

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب البليدة
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



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

**MEMOIRE DE
PROJET DE FIN D'ETUDES
POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
Master2 en Electronique
Option : Système de Vision Robotique**

Thème :

COMMANDE D'UN CONVERTISSEUR DC-DC BOOST BASEE SUR FPGA, APPLICATION PV

Présenté par : *RAISSI Mohamed Amine*
DECHOUK Ayoub

Proposé et dirigé par:

- ❖ Mr Tadriz Rezki
- ❖ Mr Mamoune Montassar

Devant le jury composé de :

Président: M^r

Examineurs: M^r

M^r

M^r

2017/2018

Remerciements

*Grâce à dieu le tout puissant nous avons pu accomplir ce modeste travail.
Nous adressons nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à sa
réalisation, nous citons en particulier nos promoteurs Mr Tadrisk Rezki et Mr
MamouneMontassar, qui nous ont orientés tout au long de ce travail, par ses
conseils, et ses informations qui nous ont beaucoup aidées.*

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

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

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

Introduction générale

La consommation d'énergie est augmentée car le développement des sociétés industrialisées nous fait avoir de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles (le pétrole, le gaz, le charbon). La consommation de ces sources effectue le lieu par la pollution et en plus de ça sont des énergies à ressource limitée.

La source d'énergie la plus efficace et inoffensive est probablement l'énergie solaire. Pour de nombreuses applications, il est donc techniquement simple à utiliser. L'utilisation de l'énergie solaire au lieu de la combustion de carburant, en particulier pour une simple application comme le chauffage à basse et moyenne température, peut réduire la charge sur l'environnement. Alors le système de production PV est considéré comme une source propre et respectueuse de l'environnement de l'énergie.

L'installation de photovoltaïque (PV) se développe rapidement malgré tout, les systèmes de génération de PV ont deux problèmes majeurs qui sont liés à une faible efficacité de conversion d'environ 15% à 20% notamment dans les conditions d'irradiation à faible et que la quantité d'énergie électrique générée par des panneaux photovoltaïques varie de façon continue avec des conditions météorologiques [1].

À partir de ça on a étudié dans ce mémoire l'énergie solaire photovoltaïque pour maximiser la puissance produite par des panneaux solaires, un contrôleur utilisé pour suivre le point de puissance maximale des systèmes PV. Notre objectif de faire une implémentation de l'algorithme P&O (perturbation et Observation) et INC pour un système PV.

Pour bien comprendre ce phénomène, nous avons présenté et organisé dans ce mémoire quatre chapitres :

Au premier chapitre, on s'intéresse à la description générale sur le phénomène photovoltaïque et le principe de générateur photovoltaïque, effet PV, cellule PV et les paramètres des cellules PV, et finalement on a représenté

Le deuxième chapitre la modélisation du module photovoltaïque GPV et les différents circuits électriques équivalents et ses caractéristiques.

Le troisième chapitre on a représenté les différents de commande MPPT les plus utilisées. Dans le troisième chapitre on va simuler l'algorithme P/O et INC sous Simulink/MATLAB

Le quatrième chapitre c'est l'implémentation des deux méthodes P&O et INC en langage VHDL dans un circuit programmable (FPGA). On va définir quelques notions sur les FPGA finalement on a présenté les résultats et les courbes obtenues par le logiciel Xilinx FPGA

Enfin, on terminera par une conclusion générale discutant les résultats obtenus et les perspectives à entreprendre dans les futurs travaux .

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre du développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV). Pour cela, nous allons utiliser deux techniques intelligentes : la méthode Perturbation-Observation (P&O), IncCond .

Le principal objectif de ces contrôles est d'extraire, pour des conditions de chargement et de données atmosphériques, la puissance maximale des modules photovoltaïques.

Dans ce travail, nous présentons le développement de ces contrôles et de leur mise en œuvre sur un circuit "FPGA Xilinx SPARTRAN 3E". En effet, au cours de ce travail, toutes les étapes utiles pour implémenter le contrôleur logique sur la cible FPGA.

Mots clés : Système photovoltaïque, Poursuite du point de puissance maximale : MPPT, contrôleur flou : FLC, circuit logiques programmable de type : FPGA.

Abstract:

This work focuses in the domain of development of procedure of optimization whom let the pursuit of the point of the maximum puissance of generator photovoltaïque

This work focuses on the pursuit of maximum power point tracking (MPPT) for photovoltaic generators. For this, we will use intelligent technique: fuzzy control. The main objective of these controls is to extract, for loading conditions and atmospheric data, the maximum power of photovoltaic modules.

In this work, we present the development of these controls and their implementation on a "FPGA Xilinx SPARTRAN 3E". In did, we will represent all steps taken to implement the fuzzy control on the circuit FPGA.

Keywords: Photovoltaic, MPPT, Neuronal networks, Fuzzy logic: FLC, FPGA circuit.

ملخص:

يركز هذا العمل على السعي لتتبع نقطة الإستطاعة الأعظمية المفرغة عن طريق المولد الكهروضوئي, لهذا فإننا نستخدم تقنية ذكية : الغرض الرئيسي لهذه التقنية هو التتبع التلقائي و الفوري لنقطة الإستطاعة العظمى "MMP". في هذا العمل نقوم ببرمجة المسيطر الغامض على دارة " مصفوفة البوابات المنطقية القابلة للبرمجة الحلقية" من نوع FPGA. محتوى هذا العمل يمثل جميع الخطوات المتبعة لتنفيذ المسيطر الغامض على دارة FPGA.

كلمات مفتاحية: توليد الكهرباء بواسطة الطاقة الشمسية، تتبع نقطة الإستطاعة العظمى، تقنيات الذكاء الاصطناعي: مسيطر غامض، دارة رقمية قابلة للبرمجة الحلقية: FPGA.

Listes des acronymes et abréviations

AC	Alternatif Current
C	Capacité du condensateur
c	Célérité de la lumière
CCM	Continuous Conduction Mode
CLB	Configurable Logic Block
CPLD	Complex Programmable Logic Device
DC	Direct Current
DC/DC	Direct Current/Direct Current Converter
DCM	Discontinuous Conduction Mode
DSP	Digital Signal Processing
E	Energie
E _g	Energie du Gap du semiconducteur
FF	Fill Factor
FPGA	Field Programmable Gate Array
GAL	Generic Array Logic
G _b	le flux global incliné
GES	Gaz à Effet de Serre
GPV	Générateur Photovoltaïque
HDL	Hardware Description Language
I _d	Le courant à travers la diode
I _{mpp}	Le courant au point de puissance maximale
InCond	Incremental Conductance
IOB	Input Output Block
I _{ph}	Photocurrent
I _s	Le courant de saturation de la diode
I _{sc}	Le courant de court-circuit
I-V	Le courant en fonction de la tension
K	Constant de Boltzman $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2\text{kg/s}^2\text{K}$
K _i	Coefficient de changement de courant de court-circuit par la température
L	L'inductance de la bobine
LUT	Look Up Table
MPGA	Mask Programmable Gate Array
mpp	Maximum PowerPoint
MPPT	Maximum Power Point Tracking
n	Facteur d'idéalité de la diode
P	La puissance
P&O	Perturbe et Observe
PAL	Programmable Array Logic
P _c	Puissance Crête
PLA	Programmable Logic Array
PLD	Programmable Logic Device
PN	Jonction semi-conducteur
PPM	Point de Puissance Maximale

PROM	Programmable Read Only Memory
PV	Photovoltaïque
P-V	La puissance en fonction de la tension
PWM	Pulse Width Modulator
q	Charge d'électron $1,6 \cdot 10^{-19}$ c
Ri	La charge à l'entrée du hacheur
Ro	La charge aux bornes du hacheur
ROM	Read Only Memory
Rs	Résistance série
Rsh	Résistance de shunt
S	Surface du champ PV
SPLD	Simple Programmable Logic Device
SRAM	Static Random Acces Memory
T	La température
Tnom	La température nominale
UV	Ultraviolet
VHDL	VHSIC Hardware Description Language
VHSIC	Very High Speed Integrated Circuit
Vmpp	La tension au point de puissance maximale
Voc	La tension de circuit ouvert
Vt	La tension thermique
Wp	Watt Peak
XSG	Xilinx System Generator
α	rapport cyclique
β	le niveau de l'ensoleillement
η	le rendement
λ	La longueur d'onde
μ C	Micro-contrôleur
μ P	micro-processeur

Listes des acronymes et abréviations

PV: Photovoltaïque;

GPV: Générateur Photovoltaïque;

I_{sat} : Le courant de saturation;

K: La constante de Boltzmann ($1,381.10^{-23}$ Joules/Kelvin);

T: la température effective des cellules (K);

T_r : Température de référence ($T_r=298$ K);

K_i : Coefficient de température de courant de court-circuit($K_i=0,0017A/^{\circ}C$); E_{g0} : Energie du gap= 1,1 eV ;

λ : Irradiation du module PV($\lambda =1000W/m^2$); e: la charge d'un électron ($1,6.10^{-19}C$)(ou bien 'q'); A: Facteur d'idéalité = 1,6 ;

n: le facteur de non idéalité de la jonction;

I_{PV} : Le courant fourni par la cellule (A);

V_{PV} : La tension aux bornes de la cellule (V);

I_{ph} : Le photon courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température(A);

I_{Scr} : Courant de court-circuit=4,75A;

R_s, R_p : Sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle ;

P_{PV} : la puissance disponible en sortie du générateur photovoltaïque;

V_{OC} : Tension de circuit-ouvert;

P_{ppm} : Puissance maximale (V_m, I_m);

PPM: Point de puissance maximale;

MPPT: maximum power point tracking;

DC-DC : Direct-Current Direct-Current;

E: L'éclairement absorbé par la cellule,

STC: Standard Test Conditions ($E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$);

NOCT: Nominal Operating Cell Temperature($E=800 W/m^2$ et $T=20^{\circ}C$);

d : Le rapport cyclique;

R_{DS} : La résistance de commutation;

ΔV : Ondulation de la tension;

ΔI_L : Ondulation du courant inducteur;

ΔQ : Variation de charge;

TaK: La Température Variable;

TrK: La Température de référence;

XSG: Xilinx System Generator;

FPGA: Field Programmable Gate Array.

Liste des figures

Chapitre 1		
Figure 1.1	Description d'une cellule photovoltaïque	5
Figure 1.2	Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque réelle	6
Figure 1.3	Caractéristiques I(V) et P(V) d'un générateur photovoltaïque	8
Figure 1.4.a	Influence de l'ensoleillement sur les courbes I-V	9
Figure 1.4.b	Influence de l'ensoleillement sur les courbes P-V	9
Figure 1.5.a	Influence de la température sur les courbes I-V	10
Figure 1.5.b	Influence de la température sur les courbes P-V	10
Figure 1.6.a	Connexion électrique directe entre un générateur PV et une charge	12
Figure 1.6.b	Points de fonctionnements résultant de l'association du générateur PV sous deux niveaux d'éclairiments (E1, E2) avec une charge soit résistive R variable (R1, R2, R3, R4) ou bien d'une batterie (Vb)	12
Figure 1.7	Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P _{MAX} du GPV	13
Figure 1.8	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque à base d'un convertisseur DC contrôlé par une commande MPPT	14
Chapitre 2		
Figure 2.1	Représentation de la sortie d'un commutateur en ouverture/fermeture sur une période	17
Figure 2.2	Circuit électrique idéalisé du convertisseur DC-DC "boost"	18
Figure 2.3	Forme du signal de commande du commutateur S	19
Figure 2.4	Equivalence électrique: Source de courant source de tension	19
Figure 2.5	Interrupteur (Switch) fermé pendant un intervalle de temps dT	21
Figure 2.6	Switch ouvert pendant un intervalle de temps $(1-d)T$	22
Figure 2.7	Variation du courant de l'inducteur I_L en fonction du temps	23
Figure 2.8	Allures de la tension aux bornes de la bobine et le courant qui la traverse pendant une période de conduction T	25
Figure 2.9	Allures de la tension aux bornes de la diode et le courant qui la traverse pendant une période de conduction T	27
Figure 2.10	Courant circulant dans le condensateur d'entrée C_{in}	28

Figure 2.11	Allures des tensions d'entrée et au bornes de la bobine pendant une période de conduction T	29
Figure 2.12	Impédance d'entrée de l'ensemble convertisseur + charge résistive	29
Figure 2.13	Schéma électrique d'un convertisseur "Boost" idéalisé	30
Figure 2.14	Quantité de charge perdue dans le condensateur C_{in} durant une période de commutation T	36
Figure 2.15	Quantité de charge emmagasinée dans le condensateur C_{out} durant une période de commutation T	37
Figure 2.16	Caractéristique P-V d'une cellule PV	38
Figure 2.17	Principe classique d'une méthode MPPT	39
Chapitre 3		
Figure 3.1	Circuit de la conversion	42
Figure 3.2	Subsystem 1	42
Figure 3.3	Circuit dans le Subsystem 2	43
Figure 3.4	Subsystem 2	43
Figure 3.5	Circuit dans le Subsystem 3	44
Figure 3.6	Subsystem 3	44
Figure 3.7	Circuit dans le Subsystem 4	45
Figure 3.8	Subsystem 4	45
Figure 3.9	Circuit dans subsystem 5	45
Figure 3.10	Subsystem 5	46
Figure 3.11	circuit final du panneau BP SX 150	46
Figure 3.12	le model du panneau photovoltaïque BP SX 150	46
Figure 3.13	caractéristique Courant-Tension, Puissance-Tension	47
Figure 3.14	Convertisseur Boost	48
Figure 3.15	caractéristiques d'entrée du convertisseur	49
Figure 3.16	Courant traversant la bobine	49
Figure 3.17	caractéristiques de sortie du convertisseur	50
Figure 3.18	Convertisseur, charge et panneau BP SX 150	50
Figure 3.19	Caractéristiques d'entrée du convertisseur	51
Figure 3.20	Courant traversant la bobine	51
Figure 3.21	Caractéristiques de sortie du convertisseur	52
Figure 3.22	Insolation variable	52
Figure 3.23	Caractéristiques d'entrée du convertisseur	53
Figure 3.24	Caractéristique de sortie du convertisseur	53

Figure 3.25	comparaison de la Tension de sortie avec irradiation et rapport cyclique variables	55
Figure 3.26	Panneau, convertisseur, Charge et MPPT.	56
Figure 3.27	Caractéristiques d'entrée du convertisseur	56
Figure 3.28	Caractéristiques de sortie du convertisseur	57

Chapitre 4

Chapitre 4		
Figure 4.1	Architecture type d'un circuit FPGA	60
Figure 4.2	Input Output Block (IOB)	62
Figure 4.3	Cellule logique (CLB)	63
Figure 4.4	Connexions à usage général et détail d'une matrice de commutation	65
Figure 4.5	Les interconnexions directes.	65
Figure 4.6	Les longues lignes.	66
Figure 4.7	Le bloc SG.	69
Figure 4.8	La limite FPGA.	69
Figure 4.9	Architecture du modèle de convertisseur Boost adoptée dans l'environnement SXG.	71
Figure 4.10	Subsystem 1	72
Figure 4.11	Bloc de l'intégral sous subsystem 1.	72
Figure 4.12	Courant traversant la Bobine.	73
Figure 4.13	Tension de sortie du convertisseur.	73
Figure 4.14	Courant à la sortie du convertisseur.	74
Figure 4.15	Estimation des ressources du convertisseur Boost.	74
Figure 4.16	Architecture du Modèle de convertisseur sur circuit FPGA.	75
Figure 4.17	Schématique du modèle du convertisseur.	76
Figure 4.18	Schématique interne du modèle.	77

Liste des tableaux

Introduction générale		
Tableau 1	Potentiel solaire en Algérie	2
Chapitre 1		
Tableau 1.1	Caractéristiques électriques du panneau BP SX 150 (bpsolar)	11
Chapitre 3		
Tableau 3.1	Paramètres du panneau BP SX 150	42
Tableau 3.2	variation des caractéristiques d'E/S en fonction du rapport cyclique et insolation fixe	54
Tableau 3.3	variation des caractéristiques d'E/S en fonction du rapport cyclique et insolation fixe	54
Tableau 3.4	variation des caractéristiques d'E/S en fonction du rapport cyclique et insolation fixe	55
Chapitre 4		
Tableau 4.1	Table de ressources Boost	75

Chapitre 1 Les systèmes photovoltaïques

1.1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie.

C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante.

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

1.2 Effet photovoltaïque

Le terme «photovoltaïque» vient du Grec et signifie lumière, il est composé de deux parties : «photo» (lumière) et d'un nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt [1].

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés".

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons se transforme ainsi directement en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque [2].

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium (Figure 1.1)

Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

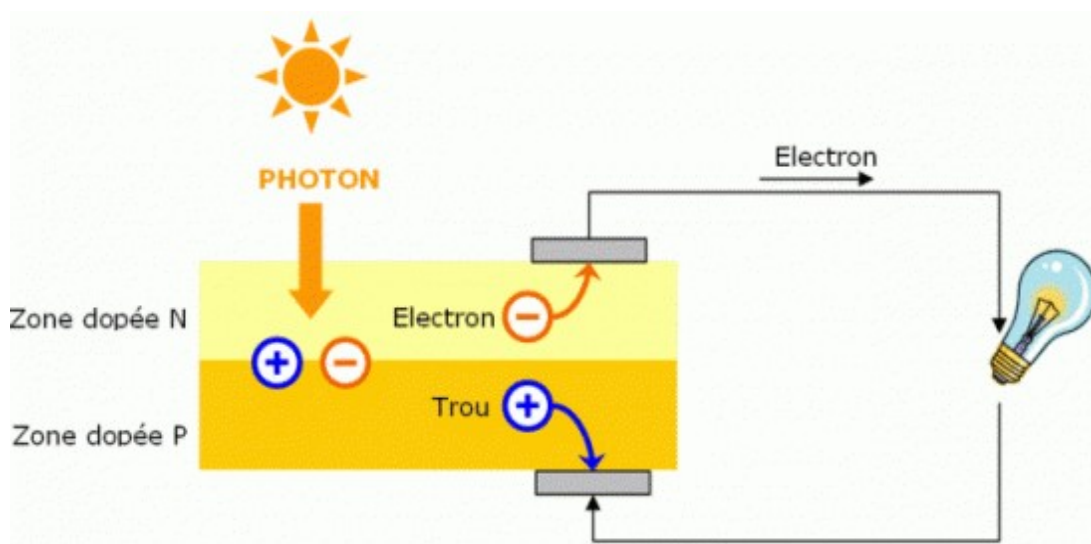


Figure 1- 1 La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique

1.3 Cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », il a été découvert par E. Becquerel en 1839. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants, suite à cette propriété, plusieurs types de cellules photovoltaïques peuvent se distinguer [3]. Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques, dont on peut citer :

- Cellules monocristallines
- Cellules polycristallines
- Cellules amorphes
- Cellules nanocristallines

La figure ci-dessous illustre les différents types de cellules et leurs caractéristiques (rendement, coût et sensibilité aux conditions météorologiques).

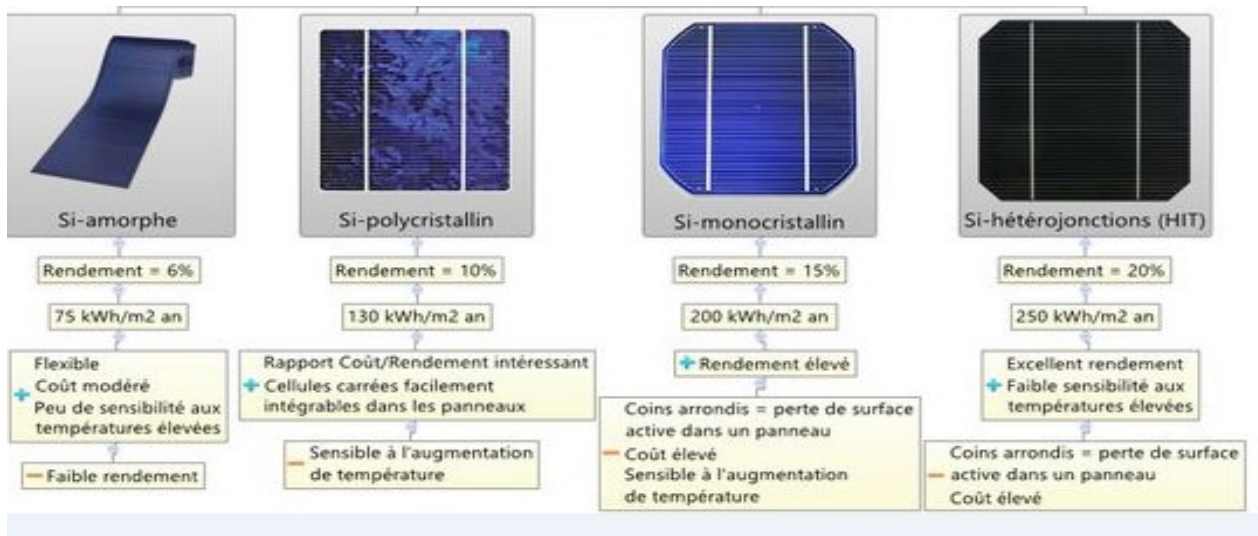


Figure 1- 2 Les différents types de cellules

1.4 Modélisation d'une cellule PV

L'objectif est de trouver un modèle simple et adaptable avec différents modules des constructeurs. Ce modèle doit être modélisé de telle façon que tous les paramètres sont facilement calculés en évitant le plus possible les équations complexes.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques dans la littérature ont été développés, dont le but est l'obtention d'une caractéristique $I(V)$ plus performante et pratique. Ces modèles sont différents entre eux par la procédure et le nombre de paramètres pris en compte.

1.5 Différents modèles électriques de la cellule PV

Il existe plusieurs modèles pour modéliser une cellule photovoltaïque, on peut citer :

- Modèle à sept paramètres (7p)
- Modèle à six paramètres (6p)
- Modèle à cinq paramètres (5p)
- Modèle à quatre paramètres (4p)
- Modèle à trois paramètres (3p)

Le modèle le plus utilisé est le modèle à quatre paramètres.

1.5.1 Modèle à quatre paramètres (4p)

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé, ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendant de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série.

Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique $I(V)$ sont le courant photonique I_{ph} (équation (1.1)), la résistance série R_s , le courant de diode I_D et la tension de sortie V . Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes d'équations $I(V)$ pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants) [4]. La figure électrique équivalente de la cellule PV pour ce modèle est représentée sur la figure (1.3) :

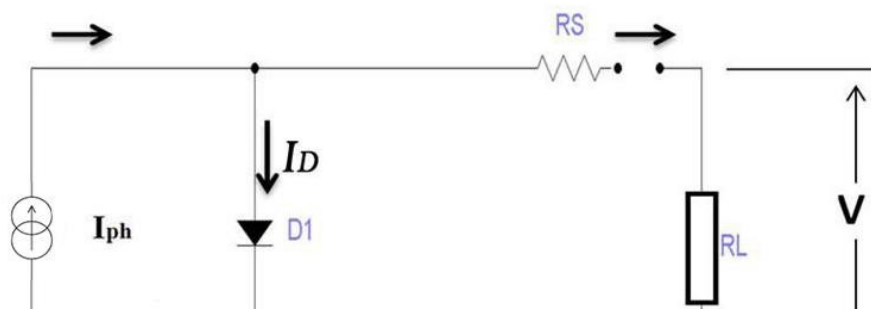


Figure 1- 3 Modèle à 4 paramètres

Les

paramètres decircuitsont:

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_D \quad (1.1)$$

$$I_D = I_0 \left(\exp\left(\frac{q}{\gamma K T c} \times (V + I R_s)\right) - 1 \right) \quad (1.2)$$

Où

IPV :courant de panneau solaire ;

Iph: courant phonique ;

ID : courant de diode ;

I0: courant inversedesaturation ;

q= $1.620.10^{-23}$ C = charge de l'électron ;

γ: facteurdequalité dediode ;

K= $1.38.10^{-23}$ J/K constant de Boltzmann ;

Tc: températuredecellule ;

V : tension desortie ;

IRs: le courant de sortie .

Leremplacementde(1.1)dans(1.2)nousdonnel'expressionducourantélectriqueproduit par lacellule :

$$I = [I_{Ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{q}{\gamma K T c} \times (V + I R_s)\right) - 1 \right)] \quad (1.3)$$

1.6 Résolution del'équation caractéristique I(v)

Lecircuitéquivalentd'uncellulephotovoltaïque est basé sur lemodèleà quatre paramètres, il donne un courant de sortie exprimé par l'équation (1.4) [5] :

$$I_{PV}(i + 1) = I_{PV}(i) - \frac{I_{cc} - I_{PV}(i) - I_0 \left(\exp\left(\frac{V_{PV} + I_{PV}(i) R_s}{V_{t,n}}\right) - 1 \right)}{-1 - I_0 \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \left(\exp\left(\frac{V_{PV} + I_{PV}(i) R_s}{V_{t,n}}\right) \right)} \quad (1.4)$$

Ipv: le courant du panneau solaire ;

I_{cc}: courant de court-circuit;

I₀=courant inverse de saturation ;

V_{pv}: tension de panneau solaire.

1.7 Différents paramètres de la cellule photovoltaïque

Considérons la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque en peut définir les différents paramètres de la cellule que nous nous définissons ci-dessous [4] :

- **Tension de circuit-ouvert (*V_{co}*)**

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

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left[\frac{I_{cc}}{I_s} - 1 \right] \quad (1.5)$$

Ou : T : La température de cellule **K** = 1.38.10⁻²³/KJ;

q = 1.620.10⁻²³C;

I_{cc}: courant de court-circuit;

I_s: courant de sortie

I_{cc}: courant de court-circuit, courant lorsque *V_{pv}* = 0

- **Courant de court-circuit (*I_{cc}*)**

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul. Dans le cas idéal (*R_s* nulle et *R_{sh}* infinie), ce courant se confond avec le photo-courant (*I_{ph}*)

- **Facteur de forme (FF)**

La puissance fournie au circuit extérieure par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement *P_p* (*I_p* et *V_p*) de la courbe courant-tension. Le facteur de forme est le rapport de la puissance maximale et le produit de la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit. Il détermine la qualité électrique de la cellule [5].

$$FF = \frac{P_m}{V_{CO} \cdot I_{CC}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{CO} \cdot I_{CC}} \quad (1.6)$$

Où

P_m ;est lapuissancemaximale ;

V_mest latensionoù la puissance estmaximale ;

I_mest le courant où la puissanceest maximale ;

V_{CO}est la tension de circuitouvert ;

I_{CC}est le courant de court-circuit.

- **Rendement de conversion (η)**

Le rendement delacellulesolaireexpriméenpourcentage,désigne le rendementde conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximal délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incident **P_{inc}**.

$$\eta(\%) = \frac{P_{max}}{P_{inc}} * 100\% \quad (1.7)$$

P_{max} : puissance maximale ;

P_{inc} : la puissance lumineuse incidente.

1.8 Générateur photovoltaïque

LecapteurPVestdécritparsescaractéristiquesélectriqueslecourantenfonctionde la tension(I=f(V))figure(1.3). Cette modélisationestutiliséegénéralementpourapproximer la sortie du capteur (tension,courant)enfonctionde deuxentréesquisontla températureet l'éclairement reçu parle capteurfigure(1.4).

Lecourantgénéréparle module PVà unetensiondonnée dépenduniquementde l'éclairementetde la température de la cellule.A températureet éclairageconstants,le rendementd'unecellulesolairedépenddelachargedansle circuitélectrique.Encircuit ouvert(R_C=∞,I=0, V= V_{OC})ouencourt-circuit(R_C=0,I=I_{CC},V=0),aucuneénergie n'est transmiseà l'extérieur.Entrecesdeuxextrêmes,ilexisteunevaleuroptimaleR_{Opt}dela résistance de chargeR_CpourlaquellelapuissanceP=V_{max}I_{max}fournieparlacellulesolaireà la résistance de chargeest maximale, et vaut P_{max} [3].

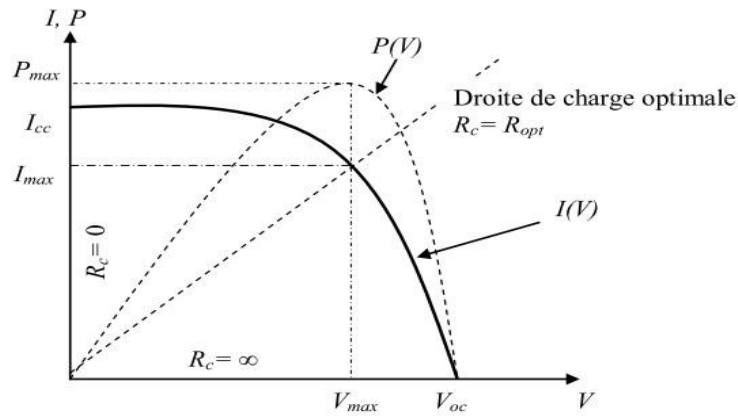


Figure 1- 4 Caractéristiques typiques d'un générateur PV

Le rendement énergétique de la cellule solaire est défini $\eta = p/p\gamma$ ou $p\gamma$ est la puissance lumineuse incidente sur la surface de la cellule. Pour la valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_C , le rendement de la cellule solaire est maximum, $\eta_{max} = p_{max}/p\gamma$ vaut la valeur R_{opt} n'est pas une caractéristique constante pour une cellule donnée, mais dépend du spectre du rayonnement incident et de la température de la jonction.

En effet, le rendement diminue lorsque la température augmente, ce qui conduit parfois à construire des capteurs hybrides résultant de la combinaison d'un capteur thermique et d'une cellule solaire, qui permettent de produire simultanément de l'eau chaude et d'augmenter le rendement photovoltaïque en refroidissant la cellule.

La puissance fournie par la cellule solaire ($P = I \times V$) et son rendement dépendent du matériau utilisé et de la technologie de fabrication (silicium amorphe, silicium polycristallin, silicium monocristallin), de la géométrie de la jonction (épaisseur des couches, multicouches, etc.) et des paramètres extérieurs (température, spectre et puissance du rayonnement incident et du circuit électrique extérieur connecté à la cellule, etc.).



Figure 1- 5 Schéma bloc de générateur PV

1.9 Caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque

Le panneau solaire photovoltaïque étant une association de cellules solaires individuelles, sa caractéristique $I(v)$ est directement liée à la caractéristique de la cellule solaire de base. De même que pour la cellule, la tension qui est présente lorsqu'il ne circule aucun courant est appelée tension en circuit ouvert (V_{oc}). À l'opposé, le courant présent lorsqu'il n'y a aucune tension est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) (Figure 1.5).

Dans ces deux situations, aucune puissance n'est extraite du panneau photovoltaïque. La meilleure combinaison des deux situations précédentes donne la puissance maximale du panneau, elle correspond à un point dit point de puissance maximale du panneau solaire photovoltaïque. La tension et le courant correspondants sont appelés tension à puissance maximale (V_{pmax}) et courant à puissance maximale (I_{pmax}). Le point de puissance maximale sert à déterminer le rendement nominal du panneau solaire et la puissance en ce point est exprimée en Wc (Watt crête)

Le courant solaire généré alors est donc forcément différent de I_{pmax} et la puissance solaire extraite du panneau photovoltaïque n'est pas égale à la puissance maximale. Ceci est toujours vrai, même si l'ensoleillement est de 1000 W/m^2 et la température des cellules de 25°C .

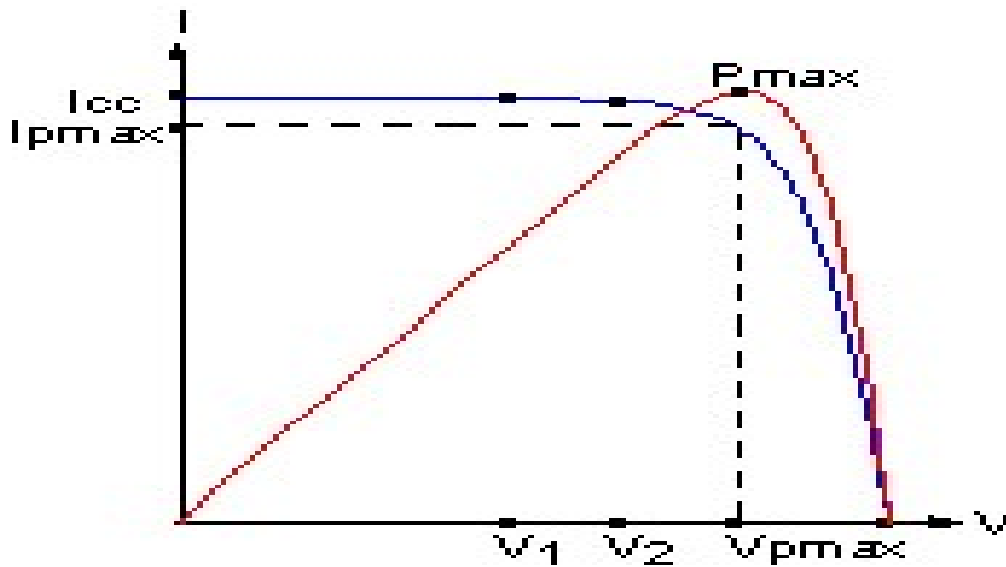


Figure 1- 6: Caractéristiques I(V) et P(V) d'un générateur photovoltaïque

1.10 L'influence des conditions météorologiques sur les cellules

1.10.1 L'influence de la température

Le courant de saturation inverse de la diode varie en fonction cubique de la température et il peut être exprimé comme suit :

$$I_s(T) = I_s \left(\frac{T}{T_{nom}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{T}{T_{nom}} - 1 \right) \frac{E_g}{NV_t} \right] \quad (1.8)$$

Ou : I_s : le courant de saturation inverse de la diode ;

T_{nom} : la température nominale ;

E_g : l'énergie de gap de semi-conducteur ;

V_t : la tension thermique donné par :

$$V_t = \frac{KT}{q} \quad (1.9)$$

En général, pour un rayonnement solaire donné, lorsque la température de la cellule augmente, la tension en circuit ouvert V_{oc} , diminue légèrement, tandis que les courant en court-circuit augmente.

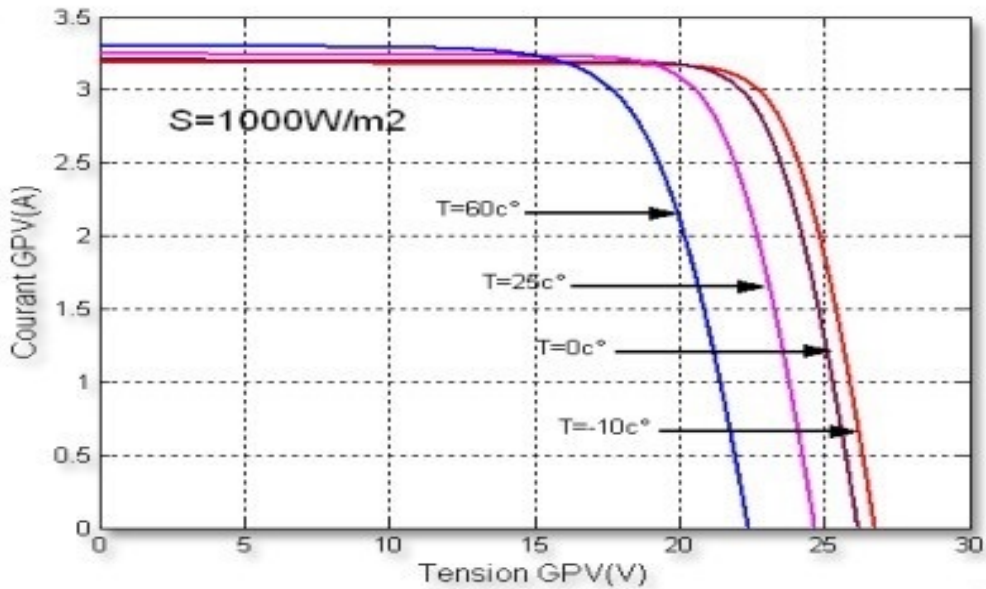


Figure 1- 7 Influence de la température sur la courbe I-V de panneau.

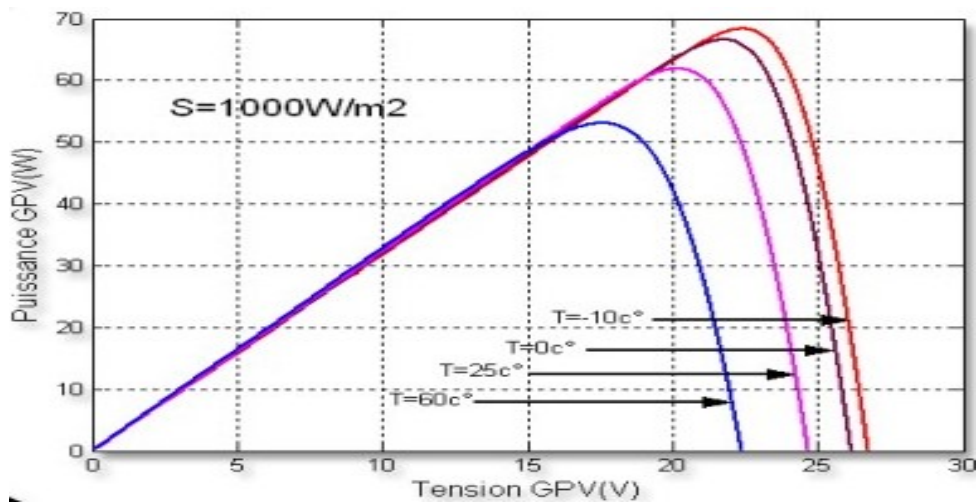


Figure 1- 8 Influence de la température sur la courbe P-V de panneau

1.10.2 L'influence de l'ensoleillement

Les courbes d'une cellule solaire photovoltaïque sont très dépendants des valeurs de rayonnement solaire. Plus le rayonnement solaire est important, plus l'ensoleillement incident sur la surface du panneau sera élevé et par conséquent l'amplitude de la puissance sera augmentée pour la même valeur de tension. Avec l'augmentation de l'irradiation solaire, la

tension de circuit ouvert aussi augmente légèrement. Cela est dû au fait que, lorsque plus d'incidents de soleil sur la cellule solaire, les électrons sont alimentés en énergie d'excitation plus élevée, ce qui augmente la mobilité des électrons et donc plus de puissance est générée.

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - 298)] \frac{\beta}{1000} \tag{1.10}$$

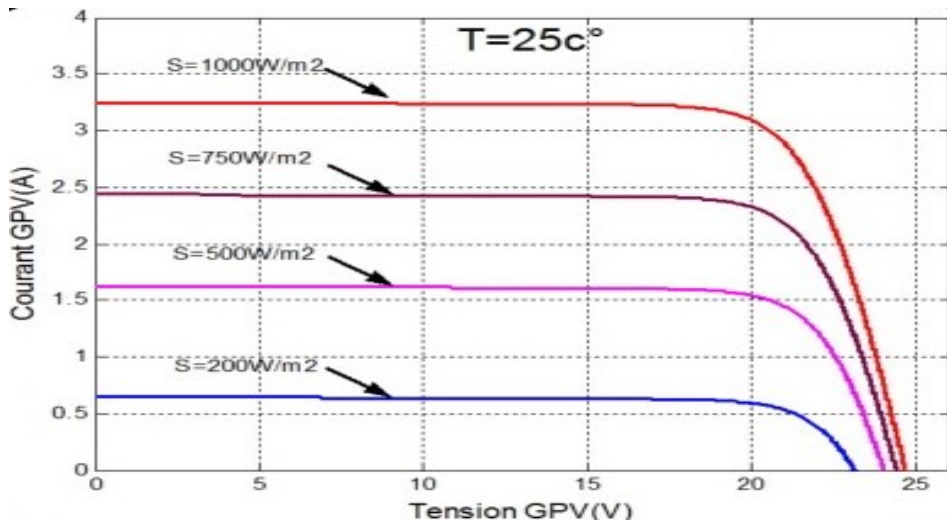


Figure 1- 9 Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V de panneau

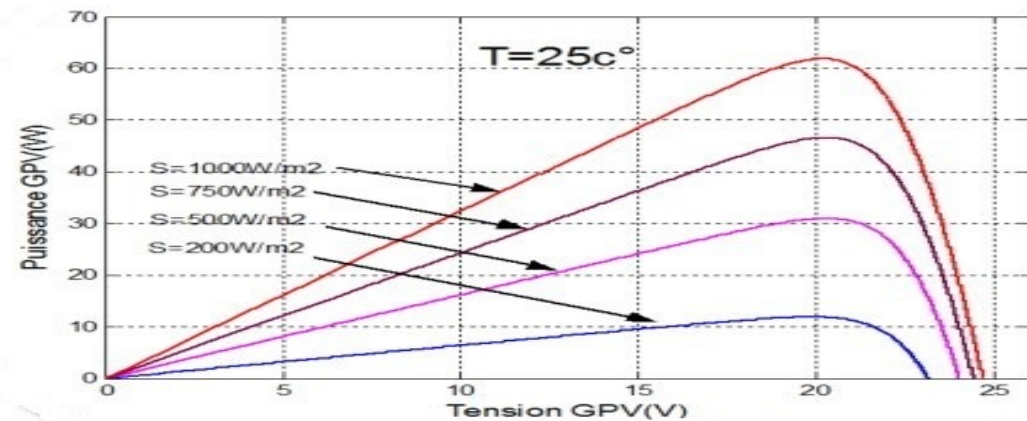


Figure 1- 10 Influence de l'ensoleillement sur la courbe P-V de panneau

1.11 Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge

Un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autres du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très

fortécartentre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure 1.11. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{MAX} disponible.

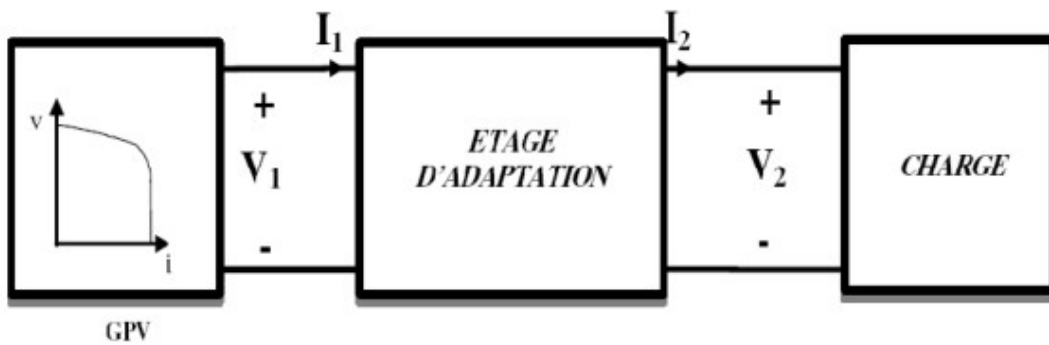


Figure 1- 11 Etage d'adaptation entre GPV et la charge

Ce dernier par le biais d'une commande spécifique est alors susceptible de permettre au générateur de délivrer sa puissance maximale notée P_{max} ($P_{max} = I_{opt} * V_{opt}$ où I_{opt} et V_{opt} représentent respectivement les tensions et courants optimaux du générateur PV pour une courbe $I(V)$ donnée) tout en assurant que la tension ou bien le courant de la charge correspond bien aux caractéristiques de cette dernière.

Pour que le générateur PV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge

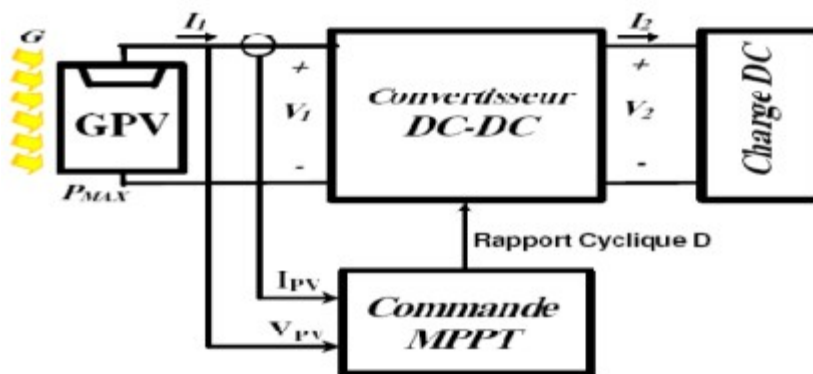


Figure 1-12 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque à base d'un convertisseur DC contrôlé par une commande MPPT

La figure (1.12) montre le schéma de principe décrivant les fonctions présentes dans un étage d'adaptation pour GPV réel conçu. Le principe de la commande MPPT délivre l'action de contrôle appropriée afin de suivre le point de puissance maximale en chaque instant.

Le choix de la structure de conversion est effectué en fonction de la charge DC à alimenter. Nous avons besoin de structures de conversion survoltrice ou dévoltrice en fonction de la caractéristique de cette charge. Par exemple, si nous supposons que la charge est une batterie au plomb, ce sont ses plages de tension de charge et de décharge qui vont établir la structure la plus adéquate.

1.12 Les composants d'un système photovoltaïque

Les composants d'un systèmes photovoltaïques dépendent du type d'application : en site isolé les principaux composant sont :

- Panneaux photovoltaïques (+ structure de support)
- Chargeur/régulateur DC/DC
- Système de stockage (batteries, condensateurs, ...)
- Eventuellement un onduleur si la consommation est alimentée en courant alternatif.
- Eventuellement un groupe électrogène en appoint

En système photovoltaïque connecté au réseau les principaux composants sont :

- Panneaux photovoltaïques (+ structure de support)
- Coffret de coupure et de protection courant continu DC
- Les Onduleurs.
- Coffret de coupure et de protection courant alternatif AC

La structure de support peut-être un élément très important en cas d'intégration au bâtiment.

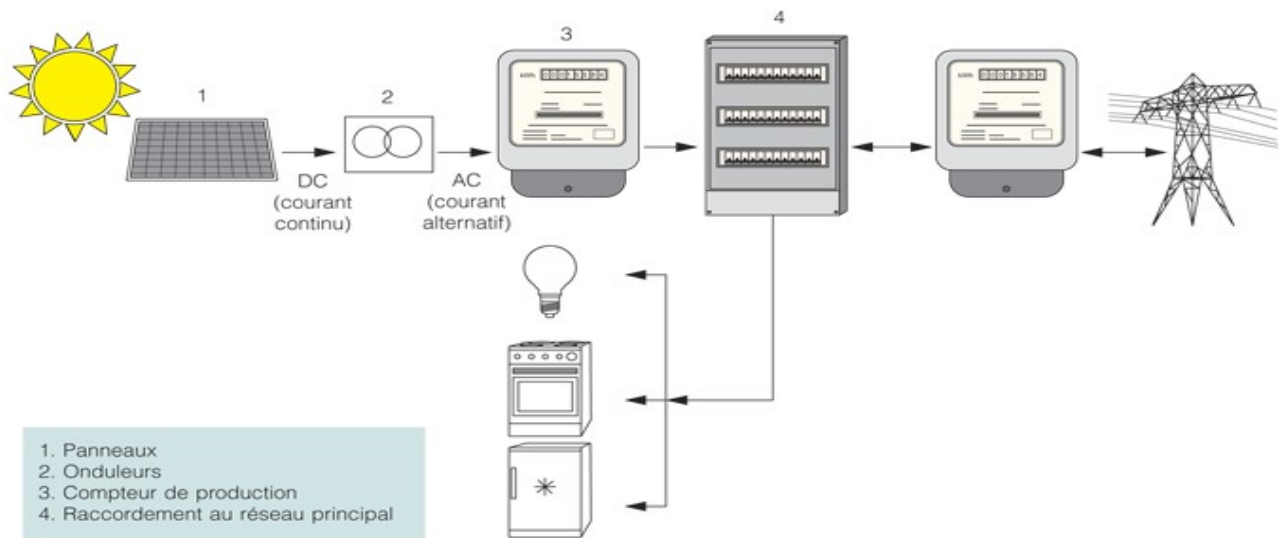


Figure 1- 13 les composants d'un système Photovoltaïque

1.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur l'effet photovoltaïque, nous avons aussi présenté le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs différents modèles. La modélisation des cellules photovoltaïques est ainsi présentée. Dans le chapitre suivant, nous allons procéder aux convertisseurs DC/DC.

Chapitre 2 Les convertisseurs DC/DC

2.1 Introduction

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Dans cette partie le principe de fonctionnement des hacheurs sera présenté. Ces convertisseurs de type continu-continu, dont le rôle primordial est de transformer une puissance d'entrée $P_{in} = V_{in}I_{in}$ en une puissance de sortie $P_{out} = V_{out}I_{out}$ avec ($V_{out} \neq V_{in}$) avec un rendement de conversion

$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out}I_{out}}{V_{in}I_{in}}$ élevé (proche de l'unité). En effet, contrairement aux alimentations classiques (linéaires) qui utilisent un transistor qui dissipe une puissance $(V_{in} - V_{out})I_{out}$, les alimentations à découpage mettent en œuvre un commutateur qui travaille en tout ou rien. [9]

Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances 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. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET connu par sa faible résistance drain source, quelques milliwatts à quelques Watt.

Pendant le fonctionnement de l'hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s allant de dizaine de kilohertz jusqu'à des centaines de kilohertz voire mégahertz avec un temps de fermeture égal à $(d \cdot T_s)$ et un temps d'ouverture égal à $((1 - d) \cdot T_s)$ Où :

- ❖ T_s Est la période de commutation qui est égale à $1/f_s$.
- ❖ d Est le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$). (Figure 2.1)

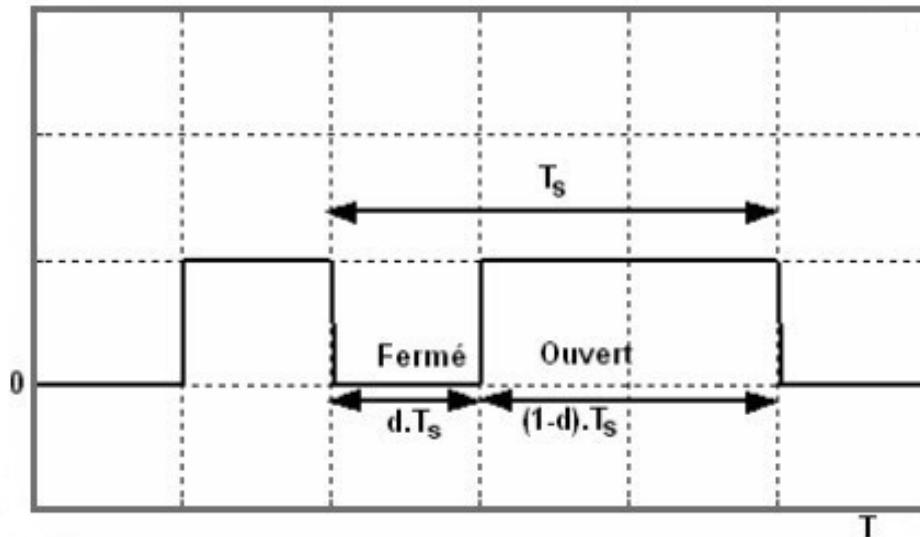


Figure 2- 1 Représentation de la sortie d'un commutateur en ouverture/fermeture sur une période.

2.2 Type de convertisseurs

Il y a différents types de convertisseurs DC-DC. Une première distinction est à faire entre le convertisseur à isolement galvanique entre la sortie et l'entrée, et le convertisseur qui présente une borne commune entre l'entrée et la sortie (Notez que dans le cas de l'isolement galvanique le rendement se verra affecté d'au moins 10%, ce qui est inadmissible dans le cas par exemple des applications en énergie photovoltaïque). [9]

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

- ❖ Les éleveurs (BOOST) dans lesquels $V_{out} > V_{in}$.
- ❖ Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_{out} < V_{in}$.
- ❖ Il y a aussi un type (BUCK-BOOST) : mélange entre les deux précédents qui comporte plusieurs topologies comme le BUCK-BOOST classique, le FLYBACK, SEPIC, et le FORWARD...

Dans notre étude, nous nous intéressons plus particulièrement au hacheur « BOOST » son étude sera présentée dans le paragraphe suivant :

2.3 Etude du fonctionnement de l'hacheur survolteur (Boost)

2.3.1 Etude de fonctionnement

Le schéma de principe d'un hacheur Boost est donné par la figure 2.2. Cette structure est composée principalement d'une inductance L et d'interrupteur T qui est généralement un MOSFET et une diode D rapide.

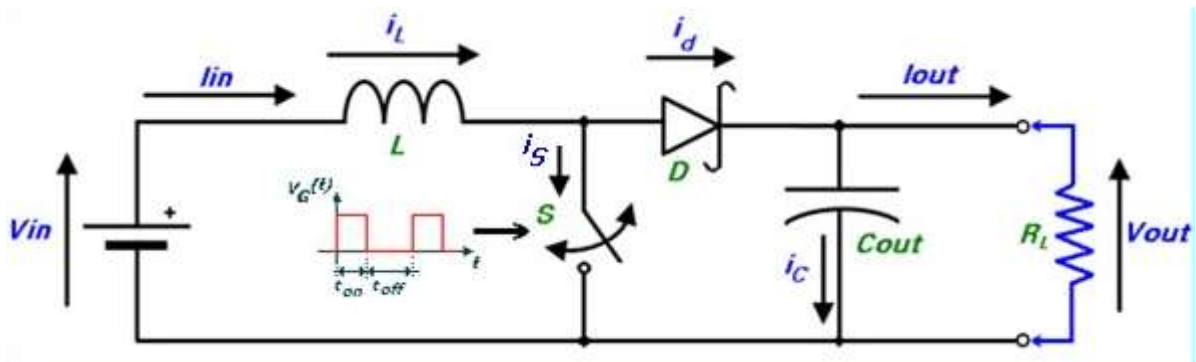


Figure 2- 2Circuit électrique idéalisé du convertisseur DC-DC "Boost".

Ici, le commutateur S , qui est souvent un transistor MOSFET, est actionné via un signal de commande de forme rectangulaire à la fréquence de commutation :

$$f_s = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

T : étant la période du signal de commande.

Le rapport cyclique d défini comme étant le rapport de fermeture du commutateur t_{on} et la somme $T = t_{on} + t_{off}$ des temps de fermeture et d'ouverture de ce commutateur :

$$d = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.2)$$

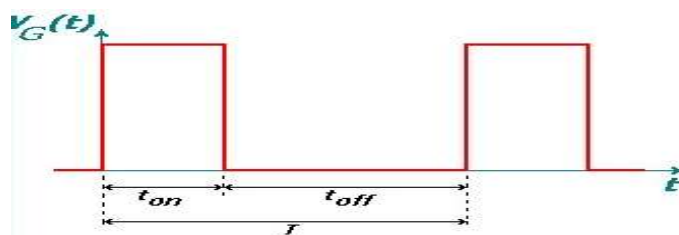


Figure 2- 3 Forme du signal de commande du commutateur S

Nous citons ici une caractéristique technique importante, le panneau photovoltaïque connecté à un convertisseur DC-DC, qui est la source de tension continue connectée à l'entrée (V_{in}) du convertisseur DC/DC, est en réalité équivalente à une source de courant, qui est d'ailleurs une modélisation la plus représentative d'un panneau photovoltaïque, à laquelle on connecte souvent en parallèle un condensateur de grande valeur. Ceci profite de la propriété intrinsèque du condensateur qui stipule que la tension à travers un condensateur ne peut pas changer instantanément. C'est ce qui justifie l'approximation suivante dans les analyses abordées lors de ce chapitre. [10]

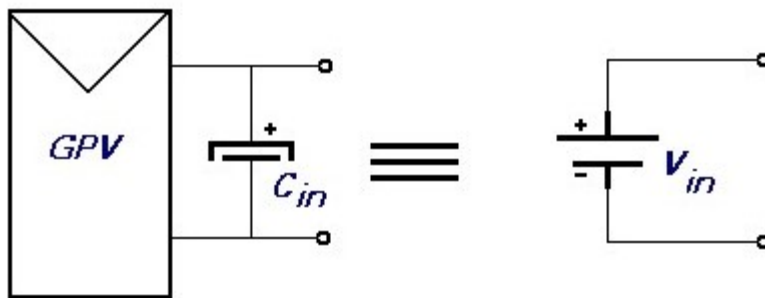


Figure 2- 4 Equivalence électrique : Source de courant source de tension.

D'une manière générale, les convertisseurs DC/DC y compris le Boost, fonctionnent selon deux modes différents : Un mode de conduction continue (MCC), dont le courant de la bobine ne s'annule jamais. C'est un mode souvent utilisé pour la conversion efficace de puissance. Il est ajouté à celui-ci le mode de conduction discontinu (MCD), cette discontinuité est due au fait que le courant circulant dans la bobine s'annule durant des intervalles de temps réguliers. Ce dernier mode est utilisé dans le transfert de faible puissance. Dans ce qui suit, l'analyse électrique ainsi que le dimensionnement de chaque composant du convertisseur sera dicté par le choix de faire fonctionner le convertisseur "Boost" en mode de conduction continue (MCC), sur la plage de fonctionnement la plus grande que possible. Dans ce mode de fonctionnement, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée partiellement à la charge et le courant dans celle-ci ne s'annule jamais.

Avant d'entamer la phase d'analyse et de modélisation du convertisseur *DC-DC* considéré, on doit tout d'abord signaler que nos raisonnements ont été effectués tout en respectant les suppositions suivantes :

- On admet que les éléments de commutation (transistor MOSFET et diode) du convertisseur sont idéaux.
- La résistance équivalente série (*ESR*) des condensateurs utilisés et les capacités parasites sont négligés.
- On suppose également que les composants passifs du convertisseur (*R*, *L*, *C*) sont linéaires, invariables dans le temps et indépendants de la fréquence.
- Le courant ne s'annule jamais dans l'inducteur.

Pour le convertisseur de type "Boost", en utilisant la théorie d'analyse de circuits électrique simple, nous pouvons facilement établir les relations fondamentales entre les différentes grandeurs électriques mis en jeux.

2.3.2 Analyse électrique

Expression du courant de la bobine

- Courant moyen :

En fonctionnement normal, le circuit est en "conduction continue", I_L n'est jamais nul. Conformément aux suppositions, citées en haut, le circuit est supposé être sans pertes électriques (idéalisé avec un rendement de 100 %), ce qui nous permet d'écrire :

$$P_{in}=P_{out} \left(\eta = 100 \%, \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (2.3)$$

$$D'où \quad V_{in} \cdot I_{Lmoy} = I_{out} \cdot V_{out} \quad (2.4) \text{ Avec : } I_{Lmoy} = I_{in}$$

- Courant instantané :

En supposant qu'on est en mode de conduction continue (MCC), le circuit peut être décomposé en deux topologies distinctes, selon l'état du switch (**S**) durant une période "**T**" du signal de commande : soit l'interrupteur fermé ou l'interrupteur ouvert.

Voir figures ci-dessous.

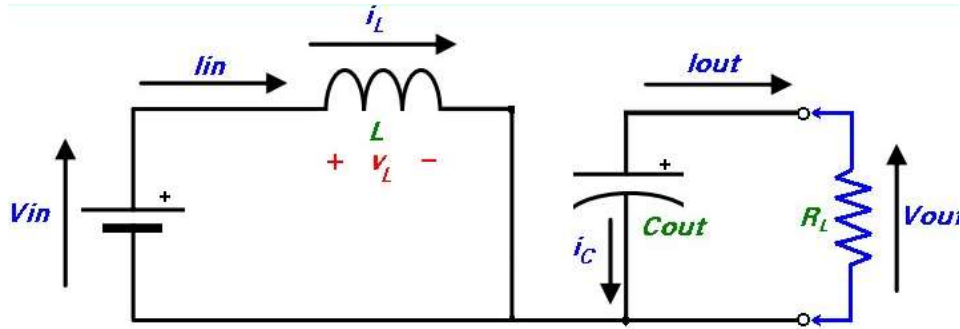


Figure 2- 5 Interrupteur (Switch) fermé pendant un intervalle de temps dT .

Pour $0 \leq t \leq dT$ ou $(0 \leq t \leq t_{on})$: phase d'accumulation d'énergie, l'interrupteur "S" est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de la source, dans ce cas I_L augmente à un taux de :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{in}}{L} \quad (2.5)$$

En intégrant les deux parties de l'égalité, on trouve que :

$$I_{L1}(t) = \frac{V_{in}}{L} t + I_{Lmin} \quad (2.6)$$

On voit bien qu'il (t) a une pente positive, ce qui prouve que durant cette phase l'inducteur se charge.

À la fin de l'état passant, le courant I_L a augmenté de :

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{dT} dI_L = \int_0^{dT} \frac{V_{in} dt}{L} = \frac{V_{in} \cdot d \cdot T}{L} \quad (2.7)$$

Comme définit en haut, d étant le rapport cyclique. Il représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur "S" conduit. Il est compris entre 0 ("S" ne conduit jamais) et 1 ("S" conduit tout le temps).

- Pour $dT \leq t \leq (1 - d) T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre.

L'interrupteur "S" est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec la source d'énergie. Sa f.e.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traverse l'inductance, la

diode D, le condensateur C et enfin la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité, qui va fixer la tension de sortie. Le circuit électrique équivalent dans ce cas est donné par la figure (2.6).

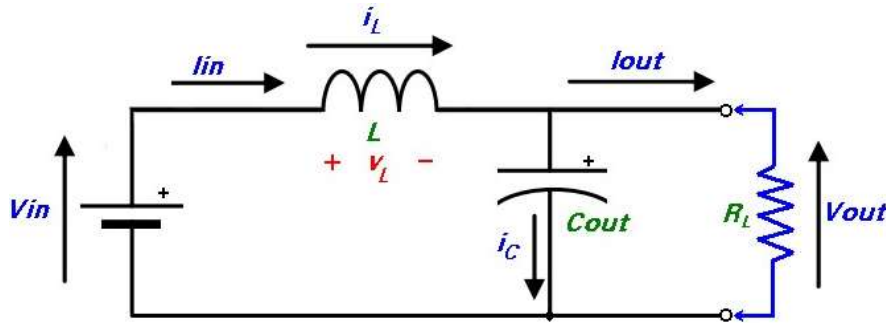


Figure 2- 6 Switch ouvert pendant un intervalle de temps $(1-d) T$.

Dans ce cas, Il diminue avec un taux de :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{in}-V_{out}}{L} \quad (2.8)$$

En intégrant les deux parties de l'égalité, on trouve que :

$$I_{L2}(t) = \frac{(V_{in}-V_{out})}{L} t + I_{Lmax} \quad (2.9)$$

Dans le cas d'un convertisseur DC/DC "Boost" l'inégalité : $V_{out} \geq V_{in}$ est toujours vérifiée. Donc, dans ce cas $I_L(t)$ a une pente négative, ce qui prouve que durant cette phase la self se décharge. La variation d'IL durant cet état bloqué est :

$$\Delta I_{Loff} = \int_{dT}^{(1-d)T} dI_L = \int_{dT}^{(1-d)T} \frac{(V_{in}-V_{out})}{L} dt = \frac{(V_{in}-V_{out})(1-d)T}{V} \quad (2.10)$$

On remarque que durant les deux phases de conduction (selon que le commutateur "S" est fermé ou ouvert) I_L oscille (augmente puis diminue) dans une bande de largeur ΔI_L autour d'une valeur moyenne $I_{Lmoy} = I_{in}$. Voir figure (2.7) ci-dessous.

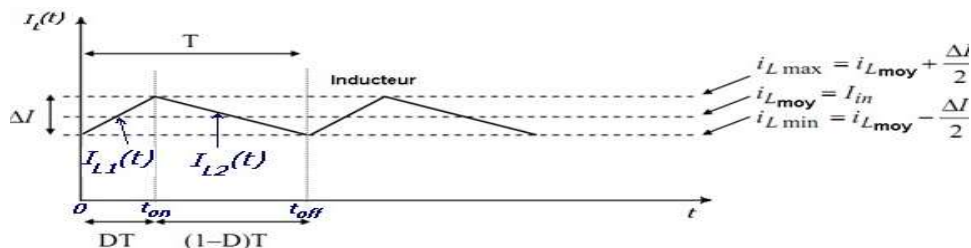


Figure 2- 7 Variation du courant de l'inducteur I_L en fonction du temps.

A travers la courbe d'évolution de $I_L(t)$, on voit bien que pour garantir un fonctionnement en mode de conduction continu, un courant d'inducteur non nul, il faut toujours respecter la condition suivante :

$$i_{Lmin} \geq 0 \quad (2.11)$$

Ce qui est équivalent à :

$$I_{in} \geq \frac{\Delta I_L}{2} \quad (2.12)$$

- Fonction de transfert (Gain) du convertisseur DC/DC

En considérant que le régime permanent est atteint, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_L^2 \quad (2.13)$$

En conséquence, le courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Il devient donc:

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = 0 \quad (2.14)$$

Soit:

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = \frac{V_{in} \cdot d \cdot T}{L} + \frac{(V_{in} - V_{out})(1-d)T}{L} = 0 \quad (2.15)$$

Après simplifications, nous pouvons réécrire cette équation de la façon suivante:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{(1-d)} \quad (2.16)$$

Ce qui donne la valeur moyenne de la tension de sortie V_{out} .

Et puisque par hypothèse, on avait: $P_{in} = P_{out}$ (2.17)

Nous aurons également: $I_{out} = (1 - d) \cdot I_{in}$ (2.18)

Dans le cas où: le rendement énergétique de l'étage est : $\eta \neq 1$, chose qui est trop proche de la réalité pratique. Nous pourrions également écrire:

$$V_{out} = \eta \cdot \frac{V_{in}}{(1-d)} \quad (2.19)$$

et
$$I_{out} = \eta \cdot (1 - d) \cdot I_{in} \quad (2.20)$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1), elle augmente avec d et que théoriquement elle peut être infinie lorsque d se rapproche de 1.

Les figures ci-dessous (figure (2.8)) représentent l'allure des principaux signaux dans le convertisseur en mode de fonctionnement MCC.

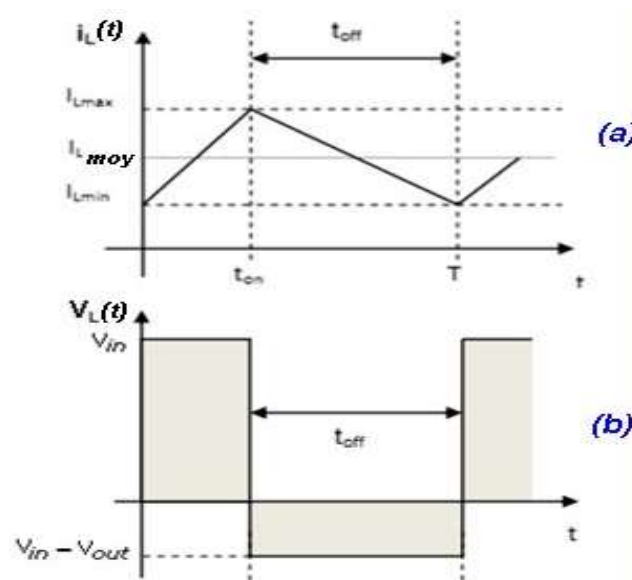


Figure 2- 8 Allures de la tension aux bornes de la bobine et le courant qui la traverse pendant

- **Courant circulant dans les éléments semi-conducteurs :**
- Courant dans la Diode (D)
- Pour $0 \leq t \leq dT$ ou $(0 \leq t \leq t_{on})$: phase d'accumulation d'énergie.

Dans cette phase, le switch "S" est fermé et conformément au schéma électrique de la figure (2.5), la diode est polarisée en sens inverse: le courant moyen la traversant est nul.

$$I_D(t) = 0 \quad (2.21)$$

- Pour $dT \leq t \leq (1 - d)T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre.

Conformément au schéma électrique de la figure (2.6) et selon la loi des mailles, nous avons:

$$I_D(t) = I_{L2}(t) = \frac{(V_{in} - V_{out})}{L} t + I_{LMAX} \quad (2.22)$$

- Courant dans le switch "S"

- Pour $0 \leq t \leq dT$ ou $(0 \leq t \leq t_{on})$: phase d'accumulation d'énergie

En suivant le même raisonnement que le précédent, et si on admet La résistance de commutation R_{DS_on} est nulle, nous avons :

$$I_S(t) = I_{L1}(t) = \frac{V_{in}}{L} t + I_{Lmin} \quad (2.23)$$

Pour $dT \leq t \leq (1 - d)T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre.

Le switch "S" est ouvert et si on maintient la supposition : La résistance de commutation R_{DS_off} est infinie, donc :

$$I_S(t) = 0 \quad (2.24)$$

- Courant dans le condensateur de sortie C_{out}

Pour $0 \leq t \leq dT$ ou $(0 \leq t \leq t_{on})$: phase d'accumulation d'énergie.

En se référant au schéma de la figure (2.5), on voit bien que la diode est non conductrice, le condensateur mis en parallèle avec la charge R_L alimente celle-ci, en se déchargeant, avec un courant constant I_{out} et dont l'expression est donnée par:

$$I_{out}(t) = \frac{V_{out}}{R_L} = cste \quad (2.25)$$

donc:

$$I_{Cout}(t) = I_{out}(t) = \frac{V_{out}}{R_L} = cste \quad (2.26)$$

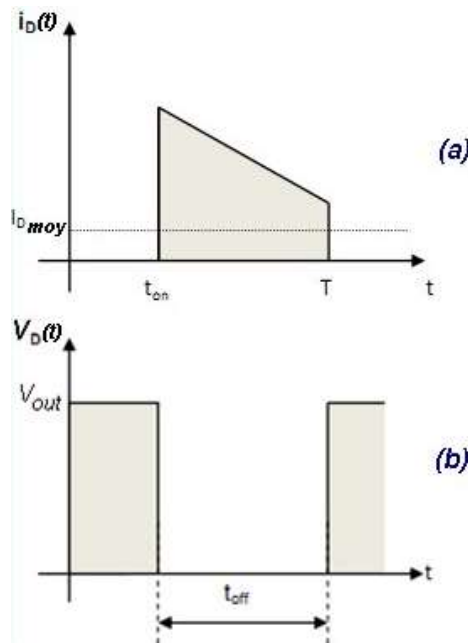


Figure 2-9 Allures de la tension aux bornes de la diode et le courant qui la traverse pendant une période de conduction T

Pour $dT \leq t \leq (1-d)T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre.

Le condensateur est connecté à la source, via la bobine L , selon la loi des nœuds, nous avons:

$$I_{Cout}(t) = I_{L2}(t) - I_{out} \quad (2.27)$$

d'où:

$$I_{Cout}(t) = \frac{(V_{in} - V_{out})}{L} t + I_{LMAX} - V_{out}/R_L \quad (2.28)$$

L'allure du courant circulant dans le condensateur C_{out} est illustrée dans la figure (2.11.c).

On note également par ici que seule la composante variable de $I_L(t)$ passe à travers C_{out} , l'autre composante, la composante continue sera directement transférée à la charge. Et selon le principe d'équilibre de la charge d'un condensateur au cours d'une période de commutation, le courant moyen circulant dans le condensateur est nul.

- Courant dans le condensateur d'entrée C_{in}

Pour $0 \leq t \leq dT$ ou $(0 \leq t \leq t_{on})$: phase d'accumulation d'énergie.

Vu que C_{in} est placé en aval du switch "S", alors, lors de tous les intervalles de commutation l'expression mathématique qui donne la valeur de $I_{cin}(t)$ sera toujours la même. En appliquant la loi des nœuds au schéma de la figure (2.10) on a:

$$I_{Cin}(t) = I_{in} - I_{L1}(t) = I_{Lmoy} - I_{L1}(t) \quad (2.29)$$

Pour $dT \leq t \leq (1-d)T$ ou $(t_{on} \leq t \leq t_{off})$: phase de roue libre.

En suivant le même raisonnement que celui adopté pour l'intervalle t_{on} , on a:

$$I_{Cin}(t) = I_{in} - I_{L2}(t) = I_{Lmoy} - I_{L2}(t) \quad (2.30)$$

L'allure du courant circulant dans le condensateur C_{in} est illustrée dans la figure (2.11.b).

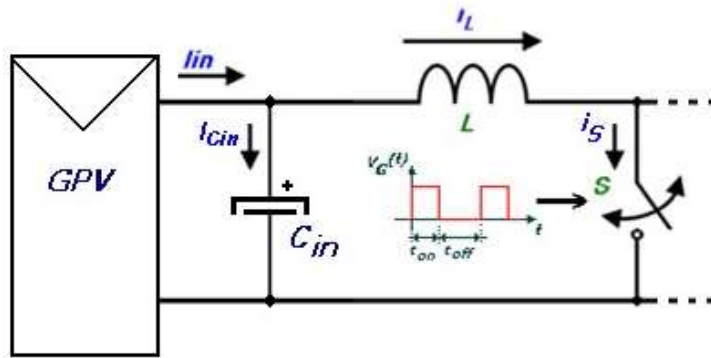


Figure 2- 10 Courant circulant dans le condensateur d'entrée C_{in} .

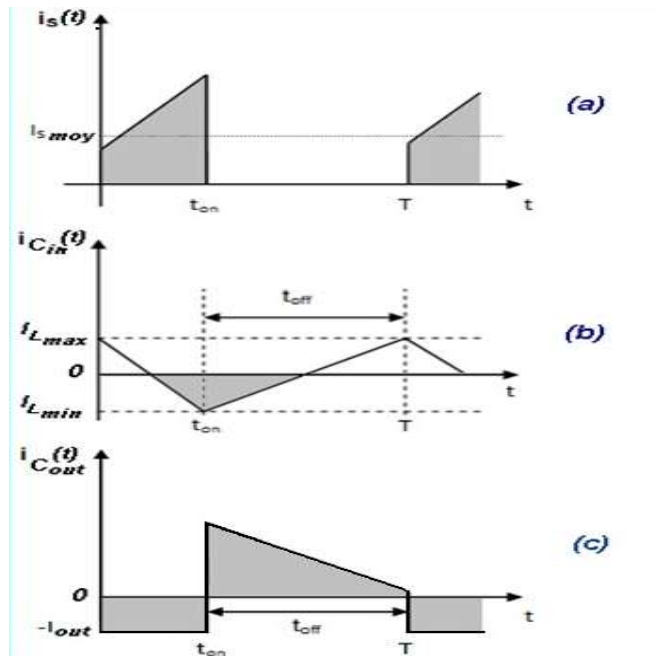


Figure 2- 11 Allures des tensions d'entrée et aux bornes de la bobine pendant une période de conduction T

- Expression et évolution de l'impédance d'entrée R_{IN}

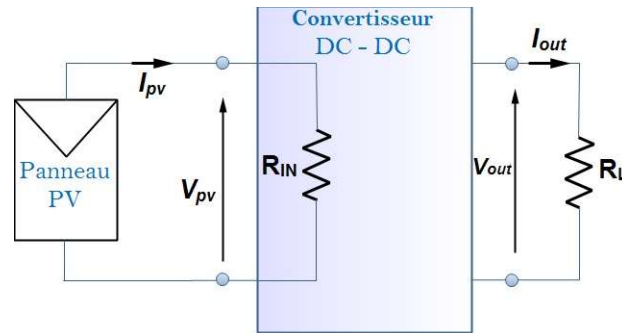


Figure 2- 12 Impédance d'entrée de l'ensemble convertisseur + charge résistive.

D'après le schéma de la figure (2.12), on a:

$$R_{IN} = \frac{V_{PV}}{I_{PV}} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \quad (2.31)$$

Et

$$R_L = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (2.32)$$

En remplaçant V_{in} et I_{in} dans (2.29) par leurs expressions dans les équations (2.16) et (2.18) on trouve:

$$R_{IN} = \frac{(1-d)^2 \cdot V_{out}}{I_{out}} \quad (2.33)$$

D étant le rapport cyclique du signal de commande du switch " S ".

Ce qui donne par la fin: $R_{IN} = (1 - d)^2 \cdot R_L \quad (2.34)$

2.4 Dimensionnement des composants électroniques

Pendant toutes les étapes de dimensionnement, on se référera toujours au schéma électrique d'un convertisseur "Boost" idéalisé dressé dans la figure (2.13). La seule différence avec celui de la figure (2.2), utilisé lors de la phase de l'étude théorique, c'est qu'ici le switch " S " est remplacé par un transistor MOSFET jouant ainsi le rôle du commutateur électronique commandé par un signal rectangulaire, périodique à rapport cyclique variable conformément à la technique PWM (Pulse Wit Modulation).

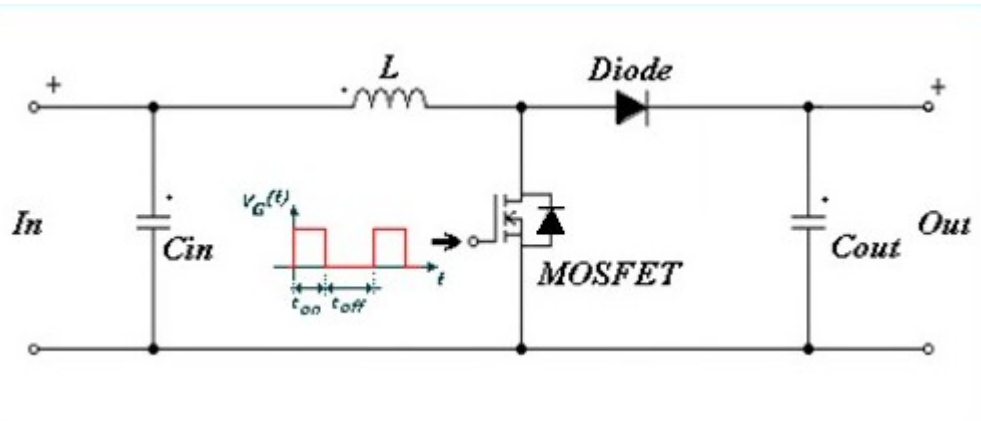


Figure 2- 13 . Schéma électrique d'un convertisseur "Boost" idéalisé

Avant d'entamer la tâche de dimensionnement des différents constituants du convertisseur, il est tout d'abord important de déterminer les spécifications du système global. Pour notre cas, de telles spécification englobe, entre autres, les caractéristiques techniques du panneau à utiliser, la gamme de variation de la tension d'entrée, tension de sortie, courant de charge, tension d'ondulation de sortie, le type et la valeur de la charge DC, la fréquence du signal de commande, ... etc. D'autres spécifications typiques liées à l'espace restreint et à l'aisance du transfert thermique sont aussi à prendre en considération en phase de réalisation pratique. Alors, commençons par :

2.4.1 Les caractéristiques du panneau photovoltaïque Siemens SM-50

Le modèle équivalent offre un bon compromis entre simplicité et précision, il a été utilisé par plusieurs auteurs, avec parfois des simplifications, mais toujours avec la structure de base composée d'une source de courant et une diode en parallèle.

Dans notre étude nous avons opté pour panneau solaire Siemens **SM-50** vu ses caractéristiques qui convient notre application et sa disponibilité sur le marché national. Cas caractéristiques électriques et mécaniques sont données par le constructeur te résumées dans le tableau suivant :

Modelé de panneau	SM-50
Tension Nominal	12V
Puissance Maximale (1)	50W
Puissance maximale (2)	45W
Courant a la puissance maximale	3.0A
Tension a la puissance maximale	16.6V
Courant maximal (sortie en court- circuit)	3A
Tension maximale (sortie ouverte)	21.4V
Température nominale de travail	45°C
Variation d'intensité avec la température	+1.2mA /°C
Pression maximale de système	2400N/m²
Résistance à la grêle (25 mm de diamètre)	23m/s
Cellules en série	36
Dimensions	1292*329*34mm

2.4.2 La charge DC

Dans le but de maintenir la tension de sortie V_{out} dans un état constant, la charge DC (la résistance R_L) qu'on a l'intention de connecter à la sortie du convertisseur doit être capable de

consommer toute la puissance générée par le panneau photovoltaïque. Ceci est équivalent à dire que sa valeur (en Ohms) doit impérativement satisfaire l'inégalité suivante :

$$(V_{out})^2/R_L > P_{max} \quad (2.35)$$

Ce qui est équivalent à :

$$R_L < (V_{out}^2/P_{max}) \quad (2.36)$$

Avec :

P_{max} : Puissance maximale que peut fournir le panneau photovoltaïque utilisé ≈ 150 W. A travers cette dernière équation, on voit bien que pour déterminer R_L il faut tout d'abord fixer V_{out} , P_{max} étant une entité entièrement connue dans notre application. Mais selon l'équation (2.16), V_{out} dépend directement de la valeur du rapport cyclique du signal de commande et de V_{in} . Or dans les applications photovoltaïques, V_{in} varie énormément en fonction des conditions de quelques paramètres climatiques qui entourent l'installation, ce qui implique une variation correspondante du rapport cyclique d pour que la commande MPPT arrive à poursuivre les points de puissance maximales qui en résultent. D'ici, il apparait nécessaire de faire une analyse préliminaire des caractéristiques des connexions électriques (GPV Convertisseur-Charge) avant d'arriver à cerner sa plage de variation des variations possibles du rapport cyclique " d " et d'en déduire par la fin les valeurs admissibles de R_L .

2.4.3 Données électriques et tolérances admissibles pour le convertisseur

$$\Delta V_{in} = 1\% V_{in_max} = 0.345 \text{ V (Ondulation sur la tension d'entrée)}$$

$V_{out} = [0, V_{out_max}]$, (V_{out_max} peut varier selon la valeur instantanée de d , qui dans ce cas présent, dépend de la charge et de la valeur de l'irradiation solaire G qui y règne).

Suite à cette dernière constatation, on revient toujours à la nécessité de fixer tout d'abord la valeur exacte ou l'intervalle de variation du rapport cyclique " d ". Une donnée critique pour la continuation du travail de dimensionnement.

D'après notre cahier de charge on a:

$$d = [d_{min}, d_{max}] = [0, 0.4]$$

Ce qui représente la gamme de variation nominale du rapport-cyclique de service. Et d'après l'équation (2.16), il en suit que la variation de la tension de sortie est:

$$V_{out_{min}} = \frac{V_{in_{min}}}{1-d_{min}} = \frac{0}{1-0} = 0 \text{ V}$$

$$V_{out_{max}} = \frac{V_{in_{max}}}{1-d_{max}} = \frac{34.5}{1-0.4} = 57.5 \text{ V}$$

$$V_{out} = [V_{out_{min}}, V_{out_{max}}] \approx [0, 57.5 \text{ V}]$$

$\Delta V_{out} = 2 \text{ V}$ (Ondulation sur la tension de sortie) ;

On cible un rendement $\geq 90 \%$;

$\Delta I_L = 0.5 \text{ A}$ (Ondulation du courant inducteur, caractérisant la limite d'ensoleillement pour un mode de fonctionnement en mode continue (MCC)).

2.4.4 Fréquence de commutation

La fréquence de découpage des convertisseurs DC-DC se situe généralement dans la gamme de 20kHz à 1MHz au-delà des fréquences audibles, en fonction de la vitesse des dispositifs semi-conducteurs. [11] Dans notre travail, nous avons choisi d'opérer à une fréquence de commutation de 25kHz.

2.4.5 Dimensionnement de l'inductance

A travers la courbe d'évolution de $I_L(t)$ dans la figure (2.7), on voit bien qu'une conséquence automatique de la première condition est qu'on doit toujours avoir :

$$i_{L_{min}} \geq 0 \quad (2.37)$$

Ce qui est équivalent à :

$$I_{in} \geq \frac{\Delta I_L}{2} \quad (2.38)$$

En utilisant l'équation (2.7), on peut écrire :

$$\Delta I_L = |\Delta I_{Lon}| = |\Delta I_{Loff}| = \frac{V_{in}.d.T}{L} \text{ avec } (2.39)$$

Et puisque dans le cas d'une connexion à un panneau photovoltaïque, on a :

$$I_{in} = I_{PV}V_{in} = V_{PV} (2.40)$$

Nous aurons finalement :

$$L \geq L_{min} = \frac{V_{PV}.d}{2.I_{PV}.f_s} (2.41)$$

D'après les équations (2.29) et (2.32) cette expression peut se mettre sous la forme :

$$L \geq L_{min} = \frac{(1-d)^2.d.R_L}{2.f_s} (2.42)$$

Et pour être plus précis encore, nous mettrons :

$$L \geq \max\left(\frac{(1-d)^2.d.R_L}{2.f_s}\right) (2.43)$$

Généralement, en pratique on prend $L \geq 10.L_{min}$ comme marge admissible pour fixer la valeur préconisée de L .

Ceci est un traitement fait pour remplir la première condition. En ce qui concerne la deuxième condition, qui reste optionnelle et qui vise la limitation de l'ondulation du courant ΔI_L , une application directe de l'équation (2.36) nous conduira à :

$$L \geq L_{min} = \frac{V_{PV}.d}{\Delta I_L.f_s} (2.44)$$

$d = 0.4, V_{PV} = 34.5A, \Delta I_L = 0.5V, f_s = 25kHz$ ce qui donne : $L_{min} = 1.1 \text{ mH}$.

Il s'agit de la valeur minimale de l'inductance qui assure le mode de conduction continue, pour éviter de sortir de l'intervalle de garantie, il est conseillé de prendre une valeur supérieure à cette valeur, nous l'avons pris égale à 1.2 mH.

2.4.6 Dimensionnement et choix des condensateurs (C_{in} et C_{out})

Les deux condensateurs C_{in} et C_{out} , utilisés dans notre convertisseur, voir schéma de la figure (2.13), ont pour fonction de minimiser les ondulations de tension d'entrée et de sortie respectivement. Ceci explique la méthodologie empruntée pour le dimensionnement de ces deux composants. Leurs valeurs sont calculées en fonction de l'ondulation maximale de tension souhaitée.

- Condensateur d'entrée C_{in}

En plus du motif exposé au début du chapitre et qui concernent l'obligation du placement d'un condensateur d'une grande valeur à l'entrée des convertisseurs DC/DC utilisés dans les applications photovoltaïques. Nous ajoutons ici, une déclaration qui stipule qu'un condensateur C_{in} à l'entrée du Boost est aussi nécessaire pour protéger le générateur PV des oscillations, à haute fréquence, générées par les commutations du convertisseur. Le dimensionnement de ce condensateur fait encore l'objet d'études pour trouver un compromis entre la protection qu'il assure et la valeur trop élevée, qui change la nature de l'entrée du convertisseur (d'une source de courant en une source de tension) [11].

Pour le dimensionnement de ce condensateur, commençons par :

La charge Q du condensateur évolue au cours du temps. Lors de l'opération de charge, Q augmente. Ce débit de charge correspond à l'intensité de courant i .

$$i_C = \frac{dQ}{dt} \quad (2.45)$$

Conformément au principe d'équilibre de charge, l'intégrale du courant du condensateur au cours d'une période de commutation est nul. Et puisque l'intégrale représente l'aire (la charge pour l'équation (2.42)), les aires en dessus et en dessous de l'axe des temps dans la figure (2.14) doivent avoir des valeurs égales (charge et décharge d'un condensateur).

Donc un simple calcul d'aire nous donnera (aire du triangle en bleu) :

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{T}{2}\right) \cdot \left(\frac{\Delta I_L}{2}\right) = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_s} \quad (2.46)$$

En plus, la relation charge-tension est donnée par:

$$\Delta Q = C_{in} \cdot \Delta V_{in} \quad (2.47)$$

Ceci nous conduira enfin à:

$$C_{in} \geq \frac{\Delta I_L}{8 \cdot \Delta V_{in} \cdot f_s} \quad (2.48)$$

D'après les données numériques du problème, nous avons :

$$\Delta I_L = 0.5A \text{ et } \Delta V_{in_max} = 0.345V$$

$$\text{Ce qui donne : } C_{in} \geq 7.24 \mu F$$

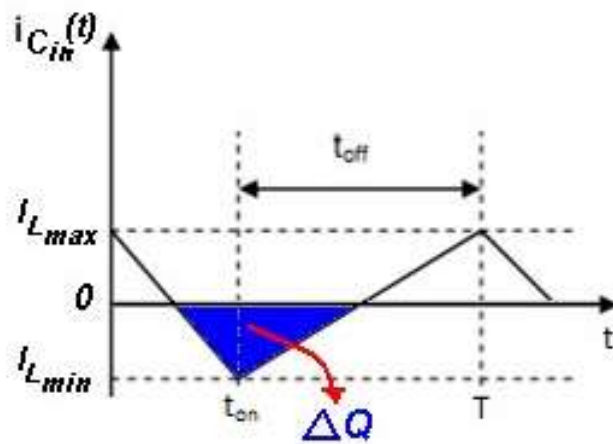


Figure 2- 14 Quantité de charge perdue dans le condensateur C_{in} durant une période de conduction T

- Condensateur de sortie C_{out}

Un autre condensateur C_{out} est nécessaire pour filtrer la tension de sortie. Il obéit aux règles de dimensionnement classiques en Electronique de Puissance. Pour le dimensionner, nous suivrons le même raisonnement que celui utilisé pour le condensateur d'entrée.

Comme on vient de le voir dans la figure (2.10), la forme d'onde de courant traversant le condensateur de sortie est donnée par la Figure (2.15). L'aire du rectangle en bleu représente la

quantité de charge perdue durant un période (Qui est la même que celle emmagasinée durant une période). Et puisque le calcul d'aire du rectangle s'apprête mieux pour le calcul de la variation de charge dans ce cas, nous avons utilisé cet intervalle pour avoir une idée sur la variation de charge dans ce condensateur durant une période de commutation.

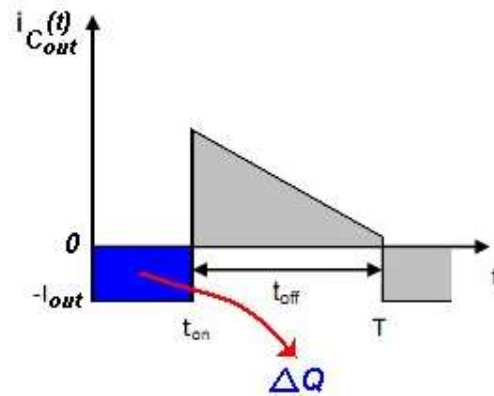


Figure 2- 15 Quantité de charge emmagasinée dans le condensateur C_{out} durant une période de commutation T .

Nous aurons donc:

$$\Delta Q = d \cdot T \cdot I_{out} \quad (2.49)$$

En combinant cette dernière équation avec l'équation (2.44), on aura:

$$C_{out} \geq \frac{d \cdot I_{out}}{\Delta V_{out} \cdot f_s} = \frac{d \cdot (1-d) I_{in}}{\Delta V_{out} \cdot f_s} = \frac{d \cdot (1-d) I_{PV_max}}{\Delta V_{out} \cdot f_s} \quad (2.50)$$

D'après les données numériques du problème, nous avons:

$d = 0.4$, $I_{pv_max} = 4.35A$ et $\Delta V_{out} = 2V$ ce qui donne:

$$C_{out} \geq 20.88 \mu F$$

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre l'étude du fonctionnement et le dimensionnement d'un convertisseur de type Boost on était présenté, suivant un cahier de charge préalablement fixé. Par conséquent le dimensionnement et la modélisation du convertisseur de type Boost vu dans ce chapitre vont être utilisés dans le prochain chapitre qui sera dédié à la simulation du convertisseur.

Chapitre 3 Résultats et simulation sur environnement

Simulink

3.1 Introduction

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

Afin de procéder à la simulation du panneau solaire nous allons utiliser le logiciel Math Works Matlab plus exactement l'outil de simulation Simulink, ce dernier est l'extension graphique de MATLAB permettant de représenter les fonctions mathématiques et les systèmes sous forme de diagramme en blocs, il tient compte de la division d'un système simulé en un certain nombre de sous-ensembles, ces sous-ensembles peuvent être modélisés et examinés individuellement et interconnectés.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'amélioration de deux techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), la méthode "Perturbation- Observation" et "IncCond".

3.2 Les commandes MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quels que soit le besoin de la charge, la commande MPPT place le système au point de fonctionnement maximums (V_m , I_m).

Les circuits de base des hacheurs sont illustrés dans au-dessous, On utilise des convertisseurs de type DC/DC dans la partie contrôle du système photovoltaïque car ils sont faciles à être contrôlés par leurs rapports cycliques en utilisant un signal MLI, ces convertisseurs (Hacheurs : Buck, boost et Buck-boost) sont utilisés comme des MPPT par la régulation de la tension de

sortie du système photovoltaïque. A partir de cette règle et selon le type de contrôleur (le contrôle du rapport cyclique), on peut raisonner sur différentes méthodes, afin d'extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire.

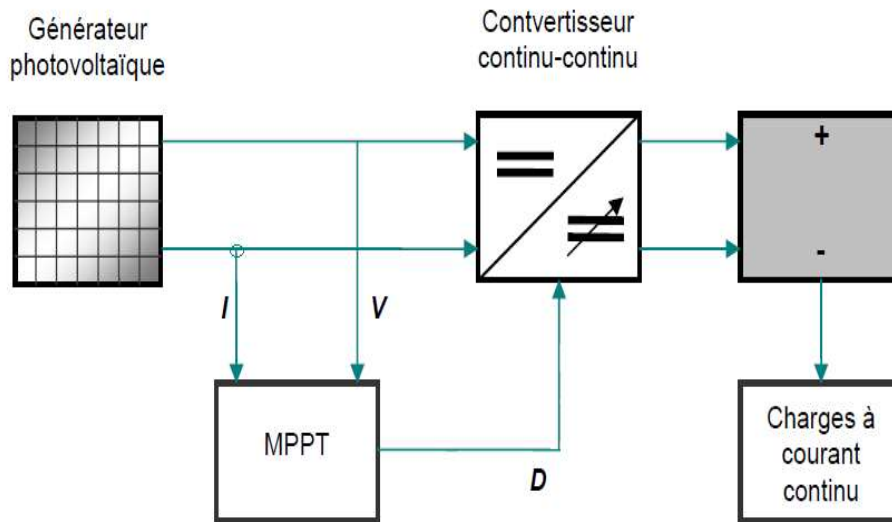


Figure 3- 1 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT

Certains des concepts sont très robustes et simples, tandis que d'autres approches exigent des dispositifs de logique très sophistiqués tels que des microprocesseurs combinés avec des circuits de puissance, de convertisseurs de commutation...

Le but de est l'étude des d'un mécanismes du tracking pour l'extraction de la puissance maximale pour différentes conditions fonctionnement (température et l'ensoleillement), on trouve plusieurs variétés de machinismes et d'approches [11], de méthodes analogiques simple mais moins efficace jusqu'à des méthodes nettement plus efficaces qui utilise des logiques sophistiquées comme les microcontrôleurs.

Il existe plusieurs méthodes MPPT. Dans ce mémoire, on s'est intéressé à la méthode Perturbation et Observation (P&O). Cette méthode utilise le principe de la contre réaction de puissance et la méthode Incrémental conductance Incd.

3.3 Les Méthodes MPPT

Il existe plusieurs méthodes de la poursuite du point de puissance maximale. Les références [9] et [10] expliquent en détail un grand nombre de ces méthodes. On en donne dans ce qui suit un bref aperçu :

- Adaptation manuelle : Elle consiste à adapter manuellement la charge au générateur photovoltaïque, c'est-à-dire choisir la charge suivant la valeur du courant et de la tension obtenue expérimentalement pour des conditions normales de fonctionnement.
- Méthodes à contre réaction de tension : la tension de référence peut être fixe, variable en fonction de la tension à circuit ouvert V_{oc} ou externe par l'utilisation d'une cellule pilote.
- Méthodes à contre réaction de courant : là aussi le courant peut être variable en fonction du courant de court-circuit I_{sc} , ou externe par l'utilisation d'une cellule pilote.
- Méthodes à contre réaction de puissance : Plusieurs algorithmes sont utilisés comme l'algorithme (P&O) « Perturbation et Observation » et l'algorithme « Incrémental Conductance ».
- Méthode de poursuite analogique : Utilisation d'un contrôleur flou. Comme on l'a déjà cité on choisit la méthode qui nous intéresse est la méthode Perturbation et Observation (P&O). Nous allons expliquer dans ce qui suit son principe de fonctionnement.

3.3.1 Critères d'évaluation des commandes MPPT

Les méthodes varient en complexité, le nombre de capteurs nécessaires, la mise en œuvre numérique ou analogique, la vitesse de convergence, Capacité de suivi, et le rapport coût efficacité. La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au PPM. Plusieurs critères sont importants pour évaluer les qualités de la commande MPPT ; tels que le rendement ; le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance [5].

- **Le rendement** : le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons η MPPT, permet de mesurer l'efficacité de la commande. Cela donne les pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire.

- **Simplicité et coût** : Complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implantation et des pertes liées directement au nombre de calculs nécessaires.

Alors, une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré.

- **Réponse dynamique** : Une commande MPPT doit avoir un bon comportement endynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible.
- **Flexibilité** : Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de panneau PV. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux PV des différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse.
- **Compétitive** : Sur une large gamme de puissance : Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications PV, est supposée traquer le PPM généré par un module PV, quel que soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance. Selon les critères cités ci-dessus on a choisi les deux algorithmes (P&O) et incd

3.4 Méthode d'incrémentation de l'inductance

Cet algorithme fonctionne à la recherche de la tension de fonctionnement point où la conductance est égale à l'augmentation de la conductance. À ce stade, le système cesse de perturber le point de fonctionnement. L'avantage de cet algorithme est qu'il a la capacité de déterminer la "distance" par rapport à le MPP, donc il est capable de déterminer si le député n'a été atteint. En outre, il est capable de suivre le MPP plus précisément dans des conditions météorologiques très variables, et des expositions moins autour du comportement oscillatoire MPP par rapport à la P&O méthode, même lorsque la méthode P&O est optimisée.

Néanmoins, l'algorithme IC a l'inconvénient que l'instabilité peut survenir en raison de l'utilisation d'un dérivé dans l'algorithme. Également sous de faibles niveaux d'ensoleillement, le processus de différenciation difficile et sujet aux bruits de mesure, et les résultats peuvent être insatisfaisant.

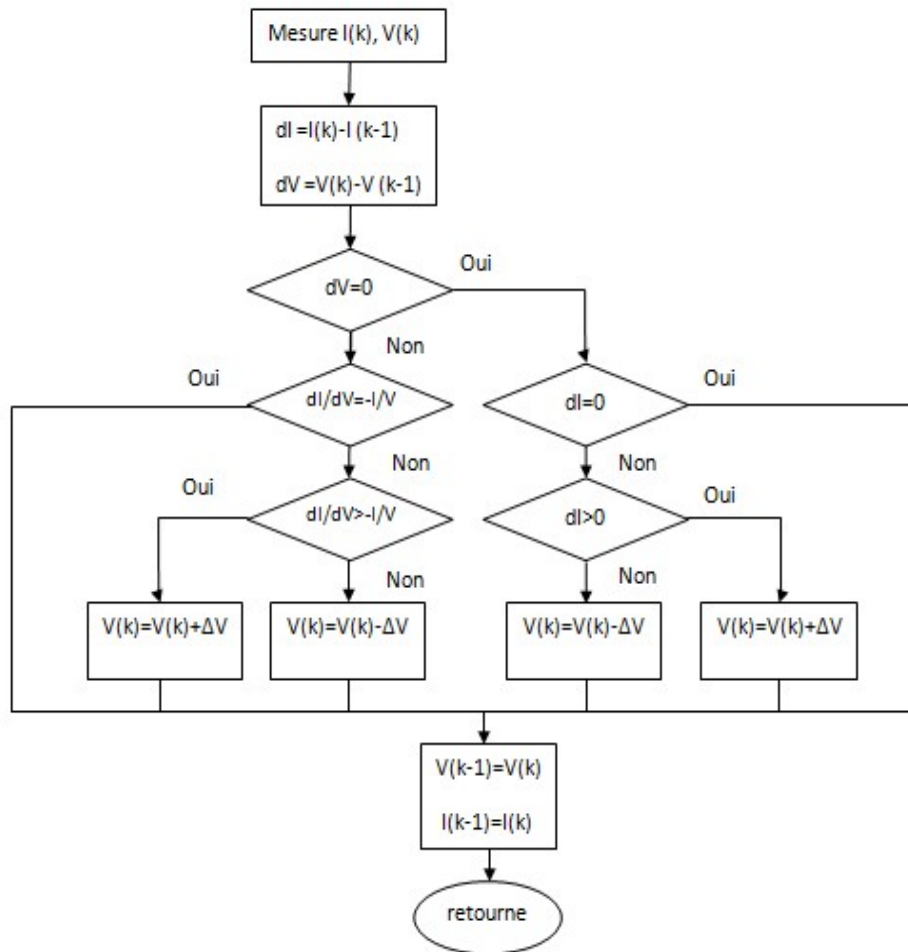


Figure 3- 2 Organigramme de l'algorithme d'incrément de l'inductance

3.5 Algorithme Perturbation et Observation (P&O) :

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

La figure donne l'organigramme de cet algorithme et en suite on expliquera brièvement son fonctionnement :

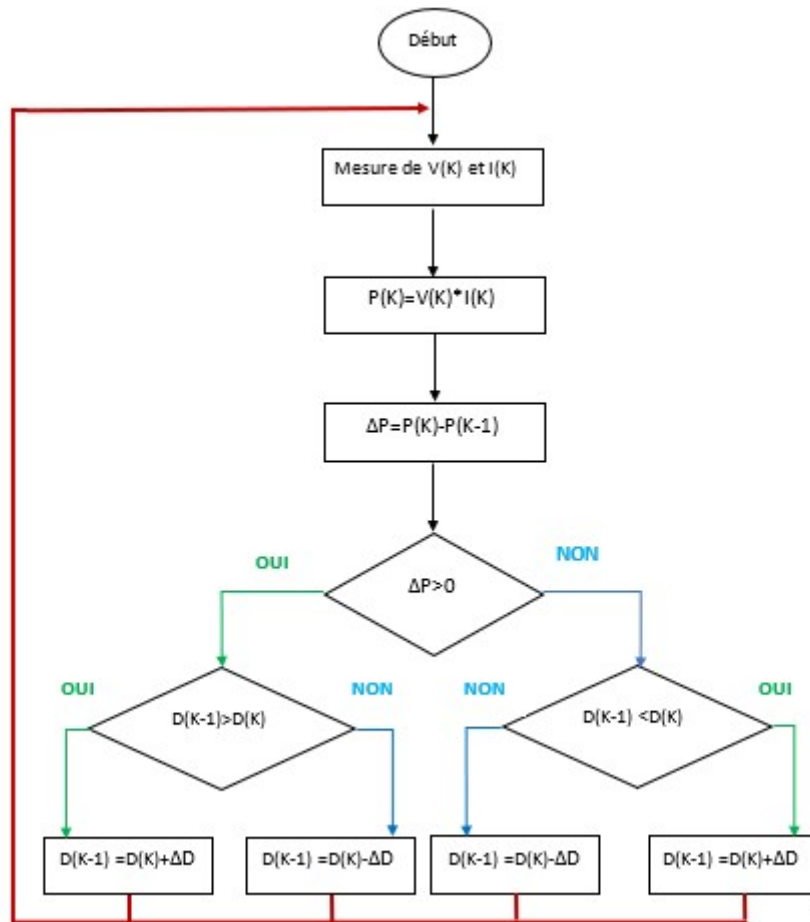


Figure 3- 3 Organigramme de l’algorithme P&O

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

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

On doit noter qu’à chaque cycle d’horloge une perturbation est introduite, et une fois le MPP atteint, l’algorithme ne s’arrêtera pas et V continuera d’osciller autour de la tension de

fonctionnement idéal V_{mp} . Ces oscillations causent des pertes d'énergie et leur amplitude est proportionnelle au pas de perturbation ΔD .

Si la largeur du pas ΔD est grande, l'algorithme convergera rapidement vers le MPP, surtout pour des changements brusques des conditions de fonctionnement, mais l'amplitude des oscillations autour de ce point seront importantes. Par contre si ce pas est trop petit l'amplitude des oscillations sera faible mais l'algorithme aura une réponse très lente, ce qui diminuera son efficacité pour des variations rapides de l'insolation et de la température.

Le choix idéal de ΔD est donc un compromis à faire entre la rapidité de la réponse de l'algorithme et les pertes de puissance générées par les oscillations autour de l'état stable. Cette valeur est déterminée la plupart du temps expérimentalement ou par la simulation.

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

3.6 La simulation du système photovoltaïque :

La simulation du système photovoltaïque dans l'environnement MATLAB/SIMULINK, il est préférable de faire une simulation séparée des différents blocs constituant le système. Nous abordons en premier lieu le panneau solaire, notre choix est porté sur le panneau Siemens SM-50. L'exploitation des caractéristiques donnée par le constructeur, cette dernière facilite la simulation. En deuxième lieu nous abordons la simulation du convertisseur Boost selon un dimensionnement qui détermine les valeurs de tous les composants constituant le circuit de ce dernier, nous obtenons en finale les courbes traduisant les caractéristiques du panneau, les courbes de la tension, du courant et de la puissance en entrée et en sortie du circuit. Enfin en dernière étape, la charge sera couplée au panneau PV par l'insertion du convertisseur Boost entre les deux. Le système est asservi par un bloc de recherche de maximum de puissance (MPPT) pour obtenir un meilleur rendement.

3.7 Simulation MPPT (P&O) :

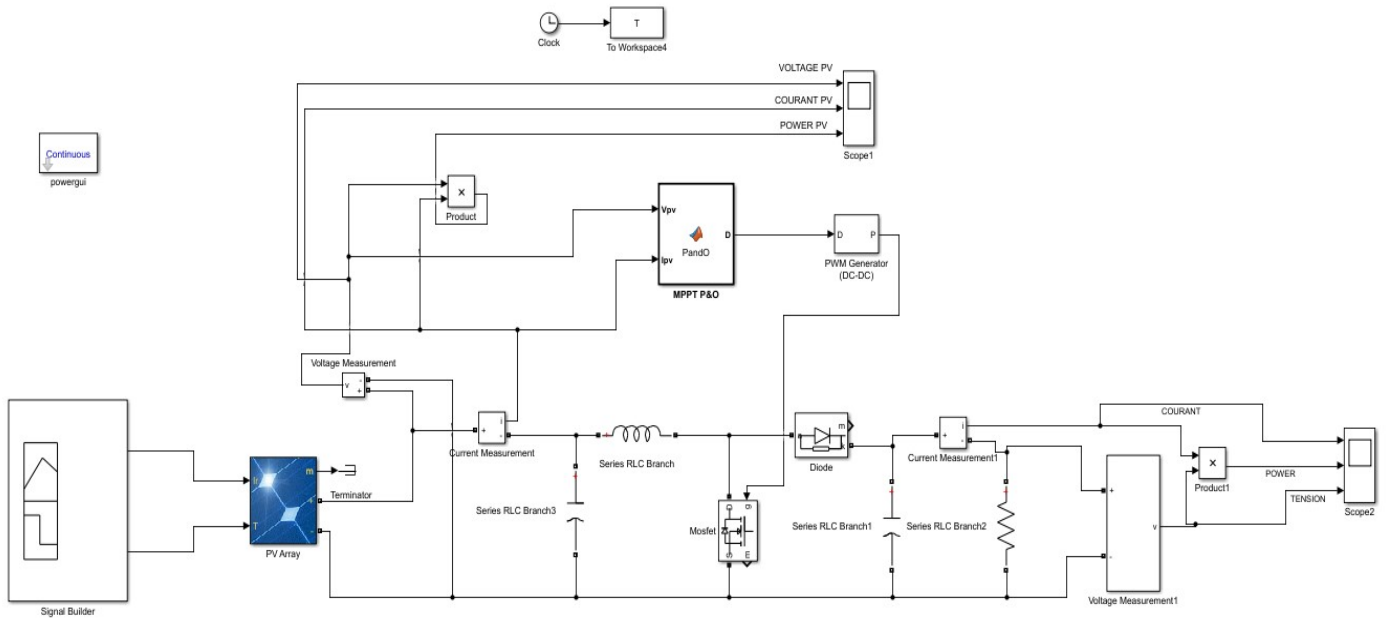


Figure 3- 4 Architecture adoptée du contrôleur P&O dans l'environnement SIMULINK

La figure 3.4et 3.5 représente le schéma global du système. Il est constitué de plusieurs étages. Le générateur photovoltaïque, la commande MPPT utilisée, le convertisseur DC/DC (step up) et la charge. ces étages sont raccordés entre eux pour constituer un système photovoltaïque.

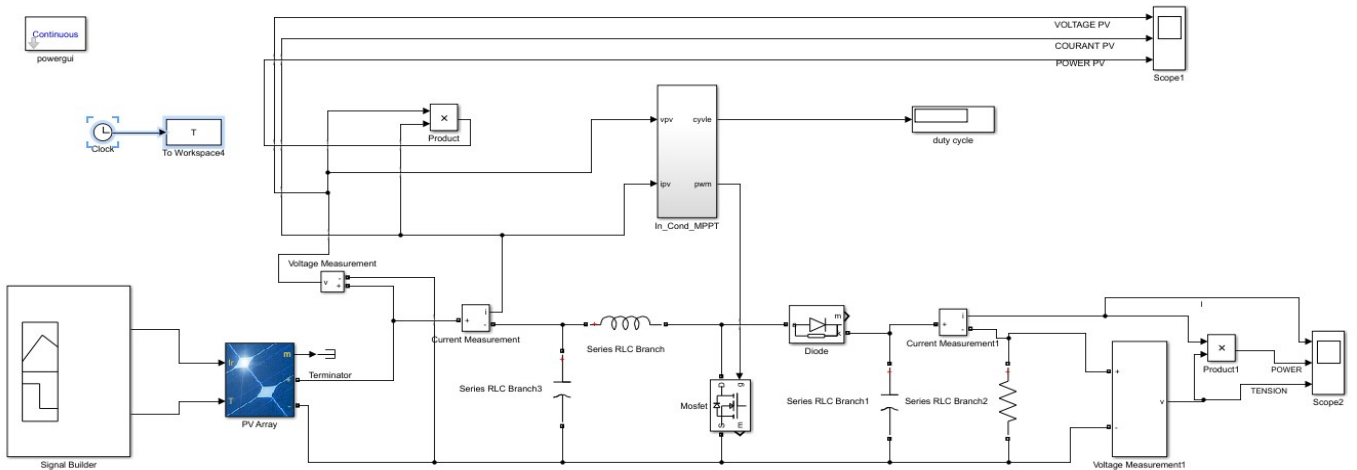


Figure 3- 5 Architecture adoptée du contrôleur INC dans l'environnement SIMULINK

Lesrésultats de simulation obtenus pour les algorithmes P&O et INCD sont représenter par les deux figure 3.6 et 3.7 respectivement. Nous avons choisi plusieurs scénarios de variation d'insolation pour vérifier l'efficacité des architectures choisies des deux algorithmes.

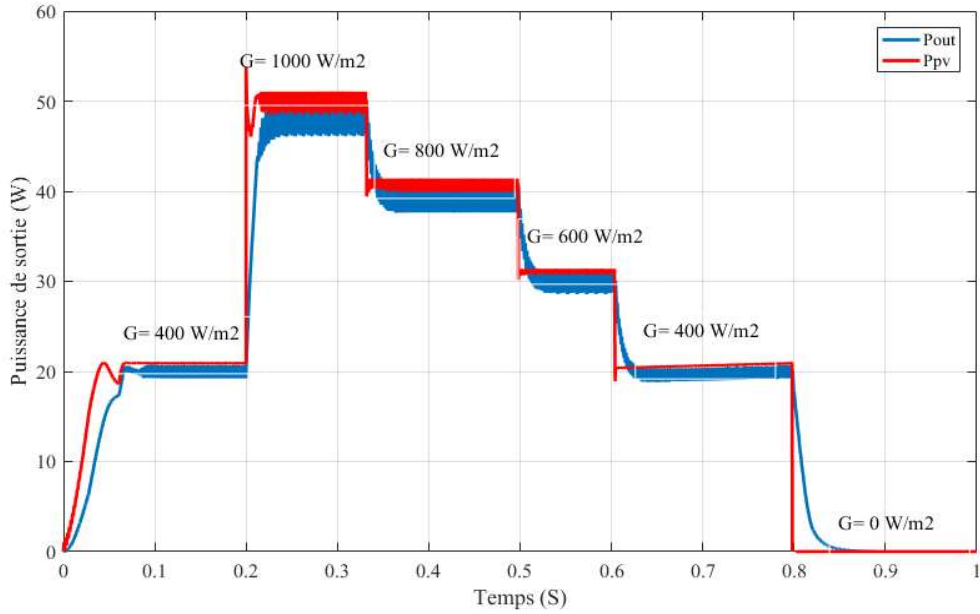


Figure 3- 7 Figure des Puissance d'entre et de sortie de methode P&O

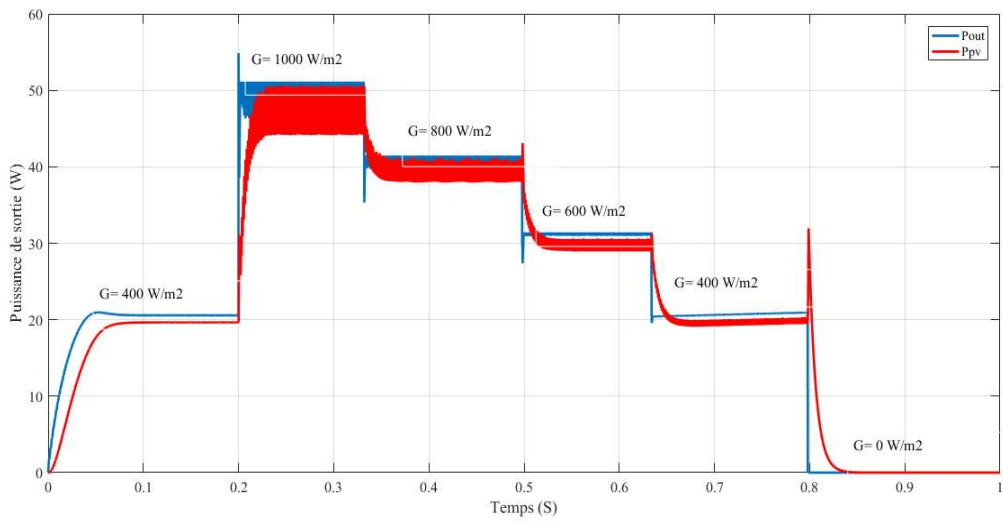
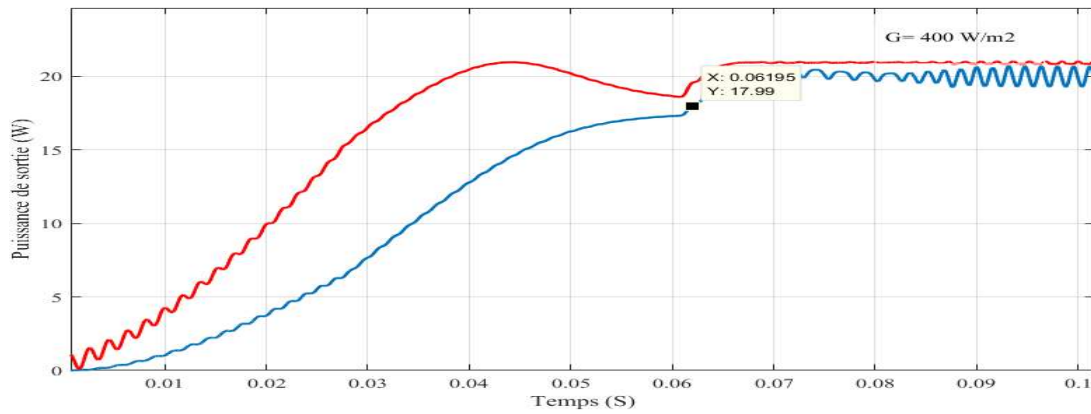


Figure 3- 6 Figure des Puissance d'entre et de sortie de methode INC

en examinant les courbes de la figure 3.6 nous concluons que :

- le suivi du PPM est très rapide, il est atteint en moins de 0.1s en passant de $G=400\text{W/m}^2$ à $G=1000\text{W/m}^2$.
- Même chose lorsque l'insolation chute brusquement de 1000W/m^2 à 800W/m^2 et garde la même efficacité du suivi jusqu'à atteindre 400W/m^2 .



Ces
mê
me
s
con
clu
sio
ns
son

Les variables pour le cas de l'algorithme Incd.

Figure 3- 8 Temps de montée P&O

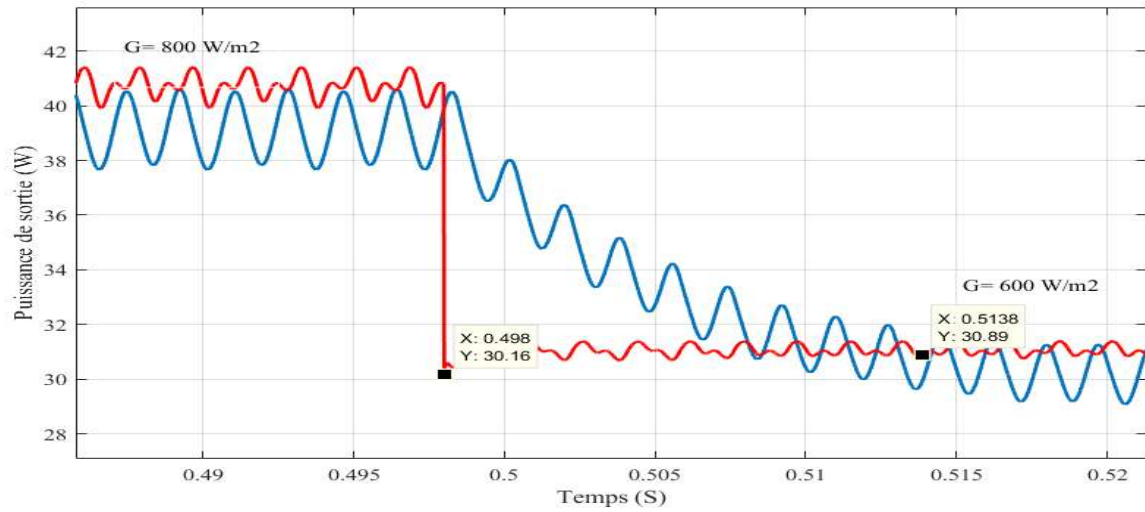


Figure 3- 9 Temps PPM down P&O

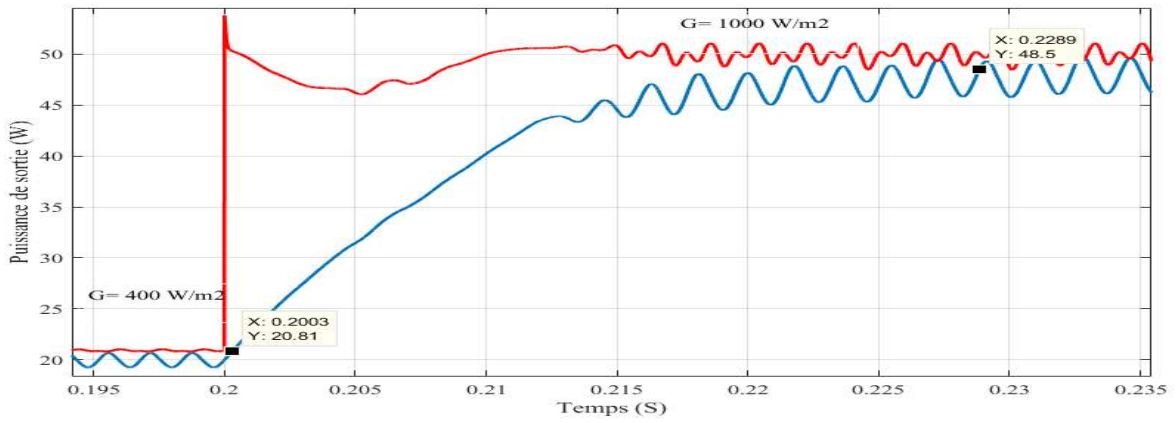


Figure 3- 10 Temps de PPM up P&O

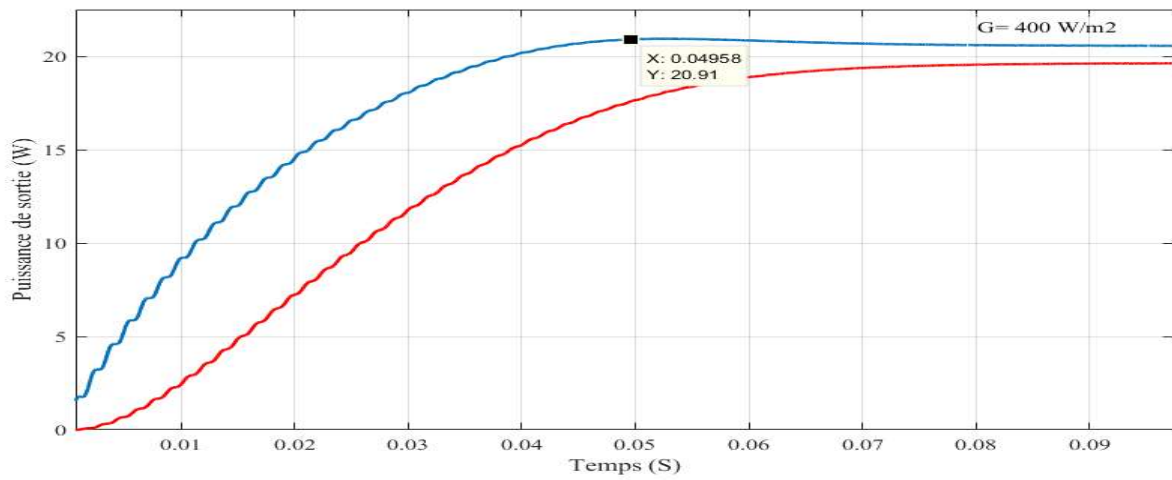


Figure 3- 11 Temps de monté INC

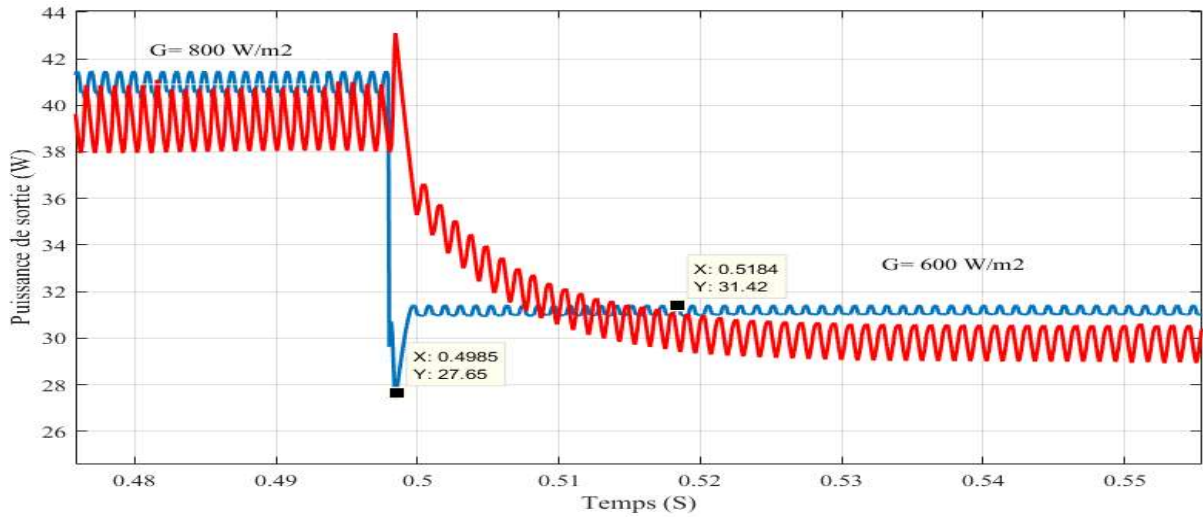


Figure 3-12 Temps de PPM down INC

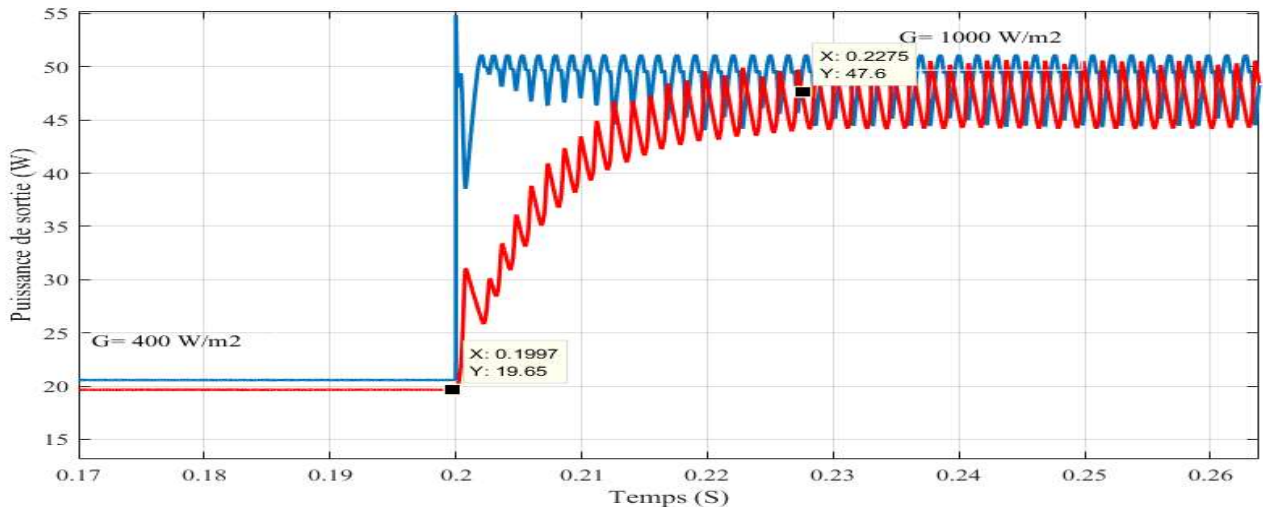


Figure 3-13 Temps de PPM UP INC

Néanmoins des comparaisons entre les deux algorithmes sont a relevée. Pour se faire, nous avons classé un tableau de comparaison des paramètres citée ci-dessus.

On examinant les tableau comparatifs ci-dessus, nous déduisons :

G(W/m ²)	400	600	800	1000	400	600	800	1000
méthode	P&O				INCD			
Pout(w)	20.2	48.51	39.94	29.75	19.65	47.6	39.83	29.56
Ppv(w)	21.02	50.25	41.11	31.23	20.57	51.12	41.2	31.42
η%	0.99	0.96	0.97	0.95	0.96	0.93	0.97	0.94
ηmoy%	(0.95+0.56+0.97+0.95)/4 = 0.967				(0.96+0.93+0.97+0.94)/4 = 0.95			

Tableau 3- 1 Comparaison (rendement/ Puissance) de deux méthode P&O et INCD

Méthode	P&O	INCD
Temps de montée(s)	0.060	0.049
Temps de recherche du PPM UP (s)	0.028	0.027
Temps de recherche de PPM DOWN (s)	0.015	0.019

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, la simulation du système composé de : générateur photovoltaïque, du convertisseur DC/DC et la commande MPPT est développée. On examine les résultats de

Tableau 3- 2 Comparaison des temps et PPM de deux méthode P&O et INCD

simulation obtenus on remarque :

- La tension de sortie désirée est assurée aux bornes du convertisseur.
- Le transfert de puissance du GPV à la charge s'effectue avec un minimum de perte. Ceci justifier l'efficacité du contrôleur choisi.

Chapitre4 Simulation dans l'environnement XILINX

System Generator

4.1 Introduction

L'évolution technologique de la microélectronique a permis la naissance d'un nouveau type de composants électroniques, dits circuits programmables. Cette évolution, aujourd'hui en pleine expansion et progression, offre de plus en plus des circuits programmables puissants avec une grande flexibilité et rapidité de fonctionnement. Cet avantage apporte à ces circuits une solution technologique (support physique) incontournable pour l'implémentation des différents algorithmes de commande caractérisés par leur grande complexité. De plus, les circuits programmables qui sont d'une grande simplicité de conception bénéficient des avantages de l'électronique analogique et ceux des microprocesseurs.

Dans notre travail l'outil FPGA pour implémenter une commande MPPT est adopté. Pour cela, dans ce chapitre, les FPGA sont présentées, puis le langage de description de matériel utilisé : Very Hardware Description Language (VHDL) et la génération du code VHDL par XILINX System Generator. Finalement, la commande MPPT est présentée et les résultats obtenus lors de la simulation sont discutés et comparés aux résultats de la simulation sous MATLAB /SIMULINK.

4.2 Les circuits FPGA

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

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

- FPGA à SRAM (Static Read Only Memory) : ou encore LCA (Logic CellArray) introduit en 1985 par XILINX à base des cellules SRAM pour configurer les connexions entre les blocs logiques.
- FPGA à anti-fusible : programmables électriquement par l'utilisateur, non effaçables [11].

On peut utiliser les FPGA dans de nombreuses applications comme :

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

4.3 Méthode de programmation

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

- **VHDL** : VHDL est le sigle de VHSIC HDL ; (Very-High-Speed Integrated Circuits), une initiative de la Défense américaine dans les années 1980 visant la construction de circuits intégrés très rapides. Le VHDL est un langage de description du matériel utilisé en électronique et en tant que standard, il est indépendant du logiciel utilisé pour la compilation, la programmation des composants, la simulation, etc.
- **Verilog** : il a été inventé par Gateway Design Automation Inc en 1984. La syntaxe de verilog est proche du langage de programmation C, ce qui explique en partie son succès et sa diffusion rapide dans la communauté des ingénieurs qui ont déjà appris le langage C.
- **XSG** : pour (Xilinx System Generator) est un plug-in pour MATLAB/SIMULINK qui permet aux ingénieurs de développer des systèmes DSP de hautes performances pour les FPGAs de Xilinx. Les ingénieurs peuvent concevoir et simuler un système utilisant MATLAB/SIMULINK et la bibliothèque de Xilinx, L'outil génère ensuite automatiquement un Code HDL synthétisable mappé à des algorithmes pré-optimisés de Xilinx.
- **Saisie de schéma** : La saisie de schéma à partir de cellules de base permet un développement " bas niveau " qui rend difficile la réalisation de circuits complexes où chaque changement ou amélioration remet en cause toute la description. Cette contrainte a conduit à étudier des techniques de génération de circuits à partir de spécifications de " haut niveau " tel que le VHDL.

4.4 Environnement de développement Simulink XILINX System Generator XSG

Le System Generator est un outil de design de DSP fournit par XILINX qui permet l'utilisation de l'environnement Simulink pour la programmation et la conception des

applications sur circuits FPGA. Autrement dit, c'est une interface entre MATLAB/SIMULINK et ISE-XILINX. Parmi les principales tâches pouvant être exécutées dans cet environnement, on peut citer :

- ❖ Conception et simulation des systèmes dans un environnement graphique (SIMULINK).
- ❖ Co-simulation logicielle (SIMULINK)-matérielle (FPGA) par communication JTAG.
- ❖ Génération automatique du code VHDL ou Verilog.
- ❖ Co-design logiciel.

4.5 Simulation temporelle

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

4.5.1 Outils de conception par le XSG

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

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

4.5.2 La communication entre les blocs SIMULINK et les blocs XSG

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

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

4.6 La simulation de commande MPPT sous System Generator

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

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

La figure (4.1) représente l'architecture du contrôleur MPPT (P&O) dans l'environnement XSG.

La figure (4.2) représente l'architecture du contrôleur MPPT (INC) dans l'environnement XSG.

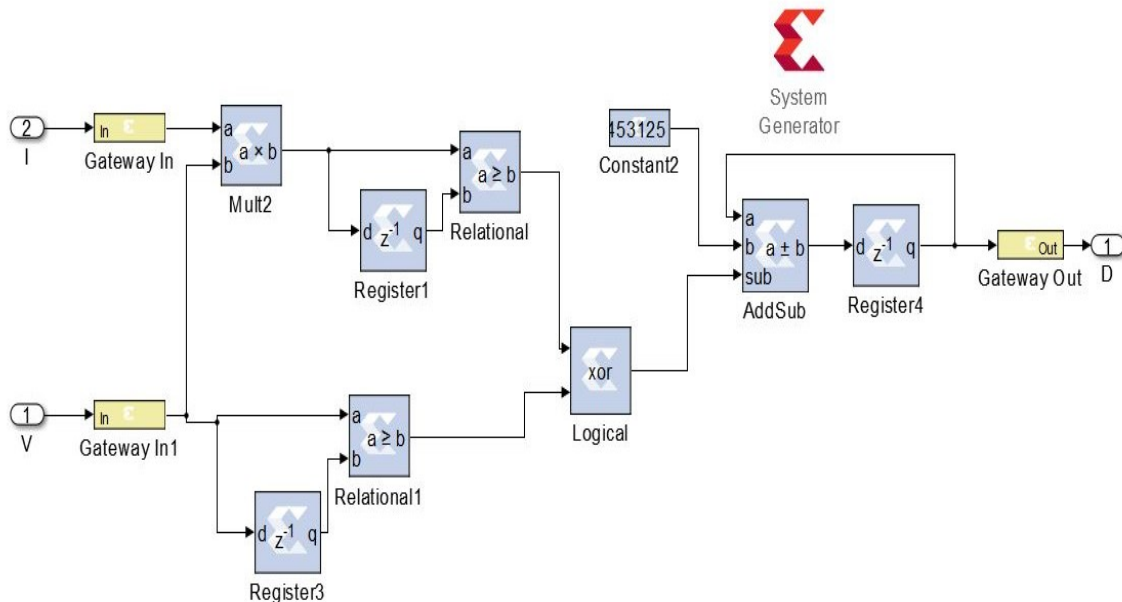
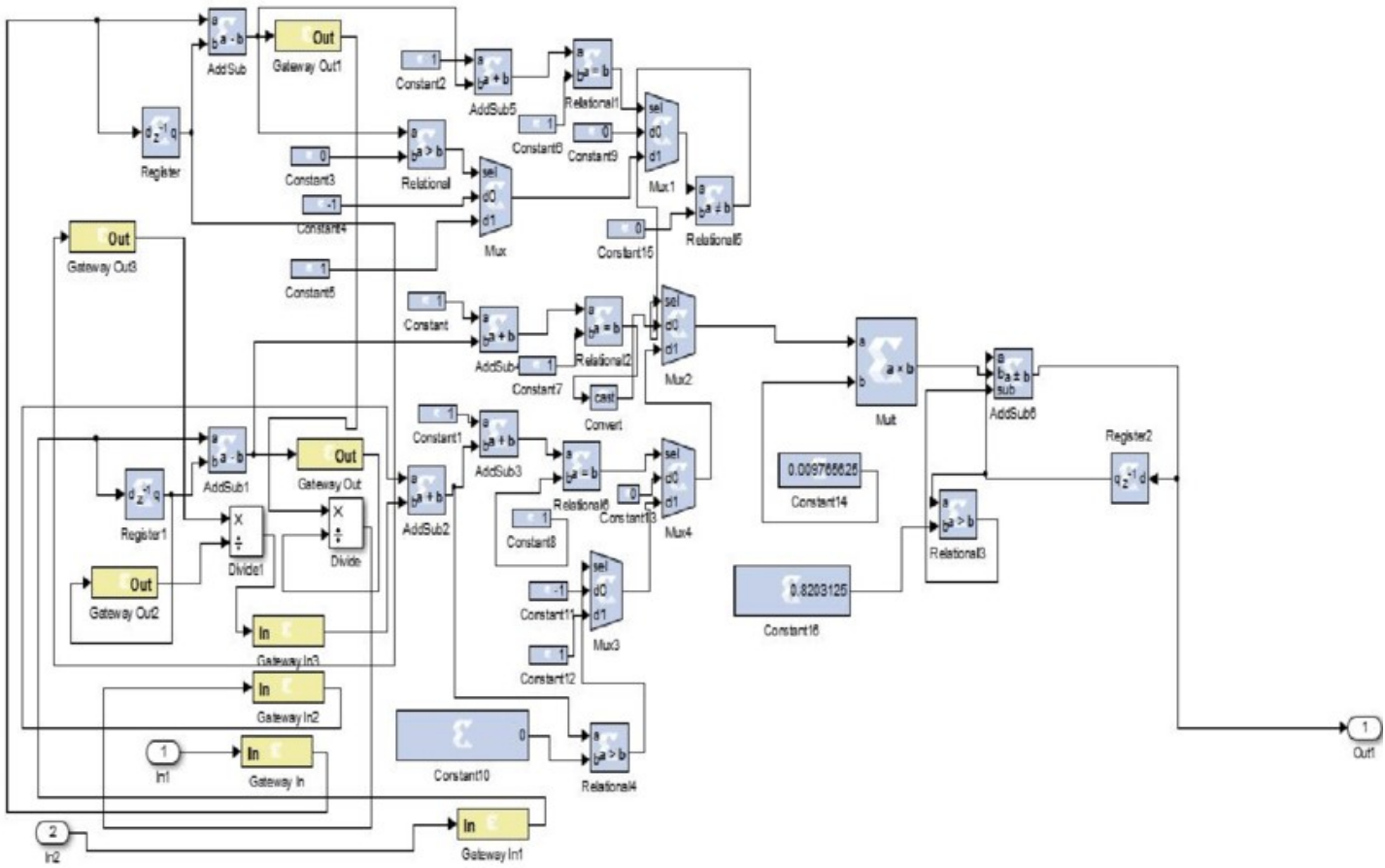


Figure 4- 1 Architecture du contrôleur MPPT (P&O) adopté dans l'environnement XSG.



4.7 Résultats et interprétations

4.7.1 Simulation du système sous les conditions standards

Après une description XSG de la commande MPPT (P&O), la simulation de ce dernier et les résultats obtenus sont comparés avec les résultats de simulations donnés par MATLAB /SIMULINK comme le montre la figure suivante :

Figure 4- 2 Architecture du contrôleur MPPT (INC) adopté dans l'environnement XSG

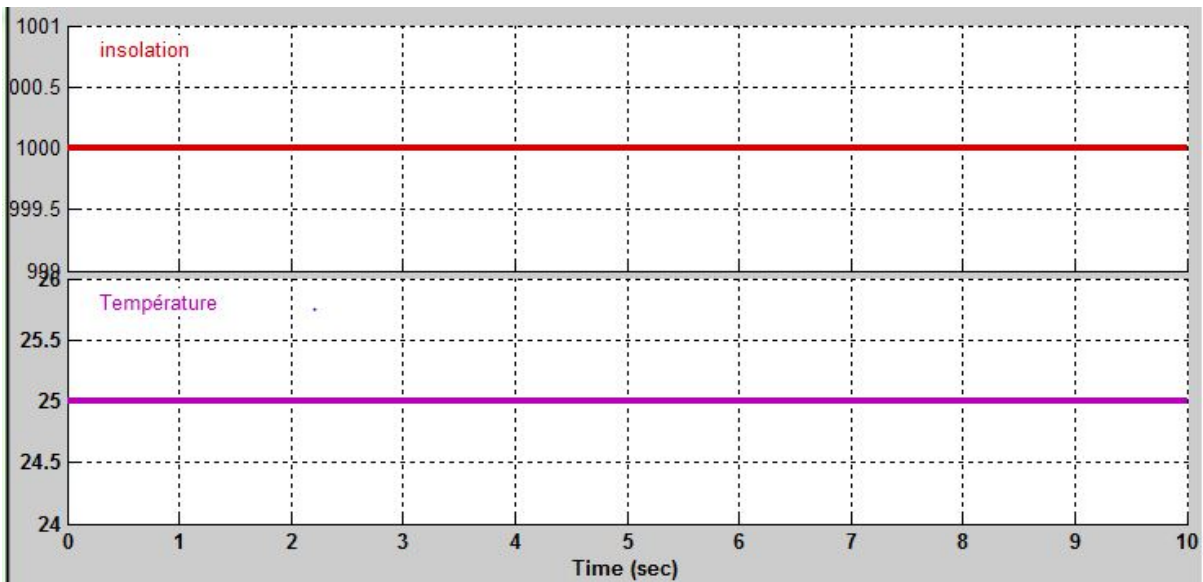


Figure 4- 1 Conditions météorologiques avec une insolation constante et température

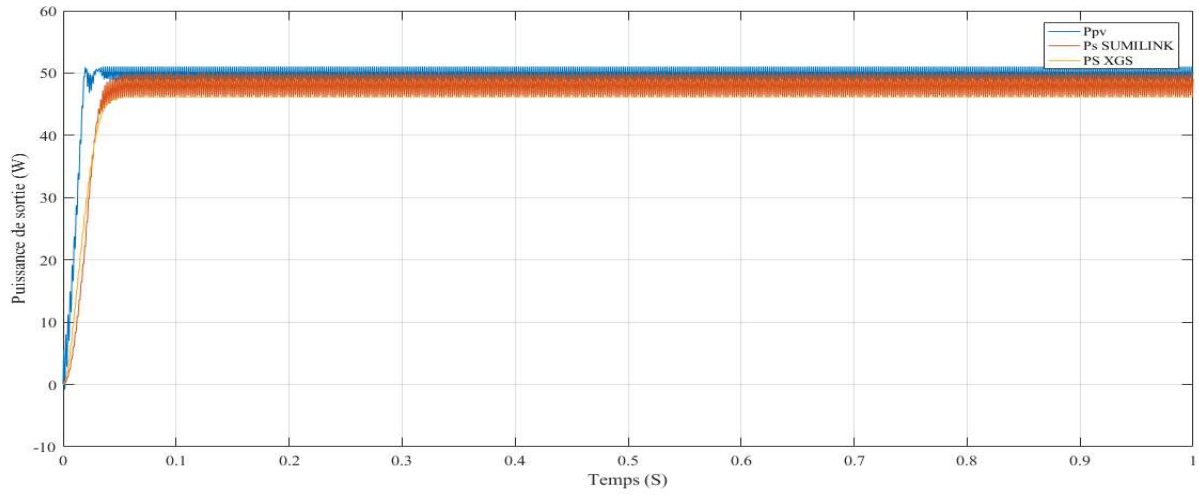
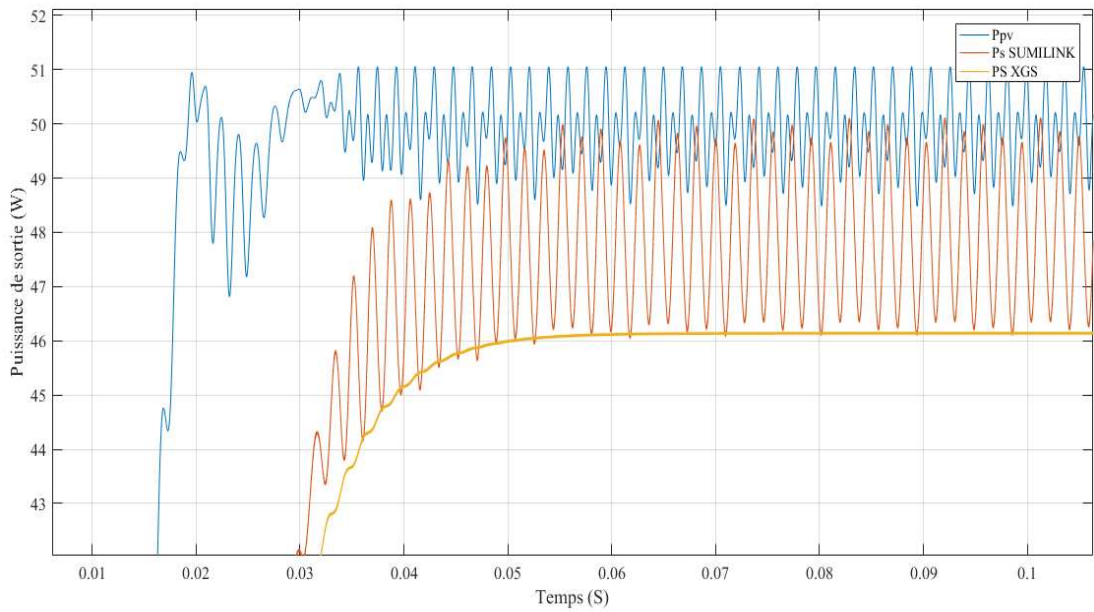


Figure 4- 2 Puissance pour une insolation constante et température constante



On fait un zoom sur l'intervalle [0 ;1] pour une bonne visualisation :

Figure 4- 3 Puissance pour une insolation constante et température constante zoomé

4.7.2 Simulation du système avec insolation variable et température constante

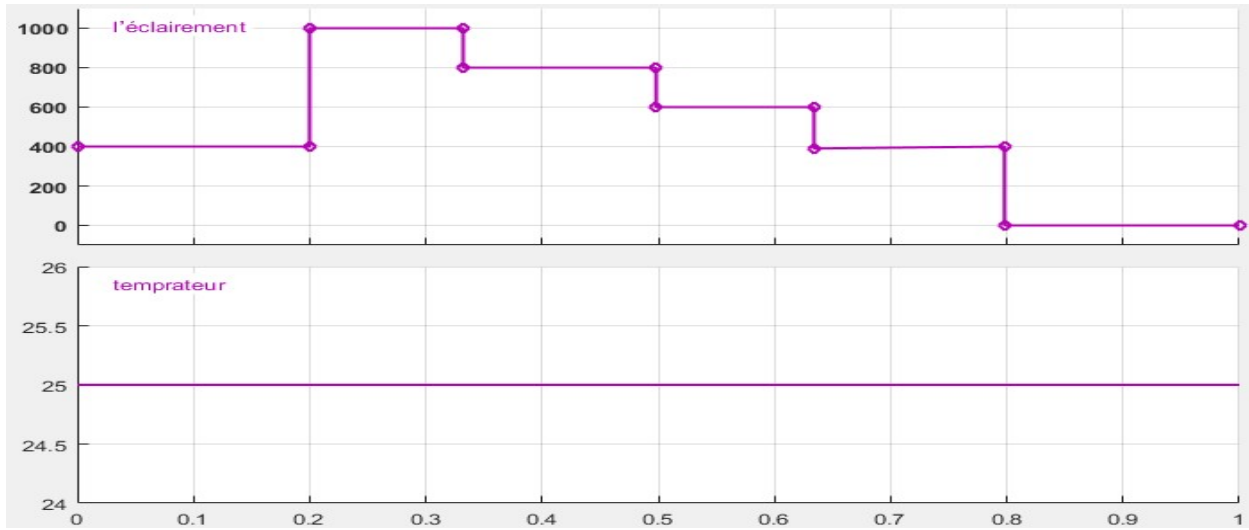


Figure 4- 4 Conditions météorologiques avec une insolation variable et température constante

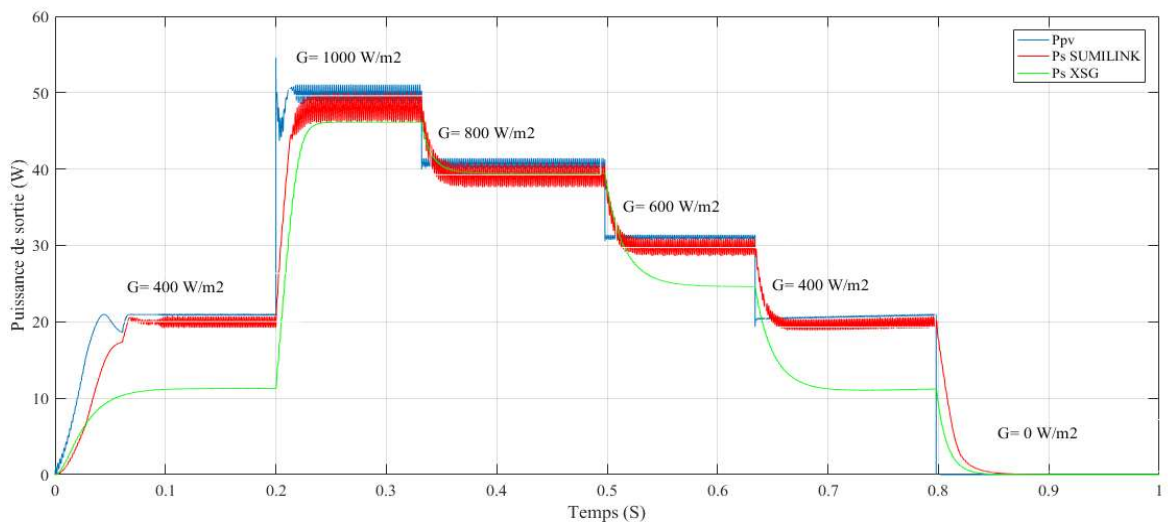


Figure 4- 5 Puissance pour une insolation variable et température constante.

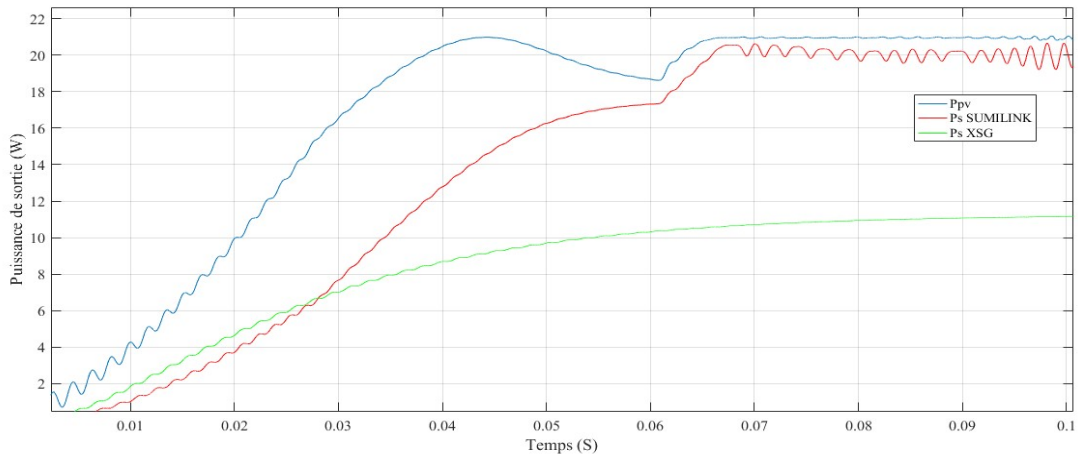


Figure 4- 6 Puissance pour une insolation constante et température constante zoomé

4.8 La Synthèse de contrôleur MPPT

Pendant l'étape de synthèse, le synthétiseur de << ISE Xilinx Project Navigator >>, vérifie les erreurs de syntaxe et programmation, ensuite il convertit le programme VHDL généré par le Système Generator (XSG) en portes logique et bascules, c'est-à-dire en éléments électroniques de base. Les figure 4.7 montre le schéma équivalent du bloc VHDL de Contrôleur MPPT généré par le synthétiseur.

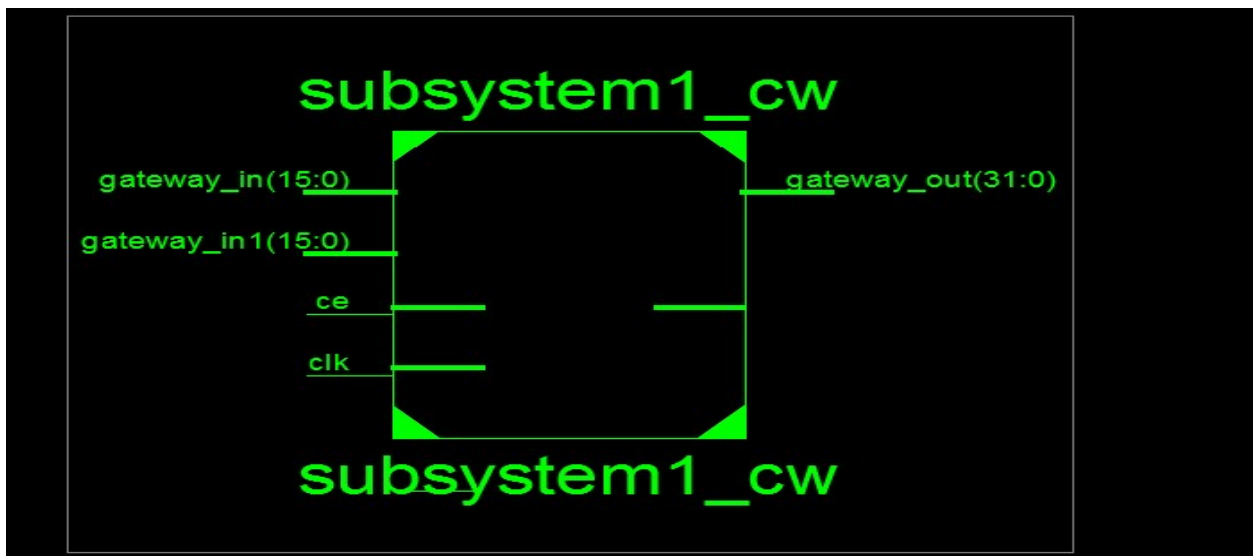


Figure 4- 7 Schématique de la commande MPPT (P&O).

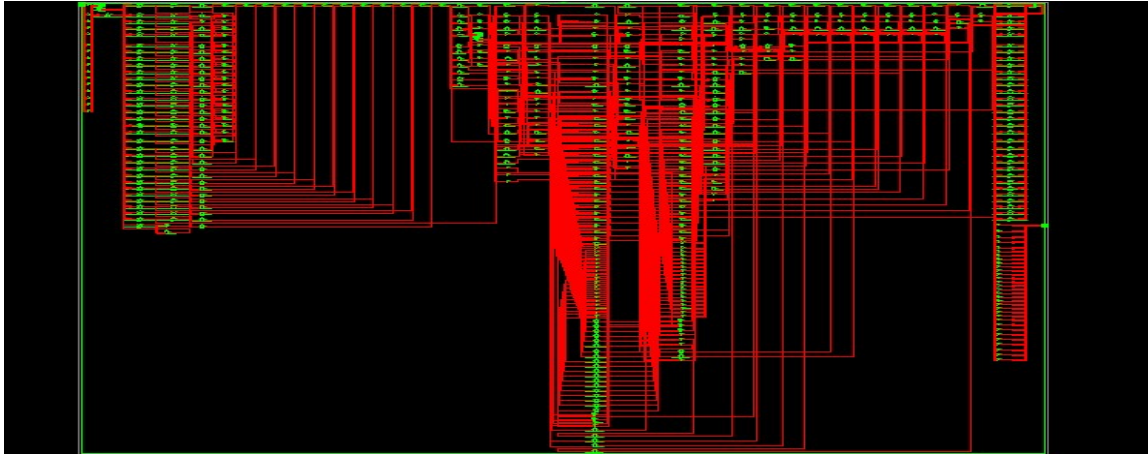


Figure 4- 8 . Architecture du commande MPPT (P&O) sur circuit FPGA.

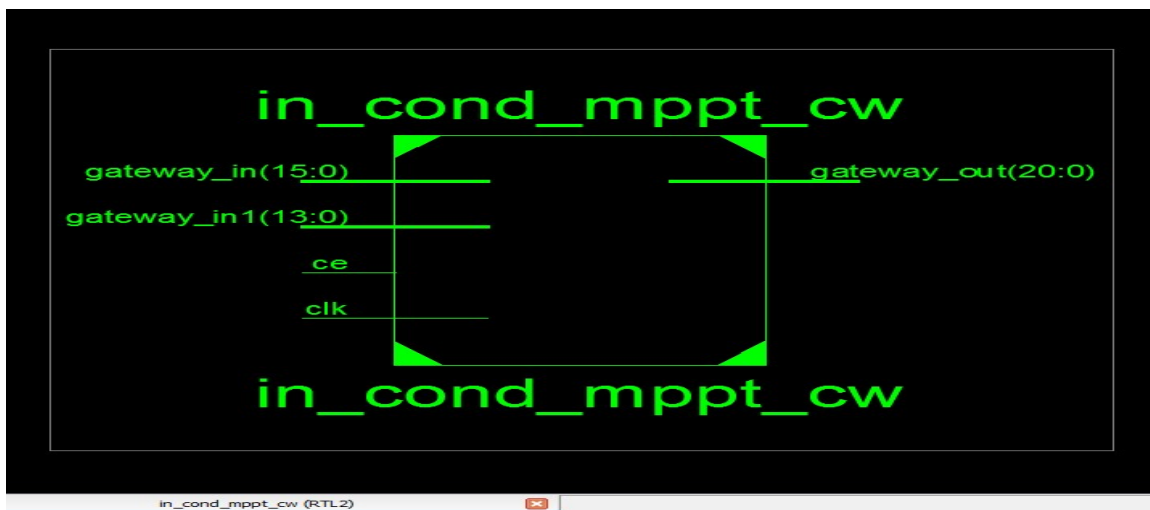


Figure 4- 9 Schéma RTL équivalent du contrôleur InCond.



Figure 4- 10 Schéma technologique du contrôleur InCond

Le routage est une étape très importante dans le développement d'une architecture pour l'implémentation sur cible FPGA. Elle consiste à créer des connexions physiques entre l'élément logique du FPGA en représentant les paramètres de l'architecture. Chaque signal doit donc être connecté aux ressources de routage de FPGA.

Après ces résultats de simulation, la conception a été synthétisée, une diapositive de flux de bits de l'ensemble du système a été générée. Il a été vitrifié avec succès en le téléchargeant sur la cible FPGA citée ci-dessus.

DeviceUtilizationsummary			
Logic Utilization	Used	Available	Utilization
Number of Slice Flip Flops	96	4,896	1%
Number of 4 inputLUTs	290	4,896	5%
Number of occupied Slices	202	2,448	8%
Number of Slices containing only related logic	202	202	100%
Number of Slices containing unrelated logic	0	202	0%
Total Number of 4 input LUTs	338	4,896	6%

Number used as logic	290		
Number used as route-thru	48		
Number of bonded IOBs	97	108	89%
Number of BUFGMUXs	1	24	4%
Number of MULT18X18SIOs	4	12	33%
Average Fanout of Non-clock Nets	1.68		

Tableau 4- 1 Ressource utilisées de l'algorithme P&O et INCD.

4.9 Conclusion et discussions des résultats

En examinant les figures 4.3, 4.6, et 4.7 nous constatons que l'extraction du maximum de puissance en utilisant le XSG est plus grand que dans le cas du Simulink on remarque dans ce cas que la puissance de sortie avoisine la puissance délivrée par la panneau solaire (60W). En examinant plus précisément les deux figures 4.6 lors de la variation de l'insolation notre system atteint d'une manière très rapide le PPM. nous simulé des scénarios aléatoires de variation de température et même temps et nous avons obtenus les mêmes résultats. C'est-à-dire notre système suit règlement le PPM.

Conclusion générale

Les énergies renouvelables constituent une excellente alternative aux énergies fossiles et nucléaires vue leurs différents avantages : inépuisables, non polluantes, et décentralisées. Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque connaît un intérêt grandissant ces dernières années.

Un générateur photovoltaïque présente une caractéristique tension-puissance en cloche qui dépend de plusieurs paramètres extérieurs et intérieure. En d'autres termes, il existe un seul point de fonctionnement pour extraire la puissance maximale du générateur et ce point n'est pas fixe, il change avec les conditions extérieures, donc plus on est loin de lui, plus la puissance délivrée par le module photovoltaïque est faible et plus le rendement de notre installation est mauvais.

Pour faire face à ce problème les ingénieurs ont mis au point des procédés pour garder le point de fonctionnement l'installation sur le point de puissance maximale quelque soient les conditions météorologiques. Ces méthodes de poursuite s'appellent « maximum power point tracking » ou MPPT. Le choix optimal d'une méthode de poursuite passe par le cahier des charges, car chaque méthode présente des avantages et des inconvénients.

Le travail présenté dans ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons étudié l'effet photovoltaïque où nous avons expliqué le principe de conversion ainsi l'analyse du générateur photovoltaïque (GPV).

Dans le deuxième chapitre, nous avons présentons les principes de fonctionnement de notre convertisseur, et on a présenté le rôle des algorithmes de contrôleur le MPPT.

Ainsi, on a décrit le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. On a présenté la méthode MPPT basées sur contre réaction de puissance la méthode de perturbation et observation. Cette dernière méthode est utilisée dans ce travail cause de sa simplicité, et son exigence seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque

Le troisième chapitre est le plus important dans notre travail. Nous avons fait une simulation de notre système photovoltaïque : le générateur photovoltaïque, l'étage d'adaptation et le contrôleur MPPT (P&O) et (InCd) sur SIMULINK MATLAB.

Enfin le quatrième chapitre comme notre but était d'implémenter un contrôleur MPPT efficace sur une carte FPGA l'utilisation de l'outil de conception haut niveau « System Generator » est très bénéfique pour la vérification du comportement de l'algorithme sur Simulink. Les simulations effectuées permettent de concevoir un algorithme efficace avec un minimum possible de porte logique, dans notre cas nous

Bibliographie

Table of Contents

1.1	Introduction	5
1.2	Effet photovoltaïque	5
1.3	Cellule photovoltaïque	6
1.4	Modélisation d'une cellule PV	7
1.5	Différents modèles électriques de la cellule PV	8
1.5.1	Modèle à quatre paramètres (4p)	8
1.6	Résolution de l'équation caractéristique $i(v)$	9
1.7	Différents paramètres de la cellule photovoltaïque	10
1.8	Générateur photovoltaïque	11
1.9	Caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque	13
1.10	L'influence des conditions météorologiques sur les cellules	14
1.10.1	L'influence de la température	14
1.10.2	L'influence de l'ensoleillement	15
1.11	Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge	16
1.12	Les composants d'un système photovoltaïque	18
1.13	Conclusion	19
2.1	Introduction	20
2.3	Etude du fonctionnement de l'hacheur survolteur (Boost)	22
2.4	Dimensionnement des composants électroniques	32
2.4.1	Les caractéristiques du panneau photovoltaïque Siemens SM-50	33
2.4.2	La charge DC	34
2.4.4	Fréquence de commutation	36
2.4.5	Dimensionnement de l'inductance	36
2.4.6	Dimensionnement et choix des condensateurs (C_{in} et C_{out})	38
2.8	Conclusion	40
3.1	Introduction	41
3.2	Les commandes MPPT	41
3.3	Les Méthodes MPPT	42
3.5	Algorithme Perturbation et Observation (P&O) :	45
3.6	La simulation du système photovoltaïque :	47
3.7	Simulation MPPT (P&O) :	48
3.8	Conclusion	53
4.1	Introduction	54
4.2	Les circuits FPGA	54

4.3	Méthode de programmation.....	55
4.6	La simulation de commande MPPT sous System Generator.....	57
4.7	Résultats et interprétations.....	59
4.7.1	Simulation du système sous les conditions standards	59
4.8	La Synthèse de contrôleur MPPT	62
4.9	Conclusion et discussions des résultats	65

Liste de Figure

Figure 1- 1 La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique.....	6
Figure 1- 2 Les différents types de cellules.....	7
Figure 1- 3 Modèle à 4 paramètres	8
Figure 1- 4 Caractéristiques typiques d'un générateur PV.....	12
Figure 1- 5 Schéma bloc de générateur PV.....	12
Figure 1- 6: Caractéristiques I(V) et P(V) d'un générateur photovoltaïque	14
Figure 1- 7 Influence de la température sur la courbe I-V de panneau.	15
Figure 1- 8 Influence de la température sur la courbe P-V de panneau	15
Figure 1- 9 Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V de panneau.....	16
Figure 1- 10 Influence de l'ensoleillement sur la courbe P-V de panneau.....	16
Figure 1- 11 Etage d'adaptation entre GPV et la charge	17
Figure 1-12 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque à base d'un convertisseur DC contrôlé par une commande MPPT	18
Figure 1- 13 les composants d'un système PV.....	19
Figure 2- 1 Représentation de la sortie d'un commutateur en ouverture/fermeture sur une période.....	21
Figure 2- 2Circuit électrique idéalisé du convertisseur DC-DC "Boost".	22
Figure 2- 3 Forme du signal de commande du commutateur S	22
Figure 2- 4 Equivalence électrique : Source de courant source de tension.	23
Figure 2- 5 Interrupteur (Switch) fermé pendant un intervalle de temps dT	25
Figure 2- 6 Switch ouvert pendant un intervalle de temps $(1-d) T$	26
Figure 2- 7 Variation du courant de l'inducteur I_L en fonction du temps.....	26
Figure 2- 8 Allures de la tension aux bornes de la bobine et le courant qui la traverse pendant.....	28
Figure 2- 9 Allures de la tension aux bornes de la diode et le courant qui la traverse pendant une période de conduction T	30
Figure 2- 10 Courant circulant dans le condensateur d'entrée C_{in}	31
Figure 2- 11 Allures des tensions d'entrée et aux bornes de la bobine pendant une période de conduction T	31
Figure 2- 12 Impédance d'entrée de l'ensemble convertisseur + charge résistive.....	32
Figure 2- 13 Schéma électrique d'un convertisseur "Boost" idéalisé.....	33
Figure 2- 14 Quantité de charge perdue dans le condensateur C_{in} durant une période de conduction T	39
Figure 2- 15 Quantité de charge emmagasinée dans le condensateur C_{out} durant une période de commutation T	40
Figure 3- 1 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT	42
Figure 3- 2 Organigramme de l'algorithme d'incrément de l'inductance	45
Figure 3- 3 Organigramme de l'algorithme P&O	46
Figure 3- 4 Architecture adoptée du contrôleur P&O dans l'environnement SIMULINK	48

Figure 3- 5 Architecture adoptée du contrôleur INC dans l’environnement SIMULINK	48
Figure 3- 6 Puissance P&O	49
Figure 3- 7 Puissance INC.....	49
Figure 3- 8 Temps de monté P&O	50
Figure 3- 9 Temps PPM down P&O.....	51
Figure 3- 10 Temps de PPM up P&O.....	51
Figure 3- 11 Temps de monté INC	51
Figure 3- 12 Temps de PPM down INC	52
Figure 3- 13 Temps de PPM UP INC.....	52
Tableau 3- 1 Comparaison (rendement/ Puissance) de deux méthode P&O et INCD.....	53
Tableau 3- 2 Comparaison des temps et PPM de deux méthode P&O et INCD.....	53
Figure 4- 1 Architecture du contrôleur MPPT (P&O) adopté dans l’environnement XSG.	57
Figure 4- 2 Conditions météorologiques avec une insolation constante et température	60
Figure 4- 3 Puissance pour une insolation constante et température constante.....	60
Figure 4- 4 Puissance pour une insolation constante et température constante zoomé.....	60
Figure 4- 5 Conditions météorologiques avec une insolation variable et température constante	61
Figure 4- 6 Puissance pour une insolation variable et température constante	61
Figure 4- 7 Puissance pour une insolation constante et température constante zoomé.....	62
Figure 4- 8 Schématique de la commande MPPT (P&O).	62
Figure 4- 9 Architecture du commande MPPT (P&O) sur circuit FPGA.	63
Tableau 4- 10 Ressource utilisées de l’algorithme P&O.....	65

Liste des Tableaux

Tableau 3- 1 Comparaison (rendement/ Puissance) de deux méthode P&O et INCD.....	53
Tableau 3- 2 Comparaison des temps et PPM de deux méthode P&O et INCD.....	53
Tableau 4- 1 Ressource utilisées de l'algorithme P&O.....	65

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce manuscrit est consacré à l'étude et implémentation d'un modèle de convertisseur sur circuit FPGA appliqué aux systèmes photovoltaïques. Ces derniers sont devenus la préoccupation de grande importance à l'échelle internationale vue les conséquences catastrophiques que provoquent les énergies faucilles.

Cette énergie solaire photovoltaïque, fluctuante, mais inépuisable et modulaire, est devenue une composante incontournable des politiques énergétiques progressant rapidement en termes d'efficacité, elle devrait être économiquement, compétitive dans les prochaines années. Les investissements d'aveniret d'autres soutiens à la filière sont un enjeu stratégique pour l'approvisionnement énergétique, de développement industriel, d'emplois, de compétitivité et de lutte contre le changement climatique.

Notre travail a consacré essentiellement à l'étage intermédiaire entre la charge et la source d'énergie photovoltaïque (Le panneau solaire). L'étude et le dimensionnement de celui-ci est basée sur un cahier de charge donné.

L'objectif tracé est atteint avec acceptance, en effet les résultats de simulation sous Simulink ont été obtenus comme prévu.

La simulation dans l'environnement Xilinx system generator pour implémenter notre modèle du convertisseur a montré une bonne concordance des résultats avec Simulink. Les ressources exploitées pour l'implémentation est favorablement admissible et économique.

Il est a noté dans ce travail que la maitrise des outils de Xilinx facilite la conception et la mise en œuvre des systèmes électroniques embarqués.

Le projet que nous avons envisagé était très bénéfique pour nous. Il nous a permis de concrétiser et de consolider d'une manière pratique les différentes notions que nous avons acquies durant notre formation. En particulier, ce projet nous a permis de découvrir un domaine de recherche très prometteur et d'actualité. Ceci était très utile et pourrait guider et orienter nos futurs travaux. En bref, nous pouvons dire que ce projet était un bon complément pour notre formation.

En perspectives nous proposons la réalisation pratique de la chaîne complète du système photovoltaïque, pour des applications nationales (Projet Desertec).

Bibliographie

Table des matières

1.1	Introduction	5
1.2	Effet photovoltaïque	5
1.3	Cellule photovoltaïque	6
1.4	Modélisation d'une cellule PV	7
1.5	Différents modèles électriques de la cellule PV	8
1.5.1	Modèle à quatre paramètres (4p)	8
1.6	Résolution de l'équation caractéristique (v)	9
1.7	Différents paramètres de la cellule photovoltaïque	10
1.8	Générateur photovoltaïque	11
1.9	Caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque	13
1.10	L'influence des conditions météorologiques sur les cellules	14
1.10.1	L'influence de la température	14
1.10.2	L'influence de l'ensoleillement	15
1.11	Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge	16
1.12	Les composants d'un système photovoltaïque	18
1.13	Conclusion	19
2.1	Introduction	20
2.3	Etude du fonctionnement de l'hacheur survolteur (Boost)	22
2.4	Dimensionnement des composants électroniques	32
2.4.1	Les caractéristiques du panneau photovoltaïque Siemens SM-50	33
2.4.2	La charge DC	34
2.4.4	Fréquence de commutation	36
2.4.5	Dimensionnement de l'inductance	36
2.4.6	Dimensionnement et choix des condensateurs (C_{in} et C_{out})	38
2.8	Conclusion	40
3.1	Introduction	41
3.2	Les commandes MPPT	41
3.3	Les Méthodes MPPT	42
3.5	Algorithme Perturbation et Observation (P&O) :	45
3.6	La simulation du système photovoltaïque :	47
3.7	Simulation MPPT (P&O) :	48
3.8	Conclusion	53

4.1 Introduction.....	54
4.2 Les circuits FPGA.....	54
4.3 Méthode de programmation.....	55
4.6 La simulation de commande MPPT sous System Generator.....	57
4.7 Résultats et interprétations.....	59
4.7.1 Simulation du système sous les conditions standards	59
4.8 La Synthèse de contrôleur MPPT	62
4.9 Conclusion et discussions des résultats	65

Liste des figures

Figure 1- 1 La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique.....	6
Figure 1- 2 Les différents types de cellules	7
Figure 1- 3 Modèle à 4 paramètres	8
Figure 1- 4 Caractéristiques typiques d'un générateur PV	12
Figure 1- 5 Schéma bloc de générateur PV	12
Figure 1- 6: Caractéristiques I(V) et P(V) d'un générateur photovoltaïque.....	14
Figure 1- 7 Influence de la température sur la courbe I-V de panneau.	15
Figure 1- 8 Influence de la température sur la courbe P-V de panneau.....	15
Figure 1- 9 Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V de panneau.....	16
Figure 1- 10 Influence de l'ensoleillement sur la courbe P-V de panneau.....	16
Figure 1- 11 Etage d'adaptation entre GPV et la charge	17
Figure 1-12 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque à base d'un convertisseur DC contrôlé par une commande MPPT	18
Figure 1- 13 les composants d'un système PV.....	19
Figure 2- 1 Représentation de la sortie d'un commutateur en ouverture/fermeture sur une période.	21
Figure 2- 2Circuit électrique idéalisé du convertisseur DC-DC "Boost".	22
Figure 2- 3 Forme du signal de commande du commutateur S	22
Figure 2- 4 Equivalence électrique : Source de courant source de tension.	23
Figure 2- 5 Interrupteur (Switch) fermé pendant un intervalle de temps dT	25
Figure 2- 6 Switch ouvert pendant un intervalle de temps $(1 -d) T$	26
Figure 2- 7 Variation du courant de l'inducteur I_L en fonction du temps.	26
Figure 2- 8 Allures de la tension aux bornes de la bobine et le courant qui la traverse pendant.....	28
Figure 2- 9 Allures de la tension aux bornes de la diode et le courant qui la traverse pendant une période de conduction T	30
Figure 2- 10 Courant circulant dans le condensateur d'entrée C_{in}	31
Figure 2- 11 Allures des tensions d'entrée et aux bornes de la bobine pendant une période de conduction T	31
Figure 2- 12 Impédance d'entrée de l'ensemble convertisseur + charge résistive.	32
Figure 2- 13 . Schéma électrique d'un convertisseur "Boost" idéalisé	33
Figure 2- 14 Quantité de charge perdue dans le condensateur C_{in} durant une période de conduction T	39
Figure 2- 15 Quantité de charge emmagasinée dans le condensateur C_{out} durant une période de commutation T	40
Figure 3- 1 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT	42
Figure 3- 2 Organigramme de l'algorithme d'incrémental de l'inductance	45

Figure 3- 3 Organigramme de l’algorithme P&O.....	46
Figure 3- 4 Architecture adoptée du contrôleur P&O dans l’environnement SIMULINK	48
Figure 3- 5 Architecture adoptée du contrôleur INC dans l’environnement SIMULINK.....	48
Figure 3- 6 Puissance P&O.....	49
Figure 3- 7 Puissance INC	49
Figure 3- 8 Temps de monté P&O.....	50
Figure 3- 9 Temps PPM down P&O.....	51
Figure 3- 10 Temps de PPM up P&O.....	51
Figure 3- 11 Temps de monté INC	51
Figure 3- 12 Temps de PPM down INC	52
Figure 3- 13 Temps de PPM UP INC	52
Figure 4- 1 Architecture du contrôleur MPPT (P&O) adopté dans l’environnement XSG.	57
Figure 4- 2 Conditions météorologiques avec une insolation constante et température	60
Figure 4- 3 Puissance pour une insolation constante et température constante.....	60
Figure 4- 4 Puissance pour une insolation constante et température constante zoomé.....	60
Figure 4- 5 Conditions météorologiques avec une insolation variable et température constante	61
Figure 4- 6 Puissance pour une insolation variable et température constante.....	61
Figure 4- 7 Puissance pour une insolation constante et température constante zoomé	62
Figure 4- 8 Schématique de la commande MPPT (P&O).	62
Figure 4- 9 . Architecture du commande MPPT (P&O) sur circuit FPGA.	63

Liste des tableaux

Tableau 3- 1 Comparaison (rendement/ Puissance) de deux méthode P&O et INCD	53
Tableau 3- 2 Comparaison des temps et PPM de deux méthode P&O et INCD.....	53
Tableau 4- 1 Ressource utilisées de l’algorithme P&O.....	65

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce manuscrit est consacré à l'étude et implémentation d'un modèle de convertisseur sur circuit FPGA appliqué aux systèmes photovoltaïques. Ces derniers sont devenus la préoccupation de grande importance à l'échelle internationale vu les conséquences catastrophiques que provoquent les énergies fossiles.

Cette énergie solaire photovoltaïque, fluctuante, mais inépuisable et modulaire, est devenue une composante incontournable des politiques énergétiques progressant rapidement en termes d'efficacité, elle devrait être économiquement compétitive dans les prochaines années. Les investissements d'avenir et d'autres soutiens à la filière sont un enjeu stratégique pour l'approvisionnement énergétique, de développement industriel, d'emplois, de compétitivité et de lutte contre le changement climatique.

Notre travail a consacré essentiellement à l'étage intermédiaire entre la charge et la source d'énergie photovoltaïque (Le panneau solaire). L'étude et le dimensionnement de celui-ci est basée sur un cahier de charge donné.

L'objectif tracé est atteint avec acceptance, en effet les résultats de simulation sous Simulink ont été obtenus comme prévu.

La simulation dans l'environnement Xilinx system generator pour implémenter notre modèle du convertisseur a montré une bonne concordance des résultats avec Simulink. Les ressources exploitées pour l'implémentation est favorablement admissible et économique.

Il est à noter dans ce travail que la maîtrise des outils de Xilinx facilite la conception et la mise en œuvre des systèmes électroniques embarqués.

Le projet que nous avons envisagé était très bénéfique pour nous. Il nous a permis de concrétiser et de consolider d'une manière pratique les différentes notions que nous avons acquies durant notre formation. En particulier, ce projet nous a permis de découvrir un domaine de recherche très prometteur et d'actualité. Ceci était très utile et pourrait guider et orienter nos futurs travaux. En bref, nous pouvons dire que ce projet était un bon complément pour notre formation.

En perspectives nous proposons la réalisation pratique de la chaîne complète du système photovoltaïque, pour des applications nationales (Projet Desertec).

1. Composants et les types de cellule

La cellule est l'unité de conversion la plus adaptée à l'effet photovoltaïque. Comme l'affirme les documents [5] et [4], les matériaux et la méthodologie utilisée pour la conception de ces cellules influent sur l'énergie récupérée. Il en résulte que de nombreuses solutions ont été développées et nous allons brièvement les présenter.

1.1. Silicium Monocristallin

La cellule de silicium monocristallin est historiquement la plus largement utilisée et commercialisée. La fabrication de cellules de silicium commence avec l'extraction du cristal de dioxyde de silicium. Ce matériel est désoxyde dans de grands fours, purifié et solidifié. Ce processus a atteint une pureté de 98 et 99 % ce qui permet un rendement énergétique fort (en effet, plus le revêtement de la cellule est pur, plus l'effet photovoltaïque est facilité). Le silicium est alors fusionné avec une petite quantité de dopant, normalement le bore qui est de type P puis coupé en fines tranches d'environ 300 μm . Après la coupe et le nettoyage des impuretés des tranches, des impuretés de type N sont introduites.

via un processus de diffusion contrôlée: les tranches de silicium sont exposées à des vapeurs de phosphore dans un four où la température varie de 800 $^{\circ}\text{C}$ à 1000 $^{\circ}\text{C}$.

1.2 Silicium poly cristallin

Les cellules en silicium poly cristallin sont moins coûteuses que celles en silicium monocristallin car les processus de préparation des cellules sont moins stricts. Leur efficacité est cependant plus faible.

Le processus de production est semblable à celui présenté précédemment dans le cas de la fabrication de cellule en silicium mais avec un contrôle moins rigoureux. Il en résulte que les

cellules obtenues sont moins coûteuses mais aussi moins efficaces (12.5% de rendement en moyenne).

Leur intérêt réside dans la multiplicité des formes sous laquelle le revêtement peut se présenter : lingots à découper, ruban ou fil à déposer,... Chaque technique permet de produire des cristaux ayant des caractéristiques spécifiques, y compris la taille, la morphologie et la concentration des impuretés.

1.3 Silicium amorphe

Les cellules de silicium amorphe diffèrent des cellules présentées précédemment puisque leur structure présente un haut degré de désordre dans la structure des atomes. L'utilisation de silicium amorphe pour les cellules solaires a montré de grands avantages à la fois au niveau des propriétés électriques et le processus de fabrication (processus simple, faiblement consommateur d'énergie, peu coûteux, possibilité de produire des cellules avec grands secteurs). Mais, même avec un coût réduit pour la production, l'utilisation du silicium amorphe a deux inconvénients : le premier est le rendement de conversion faible par rapport aux cellules de mono et poly cristallin de silicium. Le deuxième est le fait que les cellules sont affectées par un processus de dégradation dans les premiers mois d'opération, réduisant ainsi leur durabilité. En 1993, la production de cellules photovoltaïques a atteint un sommet à 60MWp, et le silicium demeure le matériau le plus utilisé. Toutefois, la recherche de matériaux alternatifs est intense et concentrée dans le domaine des films minces, comme le silicium amorphe. La technologie des cellules de films minces n'est pas encore maîtrisée mais pourrait s'avérer intéressante car elle utilise moins de matériau que ceux en structure cristalline et elle nécessite moins d'énergie dans le processus de fabrication.

2 Présentation des FPGA et conception sur ISE 7.2

2.1 Description d'un FPGA (Field Programmable Gate Array)

Un FPGA ou (réseaux logiques programmables) consiste en une matrice carrée de cellules configurables CLB (Configurables Logique Blocs) permettant de réaliser des fonctions combinatoires et des fonctions séquentielles. Tout autour de ces blocs logiques

configurables, nous trouvons des blocs d'entrées /sorties IOB (Input Output Blocs) dont le rôle est de gérer les entrées-sorties réalisant l'interface avec les modules extérieurs. La figure B.1 présente l'architecture générale d'un FPGA.

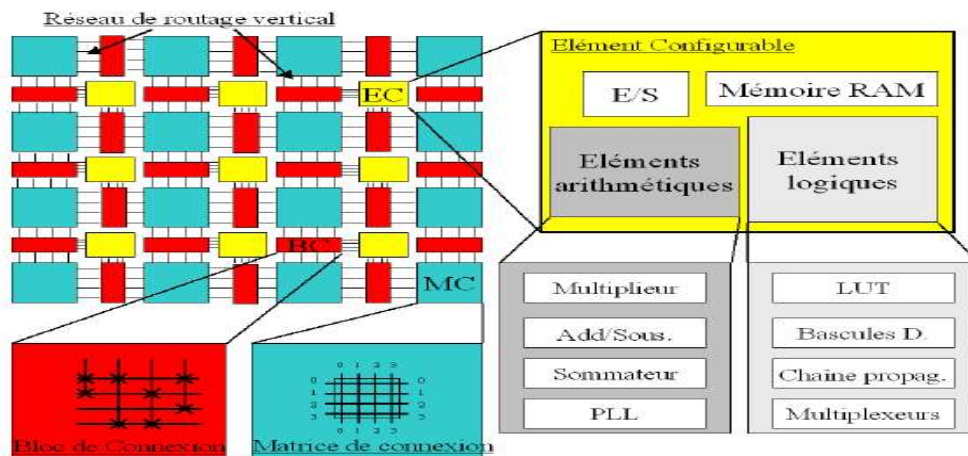
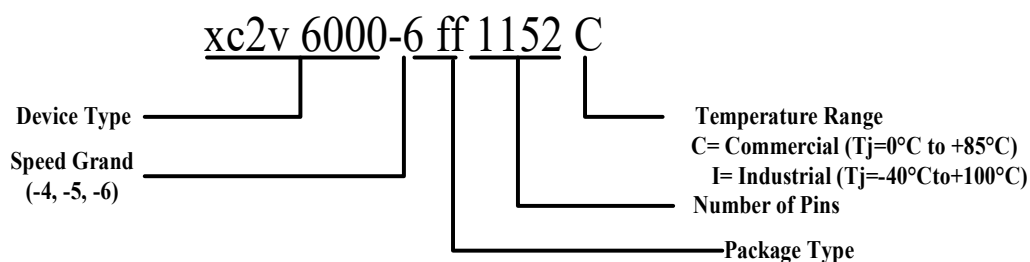


Figure B.1. Architecture générale d'un FPGA.

2.2 Les familles des FPGA

Grâce aux évolutions de la technologie microélectronique, les FPGA deviennent de plus en plus performants avec des capacités d'intégration, sans cesse augmentées. Longtemps réalisées autour de blocs logiques configurables à base de LUT (Look Up Table), les récentes familles FPGA (VIRTEX-II, VIRTEX-II pro) peuvent aujourd'hui comporter des mémoires de 18 kbits, de blocs multiplieurs et processeurs.

Les circuits FPGA de XILINIX sont caractérisés par une nomenclature spécifique qui définit les performances de chaque famille. Cette nomenclature est la suivante:



3 Description du logiciel MATLAB

MATLAB, c'est un logiciel permettant d'effectuer des opérations complexes sur des matrices et vecteurs directement avec la syntaxe matricielle (presque la même écriture que dans les livres et publications). MATLAB, c'est un interpréteur d'opérations matricielles. C'est aussi un langage de programmation de haut niveau.

MATLAB est écrit en C, mais il ne demande aucune connaissance du C de l'utilisateur.

Avec MATLAB, on peut effectuer tout ce que l'on peut faire avec un langage de programmation, mais beaucoup plus rapidement et efficacement. C'est un outil de recherche et d'application fantastique pour qui maîtrise bien l'écriture matricielle (et ses notions d'algèbre linéaire).