

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد حطاب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Pour l'obtention du diplôme MASTER en Électronique option microsysteme

présenté par

ZENAIDI TARIQ

&

HAIF AHMED YOUSRI

Comparaison de différents convertisseurs DC-DC pour un MPPT basé sur XSG application aux systèmes photovoltaïques

Proposé par : Mr. TADRIST R

Co promoteur : ASSAD ZAKYA

Année Universitaire 2015-2016

Introduction générale

Le dernier siècle a connu une consommation irrationnelle en matière d'énergie qui ne cesse de croître dans toutes les régions du monde. Nos besoins énergétiques auront tendance à augmenter encore plus dans les années à venir et donc une reconsidération de nos ressources s'avère incontournable pour envisager un réel développement durable et respectueux de l'environnement.

Les sources d'énergies renouvelables présentent à la fois une solution fiable et infinie. À ce sujet, le soleil, le vent, la biomasse, la mer,... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. L'énergie solaire est vue comme étant la meilleure alternative, et représente l'avenir du monde en matière de ressources énergétiques. En effet, ce que reçoit la terre sous forme d'énergie solaire est l'équivalent de la consommation électrique de 5.9 milliards de personnes pendant 27 ans [1].

D'après l'Agence Internationale de l'Énergie « AIE », une surface de 145.000km², soit 4% de la surface des déserts arides de panneaux photovoltaïques, suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux [1]. L'Algérie se situe dans l'une des régions les plus ensoleillées du monde, elle bénéficie d'une forte capacité d'exportation de l'énergie électrique solaire. La surface du désert seul est estimée à plus d'un million et demi de km² : un potentiel géant en énergie solaire, cette dernière, si elle est bien exploitée, peut facilement couvrir, à elle seule tout le besoin national en terme d'énergie électrique. Au-delà de toutes considérations hypothétiques, il apparaît que le photovoltaïque se présente comme une solution d'avenir car il offre une multitude d'avantages.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant électrique lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série et en parallèle forme un générateur photovoltaïque.

Une adaptation de puissance entre la source et la charge s'avère importante pour un meilleur fonctionnement et afin d'assurer la fiabilité du système. Avec le développement

d'une électronique de puissance spécifique dédiée aux applications photovoltaïques, beaucoup de systèmes de conversion innovants ont été conçus des hacheurs réalisant la conversion DC-DC ont été utilisés pour maximiser l'énergie pouvant être soutirée des panneaux photovoltaïques grâce à un contrôle MPPT, mais également pour adapter le niveau de tension du générateur PV à celui du bus continu.

Le nombre de modules photovoltaïques installés en Algérie continue de croître de manière importante. Ces panneaux seront exposés à toutes les variations météorologiques, ce qui peut altérer l'efficacité énergétique des systèmes photovoltaïques. L'objectif de ce travail consiste à faire une comparaison de trois convertisseurs DC-DC pour un MPPT basé sur XSG application aux systèmes photovoltaïques. L'environnement Matlab/Simulink est utilisé pour simuler l'ensemble panneau solaire, l'étage d'adaptation, et la charge. Par contre le contrôleur MPPT (P10) est implémenté sur cible FPGA.

Dans ce contexte, ce mémoire est établi sur trois chapitres :

- Dans le premier chapitre nous présentons les généralités sur le générateur photovoltaïque .
- Dans le deuxième chapitre, l'étude, le dimensionnement et la modélisation des trois convertisseurs DC-DC à savoir : le BOOST, le SEPIC et le BUCK, seront envisagés.
- Le troisième chapitre sera consacré dans une première partie à la simulation du système sous Simulink/Matlab. Dans la deuxième partie, l'implémentation du contrôleur MPPT sur cible FPGA sera mise en œuvre en utilisant l'environnement Xilinx System Generator. Les résultats obtenus sous pour les deux environnements seront comparés afin de déterminer les meilleures performances de chaque convertisseur.
- Nous terminerons ce travail avec une conclusion générale et des perspectives.

RESUME

L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE (PV) EST L'UNE DES RESSOURCES LES PLUS IMPORTANTES D'ENERGIE CAR IL EST PROPRE, SANS POLLUTION ET SANS FIN. LE MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) EST UTILISE DANS LE PHOTOVOLTAÏQUES (PV) AFIN DE MAXIMISER LA PUISSANCE DE SORTIE DES PANNEAUX SOLAIRES, QUEL QUE SOIT LES VARIATIONS DES CONDITIONS DE TEMPERATURE ET DE RAYONNEMENT. DANS CE TRAVAIL TROIS CONVERTISSEURS DC-DC DIFFERENTS NON-ISOLES POUR UN MPPT SERONT ETUDIES POUR UNE APPLICATION PHOTOVOLTAÏQUE. EN EFFET CES DERNIERS SONT LARGEMENT UTILISES DANS LE DOMAIN PHOTOVOLTAÏQUE. CES CONVERTISSEURS SONT: LE BUCK , LE BOOST ET LE SEPIC . DANS LA LITTERATURE, CES CONVERTISSEURS SONT AUSSI LARGEMENT ETUDIES. DANS CETTE ETUDE UNE IMAGE CLAIRE DES DIFFERENTS CONVERTISSEURS CONTINU-CONTINU POUR L'APPLICATION MPPT SERA PRESENTEE. L'ALGORITHME PERTUB AND OBSERVE EST UTILISE POUR EVALUER LA PERFORMANCE DE CHAQUE CONVERTISSEUR.

ABSTRACT

PHOTOVOLTAIC (PV) ENERGY IS ONE OF THE MOST IMPORTANT ENERGY RESOURCES BECAUSE IT IS CLEAN, POLLUTION-FREE AND ENDLESS. MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) IS USED IN PHOTOVOLTAICS (PV) TO MAXIMIZE THE OUTPUT POWER OF SOLAR PANELS, REGARDLESS OF CHANGES IN TEMPERATURE AND RADIATION CONDITIONS. IN THIS WORK THREE NON-ISOLATED DC-DC CONVERTERS FOR ONE MPPT WILL BE STUDIED FOR A PHOTOVOLTAIC APPLICATION. INDEED THESE ARE WIDELY USED IN THE PHOTOVOLTAIC DOMAIN. THESE CONVERTERS ARE: BUCK , BOOST AND SEPIC. IN THE LITERATURE, THESE CONVERTERS ARE ALSO WIDELY STUDIED. IN THIS STUDY A CLEAR PICTURE OF THE VARIOUS DC-DC CONVERTERS FOR THE MPPT APPLICATION WILL BE PRESENTED. THE PERTURB AND OBSERVATIONAL ALGORITHM IS USED TO EVALUATE THE PERFORMANCE OF EACH CONVERTER

Introduction générale 1

Chapitre 1 : Généralité sur le générateur photovoltaïque

1.1 Introduction 4

1.2 Généralités sur les cellules photovoltaïques 4

1.2.1 Rappel sur les semi-conducteurs 4

1.2.2 L'effet photovoltaïque et la jonction PN 5

1.2.3 La cellule photovoltaïque 6

1.2.4 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque 7

1.2.5 Type et rendement des cellules photovoltaïques 7

a) Cellules monocristallines 7

b) Cellules poly cristallines 7

c) Cellules amorphes 8

d) Rendement d'une cellule 9

1.2.6 Modèles de la cellule photovoltaïque 9

a) Modèle à une seule exponentielle 9

b) Modèle à deux exponentielles 11

1.2.7 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque 12

a) Courant de court-circuit 12

b) Tension de c Facteur de forme 12

c) circuit ouvert 12

d) Le rendement 13

1.3 Les modules photovoltaïques 13

1.4 Les générateurs PV 13

1.5 Influence de la température sur les courbes I(V), P(V) 14

1.6 Influence de l'ensoleillement sur les courbes I(V), P(V) 15

1.7 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque 15

a) Les avantages 15

b) Les inconvénients 16

1.8 Conclusion 17

Chapitre 2 : Les convertisseurs et la commande MPPT

2.1 Introduction 19

2.2 Convertisseurs DC-DC 20

2.2.1 Mode de fonctionnement du convertisseur statique	21
- <i>Mode de Conduction Continue (MCC)</i>	21
- <i>Mode de Conduction Discontinue (MCD)</i>	21
2.2.3 Convertisseurs DC/DC pour les systèmes d'énergie solaire	21
2.2.4 Les type des convertisseurs DC-DC	21
2.2.5 Topologie de convertisseurs DC/DC	22
2.3 Le convertisseur SEPIC	23
2.3.1 Les avantage du convertisseur SEPIC	23
2.3.2 Synoptique	23
2.3.3 Principe de fonctionnement	26
2.3.4 Dimensionnement d'un convertisseur de type SEPIC	27
a) Rapport cyclique	27
b) Inductances	27
c) Condensateur de couplage	28
d) Condensateur de filtrage	28
e) Transistor	28
f) Diode	28
2.3.5 Application numérique	28
2.4 Le Convertisseur élévateur BOOST	29
2.4.1 Avantage de convertisseur BOOST	29
2.4.2 Schéma de convertisseur	29
2.4.3 Principe de fonctionnement	30
2.4.4 Chronogrammes	31
2.4.5 Choix des composants	32
a. Le rapport cyclique	32
b. La bobine	32
c. Le condensateur	32
d. Choix de la diode et du transistor T	32
e. Ondulations de sorties	32
2.4.6 Application numérique	33
2.5 Convertisseur abaisseur BUCK	33
2.5.1 Schéma de convertisseur	33

2.5.2 Principe de fonctionnement	34
2.5.3 Chronogrammes	35
2.5.4 Choix des composants	35
a. Rapport cyclique	35
b. Choix de la bobine	35
c. Choix du condensateur	36
d. Choix de la diode et du transistor T	36
e. Ondulations de sorties	37
2. 5.5 Application numérique	37
2.6 RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (MPPT) D'UN GPV	37
2.6.1 Introduction	37
2.6.2 Principe de la recherche du point de puissance maximal	38
2.6.3 Techniques de commande MPPT	39
2.7 Conclusion	43
Chapitre 3 : Simulation sous Matlab - SIMULINK et Xilinx	
3.1 Introduction	45
A. Implémentation du système dans l'environnement SIMULINK	45
1. Introduction	45
2. Valeurs des composants adoptées pour la simulation	45
2.1 Valeurs des composants adoptées pour la simulation de SEPIC	45
2.2 Valeurs des composants adoptées pour la simulation de BOOST	46
2.3 Valeurs des composants adoptées pour la simulation de BUCK	46
3. Simulation sous SIMULINK	47
3.1 Etage d'adaptation convertisseur SEPIC	47
3.2 Etage d'adaptation convertisseur BOOST	48
3.3 Etage d'adaptation convertisseur BUCK	50
4 .Algorithme P&O (perturb and observe) sous MATLAB SIMULINK	51
B. Implémentation du système sur XSG	54
1. INTRODUCTION	54
2. Le system generator XSG	54
3. MPPT perturbe et observe« P&O»sous XILINX	55
3.2 Conclusion	59

Table des matières

Conclusion générale 60

Bibliographie 61

Listes des acronymes et abréviations

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

DC-DC: Direct-Current Direct-Current.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

PWM : Pulse Width Modulation.

PPM : point de puissance maximale.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

SEPIC : Single Ended Primary Inductor Converter.

Boost : Step-Up.

XSG : Xilinx système generator.

MCC: Mode de Conduction Continue.

MCD : Mode de Conduction Discontinue.

FPGA : (field-programmable gate array, réseau de portes programmables in situ).

η_{STC} : Rendement de la cellule photovoltaïque.

P_m : Puissance produite par le générateur PV.

E_{STC} : Eclairement absorbé par la cellule.

$S_{cellule}$: Surface de la cellule [m^2] .

I : Le courant de cellule.

V : La tension de cellule.

R_s : La résistance série de la cellule (Ω).

T : La température de la cellule ($^{\circ}K$).

q : La charge d'électron $e = 1.6 * 10^{-19} C$.

K : interrupteur K .

I_0 : Le courant de saturation (A).

K : La constante de Boltzman ($1.3854 * 10^{-2} J.K^{-1}$).

V_g : La tension de seuil de diode (1.1V).

n : Le facteur de qualité de diode.

R_s : (La résistance série) représente les résistances de contact.

R_p : (La résistance shunt (R_{sh})) caractérise les divers courants de fuite dans la jonction PN .

I_{D1}, I_{D2} : Sont les courants de saturation des diodes .

n_1, n_2 : Facteurs de pureté de la diode.

D : diode.

T : transistor .

α : Rapport cyclique .

V_{OUT} : La tension de sortie (V).

V_{IN} : La tension d'entrée (V).

L : Inductance (H).

ΔI_L : Ondulation du courant dans l'inductance (A).

f : La fréquence de découpage. (Hz).

I_{OUT} : Courant de sortie (A).

V_D : La tension de diode (V).

I_C : Courant de condensateur (A) .

ΔV_C : Ondulation de la tension de condensateur (V).

V_{ripple} : L'ondulation de tension (V).

V_T : La tension de transistor (V).

I_T : Courant de transistor (A).

R : La résistance (Ω).

P : Puissance (W).

V_s : La tension de sortie (V).

V_e : La tension d'entrée (V).

I_L : Courant d'inductance (A).

H : l'horloge (s).

F : Fréquence de travail du convertisseur (Hz).

ΔI_L Ondulation crête à crête du courant dans la bobine (A).

Liste des figures

Figure 1.1. Génération de la paire électron-trou⁵

Figure 1.2. Jonction PN⁶

Figure 1.3. Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique en PV⁶

Figure 1.4. Structure d'une cellule photovoltaïque⁷

Figure 1.5. Les images de différents types de la cellule photovoltaïque⁸

Figure 1.6. Circuit équivalent de la cellule solaire⁹

Figure 1.7. Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque à deux diodes¹¹

Figure 1.8. Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques¹⁴

Figure 1.9. L'effet de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V)[KC200GT]¹⁴

Figure 1.10. L'effet de l'ensoleillement sur les caractéristiques I(V) et P(V)[KC200GT]¹⁵

Figure 1.11. Intensité du rayonnement du soleil en un jour¹⁶

Figure 2.1. Schéma du convertisseur SEPIC

24

Figure 2.2. convertisseur SEPIC avec couplage des inductances²⁴

Figure 2.3. convertisseur SEPIC isolé²⁴

Figure 2.4. Formes d'ondes de tensions d'un convertisseur SEPIC²⁵

Figure 2.5. Formes d'ondes de courants d'un convertisseur SEPIC²⁵

Figure 2.6. SEPIC K fermé²⁶

Figure 2.7. SEPIC K ouvert²⁶

Figure 2.8. Schéma de convertisseur élévateur boost³⁰

Figure 2.9. Schéma équivalent boost (transistor passant)³⁰

Figure 2.10. Schéma équivalent boost (transistor bloqué)³¹

Figure 2.11. Chronogrammes boost	31
Figure 2.12. Schéma de Convertisseur BUCK	33
Figure 2.13. Schéma équivalent BUCK (transistor passant)	34
Figure 2.14. Schéma équivalent BUCK (transistor bloqué)	35
Figure 2.15. Chronogrammes buck	35
Figure 2.16. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	38
Figure 2.17. Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal	39
a) suite à une variation d'ensoleillement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.	
Figure 2.18. Schéma du principe de la méthode P&O	40
Figure 2.19. Algorithme de la méthode Perturb&Observ	41
Figure 3.1. Système photovoltaïque avec convertisseur SEPIC sous SIMULINK	47
Figure 3.2. Schéma de convertisseur SEPIC sous SIMULINK	48
Figure 3.3. La simulation de puissance de sortie du SEPIC sous SIMULINK	48
Figure 3.4. Système photovoltaïque avec convertisseur BOOST sous SIMULINK	49
Figure 3.5. Schéma de convertisseur BOOST sous SIMULINK	49
Figure 3.6. la simulation de puissance de sortie du BOOST sous SIMULINK	50
Figure 3.7. Système photovoltaïque avec convertisseur BUCK sous SIMULINK	50
Figure 3.8 Schéma de convertisseur BUCK sous SIMULINK	51
Figure 3.9. La simulation de puissance de sortie du BUCK sous SIMULINK	51
Figure 3.10. Schéma de MPPT perturb&observ (P&O) sous Simulink	52
Figure 3.11. Rapport cyclique de convertisseur BOOST sous SIMULINK	52

Figure3.12. Rapport cyclique de convertisseur SEPIC sous SIMULINK	52
Figure3.13. Rapport cyclique de convertisseur BUCK sous SIMULINK	53
Figure 3.14. Puissance à la sortie des trois convertisseurs contrôlés par L'algorithmes P&O	53
Figure 3.15. Architecture de l'algorithme P&O sous XSG	56
Figure3.16. Rapport cyclique de convertisseur SEPIC sous XSG	57
Figure3.17. Rapport cyclique de convertisseur BOOST sous XSG	57
Figure3.18. Rapport cyclique de convertisseur BUCK sous XSG	57
Figure 3.19. Comparaison des trois convertisseurs pour un MPPT P&O sous XSG	58

Liste des tableaux

Tableau1.1	Différents types des cellules avec leur rendement	Page 8
Tableau 2.1	Rapport de transformation des principaux convertisseurs DC-DC	Page 23
Tableau 3.1	valeur des composants pour convertisseur SEPIC	Page 46
Tableau 3.2	valeur des composants pour convertisseur BOOST	Page 46
Tableau3.3	valeur des composants pour convertisseur BUCK	Page 46
Tableau4.3	Comparaison entre les trios convertisseur sous SIMULINK	Page 53
Tableau5.3	Comparaison entre les trios convertisseur	Page 58

1.1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [2]. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante diffusée sur l'ensemble de la planète, il a pu arriver à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque. Le nom Photovoltaïque vient du Grec est composé de deux parties: Photos : Lumière. Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta. Ce phénomène fut découvert au 19ème siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications [3]. Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante. Pour comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire et les propriétés des semi-conducteurs ; matériaux de base des cellules photovoltaïques [4].

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique de type continue. Le terme photovoltaïque vient du grec " phos, photos " qui désigne la lumière et de " voltaïque ", mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité.

L'élément de base dans la conversion PV est la cellule PV, plusieurs cellules sont associées dans un module, ces derniers sont groupés en un seul panneau.

Le générateur PV est l'ensemble producteur d'énergie qui se situe en amont des charges[1].

1.2 Généralités sur les cellules photovoltaïques

1.2.1 Rappel sur les semi-conducteurs

Le semi-conducteur a une structure cristalline. Celle-ci consiste en des atomes parfaitement rangés en lignes et en colonnes et liés les uns aux autres par quatre électrons périphériques. Ces électrons n'ont pas la tentation de se déplacer, et l'ensemble se comporte comme un bon isolant électrique.

Quand un semi-conducteur est éclairé par la lumière du soleil, les photons qui constituent cette lumière sont capables de transmettre leur énergie aux électrons de valence du semi-conducteur pour rompre la liaison qui les maintient liés aux atomes respectifs. Pour chaque liaison rompue, on obtient un électron libre dans le semi-conducteur ainsi qu'un trou. Les trous se comportent, sous différents aspects, comme des particules avec une charge positive égale à celle de l'électron[5].

1.2.2 L'effet photovoltaïque et la jonction PN

Fut observé la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Sous l'effet d'un rayonnement lumineux incident, les électrons des bandes de valence du semi-conducteur vont pouvoir passer dans la bande de conduction et devenir libres. Ce phénomène va engendrer au sein de la structure du semi-conducteur la création de paire d'électron-trou.

Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N. Ainsi, une tension électrique apparaît dans les deux côtés N et P.

Le dispositif devient donc générateur électrique sous l'effet de la lumière. La collecte de courant se fait par les contacts métalliques (électrodes). Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant continu circule[6][7].

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres, figure (1.1).

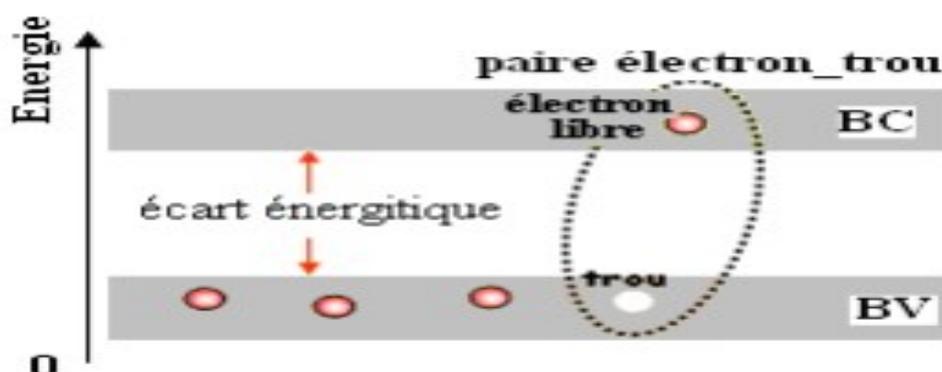


Figure 1.1. Génération de la paire électron-trou.

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant: il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo- générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P. Le composant ainsi créé est appelé diode [8].

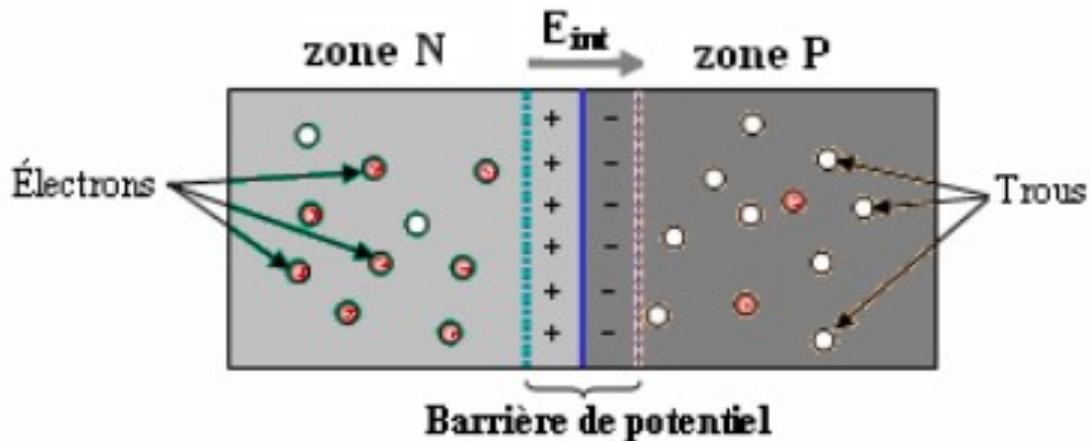


Figure 1.2. Jonction PN.

1.2.3 La cellule photovoltaïque

Appelé aussi, cellule solaire ou photopile, la cellule photovoltaïque est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs. Elle est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque, son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu. La proportion d'énergie transformée constitue le rendement de la cellule[5].

La plus répandue est à base de silicium monocristallin, un certain nombre d'autres matériaux et de structures font l'objet d'effort de recherche considérable visant à découvrir et à mettre au point des solutions nouvelles pour obtenir des cellules à base de sulfure de cadmium, du silicium amorphe, de l'arséniure de gallium[9].

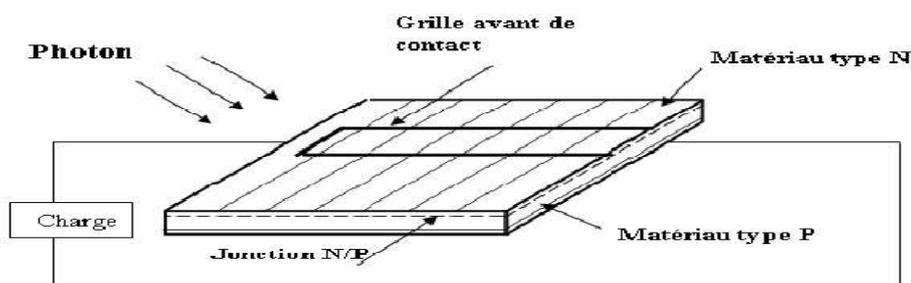


Figure 1.3. Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique en PV[10]

1.2.4. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement a base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [3]. La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure (1-4) ci-dessous

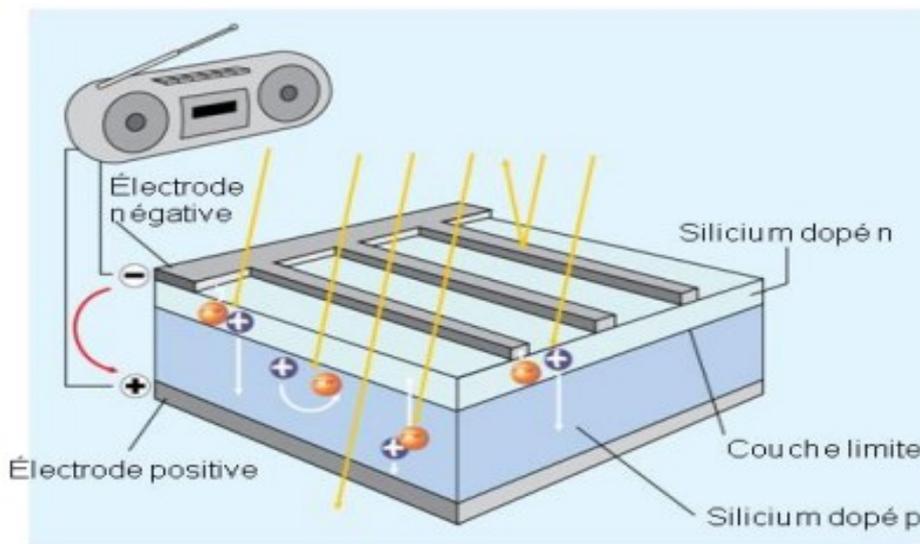


Figure 1.4. Structure d'une cellule photovoltaïque.

1.2.5. Type et rendement des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [11].

- Cellules monocristallines:** Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.
- Cellules poly cristallines:** Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible.

c) **Cellules amorphes:** Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

d) **Rendement d'une cellule:**

Le tableau suivant (1-1) présente les différents types de cellules avec leur rendement.

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe (a-Si)	13%	5-9%
Silicium poly cristallin (p-Si)	19,8%	11 à 15 %
Silicium monocristallin (m-Si)	24,7%	13 à 17%

Tableau 1.1. Différents types des cellules avec leur rendement

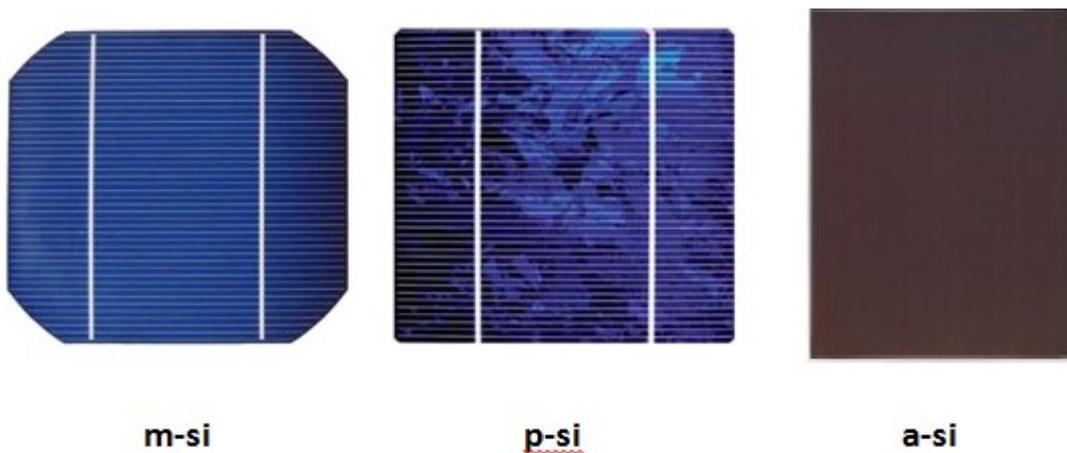


Figure 1.5. Les images de différents types de la cellule photovoltaïque.

L'expression du rendement est donnée comme suite

$$\eta_{STC} = \frac{P_m}{E_{STC} \times S_{cellule}} \quad (1.1)$$

η_{STC} : Rendement de la cellule photovoltaïque;

P_m : Puissance produite par le générateur PV;

E_{STC} : Eclairement absorbé par la cellule;

$S_{cellule}$: Surface de la cellule [m²];

♣ Ce rendement dépend de plusieurs facteurs [12]:

- Réflexion à la surface.
- Température de jonction des cellules.

- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

1.2.6- Modèles de la cellule photovoltaïque :

Depuis l'invention de la cellule solaire en 1954, plusieurs modèles ont été proposés pour décrire son fonctionnement et son comportement sous différentes conditions météorologiques (éclairage et température). Ces modèles ont été affirmés au cours du temps et en fonction des moyens de calcul disponibles. Les modèles les plus utilisées sont :

1. Modèle idéal ;
2. Modèle à une seule exponentielle ;
3. Modèle à deux exponentielles ;

a) Modèle à une seule exponentielle :

Une cellule photovoltaïque peut être illustrée par son schéma équivalent comme le montre la figure (1.6).

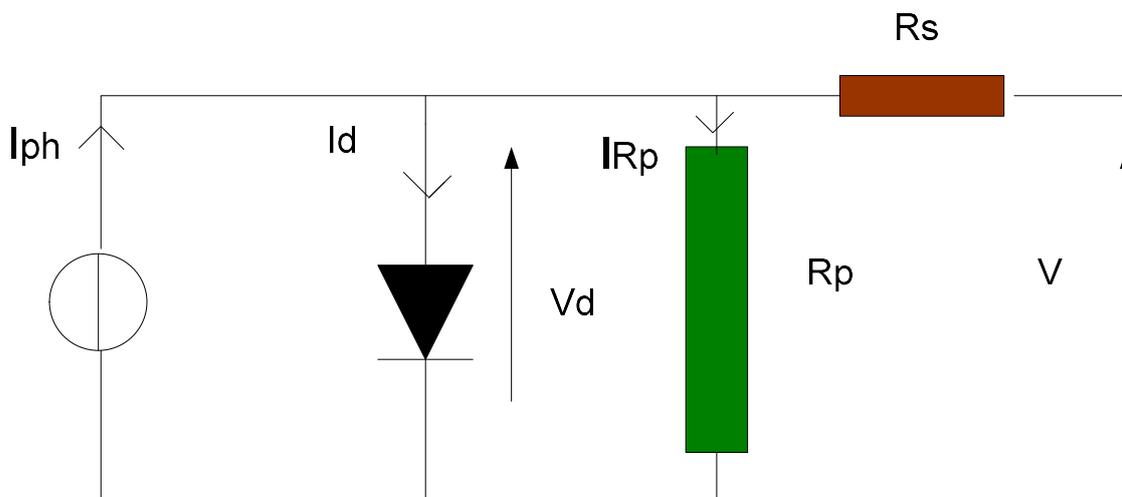


Figure 1.6. Circuit équivalent de la cellule solaire.

La cellule comporte une résistance série (R_s) et une résistance en dérivation ou shunt (R_p). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- la résistance série est la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la fonction dont celle-ci a été réalisée.

A partir de la figure (1.6) la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante

$$I_{ph} = I_D + I_{R_p} + I \quad (1.2)$$

Le courant de jonction I_D est donné par :

$$I_D = I_0 \left[e^{\frac{q(V+I R_s)}{nKT}} - 1 \right] \quad (1.3)$$

Le courant dans la résistance R_p est donné par :

$$I_{R_p} = \frac{V+I R_s}{R_p} \quad (1.4)$$

A partir de l'équation (1.1), on obtient l'expression de courant I :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{R_p} \quad (1.5)$$

Remplaçons dans (1.5) les équations (1.3) et (1.4) l'équation caractéristique deviendra :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+I R_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{V+I R_s}{R_p} \quad (1.6)$$

Où :

I : Le courant de cellule ;

V : La tension de cellule ;

R_s : La résistance série de la cellule [Ω] ;

T : La température de la cellule [$^{\circ}K$] ;

q : La charge d'électron $e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$;

I_0 : Le courant de saturation [A] ;

K : La constante de Boltzman ($1.3854 \cdot 10^{-23} J.K^{-1}$) ;

V_g : La tension de seuil de diode (1.1V) ;

n : Le facteur de qualité de diode.

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ($R_p = \infty$) l'équation (1.6) devienne:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+I R_s)}{nKT}} - 1 \right] \quad (1.7)$$

L'équation (1.6) en termes de I et V n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton- Raphson) doit être appliquée.

b) Modèle à deux exponentielles:

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dus à la fabrication et représentés sur le modèle équivalent par deux résistances : R_s et R_p , il est représenté sur la figure suivante [13]:

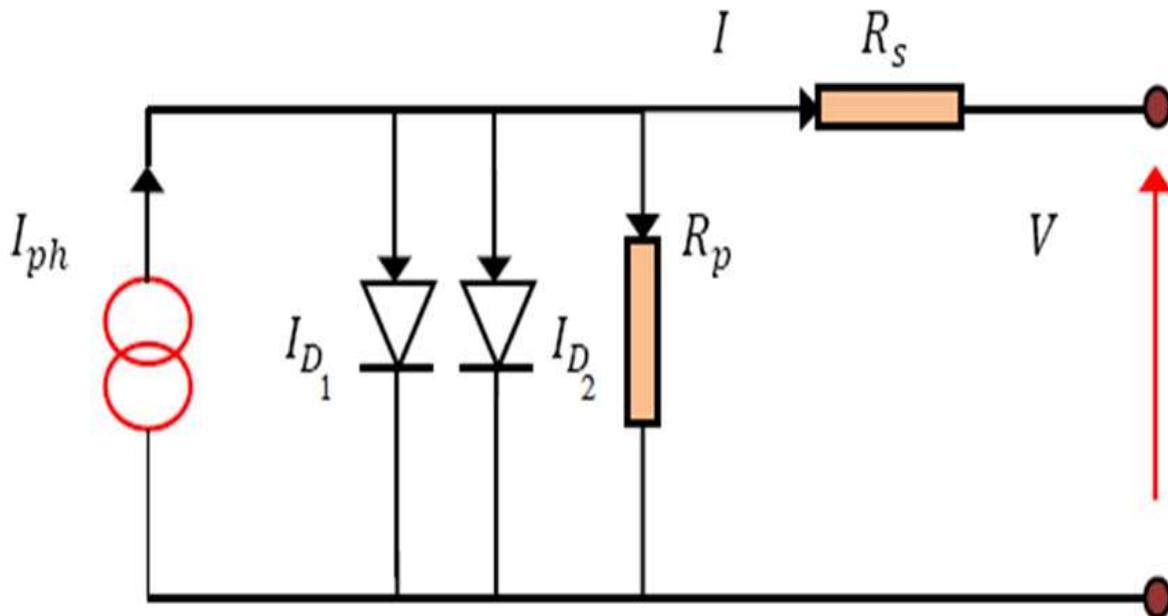


Figure 1.7. Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque à deux diodes

La représentation avec deux diodes est plus proche aux caractéristiques réelles de la cellule photovoltaïque.

L'équation caractéristique de la cellule réelle est alors donnée par :

$$I = I_{ph} - I_{D1} \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_1 kT}} - 1 \right] - I_{D2} \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_2 kT}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (1.8)$$

Le courant dans la diode est donnée par :

$$I_D = I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{n kT}} - 1 \right] \quad (1.9)$$

Avec :

$$I_0 = K_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (1.10)$$

R_s : (La résistance série) représente les résistances de contacts;

R_p : (La résistance shunt (R_{sh})) caractérise les divers courants de fuite dans la jonction PN ;

I_{D1}, I_{D2} : Sont les courants de saturation des diodes ;

n_1, n_2 : Facteurs de pureté de la diode.

1.2.7 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes[14] :

a) Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle.

Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec la photo courant

I_l dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.3), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(I_{cc} R_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{I_{cc} R_s}{R_p} \quad (1.11)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_0 \left[e^{\frac{q(I_{cc} R_s)}{nKT}} - 1 \right]$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right)}$$

b) Tension de circuit ouvert

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).

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V_{co})}{nKT}} - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_p} \quad (1.12)$$

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

$$V_{co} = \left(\frac{q}{nKT}\right) * \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (1.13)$$

c) Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF , le rapport entre la valeur maximale de la puissance peut être extrait ($V_{pm} * I_{pm}$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $I_{cc} * V_{co}$.

Où : I_{cc} intensité de court-circuit et V_{co} tension de circuit ouvert.

$$FF = \frac{V_{pm} I_{pm}}{I_{cc} V_{co}} \quad (1.14)$$

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

d) Le rendement

Le rendement (η), des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (1.15)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [15].

1.3- Les modules photovoltaïques

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge et les modules auront donc généralement 36 cellules. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série, si en additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche[16].

1.4 -Les générateurs PV

Les modules PV sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le champ de modules PV. L'énergie fournie par le champ peut être utilisée pour charger des batteries qui fourniront l'électricité au moment voulu (figure 1.9).

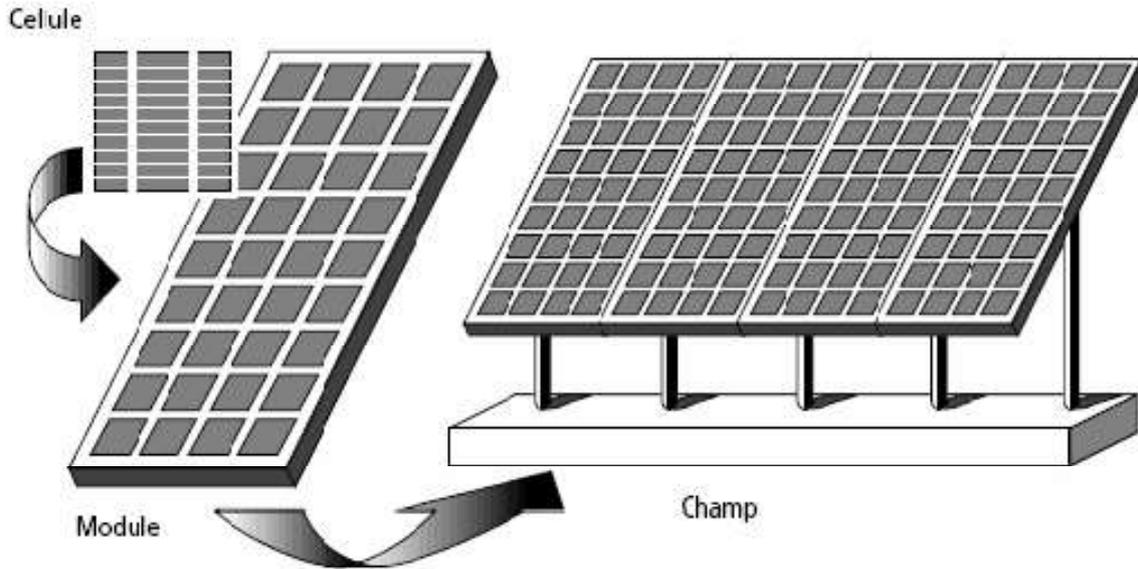


Figure 1.8. Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques[16]

Pour le générateur, la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ est obtenue par :

$$I_{pv} = N_p \cdot I \quad (1.16)$$

$$V_{pv} = N_s \cdot V \quad (1.17)$$

Où : N_p est le nombre de modules en parallèles N_s le nombre de modules en séries.

1.5 Influence de la température sur les courbes $I(V)$, $P(V)$:

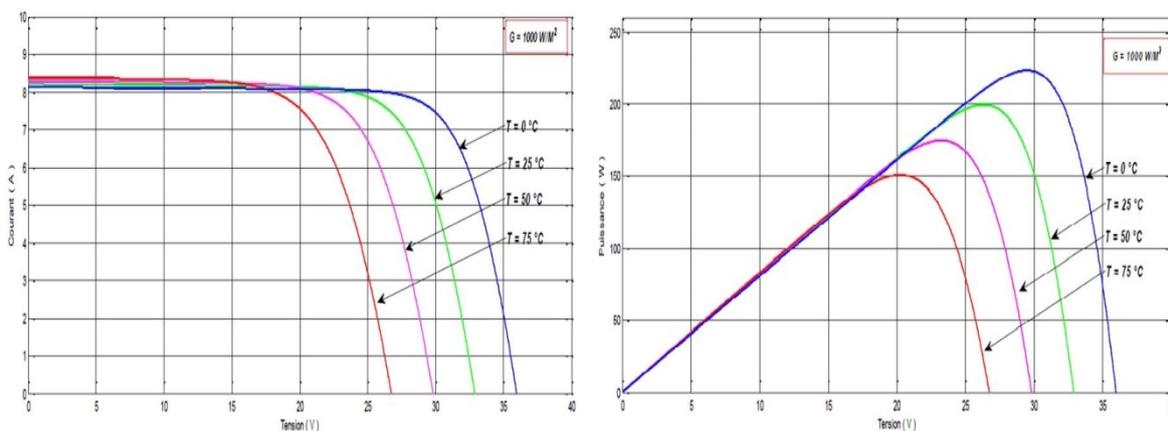


Figure1 .9. Effet de la température sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ [KC200GT]

D'après ces graphes on voit que le courant du panneau est presque constant, par contre la variation de la température est inversement proportionnelle à la tension du panneau.

1.6. Influence de l'ensoleillement sur les courbes $I(V)$, $P(V)$:

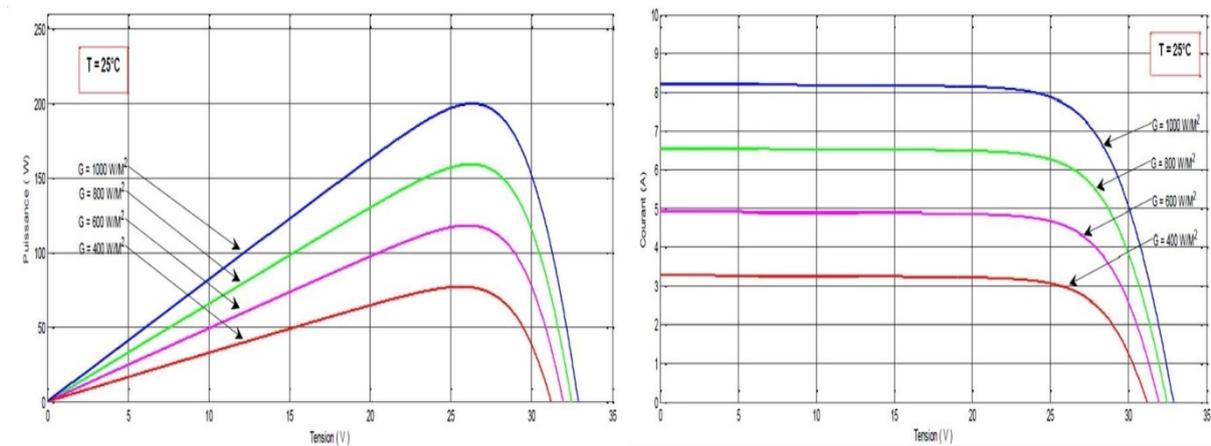


Figure 1.10. L'effet de l'ensoleillement sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ [KC200GT]

D'une part, on peut remarquer que les points de fonctionnement à puissance maximale se déplacent et se situent autour d'une valeur d'environ 21V.

D'autre part, on peut aussi remarquer que le courant est directement proportionnel au rayonnement solaire. Par contre, la tension est relativement peu dégradée. On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage.

1.7 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

a) Les avantages

Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchet toxique par son utilisation.

Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc. Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.

Les systèmes photovoltaïques ont les avantages suivants par rapport aux options de concurrence de puissance:

Ils ne font pas de pollution, sans émissions ou odeurs discernables.

Ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.

Ils ne consomment aucun carburant, leur carburant est abondant et libre.

Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.

Ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant[17].

b) Les inconvénients

Prix: les cellules solaires sont encore lointaines pour produire une fraction significative de l'énergie du monde requise en raison de la charge de placement initiale. Cependant, le prix diminue considérablement par rapport à la puissance maximale en Watt, depuis les années 70[18].

Rayonnement du soleil: l'intensité d'irradiation du rayonnement du soleil en un jour, toujours, change et flotte. La figure 1.12[9] est un exemple de l'irradiation du mauvais temps. L'irradiation commence autour de 6 heures et augmente à la valeur maximale (se rapproche de 900 W/m^2) à 12 AM après que 11 AM, l'irradiation flotte parce que le ciel est plus tardif, nuageux et pluvieux. Ensuite l'intensité d'ensoleillement diminue graduellement. Autour 18 h l'ensoleillement est nulle. Le rayonnement du soleil est une source principale pour le système photovoltaïque, ainsi l'exécution du système photovoltaïque dépend de l'intensité d'ensoleillement.

Rendement: le rendement de la cellule solaire est relativement bas, 15 %[19] pour le silicium monocristallin et 12 % pour le silicium poly-cristal. En conséquence, pour obtenir la grande capacité du générateur solaire, le grand secteur de la cellule solaire et les endroits sont nécessaires. De nouveaux matériels et processus sont recherchés pour remplacer le silicium qui est le matériel principal pour la cellule en silicium mais reste toujours à prix élevé et rendement bas.

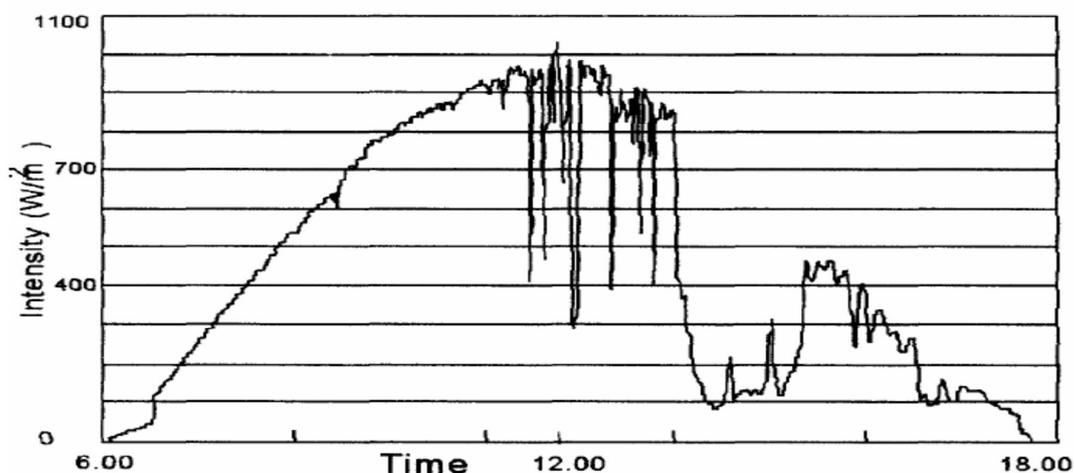


Figure1.11. Intensité du rayonnement du soleil en un jour

1.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le potentiel solaire, le principe de la conversion PV et les cellules monocristallines qui ont le meilleur rendement dans les conditions réelles d'utilisation des systèmes photovoltaïques et leurs secteurs d'application

La cellule photovoltaïque est l'élément de base dans la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, elle présente une caractéristique courant-tension fortement non linéaire, et son rendement dépend des conditions météorologiques (éclairage, température).

L'association de cellules en série et en parallèle donne lieu aux générateurs photovoltaïques, qui sont utilisés pour l'alimentation électrique.

2.1 Introduction

Les convertisseurs DC-DC sont largement utilisés dans l'environnement industriel et domestique. Grâce à leur rendement de plus en plus élevé, leur encombrement, leur poids et leur coût réduits, ils ont occupés une place importante dans les sources d'alimentation des ordinateurs portables, les téléphones mobiles, les appareils électroménagers etc ... Un convertisseur de puissance peut être caractérisé comme un système périodique, non-linéaire et variant au cours du temps en raison du changement de la topologie de leur circuit selon les états passants et bloqués des interrupteurs et diodes. Ces circuits sont typiquement contrôlés par la modulation de largeur d'impulsions PWM (Pulse Width Modulation) ou autres techniques semblables pour régler la tension ou le courant fourni aux charges. Le contrôleur décide qu'on passe d'une configuration à une autre en faisant en sorte que les transitions se produisent cycliquement ou en temps discret.

Un convertisseur DC-DC peut fonctionner suivant deux modes : le mode de conduction continue (CCM ou Continuous Conduction Mode en anglais) lorsque le courant dans l'inductance ne s'annule jamais, et le mode de conduction discontinue (DCM ou Discontinuous Conduction Mode en anglais) où le courant dans l'inductance est nul à la fin de la période de découpage. En fonction du mode de fonctionnement, ces convertisseurs présentent deux états du circuit en mode de conduction continue et respectivement trois états du circuit en mode discontinue, chaque état associé à une dynamique linéaire en temps continu différente.

La modélisation et la commande des convertisseurs DC-DC occupent une place de plus en plus importante dans le domaine de l'électronique de puissance. Dans la littérature, la plupart des convertisseurs DC-DC ont été modélisés en utilisant une approche de type modèle moyen classique en espace d'état [1], [2], car il convient le mieux aux différents concepts de commande. Beaucoup d'auteurs ont adopté ce modèle pour la synthèse des lois de commande dans un objectif classique de robustesse et de performances : commande par compensation des pôles [3], commande par modes glissants [4], commande robuste [5]. Les premiers modèles moyennés des convertisseurs PWM fonctionnant dans le mode CCM, basés sur la technique de moyen-âge en espace d'état, ont été introduits pendant les années 1970, Ensuite, cette méthode a aussi été appliquée au mode DCM.

2.2 Convertisseurs DC-DC

Le hacheur ou convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé. Le découpage se fait à une fréquence élevée. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur (ou abaisseur ou Buck). Dans le cas contraire, il est dit survolteur (ou élévateur ou Boost). Il existe des hacheurs capables de travailler dans les deux sens (Boost-Buck). Certains hacheurs sont également réversibles : ils peuvent alors fournir de l'énergie à la charge, généralement une machine à courant continu dans ce type d'application, ou bien en prélever ce qui permet de freiner la machine. Il existe différentes méthodes de classification des convertisseurs DC-DC. L'une d'elles dépend de la propriété d'isolation de la partie primaire et secondaire. L'isolation est généralement réalisée par un transformateur, qui comporte une partie primaire sur le côté d'entrée et un secondaire à côté de la sortie. La chaîne de retour de la boucle de commande est réalisée par un autre plus petit transformateur ou optiquement par optocoupleur. Par conséquent, la sortie est isolée électriquement de l'entrée. Ce type comprend les convertisseurs (Fly-back) avec un pont redresseur AC-DC supplémentaire à l'avant. Toutefois, car l'implémentation de ces transformateur encombrant est très grand et coûteux, convertisseurs DC-DC non-isolément sont plus préféré [6].

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [7].

Trois topologies de base de circuit de conversion seront décrites dans les paragraphes suivants (DC-DC) : Dans cette partie nous présentons le principe des trois types de convertisseurs DC/DC (Buck, Boostet Buck-Boost), utilisés fréquemment dans les systèmes

photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [8].

2.2.1 Mode de fonctionnement du convertisseur statique

Le convertisseur peut fonctionner suivant deux modes de fonctionnements dépendant de sa capacité de stockage d'énergie, de la période de commutation et de la charge. Ces deux modes sont :

- **Mode de Conduction Continue (MCC)** : Dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée partiellement. Le courant dans l'inductance ne s'annule pas sur une période de commutation [6].
- **Mode de Conduction Discontinue (MCD)** : Dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée totalement. Le courant dans l'inductance s'annule avant la fin d'une de commutation.

2.2.3. Convertisseurs DC/DC pour les systèmes d'énergie solaire

Le convertisseur DC/DC permet de relier le champ PV à un bus continu, auquel les diverses machines énergétiques du système sont reliées : la charge (l'utilisateur final), les autres sources d'énergie (pile à combustible, batteries, autres sources renouvelables) ou les périphériques. Il permet en outre de lisser les fluctuations de la tension des composants au niveau du bus commun [9, 10]. Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandable à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaire ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation. Le principe d'un hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable [11].

2.2.4 Les type des convertisseurs DC-DC :

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [11], [10] :

- convertisseur survolteur hacheur survolteur (ou parallèle);

- convertisseur dévolteur (ou série);
- convertisseur dévolteur- survolteur hacheur série - parallèle.

2.2.5 Topologie de convertisseurs DC/DC

Il existe différentes topologies des convertisseurs à courant continue. Ils sont classés par catégorie isolées ou non isolées. Les topologies isolées utilisent un transformateur d'isolement électrique à haute fréquence de petite taille pour assurer l'isolement entre l'entrée et la sortie, et on peut augmenter ou diminuer la tension de sortie par le changement du rapport du transformateur. Elles sont très employées dans les blocs d'alimentation à courant continu. Dans les applications PV, les systèmes de réseau-attachés emploient souvent ces types de topologie quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sécurité [12].

Les topologies non isolées n'ont pas des transformateurs d'isolement. Ces topologies sont encore classées par catégorie dans trois types : dévolteur, survolteur, dévolteur-surveolteur. La topologie dévolteur est utilisée pour diminuer la tension. Dans les applications PV, la topologie survolteur est utilisée pour augmenter la tension. Les systèmes en réseau emploient un convertisseur de type survolteur pour amplifier la tension de sortie au niveau souhaité avant de l'onduleur. Puis il y a des topologies capables de dévolter ou surveolter la tension comme : BUCK-BOOST, ĆUK et SEPIC pour le système PV avec batterie, le PPM de panneau PV commercial est placé au-dessus de la tension de charge des batteries pour la plupart des combinaisons d'irradiation et de température. Un convertisseur dévolteur au PPM sous la plupart des conditions atmosphérique, mais il ne peut pas le faire quand le PPM délivré par le panneau PV devient inférieur à la tension de charge de la batterie sous une condition de bas-irradiation et haute température. Egalement, la possibilité d'insérer un surveolteur peut légèrement augmenter la performance globale [13].

Le tableau (2.1) résume les principaux rapports de transformation en fonction du rapport cyclique pour les différentes structures de convertisseurs statiques avec et sans isolement galvanique. Où D désigne le rapport cyclique du convertisseur et K le rapport de transformation du transformateur d'isolement.

Convertisseur	Rapport de transformation en fonction de (α)	Isolement Galvanique
Buck	α	NON
Boost	$\frac{1}{1 - \alpha}$	NON
SEPIC	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$	NON

Tableau 2.1. Rapport de transformation des principaux convertisseurs DC-DC

2.3 Le convertisseur SEPIC

Le convertisseur SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter) a été conçu à la fin des années 1970 par Slobodan Cuk. La structure du hacheur SEPIC se déduit du hacheur capacitif dit hacheur Cuk par permutation de la diode et de l'inductance de sortie. Il présente des caractéristiques similaires à celle du hacheur Cuk, à l'exception qu'il est non inverseur de tension. La tension de sortie peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée. Le convertisseur SEPIC est composé de deux inductances L1 et L2. Elles peuvent être bobinées sur le même circuit magnétique, cela permet de gagner de la place sur le PCB et à tendance à couter moins chère que deux inductances séparées. La tension de sortie dépend du rapport cyclique appliqué à l'interrupteur K. La topologie du SEPIC est appropriée pour les applications de charge de batteries et pour la correction du facteur de puissance (PFC) grâce à l'inductance en série avec la source [14].

2.3.1 Les avantages du convertisseur SEPIC :

- Il peut fonctionner comme élévateur ou abaisseur de tension.
- Il contient peu de composants. La commande du transistor se réfère à la masse.
- l'ondulation du courant d'entrée est limitée.
- Il n'y a pas de liaison entre entrée et sortie en continu, grâce à la transmission d'énergie en série à travers un condensateur. Un court-circuit de la charge n'est donc pas répercuté sur l'entrée [15].

2.3.2 Synoptique :

Le hacheur SEPIC peut être réalisé de diverse manière. La Figure 2.1 présente la structure basique, la Figure 2.2 montre le couplage des inductances L1 et L2 et la Figure 2.3, la version isolée du SEPIC en remplaçant l'inductance L2 par un transformateur [14].

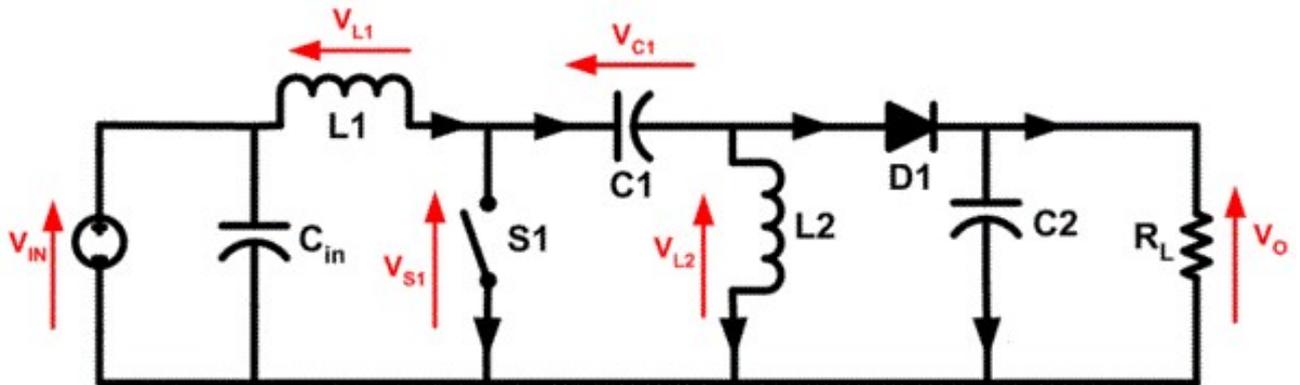


Figure 2.1. Schéma du convertisseur SEPIC.

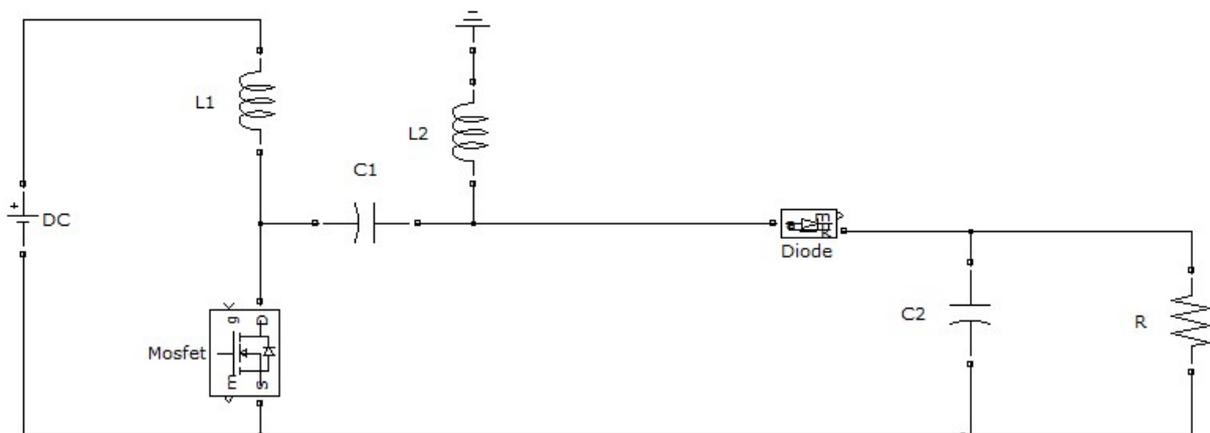


Figure 2.2. Convertisseur SEPIC avec couplage des inductances.

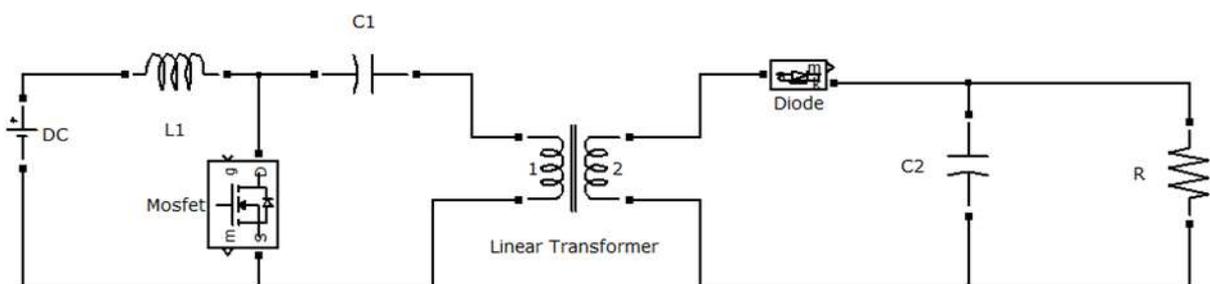


Figure 2.3. Convertisseur SEPIC isolé.

Les formes d'ondes de tensions et de courants du convertisseur SEPIC sont montrées aux figures 2.4 et 2.5, respectivement [15].

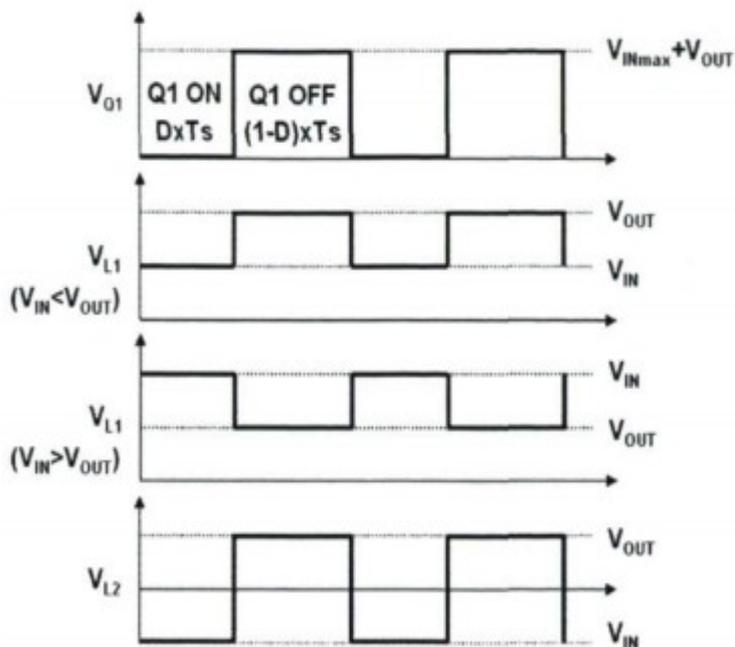


Figure 2.4. Formes d'ondes de tensions d'un convertisseur SEPIC.

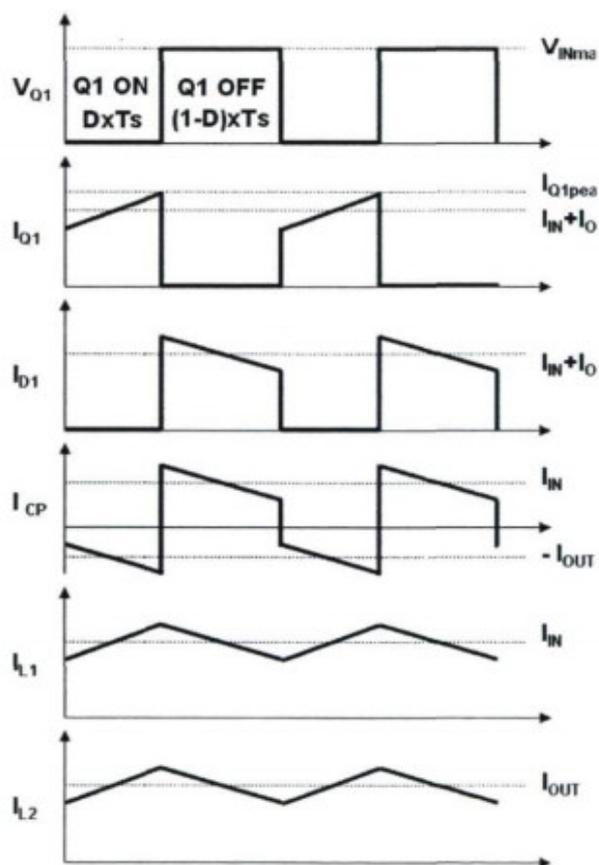


Figure 2.5. Formes d'ondes de courants d'un convertisseur SEPIC.

2.3.3 Principe de fonctionnement

L'étude se fait en deux parties selon l'état de conduction de l'interrupteur K.

a) De 0 à αT : Phase d'accumulation d'énergie

On ferme l'interrupteur K.

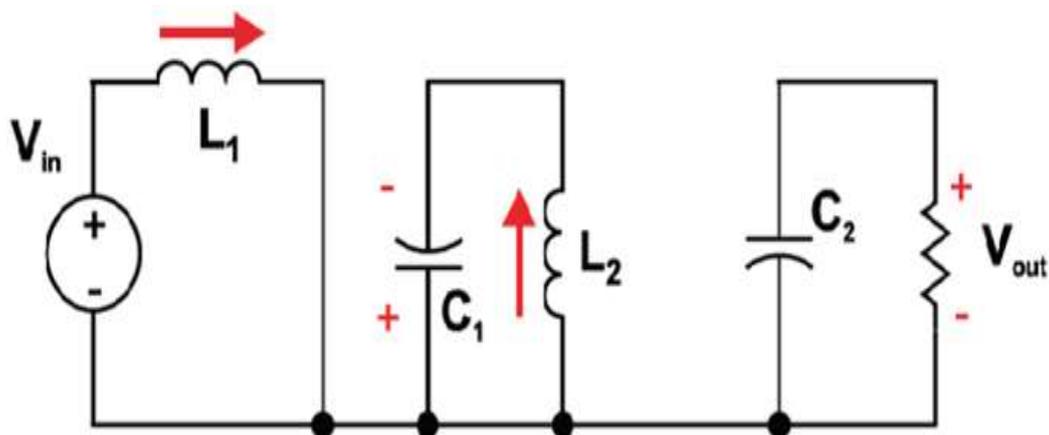


Figure 2.6. Convertisseur SEPIC K fermé.

On applique aux bornes de l'inductance L_1 la tension d'entrée V_e , le courant traversant L_1 va augmenter linéairement, l'énergie est stockée dans L_1 . L'énergie contenue dans le condensateur C_1 passe dans l'inductance L_2 , et celle du condensateur C_2 vers la charge. La tension est maintenue constante par là le condensateur C_2 . [14]

b) De αT à T : Phase de roue libre

On ouvre l'interrupteur K, ainsi la diode D se met à conduire.

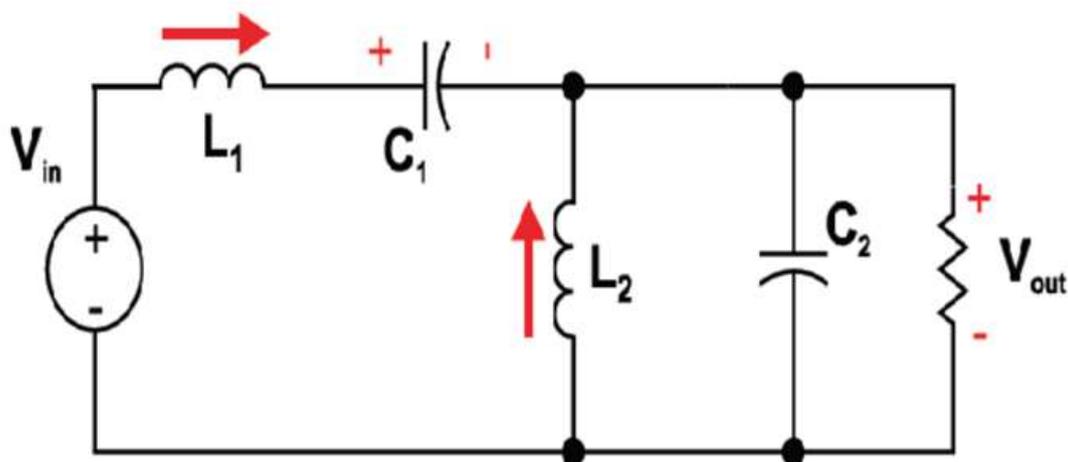


Figure 2.7. Convertisseur SEPIC K ouvert.

L'énergie emmagasinée dans l'inductance L_1 est restituée dans le condensateur C_1 . L'énergie dans L_2 est transférée vers C_2 .

2.3.4 Dimensionnement d'un convertisseur de type SEPIC

Seul le fonctionnement en conduction continue du convertisseur est étudié, c'est-à-dire que le courant dans l'inductance ne s'annule jamais en zéro avant la fin d'un cycle de fonctionnement. De par la complexité de ce hacheur, et le manque de littérature sur celui-ci, nous ne l'étudierons pas phase par phase. Nous utiliserons seulement les équations finales permettant de dimensionner les éléments du convertisseur[14].

a) Rapport cyclique

Le rapport cyclique est donné par :

$$\alpha = \frac{V_{OUT}}{V_{IN} + V_{OUT}} \quad (2.1)$$

Avec V_{IN} la tension d'entrée, V_{OUT} la tension de sortie.

Avec un rapport cyclique proche de 50%, la tension d'entrée est égale à la tension de sortie, le gain est unitaire.

b) Inductances

Les valeurs d'inductances sont déterminées principalement par l'ondulation de courant acceptée. Généralement, on autorise une ondulation de 40% le courant d'entrée maximal pour la tension d'entrée minimale. L'ondulation de courant est définie par l'équation suivante :

$$\Delta I_L = I_{IN} \times 10\% = I_{OUT} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \times 10\% \quad (2.2)$$

Soit les valeurs d'inductances calculées par :

$$L1=L2=L = \frac{V_{IN}}{\Delta I_L \times f} \times \alpha \quad (2.3)$$

Avec f la fréquence de découpage.

Pour s'assurer que le courant dans l'inductance ne sature pas, la courante crête est donné par :

$$I_{L1(peak)} = I_{OUT} \times \frac{V_{OUT} \times V_D}{V_{IN}} \times \left(1 + \frac{10\%}{2}\right) \quad (2.4)$$

$$I_{L2(peak)} = I_{OUT} \times \left(1 + \frac{10\%}{2}\right) \quad (2.5)$$

c) Condensateur de couplage

Le condensateur de couplage doit être capable de laisser passer le courant efficace donné par :

$$I_{C1(rms)} = I_{OUT} \times \sqrt{\frac{V_{OUT}}{V_{IN}}} \quad (2.6)$$

Le condensateur est dimensionné à partir de l'ondulation de tension crête à crête voulue définie par la formule suivante :

$$\Delta V_{C1} = \frac{I_{OUT} \times \alpha}{C1 \times f} \quad (2.7)$$

d) Condensateur de filtrage

Le condensateur C2 à la sortie du convertisseur SEPIC permet de filtrer la tension et de maintenir celle-ci constante. La formule permettant de dimensionner le condensateur est donnée par :

$$C2 = \frac{I_{OUT} \times \alpha}{V_{ripple} \times 0.5 \times f} \quad (2.8)$$

Avec I_{out} le courant dans la charge, V_{ripple} l'ondulation de tension.

e) Transistor

Le transistor doit être capable de supporter une tension $V_T = V_{IN} + V_{out}$, et être traverser par une courante crête égal à $I_{T(peak)} = I_{L1(peak)} + I_{L2(peak)}$

Le courant efficace est donné par :

$$I_{T(rms)} = I_{out} \sqrt{\frac{(V_{OUT} \times V_{IN} + V_D) \times (V_{OUT} \times V_D)}{V_{IN}^2}} \quad (2.9)$$

f) Diode

La diode possède les mêmes contraintes que le transistor, elle doit supporter un courant

$I_{D(peak)} = I_{K(peak)}$. Elle doit résister à une tension inversede $V_D = V_{IN(max)} V_{out(max)}$.

Le courant moyen dans la diode est égal au courant de sortie I_{out} .

2.3.5 Application numérique

$$R = \frac{V_{out}^2}{P} \frac{40^2}{190} = 8.42 \Omega$$

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R} = \frac{40}{8.42} = 4.75 \text{ A}$$

$$\alpha = \frac{V_{out}}{V_{IN} + V_{out}} = \frac{40}{96.3 + 40} = 0.60$$

$$\Delta I_L = 10\% I_e = 0.1 \times 7.61 = 0.761$$

$$L_1 = L_2 = L = \frac{V_{IN}}{\Delta I_L \times f} \times \alpha = 207 \mu H$$

$$I_{C1} = I_{out} \sqrt{\frac{V_{out}}{V_{in}}} = 5.85 \text{ A}$$

$$\Delta V_{C1} = 5\% V_{in} = 1.31 \text{ V}$$

$$C_1 = \frac{V_{out} \times \alpha}{\Delta V_{C1} + f} = \frac{40 \times 0.6}{10^5 \times 1.31} = 183 \mu F$$

$$\Delta V_{C2} = 10\% V_{out} = 0.4 \text{ V}$$

$$C_2 = \frac{V_{out} \times \alpha}{\Delta V_{C2} \times 0.5 \times f} = \frac{40 \times 0.6}{0.4 \times 0.5 \times 10^5} = 87.5 \mu F$$

2.4 Le Convertisseur élévateur BOOST

Un convertisseur Boost (ou Step-Up en anglais), ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte [16].

2.4 .1 Avantage de convertisseur BOOST

Malgré le rendement élevé du convertisseur buck dans les systèmes avec des sources de Puissance conventionnelles, le convertisseur boost peut être plus approprié aux systèmes Photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) puisque le Convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que Possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du Convertisseur boost peut être plus grand que le convertisseur buck. Le convertisseur boost est Généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le Convertisseur buck est employé pour abaisser la tension de sortie [17].

2.4.2 Schéma de convertisseur

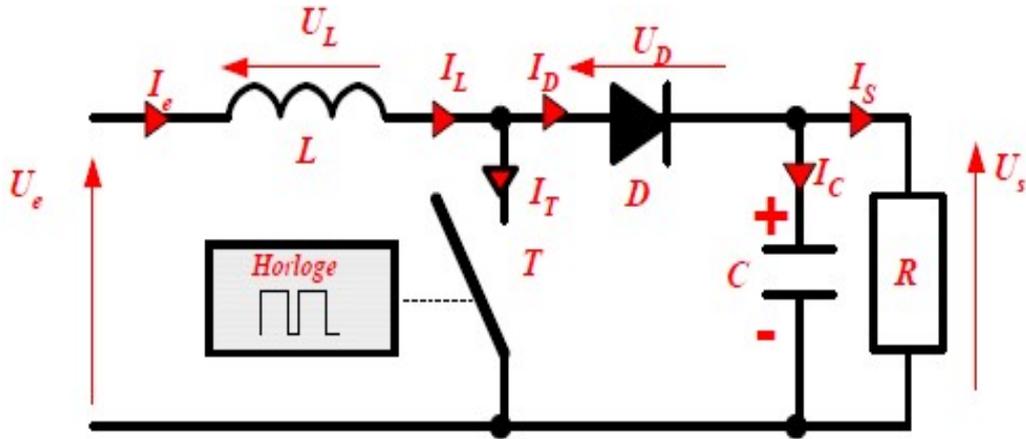


Figure 2.8. Schéma de convertisseur élévateur boost [18].

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad (2.10)$$

Avec : $V_s > V_e$

2.4.3 Principe de fonctionnement :

Le transistor Test commandé par une horloge H. Pendant le temps haut de l'horloge (PHASE N°1 de 0 à αT), le transistor Test commandé et la bobine l'emmagasine de l'énergie et le condensateur C restitue son énergie à la charge. Pendant le temps bas de l'horloge (PHASE N°2 de αT à T), le transistor est bloqué et la Bobine L restitue l'énergie emmagasinée, la diode est passante donc U_s est supérieur à U_e [17].

a. Phase N°1 (0 à αT)

Explications : Le transistor est passant et la diode est bloquée. Le condensateur restitue son énergie.

Schéma équivalent :

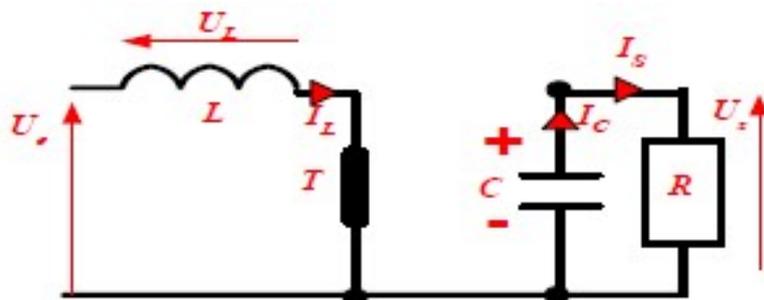


Figure 2.9. Schéma équivalent boost (transistor passant).

$$V_L = V_E \text{ avec } V_s > V_E$$

b. Phase N°2 (αT à T)

Explications : Le transistor est bloqué et c'est la bobine qui fournit l'énergie au Montage, la diode D_{est} passante.

Schéma équivalent :

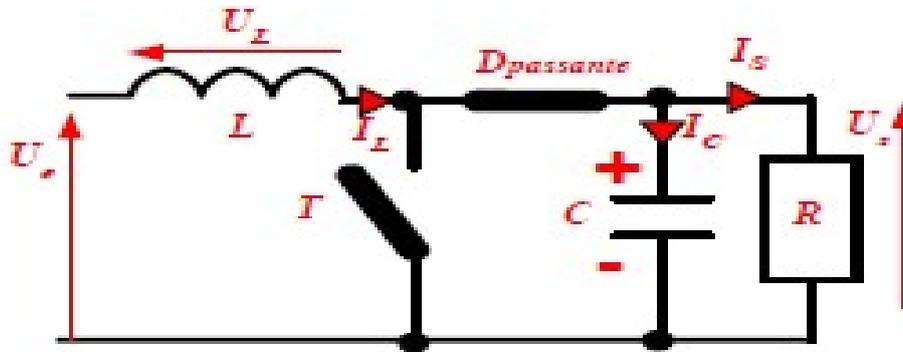


Figure 2.10. Schéma équivalent boost (transistor bloqué)

Comme le courant IL diminue alors $U_L > 0$ en conséquence $U_S > U_E$ [18]

2.4.5 Choix des composants.

a. rapport cyclique

Le rapport cyclique est donné par :

$$\alpha = \frac{1 - V_{out}}{V_{in}} \quad (2.11)$$

b. La bobine

$$L = \frac{\alpha V_{in}}{\Delta I_L F} \quad (2.12)$$

F : Fréquence de travail du convertisseur, ΔI_L Ondulation crête à crête du courant dans la bobine.

Critères technologiques :

Les selfs utilisées dans les alimentations à découpage doivent en outre supporter les Hautes fréquences (jusqu'à 100KHz). Il faut toujours choisir les modèles préconisés Par les constructeurs.

c. Le condensateur

$$C = \frac{\alpha I_{out}}{F \Delta V_{out}} \quad (2.13)$$

ΔV_S Ondulation crête à crête de la tension de sortie.

Critères technologiques :

Les condensateurs utilisés dans les alimentations à découpage doivent avoir une faible résistance série (ESR Effective Serie Resistor).

d. Choix de la diode et du transistor T

Le principal critère de choix de la diode doit être la rapidité, en effet les convertisseurs à découpage fonctionnent à des fréquences de l'ordre de la dizaine de kilohertz. On choisit par conséquent des diodes rapides comme les diodes *schottky*. Pour le transistor, il doit posséder une faible résistance et commuter rapidement, on utilise souvent des transistors *MOS*.

e. Ondulations de sorties

• Ondulation du courant dans l'inductance:

$$\Delta I_L = 10\% I_{in} \quad (2.14)$$

• Ondulation de la tension de sortie (ESR = 0Ω):

$$\Delta V_{out} = 1\% V_{out} \quad (2.15)$$

2.4.6 Application numérique

$$R = \frac{V_{out}^2}{P} = \frac{48^2}{190} = 12.12 \Omega$$

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R} = \frac{48}{12.12} = 3.96 \text{ A}$$

$$\alpha = \frac{1 - V_{IN}}{V_{out}} = \frac{1 - 26.3}{48} = 0.45$$

$$\Delta I_L = 10\% I_{in} = 0.1 \times 7.61 = 0.761$$

$$L_1 = L_2 = L = \frac{V_{IN}}{\Delta I_L \times f} \times \alpha = 155.51 \mu\text{H}$$

$$\Delta V_{out} = 1\% V_{out} = 0.48 \text{ V}$$

$$C = \frac{I_{out} \times \alpha}{\Delta V_{out} \times F} = \frac{3.96 \times 0.45}{10^5 \times 0.48} = 37.1 \mu\text{F}$$

2.5 Convertisseur abaisseur BUCK

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. [19]

2.5.1 Schéma de convertisseur

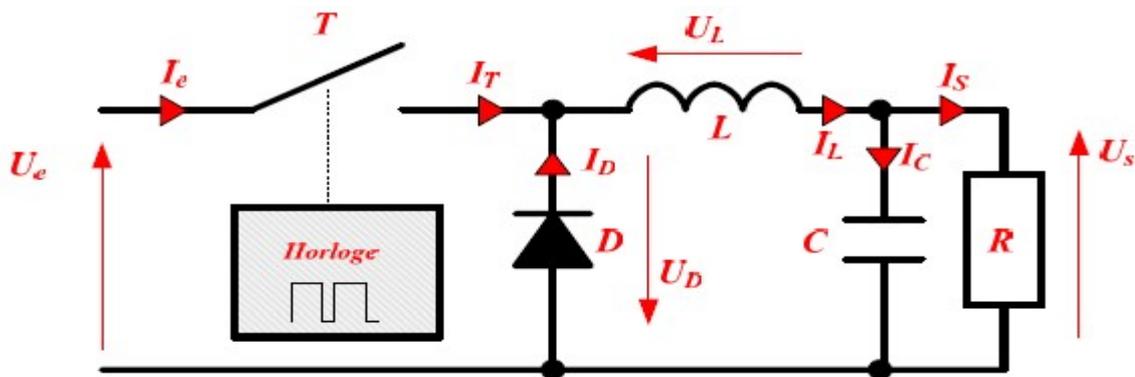


Figure 2.12. Schéma de Convertisseur BUCK [18].

$$V_s = \alpha V_e \quad (2.16)$$

Avec: $\alpha < 1$

2.5.2 Principe de fonctionnement :

Le transistor T est commandé par une horloge H . Pendant le temps haut de l'horloge (PHASE N°1 de 0 à αT), le transistor T est commandé et la bobine L emmagasine de l'énergie, puis pendant le temps bas de l'horloge (PHASE N°2 de αT à T), le transistor est bloqué et la bobine L restitue l'énergie emmagasinée [18].

Remarques importantes : Pour comprendre le fonctionnement des convertisseurs à découpage, deux conditions sont fondamentales :

- **La valeur moyenne de la tension aux bornes d'une bobine est nulle.**

La tension de sortie est continue.

- **Phase N°1 (0 à αT)**

Explications : Le transistor est passant et la diode D est bloquée.

Schéma équivalent :

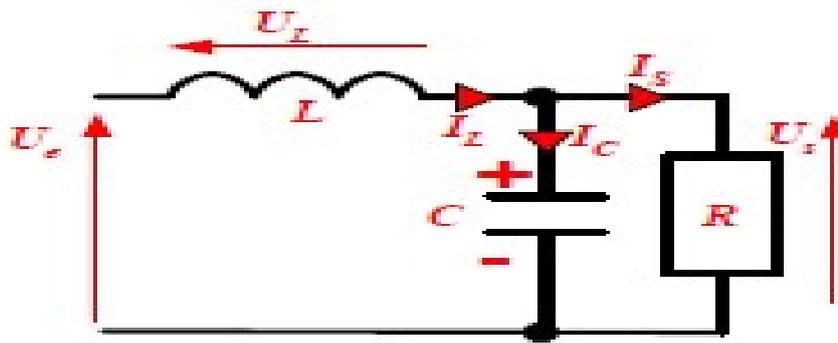


Figure 2.13. Schéma équivalent BUCK (transistor passant)

$$V_L = V_E - V_S \text{ avec } V_E > V_S$$

a. Phase N°2 (αT à T)

Explications : Le transistor est bloqué et c'est la bobine qui fournit l'énergie au montage, la diode est passante.

Schéma équivalent :

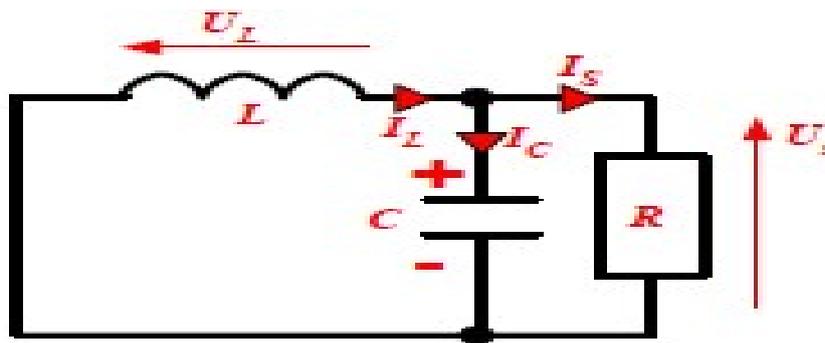


Figure 2.14. Schéma équivalent BUCK (transistor bloqué).

$$V_L = -V_S$$

2.5.4 Choix des composants.

a. rapport cyclique

Le rapport cyclique est donné par :

$$\alpha = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.17)$$

b. Choix de la bobine

Calcul :

Le calcul de la valeur de la self passe par l'ondulation crête à crête du courant de celle-ci, soit ΔI_L .

$$\Delta I_L = 5\% I_{IN} \quad (2.18)$$

$$\text{Soit } I_L = \frac{(1-\alpha)V_{out}}{\Delta I_L F} \quad (2.19)$$

ΔI_L Ondulation crête à crête du courant dans la bobine.

F : Fréquence de travail du convertisseur.

Critères technologiques :

Les selfs utilisées dans les alimentations à découpage doivent en outre supporter les Hautes fréquences (jusqu'à 100KHz). Il faut toujours choisir les modèles préconisés Par les constructeurs [18].

c. Choix du condensateur

Calcul :

Depuis le début de cet exposé, j'ai considéré que la tension v était continue, mais en réalité une petite variation $v(t)$ subsiste [18].

Soit :

$$C = \frac{(1-\alpha)V_{out}}{8LF^2\Delta V_{out}} \quad (2.20)$$

ΔV_{out} Ondulation crête à crête de la tension de sortie.

Critères technologiques :

Les condensateurs utilisés dans les alimentations à découpage doivent avoir une Faible résistance série (ESR Effective Série Résistor). En effet l'ondulation de la tension de sortie est proportionnelle aux variations de courant du condensateur.

d. Choix de la diode et du transistor T

Le principal critère de choix de la diode doit être la rapidité, en effet les convertisseurs à découpage fonctionnent à des fréquences de l'ordre de la dizaine de kilohertz. On choisit par conséquent des diodes rapides comme les diodes schottky. Pour le transistor, il doit posséder une faible résistance et commuter rapidement, on utilise souvent des transistors MOS.

e. Ondulations de sorties

• Ondulation du courant dans l'inductance:

$$C = \frac{(1-\alpha)V_{out}}{8LF^2\Delta V_{out}} \quad (2.21)$$

- *Ondulation de la tension de sortie ($ESR = 0\Omega$):*

$$\Delta V_{out} = 10\% V_{out} \quad (2.22)$$

2.5.5 Application numérique

$$R = \frac{V_{out}^2}{P} \frac{400}{190} = 2.1 \Omega$$

$$\alpha = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{20}{426.38} = 0.76$$

$$\Delta I_L = 5\% I_{in} = 0.05 \times 7.61 = 0.38 \text{ A}$$

$$L = \frac{(1-\alpha)V_{out}}{\Delta I_L F} = 126 \mu\text{H}$$

$$\Delta V_{out} = 10\% V_{out} = 0.2 \text{ V}$$

$$C = \frac{(1-\alpha)V_{out}}{8LF^2\Delta V_{out}} = \frac{(1-0.76)20}{8 \times 126 \times 0.2 \times (10^5)^2 \times 10^{-6}} = 2.38 \mu\text{F}$$

2.6 RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (MPPT) D'UN GPV

2.6.1 Introduction

Des méthodes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximaux de leurs caractéristiques sans qu'à priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni quelles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques comme notre panneau solaire cela se traduit par des points de puissance maximale. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance[20].

2.6.2 Principe de la recherche du point de puissance maximal.

La figure 2.18 représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT. Comme présenté sur la figure, la commande MPPT est associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de faire une adaptation entre le GPV et la batterie. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DCDC, dans notre cas un SEPIC, pour que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P_{max}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la batterie. La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le GPV à sa valeur optimale de fonctionnement quelles que soient les fluctuations atmosphériques [20].

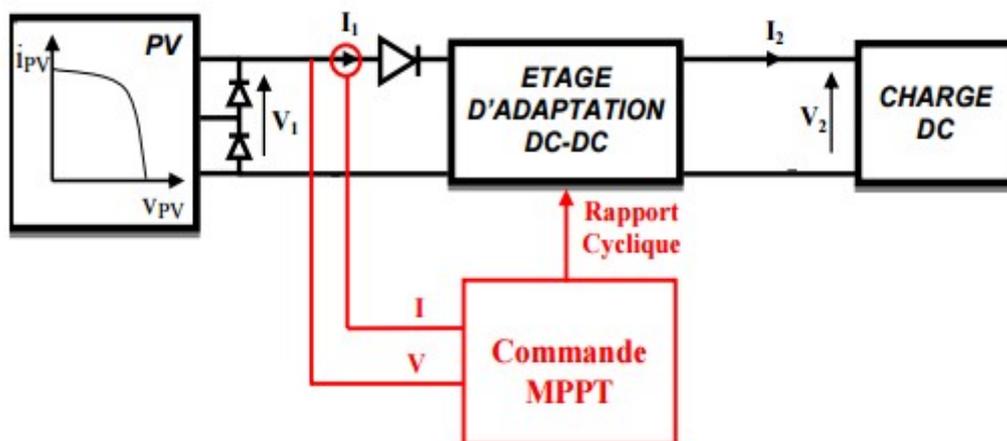


Figure 2.16. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

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

La figure 2.19 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un

dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV

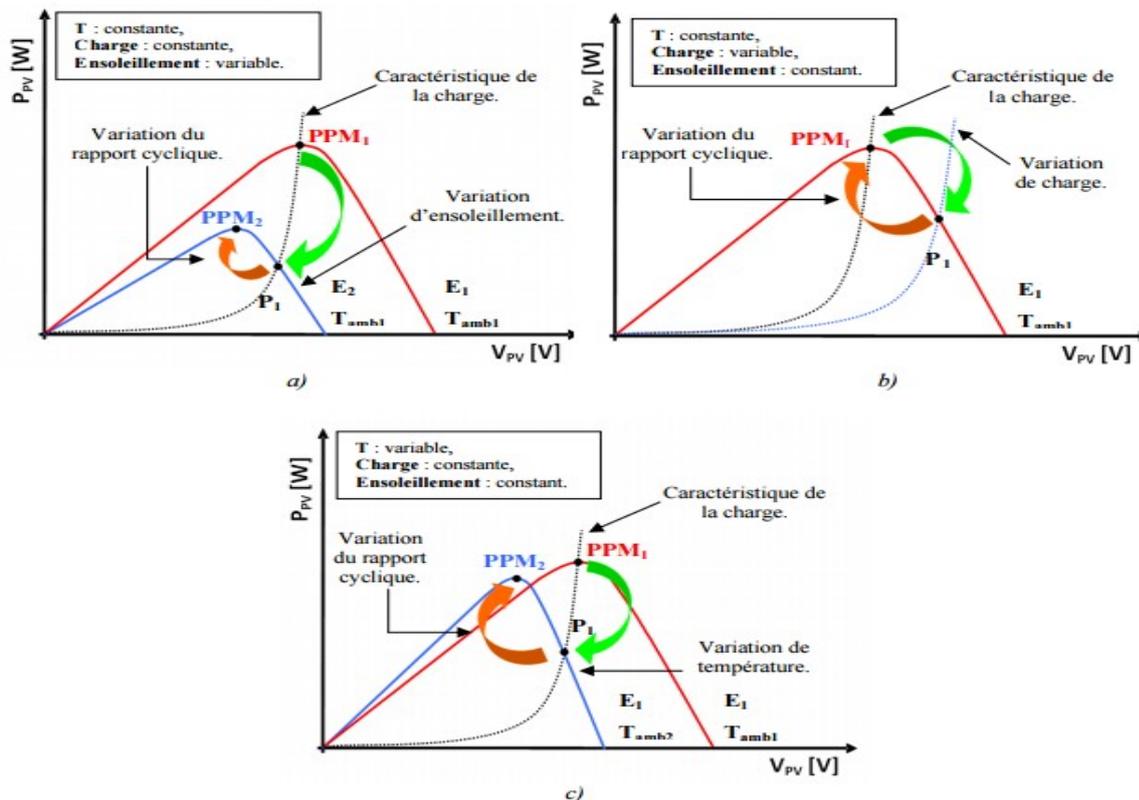


Figure 2.17. Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal [20].

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

2.6.3 Techniques de commande MPPT

Dans la littérature, il existe différents types d'algorithmes effectuant la recherche du point de puissance maximale (PPM) [21]. Les trois méthodes les plus utilisées sont : Hill Climbing, Perturb&Observ (P&O) et l'incrément de conductance (IncCond).

Dans ce travail, nous utilisons la méthode Perturb& Observe (P&O) qui est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation. Elle consiste à perturber la tension (V_{pv}) d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la

variation de puissance (P_{pv}) qui en résulte [22]. Comme illustré à la figure 2.20, on peut observer que si une incrémentation positive de la tension (V_{pv}) engendre un accroissement de la puissance (P_{pv}), le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Au contraire, si la puissance décroît, le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique (P_{pv}/V_{pv}), on peut facilement situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de le faire converger vers le maximum de puissance en imposant une valeur appropriée au courant de sortie du module PV

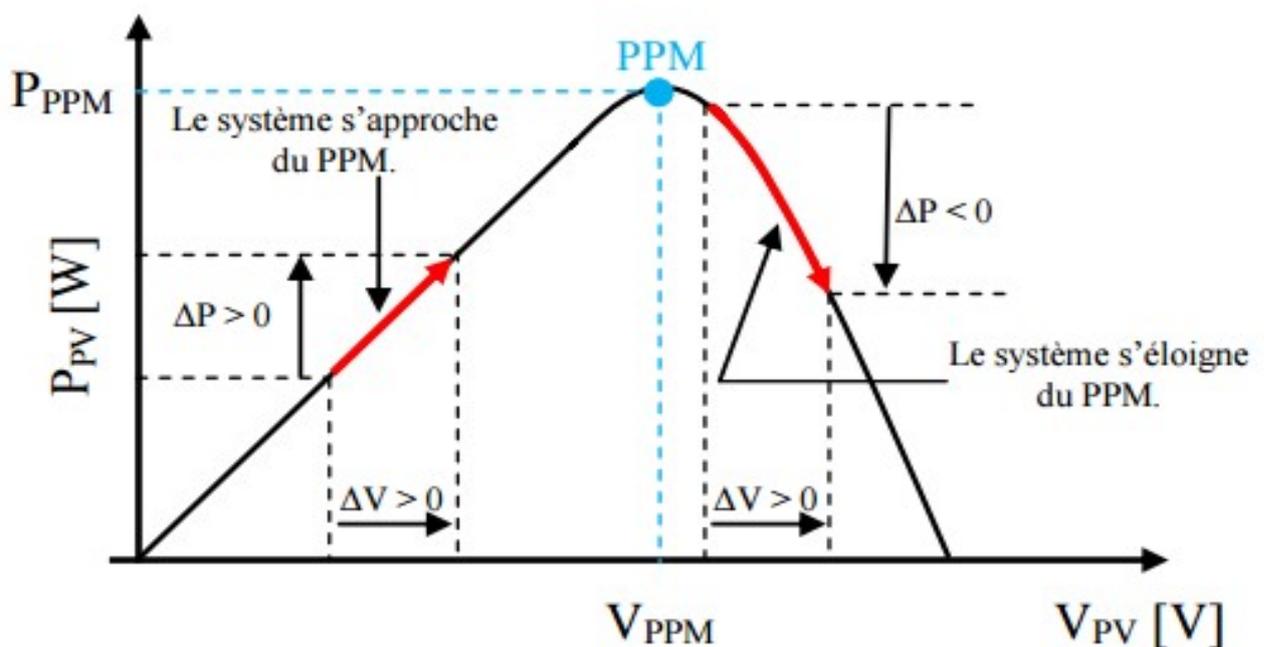


Figure 2.18. Schéma du principe de la méthode P&O[20].

La figure 2.19 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

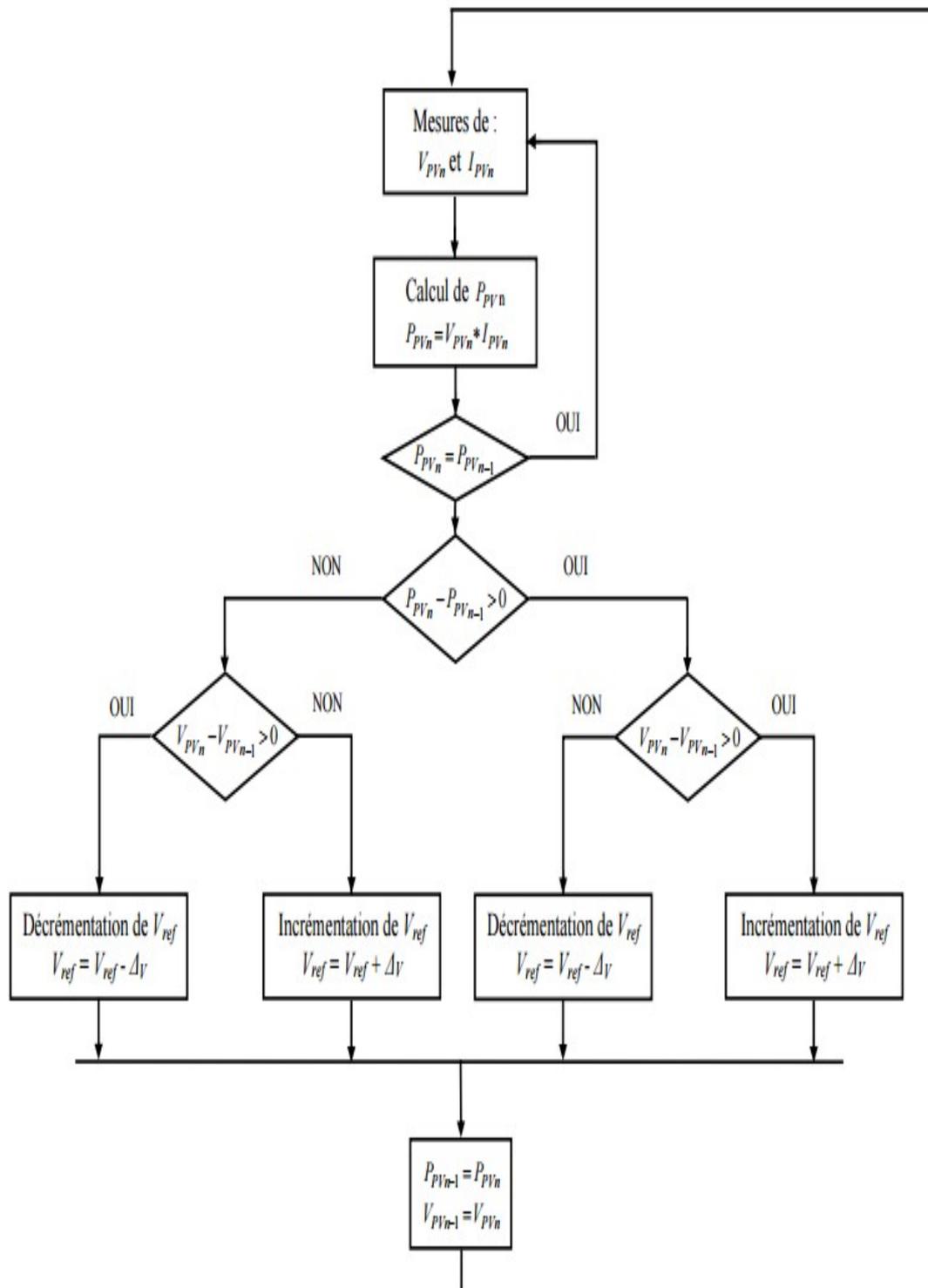


Figure 2.19. Algorithme de la méthode Perturb&Observ[20].

La méthode P&O est aujourd’hui largement utilisée de par sa facilité d’implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu’elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce

dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

Ce problème est mis en évidence, par exemple par NoppadolKhaehintung, publiée en 2006 [23], où la recherche du PPM est effectuée avec deux valeurs fixes d'incrément. L'une correspondant à $\Delta V1 = 2/256$ V et l'autre à $\Delta V2 = 5/256$ V. A partir des oscillogrammes proposés, le temps mis pour atteindre le nouveau PPM, lors d'une variation de puissance de l'ordre de 8 W, est de 200 ms pour l'incrément de faible valeur, alors que celui-ci est divisé par deux pour l'incrément de forte valeur. En contrepartie, les oscillations autour du PPM sont accentuées pour ce dernier. Malheureusement, la qualité des relevés ne permet pas d'évaluer la précision statique de la MPPT (voir la notion de rendement MPPT défini en fin de chapitre), obtenue avec ces deux incréments proposés par l'auteur ni le choix d'autres incréments si le GPV change.

Par contre, une étude comparative entre différents algorithmes de recherche a été effectuée par D. P. Hohm en 2000 [24]. Dans cet article, l'auteur a développé un banc de mesure et une procédure de test qui permettent d'évaluer différentes commandes MPPT sous les mêmes conditions climatiques durant une journée de fonctionnement. Les principes de recherche analysés sont, outre la méthode P&O, l'incrément de conductance et une méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert (VOC), détaillées toutes deux dans la suite du document. Il ressort de cette étude que la commande MPPT testée basée sur le principe P&O [25] affiche un rendement MPPT de l'ordre de 96,5 %, cependant aucune indication n'est fournie par l'auteur sur la valeur de la variable d'incrément et si cette valeur est une valeur moyenne ou une valeur liée aux conditions climatiques. En effet, il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement au soleil. Par contre pour une journée présentant de forts changements d'irradiations très fréquents, cette commande présente plus de pertes, engendrées par le temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM[20].

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre l'étude et le dimensionnement du convertisseur SEPIC, BOOST et BUCK, leurs fonctionnements et ses performances ont été présentés. Les directives d'optimisation de la conception, nous ont aidés à donner un bon dimensionnement aux convertisseurs. Nous avons aussi présenté une commande MPPT pour les trois convertisseurs SEPIC, BOOST et BUCK pour la recherche du point maximal de puissance du générateur photovoltaïque, à savoir la méthode Perturbe et Observe.

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous abordons deux parties distinctes, la première partie sera consacrée à la simulation des trois convertisseurs SEPIC et BOOST et BUCK adapté par une commande MPPT numérique «Perturbation et Observation» appliquées à un système photovoltaïque.

Dans le but de comparer les performances de ces trois convertisseurs contrôlés chacun par l'algorithmes développés dans le chapitre précédent, les architectures sont implémentées sous SIMULINK. Puis les performances des trois convertisseurs contrôlés par un MPPT, à savoir Perturbation et Observation sera implémenté sur cible FPGA en utilisant XILINX System Generator.

Et enfin une comparaison des trois performances pour l'environnement sera discutée

A. Implémentation du système dans l'environnement SIMULINK :

1. Introduction :

MATLAB fait partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, est un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulation spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop. [1].

2. Valeurs des composants adoptées pour la simulation :

On se référant au chapitre précédent les valeurs adoptées pour la simulation des convertisseurs SEPIC, BOOST et BUCK sont dressés dans les trois tableaux ci-dessous.

2.1 Valeurs des composants adoptées pour la simulation de SEPIC :

Description	Estimation
Inductance(L1)	207 μ H
Inductance(L2)	207 μ H
Condensateur(C1)	8,61 μ F
Condensateur(C2)	135 μ F
MOSFET(S)	STW40NF20
Charge Résistive ()	8,42 Ω
Diode de puissance	BYT30-1000
Fréquence de coupure	100 khz
Rapport cyclique α	0.60

Tableau 3.1. Valeur des composants pour convertisseur SEPIC

2.2 Valeurs des composants adoptées pour la simulation de BOOST :

Description	Estimation
Inductance(L)	155,51 μ H
Condensateur©	37,1 μ F
MOSFET (S)	STW40NF20
Charge Résistive ()	9,2 Ω
Diode de puissance	BYT30-1000
Fréquence de coupure	100 khz
Rapport cyclique α	0.45

Tableau3.2. Valeur des composants pour convertisseur BOOST

2.3 Valeurs des composants adoptées pour la simulation de BUCK:

Description	Estimation
Inductance(L1)	126 μ H
Condensateur(C1)	2,38 μ F
MOSFET(S)	STW40NF20
Charge Résistive ()	2,1 Ω

Diode de puissance	BYT30-1000
Fréquence de coupure	100 khz
Rapport cyclique α	0.76

Tableau 3.3. Valeur des composants pour convertisseur BUCK

3. Simulation sous SIMULINK

Architectures adaptées dans l'espace SIMULINK :

3.1 Etage d'adaptation convertisseur SEPIC

Le système photovoltaïque composé de panneau photovoltaïque, un MPPT, et un étage d'adaptation représentée par un convertisseur SEPIC.

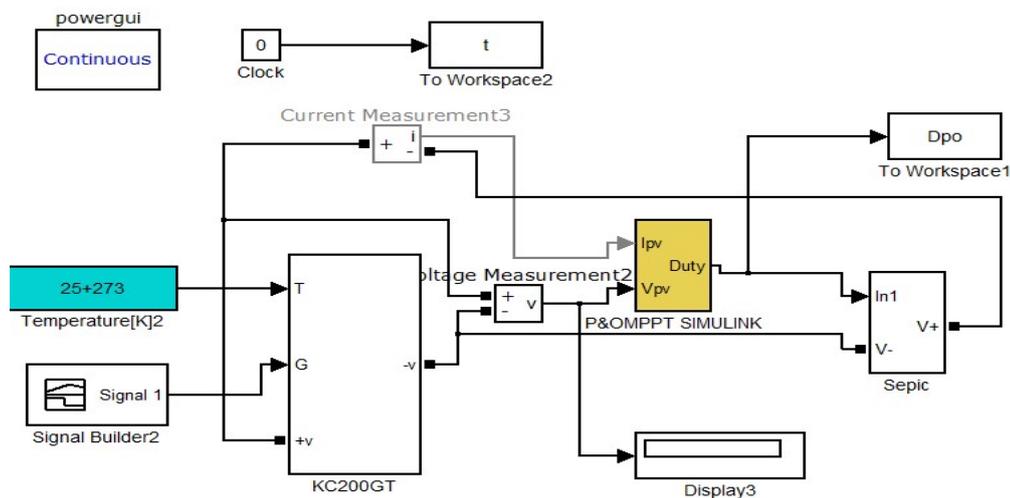


Figure3.1. Système photovoltaïque avec convertisseur SEPIC sous SIMULINK

Le schéma ci-dessous représente le modèle électrique de convertisseur SEPIC, il est composé de 2 bobines ($L1$ et $L2$), 2 condensateurs $C1$ de couplage doit être capable de laisser passer le courant efficace de la source vers la charge, et $C2$ de filtrage à la sortie du convertisseur SEPIC permet de filtrer la tension et de maintenir celle-ci constante, un interrupteur MOSFET, une diode. Ce circuit est alimenté par une source de courant continue de tension optimale égale à 26.3V (un générateur GPV).

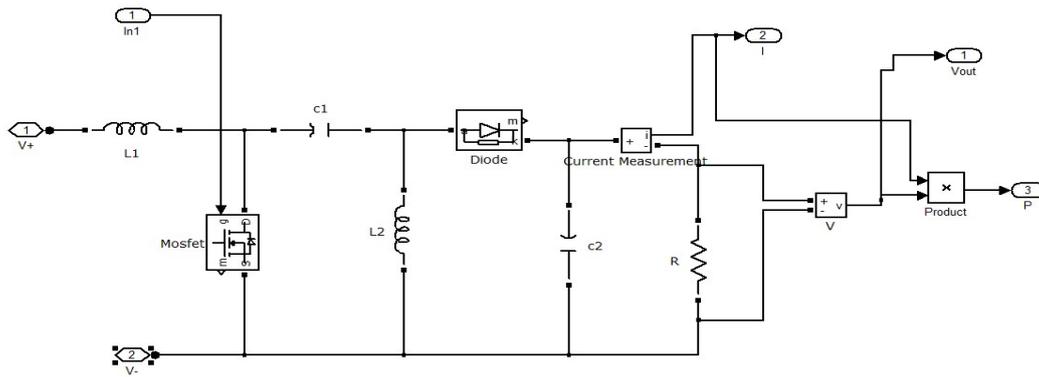


Figure 3.2. Schéma de convertisseur SEPIC sous SIMULINK.

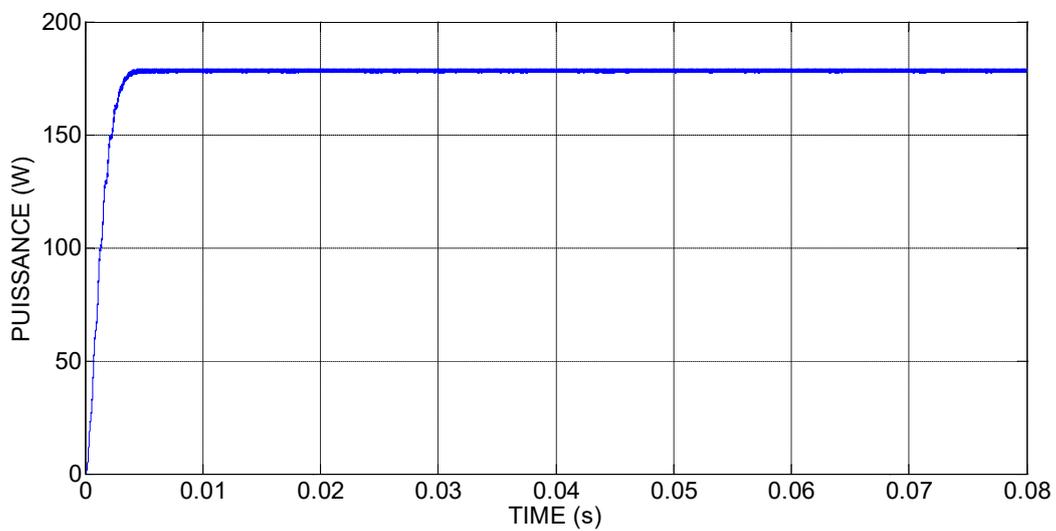


Figure 3.3. la simulation de puissance de sortie du SEPIC sous SIMULINK.

3.2 Etage d'adaptation convertisseur BOOST

Le système photovoltaïque composé de panneau photovoltaïque, un MPPT, et un étage d'adaptation représentée par un convertisseur BOOST.

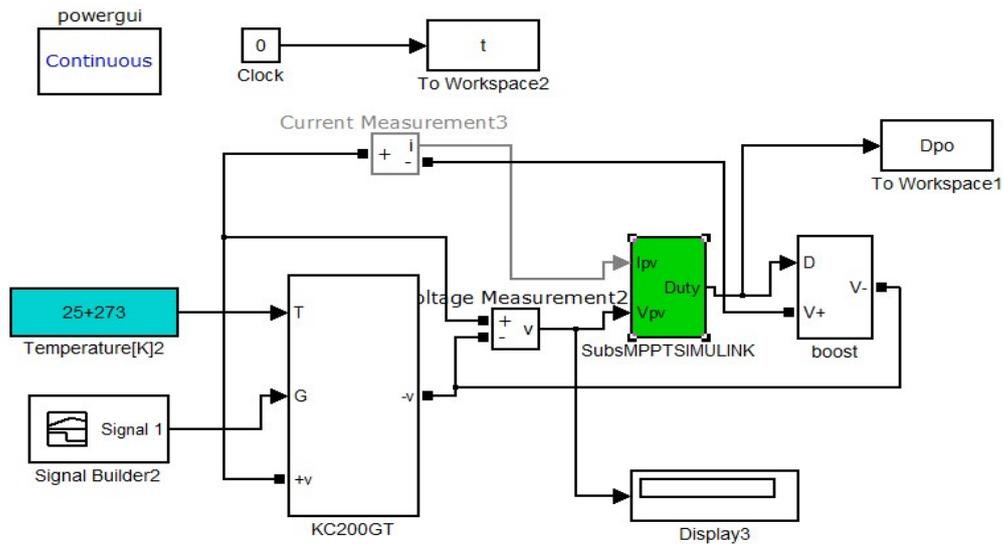


Figure 3.4. Système photovoltaïque avec convertisseur BOOST sous SIMULINK.

Le schéma ci-dessous représente le modèle électrique de convertisseur BOOST, il est composé d'un bobine (L), un condensateur C de filtrage permet de filtrer la tension, un interrupteur MOSFET, un diode. Ce circuit est alimenté par une source de courant continue de tension optimale égale à 26.3V (un générateur GPV).

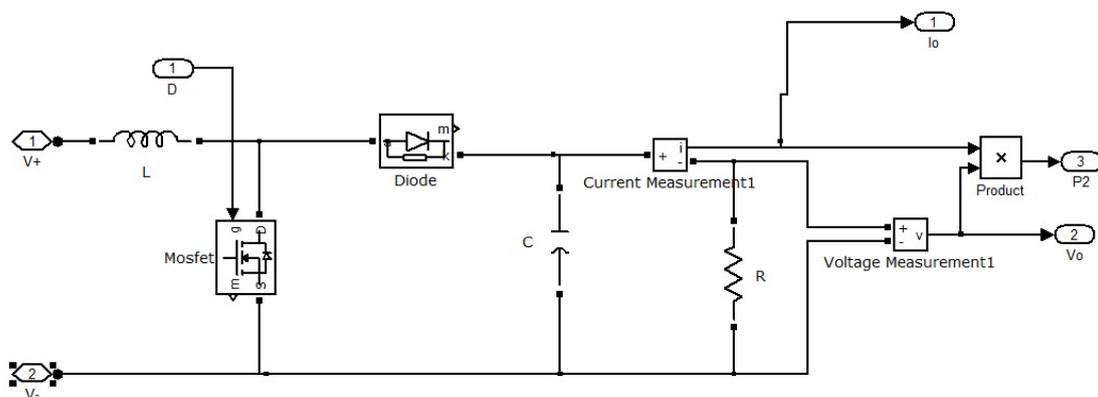


Figure 3.5. Schéma de convertisseur BOOST sous SIMULINK.

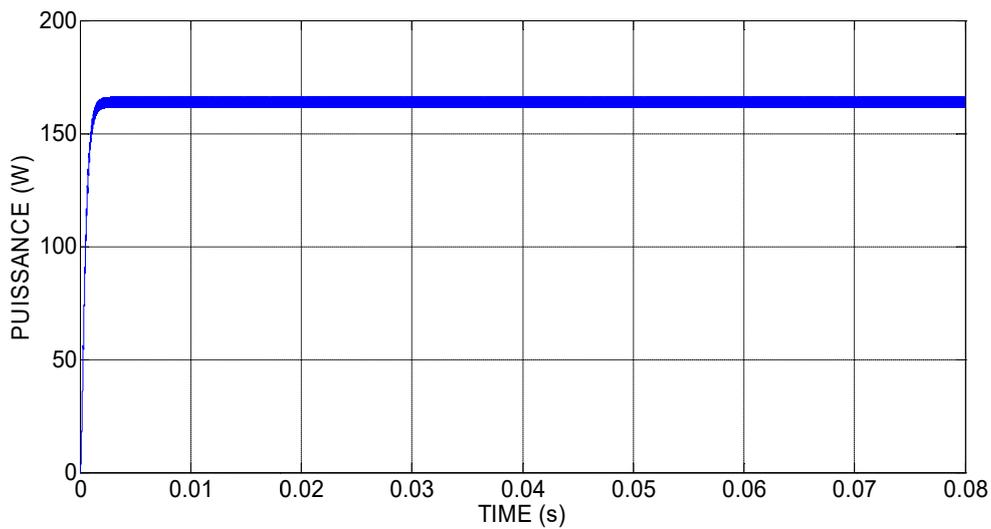


Figure 3.6. la simulation de puissance de sortie du BOOST sous SIMULINK.

3.3 Etage d'adaptation convertisseur BUCK

Le système photovoltaïque composé de panneau photovoltaïque, un MPPT, et un étage d'adaptation représentée par un convertisseur BUCK.

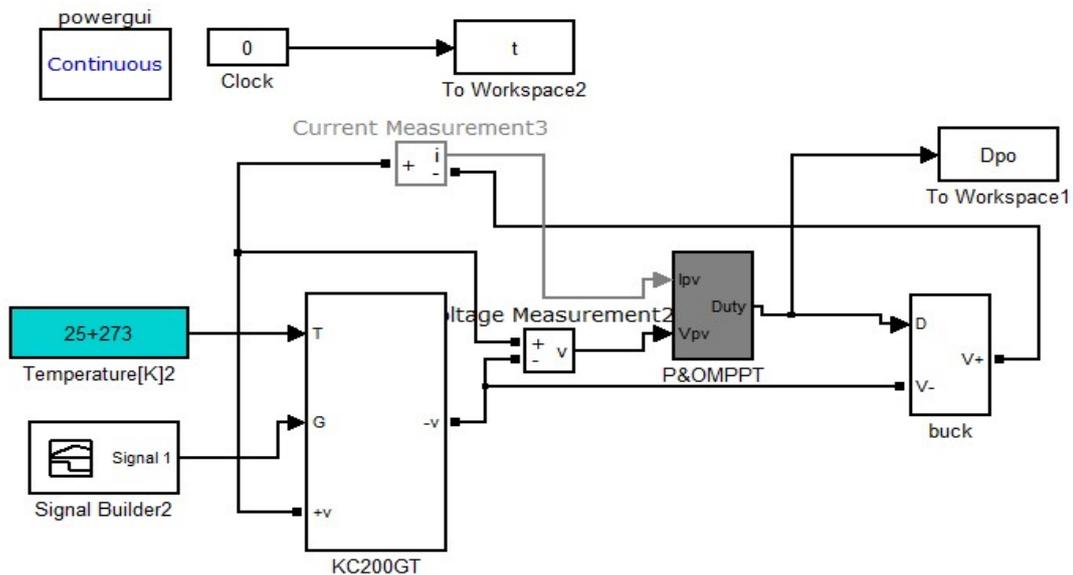


Figure 3.7. Système photovoltaïque avec convertisseur BUCK sous SIMULINK.

Le schéma ci-dessous représente le modèle électrique de convertisseur BUCK, il est composé d'un bobine (L), un condensateur C de couplage doit être capable de laisser passer le courant efficace de la source vers la charge, , un interrupteur MOSFET, un diode. Ce circuit est

alimenté par une source de courant continue de tension optimale égale à 26.3V (un générateur GPV).

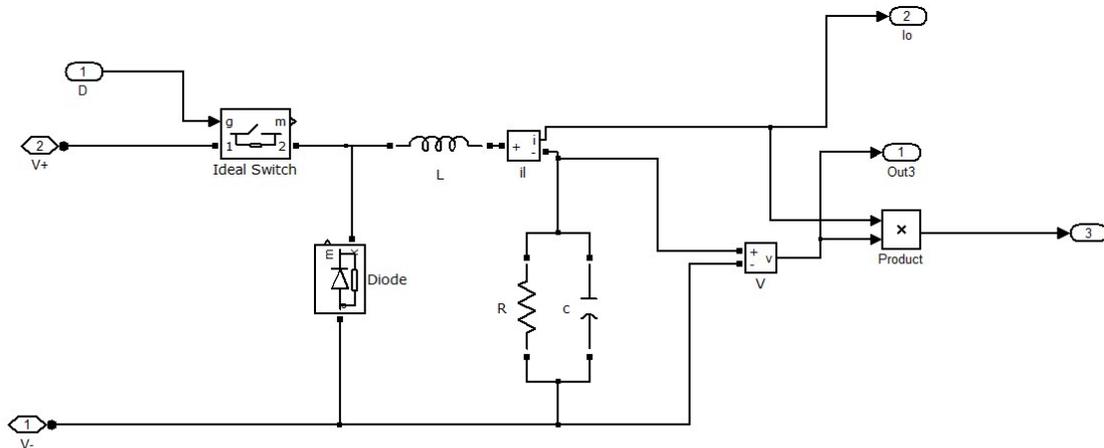


Figure 3.8 Schéma de convertisseur BUCK sous SIMULINK.

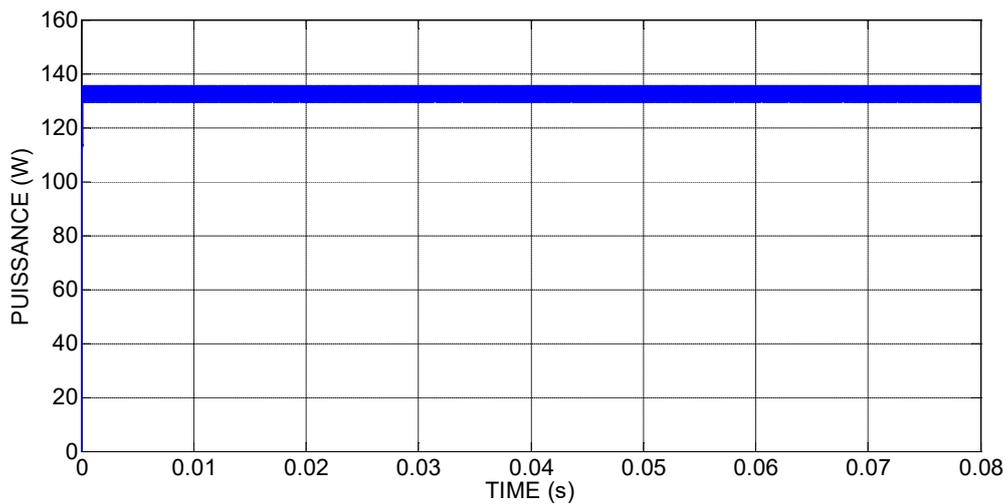


Figure 3.9. la simulation de puissance de sortie du BUCK sous SIMULINK.

4 .Algorithme P&O (perturb and observe) sous MATLAB SIMULINK

On a fait l'Algorithme dans MatlabSIMULINK comme suit :

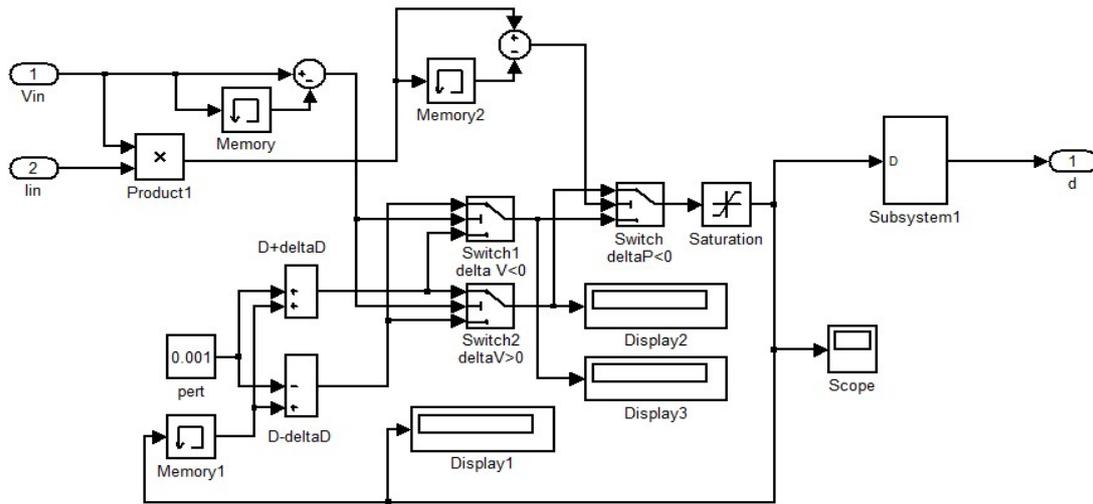


Figure 3.10. Schéma de MPPT perturb&observ (P&O) sous Simulink.

La figure (3.7) représente la commande MPPT perturbée et observée sous MATLAB/SIMULINK qui donne à sa sortie le rapport cyclique α .

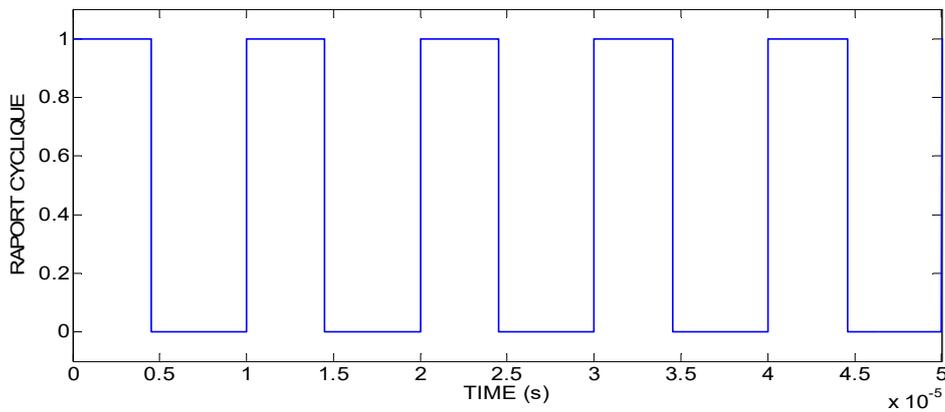


Figure 3.11. Rapport cyclique de convertisseur BOOST sous SIMULINK.

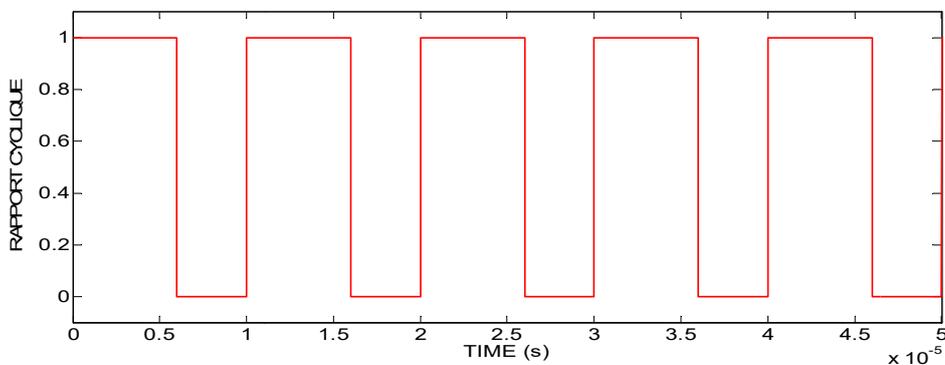


Figure 3.12. Rapport cyclique de convertisseur SEPIC sous SIMULINK.

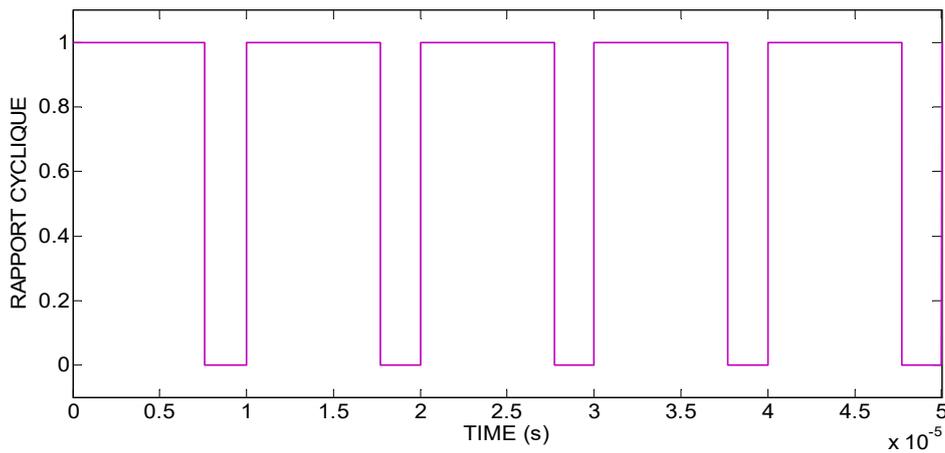


Figure3.13. Rapport cyclique de convertisseur BUCK sousSIMULINK.

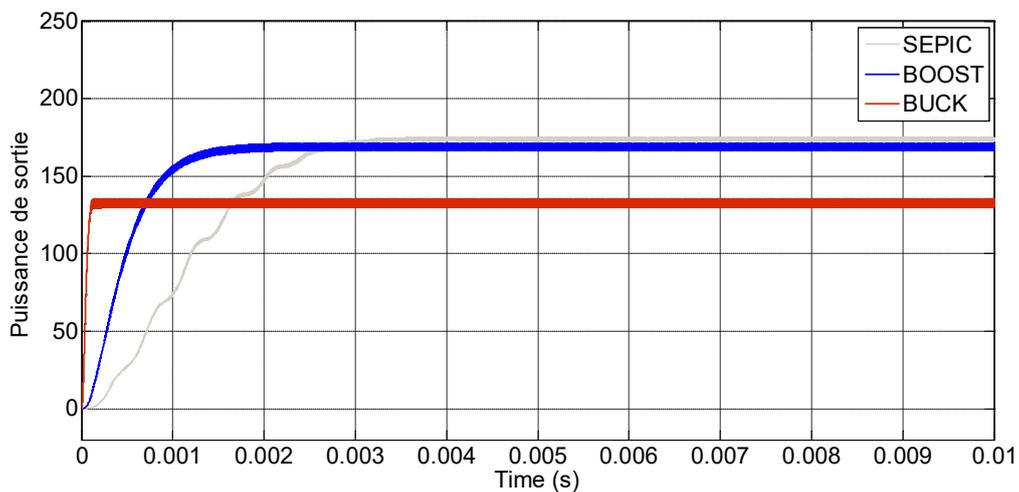


Figure 3.14. Puissance à la sortie des trois convertisseurs contrôlés par L'algorithmes P&O.

Le graphe de figure (3.14) présente les résultats de la simulation de la puissance à la sortie des convertisseurs BOOST, SEPIC et BUCK contrôlé par L'algorithmes P&O sous MATLAB SIMULINK.

Convertisseurs	Tempe de réponse	puissance
SEPIC	0,0014 s	113,4 w
BOOST	0,0006 s	112 w
BUCK	0,0004 s	88,2 w

Tableau 3.4. comparaison entre les trois convertisseurs sous SIMULINK

on remarque que le convertisseur BUCK possède le meilleur temps de réponse après c'est le BOOST et le dernier c'est le SEPIC.

la puissance de SEPIC est mieux que les autres convertisseurs et le BOOST c'est le deuxième et après le BUCK

B. Implémentation du système sur XSG :

1. INTRODUCTION

Un circuit logique programmable, ou réseau logique programmable, est un circuit intégré logique qui peut être reprogrammé après sa fabrication. Notons qu'il serait impropre de parler de programmation au sens logiciel (contrairement à un microprocesseur, il n'exécute aucune ligne de code). Ici, mieux vaudrait parler de « reconfiguration » plutôt que de reprogrammation (on modifie des connexions ou le comportement du composant, on connecte des portes logiques entre elles, etc.). Le verbe programmer est toutefois le plus fréquent, mais au sens de personnaliser. Il s'agit bel et bien de réseaux logiques reconfigurables et modifiables.

Il est composé de nombreuses cellules logiques élémentaires et bascules logiques librement connectables (c'est justement la reconfiguration, ou programmation, du composant qui définit les connexions faites entre portes logiques). [2]

2. Le system generator XSG:

La librairie XSG Outils contient les fonctions essentielles, généralement utilisées dans le cadre de la programmation sur cible FPGA, sous la forme de blocs Simulink® standards. Ces blocs de fonctions de haute qualité sont prêts à l'emploi, simples à adapter à votre projet, et facilitent ainsi considérablement la programmation de votre FPGA. Parmi les fonctions disponibles, citons des fonctions E/S améliorées, des oscilloscopes, des tables d'interpolation mais également un calculateur de moyennes, un générateur de fonctions sinus et un codeur de forme d'onde.

Afin que vous puissiez n'acheter que le jeu de fonctions dont vous avez besoin pour votre propre application FPGA, dSPACE offre la XSG Utiles Library comme sous-ensemble de fonctions avec la XSG Electric Components Library ou la XSG ACMC Library. Différentes versions de toutes ces librairies sont disponibles, selon que vous soyez développeur ou utilisateur d'applications FPGA.

3 .MPPT perturbe et observe« P&O»sous XILINX

Le système générateur de XILINX fournit un ensemble de blocs de SIMULINK (modèles) pour plusieurs opérations de matériel qui pourraient être mises en application sur divers Xilinx FPGA. Ces blocs peuvent être employés pour simuler la fonctionnalité du système de matériel utilisé dans l'environnement de Simulink.

. La figure ci-dessous illustre l'architecture du MPPT P&O sous XSG.

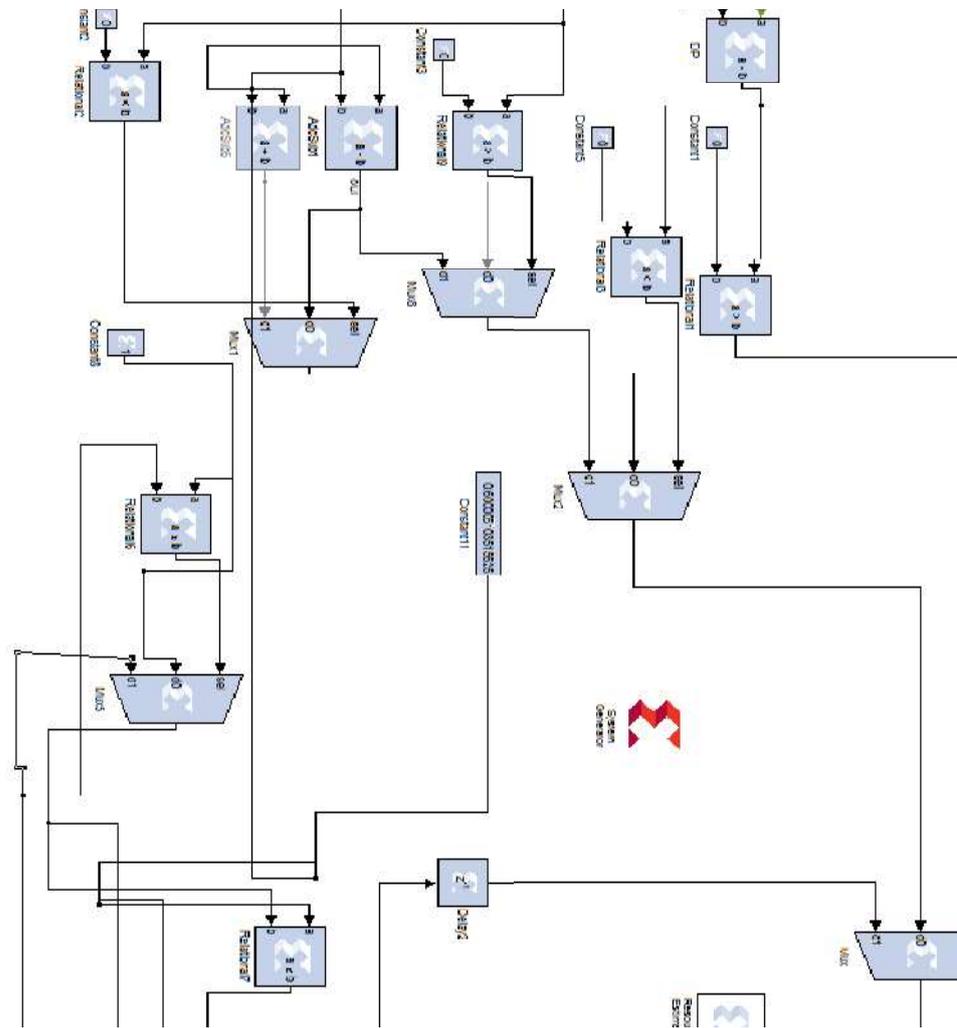


Figure 3.15. Architecture de l'algorithme P&O sous XSG.

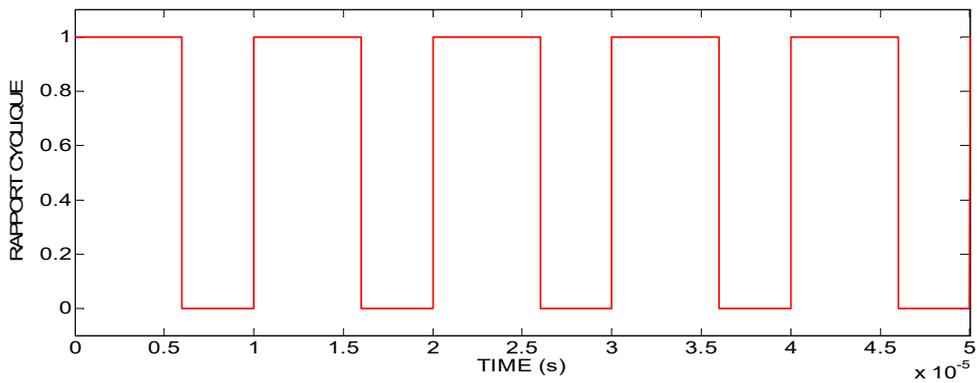


Figure3.16. Rapport cyclique de convertisseur SEPIC sousXSG.

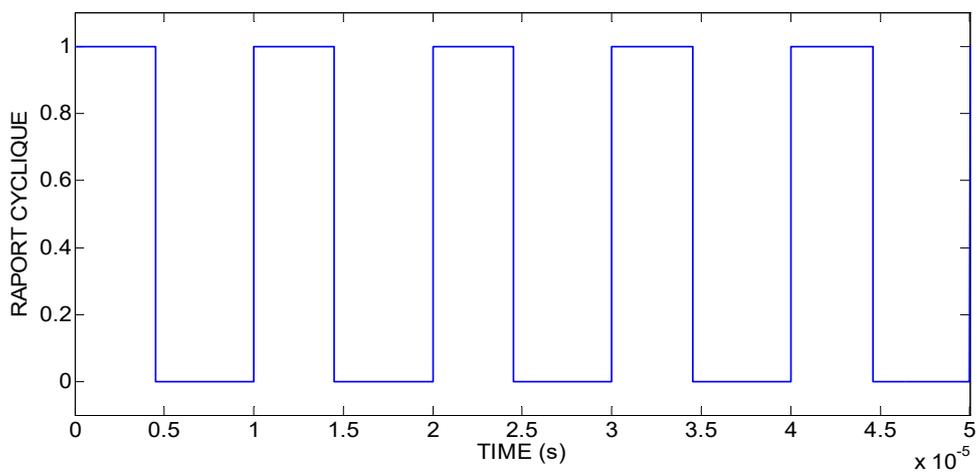


Figure3.17. Rapport cyclique de convertisseur BOOST sousXSG.

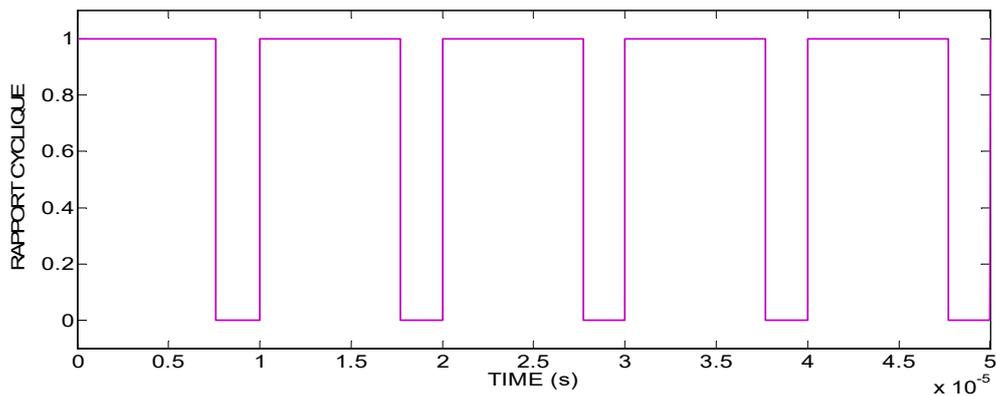


Figure3.18. Rapport cyclique de convertisseur BUCK sousXSG.

Les figuresprésentent les différencesrésultats de rapportcyclique des convertisseurs SEPIC,BOOST et BUCK en XSG.

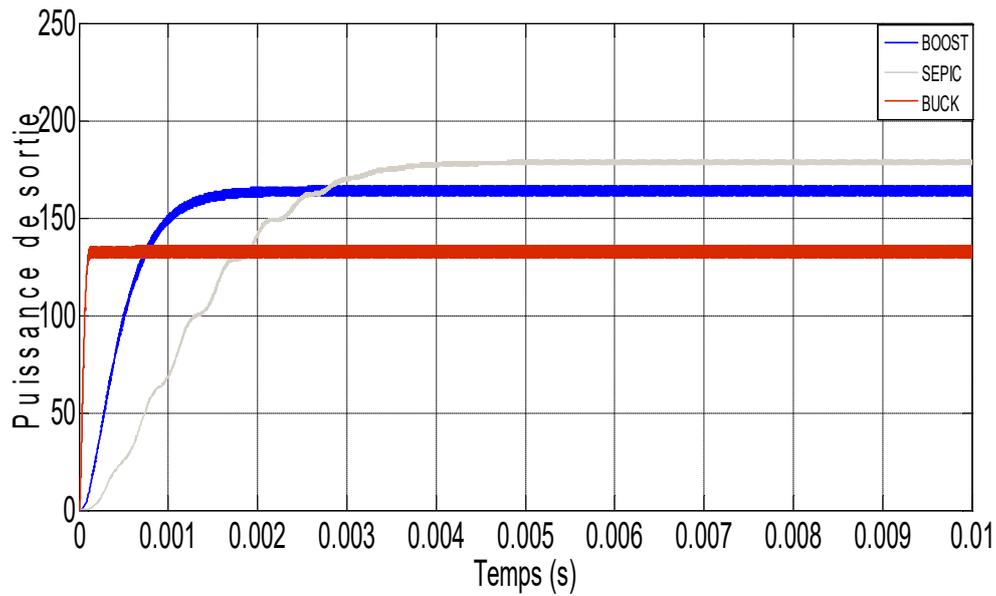


Figure 3.19. comparaison des trois convertisseurs pour un MPPT P&O sous XSG.

La figure représente la simulation de puissance de sortie sous XSG des trois convertisseurs SEPIC, BOOST et BUCK.

Convertisseurs	Tempe de réponse	puissance
SEPIC	0,0013 s	114 w
BOOST	0,0007 s	111 w
BUCK	0,0005 s	88 w

Tableau 3.5. comparaison entre les trois convertisseurs

on remarque que les résultats de XILINX et MATLAB SIMULINK sont les mêmes.

3.2 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons simulé notre MPPT sous SIMULINK/MATLAB et sous XILINX par un MPPT P&O avec trois convertisseurs. Les résultats obtenus sont les mêmes.

Cette étude présente la comparaison des trois convertisseurs différents reliés avec le dispositif de commande MPPT Perturbance Observer, on a fait ces simulations sous MATLAB SIMULINK et XILINX et aussi dans ce programme il y a un panneau solaire simple qui a la norme la valeur de l'insolation et la température a été inclus dans la simulation circuit. De tous les cas, les deux simulations sont les mêmes.

On remarque que le fonctionnement des trois convertisseurs est acceptable et chaque un son rôle par exemple le BOOST augmente la tension, le BUCK diminue la tension et SEPIC augmente légèrement la tension.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à l'étude et la comparaison des performances entre trois convertisseurs SEPIC, BOOST et BUCK contrôlés par un MPPT "Maximum Power Point Tracking" à savoir Le Perturbe and Observe (P&O).

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les différentes parties constituant un système photovoltaïque : le générateur photovoltaïque, l'étage d'adaptation.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié le dimensionnement et le principe du fonctionnement de chaque convertisseur, et on a présenté le rôle MPPT P&O.

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 bloc MPPT) sur SIMULINK MATLAB pour comparer entre les performances des trois convertisseurs, et aussi le but de ce chapitre est l'implémentation de l'algorithme P&O sur un circuit FPGA pour le contrôle des trois convertisseurs. Pour cela nous avons adopté une architecture sous XSG. Les résultats obtenus sont comparables aux résultats obtenus sous SIMULINK, nous avons remarqué le temps de réponse des trois convertisseurs. Cette architecture nécessite une bonne optimisation afin de faciliter son implémentation sur cible FPGA. Cette comparaison aide nous beaucoup donc notre résultat est acceptable.

Bibliographie de chapitre 1 :

- [1] Daniel LINCOT, « La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire », Découverte N° 344-345, Janvier-Février 2007, France.
- [2]. A.Mohammed Ahmed, "Study of interconnecting issues of photovoltaic/windhybrid system with electric utility using artificial intelligence", Electrical engineering dept., faculty of engineering, El-Minia University 2006.
- [3]. B.Bendib, "Techniques conventionnelles et avancées de MPPT pour des applications photovoltaïques: étude comparative", mémoire de Magister, département d'Electronique .Université Ferhat Abbes-Sétif 2007.
- [4]. N.Saadaoui, "Modélisation et extraction automatique des paramètres d'un générateur photovoltaïque", mémoire de Magister, département d'Electrotechnique, Université Ferhat Abbes-Sétif 2010.
- [5] A. BELHAOUA simulation et prise en charge des défauts des régulateurs photovoltaïques. Thèse d'ingénieur d'état en électronique. USTHB 2004.
- [6] M. OUSAID, « *Optimisation d'un Générateur Photovoltaïques par Réseaux de Neurones Artificiels : Application au Pompage Photovoltaïques* », Mémoire de Fin d'Etudes, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.
- [7] T. OBEIDI, « *Commande des hacheurs MPPT par logique floue* », Mémoire de Magister, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2006.
- [8] M. SLAMA Fateh « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, département d'Electronique .Université Ferhat Abbes-Sétif 2011.
- [9] O. THAMEUR, « *Application des algorithmes génétiques dans la commande des hacheurs MPPT* », Mémoire de Magister, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2006.
- [10]. M. Djarallah, "Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique,". Thèse de doctorat en sciences, Université de Batna 2008.
- [11]. B.Mohammed, "Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome," mémoire de Magister, Centre universitaire de Bechar, 2008.
- [12] W. PALZ, « *L'électricité Solaire* », Dunod Unesco, Paris, France, 1981.
- [13] colloque national sur l'énergie solaire CNESOL 2006.

- [14] Article de M.Belmili Hocine « Dimensionnement d'un system hybride PV/ éolien. » Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES).
- [15] Y. Pankow, " Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque", Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'ENSAM ED432, 2004.
- [16] " Énergie photovoltaïque " Guide d'énergie renouvelable 2002.
- [17] Luc Chancelier-Eric Laurent « électricité photovoltaïque » Collection 'Le point sur'
- [18] M. ARROUF, « Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2006.
- [19] J.M. KOO, « *Development of a flat-plat solar collector design program* », Master Thesis, University of Wisconsin, 1999.

Bibliographie de chapitre 2 :

- [1] R. D. Middlebrook, S. Ćuk. "A General Unified Approach to Modeling Switching Power Converter Stages." In IEEE International Conference PESC'76 Proceedings, pp.18–34, Cleveland, OH, USA, 1976. [2] S. Ćuk, R. D. Middlebrook. "A General Unified Approach to Modeling Switching DC-to-DC Converters in Discontinuous Conduction Mode." In IEEE Power Electron. Spec. Conf., pp.36–57, Jun.1977.
- [3] H. Lee, P. Mok, and W. H. Ki. "A Novel Voltage-Control Scheme for Low Voltage DC-DC Converters with Fast Transient Recovery." In IEEE International Symposium on Circuits and Systems." Geneva, Switzerland, May 2000.
- [4] S. C. Tan, Y. M. Lai, and C. K. Tse. "A Unified Approach to the Design of PWM-Based Sliding Mode Voltage Controllers for Basic DC-DC Converters in Continuous Conduction Mode." IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol.53 (8) pp.1816–1827, 2006.
- [5] I. Gadoura, T. Suntio, and K. Zenger. "Model Uncertainty and Robust Control of Paralleled DC-DC Converters." In IEE International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Bath, UK, 2002.
- [6] M. Biswal, Master of Technology (Research), —control techniques for dc-dc buck converter with improved performance|| , National Institute of Technology , Rourkela, March 2011.

- [7] A. Lyes, "Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque," UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU Mémoire de Magister, 2011.
- [8] A.Saadi, "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque," Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.
- [9] : Julien LABBÉ, « L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés », Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris Spécialité "Énergétique", 2006.
- [10] : SoltaneBelakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Thèse de Doctorat en sciences, Université de Constantine, 2010.
- [11]: BoucheritteWafa, « Convertisseurs multiniveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau», Mémoire de Magister en Electrotechnique, Option Energies renouvelables, Université Mohamed Khider , Biskra, 2013.
- [12] N. Abouchabana, " Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT ", Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [13] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, "Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque ", Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005.
- [14] JEAN-PAUL FERRIEUX ET FRANÇOIS FOREST : « Alimentation à découpage, Convertisseurs à résonance, Principes-composants-modélisation », Dunod, 3ième édition, 1999. WÜRTH ELEKTRONIK, « Trilogy of magnetic », 4th extended and revised edition, 2009. J.C. CHAUVEAU, G. CHEVALIER, B. CHEVALIER, « Mémotech électronique : Composants », Casteilla, 4ième édition, 1999. TEXAS INSTRUMENT, « AN-1484 Designing A SEPIC Converter », SNVA168D–May 2006–Revised April 2008. Consulté le 22 janvier 2013. <http://www.ti.com/lit/an/snva168d/snva168d.pdf>.
- [15] SepicDesign ,Texas Instrument SLVA-442, octobre 2010, www.ti.com.
- [16] https://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Boost.
- [17] H. LEQUEU – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9, 2004/2005.

[18] Pierre Mayé -DUNOD, Philippe LETENNEUR – STS Granville 2003-2004. Alimentation_electrique.pdf.

[19] https://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Buck.

[20] Cédric CABAL. Thèse "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque". préparée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS. UNIVERSITE TOULOUSE III, 2008.

[21] T. Eram, P. L. Chapman. "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques", IEEE Transactions On. Energy Conversion, Vol. 22, pp. 439- 449, Jun. 2007.

[22] N. Femia, G. Pétrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, "Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method", IEEE Transactions On Power Electronics, Vol.20, No. 4, pp. 16-19, Mar. 2004.

[23] K. Noppadol, W. Theerayod, S. Phaophak, "FPGA Implementation of MPPT using variable step-size P&O algorithm for PV applications", Communication and Information Technologies, ISCIT'06, IEEE International Symposium On, pp. 212- 215, Sept. 2006

[24] D. P. Hohm, M. E. Ropp, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental programmable, maximum power point tracking test bed", IEEE Photovoltaic Specialists Conference, PVSC 2000 pp. 1699-1702, Sept. 2000.

[25] C. Hua, C. Shen "Comparatives study of peak power tracking techniques for solar storage system", IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC'98, Vol. 2, pp. 679-685, Feb. 1998.

Bibliographie de chapitre 3 :

[1] M. Djarallah : 'contribution a l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique', Thèse de doctorat université de Batna 2008.

[2] https://fr.wikipedia.org/wiki/Circuit_logique_programmable.

