

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N°:2018 / ESEM15 / 87



DOMAINE: SCIENCES
ET TECHNOLOGIES

FILIERE:
ELECTRONIQUE

OPTION: Electronique
des Systèmes embarqués

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

Par: MADANI Maroua

Intitulé

**Implémentation d'un algorithme MPPT dans une
FPGA on utilisant la carte ML605**

Soutenu devant le jury composé de:

Mr. BENHAMADOUC Abdelouahab	Université de M'sila	Président
Mr. BALLOUTI Adel	Université de M'sila	Rapporteur
Mr. BAKHTI Hadi	Université de M'sila	Examinateur

Année Universitaire : 2017 / 2018

Introduction générale

CHAPITRE I

Les générateurs photovoltaïques

CHAPITRE II

*Les FPGAs et
Le VHDL*

CHAPITRE III

*Les convertisseurs
DC/DC et la
commande MPPT*

CHAPITRE IV

*Simulation et
interprétation*

Conclusion

générale

REMERCEMENT

Je remercié en premier lieu Dieu qui j'ai donné ce bien là et pour que je venais ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail.

Je tenais à exprimer mes remerciements à mon encadreur Monsieur BELLOUTI Adel qui a proposé et a dirigé ce travail.

Je remercié monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Je tenais à remercier les responsables et tout le personnel du département d'Electronique de M'sila pour les facilités qu'ils n'ont accordé pour terminer ce travail.

Le travail de mémoire que j'ai effectué doit beaucoup à certaines personnes que je tenais à les remercier sincèrement.

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

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

*À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur
tendresse, leur soutien et leur prière tout au long de*

Mes études.

Aux personnes les plus proches de moi mes sœurs, mes frères.

Et à tous mes amis.

À Tous ceux qui me sont chers.

Merci d'être toujours là pour moi.

MADANI Maroua

Liste des figures

Chapitre I: les générateurs photovoltaïques

Figure I.1 : (a) cellule photovoltaïque. (b) collision entre un photon et un atome	04
Figure I.2 : le photon incident crée un pair électron / trou.....	04
Figure I.3 : la collecte des charges.....	05
Figure I.4 : cellules photovoltaïques.....	05
Figure I.5 : Circuit équivalent d'une cellule solaire.....	07
Figure I.6 : Caractéristiques électriques d'une cellule PV.....	08
Figure I.7 : Caractéristique résultante du regroupement de Ns cellules en série.....	11
Figure I.8 : Caractéristique résultante du regroupement de NP cellules en parallèle.....	11
Figure I.9 : Association mixte des modules solaires.....	12
Figure I.10 : Champ photovoltaïque	13
Figure I.11 : Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques	13
Figure I.12 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.....	14

Chapitre II : les FPGA et le VHDL

Figure II.1 : Structure d'un circuit FPGA.....	19
Figure II.2 : Exemple de blocs logiques de différents fabricants.....	20
Figure II.3 : exemple de Cellule I/O (IOB) de la famille X4000.....	21
Figure II.4 : Interconnexion interne d'un FPGA.....	23
Figure II.5 : Caractéristiques des technologies ANTI-FUSIBLES.....	24
Figure II.6 : Caractéristiques des technologies FLASH.....	25
Figure II.7 : Caractéristiques des technologies SRAM.....	25
Figure II.8 : structure de base d'un module sous VHDL.....	29
Figure II.9 : Syntaxe déclarative de l'entité.....	29
Figure II.10 : Syntaxe déclarative de l'architecture.....	29
Figure II.11 : Diagramme de développement d'un projet vhdl.....	30
Figure II.12 : Principe de la Co-simulation et de FPGA in the loop.....	32
Figure II.13 : la Co-simulation entre matlab et modelsim.....	33
Figure II.14: FPGA in the loop.....	34

Chapitre III : les convertisseurs DC/DC et la commande MPPT

Figure III.1 : Schéma de principe d'une d'alimentation à découpage.....	36
-------------------------------------------------------------------------	----

<i>Figure III.2 : Schéma d'un quadripôle électrique</i>	36
<i>Figure III.3 : Périodes de fermeture et d'ouverture d'un commutateur</i>	37
<i>Figure III.4 : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur</i>	37
<i>Figure III.5 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur</i>	38
<i>Figure III.6 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost</i>	39
<i>Figure III.7 : Schémas équivalents d'un hacheur survolteur</i>	40
<i>Figure III.8 : Convertisseur dévolteur-survolteur</i>	41
<i>Figure III.9 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur</i>	41
<i>Figure III.10 : Principe de la commande MPPT</i>	43
<i>Figure III.11 : Classification des différentes méthodes de poursuite du MPP</i>	46
<i>Figure III.12 : Recherche du PPM par la méthode (P&O)</i>	47
<i>Figure III.13 : Organigramme de l'algorithme P&O</i>	48
<i>Figure III.14 : Organigramme de l'algorithme INC</i>	49
<i>Figure III.15 : Organigramme de l'algorithme FCO</i>	50
<i>Figure III.16 : Organigramme de l'algorithme FCC</i>	51
<i>Figure III.17 : structure de base de la commande floue</i>	52

CHAPITRE IV : simulation et interprétation

<i>Figure IV.1 : Système proposé</i>	61
<i>Figure IV.2 : Modèle Simulink du générateur photovoltaïque</i>	62
<i>Figure IV.3: Modèle Simulink du Hacheur BOOST</i>	62
<i>Figure IV.4: FSM de la commande MPPT proposé</i>	63
<i>Figure IV.5: Partie du modèle VHDL de la commande MPPT</i>	63
<i>Figure IV.6: Modèle généré par Simulink à partir du model VHDL de la commande MPPT</i> ...	64
<i>Figure IV.7: la puissance de sortie du boost</i>	64
<i>Figure IV.8: la puissance d'entrée du boost</i>	65
<i>Figure IV.9: la tension d'entrée du boost</i>	65
<i>Figure IV.10 : le courant a l'entrée du convertisseur Boost</i>	65
<i>Figure IV.11 : le tension a la sortie du convertisseur Boost</i>	66
<i>Figure IV.12 : le signal issu la commande MLI</i>	66
<i>Figure IV.13 : Référence du rapport cyclique généré par le modèle VHDL</i>	66
<i>Figure IV.14 : Réponses de la commande MPPT numérique sous l'environnement Modelsim (Co- simulation)</i>	67
<i>Figure IV.15 : Zoom sur la réponse MPPT numérique</i>	67

Liste des tableaux

Chapitre II : les FPGA et le VHDL

Tableau II.01 : Comparaison des entre les circuits ASIC et FPGA.....17

Tableau II.02 : Avantages et Inconvénients de la Co-simulation.....33

Chapitre III : les convertisseurs DC/DC et la commande MPPT

Tableau III.1 : Rendement de quelques convertisseurs.....42

Tableau III.2 : Principe de l'algorithme P&O..... 47

Tableau III.3 : Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.....52

Tableau III.4 : Comparaison des algorithmes MPPT.....54

Liste des figures

Chapitre I: les générateurs photovoltaïques

Figure I.1 : (a) cellule photovoltaïque. (b) collision entre un photon et un atome	04
Figure I.2 : le photon incident crée un pair électron / trou.....	04
Figure I.3 : la collecte des charges.....	05
Figure I.4 : cellules photovoltaïques.....	05
Figure I.5 : Circuit équivalent d'une cellule solaire.....	07
Figure I.6 : Caractéristiques électriques d'une cellule PV.....	08
Figure I.7 : Caractéristique résultante du regroupement de Ns cellules en série.....	11
Figure I.8 : Caractéristique résultante du regroupement de NP cellules en parallèle.....	11
Figure I.9 : Association mixte des modules solaires.....	12
Figure I.10 : Champ photovoltaïque.....	13
Figure I.11 : Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques.....	13
Figure I.12 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.....	14

Chapitre II : les FPGA et le VHDL

Figure II.1 : Structure d'un circuit FPGA.....	19
Figure II.2 : Exemple de blocs logiques de différents fabricants.....	20
Figure II.3 : exemple de Cellule I/O (IOB) de la famille X4000.....	21
Figure II.4 : Interconnexion interne d'un FPGA.....	23
Figure II.5 : Caractéristiques des technologies ANTI-FUSIBLES.....	24
Figure II.6 : Caractéristiques des technologies FLASH.....	25
Figure II.7 : Caractéristiques des technologies SRAM.....	25
Figure II.8 : structure de base d'un module sous VHDL.....	29
Figure II.9 : Syntaxe déclarative de l'entité.....	29
Figure II.10 : Syntaxe déclarative de l'architecture.....	29
Figure II.11 : Diagramme de développement d'un projet vhdl.....	30
Figure II.12 : Principe de la Co-simulation et de FPGA in the loop.....	32
Figure II.13 : la Co-simulation entre matlab et modelsim.....	33
Figure II.14: FPGA in the loop.....	34

Chapitre III : les convertisseurs DC/DC et la commande MPPT

Figure III.1 : Schéma de principe d'une d'alimentation à découpage.....	36
-------------------------------------------------------------------------	----

<i>Figure III.2 : Schéma d'un quadripôle électrique.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure III.3 : Périodes de fermeture et d'ouverture d'un commutateur.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure III.4 : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure III.5 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure III.6 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure III.7 : Schémas équivalents d'un hacheur survolteur.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure III.8 : Convertisseur dévolteur-survolteur.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure III.9 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure III.10 : Principe de la commande MPPT.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure III.11 : Classification des différentes méthodes de poursuite du MPP.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure III.12 : Recherche du PPM par la méthode (P&O).....</i>	<i>47</i>
<i>Figure III.13 : Organigramme de l'algorithme P&O.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure III.14 : Organigramme de l'algorithme INC.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure III.15 : Organigramme de l'algorithme FCO.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure III.16 : Organigramme de l'algorithme FCC.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure III.17 : structure de base de la commande floue.....</i>	<i>52</i>

CHAPITRE IV : simulation et interprétation

<i>Figure IV.1 : Système proposé.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure IV.2 : Modèle Simulink du générateur photovoltaïque.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure IV.3: Modèle Simulink du Hacheur BOOST.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure IV.4: FSM da la commande MPPT proposé.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure IV.5: Partie du modèle VHDL de la commande MPPT.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure IV.6: Modèle généré par Simulink à partir du model VHDL de la commande MPPT... </i>	<i>64</i>
<i>Figure IV.7: la puissance de sortie du boost.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure IV.8: la puissance d'entrée du boost.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure IV.9: la tension d'entrée du boost.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure IV.10 : le courent a l'entrée du convertisseur Boost.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure IV.11 : le tension a la sortie du convertisseur Boost.....</i>	<i>66</i>
<i>Figure IV.12 : le signal issu la commande MLI.....</i>	<i>66</i>
<i>Figure IV.13 : Référence du rapport cyclique généré par le modèle VHDL.....</i>	<i>66</i>
<i>Figure IV.14 : Réponses de la commande MPPT numérique sous l'enivrement Modelsim (Co- simulation).....</i>	<i>67</i>
<i>Figure IV.15 : Zoom sur la réponse MPPT numérique.....</i>	<i>67</i>

Liste des tableaux

Chapitre II : les FPGA et le VHDL

Tableau II.01 : Comparaison des entre les circuits ASIC et FPGA.....17

Tableau II.02 : Avantages et Inconvénients de la Co-simulation.....33

Chapitre III : les convertisseurs DC/DC et la commande MPPT

Tableau III.1 : Rendement de quelques convertisseurs.....42

Tableau III.2 : Principe de l'algorithme P&O..... 47

Tableau III.3 : Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.....52

Tableau III.4 : Comparaison des algorithmes MPPT.....54

Liste des abréviations et des symboles

Liste des abréviations et des symboles

PV : photovoltaïque.

α : rapport cyclique des impulsion qui commandent l'interrupteur.

eV: électrons-volt.

W: watt.

P: phosphor.

B: bore.

PN : la jonction.

D : Une diode.

I_{ph} : Le photo-courant.

V_D : la tension aux bornes de la diode.

I_S : le courant inverse de saturation.

q : la charge de l'électron

K : la constante de Boltzmann.

n : le facteur d'idéalité.

R_S : la résistance série de la cellule.

R_P : la résistance parallèle de la cellule (la résistance shunt).

T_c : la température de la cellule

$I(V)$: courant (tension).

$P(V)$: puissance (tension).

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

I_{CC} : Courant de court-circuit.

$P_{max,idéale}$: La puissance maximale dans le cas idéal.

FF : Le facteur de forme.

η : le rendement de la cellule PV.

P_{in} : La puissance d'entrée qui est l'éclairement incident sur le capteur par unité de surface.

Liste des abréviations et des symboles

N_s : Nombre des cellules en série.

N_p : Nombre des cellules en parallèle.

GPV : Un **G**énérateur **S**olaire **P**hotovoltaïque.

PPM : **P**oints de **P**uissance **M**aximale.

MPPT : **P**oursuite du **P**oint de **P**uissance **M**aximale (**M**aximum **P**ower **P**oint **T**racking).

DC-DC: Continue-Continue.

FPGA: **F**ield **P**rogrammable **G**ates **A**rrays.

VHDL: **V**ery high speed integrated circuit **H**ardware **D**escription **L**anguage.

ASIC: **A**pplication **S**pecific **I**ntegrated **C**ircuits.

CPLD : **C**omplex **P**rogrammable **L**ogique **D**evice.

DSP: **D**igital **S**ignal **P**rocessing.

CPU: **C**entral **P**rocessing **U**nite.

CLBs: **C**onfigurables **L**ogic **B**loc.

IOB: **I**nput **O**utput **B**loc.

RAM: **R**andom-**A**ccess **M**emory.

LUT: **L**ook-**U**p **T**able.

IOBs: **I**nput **O**utput **B**loc.

TTL: **T**ransistor-**T**ransistor **L**ogic.

CMOS: **C**omplementary **M**etal-**O**xide-**S**emiconductor.

RTL: **R**egister **T**ransfer **L**evel.

SRAM: **S**tatic **R**andom **A**ccess **M**emory.

ROM: **R**ead **O**nly **M**emory.

Liste des abréviations et des symboles

EPROM: Erasable Programmable Read Only Memory.

EEPROM: Electrically Erasable Programmable Read Only Memory.

HDLs: Hardware Description Languages.

PLD: Programmable Logique Device.

FIL: FPGA In the loop.

HIL: Hardware-In-the-Loop.

f_s : Fréquence constante.

T_s : La période de commutation.

d : le rapport cyclique du commutateur.

M : le rapport de conversion.

CS : convertisseur statique.

ΔV : L'ondulation de la tension.

ΔP : L'ondulation de puissance.

V_{ref} : Tension de référence.

P&O : Algorithme Perturber et Observer.

INC : Algorithme Incrément de la Conductance.

G : conductance.

dG : l'incrément de la conductance.

η_{conv} : Rendement du convertisseur.

I_{opt} : Courant optimal d'une cellule ou GPV aussi appelé V_{mpp} .

Liste des abréviations et des symboles

V_{opt} : Tension optimal d'une cellule ou GPV aussi appelé V_{mpp} .

FCO : Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction de la Tension V_{OC} .

FCC : Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction du Courant I_{CC} .

LF : Algorithme à Base de la Logique Floue.

E : l'erreur.

ΔE : le changement d'erreur.

$\Delta\alpha$: changement du rapport cyclique du convertisseur.

NB: Negative Big.

NS: Negative Small.

ZE: Zero.

PS: Positive Small.

PB: Positive Big.

ISE: Integrated Software Environment.

PWM: Pulse Width Modulation.

FSM: Finite State Machine.

Introduction générale

L'énergie est un besoin primordial pour l'humanité, et face à la prévision d'épuisement inéluctable des ressources mondiales en énergie fossile (pétrole, gaz et charbon), la science s'est tout tourner vers l'énergie dite renouvelable et la source la plus importante d'énergie renouvelable ces énergies issu du soleil, spécialement et la plus utilisé des ces énergies, c'est l'énergie photovoltaïque, Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité, sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Dans la plupart des systèmes de production d'énergie photovoltaïque, on trouve une technique ou un algorithme particulier nommé « Maximum Power Point Tracking » (MPPT). Qui sera implanté dans un FPGA. En effet, le degré de maturité des FPGAs fait d'eux aujourd'hui une solution pour remplacer les ASICs (circuits intégrés à application spécifique) et les processeurs personnalisés dans des applications de contrôle et de traitement de signaux.

Réduire les coûts, augmenter les performances et la fiabilité d'un circuit, diminuer les délais de mise en place d'un prototype opérationnel, maintenabilité et réduire l'encombrement des composants sur circuit, sont des atouts conjugués dans un FPGA. Ces atouts justifient le succès de ces composants dans tous les domaines d'applications de l'électronique. L'aéronautique, l'aérospatial, l'industrie, les télécommunications, les appareils médicaux, l'électroménager...etc, tous les domaines trouvent le bon compromis en intégrant les FPGAs.

Notre travail est développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation, quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairage). Il est basé essentiellement dans la commande MPPT, et la conversion photovoltaïque, il est constitué par des cellules qui sont assemblées pour former un module (panneau), les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension, et des équipements de consommation (batterie).

Le type de commande de MPPT qui sera utilisé, nommé la méthode de perturbation et observation (P&O), nécessite la connaissance du courant et la tension du panneau

Introduction générale

PV pour calculer sa puissance et fait la régulation du rapport cyclique α du convertisseur, qui permet l'acquisition de ces grandeurs qui seront ensuite utilisées dans le programme, dans le but d'obtenir une puissance de fonctionnement maximal, et nous essayons d'implémenter cet algorithme dans un FPGA, pour cela on utilise au côté hardware la carte ML605 et au côté software virtex6 dans un programme XILINX, pour réaliser notre travail il faut passer par l'un des deux méthodes: Co-simulation et FPGA in the loop.

Cette mémoire intitulée « Implémentation d'un algorithme MPPT dans une FPGA en utilisant la carte ML605 » est organisée en quatre chapitres qui présentent, de manière assez précise, les divers concepts de la technologie MPPT ainsi que l'algorithme permettant de faire la régulation nécessaire.

- Dans le premier chapitre nous présenterons les généralités sur le système Photovoltaïque ainsi que leur modélisation.
- Dans le deuxième chapitre et divisé en deux parties, la première traite des circuits logiques programmables selon leur ordre chronologique d'avènement jusqu'à l'invention des FPGA. La deuxième partie, indispensable pour la programmation d'un FPGA, les langages HDL (Hard Ware Description Languages) puis le travail est orienté en particulier vers le langage VHDL (Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language).
- Dans le troisième chapitre introduit les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque, et les classifications de la commande MPPT et des études théoriques de quelques-unes de ces méthodes.
- Le dernier chapitre est consacré à l'implémentation de l'algorithme et la simulation et évaluation des résultats qui sont effectués pour la vérification du fonctionnement du panneau photovoltaïque.
- Une conclusion générale dressera le bilan de cette étude en donnant quelques perspectives pour de futurs travaux.

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique via l'utilisation de matériaux dite semi-conducteur, Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet-photovoltaïque. L'électricité produite de cette conversion est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau.

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

I.2 Energie solaire photovoltaïque

I.2.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable à travers un matériau semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque [1].

La conversion photovoltaïque met simultanément en jeu trois phénomènes physiques :

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert de l'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 figures I.1.

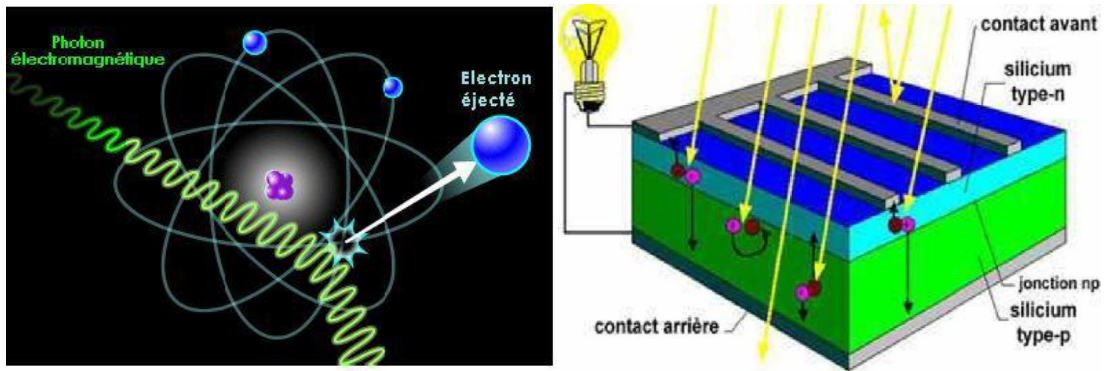


Figure I.1 : (a) Collision entre un photon et un électron éjecté (b) cellule photovoltaïque

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 comme représente la Figure I.2.

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-volt (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 [2].

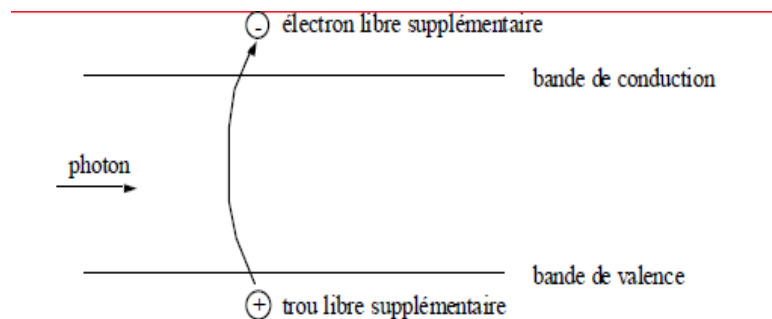


Figure I.2 : le photon incident crée un pair électron / trou.

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 charge est réalisée grâce à une jonction créée volontairement dans le matériau.

On va alors engendrer un champ électrique qui va entrainer les charges négatives d'un côté et les charge positives de l'autre côté. 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 : la diode. Comme le montre la figure I.3, 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 [3].

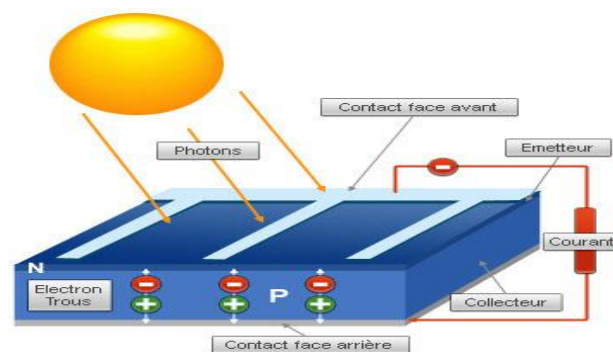


Figure I.3 : la collecte des charges.

I.2.2 Cellule photovoltaïque

Les cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé effet photovoltaïque. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés Intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque [4]. Figure I.4.

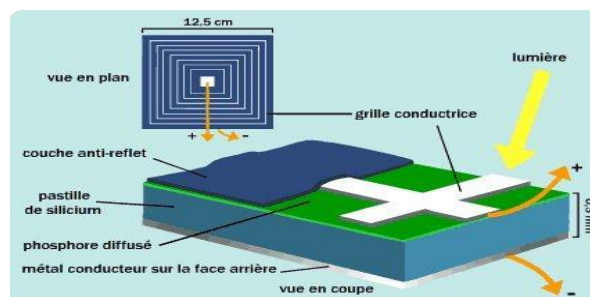


Figure I.4 : cellule photovoltaïque.

I.2.3 Différents types des cellules solaires

Il existe plusieurs types des cellules photovoltaïques [5], Elles peuvent être classées comme suite:

✚ **Les cellules monocristallines** : caractérisées par :

- La première génération de photopiles.
- Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire).
- Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

✚ **Les cellules poly-cristallines** : ils caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Procédé nécessitant moins d'énergie.
- Rendement 11-13% (18% en Labo).

✚ **Les cellules amorphes (cellules de calculatrices par exemple)** : caractérisées par :

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo).
- Durée de vie plus faible.
- C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres etc. Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse. De plus, les cellules mono et poly-cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production).

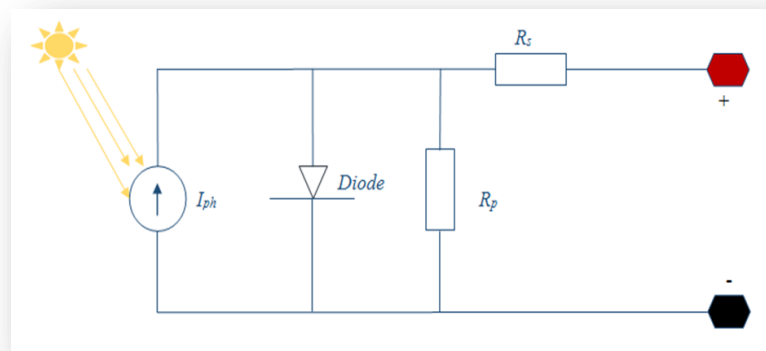
✚ **Les cellules nanocristallines** : caractérisées par :

- Une des dernières générations de photopiles.
- Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques.
- Rendement global de 10,4 %, confirmé par des mesures au laboratoire.
- Procédé et coût de production encore plus bas.

I.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

L'objectif est de trouver un modèle simple et adaptable avec différents modules des constructeurs. Ce modèle doit être structuré de telle façon que toutes les valeurs sont facilement calculés et en évitant les équations complexes. Il existe plusieurs modèles électriques de la cellule photovoltaïque, mais dans cette étude, nous utilisons le modèle schématisé dans la figure I.5. Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi qu'une résistance série R_S et parallèle R_P pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule.

Ce modèle est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante).



La Figure I.5 : Circuit équivalent d'une cellule solaire.

Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série R_S représente la résistance de contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt R_P représente le courant de fuite. Une diode D en parallèle qui modélise la jonction PN [6].

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$I_{\text{cell}} = I_{\text{ph}} - I_S \left(\exp\left(\frac{q V_D}{n K T_c}\right) - 1 \right) - \frac{V_{\text{cell}} + I_{\text{cell}} R_S}{R_P} \quad (\text{I.1})$$

Où : I_{ph} est le courant photo- généré, V_D la tension aux bornes de la diode, I_S le courant inverse de saturation, q la charge de l'électron, K la constante de Boltzmann, n le facteur d'idéalité, T_c la température de la cellule, R_S la résistance série de la cellule et R_p la résistance parallèle de la cellule.

I.4 les caractéristiques d'une cellule PV

I.4.1 les caractéristiques électriques d'une cellule PV

I.4.1.1 caractéristique courant-tension et puissance-tension d'une cellule PV

La figure I.6 représente la courbe caractéristique d'une cellule PV, la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule [7].

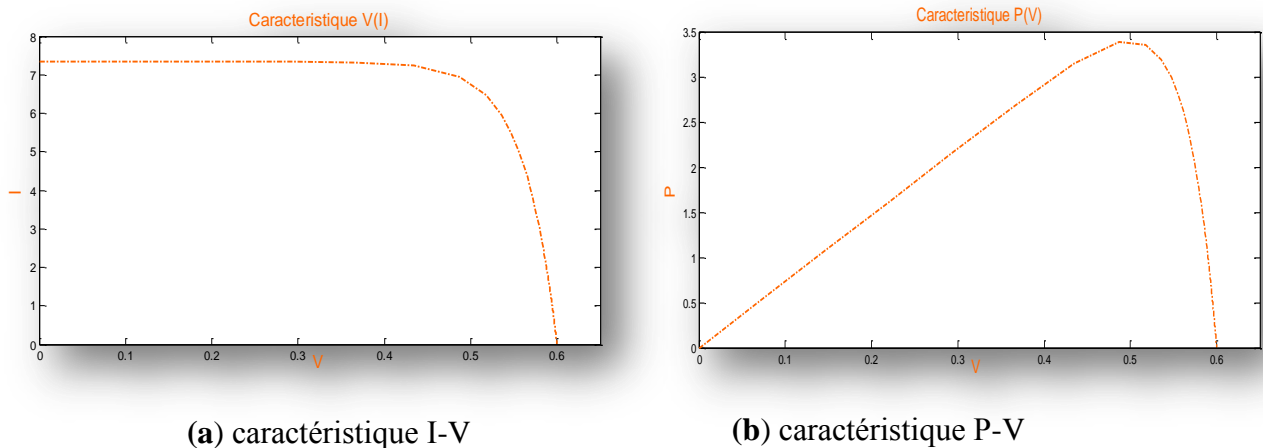


Figure I.6 : Caractéristiques électriques d'une cellule PV.

I.4.1.1.A Tension de circuit ouvert V_{co} (pour $I_{co}=0$)

C'est la tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairage " plein soleil ". Elle ne varie presque pas.

Tension de circuit ouvert V_{co} mesuré par un voltmètre placé aux bornes de la cellule.

I.4.1.1.B Courant de court-circuit I_{cc} (pour $V_{cc}=0$)

C'est le courant maximal généré par la cellule, Le courant de court-circuit I_{cc} peut être mesuré par un ampèremètre placé aux bornes de la cellule.

I.4.1.2 la puissance maximale

Dans le cas idéal, La puissance maximale $P_{max,idéale}$ correspond au courant de court-circuit I_{cc} multipliée par la tension de circuit ouvert V_{co} .

$$P_{max, idéale} = I_{pMax} * V_{pMax} \quad (I.2)$$

I.4.1.3 le facteur de forme FF

Le facteur de forme **FF**, dit aussi facteur de remplissage ou facteur de courbe, il correspond au rapport de puissance maximale sur le produit de V_{co} et I_{cc} (c'est-à-dire la puissance maximal d'une cellule idéale). Et il est donné par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{Max}}{V_{co} * I_{cc}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{I_{cc} V_{co}} \quad (I.3)$$

FF : facteur de forme.

P_{Max} (W) : puissance maximale aux bornes de la cellule PV.

V_{co} (V) : tension de circuit ouvert.

I_{cc} (A) : courant de court-circuit.

I.4.2 les caractéristiques énergétiques d'une cellule PV

Comme dans tous les systèmes énergétiques, l'énergie disponible aux bornes d'une cellule PV et fonction de l'énergie entrante et des pertes, ce que l'on peut écrire de la manière suivante :

$$E_{électrique} = E_{lumineuse} - E_{thermique} \quad (I.4)$$

$E_{électrique}$: L'énergie disponible aux bornes de la cellule PV (tension-courant).

$E_{lumineuse}$: L'énergie incidente (flux lumineux).

$E_{thermique}$: Les pertes thermiques (par convection, rayonnement et conduction) [8].

I.4.2.1 Rendement de la cellule PV

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques.

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

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{pm} I_{pm}}{P_{in}} = \frac{V_{co} \cdot I_{cc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (I.5)$$

P_{in} : La puissance d'entrée qui est l'éclairement incident sur le capteur par unité de surface.

Il y'a une relation entre la cellule solaire et le rendement, Il caractérise ces composants et définit leur performance.

I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont [9] [10] :

- Sa gratuité.
- Pas de pollution.
- Sa structure fixe.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.

Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont :

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour Une installation autonome.
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la Fabrication des panneaux ont un impact sur l'environnement.

I.6 Module photovoltaïque

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt.

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du

module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité [11].

I.6.1 Association en série

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

L'association en série des cellules Figure I.7, délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [12] [13].

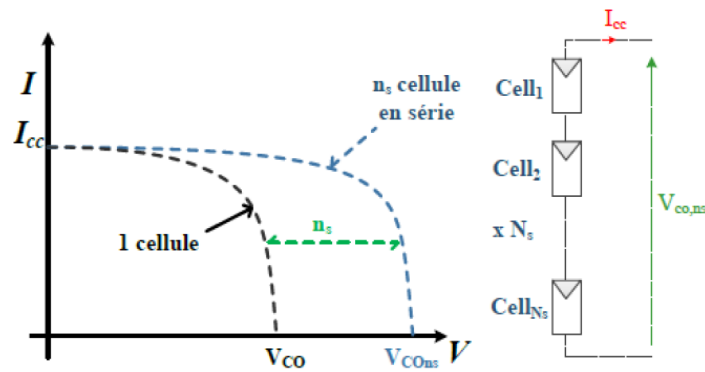


Figure I.7 : Caractéristique résultante du regroupement de N_s cellules en série.

I.6.2 Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle Figure I.8, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [14].

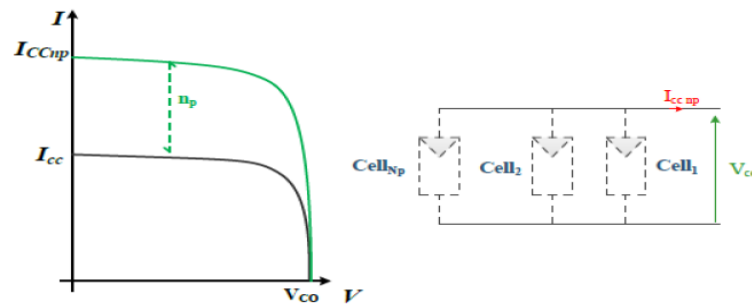


Figure I.8 : Caractéristique résultante du regroupement de N_p cellules en parallèle [13].

I.6.3 Association 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 comme le montre La figure I.9.

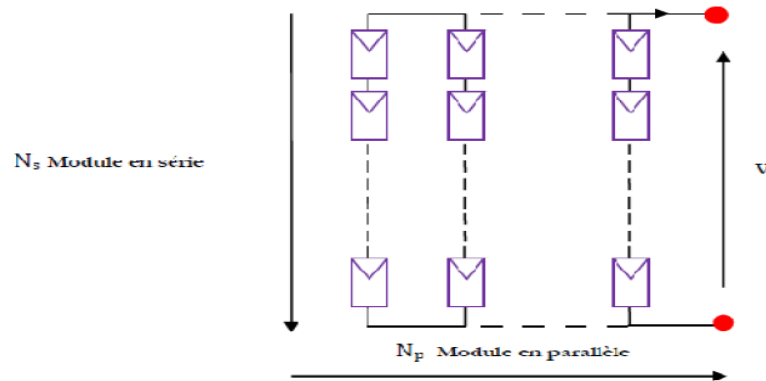


Figure I.9 : Association mixte des modules solaires.

I.7 Le champ photovoltaïque

Une association de plusieurs panneaux photovoltaïques forme ce qu'on appelle e champ photovoltaïque. Figure I.10.

L'emplacement du champ photovoltaïque devra respecter les contraintes suivantes :

- Exposition au rayonnement solaire toute la journée en toute saison.
- Les panneaux doivent être orientés au sud dans l'hémisphère nord et au nord dans L'hémisphère sud, et inclinés pour être le plus souvent possible perpendiculaire aux rayons lumineux.
- Accès facile pour le nettoyage.
- Proximité avec la régulation, le stockage et les récepteurs.
- Fixations solides pour résister aux vents : les modules sont généralement fixés soit au sol, soit en toiture, soit en façade.



Figure I.10 : *Champ photovoltaïque*

I.8 Générateur Photovoltaïque GPV

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel Figure I.11. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [15] [16].

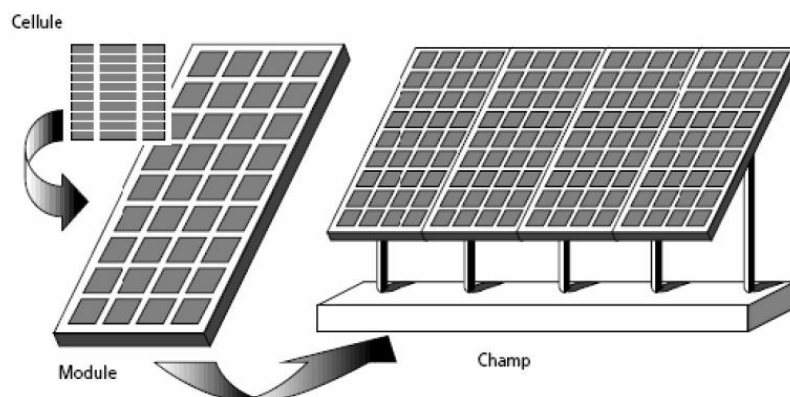


Figure I.11 : *Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques.*

I.9 Maximum Power Point Tracker (MPPT) [8-16]

La puissance de sortie des générateurs photovoltaïques varie considérablement avec les conditions météorologiques telles que l'ensoleillement, la température et les nuages. Le

fonctionnement du générateur photovoltaïque à sa puissance maximale (Maximum Power Point ou MPP), dans toutes les conditions météorologiques, consiste à adapter l'impédance de la charge à celle du générateur. A cet effet, un étage d'adaptation, capable de remplir la fonction d'un MPPT, doit être connecté entre le générateur PV et la charge comme représenté dans la figure I.12. La détermination du MPP du générateur photovoltaïque nécessite une mesure de la tension du générateur et du courant. L'étage d'adaptation est alors utilisé pour ajuster la tension de fonctionnement effective et le courant du générateur photovoltaïque de telle sorte que la puissance réelle se rapproche le plus possible de la valeur optimale.

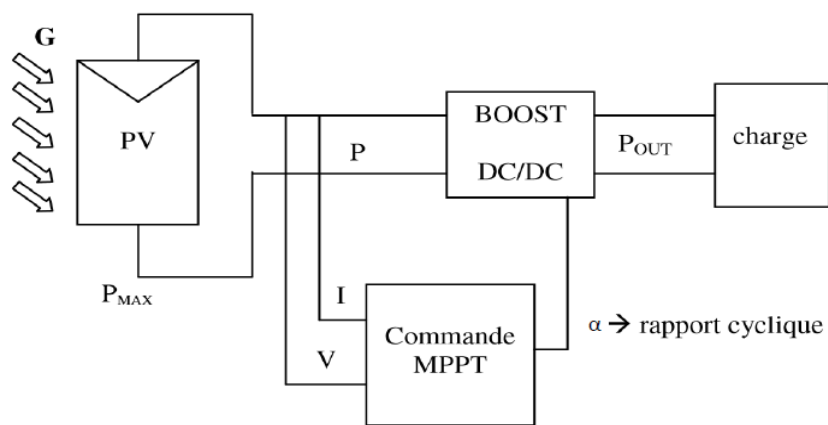


Figure I.12 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

I.10 Conclusion

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. On a présenté le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et leur modèle, ce qui nous a permis de tracer les caractéristiques de la cellule PV. Caractéristique courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$. Et de présenter aussi les différentes connexions possibles pour répondre aux exigences énergétiques de l'utilisateur.

Bibliographie

[1] Salah Eddine Ben Salem « effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires » magister en énergétique et mécanique des fluides universités Ferhat Abbas, Sétif, 2011

[2] L. Baxerres, A. Michalet, C. Ramet, Yves Brière projet d'initiative personnelle : Le Microtransat 2006, partie électronique et énergétique Année 2005-2006.

[3] K. NECHE, « Aide à la mise au point d'un banc de test photovoltaïque », projet de fin d'Etudes, ENP Algérie, Juin 2008.

[4] BELAOUDMOU. O, BAHLOUL. A, «Etude et Commande d'un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque Connecté au Réseau», diplôme de Master en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2012

[5] Mornay Thomas, Verny Alexis, Volle Marion, Sup-D, « les cellules photovoltaïques », classes préparatoires CPE institution des chartreux année 2004/2005

[6] A. Ould Mohamed Yahia, A. Ould Mahmoud Et I. Youm « étude et modélisation d'un générateur photovoltaïque » revue des énergies renouvelables vol. 11 n°3 Sénégal, 2008.

[7] M. ISSAADI Salim, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum(MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de Magister en électronique, ENP Algérie, Juin 2006.

[8] Abdelkader BIRANE, « caractéristiques et tri de cellules solaires par leur temps de recouvrement inverse, Mémoire de Magister en électronique, ENP Algérie, Juin 2005.

[9] Antonio Luque and Steven Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003.

[10] A. Luque and S. Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering". Wiley. 2003.

[11]. Mohamed Lakhdar LOUAZENE, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla », Mémoire de Magister en électronique, université el hadj Lakhdar – BATNA, Juin 2008.

[12] Makhloof .M «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application», thèse de doctorat, Université de Constantine, 2012.

[13].BISKER. A, CHIRI .M, « Commande d'un Système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau», Projet de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'État en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique, Juin 2012

[14]. Saidani. A, « Amélioration de la technique d'extraction de maximum de puissance du système photovoltaïque basé sur la méthode (P&O) », mémoire de master, Université de M'sila 2015.

[15] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud Et I. Youm « étude et modélisation d'un générateur photovoltaïque » revue des énergies renouvelables vol. 11 n°3 Sénégal, 2008

[16] BELAKEHAL. S, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», THÈSE Doctorat, UNIVERSITE DE CONSTANTINE, 10/06/ 2010.

II.1 Introduction

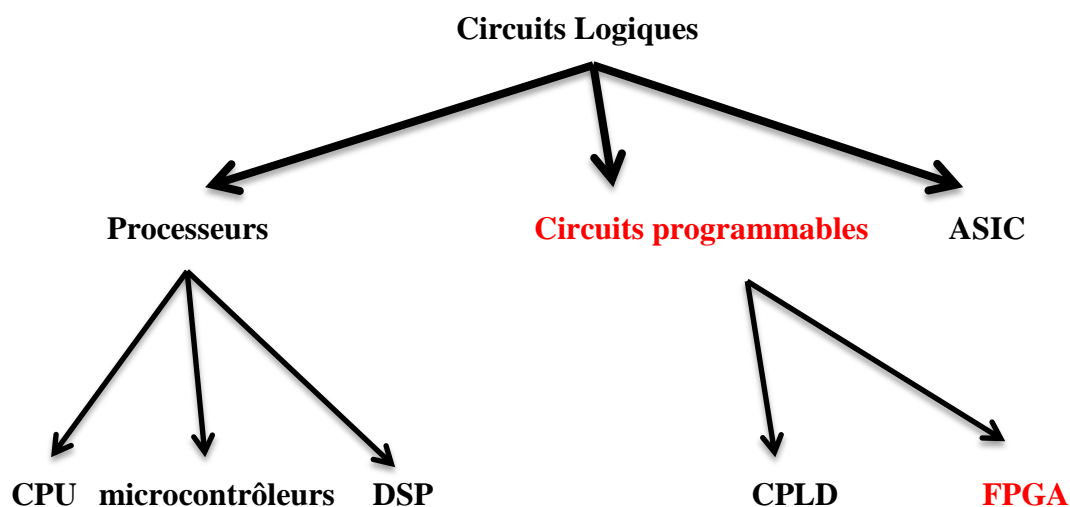
Suite à la révolution technologique du 20ème siècle et l'implantation de l'électronique dans tous les domaines de la vie, l'évolution des circuits électronique était très remarquable et une nécessité d'avoir des circuits puissant et spécialisé pour des applications bien précises a été apparait. De plus en plus ces applications demandent que ces circuits soient programmables, cela à donner la naissance d'une famille des circuits programmable comme les FPGAs.

Les FPGAs, apparus en 1985 sous l'initiative de l'entreprise XILINX, ce sont des composants électroniques entièrement reconfigurables pouvant être reprogrammés afin d'accélérer notablement certaines phases de calculs.

La programmation de l'architecture d'un FPGA, bien qu'il soit possible de programmer en schématique, se fait principalement en langage VHDL (ou Verilog). Nous utilisons les FPGA XILINX (VERTEX) et l'outil de synthèse produit par le même fabriquant, à savoir ISE.

Dans la première partie de ce chapitre on présente les circuits FPGAs ainsi que son architecture interne, on présente leurs avantages et leurs inconvénients. Dans la deuxième partie nous abordent le langage VHDL.

II.1.1 Les Circuits Logiques



II.1.2 Comparaison entre les circuits ASIC et FPGA

La différence entre FPGA et ASIC est donnée par le tableau suivant :

Tableau II.01: Comparaison des entre les circuits ASIC et FPGA.

ASIC	FPGA
Développement long	Développement rapide
Coût de fabrication (en augmentation)	Coût à l'unité (en diminution)
Full custom : Performances maximal	Contraint par la technologie du FPGA
Fabrication grande série	Prototypage rapide

II.2 les circuits programmables FPGAs

Les FPGA, sigle anglais qui signifie « **F**ield **P**rogrammable **G**ates **A**rrays » traduit en français par réseau de portes programmables, les FPGAs peuvent être programmé ou reprogrammé pour la fonctionnalité ou l'application requise après fabrication, ils constituent une évolution des circuits logiques programmables **CPLDs**,

L'FPGA est constitué de blocs logiques programmables, d'interconnexions reconfigurables et de blocs d'entrée / sortie. Les blocs logiques utilisés dans un réseau de portes programmables sur site peuvent être constitués d'éléments de mémoire tels que des bascules ou des blocs de mémoire. Les blocs logiques sont capables d'effectuer des fonctions de calcul simples à complexes. Les réseaux de portes programmables sur le terrain sont à bien des égards similaires aux puces de mémoire programmables en lecture seule. Cependant, contrairement aux puces mémoires programmables en lecture seule, qui sont limitées à des centaines de portes, un réseau de portes programmables sur le terrain peut supporter plusieurs milliers de portes. Une autre caractéristique importante des réseaux de portes programmables sur le terrain est la possibilité de reprogrammation, contrairement aux circuits intégrés spécifiques à l'application qui sont fabriqués pour des tâches spécifiques.

Un réseau de portes programmable par l'utilisateur peut aider les utilisateurs d'ordinateurs à adapter les capacités des microprocesseurs aux besoins individuels spécifiques. En fait, les ingénieurs utilisent des réseaux de portes programmables sur le terrain pour concevoir des circuits intégrés spécialisés. D'autres avantages de l'utilisation de réseaux de portes programmables sur site comprennent un cycle de vie plus prévisible grâce à l'élimination des capacités de plaquettes, des réseaux potentiels, un temps de mise sur le marché plus rapide par rapport aux autres options et un cycle de conception simple.

Ils offrent la possibilité de réaliser des fonctions numériques plus ou moins complexes.

Les deux plus grands constructeurs de FPGA sont XILINX et ALTERA.

II.2.1 Différent domaines d'application des FPGAs

- Informatique : Périphériques spécialisés.
- Machinerie industrielle : Contrôleur pour machines.
- Télécommunications : Traitement d'images, Filtrage.
- Instrumentation : Équipement médical, Prototypage.
- Transport : Contrôle d'avions et métros.
- Aérospatiale: Satellites, Radar, la détection ou la surveillance.....etc

II.2.2 Les cinq principaux atouts de la technologie FPGA

1. Performances.
2. Coût.
3. Fiabilité.
4. Temps de mise sur le marché.
5. Maintenance à long terme.

II.3 Architecture interne d'un FPGA

Les circuits FPGA du fabricant XILINX, structurés sous forme des matrices, utilisent deux types de cellules de base, les cellules logiques appelées CLB, et les cellules d'entrées/sorties appelées IOB, Ces différentes cellules sont reliées entre elles par un réseau d'interconnexions configurable. Donc les trois blocs principaux sont les

blocs logiques configurables, les blocs d'entrées/sorties et les ressources de communications.

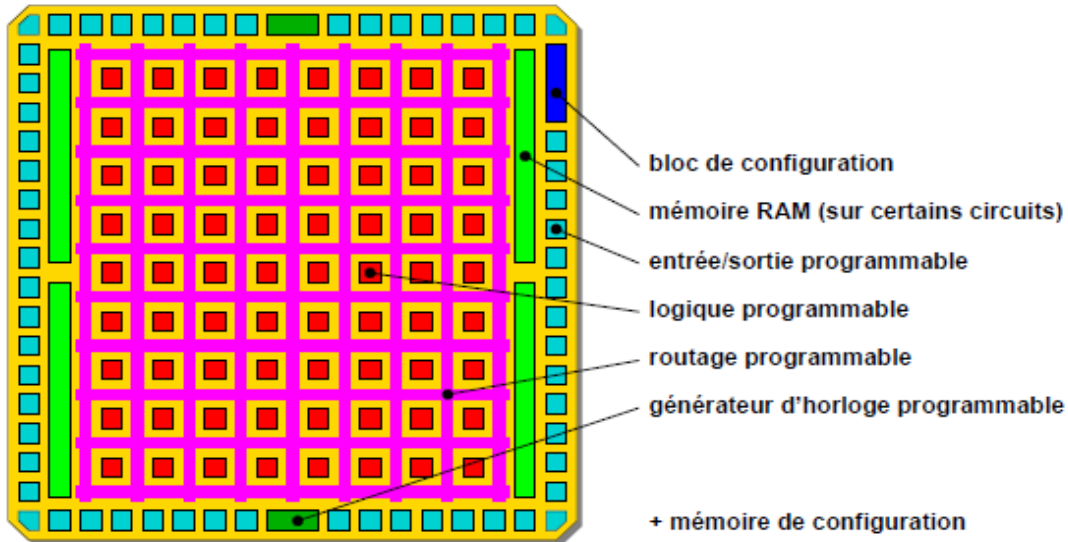


Figure II.1 : Structure d'un circuit FPGA.

II.3.1 les blocs logiques CLBs (Configurable Logic Blocs)

Sont des éléments déterminants des performances du FPGA et contenant les fonctions logiques combinatoires et séquentielles.

- La partie combinatoire permet de réaliser des fonctions arithmétiques et logiques de complexité variable. Il est en effet possible d'utiliser plusieurs méthodes de synthèse dont les principales sont : la synthèse de fonctions à 4 ou 5 variables avec des portes classiques ET, OU et NON, la synthèse de fonctions combinatoires à l'aide de mémoires vives. Dans ce dernier cas, on dit aussi réalisation de fonctions logique par LUT (Look-Up Table) signifiant table de réalisation (ou d'observation).
- La partie séquentielle comporte en règle générale une ou deux bascules de type D.

Suivant le fabricant du circuit, ces blocs contiennent un nombre différent de portes logiques et de bascules à l'intérieur d'un bloc comme le montre la figure II.2.

Il existe 4 types de blocs logiques :

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

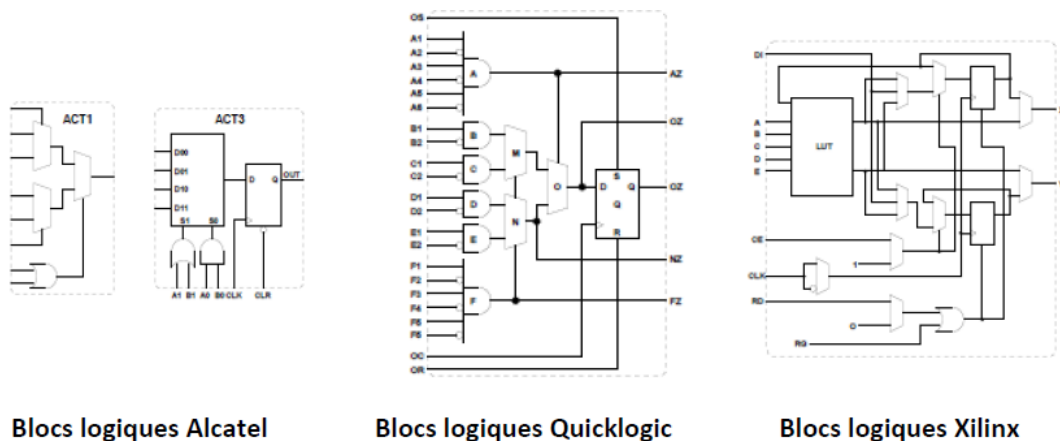


Figure II.2 : Exemple de blocs logiques de différents fabricants.

II.3.2 les cellules d'entrées/sorties IOBs (Input Output Blocs)

Ces blocs permettent d'interface entre les broches du composant FPGA et la logique interne développée à l'intérieur du composant. Pour adapter les signaux suivants :

- ✚ Alimentation.
- ✚ Signaux d'horloge.
- ✚ Signaux de configuration du FPGA.
- ✚ Signaux de test.

Les IOBs permettent l'interconnexion de la logique interne aux ports d'entrées et de sorties du FPGA. Les IOBs ont leur propre mémoire de configuration, elles stockent les standards de tension et la direction des ports. Ces blocs sont présents sur toute la périphérie du circuit FPGA. Chaque bloc IOB contrôle une broche du composant et il peut être reconfiguré en entrée ou en sortie, en signaux bidirectionnels ou être inutilisé (haute impédance).

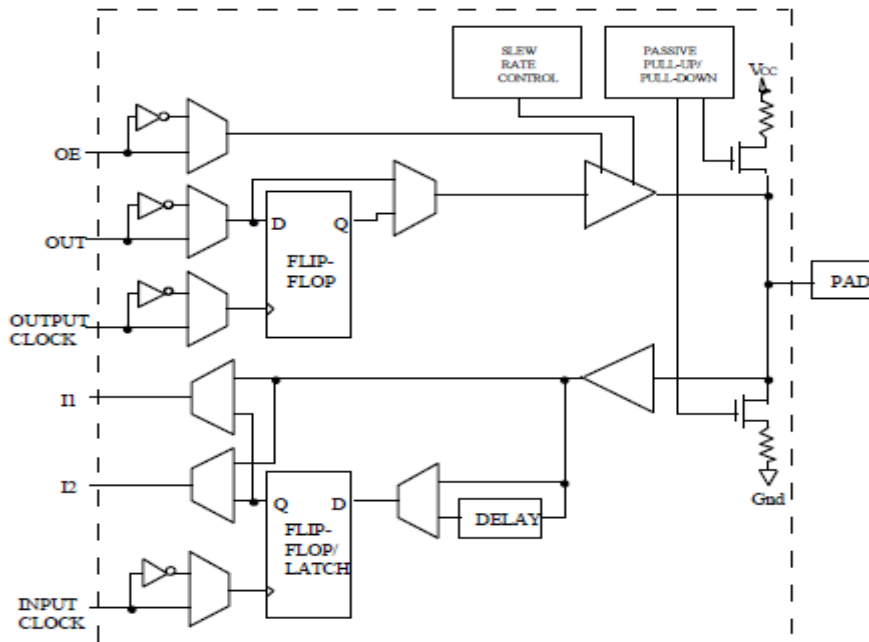


Figure II.3 : exemple de Cellule I/O (IOB) de la famille X4000.

II.3.2.1 configuration en entrée

Premièrement, le signal d'entrée traverse un buffer qui selon sa programmation peut détecter soit des seuils TTL ou soit des seuils CMOS. Il peut être routé directement sur une entrée directe de la logique du circuit FPGA ou sur une entrée synchronisée. Cette synchronisation est réalisée à l'aide d'une bascule de type D, le changement d'état peut se faire sur un front montant ou descendant. De plus, cette entrée peut être retardée de quelques nanosecondes pour compenser le retard pris par le signal d'horloge lors de son passage par l'amplificateur. Le choix de la configuration de l'entrée s'effectue grâce à un multiplexeur (program controlled multiplexer). Un bit positionné dans une case mémoire commande ce dernier. [1]

II.3.2.2 Configuration en sortie

Nous distinguons les possibilités suivantes :

- inversion ou non du signal avant son application à l'IOB.
- synchronisation du signal sur des fronts montants ou descendants d'horloge.

- mise en place d'un " pull-up " ou " pull-down " dans le but de limiter la consommation des entrées sorties inutilisées.

- signaux en logique trois états ou deux états. Le contrôle de mise en haute impédance et la réalisation des lignes bidirectionnelles sont commandés par le signal de commande Out Enable lequel peut être inversé ou non. Chaque sortie peut délivrer un courant de 12mA. Ainsi toutes ces possibilités permettent au concepteur de connecter au mieux une architecture avec les périphériques extérieurs. [2]

II.3.3 Les interconnexions [3]

Les ressources d'interconnexion au sein d'un FPGA permettent la connexion arbitraire des CLB et des IOB. Les connexions internes dans les circuits FPGA sont composées de segments métallisés. Parallèlement à ces lignes, nous trouvons des matrices programmables réparties sur la totalité du circuit, horizontalement et verticalement entre les divers CLB. Elles permettent les connexions entre les diverses lignes, celles-ci sont assurées par des transistors MOS dont l'état est contrôlé par des cellules de mémoire vive ou RAM. Le rôle de ces interconnexions est de relier avec un maximum d'efficacité les blocs logiques et les entrées/sorties afin que le taux d'utilisation dans un circuit donné soit le plus élevé possible. Pour parvenir à cet objectif, XILINX propose trois sortes d'interconnexions selon la longueur et la destination des liaisons comme le montre la Figure II.4.

– Les interconnexions directes : Ces interconnexions permettent l'établissement des liaisons entre les CLB et les IOB. Il est possible aussi de connecter directement certaines entrées d'un CLB aux sorties d'un autre.

– Les longues lignes : Ce sont de longs segments métallisés parcourant toute la longueur et la largeur du FPGA, elles permettent éventuellement de transmettre avec un minimum de retard les signaux entre les différents éléments dans le but d'assurer un synchronisme aussi parfait que possible. De plus, ces longues lignes permettent d'éviter la multiplicité des points d'interconnexion.

– Les matrices d'interconnexion : Ce sont des aiguilleurs situés à chaque intersection. Leur rôle est de raccorder les longues lignes entre elles selon diverses configurations. Ces interconnexions sont utilisées pour relier un CLB à n'importe quel autre CLB sur

le FPGA pour assurer la communication des signaux. Pour éviter l'affaiblissement des signaux traversant les longues lignes, des buffers sont implantés dans chaque matrice d'interconnexion.

Les trois blocs présentés jusqu'ici sont interconnectés ensemble dans le dispositif pour créer une infrastructure de communication composée d'un réseau de communication et d'IOBs autour des CLBs. Des cellules de mémoire liées à chaque bloc détiennent les caractéristiques principales, de telle sorte que les interconnexions entre l'infrastructure de communication, les normes de tension des entrées-sorties d'un IOB, et les équations soient commandées par des valeurs particulières stockées dans une mémoire. Toutes ces configurations sont stockées dans des SRAM qui sont volatiles : lorsque le composant est mis sous tension, toute sa configuration est perdue et il doit être redémarré avec une nouvelle configuration. Habituellement, une machine externe se charge de télécharger la configuration sur le FPGA via une de ses interfaces de configuration, et envoie une commande de démarrage pour signaler que la configuration a eu lieu. Certaines cartes ont une mémoire ROM d'intégrée. Elle permet de stocker la configuration, de sorte qu'elle puisse ensuite être téléchargée sur le FPGA. Dans ce cas, les données de configuration sont copiées sur la mémoire SRAM de configuration du FPGA au démarrage de celui-ci.

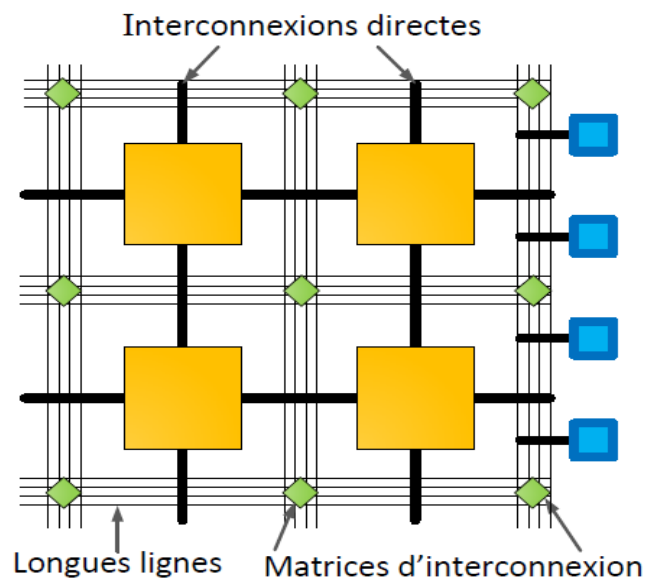


Figure II.4: Interconnexion interne d'un FPGA.

II.4 Technologies de programmation des FPGA [4]

Il existe trois types d’FPGAs reprogrammables suivant la technologie de mémorisation pour répondre aux différentes applications :

- **ANTIFUSIBLE** (la plus ancienne, configurable une seule fois).
- **FLASH** (non-volatile).
- **SRAM** (volatile, la plus utilisée, représente plus de 80 % du marché).

II.4.1 Technologie à base d’anti-fusibles (ACTEL)

Les points de connexions sont du type ROM, c’est-à-dire que la modification du point est irréversible. Pour comprendre le mécanisme de connexion sans rentrer dans les détails des semi-conducteurs, on considère que le point de connexion est le point de rencontre de deux segments conducteurs ou lignes conductrices. Le nom anti-fusible vient du fait que l’état initial du fusible ou la couche isolante est présente et il n’y a pas de contact pour l’établir, il faut détruire le fusible ce qui est contradictoire au fonctionnement habituel d’un fusible. Des composants moins génériques mais plus petits et plus rapides ont été développés figure **II.5**.

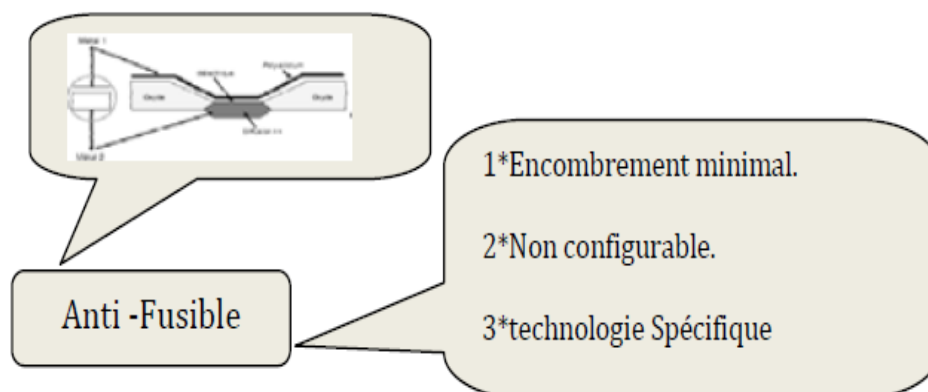


Figure **II. 5** : Caractéristiques des technologies **ANTI-FUSIBLES**.

II.4.2 Technologie à base d’EEPROM ou FLASH (LATTICE et ACTEL)

Cette technologie garde sa configuration mais un nombre limité de configuration avec une configuration plus lente par rapport à SRAM comme le montre la figure **II.6**.

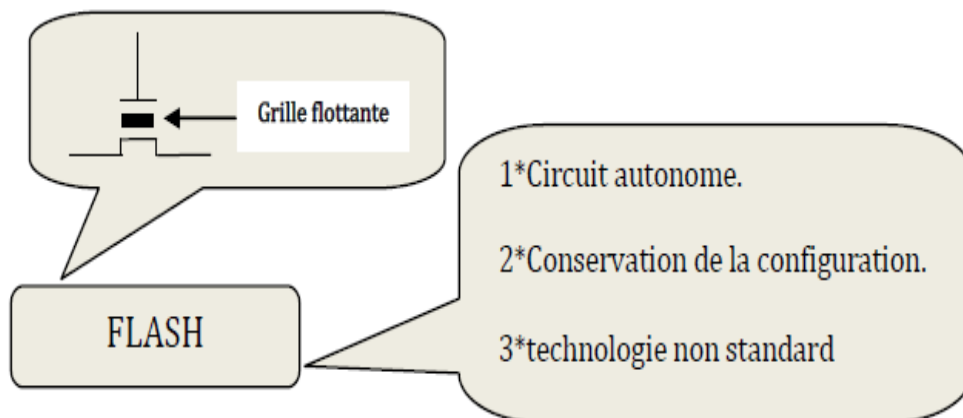


Figure II.6: Caractéristiques des technologies **FLASH**.

II.4.3 Technologie à base de RAM (XILINX et ALTERA)

Cette technologie permet d'avoir une reconfiguration rapide des FPGAs. Les points de connexions sont des ensembles de transistors commandés. L'inconvénient majeur de cette technologie c'est qu'elle nécessite beaucoup de place et il est nécessaire de sauvegarder le design du FPGA dans une autre mémoire Flash. La figure II.7.

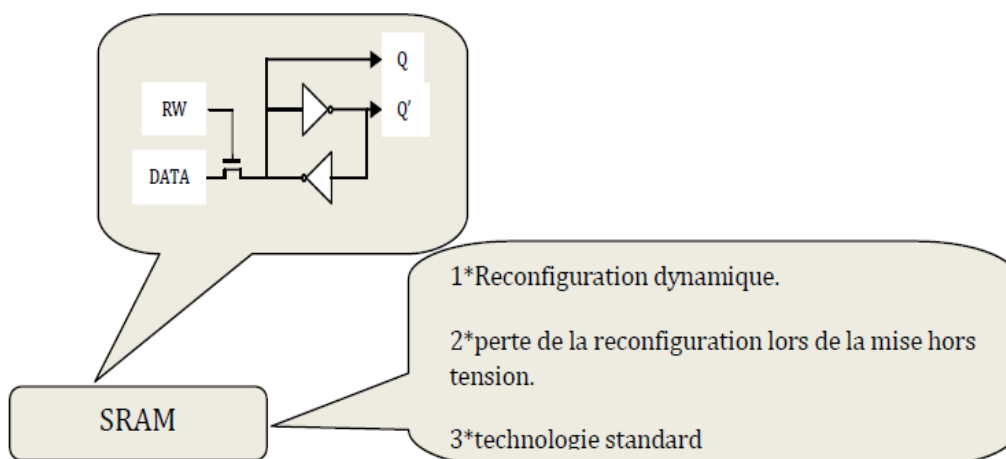


Figure II.7: Caractéristiques des technologies **SRAM**.

II.5 Avantages et inconvénients des FPGA

Les avantages et les inconvénients des FPGA sont multiples dont on cite :

Les Avantages

- Technologie « facile » à maîtriser.
- Reprogrammable.
- Temps de développement réduit.
- Idéal pour le prototypage (rapide).
- Coût peu élevé.
- Parallélisme de traitement.
- Flexibilité et la possibilité de réduire
- Fortement les délais de développement et commercialisation.
- La reconfiguration, parfois en temps réel.

Les Inconvénients

- Performances no optimisées.
- Temps de réponse long par rapport aux **ASIC**.

II.6 les langages HDL

Depuis le début des années 90, l'intégration de transistors sur une même puce contribue à l'intégration "*single chip*" dans le domaine de la commande numérique des systèmes de puissance. Cette évolution a également ouvert la voie aux langages de haut niveau de description de matériel, encore appelés HDLs pour "*Hardware Description Languages*". Deux d'entre eux ont émergé et sont aujourd'hui couramment utilisés : il s'agit de VHDL et de Verilog. Tous les deux sont supportés par un grand nombre de logiciels.

Les intérêts majeurs d'une description basée sur un HDL résident dans sa portabilité et son caractère exécutable. En effet, un modèle fonctionnel numérique décrit à haut niveau par un HDL peut être vérifié par simulation, avant même son conception finale.

La conception des tels systèmes numériques intégrés a généralement recours aux langages numériques de description de matériel comme par exemple VHDL (**V**ery **H**igh **S**peed **I**ntegrated **C**ircuit **H**ardware **D**escription **L**anguage). De tels langages et les outils associés permettent l'implémentation sur cibles numériques de ce contrôleur.

II.6.1 Utilité des HDL

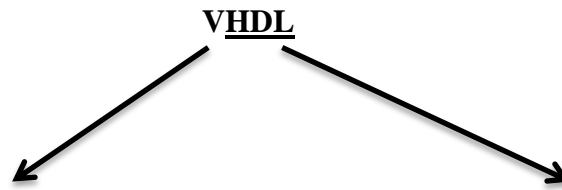
Le but du langage HDL est double :

- ✓ La simulation : Le but de la modélisation, c'est la simulation.
- ✓ La synthèse : Les langages fonctionnels de description matérielle servent aussi à concevoir. Il ne s'agit plus de modéliser en vue de la simulation.

II.6.2 Les principaux langages HDL

Il existe un bon nombre de langages HDL, malgré leurs diversités. Par exemple : VHDL, Verilog, SystemC, SystemVerilog... etc.

II.7 Le langage de description matérielle VHDL



Very High-Speed Integrated Circuits Hardware Description Language
Le langage VHDL est un langage de description matériel des systèmes numériques.

C'est un langage standard IEEE.

Le VHDL est basé sur l'assemblage de composants nommés entités. Ces entités peuvent être définies par le langage sous la forme d'instructions séquentielles et/ou parallèles. Ces instructions peuvent soit correspondre à l'assemblage d'autres entités, soit correspondre à des instructions de base du langage. Certaines variables peuvent être évaluées dans le temps.

La communication entre les entités se fait par l'intermédiaire de mémoires partagées représentées par des signaux.

VHDL est un langage qui permet de représenter la plupart des concepts nécessaires à la description des systèmes temps réel. Il n'a cependant pas d'instructions spécifiques aux transitions d'états et permettant de définir des exceptions. [5]

Le langage VHDL exploite quatre objets différents :

- ✚ Les signaux.
- ✚ Les constantes.
- ✚ Les variables.
- ✚ Les portes.

II.7.1 La Structure d'un programme VHDL (entity, architecture)

Les concepteurs du VHDL ont adopté l'approche suivante :

1. **Entity** : le système est considéré comme une boîte noire. Cette boîte noire a des entrées et des sorties.
2. **Architecture** : dans cette partie on définit le corps du système. Voir la figure II.8.

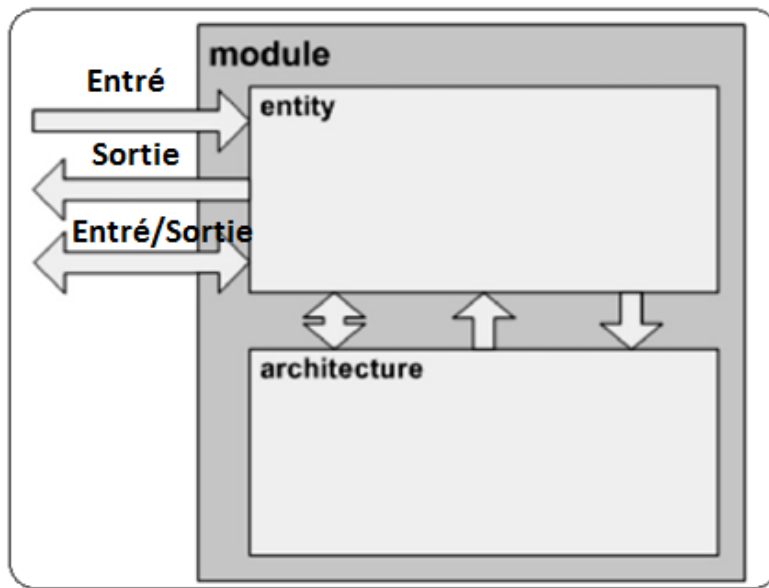


Figure II.8: structure de base d'un module sous VHDL.

Dans la partie déclarative de l'entité le circuit est décrit comment il est vu Par l'extérieur ceci à travers les entrées, sorties.

Cependant l'architecture décrit le comportement que doit avoir le circuit ou les opérations qu'il doit effectuer. Une architecture se doit toujours d'être attachée à une entité. Voir les figures II.9 et II.10 suivantes Consécutifs.

```
Entity <entity name> Is Port (
    <signal name : <signal direction> <data type>);
End <entity name>;
```

Figure II.9: Syntaxe déclarative de l'entité.

```
Architecture <architecture name> Of <entity name> Is
    <Define signals and constants>
Begin
End <architecture name>;
```

Figure II.10 : Syntaxe déclarative de l'architecture.

II.7.2 domaine d'utilisations du langage VHDL

- Concevoir des ASICs.
- Programmer des composants programmables du type PLD, CPLD, FPGA.
- Concevoir des modèles de simulations numériques ou des bancs de tests.

II.7.3 Méthodologie de conception

Le flot de conception d'un système sur puce regroupe plusieurs niveaux d'abstraction.

Nous pouvons traiter un système complexe de deux manières qui sont :

- L'approche dite « descendante » (ou « **top-down** » en anglais).
- L'approche dite « ascendante » (ou « **bottom-up** » en anglais).

La conception d'un programme VHDL, peut être résumée par le diagramme de la figure suivant :

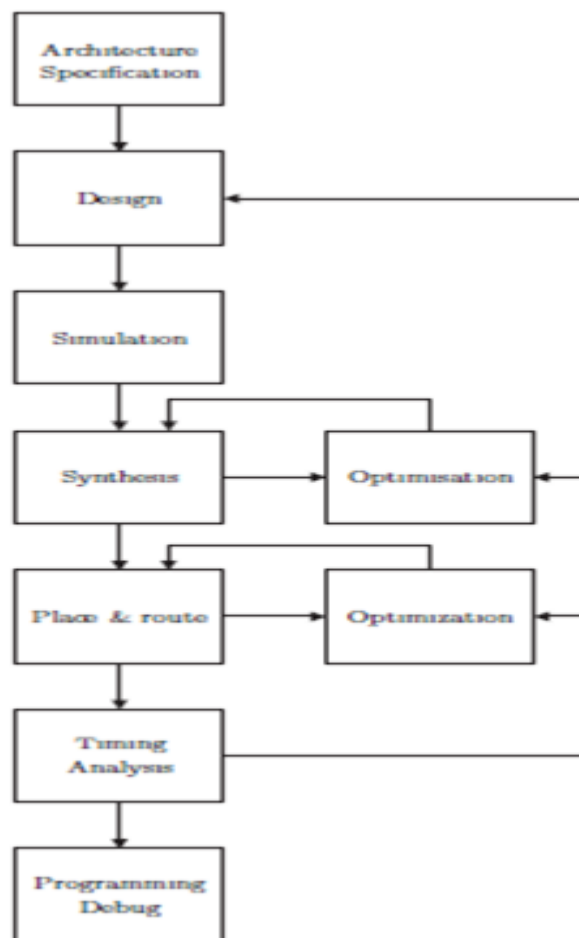


Figure II.11 : Diagramme de développement d'un projet vhdL.

II.7.4 Avantages du langage VHDL

- ✓ La portabilité.
- ✓ La conception de haut niveau.
- ✓ La possibilité de décrire des systèmes très complexes en quelques lignes de code.

De plus, le VHDL :

- ✓ Peut être simulé.
- ✓ Peut être traduit en schéma de portes logiques.

II.8 La vérification d'une conception VHDL

Il existe différentes méthodes pour développer des systèmes numériques incluent les processus d'optimisation, de vérification et de validation des systèmes. Les tests de développement du système sont principalement effectués en utilisant deux méthodes.

-Premièrement la fonctionnalité et les performances du système sont observées et réglées à l'aide d'un logiciel outils de simulation. Le niveau de confiance obtenu à partir de la simulation logicielle est spécifique à l'application et dépend de la disponibilité et de la précision du système.

-Deuxièmement, la conception est déployé sur une plate-forme cible pour vérifier la fonctionnalité et mesurer la performance dans des conditions plus réalistes. Cette approche est également connue sous le nom de test de matériel.

Dans ce travail nous nous examinons deux méthodes pour la vérification : la Co-simulation et FPGA in the loop la figure **II.12**.

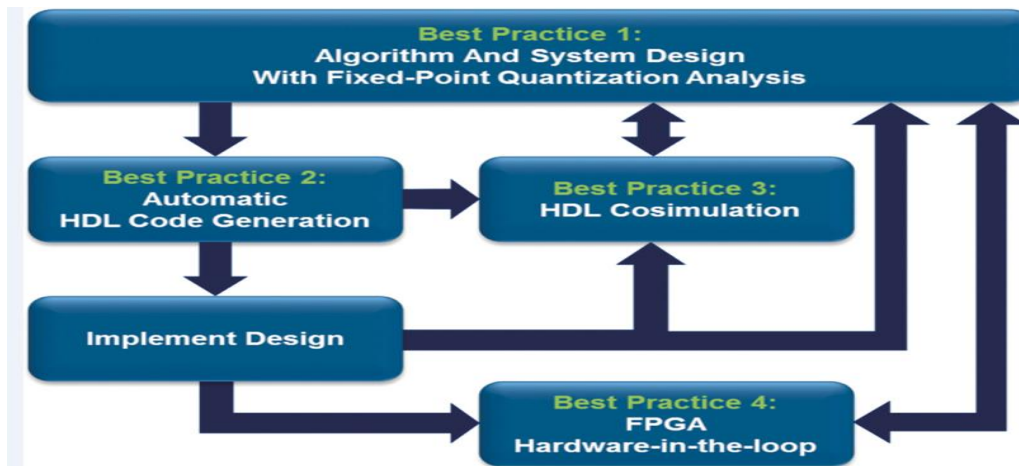


Figure II.12 : Principe de la Co-simulation et de FPGA in the loop.

II.8.1 La Co-simulation

La Co-simulation est basée sur la communication entre deux simulateurs liés à deux logiciels différents, l'un numérique et l'autre analogique. Les modèles sont conjointement exécutés par ces deux simulateurs, chaque simulateur modélisant une partie spécifique du circuit à concevoir ou de son environnement. Une interface de Co-simulation permet l'échange de données entre les deux simulateurs tout en respectant les contraintes de types et de tailles mais surtout respectant la synchronisation temporelle des deux simulateurs. [6]

Comme exemple la Co-Simulation entre MODELSIM/MATLAB est montré dans la figure II.13.

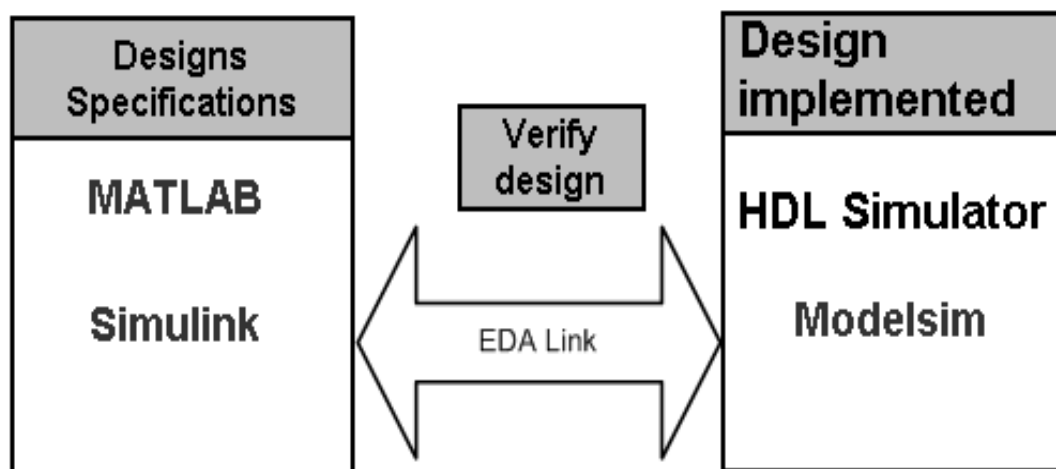


Figure II.13: la Co-simulation entre matlab et modelsim.

Le Tableau II.02 montre les avantages et les Inconvénients de la Co-simulation:

Le Tableau(II.02) : Avantages et Inconvénients de la Co-simulation

LA CO SIMULATION	
LES AVANTAGES	LES INCONVÉNIENTS
- Bibliothèques riches en composants analogiques ou de puissance.	- Deux simulateurs sont nécessaires et doivent être maîtrisés.
	-Temps de simulation important.

II.8.2 FPGA in the loop

FPGA in the loop (FIL) (Fig. II.14) est une méthode HIL (Hardware-In-the-Loop), c'est-à-dire simuler le programme au algorithme (implanter dans une carte), relie à un simulateur à travers des entrees/sorties (commande, feedback).avec une seule exception, le hardware au bien la carte est une carte FPGA.

Le FIL est utilisé pour accélérer la vérification et la validation de code VHDL pour l'obtention des meilleures performances désirées. Les nouvelles capacités FIL permettent une communication plus rapide avec la carte FPGA et une simulation de fréquence d'horloge plus élevée. Désormais, les ingénieurs système et les chercheurs peuvent vérifier et valider rapidement et en toute confiance qu'une conception FPGA fonctionne comme prévu dans le système, ce qui permet d'économiser le temps de développement.

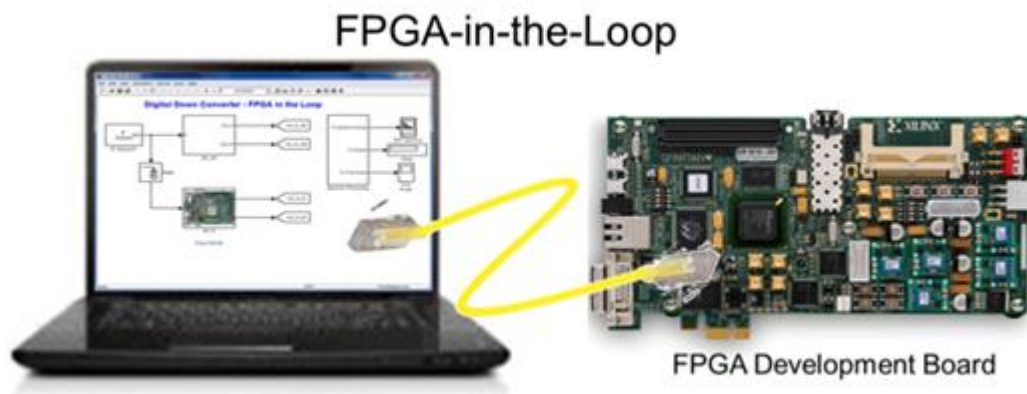


Figure II.14: FPGA in the loop.

II.9 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre on a discuté les circuits logiques programmables FPGAs et on a abordé leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs différents composants constituent ces circuits, leurs avantages et inconvénients.

Dans la deuxième partie, de ce chapitre on a vu les langages HDL qui sont utilisés pour programmer les circuits FPGAs, et en particulier le langage VHDL, Nous avons également abordé la chose importante incorporée dans le processus de vérification qui est la Co-simulation et FPGA-in-the-loop.

Bibliographie

[1] BOUAMRA Sid-Ahmed, « IMPLEMENTATION D'UN MODULE DE RECEPTEUR NUMERIQUE SUR UN CIRCUIT REPROGRAMMABLE DE TYPE FPGA » Université Dr Yahia Fares de Médéa, 2008/2009 Département d'Electronique Instrumentation.

[2] SALLMI Chawki, « conception et réalisation d'une carte de développement FPGA » Université de M'SILA, Juin 2012 Département électrique Instrumentation et Maintenance Industrielle.

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

[4] *D.SMITH* « HDL Chip Design: A pratical Guide for Designing, Synthesis & Simulating Asics &FPGAs using VHDL or Verilog » Doone Pubns, 2006.

[5] J. Madsen, J. Grode, P. Knudsen, M. Petersen et A. Haxthausen {
® LYCOS: then lyngby co-synthesis system }, Design Automation for Embedded Systems, vol. 2, Depatment of Information Technology, Technical University of Denmark, 1997.

[6] Shahram KARIMI «Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop": application au filtre actif parallèle». L'Université Henri Poincaré, Nancy-I, le 26 Janvier 2009.

III.1 Introduction

Afin d'extraire, à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation est utilisé. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments. Il assure, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur, l'adaptateur communément utilisé dans les systèmes PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter. Elle peut être survoltrice ou dévoltrice. Si par exemple la charge est une batterie au plomb, ce sont ses plages de tension de charge et de décharge qui vont permettre d'établir la structure la plus adéquate.

Dans ce chapitre on va présenter les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque, et son commande MPPT pour chercher le point de puissance maximale. Ensuite nous classerons les algorithmes de commande MPPT les plus populaires, en particulier l'algorithme P&O que on va l'utiliser dans notre étude et on finira avec une conclusion.

III.2 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) [1]

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries.

Dans une alimentation à découpage Figure III.1, la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué.

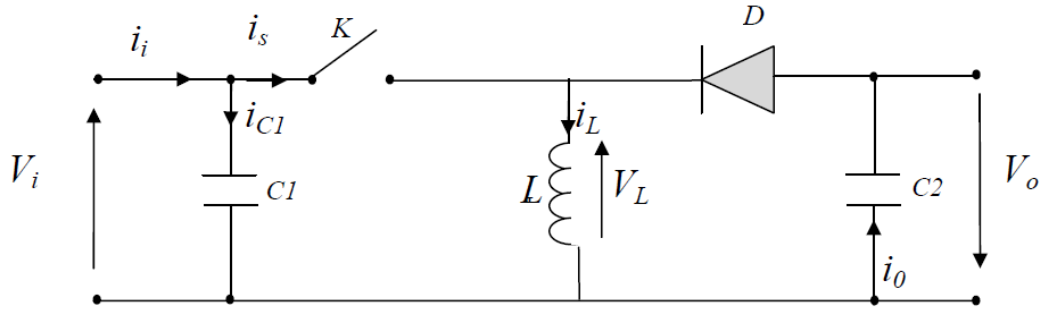


Figure III.1 : Schéma de principe d'une d'alimentation à découpage.

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle figure III.2, jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues.

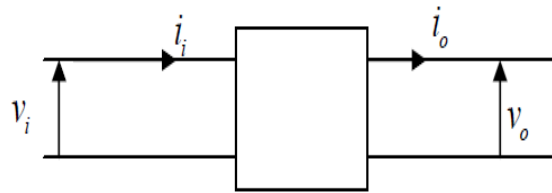


Figure III.2 : Schéma d'un quadripôle électrique.

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant figure III.3. L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout ou rien (bloqué/saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite. Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s avec un temps de fermeture $d T_s$ et un temps d'ouverture $(1-d) T_s$. Où:

- T_s la période de commutation qui est égale à $\frac{1}{f_s}$.
- d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).

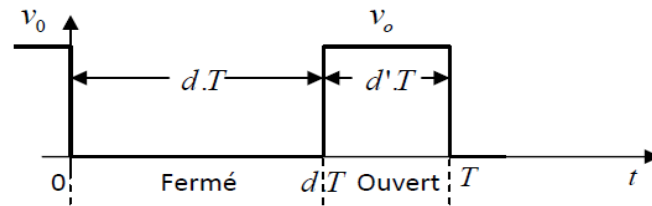


Figure III.3 : Périodes de fermeture et d’ouverture d’un commutateur.

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

III.2.1 Hacheur dévolteur Buck

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur **buck** ou hacheur série. La figure III.4 présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur [1]. Son application typique est de convertir sa tension d’entrée en une tension de sortie inférieure.

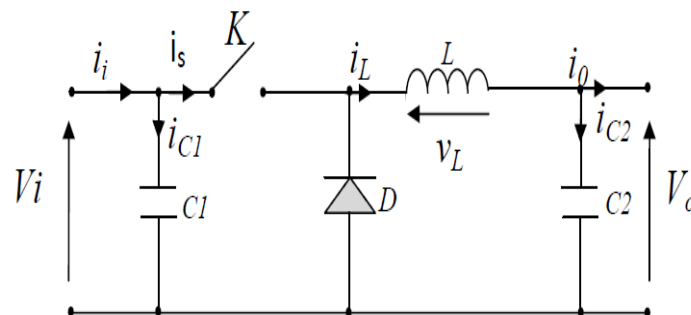


Figure III.4: Schéma de principe d’un convertisseur dévolteur.

La figure III.5 montre les schémas des circuits équivalents d’un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l’interrupteur fermé pendant $d T_s$ et l’interrupteur ouvert pendant $(1-d) T_s$ [2, 3, 4,5].

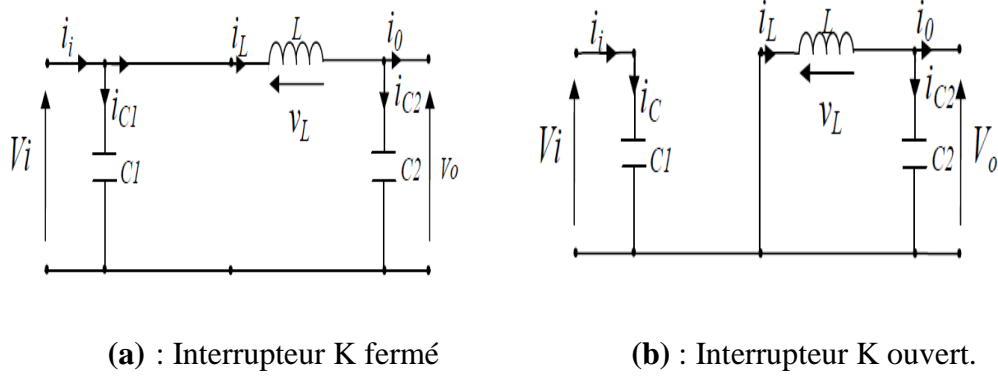


Figure III.5 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur.

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure III.5, on obtient les systèmes d'équations suivants :

Pour la première période $d.T_s$:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c_2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Pour la deuxième période $(1-d)T_s$:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c_2}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -v_o(t) \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour toute la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante [1] :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt_{DT_s}} dT_s + \frac{dx}{dt_{(1-D)T_s}} (1-d)T_s \quad (\text{III.3})$$

En appliquant la relation (III.3) sur les systèmes d'équations (III.1) et (III.2), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_L) + (1 - d)T_s i_i \\ C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} T_s = dT_s(i_L - i_o) + (1 - d)T_s(i_L - i_o) \\ L \frac{di_L}{dt} = dT_s(v_i - v_o) + (1 - d)T_s(-v_o) \end{cases} \quad \text{(III.4)}$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} i_o(t) = i_L(t) - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ i_L(t) = \frac{1}{d} (i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt}) \\ V_i(t) = \frac{1}{d} (L \frac{di_L(t)}{dt} + V_o(t)) \end{cases} \quad \text{(III.5)}$$

III.2.2 Hacheur survolteur BOOST

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de BOOST ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure III.6. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [1].

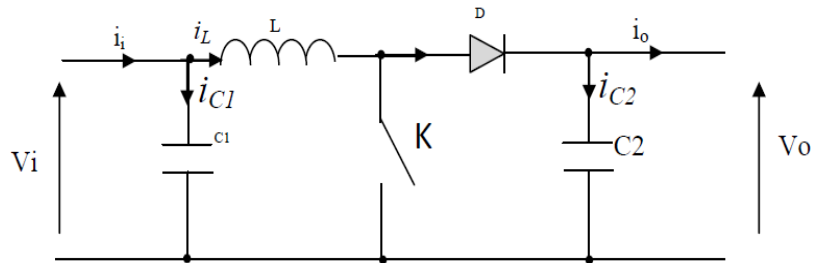


Figure III.6: Schéma de principe d'un convertisseur Boost.

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur voir la figure III.7 des deux phases de fonctionnement donne :

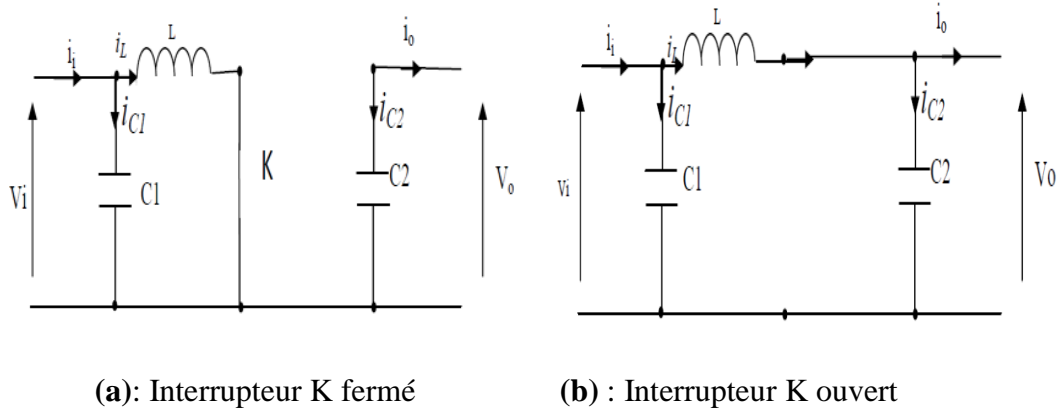


Figure III.7 : Schémas équivalents d'un hacheur survolteur

Pour la première période $d \cdot T_s$:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -v_i(t) \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Pour la deuxième période $(1-d)T_s$:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

En appliquant la relation (III.3) sur les systèmes d'équations (III.6) et (III.7), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_o = (1-d)i_L - C_2 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ v_i = L \frac{di_L}{dt} + (1-d)v_o \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

III.2.3 Hacheur dévolteur-survolteur (mixte)

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe

quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée; son schéma de base est illustré par la figure III.8 [1] :

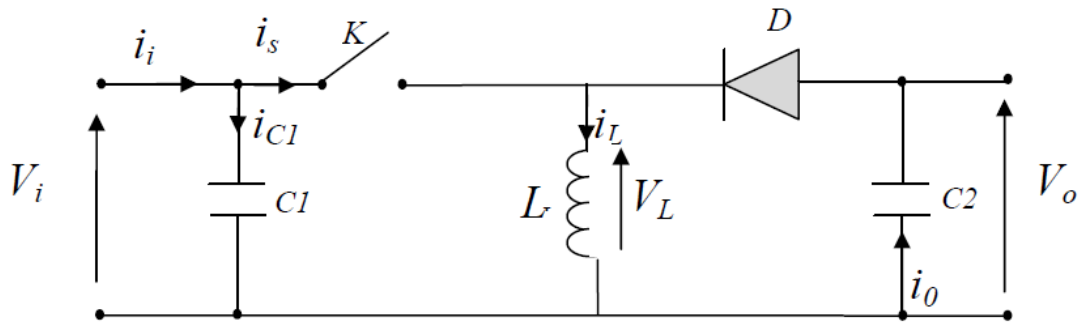
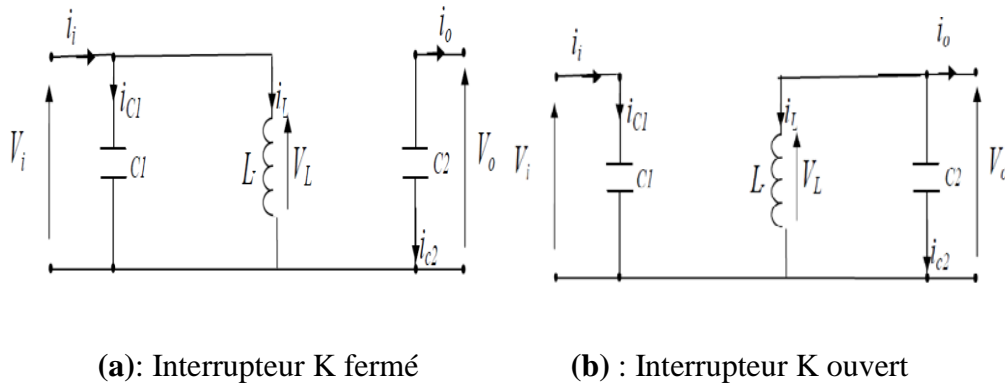


Figure III.8: Convertisseur dévolteur-survolteur.

La figure III.9 montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles de fonctionnement.



(a): Interrupteur K fermé

(b) : Interrupteur K ouvert

Figure III.9 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur,

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

Pour la première période $d.T_s$:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_i(t) \end{cases} \quad \text{(III.9)}$$

Pour la deuxième période $(1-d)T_s$:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_0(t) \end{array} \right. \quad (\text{III.10})$$

En appliquant la relation (III.3) sur les systèmes d'équations (III.9) et (III.10), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_L = \frac{1}{d} (i_i - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt}) \\ i_0 = -(1-d)i_L - C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ V_i = \frac{1}{d} (-(1-d)v_0 + L \frac{di_L}{dt}) \end{array} \right. \quad (\text{III.11})$$

III.3 Rendement du convertisseur statique

Les convertisseurs Boost, Buck est parmi les meilleurs en rendement. Par rapport aux autres convertisseurs. Le tableau III.1 donne une idée de rendement de certains convertisseurs connus.

L'expression du rendement du convertisseur est donné part :

$$\eta_{conv} = \frac{P_{out}}{p} \quad (\text{III.12})$$

Tableau III.1 : Rendement de quelques convertisseurs.

Structure	Rendement et conversion	Batterie
Buck	93%	12V
Boost	92%	24V
Buck-Boost	92%	12V- 24V
Cuk	89%	12V
Flayback	78.1%	24V
Flayback	74%	12V

III.4 Principe de la commande MPPT numérique

La commande MPPT "Maximum Power Point Tracking" est une commande essentielle pour le fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Cette algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP.

Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié en

l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV.

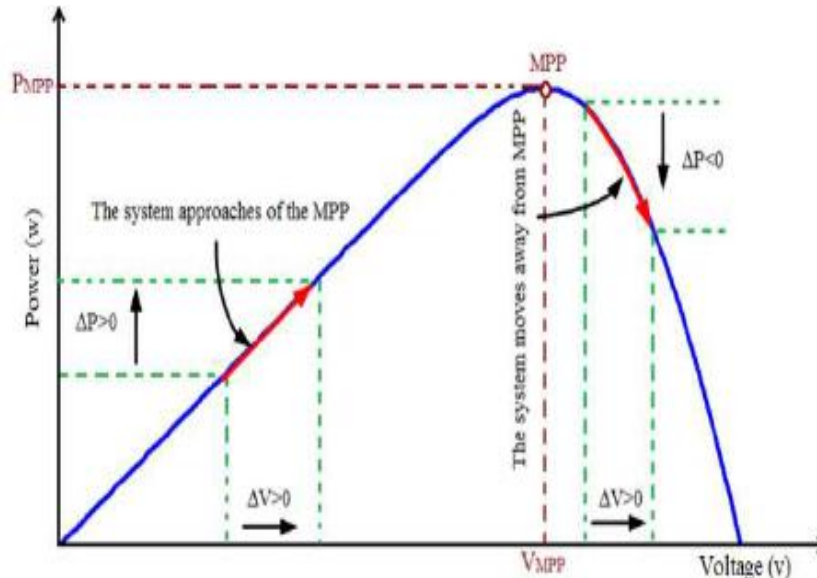


Figure III.10 : Principe de la commande MPPT.

III.5 Classification des techniques MPPT

Il existe différentes manières de classification des algorithmes MPPT. Il est possible de classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT.

III.5.1 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée [5]

A) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb&Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{opt} et I_{opt}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{oc} et

I_{cc}). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction.

B) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de p_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial.

III.5.2 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche [5-6]

a. MPPT Indirect :

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

b. MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc

réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction.

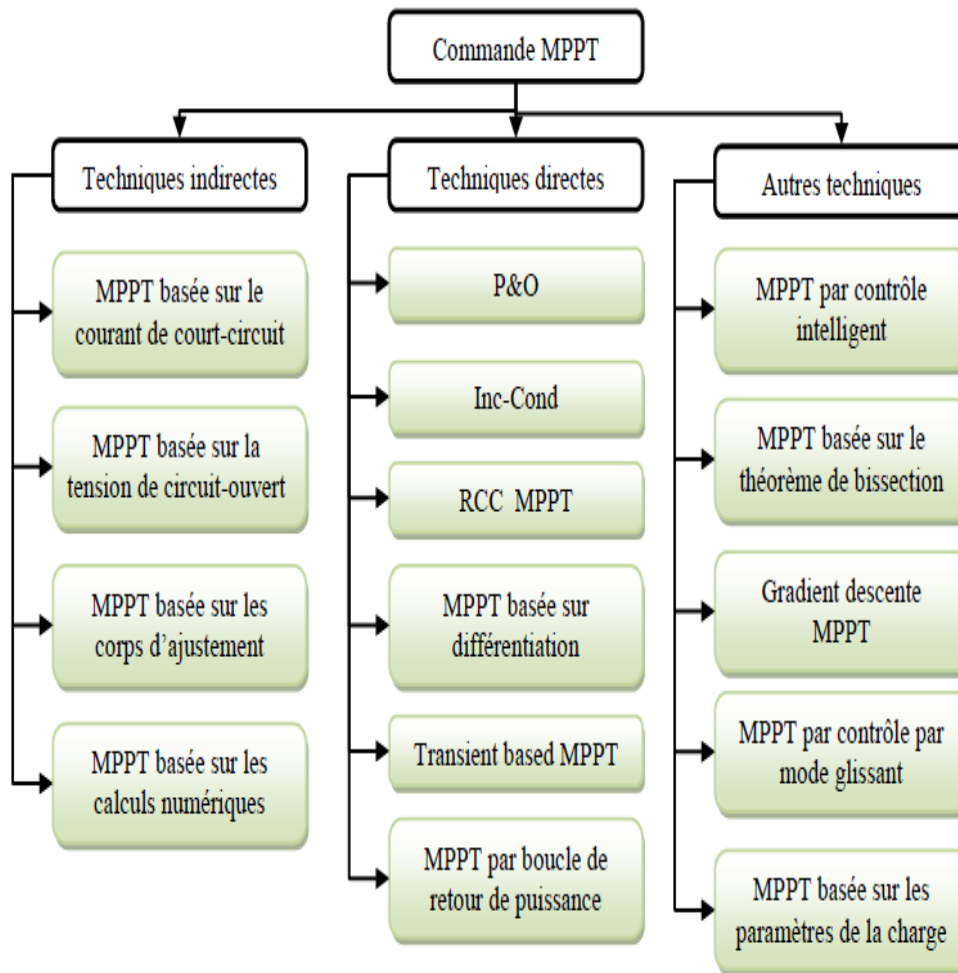


Figure III.11 : Classification des différentes méthodes de poursuite du MPP.

III.6 Les algorithmes de commande les plus populaires

III.6.1 Algorithme Perturber et Observer (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique.

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique α . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant k , puis on la compare à la précédente de l'instant $(k-1)$. Si la puissance augmente, on s'approche du point à maximum de puissance (PMP) et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du

PMP. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique voire la figure III.12 [7].

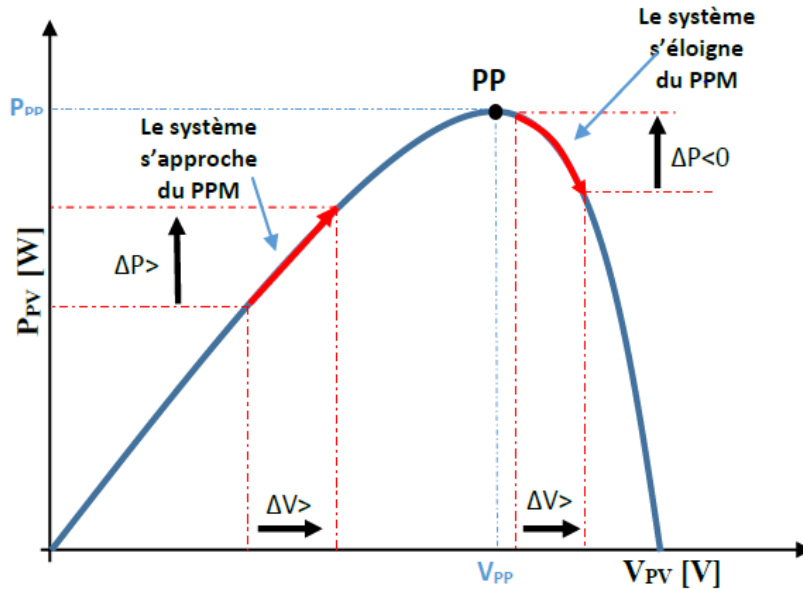


Figure III.12 : Recherche du PPM par la méthode (P&O).

Tableau III.2 : Principe de l’algorithme P&O

Cas	ΔV	ΔP	$\frac{\Delta P}{\Delta V}$	Sens de la poursuite	Action de contrôle
01	+	+	+	Bon	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
02	-	-	+	Mauvais	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + 2 \Delta V$
03	+	-	-	Mauvais	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$
04	-	+	-	Bon	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - 2 \Delta V$

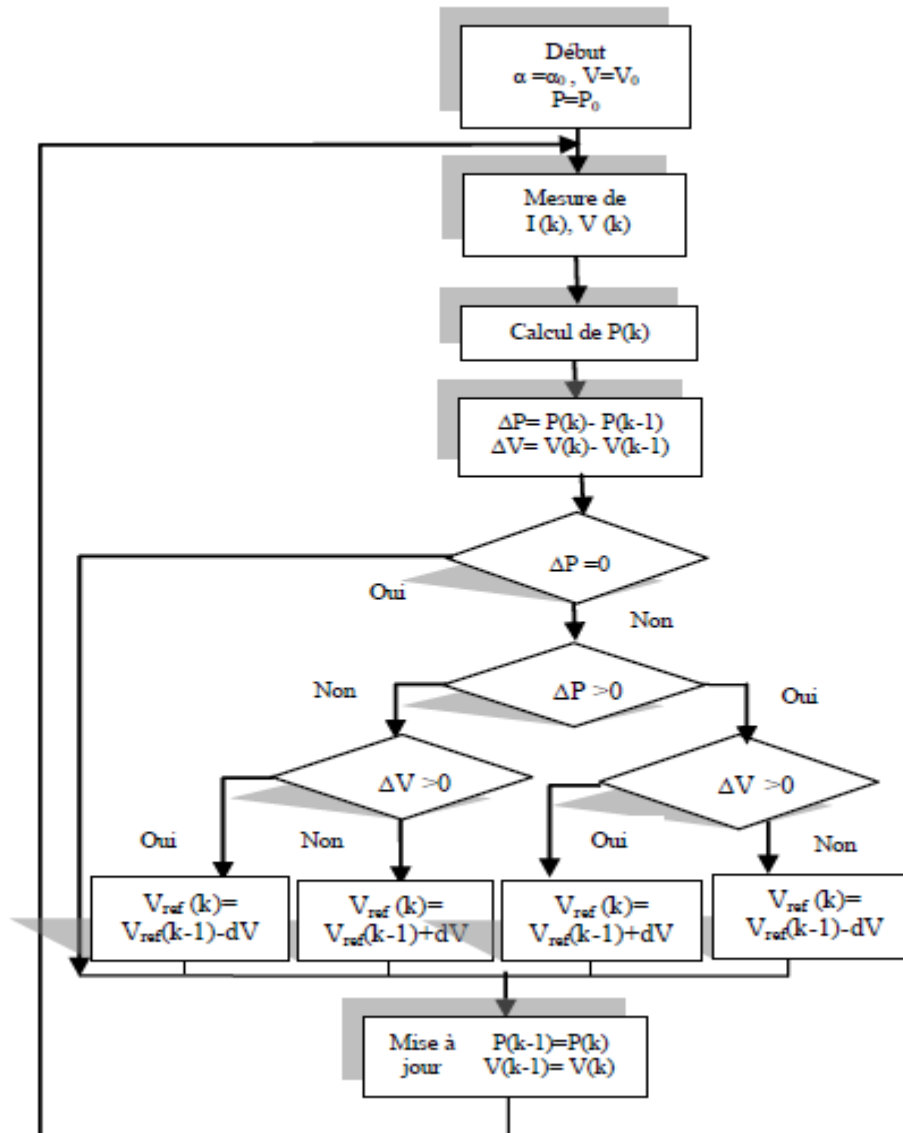


Figure III.13: Organigramme de l'algorithme P&O.

III.6.2 Algorithme Incrément de la Conductance (INC)

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G=I/V$ et l'incrément de la conductance (dG) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport PMP. Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le PMP [8].

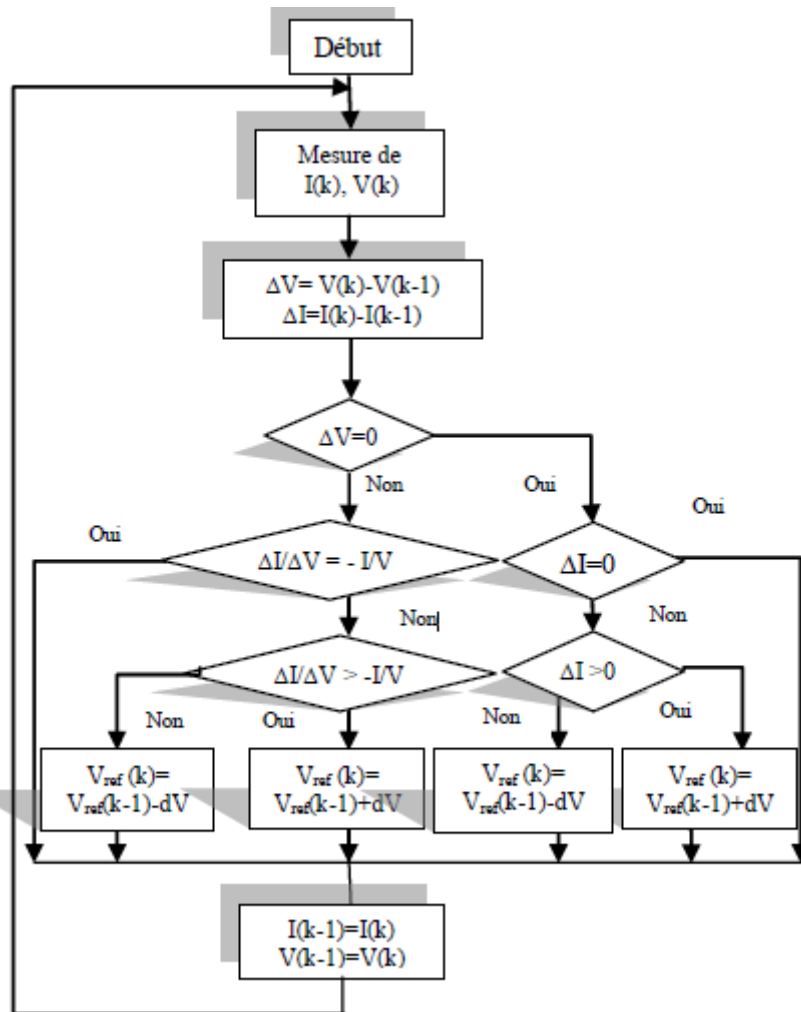


Figure III.14: Organigramme de l’algorithme INC.

III.6.3 Algorithme à Base de la Mesure d’une Fraction de la Tension V_{oc}

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l’équation suivante :

$$V_{mp} = kV_{oc} \tag{III.13}$$

Où k est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8.

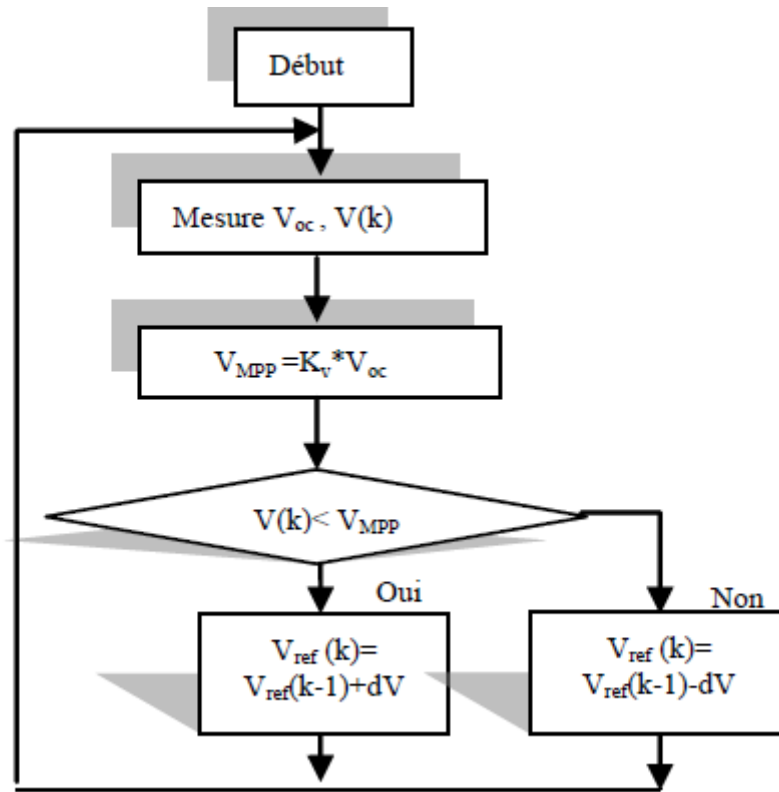


Figure III.15: Organigramme de l'algorithme FCO.

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert V_{oc} . Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche de point optimal en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée.

Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale [9].

III.6.4 Algorithme à Base de la Mesure d'une Fraction du Courant I_{cc}

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante :

$$I_{mp} = k I_{cc} \quad (\text{III.14})$$

Où k est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92.

En effet, le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal. Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale [10].

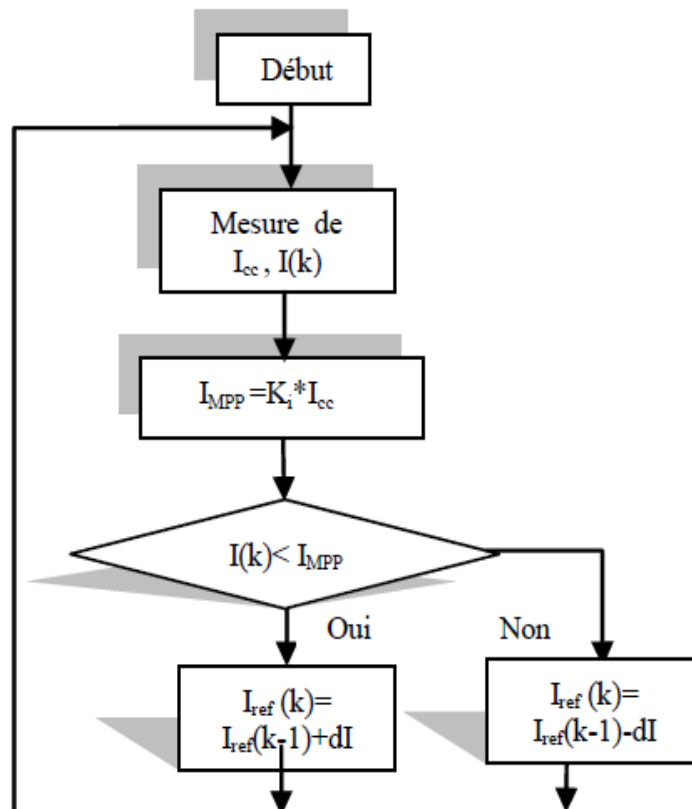


Figure III.16: Organigramme de l'algorithme FCC.

III.6.5 Algorithme à Base de la Logique Floue

La commande basée sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) est de plus en plus populaire grâce à l'évolution des microcontrôleurs.

L'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elle n'a pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elle peut traiter des non linéarités.

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie $\Delta\alpha$ (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature :

- la fuzzification.
- la lecture de la table de vérité.

- la defuzzification.

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes :

- **NB**: Negative Big,
- **NS**: Negative Small,
- **ZE**: Zero,
- **PS**: Positive Small,
- **PB**: Positive Big.

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en Figure III.17 :

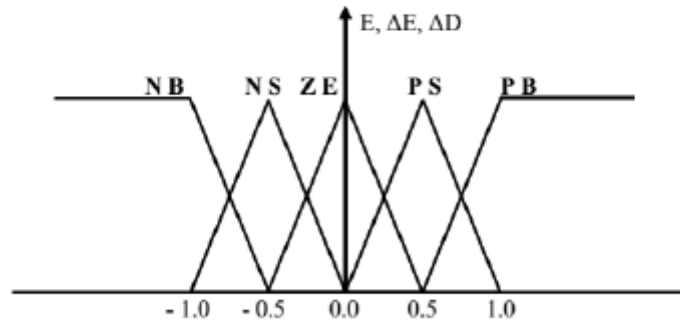


Figure III.17: structure de base de la commande floue.

Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liées aux équations suivantes :

$$E(n) = \frac{p(n)-p(n-1)}{v(n)-v(n-1)} \tag{III.15}$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n - 1) \tag{III.16}$$

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau I, une valeur est attribuée au paramètre de sortie $\Delta \alpha$.

Tableau III.3: Exemple d'une table de vérité pour une commande logique floue.

ΔE \ E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

La variable linguistique assignée à $\Delta\alpha$, dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE . Par exemple, si les variables d'entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie $\Delta\alpha$ est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à $\Delta\alpha$ s'affinent jusqu'à atteindre le PPM.

La defuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie $\Delta\alpha$, afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM.

En résumé, cette méthode s'avère être très performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa précision en statique est fortement liée à la complexité de la table de vérité employée entraînant la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs tenant compte des nombreuses disparités des paramètres électriques du panneau. Ici, typiquement, cette commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM mais elle entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût [11-12].

III.7 Comparaison des algorithmes MPPT

L'algorithme P&O est un algorithme classique et simple. En général, cet algorithme dépend fortement des conditions initiales et il présente des oscillations autour de la valeur optimale. L'inconvénient majeur de cet algorithme est son mauvais comportement suite à un changement brusque de l'éclairement (nuages).

L'algorithme INC semble une amélioration de l'algorithme P&O. En effet, il se comporte mieux lors d'un changement rapide des conditions météorologiques. Cependant, c'est un algorithme un plus complexe que le précédent.

Les algorithmes basés sur la mesure d'une fraction de tension du circuit ouvert ou d'une fraction de courant de court-circuit sont très simples et faciles à implémenter. L'inconvénient majeur est les pertes d'énergie et l'arrêt de transfert de puissance lorsqu'on mesure les grandeurs et. Pour surmonter ce problème, on utilise une cellule

pilote de même nature que les cellules du panneau. De plus, la détermination de la valeur optimale du paramètre est très difficile. C'est pourquoi, ces méthodes semblent juste une approximation et elles ne présentent pas assez de précision et par la suite le système ne fonctionne pas toujours au point optimal. $O_c V_{cc} I_k$

L'algorithme basé sur la logique floue est un algorithme robuste et efficace. En effet, cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations. En outre, il est caractérisé par un bon comportement en état transitoire. Cependant, l'implémentation de ce type d'algorithme est plus complexe que les algorithmes classiques. De plus, l'efficacité de cet algorithme dépend énormément du tableau d'inférence.

Le tableau suivant résume les principales spécifications des différents algorithmes MPPT précédemment étudiés. Nous avons évalué et comparé ces algorithmes en termes de connaissance technique des paramètres du panneau PV, complexité, rapidité et précision.

Tableau III.4: Comparaison des algorithmes MPPT.

Algorithmes MPPT	P&O	INC	FCO	FCC	LF
Type de Capteurs utilisés	1 Tension 1 Courant	1 Tension 1 Courant	1 Tension	1 Courant	1 Courant
Identification des paramètres du panneau PV	Non nécessaire	Non nécessaire	Oui nécessaire	Oui nécessaire	Oui nécessaire
Complexité	Basse	Moyenne	Très Basse	Très Basse	Haute
Nb itérations	45	48	35	41	27
Vit. Convergence	Moyenne	Moyenne	Rapide	Rapide	Très rapide
Précision	95 %	98 %	94 %	94 %	99 %

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de la description du convertisseur MPPT qui est un convertisseur de puissance (DC/DC) commandé par un algorithme MPPT. Nous avons expliqué le principe de recherche du MPP. Ensuite, ainsi que la classification des commandes MPPT. Enfin, Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuel évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles.

Bibliographies

[1] N. Abouchabana, « *Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT* », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[2] S. M. Ait-Cheikh, « *Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques* », Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[3] S. Issaadi, « *Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones* », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.

[4] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « *Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné à une installation photovoltaïque* », Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005.

[5] M. Angel Cid Pastor, « *conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques* », docteur de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006.

[6] M. Boukli-Hacene Omar « *conception et réalisation d'une génération photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique* » magister en automatique productique informatique 2010/2011.

[7] Ali Chermitti, Omar Boukli-Hacene, Samir Mouhadjer, —*Design of a Library of Components for Autonomous Photovoltaic System under Matlab/Simulink*», International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volume 53– No.14, September 2012.

[8] Moshiur Rahman Sourov, Ummee Tania Ahmed, Mirza Golam Rabbani «*A High Performance Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power System Using DC-DC Boost Converter*», IOSR Journal of Engineering Vol. 2, Issue 12 (Dec. 2012), PP 12-20.

[9] Cédric CABAL — Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Doctoral thesis, Université of Toulouse, LAAS, Décembre 2008.

[10] Burri Ankaiah, Jalakanuru Nageswararao, "Enhancement of Solar Photovoltaic Cell by Using Short-Circuit Current Mppt Method", IJESI, Volume 2 Issue 2, PP.45-50, February 2013.

[11] W. Chung-Yuen, K. Duk-Heon, K. Sei-Chan, And All, "a new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller", IEEE power electronics specialists conference, pesc'94, pp. 396-403, jun. 1994.

[12] M. Veerachary, T. Senjyu and K. Uezato, "feed forward maximum power point tracking of PV systems using fuzzy controller", IEEE trans. On aerospace and electronic systems, vol 38, no. 3, July 2002.

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre et consacré à l'étude et la Co-simulation d'un système photovoltaïque via l'utilisation de deux logiciels SIMULINK/MODELSIM. De ce fait Simulink se charge de la partie analogique du système et MODELSIM se charge de la partie la numérique (partie commande).

IV.2 Présentation de notre système

Le système proposé est représenté par la figure IV.1. Il est constitué par un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC/DC de type boost, une charge, et un contrôleur MPPT.

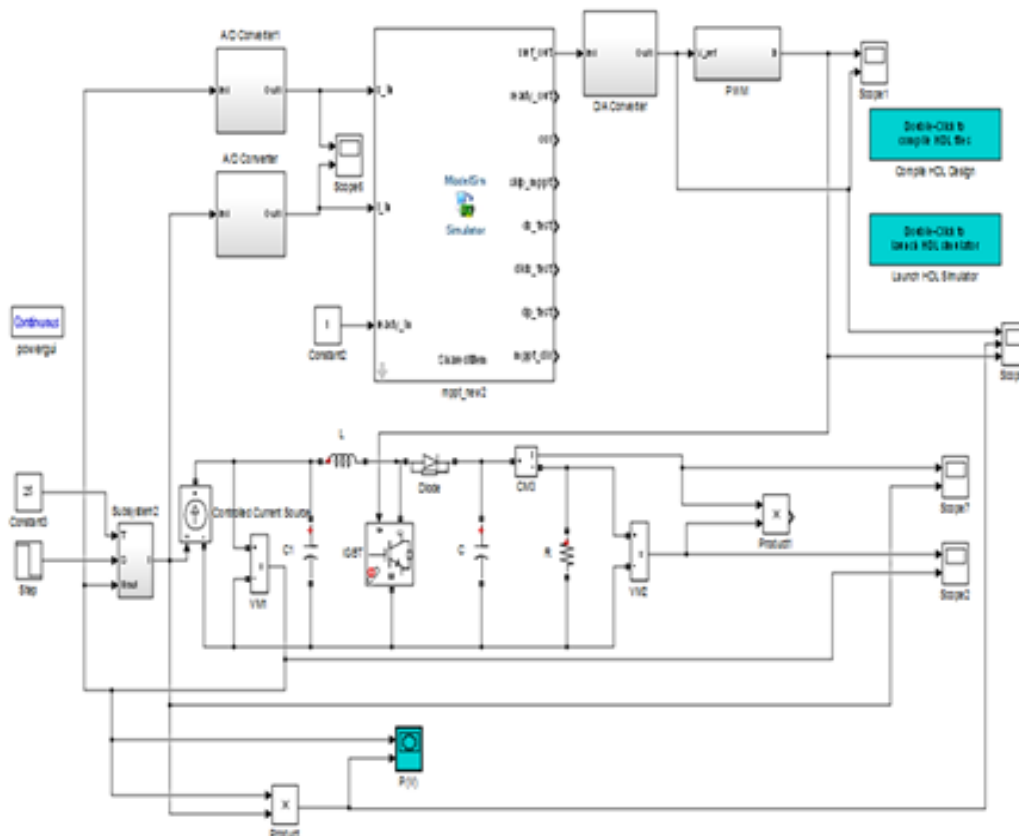


Figure IV.1 : Système proposé.

IV.2.1 Bloc GPV :

Le modèle Simulink du générateur photovoltaïque donné par la figure suivante :

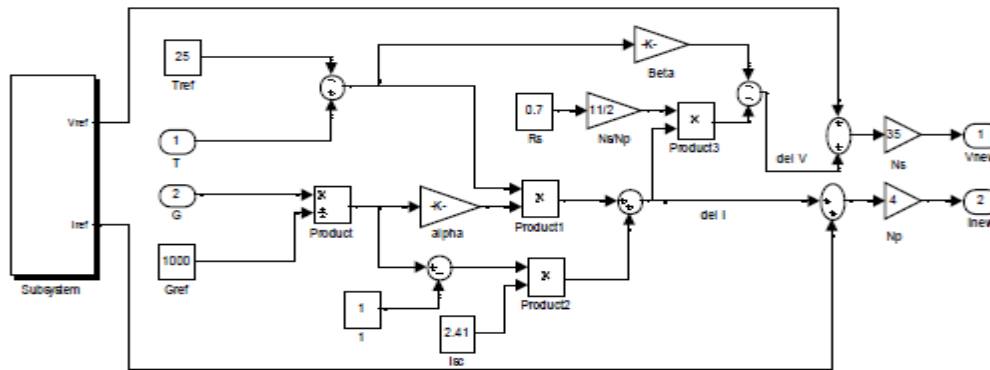


Figure IV.2 : Modèle Simulink du générateur photovoltaïque.

IV.2.2 Bloc du hacheur boost :

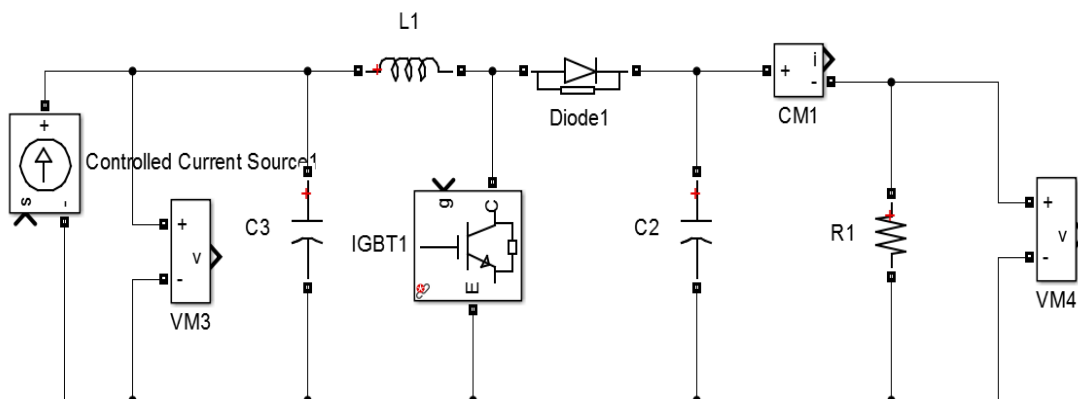


Figure IV.3: Modèle Simulink du Hacheur BOOST.

IV.2.3 Bloc de commande MPPT :

Ce block est écrit en VHDL est simulé dans l'environnement ISE de XILINX, il est écrit sous forme d'une machine d'état finis (**Finite State Machine FSM**), On note que ce programme est constitué de sept états figure IV.4, ou on a utilisé le codage ONE HOT pour code les différents états comme le montre la figure IV.5.

L'utilisation du codage ONE HOT est bien adapter pour la plupart des circuits FPGAs (rapidité d'exécution, espace occupée et consommation d'énergie), cependant, il associe un bit de code donc un flip-flop pour chaque état.

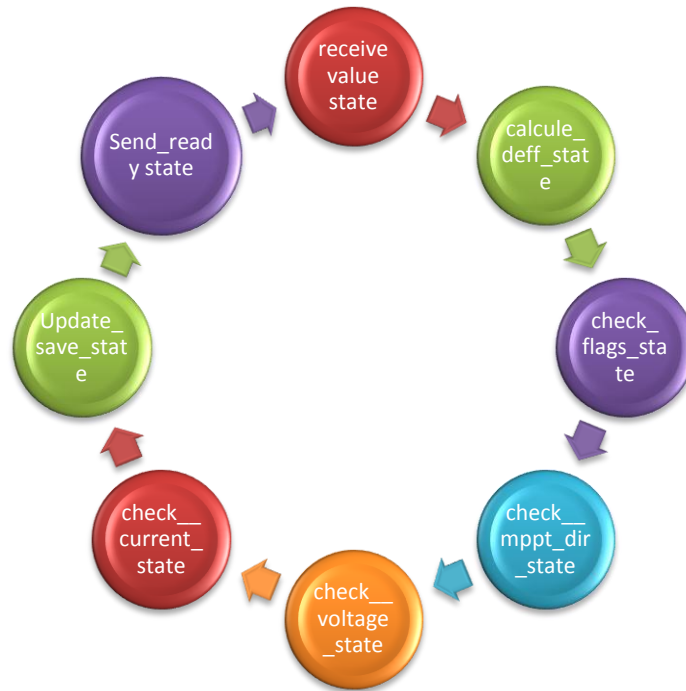


Figure IV.4: FSM de la commande MPPT proposé

```

57 use IEEE.std_logic_1164.all;
58 use IEEE.numeric_std.all;
59 use IEEE.math_real.all;
60 use ieee.std_logic_unsigned.all;
61
62 Entity MPPT_new2 is
63 PORT (
64     Reset      : in std_logic;
65     v_in       : IN std_logic_vector(15 DOWNTO 0);
66     i_in       : IN std_logic_vector(15 DOWNTO 0);
67     ready_in   : IN std_logic;
68     clk        : IN std_logic;
69     vref_out   : OUT std_logic_vector(15 DOWNTO 0);
70 );
71 end MPPT_new2;
72
73 Architecture Behavioral_FSM2 of MPPT_new2 is
74
75 signal MPPT_current_state,MPPt_next_state: std_logic_vector(7 downto 0);
76 -- ADC States "One hot" coding for Fpga
77 constant Recieve_Value_STATE      : std_logic_vector := "00000001";--1
78 constant Calcul_deff_STATE        : std_logic_vector := "00000010";--2
79 constant Check_flags_STATE        : std_logic_vector := "00000100";--4
80 constant Check_MPPT_Dir_STATE     : std_logic_vector := "00001000";--8
81 constant Check_Voltage_STATE      : std_logic_vector := "00010000";--16
82 constant Check_Current_STATE      : std_logic_vector := "00100000";--32
83 constant Update_Save_STATE        : std_logic_vector := "01000000";--64
84 constant Send_Ready_STATE         : std_logic_vector := "10000000";--128
  
```

Figure IV.5: Partie du modèle VHDL de la commande MPPT.

Après vérification par simulation dans l'environnement ISE de XILINX on peut donc générer le modèle pour l'utiliser dans Simulink pour faire la Co-simulation, pour cela on utilise l'outil CosimWizard associé dans MATLAB est le résultat et représenté dans la figure IV.6.

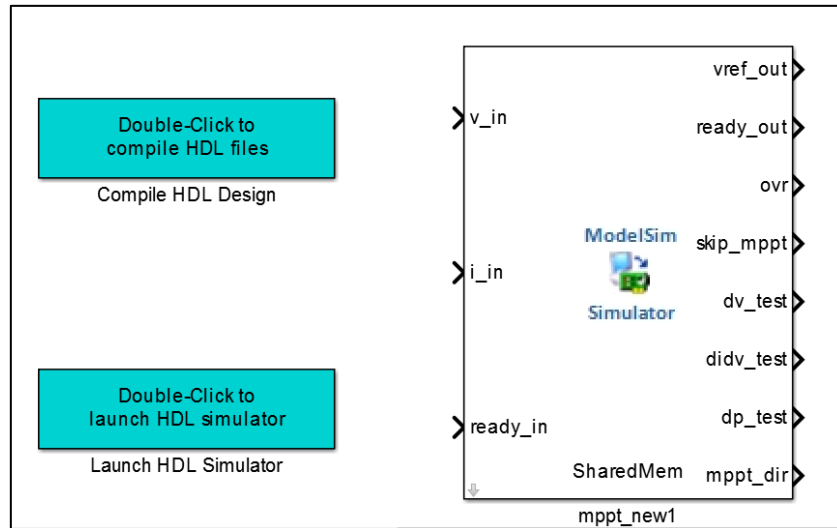


Figure IV.6: Modèle généré par Simulink à partir du model VHDL de la commande MPPT.

IV.3 résultats de simulation

Dans les conditions standard ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $E = 1000\text{W/m}^2$) :

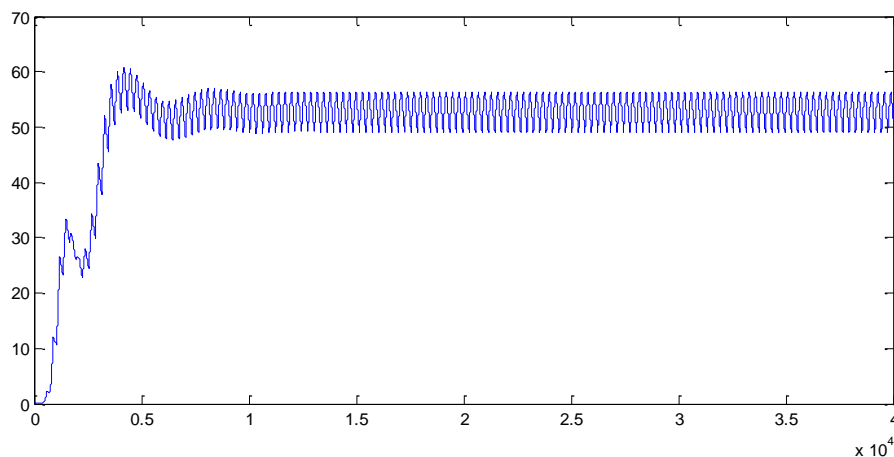


Figure IV.7: la puissance de sortie du boost.

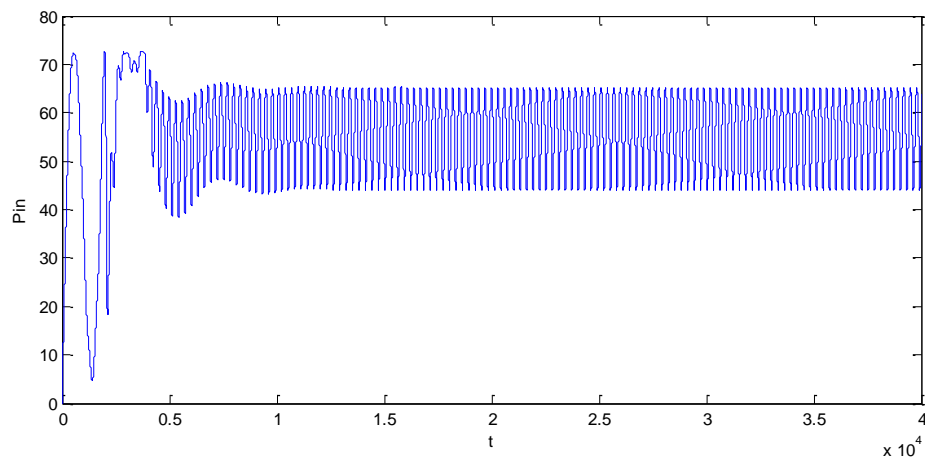


Figure IV.8: la puissance d'entrée du boost.

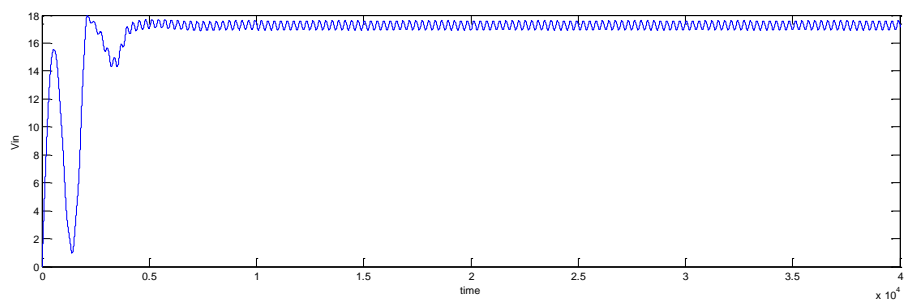


Figure IV.9: la tension d'entrée du boost.

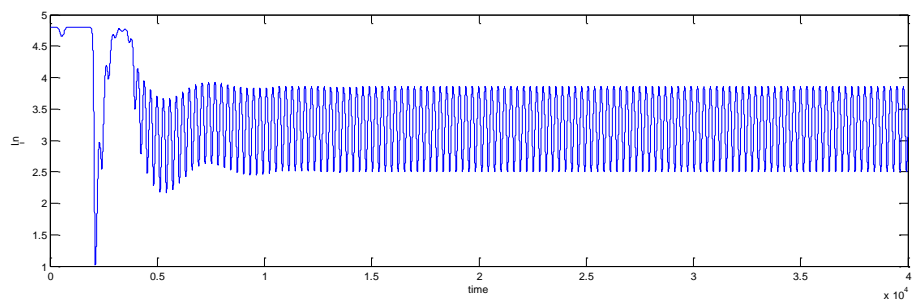


Figure IV.10 : le courant à l'entrée du convertisseur Boost.

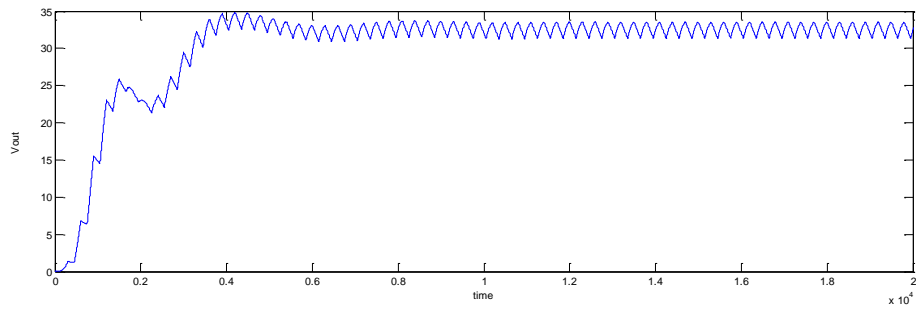


Figure IV.11: la tension à la sortie du convertisseur Boost.

D'après les figures IV.7-11, on remarque que notre algorithme a bien fait fonctionner le panneau photovoltaïque à son point de puissance maximum, et la tension de sortie suit la tension de référence générée par le bloc VHDL, on peut aussi remarquer que la tension de sortie du hacheur survolteur est supérieure à la tension d'entrée avec un rapport cyclique presque 0.9 figure IV.13.

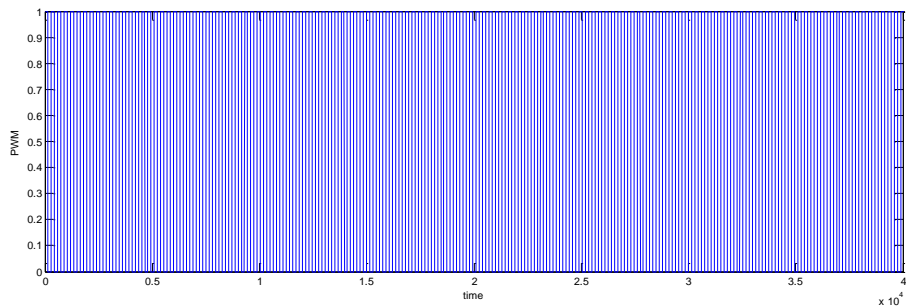


Figure IV.12: le signal issu la commande MLI

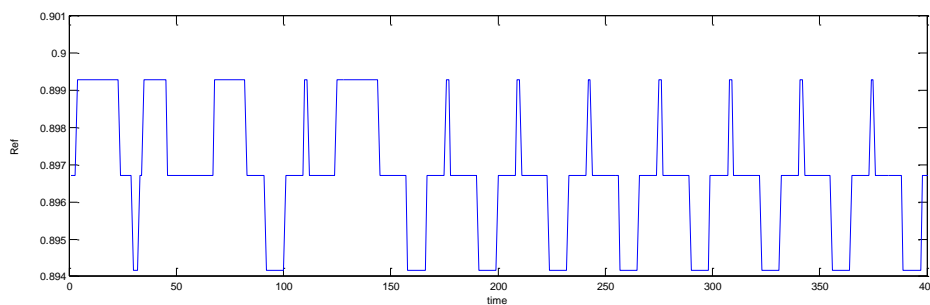


Figure IV.13: Référence du rapport cyclique généré par le modèle VHDL.

IV.4 Résultats de simulation du bloc numérique VHDL avec MODELSIM

La Figure IV.14 illustre le résultat de simulation du bloc numérique dans l’interface graphique de MODELSIM.

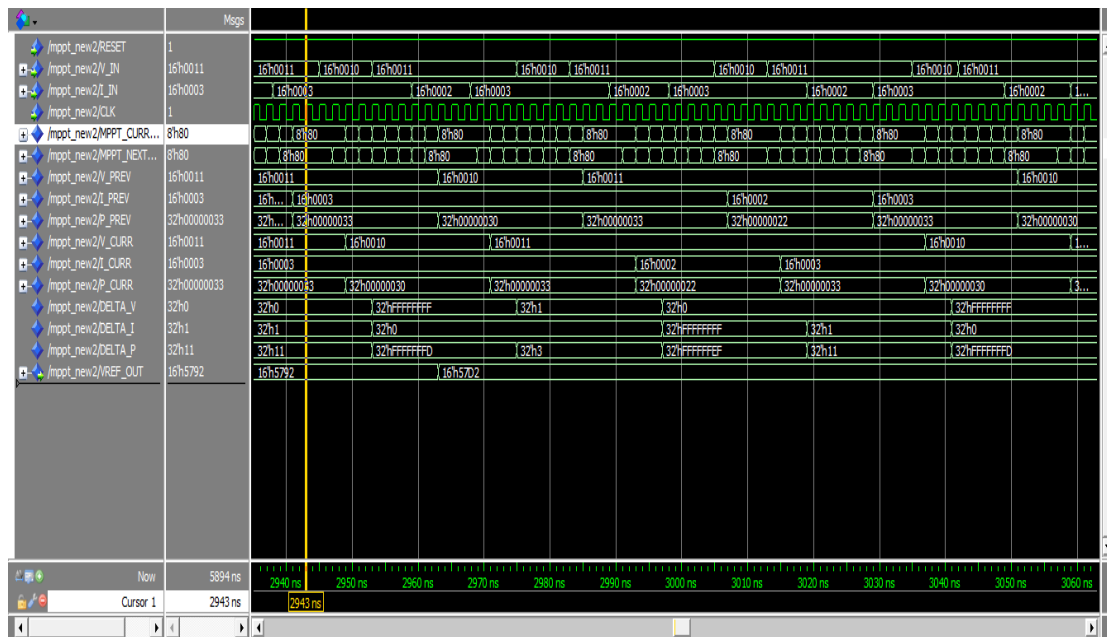


Figure IV.14: Réponses de la commande MPPT numérique sous l’environnement MODELSIM(Co-simulation).

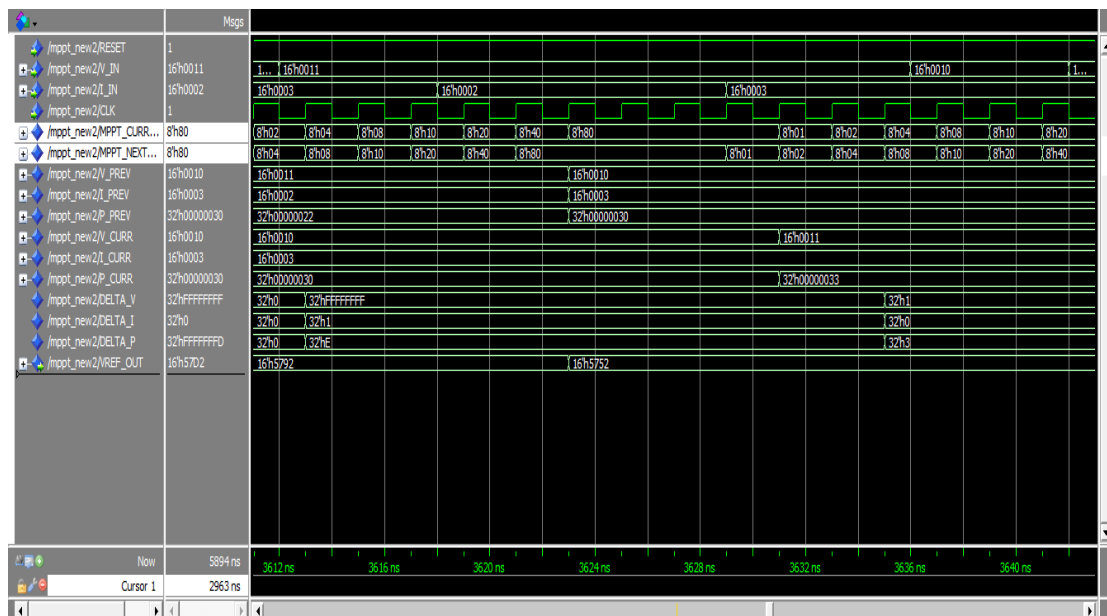


Figure IV.15: Zoom sur la réponse MPPT numérique.

IV.5 Conclusion

La simulation numérique est un moyen très performant pour l'analyse et comprendre des phénomènes physiques.

Le logiciel MATLAB de MathWorks et son extension graphique associée SIMULINK, présentent la possibilité de simuler des systèmes mixtes continus et discrets. Il est donc bien adapté pour mettre en œuvre, tester et évaluer les systèmes numériques.

Dans ce chapitre nous avons présenté un système photovoltaïque formé d'un hacheur DC/DC (boost), une charge et son commande MPPT. Dans ce chapitre aussi et pour vérifier le bon fonctionnement de notre algorithme MPPT numérique écrit en VHDL, on a utilisé la méthode de Co-Simulation pour vérifier le bon fonctionnement de notre système ; et qui consiste à simuler les composants analogique du système dans un simulateur analogique (Simulink) et les composants numérique du système dans un simulateur numérique (MODELSIM) tout en gardant un lien entre les deux simulateurs (échange de données entre les deux simulateurs).

Les résultats de simulations obtenus montrent le bon fonctionnement de notre algorithme MPPT numérique écrit en langage VHDL. Ce qui nous permet dans un futur travail l'implémentation de cet algorithme dans une FPGA en vue de commander un système réel.

conclusion générale

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale, des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à la poursuite PPM et à minimiser ainsi l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence qui est variable en fonction de la charge et des conditions climatiques. Dans le même but, plusieurs techniques de contrôle MPPT ont été introduites dernièrement à savoir : P&O Incrément de la Conductance (INC), à Base de la Logique Floue....etc.

Dans ce travail, on a développé et implémenté sur le circuit " FPGAVIRTEX 6 de XILINX, la méthode MPPT qui utilisées dans notre systèmes photovoltaïques: la méthode du Perturbation et Observation (P&O), on a tenté d'explorer et d'exploiter au maximum les ressources offertes par ces FPGA. La simulation nous a permis de valider les programmes la méthode avant de les charger sur le circuit FPGA.

Si on estime par contre que les performances de la méthode MPPT doivent être optimales, même pour une implémentation plus complexe, le choix, relativement aussi, mais on peut conclure que le contrôleur donne des bons résultats et montrent leurs efficacité non seulement pour la poursuite du point de puissance maximale mais aussi pour le temps de réponse et la stabilité. On peut conclure aussi que la sortie des signaux qui sont obtenus et visualisés sur oscilloscope démontre la faisabilité des commandes MPPT.

Enfin, nous espérons que notre travail pourra contribuer à aider les personnes à l'étude de l'un des technologies qui s'intéressent à l'étude de la maîtrise de l'énergie renouvelable une technologie écologique, peu couteuse et hautement fiable, ne nécessitant ni combustible, ni transport. Une technologie restant, malheureusement, encore pionnier dans notre pays.

résumé

Abstract

In this work, the maximum power point tracking algorithms are designed using High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language. The MPPT algorithm used is Perturb & Observe method designed and compared with device usage diagrams in Xilinx ISE 13.4. With the mathematical equation the PV cell is modeled and simulated in SIMULINK-MATLAB blocks. Simulation tools like ModelSim SE 10.5, Xilinx ISE 13.4 and SIMULINK-MATLAB are used. The results prove that MPPT algorithms could be easily implemented using Field Programmable Gate Array (FPGA) in real time.

Keywords: PV cell model, Perturb & Observe MPPT algorithm, VHDL coding.

Résumé

Dans ce travail, les algorithmes de suivi de point de puissance maximum sont conçus en utilisant Langage de description de matériel de circuit intégré à haute vitesse. L'algorithme MPPT utilisé c'est Perturb & Observe méthode conçus et comparés avec les diagrammes d'utilisation des appareils dans Xilinx ISE 13.4. Avec l'équation mathématique la cellule PV est modélisée et simulée dans SIMULINK-MATLAB des blocs. Les outils de simulation comme ModelSim SE 10.5, Xilinx ISE 13.4 et SIMULINK-MATLAB sont utilisés. Les résultats prouvent que les algorithmes MPPT pourraient être facilement mis en œuvre en utilisant FPGA (Field Programmable Gate Array) en temps réel.

Mots-clés: Modèle de cellule PV, algorithme P&O MPPT, codage VHDL.

المخلص

في هذا العمل ، تم تصميم خوارزميات تتبع نقطة الطاقة القصوى باستخدام لغة وصف أجهزة الدائرة المتكاملة ذات السرعة العالية. خوارزمية MPPT المستخدمة هي "الاضطراب والملاحظة" المصممة والمقارنة مع الرسوم البيانية لاستخدام الجهاز في XILINX ISE 13.4. مع المعادلة الرياضية تم تشكيل الخلية الكهروضوئية ومحاكاتها في SIMULINK-MATLAB. ونستخدم ادوات المحاكاة

Modelsim SE 10.5 و SIMULINK-MATLAB و XILINX ISE 13.4 تثبت النتائج انه يمكن تنفيذ

خوارزميات MPPT بسهولة باستخدام "صيف بوابة برمجة" (FPGA) في الوقت الحقيقي.

الكلمات المفتاحية: نموذج الخلية الكهروضوئية , خوارزمية MPPT "الاضطراب والملاحظة" ,

ترميز VHDL.