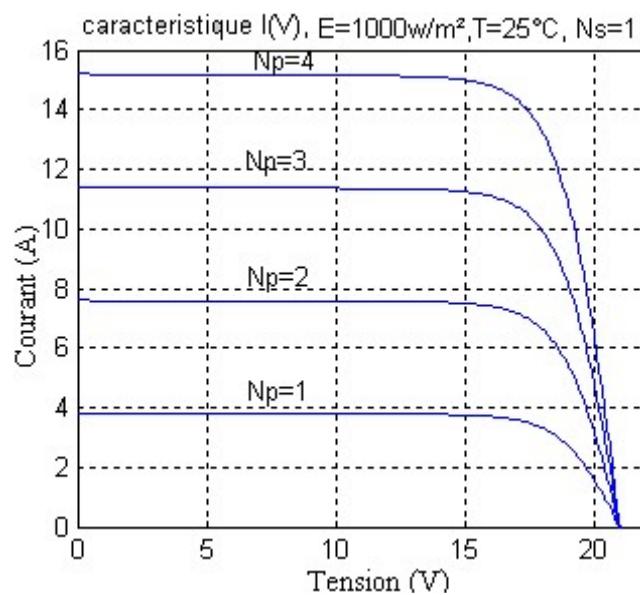


Figure II.19: Caractéristique de nombre des modules en parallèles.

II.9.3. Association mixte (Série + Parallèle):

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle. [17]

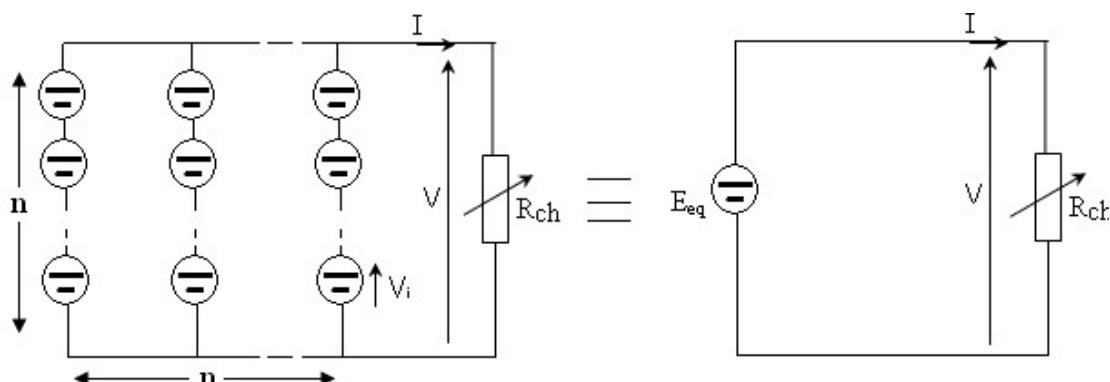


Figure II.20: Association mixte $N_s N_p$ modules solaires.

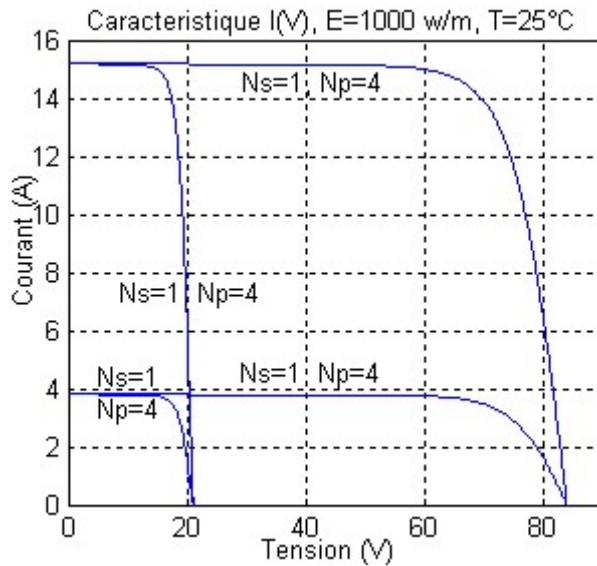


Figure II.21: Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle.

II.10. La protection des cellules:

Un problème persiste en montant les cellules solaires en série ou en parallèle pour générer une tension ou un courant suffisants pour le fonctionnement du système, à cause du fait suivant: lorsqu'une ou plusieurs cellules sont ombrées par un quelconque objet ou lorsqu'il existe des défaillances de quelques-unes, ces cellules deviennent des consommatrices de puissance et non des génératrices ce qui cause des pertes d'énergie. Pour remédier à ce problème on prend quelques cellules voisines et on les shunte par une diode en parallèle appelée '*Bypass diode*'. Ces diodes éviteront que le courant ne passe à travers ces cellules lorsque leur tension tombe au-dessous de la tension de seuil de la diode.

On place aussi une diode en série avec le panneau pour éviter le retour de courant des autres panneaux montés en parallèles lorsqu'un panneau est mal ensoleillé Figure II.22.

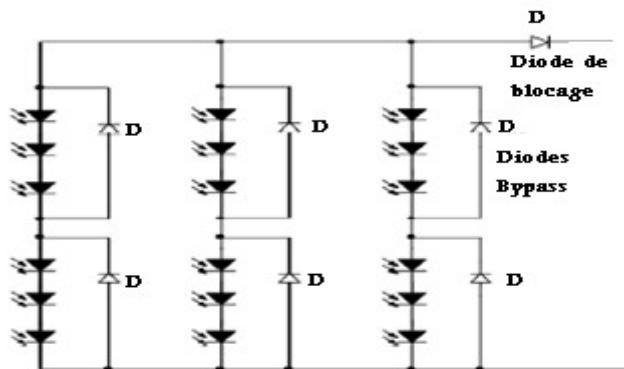


Figure II.22: Branchement des diodes Bypass et de blocage avec un réseau de cellules solaires.

II.11. Conclusion:

Dans ce chapitre on s'est étalé beaucoup plus sur la cellule photovoltaïque, ainsi nous avons présenté son principe de fonctionnement et ses différents types, ensuite on a mis en évidence les modèles mathématiques qui sont les modèles à diode et le modèle à résistance équivalente ainsi que leurs schémas équivalents après on a vu les paramètres de la cellule photovoltaïque, zone de caractérisation de $I(V)$ et les différents paramètres qui influe sur la caractéristique $I(V)$.

Enfin nous avons définit les modules et les panneaux solaire et leur association dans le prochain chapitre nous allons simuler le système photovoltaïque sur simulink.

Chapitre III: simulation du système photovoltaïque

III.1. Introduction:

Les logiciels de simulations sont des outils puissants pour tester et évaluer l'exécution théorique des systèmes. Les conditions d'exécution du dispositif à tester peuvent être facilement contrôlables.

La simulation nous permet de passer de la conception du système théorique à la réalisation pratique avec plus d'assurance car les changements lors de la conception peuvent être faits facilement dans un système simulé, ceci nous permet d'expérimenter un ensemble large de variations et de choisir enfin la solution optimale.

Pour simuler le système photovoltaïque on utilise le logiciel de *Math Works Matlab* qui inclut l'outil de simulation Simulink.

Simulink tient compte de la division d'un système simulé en un certain nombre de sous-ensembles, Ces sous-ensembles peuvent être modélisés et examinés individuellement et Interconnectés. Ceci permet d'établir des sous-ensembles physiques comme le panneau solaire, les batteries, le convertisseur DC/DC et la commande MPPT choisi.

III.2 .Blocs de simulation:

III.2.1. Schéma global de la simulation:

Ce schéma global est constitué de plusieurs étages comprenant le panneau solaire la commande MPPT utilisée, le convertisseur DC-DC (buck), ces étages sont raccordés entre eux pour constituer un système photovoltaïque.

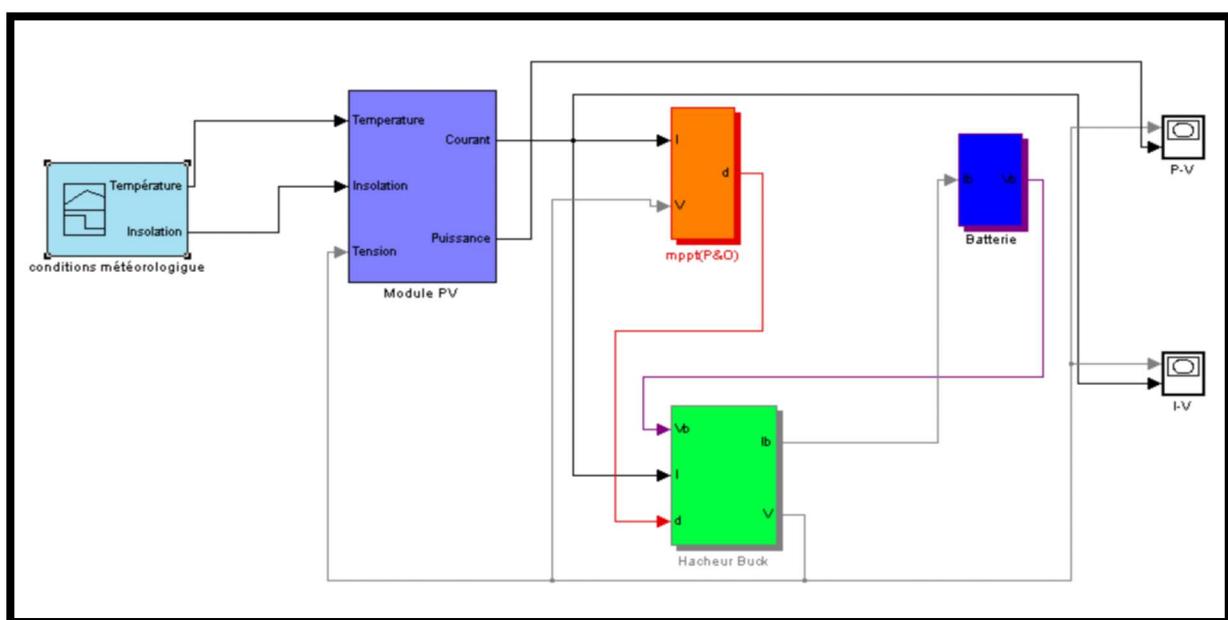


Figure III.1: Schéma global Du système photovoltaïque.

III.2.2. Le Générateur photovoltaïque:

Nous avons utilisé les équations relatives aux panneaux solaires de (II.4) jusqu'à (II.10). Précisons que nous avons utilisé le modèle à une seule diode et pour cela on a utilisé les caractéristiques du panneau solaire KC200GT et qu'ils sont définies par la suiv.

III.2.2.1. Le panneau solaire Kyocera KC200GT: [18]

La technologie avancée Kyocera de traitement des cellules et des installations de production automatisée permet de produire un module photovoltaïque polycristallin très efficace. Le rendement de conversion de la cellule solaire Kyocera est plus de 16%. Ces cellules sont encapsulées entre une couverture en verre trempé et une feuille arrière pour fournir une protection efficace dans des conditions environnementales plus sévère.

III.2.2.1.1. Caractéristiques électriques:

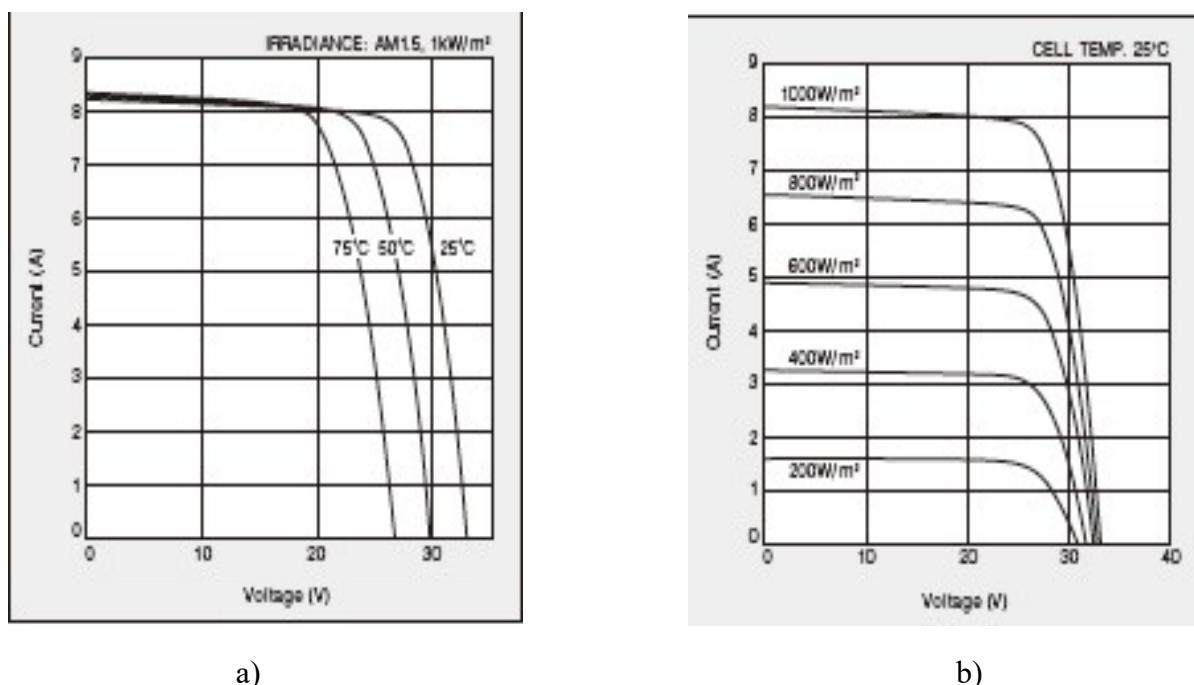


Figure.III.2: Caractéristique courant-tension du module photovoltaïque à KC200GT
a) différentes températures et b) d'éclairement différents.

III.2.2.1.2. Spécification: [18]

■ Performance électrique dans des conditions d'essai standard (*STC)	
Puissance maximale (Pmax)	200W (+10% / -5%)
Tension de la puissance maximale (Vmpp)	26.3 V
courant de la puissance maximale (Impp)	7.61 A
Tension en circuit ouvert (Voc)	32.9 V
Courant en court circuit (Isc)	8.21 A
Tension maximal du système	600 V
Constante d'idéalité des diodes a	1.3
la saturation inverse nominal I _{0,n}	9.825 10 ⁻⁸ A
Coefficient de température de Voc (K _v)	-0.1230 V/K
Coefficient de température de Isc (K _I)	0.0032 A/K
Nombre de cellule par module	54

Tableau 1: Caractéristique de panneau solaire KC200GT.

Deux paramètres restent inconnus dans l'équation (II.5) qui sont R_s et R_p [11]. L'ajustement de R_s et R_p est basée sur une méthode de telle façon qu'il y ait une seule paire $\{R_s, R_p\}$ qui garantie que $P_{max,m} = P_{max,e} = V_{mp} I_{mp}$ au point (V_{mp}, I_{mp}) de la courbe I-V, à savoir la puissance maximale calculée par le modèle I-V (II.5), $P_{max,m}$ est égale à la puissance maximale expérimentale de la fiche, $P_{max,e}$, au point de puissance maximal (MPP).

$$P_{max,m} = V_{mp} \left\{ I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{KT} \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{aN_s} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_p} \right\} = P_{max,e} \quad (\text{III.1})$$

$$R_p = V_{mp} (V_{mp} + R_s I_{mp}) / \left\{ V_{mp} I_{pv} - V_{mp} I_0 \exp \left[\frac{(V_{mp} + R_s I_{mp}) q}{N_s a} \right] + V_{mp} I_0 - P_{max,e} \right\} \quad (\text{III.2})$$

L'équation (III.2) signifie que pour toute valeur de R_s il y aura une valeur de R_p qui rend la courbe mathématique I-V à travers le point expérimental (V_{mp}, I_{mp}) .

III.2.2.1.3. Solution itérative de R_s et R_p :

L'objectif est de trouver la valeur de R_s (et donc R_p) qui fait le pic de la courbe mathématique P-V qui coïncide avec le pic de puissance au point expérimentale (V_{mp} , I_{mp}). Cela nécessite plusieurs itérations jusqu'à ce $P_{max,m} = P_{max,e.}$ [11]

La figure.III.3 montre le contour dessiné par les sommets des courbes de puissance pour plusieurs valeurs de R_s .

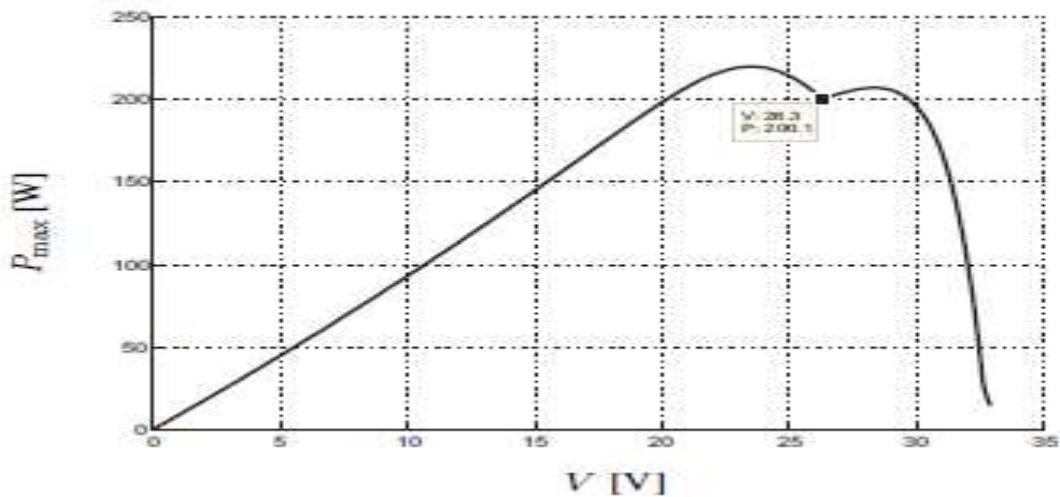


Figure.III.3: $P_{max,m} = f(V)$ pour plusieurs valeurs de $R_s > 0$.

La méthode itérative donne la solution $R_s = 0,221 \Omega$ pour le panneau KC200GT. La figure III.3 montre un graphe de $P_{max,m}$ en fonction de V pour plusieurs valeurs de R_s . Il ya un seul point correspondant à une seule valeur de R_s , qui satisfait la condition imposée $P_{max,m} = V_{mp}I_{mp}$ au point (V_{mp}, I_{mp}) . La figure III.4 montre un graphe de $P_{max,m}$ en fonction de R_s pour $I = I_{mp}$ et $V = V_{mp}$. Ce graphique montre que $R_s = 0,221 \Omega$ est la solution souhaitée, en conformité avec le résultat de la méthode itérative. Ce graphe peut être une voie alternative pour trouver la solution graphique pour R_s . [11]

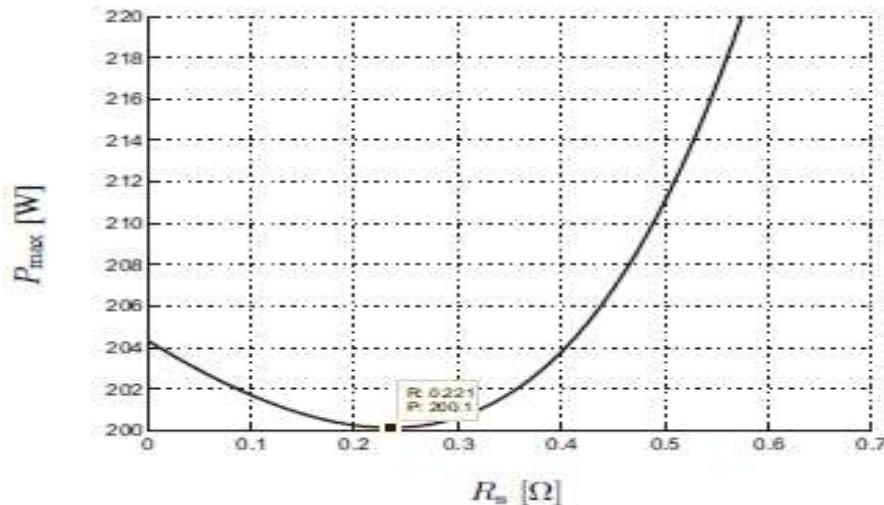


Fig. III.4: $P_{max} = f(R_s)$ avec $I = I_{mp}$ et $V = V_{mp}$

À partir de l'équation (III.2) on peut déterminer la valeur de R_p et qui est égale à 415.405Ω .

III.2.2.2. Schéma de Simulation du panneau pv à une seule diode:

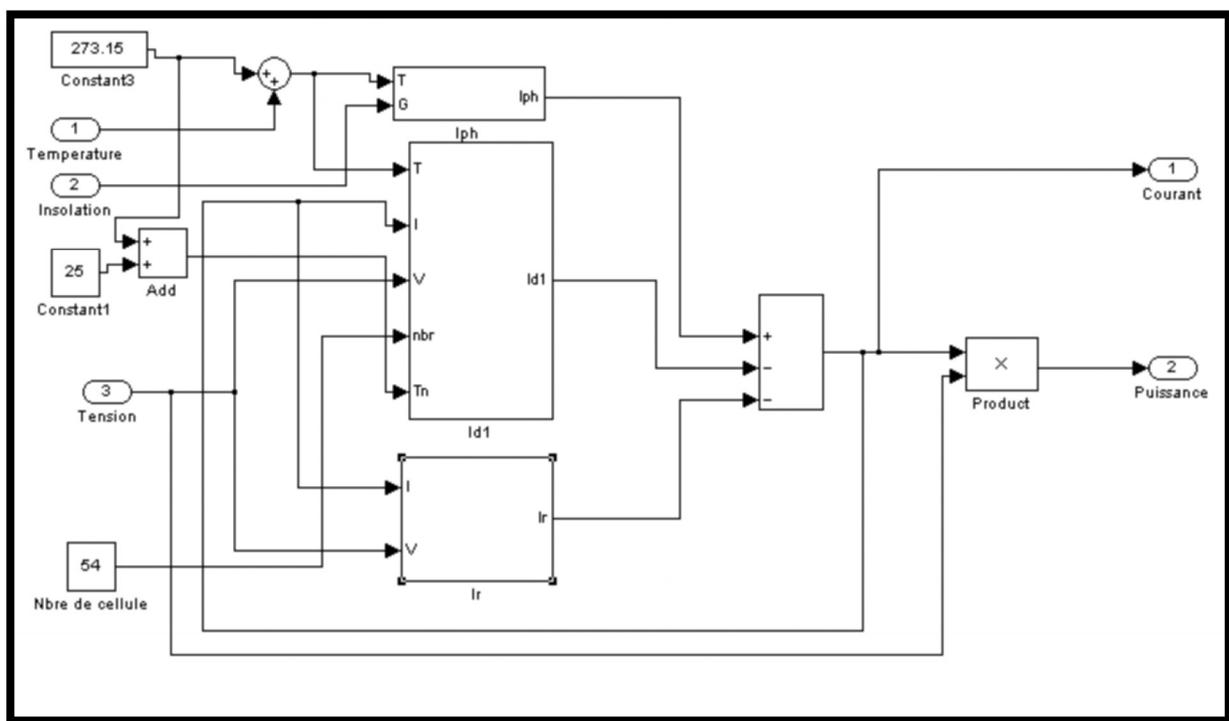


Figure III.5: Schéma de la Simulation de générateur pv à une seule diode.

III.2.2.3. Simulation du modèle à résistance équivalente du panneau PV:

Pour cela nous avons fait appel aux équations (II.15)- (II.19). Ces dernières seront améliorées en les comparant avec les caractéristiques données du panneau PV KC200GT.

Par conséquent l'équation (II.15) devient :

Chapitre III: simulation du système photovoltaïque

$$V_{pv} = \frac{R1 R2 (I_{cc} - I_{pv})}{R1 + R2 (1 - \frac{I_{pv}}{I_{cc}}) (1 - 0.124 (I_{cc_100\%} - I_{cc}))} \quad (\text{III.3})$$

Pour y arriver à cette dernière, on procède de la manière suivante:

On calcule le facteur d'échelle M pour une valeur de R_{eq} obtenue pour un niveau d'irradiation diminué $I_{SC20\%}$. On appellera dans la suite R_{eqmin} la résistance des cellules photovoltaïques en fonctionnement en circuit ouvert ($I_{pv} = 0$, $I_{Req} = I_{cc}$);

$$R_{eq\ min\ 20\%} = R_{eq\ min\ 100\%} \frac{V_{oc\ 20\%}}{V_{oc\ 20\%} * 20\%} \quad (\text{III.4})$$

A partir des données analysées du modèle de cellule PV:

$$R_2 = 120 [\Omega]$$

$$V_{oc_100\%} = 32.9 [\text{V}] (\text{G}=1000 \text{ w/m}^2, 25^\circ\text{C})$$

$$V_{oc_20\%} = 30.54 [\text{V}] (\text{G}=200 \text{ w/m}^2, 25^\circ\text{C})$$

$$R_{eq\ min\ 100\%} = 4 [\Omega]$$

La résistance équivalente à 20% de l'éclairement a la valeur suivante:

$$R_{eq\ min\ 20\%} = 18.57 [\Omega] \quad (\text{III.5})$$

Les variations de valeur $R_{eq,min}$ peuvent être simulés comme des changements de la valeur maximale du paramètre K(II.16). Pour la baisse du niveau de l'irradiation ($I_{cc20\%}$), il peut être calculé:

$$K_{max_20\%} = 0.188. \quad (\text{III.6})$$

Cela signifie, que pour le niveau d'irradiation réduite ($I_{cc20\%}$), à circuit ouvert, la valeur de K doit être égale à (III.6) pour fournir une valeur correcte de V_{OC} .

La différence de valeurs du courant court-circuit PV (pour l'irradiation 1000 W/m² et 200 W/m²) est comme suit:

$$I_{cc_100\%} - I_{cc_20\%} = 8.21 - 1.64 = 6.57 [\text{A}] \quad (\text{III.7})$$

Sur la base de l'hypothèse que le changement V_{OC} est linéaire (dans la plage de -100% à 20% de l'irradiation), il peut être écrit:

$$K_{max_20\%} \Leftrightarrow I_{cc_100\%} - I_{cc_20\%} \quad (\text{III.8})$$

$$K_{max_100\%} \Leftrightarrow I_{cc_100\%} - I_{cc_100\%} = 0.$$

A partir de ca on peut tracer donc I_{cc} en fonction de M;

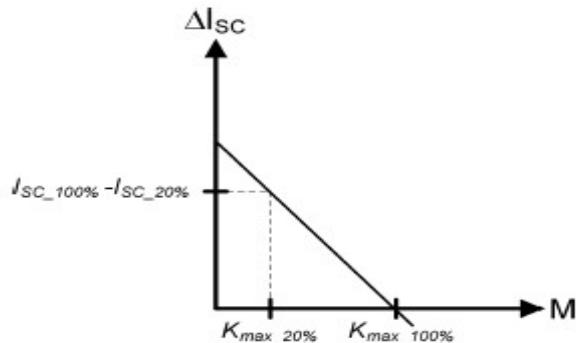


Figure III.6: I_{SC} en fonction du facteur d'échelle M (II.19).

De la Figure III.6, il s'ensuit que:

$$I_{cc_100\%} - I_{cc} = \left(\frac{I_{cc_100\%} - I_{cc_20\%}}{K_{max_20\%}} \right) \cdot M - \left(\frac{I_{cc_100\%} - I_{cc_20\%}}{K_{max_20\%}} \right). \quad (\text{III.9})$$

Valeur de M facteur d'échelle pour le modèle de cellules photovoltaïques analysées:

$$M = 1 - 0,124 * (8,21 - I_{cc}) \quad (\text{III.10})$$

Le schéma adopté pour la simulation est donné par la figure III.7.

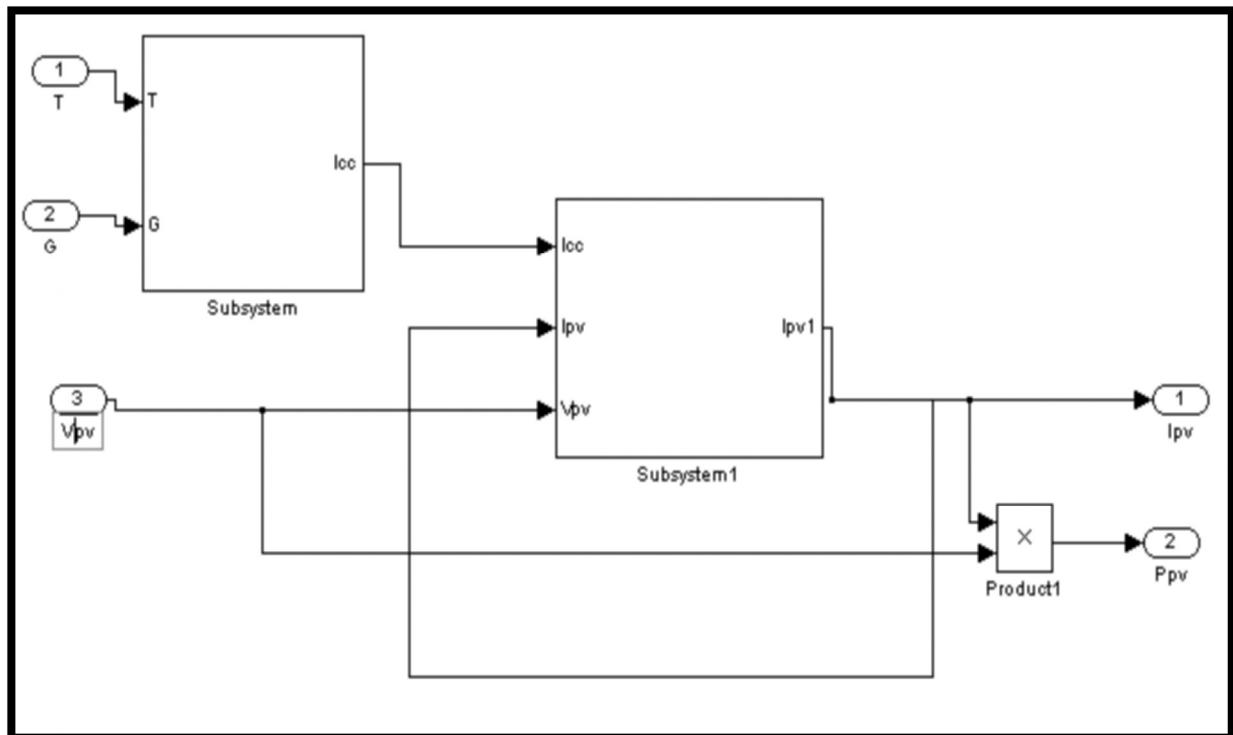


Figure III.7: Schéma de la Simulation de générateur pv à résistance équivalente.

Chapitre III: simulation du système photovoltaïque

III.2.3. Le convertisseur DC/DC:

D'après les équations relatives au hacheur survolté (buck) on a les équations suivantes :

$$C1=5.6 \text{ mf}$$

$$C2=C1$$

$$L= 3.5\text{mH}$$

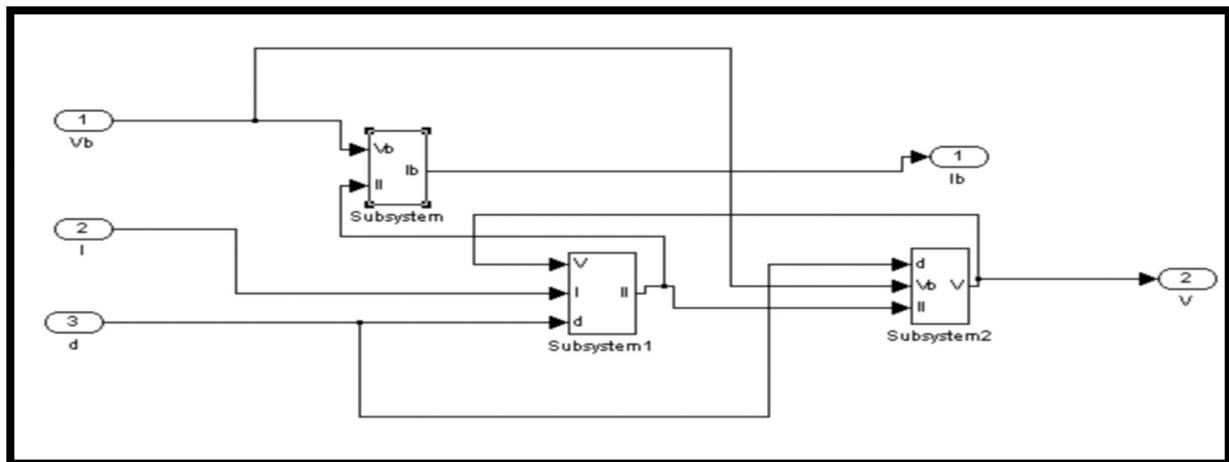


Figure III.8: schéma de simulation du convertisseur DC/DC.

III.2.4. L'algorithme MPPT:

D'après l'organigramme de l'algorithme P&O (pertub and observe) on a :

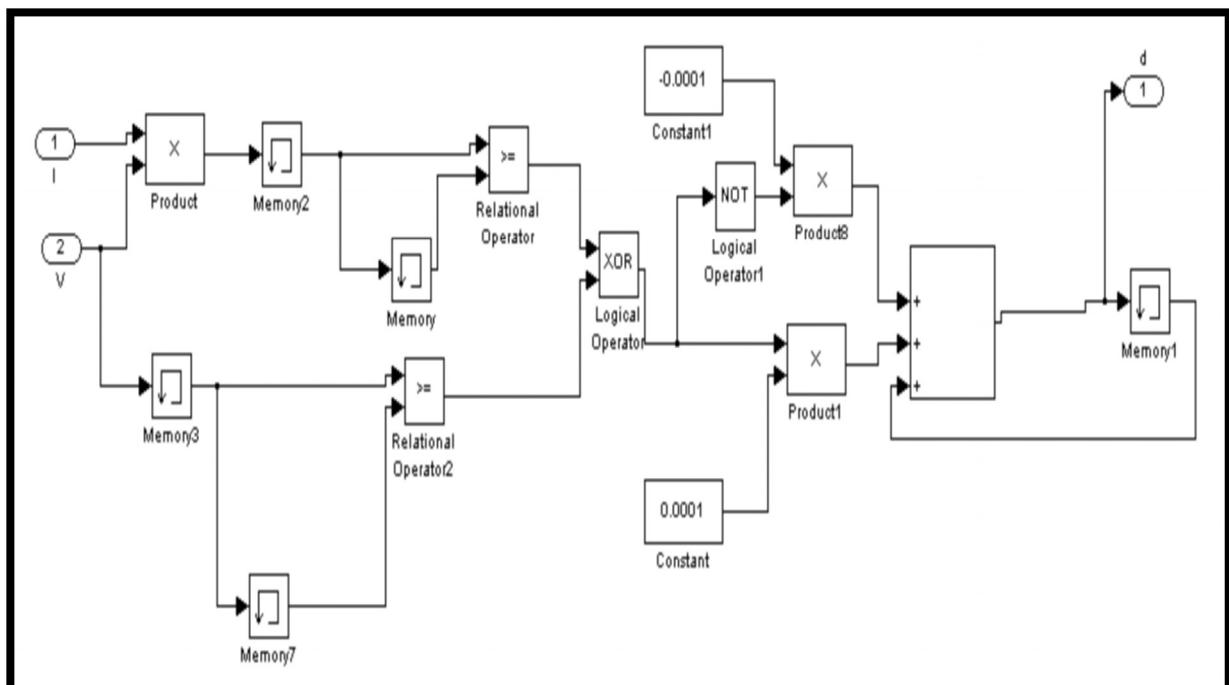


Figure III.9: schéma de simulation de l'algorithme P&O.

III.2.5. le modèle de batterie:

Dans le modèle de Batterie on a pris les valeurs de R_{bs} , R_{b1} , R_{bp} , C_{b1} , C_{pb} comme suit:

$$R_{bs} = 0.0013\Omega;$$

$$R_{b1} = 2.84\Omega;$$

$$R_{bp} = 10 \cdot 10^3\Omega;$$

$$C_{b1} = 2.5 \text{ KF};$$

$$C_{pb} = 4.6501 \text{ KF}.$$

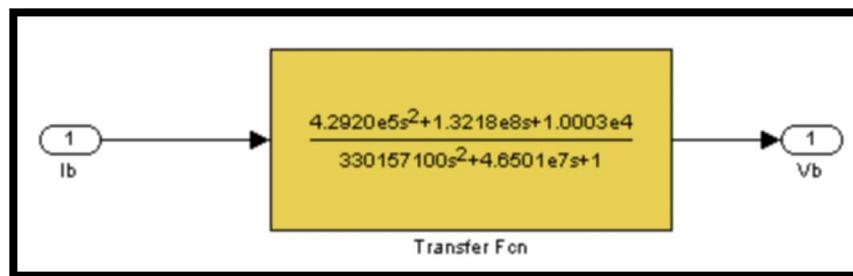


Figure III.10: schéma de simulation de la batterie.

III.3. Résultats de simulation:

III.3.1. Résultats de simulation du panneau solaire à une seule diode:

Nous examinons dans cette partie le comportement du panneau solaire à une seule diode et visualiser les courbes $P=f(V)$ et $I=f(V)$.

Les courbes dans les figures III.11 et Figure III.12 sont obtenues pour les conditions standard ($T=25^\circ\text{C}$ et $G=1000 \text{ w/m}^2$).

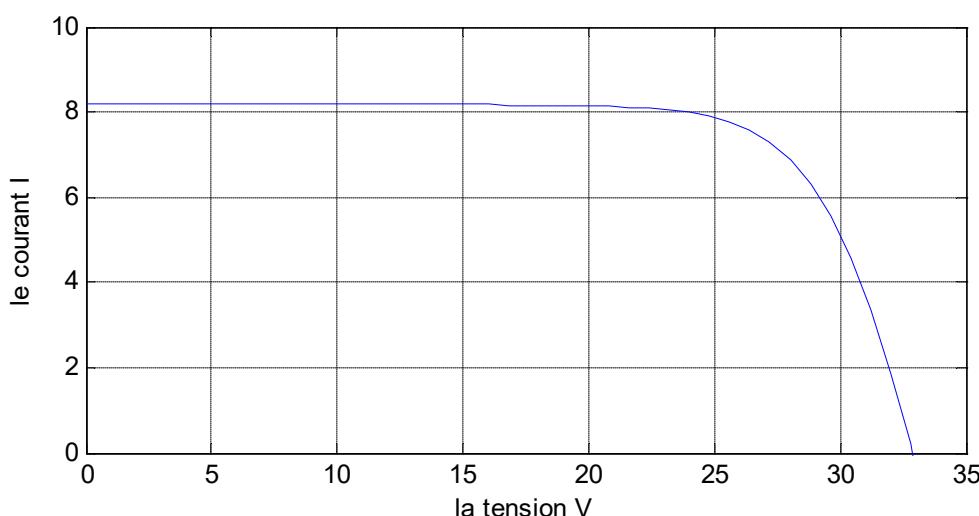


Figure III.11: la courbe $I=f(V)$ du modèle à une seule diode.

Chapitre III: simulation du système photovoltaïque

On remarque que le courant reste constant en fonction de la tension (zone 1) (comportement d'un générateur de courant). A partir du point maximal (V_{max} , I_{max}) le courant diminue jusqu'à s'annuler (V_{oc}). Ce résultat est compatible avec les caractéristiques données du panneau PV KC200GT.

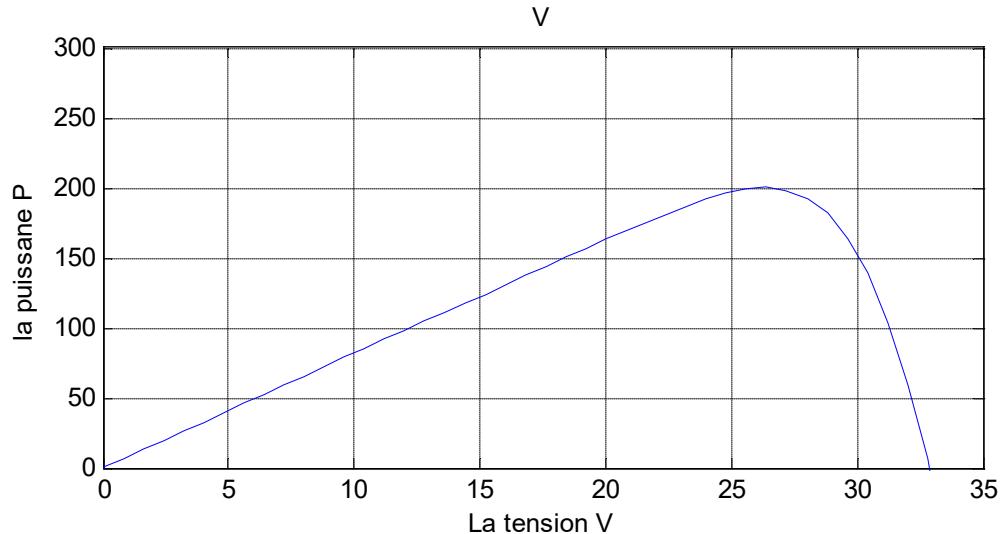


Figure III.12: la courbe $P=f(V)$ du modèle à une seule diode.

On remarque que la courbe obtenue par simulation coïncide bien avec celle donnée par le constructeur pour les mêmes conditions standard.

III.3.2. Résultats de simulation du panneau solaire à résistance équivalente:

Dans ce paragraphe nous avons simulé le modèle du panneau solaire à résistance équivalente et visualiser les courbes $P=f(V)$ et $I=f(V)$.

a) les courbes $P=f(V)$ et $I=f(V)$ pour une température et une insolation constante:

Les résultats obtenus pour la condition standard ($T=25^\circ\text{C}$ et $G=1000 \text{ w/m}^2$) sont illustrés dans les figures III.13 et III.14.

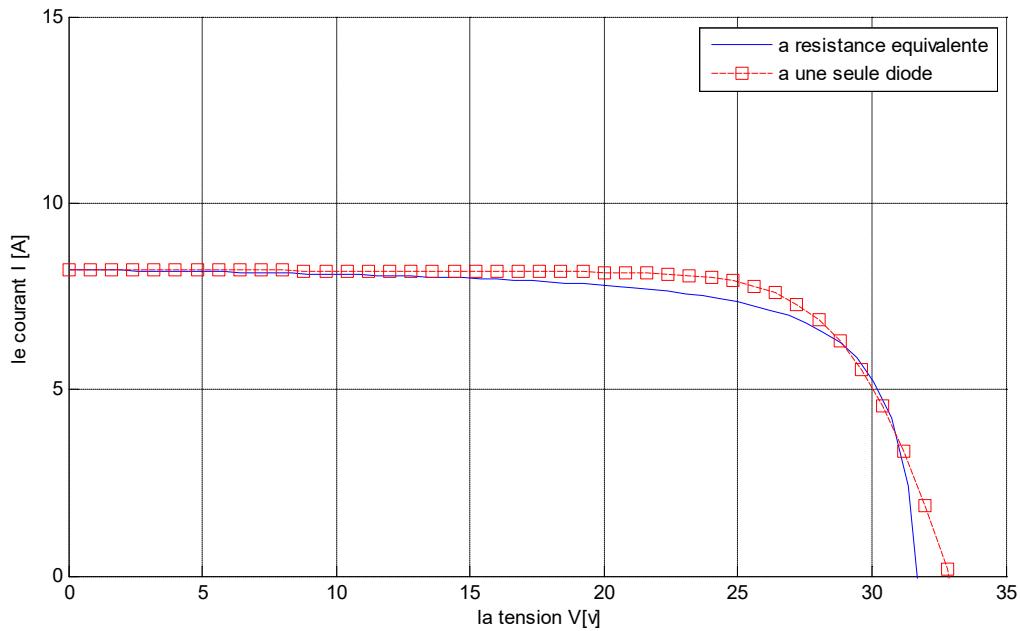


Figure III.13: comparaison de la courbe $I=f(V)$ du modèle à résistance équivalente et modèle à une seule diode.

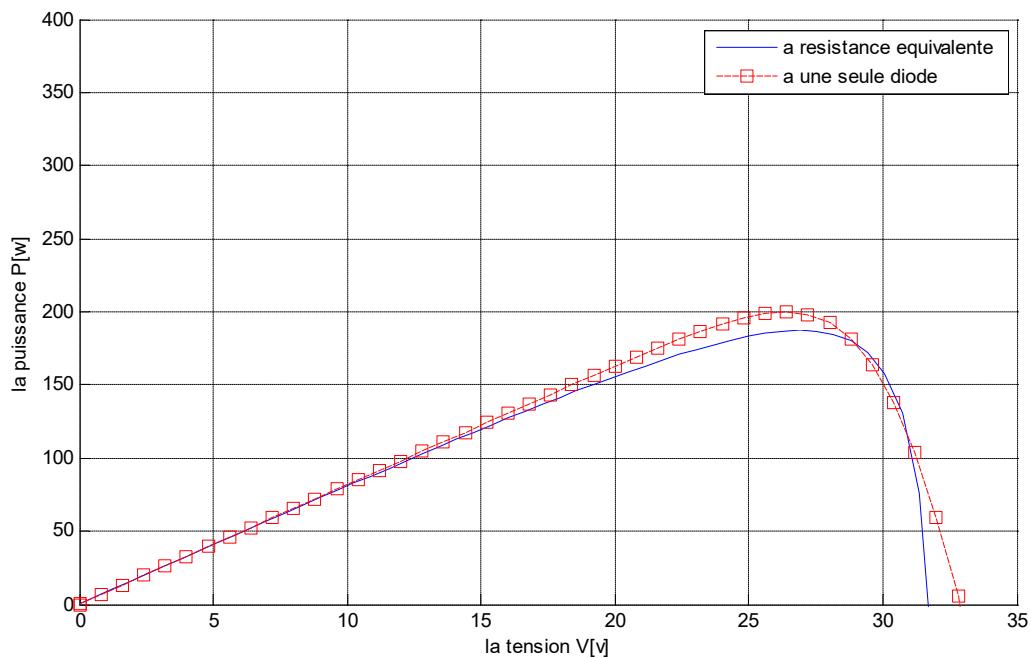


Figure III.14: comparaison de la courbe $I=f(V)$ du modèle à résistance équivalente et modèle à une seule diode.

Nous remarquons une forte coïncidence des résultats de simulation pour les deux modèles. En conséquence il peut être adopté pour lors de l'implémentation.

b) les courbes $P=f(V)$ et $I=f(V)$ pour une température constante et une insolation variable:

Les résultats de simulation obtenus pour différents niveaux d'insolation sont montrés dans les figures III.15 et III.16.

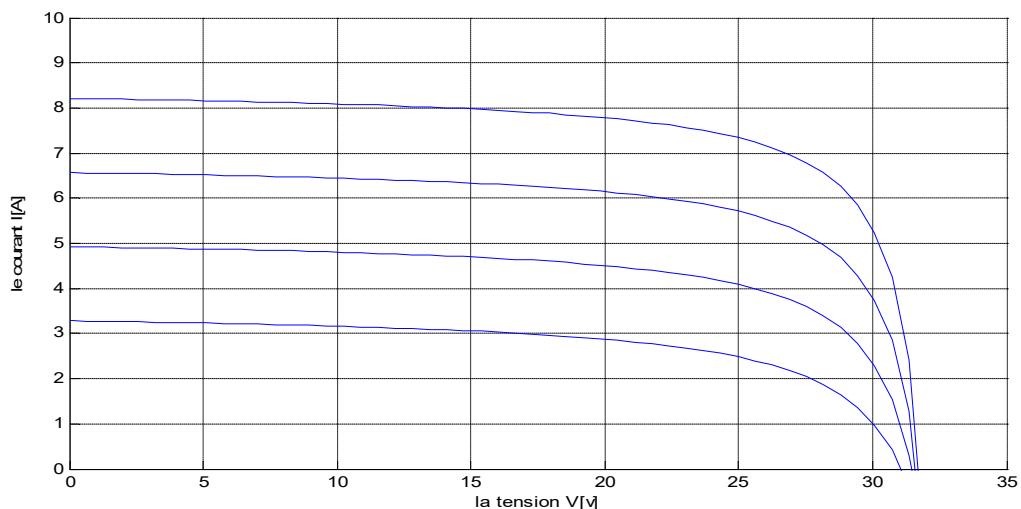


Figure III.15: la courbe $I=f(V)$ du modèle à résistance équivalente à différentes niveau d'insolation.

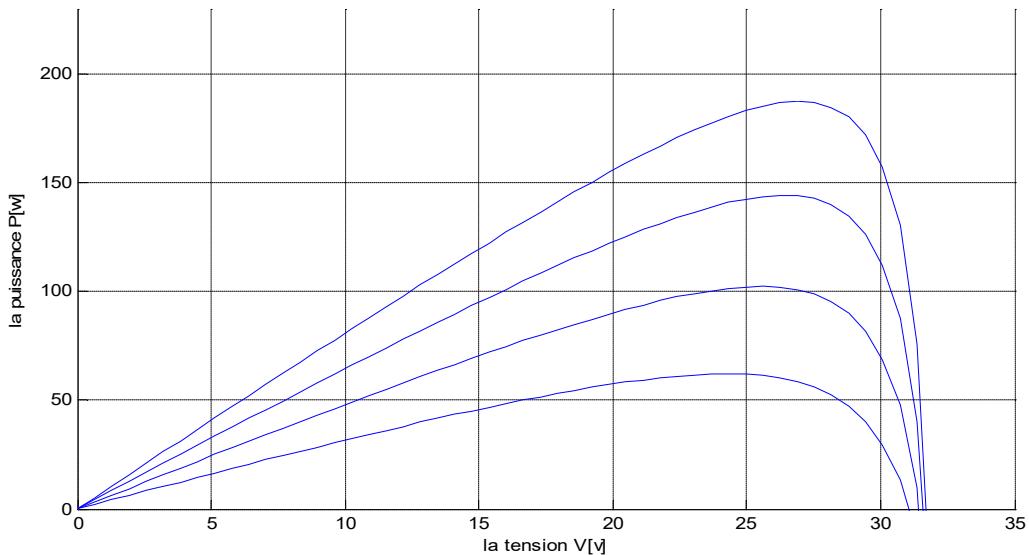


Figure III.16: la courbe $P=f(V)$ du modèle à résistance équivalente à différentes niveau d'insolation.

L'influence de l'insolation sur la valeur du courant et de la puissance est très remarquable.

III.3.3. Résultats de simulation du système photovoltaïque:

Il s'agit de vérifier le comportement du système photovoltaïque, où l'insolation et la température sont variables.

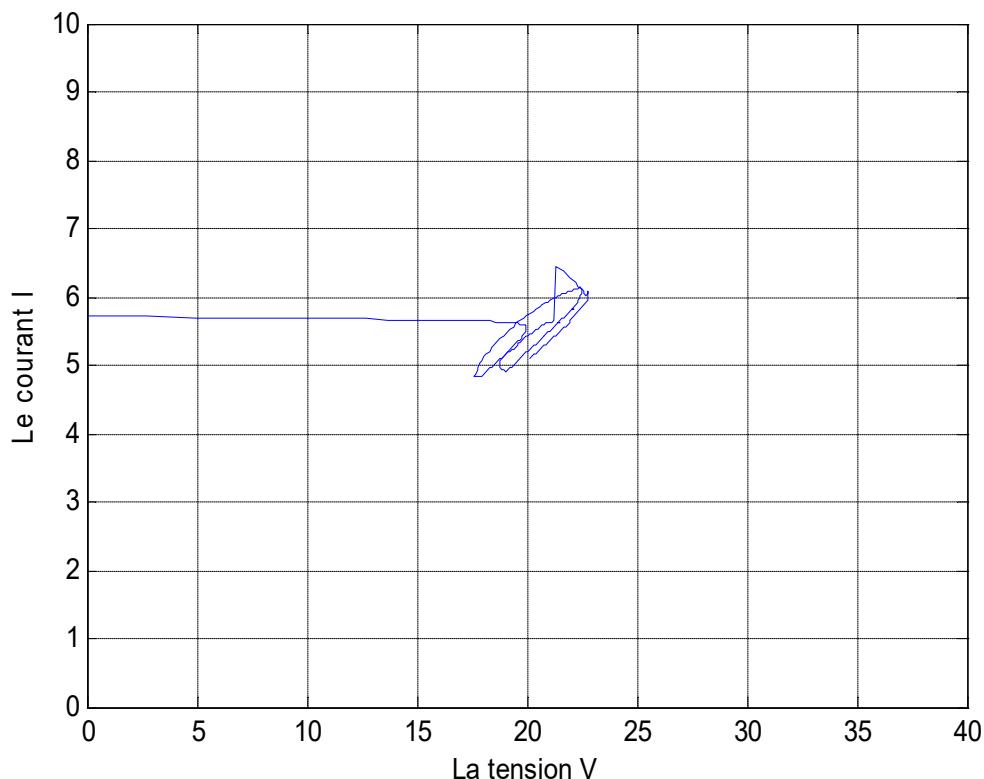


Figure III.17: la courbe $I=f(V)$ du système photovoltaïque.

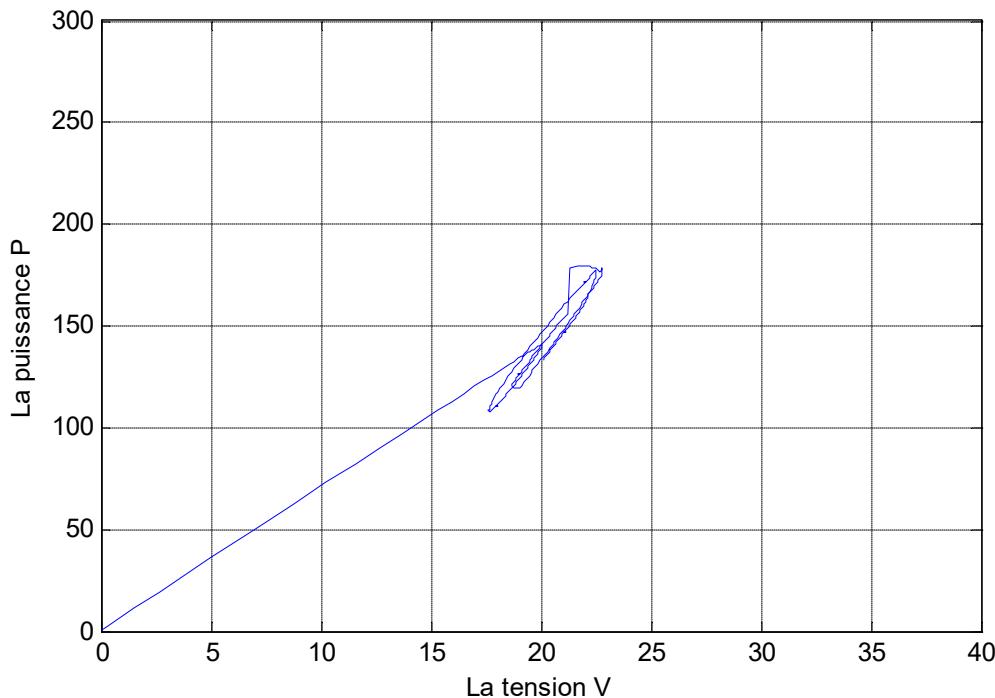


Figure III.18: la courbe $P=f(V)$ du système photovoltaïque.

Ces résultats de simulation sont obtenus pour un algorithme MPPT (P&O) simple, on remarque ainsi que le point maximal est obtenu.

III.4. Conclusion:

La simulation du système photovoltaïque nous a permis de vérifier le bon fondement des relations et des modèles mathématiques de chaque partie de ce système. Ainsi nous avons pu faire simuler les panneaux solaires et avoir leurs caractéristiques que nous avons exploitées dans le deuxième chapitre.

Le plus grand bénéfice de cette simulation est quelle nous a permis de trouver les ordres de grandeurs des différents paramètres qui font que le système fonctionne suivant le chemin optimal, bien sûr l'éventualité de changements de ces paramètres est à envisager durant la réalisation pratique on peut dire que cela est inévitable.

IV.1. Introduction:

Dans ce chapitre on va présenter et expliquer l'implémentation de la cellule photovoltaïque sur FPGA en utilisant le logiciel system generator. Notre travail est constitué en plusieurs parties (Blocs) ensuite le tout est assemblé pour construire le circuit global.

IV.2. Circuit FPGA:

Les FPGA (Field Programmable Gate Array) sont des circuits à architecture programmable qui ont été inventés par la société XILINX en 1985. 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 notamment 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).

De nombreuses familles de circuits programmables et reprogrammables sont apparues Depuis les années 70 avec des noms très divers suivant les constructeurs. Une classification possible des circuits numériques en précisant où se situent les circuits FPGA dans cette classification. Les FPGA sont utilisés dans de nombreuses applications, on en cite dans ce qui suit quelques unes:

- Prototypage de nouveaux circuits;
- Fabrication de composants spéciaux en petite série;
- Adaptation aux besoins rencontrés lors de l'utilisation;
- Systèmes de commande à temps réel;
- DSP (Digital Signal Processor);
- Imagerie médicale.

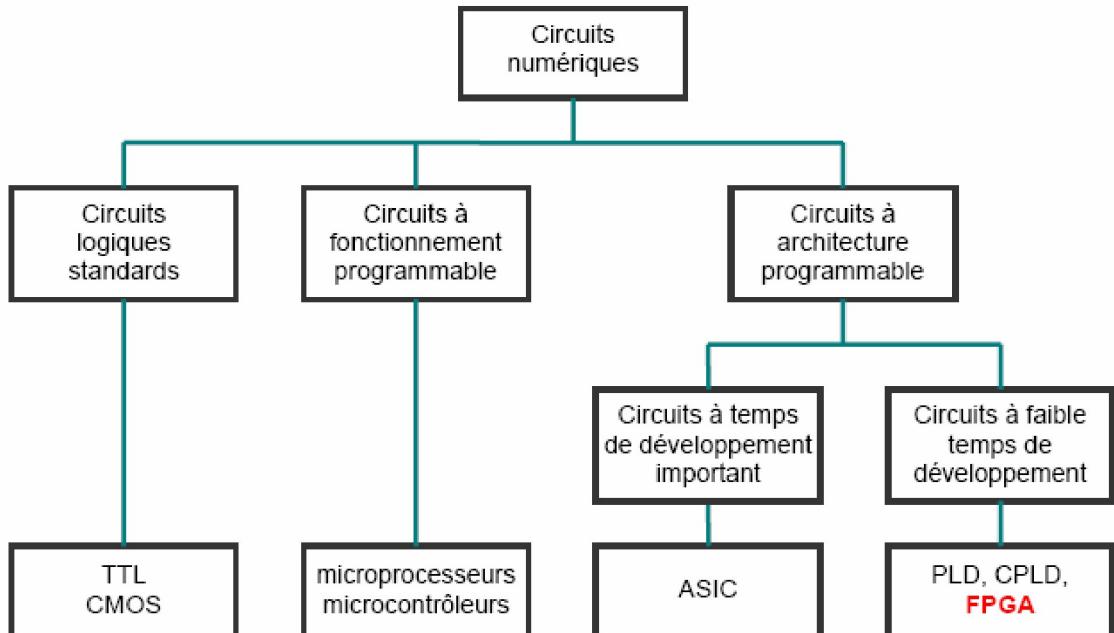


Figure VI.1: Classification des circuits numérique.

La partie “**Field Programmable**” du nom de FPGA se rapporte au fait que sa programmation aura lieu “sur place” (par opposition aux dispositifs dont la fonctionnalité interne est câblée par le constructeur). Ceci peut signifier que les FPGAs peuvent être configurés dans un laboratoire, ou par un utilisateur par un simple système électronique. Si un dispositif est capable d’être programmé sans l’extraire de son environnement, il est désigné sous le nom (*in-system programmable*) (ISP).

IV.2.1. Langage de description VHDL:

Auparavant pour décrire le fonctionnement d’un circuit électronique programmable, les techniciens et les ingénieurs utilisaient des langages de bas niveau (ABEL, PALASM, ORCAD/PLD,...) ou plus simplement un outil de saisie de schémas. Actuellement la densité de fonctions logiques (portes et bascules) intégrées dans les PLD (Programmable Logic Device) est telle (plusieurs milliers voire millions de portes) qu’il n’est plus possible d’utiliser les outils d’hier pour développer les circuits d’aujourd’hui.

Les sociétés de développement et les ingénieurs ont voulu s’affranchir des contraintes technologiques des circuits. Ils ont donc créé des langages dits de haut niveau à savoir VHDL et VERILOG. Ces deux langages font abstraction des contraintes technologies des circuits PLD. Ils permettent au code écrit d’être portable, c’est à dire qu’une description écrite pour un circuit peut être facilement utilisée pour un autre circuit.

Chapitre IV: développement du système sous system generator

Il faut avoir à l'esprit que ces langages dits de haut niveau permettent de matérialiser les structures électroniques d'un circuit. En effet les instructions écrites dans ces langages se traduisent par une configuration logique de portes et de bascules qui est intégrée à l'intérieur des circuits PLD. C'est pour cela qu'on préfère parler de description VHDL ou VERILOG que de langage. Dans ce qui suit, on s'intéressera uniquement au VHDL et aux fonctionnalités de base de celui-ci lors des phases de conception ou synthèse.

L'abréviation VHDL signifie VHSIC (Very High Speed Integrated Circuit) Hardware Description Language. Ce langage a été développé dans les années 80 par le DOD (Departement of Defense) des Etats-Unis ; l'objectif était de disposer d'un langage commun avec les fournisseurs pour décrire les circuits complexes. En 1987, une première version du langage est standardisée par l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sous la dénomination IEEE Std. 1076-1987 (VHDL 87). Une évolution du VHDL est normalisée en 1993 (IEEE Std. 1076-1993 ou VHDL-93) ; cette nouvelle version supprime quelques ambiguïtés de la version 87, et surtout met à disposition de nouvelles commandes. Actuellement, tous les outils dignes de ce nom supportent le VHDL-93. En 1997, de nouvelles libraires ont été normalisées de manière à ajouter des fonctions pour la synthèse (conception) de circuits logiques programmables PLD, et plus particulièrement les FPGA. La dernière révision est celle de 2002 (IEEE Std. 1076-2002 ou VHDL-2002).

Le VHDL est un langage permettant de faire;

- **La spécification:** le langage VHDL est très bien adapté à la modélisation des systèmes numériques complexes grâce à son niveau élevé d'abstraction. Le partitionnement en plusieurs sous ensembles permet de subdiviser un modèle complexe en plusieurs éléments prêts à être développés séparément [19].

- **La simulation:** la notion du temps, présente dans le langage, permet son utilisation pour décrire des fichiers de simulation (Test-Bench). Le modèle comportemental avec les fichiers de simulation peuvent constituer, ensemble, un cahier de charges. Les fichiers de simulation peuvent également être utilisés avec un banc de tests de production.

- **La synthèse logique:** les logiciels de synthèse permettent de traduire la description VHDL en logique. Il est ainsi possible d'intégrer la description dans un composant programmable (CPLD, FPGA) ou dans un circuit ASIC [20].

- **La preuve formelle:** le langage permet de prouver formellement que 2 descriptions sont parfaitement identiques au niveau de leur fonctionnalité [20].

IV.2.2. Le logiciel Xilinx System Generator:



Dans le cadre de ce projet, le développement du prototype s'effectue avec le logiciel XSG. Il s'agit d'un toolbox développé par Xilinx pour être intégré dans l'environnement Matlab-Simulink et qui laisse l'usager créer 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 comme SPS. Une fois le système complété, le code VHDL généré par l'outil *XSG* reproduit exactement le comportement observé dans Matlab. Pour le prototypage rapide, le choix de cet outil est facilement explicable. Le système de contrôle devant être 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. Aussi, le modèle peut ensuite être couplé à des moteurs virtuels (à l'aide du toolbox SPS) et des simulations en boucle fermée sont réalisables. Quand le prototype fonctionne, le passage vers la plateforme matérielle pour des tests sur le terrain est rapide, ce qui rend la validation du prototype un projet réalisable à court terme.

IV.2.2.1. Principe de la conception:

Plus de 90 blocs de *XSN* de conception sont fournis dans le bloc Xilinx blockset dans Simulink. Ces blocs comprennent des blocs communs de conception tels que des additionneurs, des multiplicateurs, des multiplexeurs, des registres et d'autres, comme le montre la figure IV.2 sont également inclus.

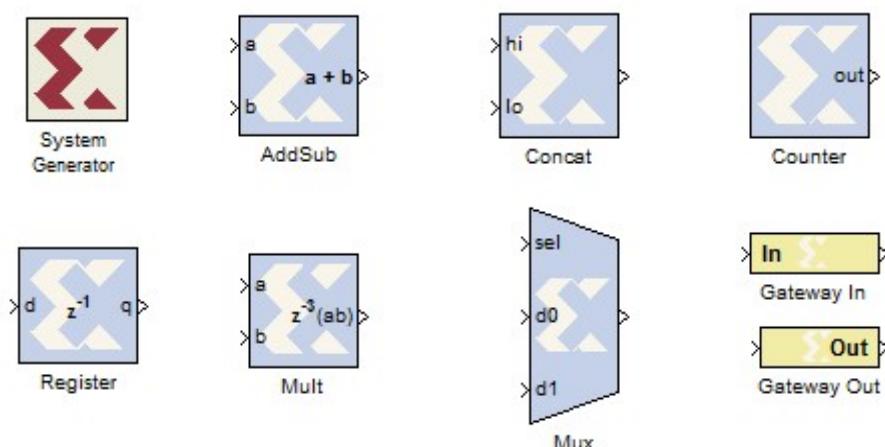


Figure IV.2: Xilinx Block Set.

Chapitre IV: développement du système sous system generator

Le Xilinx Blockset est accessible via le navigateur de la bibliothèque Simulink qui peut être lancées à partir de la barre d'outils standard de MATLAB (figure IV.3). Les blocs sont séparés en sous-catégories pour faciliter la recherche. Une sous-catégorie, l'indice comprend tous les blocs et est souvent le moyen le plus rapide d'accéder à un bloc que vous êtes déjà familier avec.

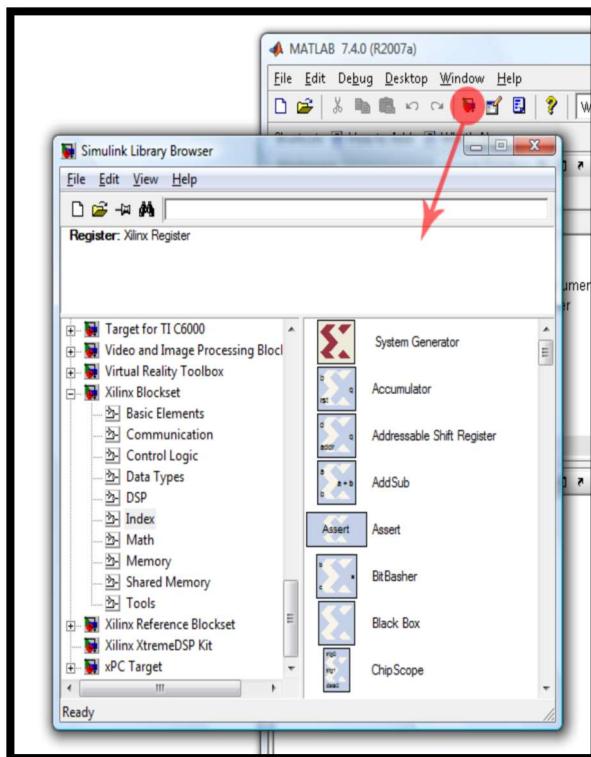


Figure IV.3: Lancement de Simulink.

IV.2.2.2. Définition de la frontière FPGA:

System Generator fonctionne avec les modèles Simulink standard. Deux blocs nommés Gateway In et Gateway Out définissent la frontière de FPGA à partir du modèle de simulation Simulink. Double-cliquez sur les blocs amène l'éditeur de propriétés, où les propriétés du bloc peuvent être entièrement spécifiés figure IV.4.

Chapitre IV: développement du système sous system generator

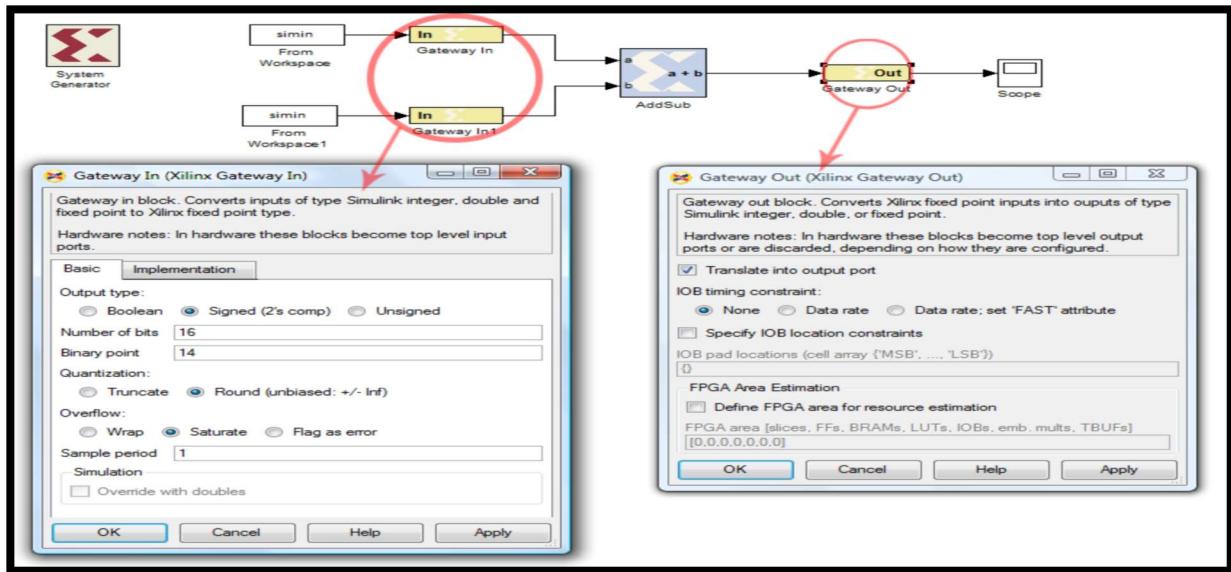


Figure IV.4: blocs Gateway In et Gateway Out.

Le bloc Gateway In convertit les entrées de type Simulink entier, double et fixe point à des nombres point fixes Xilinx. Les types point fixes de Xilinx sont:

- booléen
- signé
- non signé

Si le type choisi est signé ou non signé, le nombre de bits avec la virgule binaire a besoin d'être spécifié. Le nombre de bits représente la largeur d'entrée, tandis que le paramètre du point binaire indique le nombre de bits à droite de la virgule binaire (c'est à dire la taille de la fraction). La position du point binaire doit être comprise entre zéro et le nombre de bits spécifié.

IV.3. Simulation sous system generator:

La simulation sous System Generator se base sur la simulation faite sous simulink en respectant la structure des blocs sauf que les données (les constantes, les opérations mathématiques) sont convertis en mode numérique (précision du nombre de bits).

La figure suivante présente le schéma de la cellule PV étudiée à résistance équivalente:

Chapitre IV: développement du système sous system generator

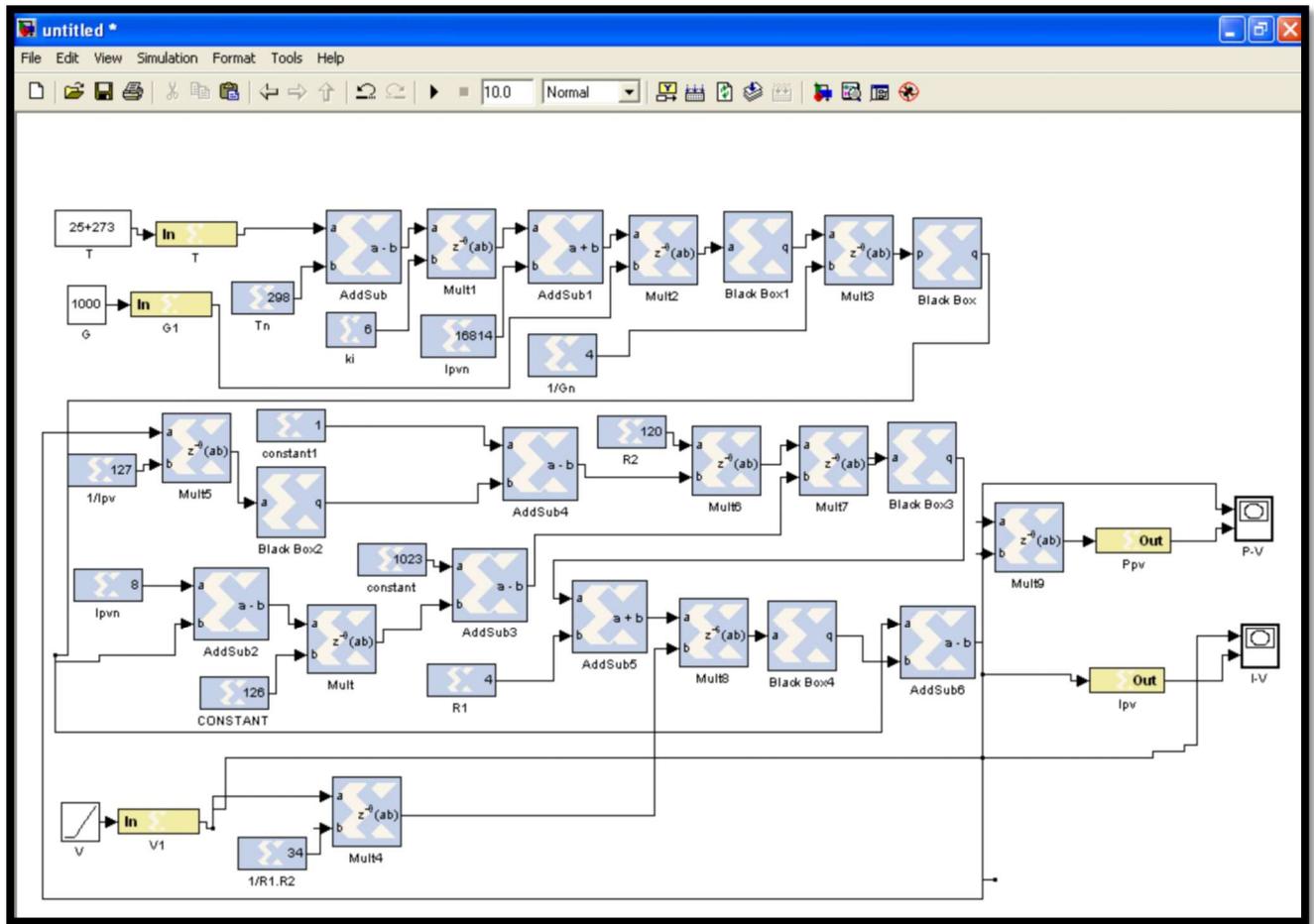


Figure IV.5: Simulation sous system generator.

IV.3.1. Description du système:

IV.3.1.1. Affectation des bits aux blocs:

L'affectation des bits à chaque bloc s'effectue à l'aide d'une fenêtre obtenue par double click sur le bloc concerné. En choisissant '**user defined**' pour attribuer le nombre de bits ainsi que le type de la valeur. Par la suite nous effectuons un choix entre la valeur signée ou non signée en choisissant une des opérations '**signed**' ou '**unsigned**' respectivement. Dans La case '**number of bits**' on choisit le nombre de bits nécessaire et dans la case '**binary point**' on affecte le nombre de bits après la virgule.

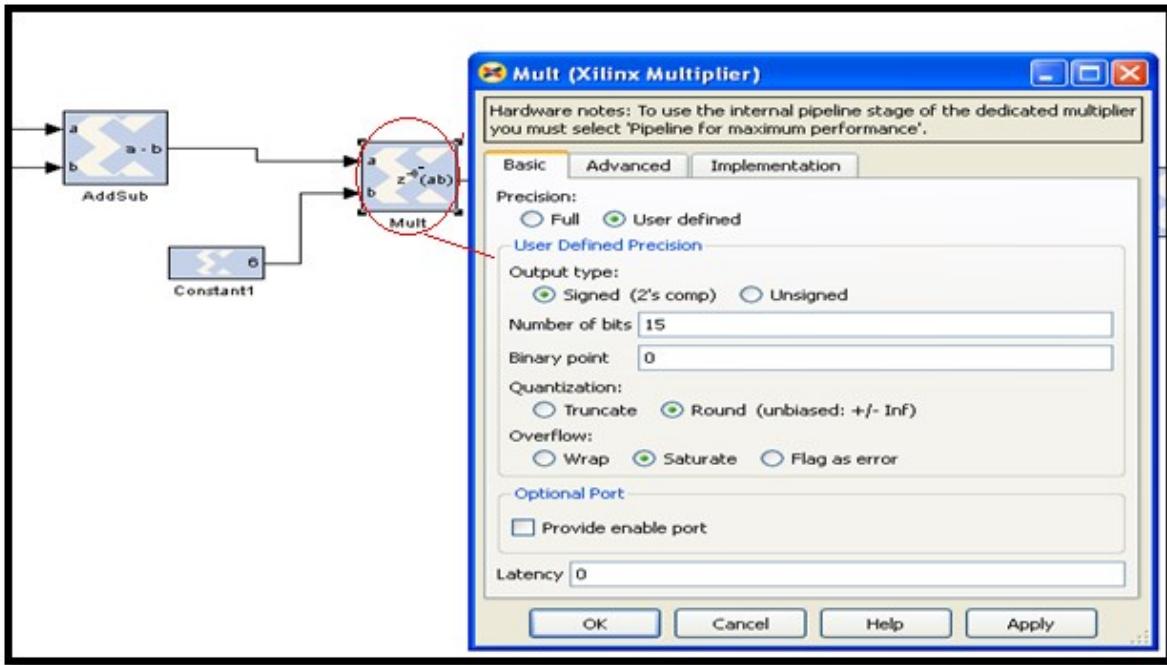


Figure IV.6: Exemple d'affectation des bits.

Pour prendre en considération les chiffres après la virgule dans le cas d'un nombre fractionnel, on doit le multiplier par des nombres de 2^n , tel que n est le nombre de bits à ajoutés, et ceci dans le but d'enlever la virgule et rendre le nombre entier. Ensuite on élimine les bits ajoutés après avoir terminé l'opération par des blocs appelés '**black box**'.

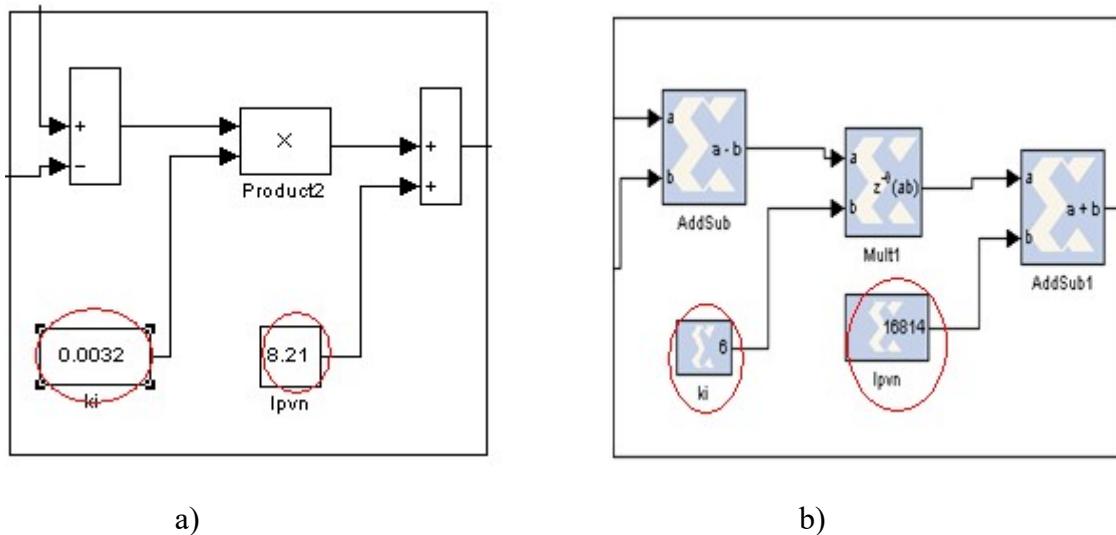


Figure IV.7: Comparaison des constantes entre simulink et le system generator (K_i et I_{pvN})

a) cas simulink b)cas system generator.

Chapitre IV: développement du système sous system generator

Remarque:

Dans le cas d'un additionneur l'ajout du nombre de bits aux deux entrées doit être égal, ce qui n'est pas nécessaire pour un multiplicateur.

IV.3.1.2. Black box:

Le Black box fournit un moyen d'intégrer des modèles d'un langage de description matérielle (HDL) dans system generator. Il est utilisé pour spécifier à la fois le comportement de simulation dans Simulink et les fichiers de mise en œuvre pour être utilisé pendant la génération de code avec le system generator. Les ports de Black box reçoivent et génèrent les mêmes types de signaux que ceux des blocs de system génératator. Quand le Black box est convertit en hardware, l'entité HDL associé est automatiquement intégrée et câblé à d'autres blocs dans la conception résultante.

Apres cette définition du black box, nous décrirons le chemin de son emplacement dans la bibliothèque de system generator comme suit:

Aller à:

- ‘**simulink library browser**’,
- ‘**Xilinx blockset**’,
- ‘**basic elements**’.

Enfin, on glisse le bloc dans la fenêtre qui contient notre schéma dans system generator et une fenêtre s'ouvre automatiquement. Cette fenêtre indique le chemin à parcourir pour repérer le fichier VHDL qui contient la description VHDL qu'on souhaite généré. Ensuite, on remarque que le black box contient des entrés et sorties de la description.

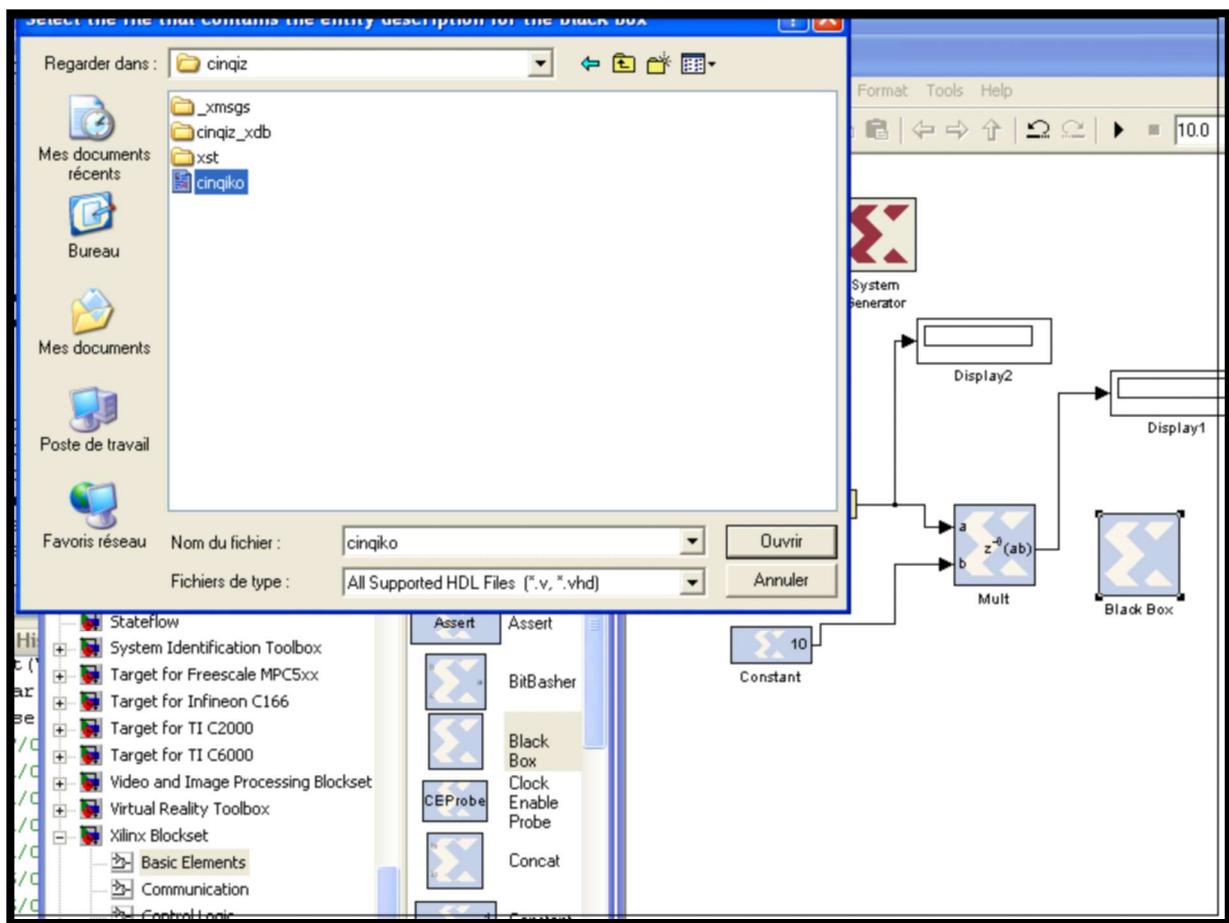


Figure IV.8: Génération d'une description VHDL dans un black box.

IV.3.1.3. Soustraction des bits:

Pour revenir aux valeurs originales du système, nous devons soustraire les bits ajoutés précédemment, en écrivant en VHDL la description suivante:

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
use IEEE.STD_LOGIC_ARITH.ALL;
use IEEE.STD_LOGIC_UNSIGNED.ALL;
entity exemple is
Port ( a : in STD_LOGIC_VECTOR (15 downto 0);
       q : out STD_LOGIC_VECTOR (5 downto 0));
end exemple;
architecture Behavioral of exemple is

```

Chapitre IV: développement du système sous system generator

```
signal k: std_logic_vector (5 downto 0);
```

```
begin
```

```
    k <= a(15 downto 10);
```

```
    q <= k ;
```

```
end Behavioral;
```

Cette description sera ensuite chargée dans le black box.

IV.4. Résultats de simulation sous system generator:

Les résultats de simulation obtenus dans l'environnement system generator sont présentés dans les figures suivantes:

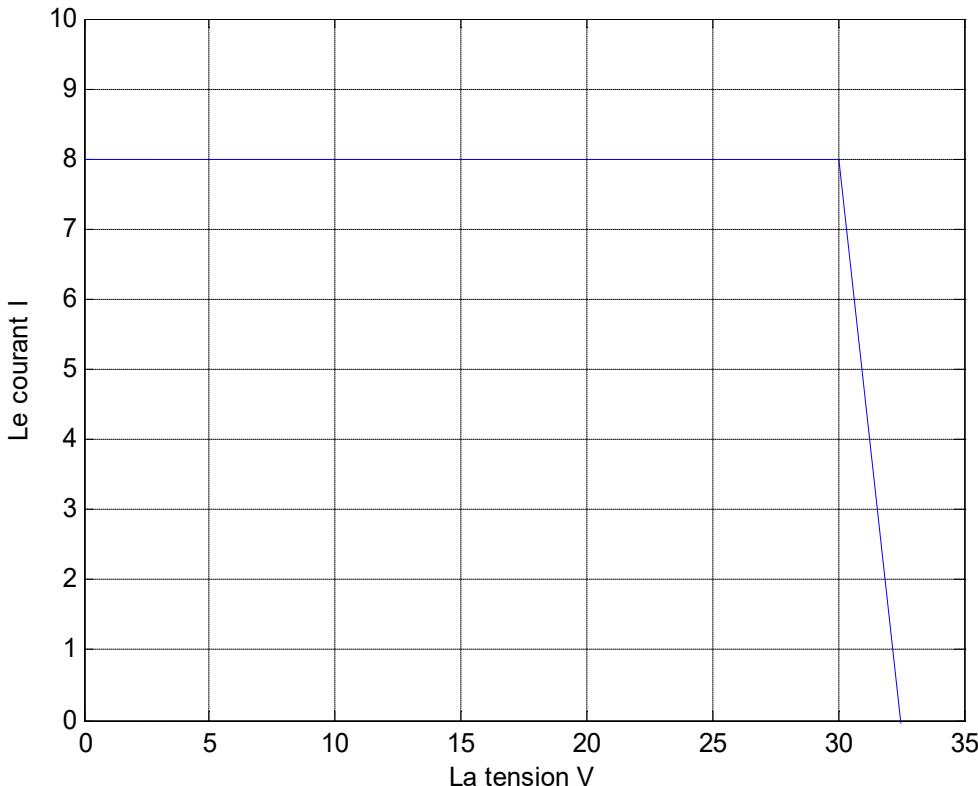


Figure IV.9: Variation du courant de la cellule en fonction de la tension $I=f(V)$ sous system generator.

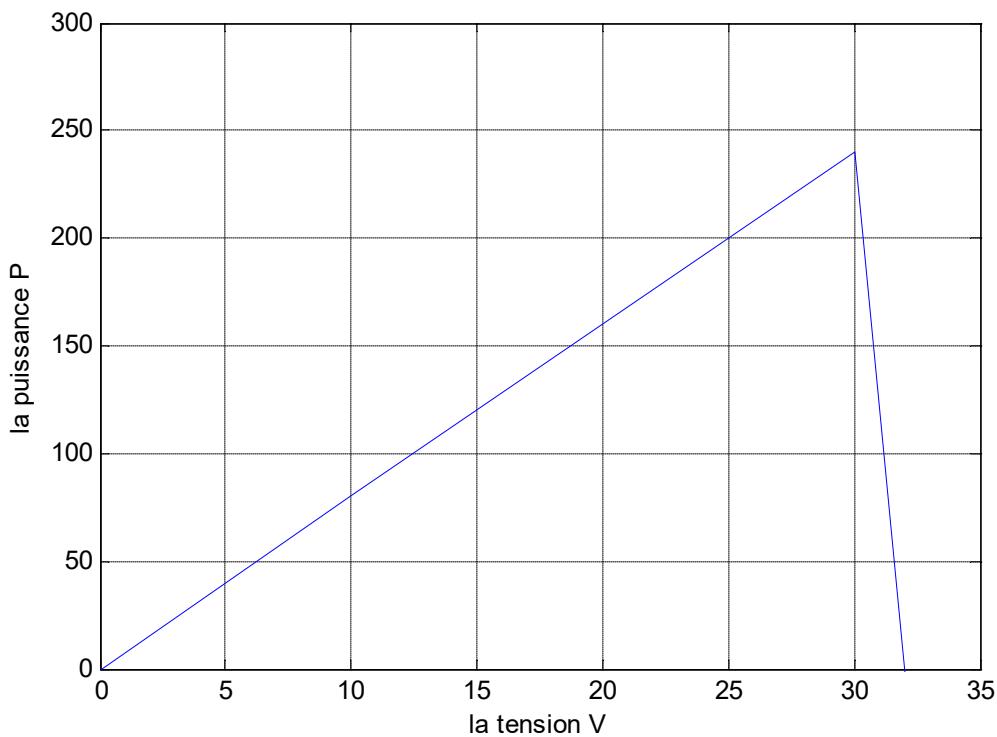


Figure IV.10: Variation de la puissance de la cellule en fonction de la tension $P=f(V)$ sous system generator.

IV.4.1. Comparaison des résultats:

La comparaison des courbes obtenues sous system generator avec celles obtenues sous matlab/simulink sont illustrées dans les figures suivantes:

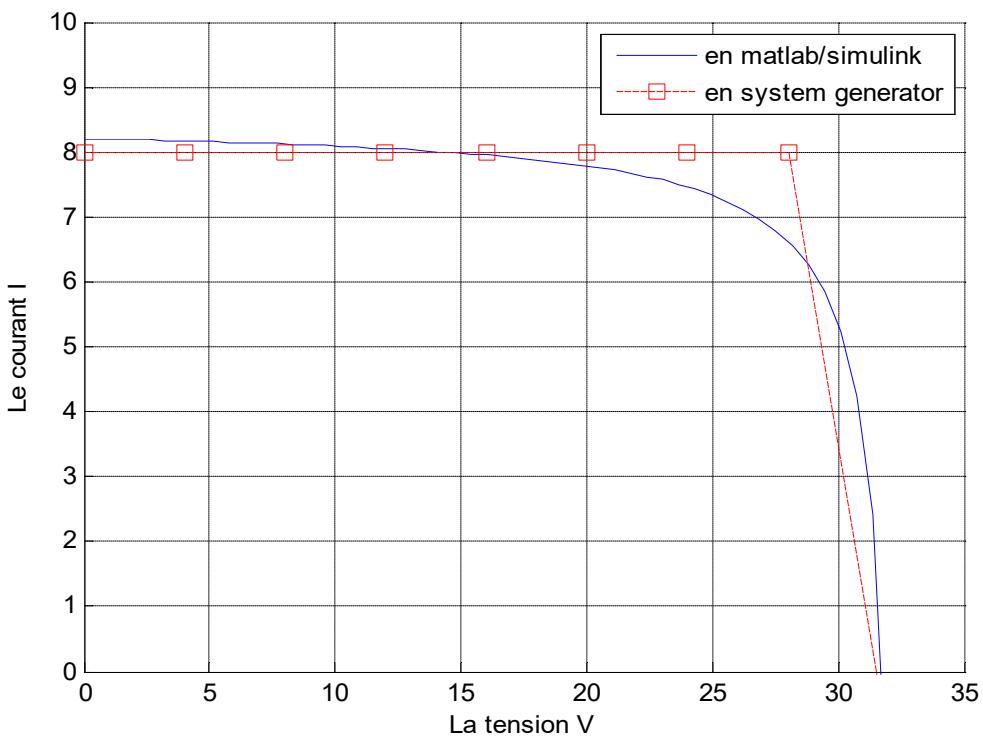


Figure IV.11: comparaison de la courbe $I=f(V)$ obtenue en simulink et system generator.

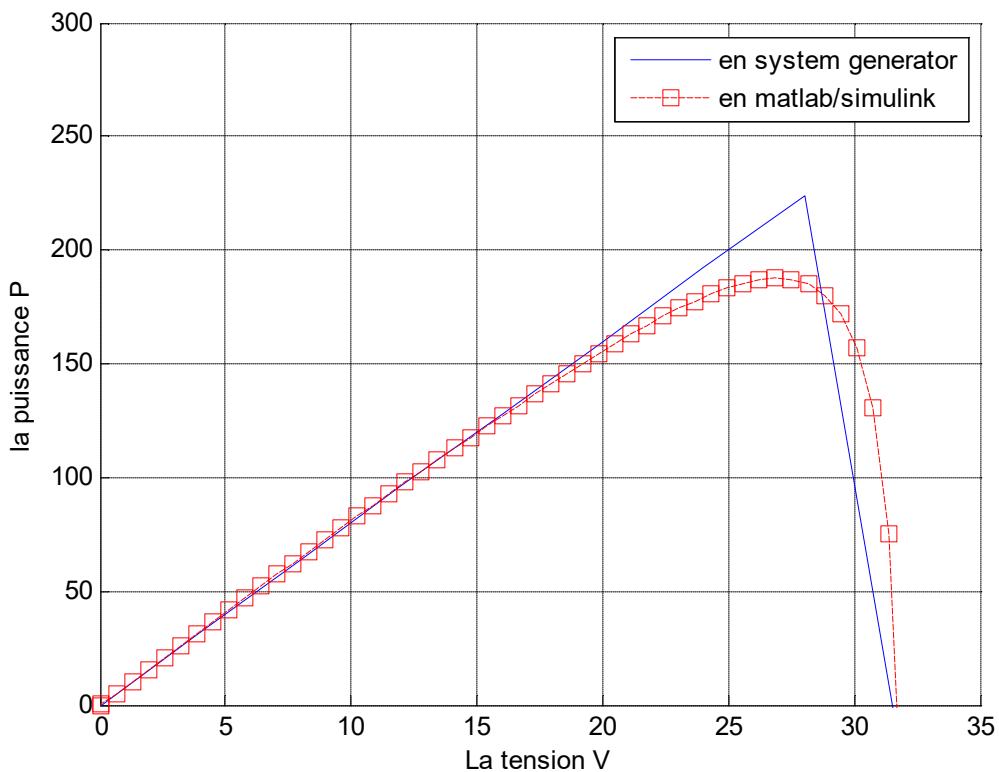


Figure IV.12: Comparaison de la courbe $P=f(V)$ obtenue en simulink et system generator.

Chapitre IV: développement du système sous system generator

La comparaison des deux courbes obtenues par les deux simulateurs (simulink et system generator) montre leur superposition dans les zones (1) et (3), pour le courant et la puissance.

Zone(1): GPV fonction comme générateur de courant;

Zone(3): GPV fonction comme générateur de tension.

Dans la zone(2) qui est caractérisée par le PPM, le décalage des deux courbes est due à la sensibilité du système pour les petites valeurs (changement brusque de la pente), qui nécessite un choix précis du nombre de bits

IV.5. Conclusion:

La simulation abordée Dans ce chapitre vise l'implémentation du panneau solaire sur FPGA. La difficulté d'implémentation du modèle a une seule diode nous a conduit a opté le modèle a résistance équivalente. La simulation de ce dernier modèle par les deux simulateurs (simulink et system generator) a donné une bonne superposition des courbes ce qui facilite dans la suite du travail de l'implémentation du panneau sur FPGA.

Conclusion générale

Conclusion générale:

Les énergies renouvelables constituent une excellente alternative aux énergies fossiles et nucléaires vue leurs différents avantages: inépuisables, non polluantes et décentralisées. Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque connaît un intérêt grandissant ces dernières années. Un générateur photovoltaïque présente une caractéristique tension-puissance en cloche qui dépend de plusieurs paramètres extérieurs comme l'ensoleillement, la température, la position du soleil. La cellule photovoltaïque est caractérisée par son schéma équivalent et son modèle mathématique.

Dans ce mémoire nous avons organisé notre travail en quatre parties. La première était la description de système photovoltaïque.

Dans la seconde partie nous avons illustré les caractéristiques de la cellule photovoltaïque et ses schémas équivalents et ses modèles mathématiques.

Ensuite nous avons simulé le panneau solaire sous simulink pour obtenir les courbes courant-tension et puissance-tension pour différentes isolations.

Dans la dernière partie de ce travail afin d'implémenter le panneau solaire sur FPGA, nous avons simulé le panneau en utilisant le logiciel Xilinx System Generator.

L'expression mathématique du modèle du panneau solaire à une seule diode contient un exponentiel difficile à implémenté sur FPGA. Une solution est apportée en adoptant le modèle à résistance équivalente. Ces deux modèles donnent des résultats semblables, donc l'implémentation de ce dernier modèle ne pose aucune difficulté malgré les petites différences citées ci-dessus.

Pour obtenir une exactitude de superposition des courbes sous les deux environnements (Simulink et System Generator), une maîtrise du choix de nombre de bits pour l'élimination de la virgule dans le cas des chiffres fractionnels est très nécessaire.

On estime que les résultats obtenus peuvent être un support important pour une éventuelle amélioration.

La méthodologie intégrant des outils comme Xilinx System Generator, Simulink et offre un environnement de développement qui peut donner des solutions à l'intégration facile des

Conclusion générale

systèmes photovoltaïque sur FPGA tout en évitant les coûts d'une solution commerciale intégrée.

De plus, l'accessibilité de ces outils et l'élaboration de cette méthode permettent d'éviter les coûts et le temps avec des outils commerciaux plus complexes.

Les divers résultats de ce travail offrent donc une fondation solide aux étudiants qui s'intéressent au domaine de l'énergie solaire.

List des figures & tableaux

Chapitre I

Figure I.1 : Connexion directe GPV-Charge via une diode anti-retour.....	5
Figure I.2 : Chaine de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT sur charge DC.....	6
Figure I.3 : Schémas de principe d'une connexion via a) un étage d'adaptation avec MPPT et b) d'une connexion directe.....	6
Figure I.4 : Comparaison de η_{MPPT} pour une connexion directe (Diode) et à l'aide d'un étage d'adaptation de type Boost avec MPPT (MPVE).....	7
Figure I.5 : Organigramme de l'algorithme P&O.....	8
Figure I.6 : Organigramme de l'algorithme incrémentation de l'inductance.....	11
Figure I.7 : Représentation de la sortie d'un commutateur en ouverture/fermeture sur une période.....	12
Figure I.8 : Circuit idéal du hacheur série.....	13
Figure I.9 : Courant dans la self du hacheur série.....	14
Figure I.10 : Courant en discontinuité dans la self du hacheur série.....	14
Figure I.11 : Schéma équivalent du hacheur série quand $t \in [0, DT_s]$	15
Figure I.12 : Schéma équivalent du hacheur série quand $t \in [d.TS, TS]$	15
Figure I.13 : Schéma de principe d'un boost.....	16
Figure I.14 : Circuit de base d'un buck boost.....	16
Figure I.15. Modèle équivalent de la batterie.....	17

Chapitre II

Figure II.1 : Absorption de la lumière et transfert de l'énergie des photons aux électrons.....	21
Figure II.2 : La collecte des charges.....	22
Figure II.3. Schéma de principe d'une cellule organique.....	24
Figure II.4 : Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque.....	24
Figure II.5 : La caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque.....	25
Figure II.6: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque à une seule diode.....	26

List des figures

Figure II.7: Modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque et son symbole.....	29
Figure II.8:Modèle de source PV non linéaire après [15] et la résistance de commutation.	30
Figure II.9:Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque....	33
Figure II.10 : Influence de l'éclairement sur le module.....	34
Figure II.11: Influence de la température sur le module	34
Figure II.12 : L'influence de la résistance série R_s sur la caractéristique I (V)	35
Figure II.13 : L'influence de la résistance parallèle R_p sur la caractéristique I (V)	36
Figure II.14 : les modules photovoltaïques	36
Figure II.15 : Panneaux photovoltaïques	37
Figure II.16: Association de N_s modules solaires en série.....	38
Figure II.17: Caractéristique de nombre des modules en série.....	38
Figure II.18: Association de N_p modules solaires en parallèle.....	38
Figure II.19: Caractéristique de nombre des modules en parallèles.....	39
Figure II.20: Association mixte $N_s \times N_p$ modules solaires.....	39
Figure II.21 : Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle.....	40
Figure II.22:Branchement des diodes Bypass et de blocage avec un reseaux de cellules solaires.....	41

Chapitre III

Figure III.1 : Schéma global Du système photovoltaïque.....	42
Figure.III.2 : Caractéristique courant-tension du module photovoltaïque KC200GT différentes a)températures de cellule et b) d'éclairement différents.....	43
Tableau.III.1: Caractéristique de panneau solaire KC200GT.....	44
Figure.III.3 : $P_{max, m}$ vs V pour plusieurs valeurs de $R_s > 0$	46
Figure. III.4: $P_{max} = f(R_s)$ avec $I = V_{mp} I_{mp}$ et $V = V_{mp}$	46
Figure III.5 : Schéma de la Simulation de générateur pv à une seule diode.....	46
Figure III.6 : I_{sc} en fonction du facteur d'échelle M (II.19)	48
Figure III.7 : Schéma de la Simulation de générateur pv à résistance équivalente.....	48
Figure III.8 : schéma de simulation du convertisseur DC/DC.....	49
Figure III.9 : schéma de simulation de l'algorithme P&O.....	49
Figure III.10 :schéma de simulation de la batterie.....	50

List des figures

Figure III.11: la courbe $I=f(V)$ du modèle à une seule diode.....	50
Figure III.12: la courbe $P=f(V)$ du modèle à une seule diode.....	51
Figure III.13: comparaison de la courbe $I=f(V)$ du modèle à résistance équivalente et modèle à une seule diode.....	52
Figure III.14: comparaison de la courbe $I=f(V)$ du modèle à résistance équivalente et modèle à une seule diode.....	52
Figure III.15: la courbe $I=f(V)$ du modèle à résistance équivalente à différentes niveau d'insolation.....	53
Figure III.16: la courbe $P=f(V)$ du modèle à résistance équivalente à différentes niveau d'insolation.....	53
Figure III.17: la courbe $I=f(V)$ du système photovoltaïque.....	54
Figure III.18: la courbe $P=f(V)$ du système photovoltaïque.....	55

Chapitre IV

Figure VI.1:Classification des circuits numérique.....	57
Figure IV.2: Xilinx Block Set.....	59
Figure IV.3: Lancement de Simulink.....	60
Figure IV.4: blocs Gateway In et Gateway Out.....	61
Figure IV.5: Simulation sous system generator.....	62
Figure IV.6: Exemple d'affectation des bits.....	63
Figure IV.7: Comparaison des constantes entre simulink et le system generator (Ki et Ipvn) a)cas simulink b)cas system generator	63
Figure IV.8: Génération d'une description VHDL dans un black box.....	65
Figure IV.9: Variation du courant de la cellule en fonction de la tension $I=f(V)$ sous system generator.....	66
Figure IV.10: Variation de la puissance de la cellule en fonction de la tension $P=f(V)$ sous system generator.....	67
Figure IV.11: comparaison de la courbe $I=f(V)$ obtenue en simulink et system generator....	68
Figure IV.12: comparaison de la courbe $P=f(V)$ obtenue en simulink et system generator....	68

Bibliographie

Bibliographie

- [1] M.F.Shraif, « *optimisation et mesure de chaine de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique*», Thèse Université Paul Sabatier, 2002.
- [2] L.Portion , S. Astrier, « *Conversion photovoltaïque*», Technique de l'ingénieur.
<http://ti.idm.fr>.
- [3] M.Petibon Stephane, « *Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques*»,Université Toulouse, 2009.
- [4] M. Sabry, Ahmed E. Ghitas; « *Effect of edge shading on the performance of silicon solar cell*», Vacuum, Volume 80, Issue 5, 26 January 2006
- [5] A.Benmosbah, C.Mecheraoui, «*Implémentation sur FPGA des méthodes MPPT : "P&O" et "floue optimisée par les Algorithmes Génétiques"*», Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2006.
- [6] G.F. TCHOKETCH KEBIR GUL FILIZ, « *Commande des hacheurs MPPT par la logique floue*», Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2005.
- [7] K. Neche, « *Aide à la mise au point d'un banc de test photovoltaïque*», Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2008.
- [8] C.F. Lu, C.C. Liu, and C.J. Wu, « *Dynamic modelling of battery energy storage system and application to power system stability*», In IE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Volume 142(4), IEE, Stevenage, Herts., U.K., July 1995.
- [9] A. Bouben, « *Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque*», Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2008.
- [10] «*La cellule photovoltaïque*» Centre de recherche de développement de l'ECAM.
- [11] M.G.Villalva, J.R.Gazoli, E.R.Filho, « *MODELING AND CIRCUIT-BASED SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC ARRAYS*», University of Campinas (UNICAMP), Brazil, 2009.

Bibliographie

- [12] J. A. Gow, C. D. Manning. “*Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies*”. *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, 146(2):193–200, 1999.
- [13] Kensuke Nishioka, Nobuhiro Sakitani, Yukiharu Uraoka, and Takashi Fuyuki. “*Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent model taking leakage current through periphery into consideration*”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(13):1222–1227, 2007.
- [14] H. Knopf, “*Analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle*”. 34th *IEEE Power Electronics Specialist Conf.* 4, 1729–1734, 2003.
- [15] S. PIROG, R. STALA, L. STAWIARSKI,” *Power electronic converter for photovoltaic systems with the use of FPGA-based real-time modeling of single phase grid-connected systems*”, University of 30 Mickiewicza Ave, 30-059 Krakow, Poland, 2009.
- [16] A, Luis, A. C. Lopes. M. Lienhardt,” *A Simplified Nonlinear power source for simulating PV panels*”, *IEEE Power Electronics Specialist 0-7803-7754 (2003)*.
- [17] M. Angel, C. Pastor "conception et realisation de modules photovoltaïques électroniques", l'institut national des sciences appliquées de toulouse, septembre 2006.
- [18] KC200GT, *KYOCERA*, datasheet (2001–2008).
- [19] C. Maxfield, *The Design Warrior's Guide to FPGAs*" Newnes .USA Linacre House, Jordan Hill, Oxford, 2004
- [20] <http://proxoctutor.free.fr/architecture.htm>.