

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N° :



**DOMAINE : SCIENCES ET
TECHNOLOGIE**

FILIERE : ELECTRONIQUE

**OPTION : Electronique des Systèmes
Embarqué**

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par: TOUAMA Tariq

HAFIDI Nouh

Intitulé

**Commande d'un MPPT avec un convertisseur
DC/DC pour un système photovoltaïque**

Soutenu devant le jury composé de:

	Université de M'sila	Président
BELLOUTI Adel	Université de M'sila	Encadreur
	Université de Msila	Examineur

Année universitaire : 2018 /2019

Remercîments

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu tout puissant de nous avoir donné la force et le courage.

À la suite Nous tenons à remercier vivement Mr. BELLOTI Adel et Mr. BENHAMADOUCHE Abdelwahab nos promoteurs qui ont fourni des efforts énormes, par ses informations leurs conseils et leurs encouragements. Nous voudrons aussi exprimer nos remerciements aux membres de jury d'avoir fait l'honneur d'accepter le jury de ce travail.

Que tous les enseignants de département d'Electronique et nous remercier spécialement Mr. Bryk Youcef, qu'il donné l'espoir à nous pour continue dans ce travail

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de cette mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents

Ma sœur

Tous mes frères

Mes collègues

Et à toute la famille

TOUAMA.T

Je dédie ce modeste travail à :

Moi seulement

HAFIDI.N.

List de figure

Figure 1.1 Représentation d'une jonction P-N d'une cellule PV.....	7
Figure 1.2: Les électrons circulent à partir du côté N, traversant la charge, et reviennent au côté P...	8
Figure 1.3 Composants d'un GPV	8
Figure 1.3 Modèle électrique équivalent à la cellule solaire.....	9
Figure.1.4 Caractéristique P-V d'une d'une cellule	12
Figure.1.5 Caractéristique I-V d'un cellule.....	12
Figure.1.6 Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en série.....	13
Figure.1.7 Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en parallèle...14	
Figure.1.8 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour	14
Figure.1.9 Caractéristique P/V d'un panneau P.....	16
Figure.1.10 Caractéristique I/V d'un panneau PV	16
Figure.1.11 Etage d'adaptation entre un GPV et une charge	17
Figure. 2.1 Hacheur.....	22
Figure.2.2 Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour.....	23
Figure.2.3. Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe pour différentes charges DC.....	23
Figure.2.4 Figure 2.4. Principe de l'adaptation d'impédance par MPPT	
a) En utilisant les paramètres d'entrés	25
b) En utilisant les paramètres de sorties	25
Figure 2.5. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck.....	26
Figure 2.6. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost.....	27
Figure 2.7. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé	28
Figure 2.8. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert	28
Figure 2.9. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boos	31
Figure 2.10. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Cuk.....	32
Figure 2.11. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Sepic	34

Figure 2.12. Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs.....	35
Figure 2.13. Evolution du gain en tension en tenant compte des éléments parasites des convertisseurs.....	35
Figure.2.14. Évolution de la tension de sortie en fonction du rapport cyclique quand la résistance parasite de l'inductance augmente	42
Figure 3.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur SEPIC, une commande MPPT et une charge	46
Figure 3.2 Principe de la commande MPPT	46
Figure 3.3. Organigramme de la première commande MPPT	49
Figure 3.4. Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.	51
Figure 3.5. Organigramme de la méthode P&O	52
Figure 3.6. Principe de la méthode HC	53
Figure 3.7. Algorithme de la méthode HC	53
Figure 3.8 Caractéristique de fonctionnement de la méthode IncCond	54
Figure 3.9. Organigramme de la méthode IncCond	55
Figure 3.10 IDE.	57
Figure 3.11 carte ARDUINO NANO	58
Figure 4.1. simulation de dimensionnements d'un SEPIC	62
Figure 4.2. Les caractéristique (I_V) et (P_V) dans les conditions standard (25°/1000 W/m ²) dans simulink.	63
Figure 4.3. Les caractéristique (I_V) et (P_V) dans le cas de variation de l'irradiance et la température (25°).	63
Figure 4.4. Les caractéristique (I_V) et (P_V) dans le cas de variation la température et l'irradiance (1000 W/m ²)......	64
Figure 4.5. Algorithme MPPT P&O	65
Figure 4.6. schéma block de l'algorithme P&O dans SIMULINK/MATLAB	65
Figure 4.7. Simulation de convertisseur commandée par P&O	66

Figure 4.8. la charge de batterie avec leur courant	66
Figure 4.9. comparaison entre la puissance d'entrée et la puissance de sortie.	67
Figure 4.10. comparaison entre la tension de sortie et tension d'entrée	67
Figure 4.11. Simulation d'un module cellule dans Proteus.	69
Figure 4.12. Simulation du convertisseur SEPIC avec le générateur PWM.	69
Figure 4.13. Simulation d'un convertisseur SEPIC avec le module PV dans Proteus.	70
Figure 4.15. Simulation de circuit avec l'utilisation de signal PWM de l'Arduino.	70
Figure 4.16. Réalisation prototype d'un convertisseur SEPIC	71
Figure 4.17. La tension de bobine avec deux modes (DCM et CCM).....	71
Figure 4.18. Code PWM dans ARDUINO IDE	74
Figure 4.19. Résultat de réalisation PWM dans oscilloscope.	75
Figure 4.20. Réalisation du convertisseur SEPIC avec l'Arduino et le driver.	76
Figure 4.21. ACS-712 hall effect capteur de courant	76
Figure 4.22. Schéma finale dans proteus	77
Figure 4.23. Affichage d'oscilloscope	78

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Conditions de test	10
Tableau 1.2. Caractéristiques du module KC-60	12
Tableau 2.1. Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs continu-continu.....	36
Tableau 2.2. présent les pertes des convertisseur	39
Tableau 3.1. Principe de l'algorithme P&O	51
Tableau 4.1. spécifications d'un panneau solaire	61
Tableau 4.2. Dimensionnements des composants de convertisseur	62
Tableau 4.3. présenté Composants pour la réalisation du dispositif MPPT	68
Tableau 4.4. Contrôleur de registre de comptage 2A	72
Tableau 4.5. Configurerions PWM modes (COM2A0, COM2A1)	72
Tableau 4.6. Configurerions PWM modes (COM2B0, COM2B1)	72
Tableau 4.7. Contrôleur de registre de comptage 2B	72
Tableau 4.8. Configuration de CS bits	72
Tableau 4.9. Forme d'onde d'un bit de mode générateur	73

Liste d'Abréviations :

I_{sc,0} : le courant de court-circuit

V_{oc,0} : la tension de circuit ouvert.

P_{max,0} : □ la puissance maximale

NOCT : Nominal Operating Cell Temperature

STC: Standard test conditions

I_{ph}: Photo-courant.

T : Température absolue en °K.

R_s : Résistance série (Ω)

R_{sh} : Résistances parallèle shunt (Ω).

q : Charge de l'électron.

K : Constant de Boltzmann ($1.38.10^{-23}$ J / K).

FF: Facteur de forme.

η : Rendement.

P : Puissance.

V : Tension.

I : Courant.

α : Rapport cyclique.

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur photovoltaïque.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O : Perturbation et Observation.

HC: Hill climbing

DC : Courant Continu.

AC : Courant Alternatif.

CS : convertisseur statique

PPM : Point de Puissance Maximale.

IncCond : Incremental Conductance(Conductance Incrémentale).

CV :Constant Voltage

P&O :Perturb And Observe (Perturbation et Observation).

MOSFET : Métal Oxide Silicon Field Effect Transistor

IGBT : insulated-gate bipolar transistor

GBF : Générateur Base Fréquence

DC/DC : Hacheur Courant Continu/Courant Continu.

GPV Générateur Photovoltaïque.

I-V : Courant-tension

P-V : Puissance-tension

Sommaire

Remerciement	i
dédicace	ii
liste des figures	iii
liste des tableaux	vi
liste des abréviations	vii

Introduction General

Introduction General	2
----------------------------	---

Chapitre1 : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

1.1. Introduction	5
1.2 La cellule PV	6
1.2.1 l'effet Photovoltaïque	6
1.2.2 Générique d'une cellule PV	7
1.3 Générateur photovoltaïque GPV	8
1.4.1 Modélisation D'un Cellule Photovoltaïque	9
1.4.2 Caractéristique D'une Cellule Photovoltaïque	12
1.4.3 Groupement de Cellules Photovoltaïques	13
1.4.3.1 Association De Cellules Photovoltaïques En Série	13
1.4.3.2 Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle	13
1.4.4 Protections D'un Générateur	14
1.4.5 Modélisation D'un GPV	15
1.4.6 Caractéristique D'un Générateur PV	16
1.5 Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV	17
1.6 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge	17
1.7.1. <i>Facteur de forme</i> , FF	18
1.7.2. Le rendement, η	18
1.8. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque	18
1.8.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque	18
1.8.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque	19
1.9. Conclusion	20

Chapitre 2 : les convertisseur DC/DC

2.1. Introduction	22
2.2. Convertisseurs DC/DC (Hacheur)	22
2.3.1. Connexion directe générateur photovoltaïque-charge	22
2.3.2. Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation.....	23
2.4. Type de convertisseurs DC-DC	25
2.4.1. Convertisseur buck	25
2.4.2. Convertisseur Boost	27
2.4.3. Convertisseur Buck-Boost	30
2.4.4. Convertisseur Cuk	31
2.4.5. Convertisseur Sepic	33
2.5. Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur.....	34
2.6. Dimensionnement d'un convertisseur de type SEPIC.....	36
2.6.1. Rapport cyclique	36
2.6.2. Inductances	37
2.6.3. Condensateur de couplage	37
2.6.4. Condensateur de filtrage.....	38
2.6.5. Transistor	38
2.6.6. Diode	39
2.6.7. Radiateur	39
2.7. Prise en compte des éléments parasites	42
2.8. Conclusion	43

Chapitre 03 : Poursuite du point de puissance maximale

3.1. Introduction	45
3.2. Etat de l'art sur les techniques MPPT dans les applications photovoltaïques	45
3.3. Principe De La Commande MPPT	46
3.4 Classification Des Commandes MPPT	47
3.4.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.	47
A Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS	47
B Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du	

convertisseur	47
3.4.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche	48
a. MPPT Indirect	48
b. MPPT Direct.....	48
3.5 Les Algorithmes MPPT	49
3.5.1. Premiers types de commande MPPT.....	49
3.5.2. Méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert	50
3.5.3. Algorithme de perturbation et observation	50
3.5.4. Algorithme Hill Climbing.....	52
3.5.5. Algorithme d'incrémentatation de la conductance.....	53
3.6. Techniques de la commande PWM	55
3.6.1. Principe de la commande PWM.....	56
3.7. Choix du langage de programmation	56
3.7.1. Le langage de programmation	56
3.7.2. Description de l'IDE.....	57
3.7.3. datasheet d'une carte arduino	58
3.7. Conclusion	59

Chapitre 04 : résultat de réalisation et simulation

4.1. Introduction	61
4.1.2. Spécification	61
a) panneau solaire	61
b) Batterie solaire	62
c) condition de charge	62
4.2 Dimensionnements d'un convertisseur SEPIC	62
4.2.1. Résultats de simulation obtenu	62
4.2.2. Simulation d'un GPV dans MATLAB/SIMULINK	63
4.3. Algorithme MPPT P&O organigramme	64
4.4. Schéma bloc d'un MPPT de P&O	65
4.5. Schéma bloc total	66

4.4. Test et simulation de fonctionnement de composant avec un prototype	68
4.4.1. Simulation et réalisation d'un convertisseur SEPIC avec panneau solaire (prototype)	69
a) Etape 1	69
b) Etape 2	69
c) Etape 3	70
d) Etape 4	70
4.4.2. Réalisation d'un convertisseur	71
4.4.3. Réalisation et configurations d'un générateur PWM avec TIMER	72
4.4.3. Réalisation de la partie puissance avec l'Arduino	75
4.5. Implémentation des capteurs (tension et courant)	76
4.5.1. Capteur de courant ACS-712	76
4.5.2. Capteur de tension	76
4.6. Simulation de schéma final avec les capteurs (tension et courant)	76
4.7. Conclusion	78
<i>Conclusion General</i>	
Conclusion Générale	80
<i>Reference Bibliographie</i>	
Reference bibliographie	82

Introduction Générale

Introduction générale

L'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel, ses sources, est la question que le futur va poser à l'homme. Cependant l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique sans cesse croissante, la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne,...etc.) reviennent au premier plan de l'actualité ; leur exploitation arrange beaucoup l'environnement.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées. Elle consiste à convertir directement le rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT).

Dans ce contexte, nous sommes intéressés dans ce travail essentiellement, à l'étude et développement de la poursuite de point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV), pour une bonne exploitation, quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairage). Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation-Observation (P&O), Incrémentation (INC) et l'approche Floue (FL).

Dans ce mémoire nous avons commencé par présenter des notions générales sur les systèmes photovoltaïques, Nous avons ensuite présenté dans le deuxième chapitre les convertisseur de puissance type DC/DC ainsi que, le dimensionnement d'un convertisseur de type SEPIC. Nous avons également présenté .Dans le troisième chapitre les algorithmes de contrôle MPPT d'un système photovoltaïque et leurs classifications. les résultats de simulations sont présentées dans le quatrième chapitre.

CHAPITRE :01

Généralité sur les systèmes photovoltaïques

1.1. Introduction :

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

En 1956 Loferski publiait différentes tables de conversion de rendement photovoltaïque pour tous les matériaux semi-conducteurs. Puis, c'est au début des années 70 que l'on a pu obtenir en laboratoire un rendement de 20 % en travaillant sur des cellules de monocristal d'arsenic de gallium (GaAs). Le rendement est sensiblement inférieur lorsque ces cellules se font à l'échelle industrielle. Aussi, des expériences ont été faites avec des cellules composées de deux couches :

Une de sulfure de cadmium (SCd) et une autre de sulfure de cuivre (SCu₂). Ces cellules présentent l'avantage d'utiliser très peu de matière active et permettent un processus de fabrication plus simple. Cependant, leur faible rendement ne permet pas de les utiliser à l'échelle industrielle.

La commercialisation de cellules solaires photovoltaïques a commencé dès l'apparition du silicimonocristallin et elles occupent encore la première place du marché. Plus tard, apparurent les matériaux polycristalins, de fabrication plus économique, mais présentant encore de faibles rendements.

Récemment se sont commercialisées des cellules de silicium amorphe, utilisées pour des dispositifs de très faible puissance : calculettes, montres, radio portable, etc...

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

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

Ce chapitre discute les principes fondamentaux et la modélisation d'une cellule PV

Avec son circuit électrique équivalent. Les modèles sont mis en application en utilisant **MATLAB** pour étudier et simuler les caractéristiques électrique d'un module PV réel.

1.2. La cellule PV :

1.2.1. l'effet Photovoltaïque

C'est la conversion de l'énergie qui transportent les photons de la lumière lorsqu'ils rentrent en collision avec des matériaux semi-conducteurs convenablement traités , en énergie électrique capable de créer un courant d'électrons à travers un circuit extérieur, en réalisant un travail utile [1].

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

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

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

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

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

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

peut générer de l'électricité.

1.2.2. Générique d'une cellule PV :

Examinons ce que se produit à proximité d'une jonction p-n lorsqu'elle est exposée à la lumière du soleil. Lorsque les photons sont absorbés, des paires de trou électron peuvent être formées. Si ces porteuses de charge atteignent la proximité de la jonction, le champ électrique dans la barrière de potentiel pousse les trous dans la zone des charges positives où ils sont accumulés et pousse les électrons dans la zone des charges négatives ou ils sont accumulés aussi, ceux qui créent une différence de potentiel qui peut être utilisé pour fournir du courant à la charge comme la (figure 1.1) montre [2].

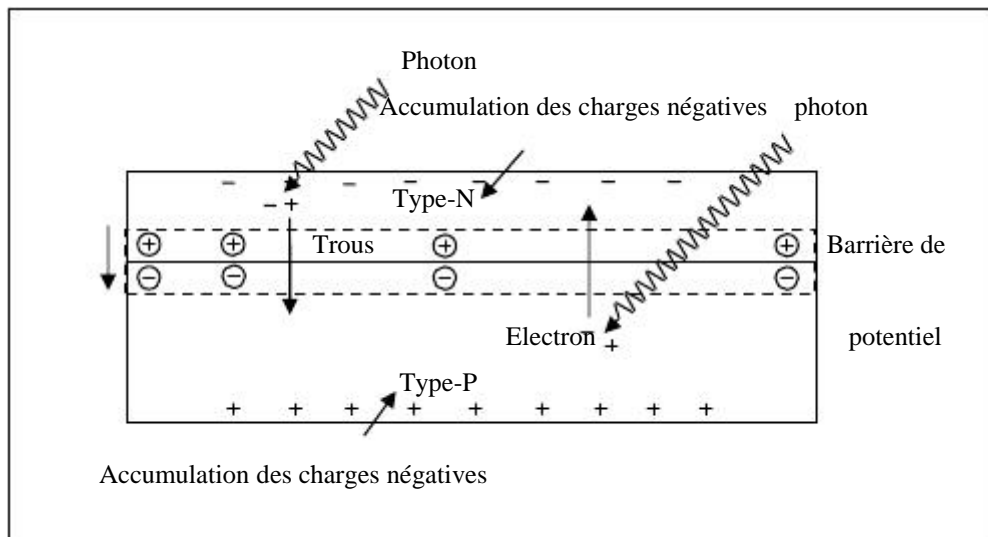


Figure 1.1. Représentation d'une jonction P-N d'une cellule PV montrant la création des paires Trous-Electrons par l'absorption des photons.

Si des contacts électriques sont attachés au dessus et au dessous de la cellule, des électrons sortent du côté des charges négatives dans le fils de connexion passant par la charge et revenant au côté des charges positives comme la (figure 2.2) montre, puisque le fils ne peut pas conduire des trous, les électrons seulement se déplacent autour du circuit, quand ils atteignent le côté des P ils se combinent avec des trous pour accomplissant le circuit, par convention le courant positif circule dans la direction opposée avec les électrons, alors la flèche I montre le sens du courant.

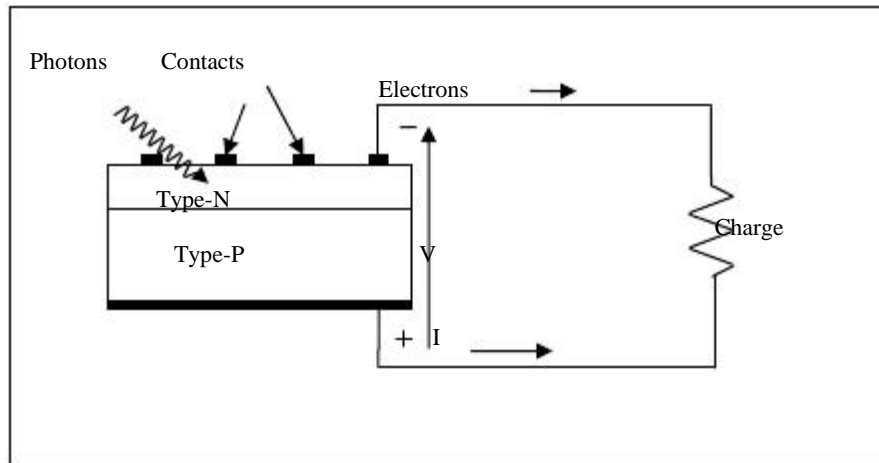


Figure 1.2. : Les électrons circulent à partir du côté N, traversant la charge, et reviennent au côté P.

1.3. Générateur photovoltaïque GPV :

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel (**figure 1.3**). Les modules PV sont habituellement branchés en série- parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules[3].

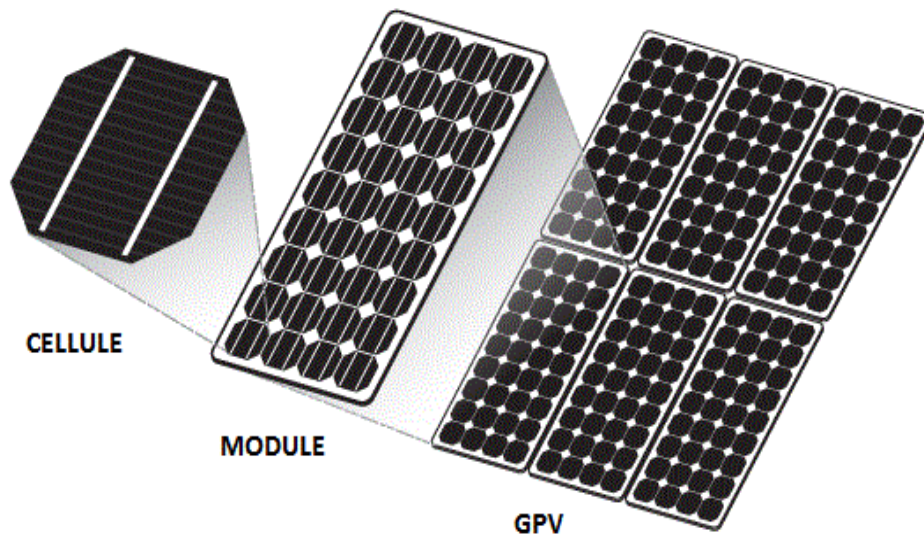


Figure 1.3. Composants d'un GPV

1.4.1. Modélisation D'un Cellule Photovoltaïque :

La caractéristique I– V du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par un circuit équivalent. Il existe plusieurs modèles électriques de la cellule photovoltaïque, mais dans cette étude, nous utilisons le modèle schématisé dans par (**la figure1.4**) Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série R_s et parallèle R_p pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule [4].

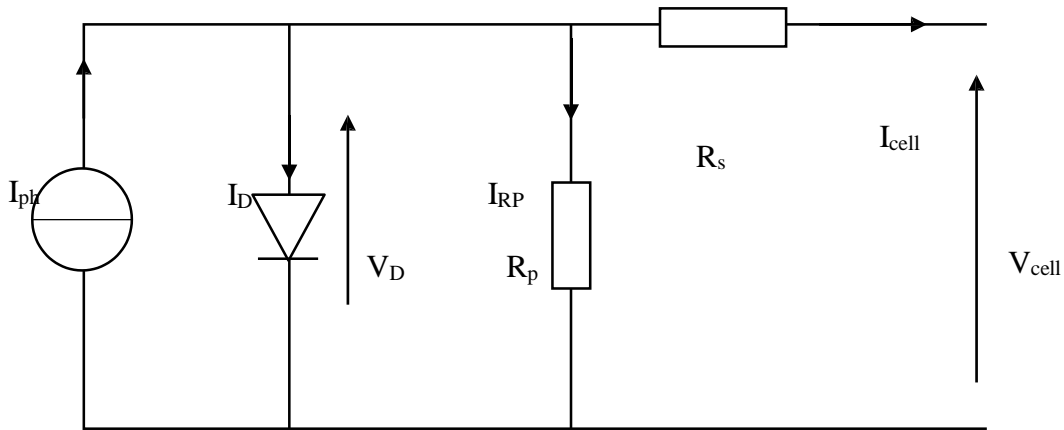


Figure 1.4. Modèle électrique équivalent à la cellule solaire

Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série R_s représente la résistance de contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt R_p représente le courant de fuite. Une diode D en parallèle qui modélise la jonction PN .Ce circuit peut être utilisée aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [4].

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (1-1)$$

$$I_{Rp} = \frac{V_D}{R_p} \quad (1-2)$$

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V_D}{V_{th}}} - 1 \right) \quad (1-3)$$

$$V_D = V_{cell} - R_s I_{cell} \quad (1-4)$$

Alors :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_{cell} - R_s I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} - R_s I_{cell}}{R_p} \quad (1-5)$$

Avec :

$$I_s = K_1 T^3 e^{\frac{V_g}{KT}} \quad (1-6)$$

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad (1-7)$$

Généralement la résistance (R_p) est plus élevée et son influence n'est prépondérante que pour des niveaux d'éclairement très bas, donc on peut négliger le courant I_{RP} [5], Le courant délivré par la cellule est alors donné par l'expression :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_{cell} - R_s I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right) \quad (1-8)$$

Et la tension à ses bornes est donnée par :

$$V_{cell} = R_s I_{cell} + V_{th} \ln \left(\frac{I_{ph} - I_{cell} - I_s}{I_s} \right) \quad (1-9)$$

Pour une modélisation plus précise de la cellule PV, l'influence du niveau d'éclairement ainsi que celle de la température doivent être prises en compte. En pratique, les paramètres de la cellule sont donnés (par le fabricant) dans des conditions de test standard (STC : Standard Test Conditions) ou nominales comme l'indique le tableau suivant :

conditions de test standard	conditions nominales
Eclairement $G_0=1000W/m^2$	Eclairement $G_{nom}=800W/m^2$
Température de la cellule $T_0=25^\circ C$	Température ambiante $T_{a,nom}=20^\circ C$

Tableau 1.1. Conditions de test.

Sous les conditions de test standard, les paramètres mesurés sont ($I_{sc,0}$, $V_{oc,0}$, $P_{max,0}$)

Sous les conditions nominales, la température de la cellule T_{NOCT} (NOCT : Nominal Operating Cell Temperature) est mentionnée sur le catalogue du fabricant.

Le photo-courant I_{ph} est directement proportionnel à l'éclairement. Si $I_{sc,0}$ est donnée sur le catalogue en STC, alors le photo-courant généré pour n'importe quelle autre valeur de G , est donné par :

$$I_{ph} \Big|_{T_0} = \frac{I_{sc,0}}{G_0} \cdot G = C_1 \cdot G \quad (1-10)$$

Le photo-courant dépend aussi de la température, son expression est donnée par :

$$I_{ph} = I_{ph} \Big|_{T_0} (1 + K_0(T - T_0)) \quad (1-11)$$

D'où

$$K_0 = \frac{I_{ph} \Big|_{T_2} - I_{sc,0}}{T_2 - T_0} \quad (1-12)$$

Avec k_0 est le coefficient de température de I_{ph} (habituellement donné par le fabricant sur le datasheet en pourcentage de changement par degré Celsius), et $T_2 = 75^\circ\text{C}$.

La température de fonctionnement de la cellule T^c dépend de l'éclairement G et de la température ambiante T_a , selon l'équation empirique suivante :

$$T^c = T_a + C_2 \cdot G \quad (1-13)$$

Avec

$$T_c = \frac{T_{NOCT} - T_{a,nom}}{G_{nom}} \quad (1-14)$$

Si la température TNOCT n'est pas connue, la constante C_2 est approximée par $0.03^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$. (en pratique C_2 varie entre 0.01 et $0.03^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$).

La tension de circuit ouvert dépend de la température selon l'expression :

$$V_{oc} = V_{oc,0} + C_3(T^c - T_0) \quad (1-15)$$

Où $C_3 = -2.3\text{mV}/^\circ\text{C}$

Le courant de saturation I_s de la diode pour la température T_0 , est donné par :

$$I_{sc,0} = \frac{I_{sc,0}}{(e^{V_{oc,0}/V_{th,0}} - 1)} \quad (1-16)$$

Le courant de saturation dépend de la température. Sa valeur pour une température

donnée est calculée par l'équation suivante :

$$I_s = I_{s,0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{n}} \cdot e^{-\frac{qV_g}{nk} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1-17)$$

La résistance série R_s a un impact sur la pente de la courbe caractéristique près de la tension de circuit ouvert V_{oc} . La valeur de R_s est alors donnée en évaluant la pente dV/dI de la courbe I/V pour $V = V_{oc}$. L'expression de R_s est donnée en dérivant I et en réarrangeant en fonction de R_s :

$$I = I_{ph} - I_s (e^{(V-R_s I)/V_{th}} - 1) \quad (1-18)$$

$$dI = 0 - \frac{I_s}{V_{th}} (dV + R_s dI) \cdot e^{(V-R_s I)/V_{th}} \quad (1-19)$$

$$R_s = - \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc,0}} - \frac{1}{X_V} \quad (1-20)$$

$$X_V = \frac{I_{s,0}}{V_{th,0}} e^{\frac{V_{oc,0}}{V_{th,0}}} \quad (1-21)$$

La résistance série peut aussi être calculée en utilisant l'expression :

$$R_s = R_s \Big|_{T_0} (1 - K_3 (T - T_0)) \quad (1-22)$$

2.4.2. Caractéristique D'une Cellule Photovoltaïque :

En prend par exemple une cellule de module KC-60 Ce module possède les caractéristiques suivantes à 1000 (w/m²) et 25°C.

Puissance optimale	Courant de court-circuit	Tension a circuit ouvert	Courant optimale	Tension optimale
60 w	3.73 A	20 V	3.55 A	16.9 V

Tableau 1.2 Caractéristiques du module KC-60[5].

Les **figures (1.5 1.6)** suivantes représentent les caractéristiques d'une cellule PV pour un rayonnement constant de 1000W/m² et une température de 25°C.

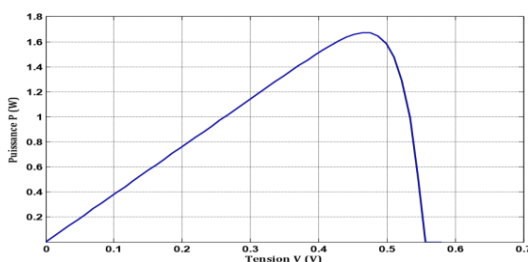


Figure.1.5. Caractéristique P-V d'une cellule PV

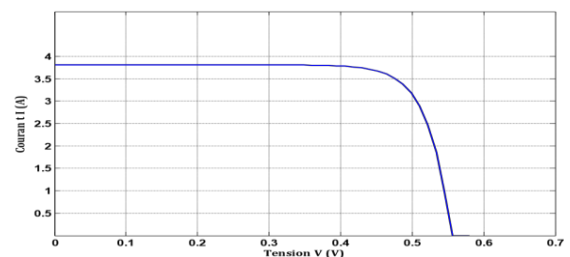


Figure.1.6. Caractéristique I-V d'un cellule PV

1.4.3. Groupement de Cellules Photovoltaïques :

La puissance fournie par une seule cellule solaire étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées et encapsulées dans un plastique pour former un GPV pratique.

1.4.3.1. Association De Cellules Photovoltaïques En Série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. **Figure.1.7** montre la caractéristique résultante (I_{cs} , V_{cs}) obtenue en associant en série N_s cellules identiques (I_c , V_c) [6].

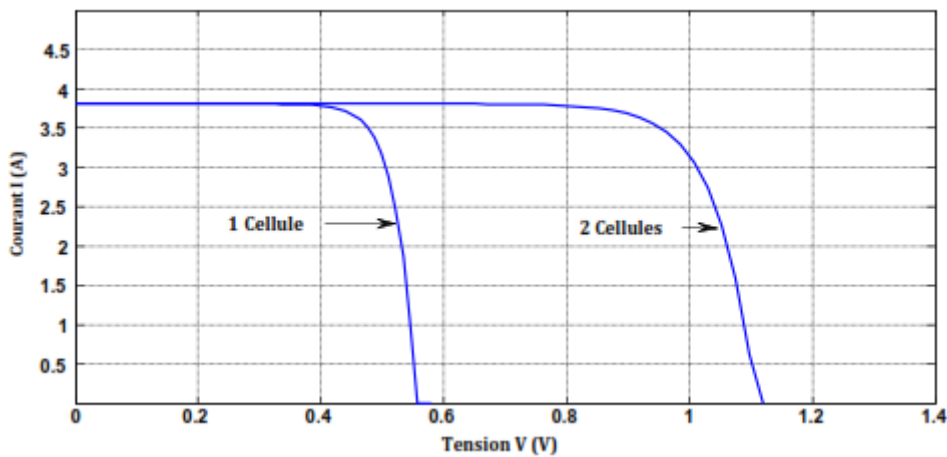


Figure.1.7 Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en série.

$$I_{cs} = I_c \quad (I-23)$$

Et

$$V_{cs} = N_s \cdot V_c \quad (I-24)$$

1.4.3.2. Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. (**Figure 1.8**) montre la caractéristique résultante (I_{cp} , V_{cp}) obtenue en associant en parallèle N_p cellules identiques (I_c , V_c) [6] :

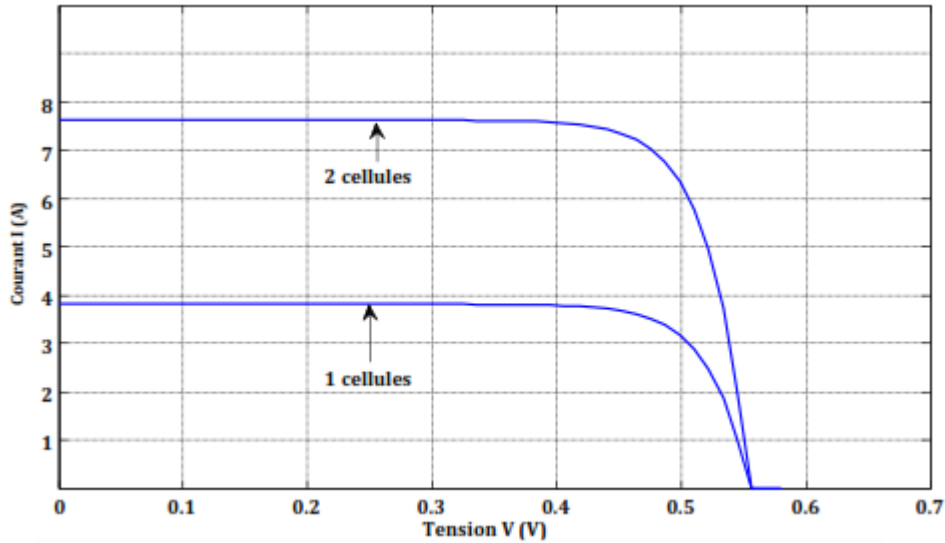


Figure.1.8 Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en parallèle.

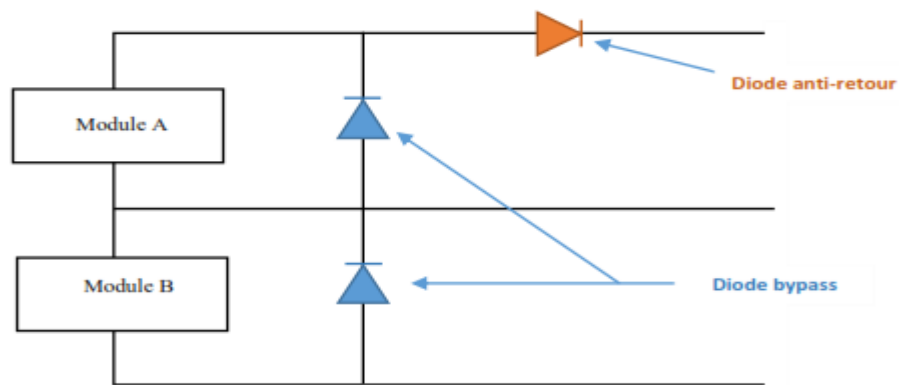
$$I_{cp} = N_p I_c \tag{I-25}$$

Et

$$V_{cp} = V_c \tag{I-26}$$

1.4.4. Protections D'un Générateur

Le groupement des cellules photovoltaïques présente un effet indésirable lorsque le module est partiellement à l'ombre ou lorsque les cellules ne sont pas éclairées équitablement (éclairage non homogène). donc pour résoudre ce problème et pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées



-1

Figure.1.9 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

- la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par

exemple une batterie durant la nuit.

- les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

1.4.5. Modélisation D'un GPV

Nous avons vu que le modèle mathématique d'une cellule PV est donné par :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s(e^{(V_{cell} + R_s I_{cell})/V_{th}} - 1) \quad (1-27)$$

Cette expression ne peut être utilisée directement pour prédire le comportement du GPV, car quelques paramètres, I_{ph} et I_s en particulier, ne peuvent être établies à partir des informations habituellement disponibles. Ces dernières sont restreintes aux valeurs de I_{SC} , V_{OC} et P_{max} qui sont toujours incluses dans le catalogue du fabricant.

Pour pallier à ce problème, des simplifications peuvent être faites en faisant les suppositions suivantes, qui sont généralement valides pour les cellules au silicium [7] :

- le photo-courant et le courant de court-circuit sont égaux.
- $e^{(V + IR_s)/V_{th}} \gg 1$ pour toutes les conditions de fonctionnement.

Par conséquent, l'équation (3) devient :

$$I_{cell} = I_{sc} - I_s e^{(V_{cell} + R_s I_{cell})/V_{th}} \quad (1-28)$$

Et la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{oc} = V_{th} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_s}\right) \quad (1-29)$$

D'où :

$$I_s = I_{sc} \cdot e^{-\frac{V_{oc}}{V_{th}}} \quad (1-30)$$

Finalement, on obtient :

$$I = I_{sc} \cdot (1 - e^{(V - V_{oc} + IR_s)/V_{th}}) \quad (1-31)$$

Cette expression est très pratique, car ces paramètres sont facilement déterminés, ce qui permet l'application directe de cette dernière.

Nous avons vu que plusieurs cellules PV sont groupées pour constituer des modules ou des panneaux PV. Ces derniers contiennent N_P branches en parallèle, chacune avec N_S cellules connectées en série. En considérant que les cellules sont semblables et sont soumises aux mêmes conditions, donc le courant I^P , généré par le module PV sera exprimé par:

$$I^P = N_P I_{sc} \left(1 - e^{(V^P - N_S V_{oc} + \frac{N_S}{N_P} I^P R_s) / V_{th}} \right) \quad (1-32)$$

1.4.6. Caractéristique D'un Générateur PV

Les figures (1.10 1.11) suivant présentent les Caractéristique d'un générateur PV pour un rayonnement constant de $1000W/m^2$ et une température de $25^\circ C$.

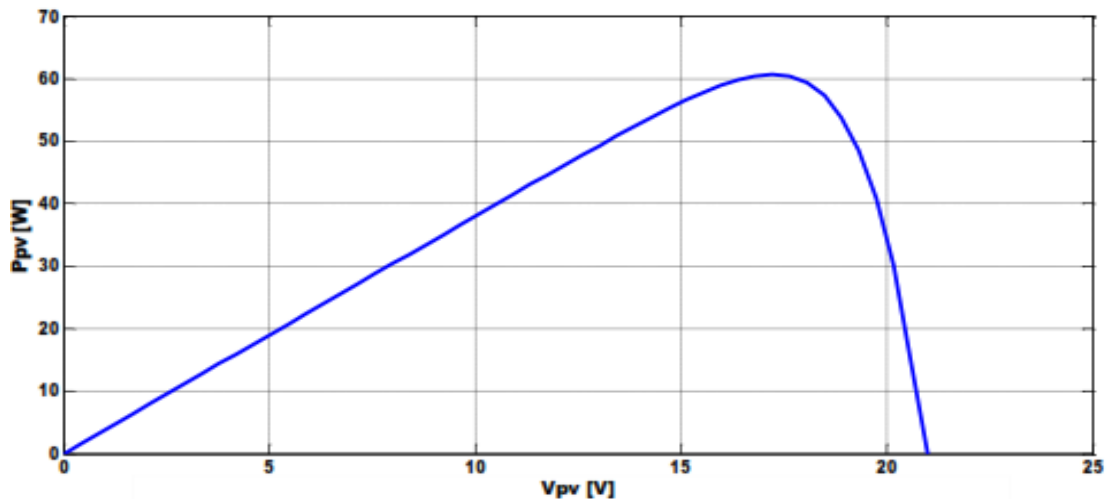


Figure.1.10 Caractéristique P/V d'un panneau P

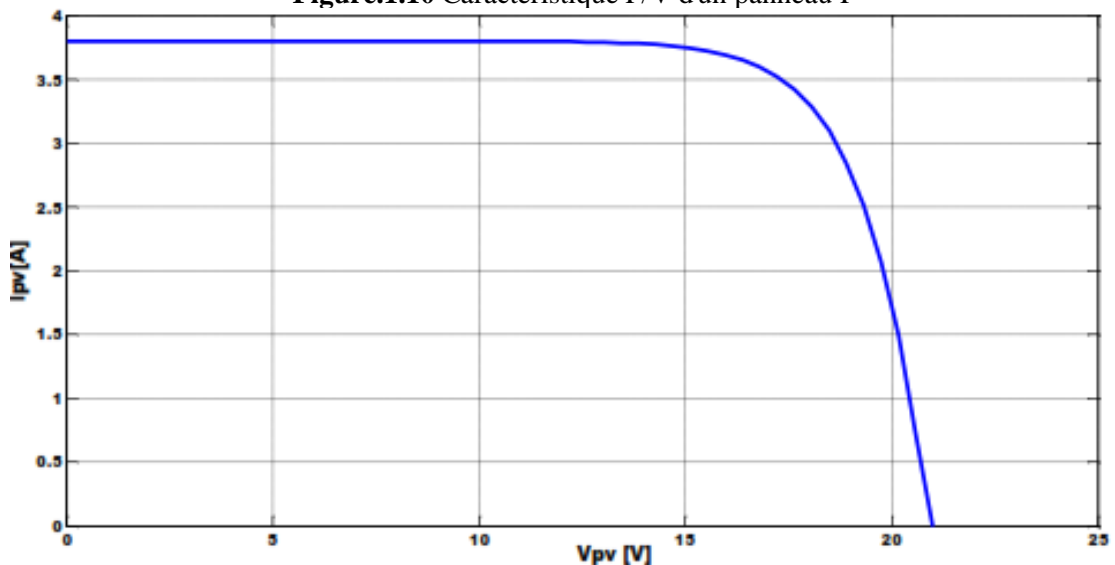


Figure.1.11 Caractéristique I/V d'un panneau PV

1.5. Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV

Le générateur PV est l'élément principal d'un système PV. Cependant, pour une application pratique, d'autres éléments sont nécessaires, par exemple pour le stockage de l'énergie, pour la régulation de la circulation du flux d'énergie ou pour l'alimentation du réseau alternatif. Ces composants supplémentaires représentent une part considérable du coût, provoquent la réduction du rendement et influencent considérablement le comportement et les performances de tout le système.

1.6. Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge

Un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des points de puissance maximaux (PPM). Ces caractéristiques dépendent au niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la **figure 1.12** Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{MAX} disponible [7].

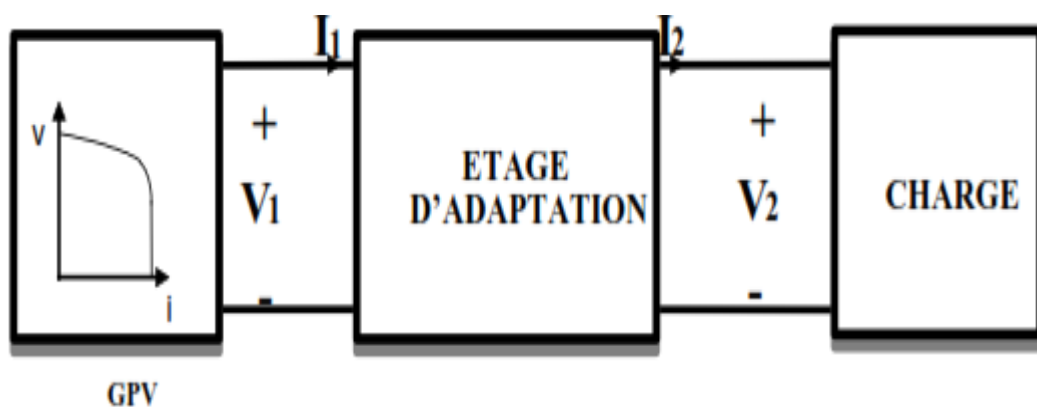


Figure.1.12 Etage d'adaptation entre un GPV et une charge

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC).

1.7.1. Facteur de forme, FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{CC} \cdot V_{OC}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [8]. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{CO} I_{CC}} \quad (1-33)$$

1.7.2. Le rendement, η :

Le rendement 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} .

$$\eta = \frac{FF \cdot V_{CO} I_{CC}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (1-34)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

1.8. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

1.8.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages [9] :

La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.

Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.

L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.

La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.

L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.

Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).

La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

1.8.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.

Le coût très élevé.

Faible rendement de conversion.

S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente

Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'atténuer, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [9].

1.9. Conclusion

En résumé, technologiquement, un capteur PV est proche d'une diode PN de par sa constitution, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre. Le comportement d'une cellule PV peut donc se modéliser comme celui d'une mauvaise jonction PN autant en statique qu'en dynamique lorsque cette dernière n'est pas éclairée.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les enjeux et les développements actuels du photovoltaïque. Nous avons ensuite présenté le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque (L'effet photovoltaïque). Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire, présente un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par un courant (I_{max}) et une tension (V_{max}) et qu'elle peut être modélisée par un circuit électrique simple. Nous avons présenté l'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique. Le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement et la tension à vide avec la température. L'interconnexion de cellules PV en série ou en parallèle pose plusieurs problèmes de déséquilibre qui sont très pénalisants si les cellules n'ont pas le même point de fonctionnement. Nous avons présenté les différentes technologies de cellules actuellement sur le marché et ou cours de développement, et malgré la fin du silicium annoncée depuis de nombreuses années, ce dernier garde une grande longueur d'avance sur les autres technologies. Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules.

CHAPITRE :02

Les convertisseurs DC/DC

2.1. Introduction :

Par convention, les systèmes de conversion photovoltaïques reliés au réseau se composent de convertisseur DC-DC et d'onduleur (DC-AC). Le convertisseur DC-DC est contrôlé pour le système de contrôle du point de puissance maximale du panneau photovoltaïque. L'onduleur est contrôlé pour produire le courant de telle manière que le courant de système ait une faible déformation totale d'harmonique et soit en phase avec la tension du réseau.

Le but de ce chapitre est la présentation et l'étude des différentes définitions et notions de base des Convertisseurs DC-DC, ainsi que les modèles mathématiques utiles à l'étude de leur comportements lors de la simulation du système photovoltaïque globale.

2.2. Convertisseurs DC/DC (Hacheur)

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu. Il contrôle la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. [10]. [11]

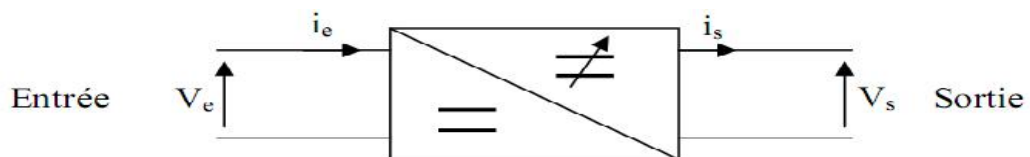


Figure. 2.1. Hacheur

2.3.1. Connexion directe générateur photovoltaïque-charge :

Actuellement, beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge existent encore. Cette connexion en l'absence d'électronique est simple, fiable et de faible coût. Mais, elle ne garantit pas un transfert optimal de l'énergie du GPV vers la charge. Un autre inconvénient c'est que la connexion directe du GPV n'est pas valable sur une charge AC car le GPV fournit un courant continu. Pour la connexion d'un GPV à une charge alternative, un étage d'adaptation de type onduleur est nécessaire [12]. Cette configuration est illustrée à la **figure 2.1**, la diode anti-retour placée entre le GPV et la charge sert de protection. En effet, si cette charge était une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur. La batterie pourrait donc se décharger sur le GPV et en plus l'endommager.

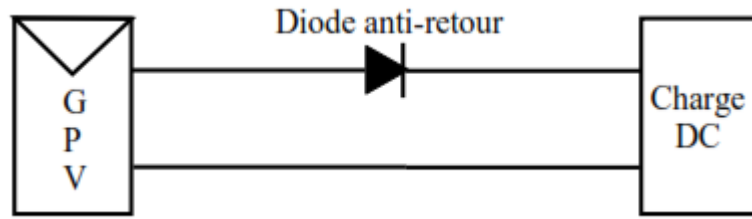


Figure 2.2. Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour

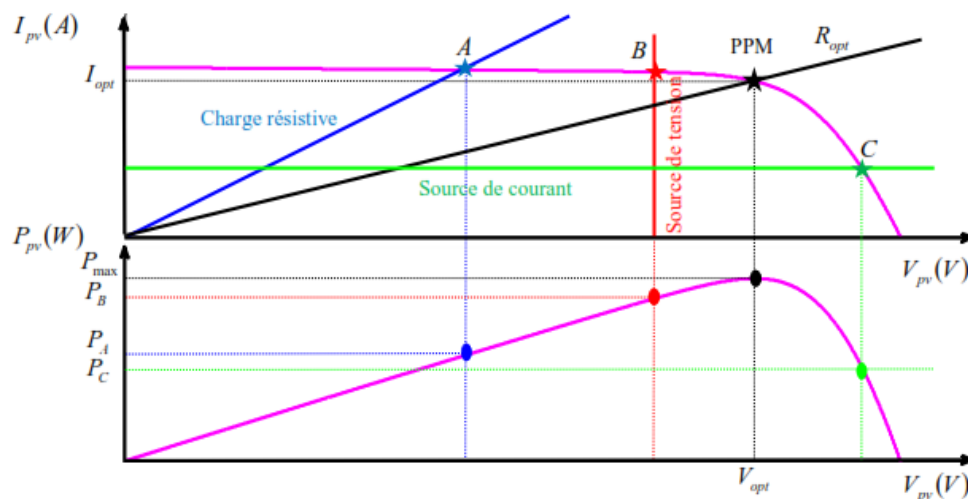


Figure 2.3. Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe pour différentes charges DC

La charge DC peut être : une charge purement résistive, une charge de type source de tension ou une charge de type source de courant. Sur la **figure 2.3**, les caractéristiques I-V et P-V d'un GPV sont représentées ainsi que les caractéristiques I-V des trois types de charges. Les points de fonctionnement *A*, *B*, *C* sont les points d'intersection entre la caractéristique I-V du GPV et celles des trois types de charge. Le fonctionnement optimal s'obtient pour le PPM qui correspond à la tension optimale V_{opt} et au courant optimal I_{opt} . Pour ces trois points, les puissances fournies par le générateur sont respectivement P_A , P_B , P_C . Ces puissances sont toutes des valeurs de puissances inférieures à la puissance maximale disponible P_{max} . Donc, il faut remédier à ce problème par l'ajout d'un étage d'adaptation.

2.3.2. Connexion indirecte GPV-charge par le biais d'un étage d'adaptation:

Lors de la construction d'un système PV, l'une des préoccupations majeures de conception est de trouver l'adaptation optimale entre les caractéristiques électriques des modules solaires, batteries et charge électrique. Une telle adaptation peut être aisément

obtenue si la courbe de charge pouvait suivre les points du réseau de caractéristiques I-V des modules PV pour lesquels la puissance délivrée par ces modules devient maximum. La puissance maximale produite par les modules PV varie en fonction des fluctuations du rayonnement solaire. Par conséquent, la charge devra être reliée aux modules PV par le biais d'un convertisseur MPPT qui puisse suivre les PPM.

On constate que la pente en tout point de la caractéristique I-V du générateur est négative $Z_d = \frac{dv}{di}$ du GPV est toujours négative de part et d'autre du PPM. En ce dernier point de fonctionnement optimal, où la pente de la caractéristique P-V devient nulle, cette impédance vaut :

$$Z_{d\ opt} = \frac{dv}{di} = -\frac{V_{opt}}{I_{opt}} \quad (2.1)$$

Alors, seule une charge dont la caractéristique passe par le point (I_{opt}, V_{opt}) permet d'extraire la puissance optimale. La valeur de cette charge vaut alors :

$$R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} = f(G, T) \quad (2.2)$$

L'utilisation optimale consiste alors à ce que la charge conserve à chaque instant sa valeur optimale R_{opt} lorsque les conditions varient. Dans le cas général, il y a peu de chance pour que la charge réelle suive naturellement ces variations. Il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire en insérant, entre le générateur et la charge électrique, un dispositif adaptateur d'impédance comme illustré dans la **figure 2.4**. Il est présenté deux cas de figures (a) et (b), dans la première, la

commande MPPT utilise les paramètres d'entrées [13, 14, 15], et dans la seconde, la poursuite du PPM est basée sur les paramètres de sorties. La dernière structure est généralement conçu pour des systèmes ayant comme charge une batterie [16, 17].

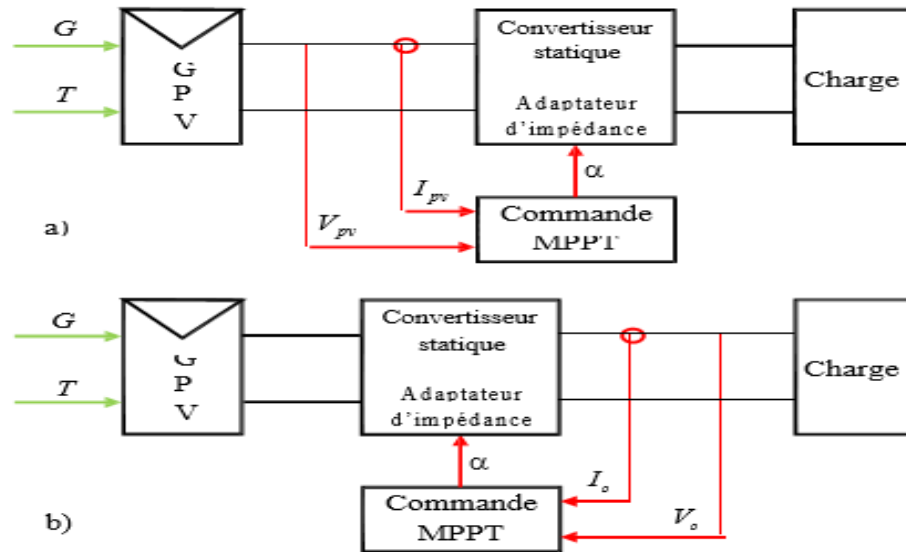


Figure 2.4. Principe de l'adaptation d'impédance par MPPT
 a) En utilisant les paramètres d'entrés
 b) En utilisant les paramètres de sorties

Ces adaptateurs d'impédance sont des convertisseurs DC-DC avec les différentes topologies possibles. On s'intéresse juste aux hacheurs sans isolation galvanique qui sont dépourvus de transformateur tels que : hacheur dévolteur ou abaisseur de tension (Buck), hacheur survolteur ou élévateur de tension (Boost), hacheur abaisseur élévateur de tension (Buck-Boost, Cuk, Sepic)

2.4. Type de convertisseurs DC-DC

On distingue trois types de convertisseurs DC-DC: Les élévateurs (BOOST) dans lesquels $V_{out} > V_{in}$. Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_{out} < V_{in}$.

Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents qui comporte plusieurs topologies comme le BUCK-BOOST classique, le FLYBACK, SEPIC, CUK, ...

2.4.1. Convertisseur buck :

Dans l'étude du convertisseur Buck. **La figure (2.5)** montre la structure et les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur qui est caractérisé par la disposition en série de l'interrupteur avec la source.

L'ondulation de la tension de sortie donnée respectivement par :

$$V_s = \alpha \cdot V_e \tag{2.3}$$

$$\Delta i_L = \frac{\alpha(1 - \alpha)V_e}{L \cdot f} \tag{2.4}$$

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i_L}{8C \cdot f} = \frac{\alpha(1 - \alpha)V_e}{8C \cdot L \cdot f^2} \tag{2.5}$$

Le convertisseur est donc abaisseur en tension.

Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge :

$$I_L = I_s \tag{2.6}$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes.

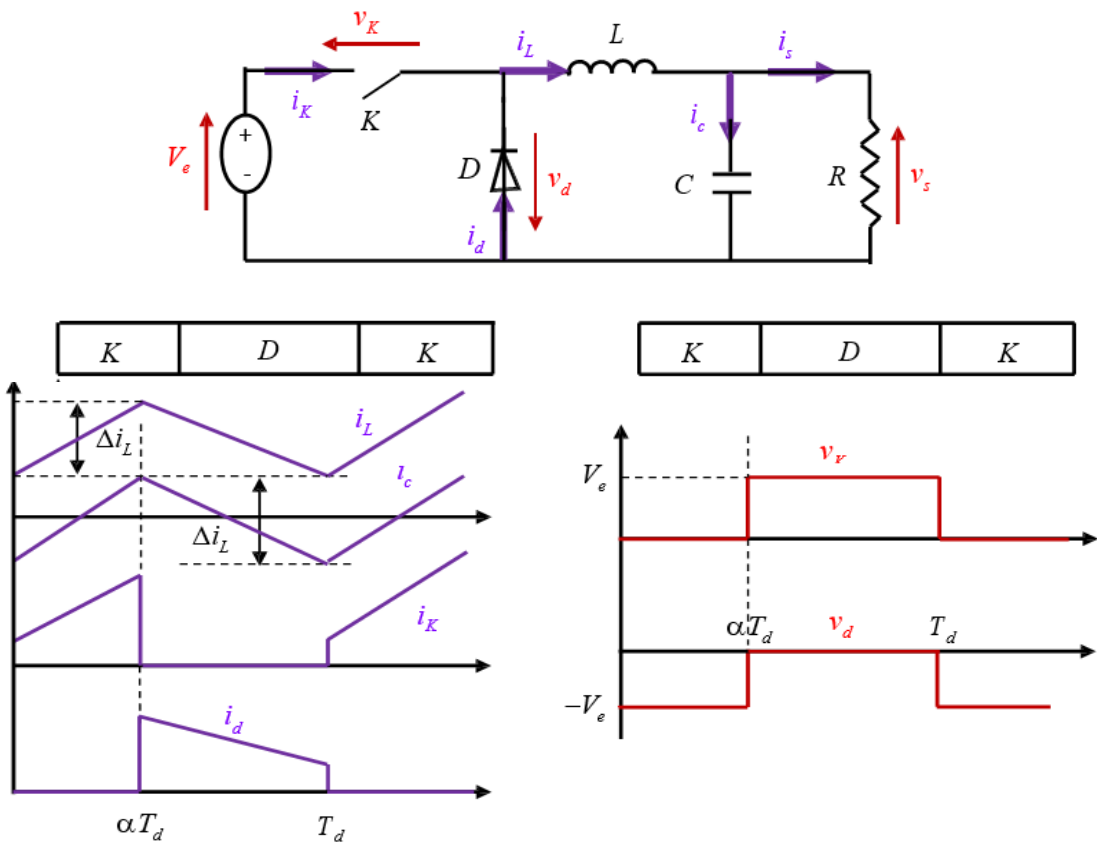


Figure 2.5. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck.

En tension, on a :

$$V_{K,max} = |V_{K,max}| = V_e \quad (2.7)$$

En courant :

$$I_{K,max} = I_{d,max} = I_{L,max} = I_L \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.8)$$

2.4.2. Convertisseur Boost :

On considère un convertisseur DC-DC de type Boost. Il est composé essentiellement d'un interrupteur K (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode D l'interrupteur K est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découpage fixe T_d et de rapport cyclique variable α . La conduction des deux interrupteurs est complémentaire, quand K est fermé D est ouvert ; et quand K est ouvert, D est fermé. Durant chaque période, K est fermé de l'instant 0 à αT_d et ouvert de αT_d à T_d . On distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance s'annule (conduction discontinue) ou pas (conduction continue).

On s'intéresse au second cas qui est le plus important. La **figure 2.6** donne le schéma de principe de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes de ses courants (à gauche) et tensions (à droite).

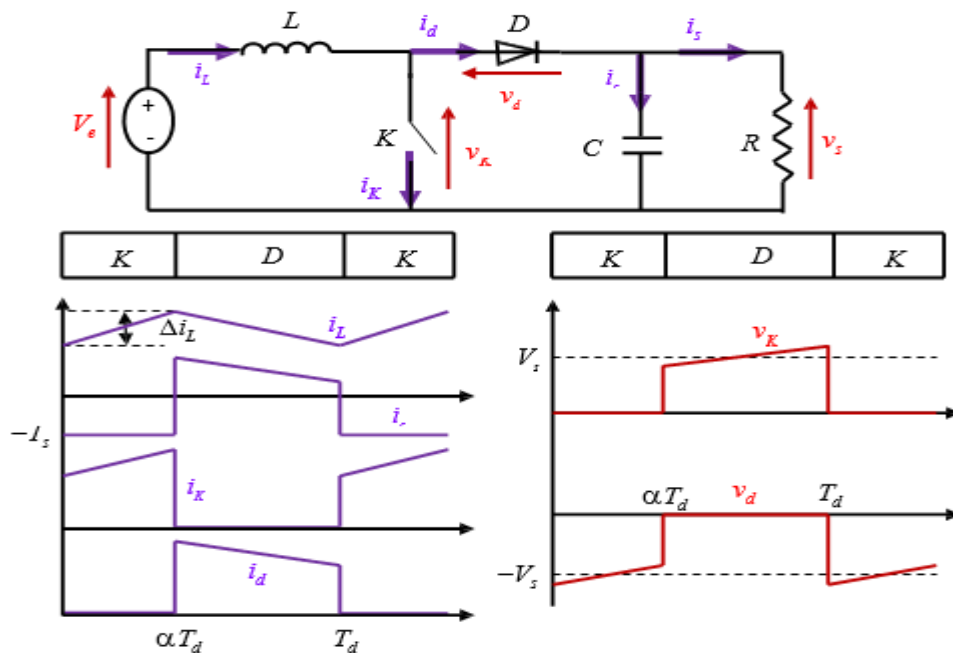


Figure 2.6. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost

Lorsque l'interrupteur K est fermé ($0 < t < \alpha T_d$), le circuit du convertisseur est (Figure 2.7) :

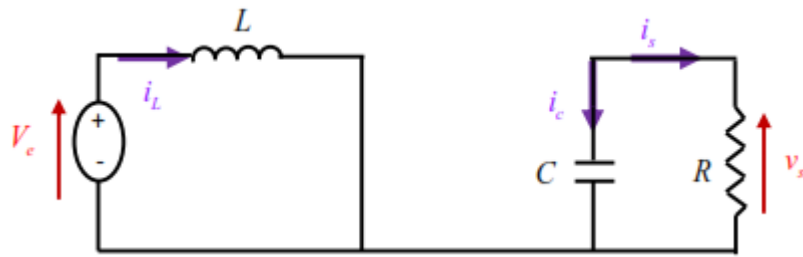


Figure 2.7. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé

$$L \frac{d i_L}{dt} = V_c \quad (2.9)$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_c}{L} t \quad (2.10)$$

Avec I_{min} la valeur minimale du courant dans l'inductance.

A l'instant $t = \alpha T_d$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{max}

$$I_{min} = I_{min} + \frac{V_c}{L} \alpha T_d \quad (2.11)$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert $\alpha T_d < t < T_d$ le circuit du convertisseur sera comme montré dans la Figure 2.8.

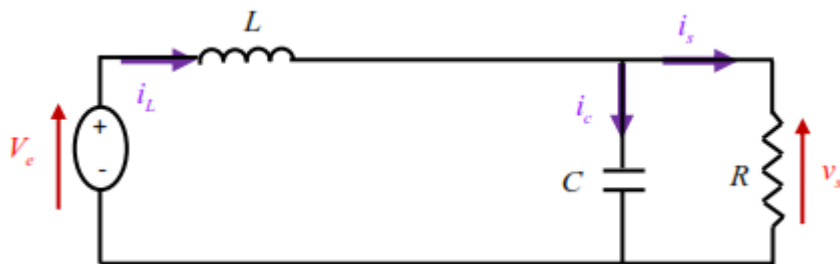


Figure 2.8. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert

$$L \frac{d i_L}{dt} = V_c - V_s \quad (2.12)$$

$$I_L = I_{min} + \frac{V_c - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (2.13)$$

A l'instant $t = T_d$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{min}

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_c - V_s}{L} (1 - \alpha)T_d \quad (2.14)$$

Soit $\Delta i_L = I_{max} - I_{min}$ l'ondulation du courant dans l'inductance.

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des **équations (2.11)** et **(2.14)**, on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (2.15)$$

On remarque qu'on peut contrôler la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{1}{1 - \alpha} I_e \quad (2.16)$$

De l'**expression (2.11)**, on exprime l'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_s}{L} T_d = \frac{\alpha V_c}{Lf} \quad (2.17)$$

Avec f la fréquence de découpage.

Pendant la première séquence de fonctionnement $0 < t < \alpha T_d$, seul le condensateur donne de l'énergie à la charge, on peut écrire :

$$C \frac{dv_s}{dt} = -i_s \quad (2.18)$$

Alors l'ondulation de la tension de sortie peut être exprimée par:

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C \cdot f} = \frac{\alpha V_s}{(1 - \alpha)RCf} \quad (2.19)$$

D'après l'analyse des deux séquences de fonctionnement, on constate que les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes en courant et en tension.

$$\begin{aligned} i_{k,max} = i_{d,max} = i_{max} &= I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \\ &= \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} i_{k,max} = i_{d,max} = i_{max} &= I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \\ &= \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.4.3. Convertisseur Buck-Boost

La topologie et les formes d'ondes de courant et de tension obtenues de ce convertisseur sont présentées à la **figure 2.8**. La tension de sortie moyenne est donnée par:

$$V_s = \frac{\alpha V_c}{1-\alpha} \quad (2.22)$$

L'ondulation de courant dans l'inductance est donnée par :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_c}{Lf} \quad (2.23)$$

et l'ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{Cf} = \frac{\alpha^2 V_s}{(1-\alpha)RCf} \quad (2.24)$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur-inverseur en tension. Le courant moyen traversant l'inductance est donné par :

$$I_L = \frac{I_s}{1-\alpha} \quad (2.25)$$

Les contraintes en tension et en courant sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes :

$$V_{k,max} = |V_{d,max}| = V_{s,max} + V_s = \frac{V_c}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (2.26)$$

$$i_{k,max} = i_{d,max} = i_{L,max} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.27)$$

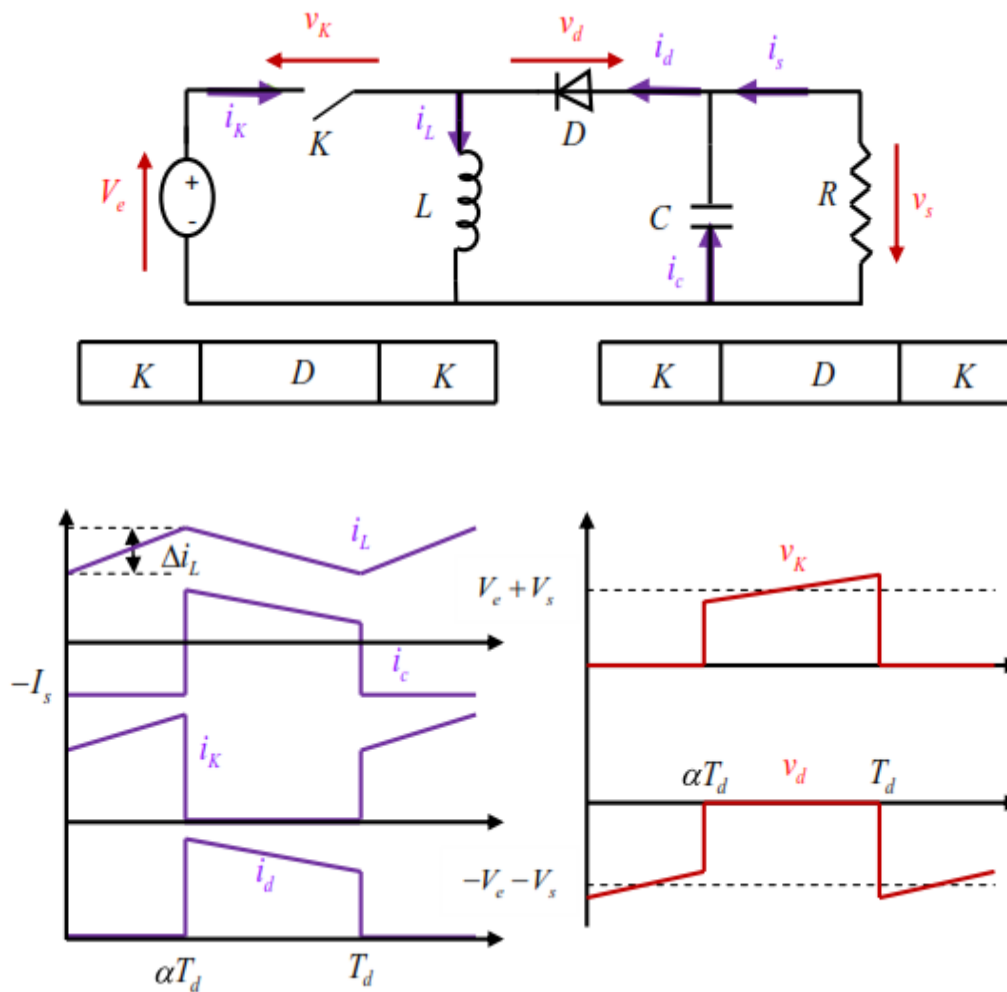


Figure 2.9. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost

2.4.4. Convertisseur Cuk

La **figure 2.10** illustre le circuit électrique du convertisseur Cuk et ses formes d'ondes de courant et de tension. La tension de sortie moyenne est donnée par:

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{1-\alpha} \quad (2.28)$$

On remarque que le rapport de transformation est similaire à celui du Buck-Boost. De même, on peut dire que c'est un montage abaisseur-élevateur-inverseur en tension.

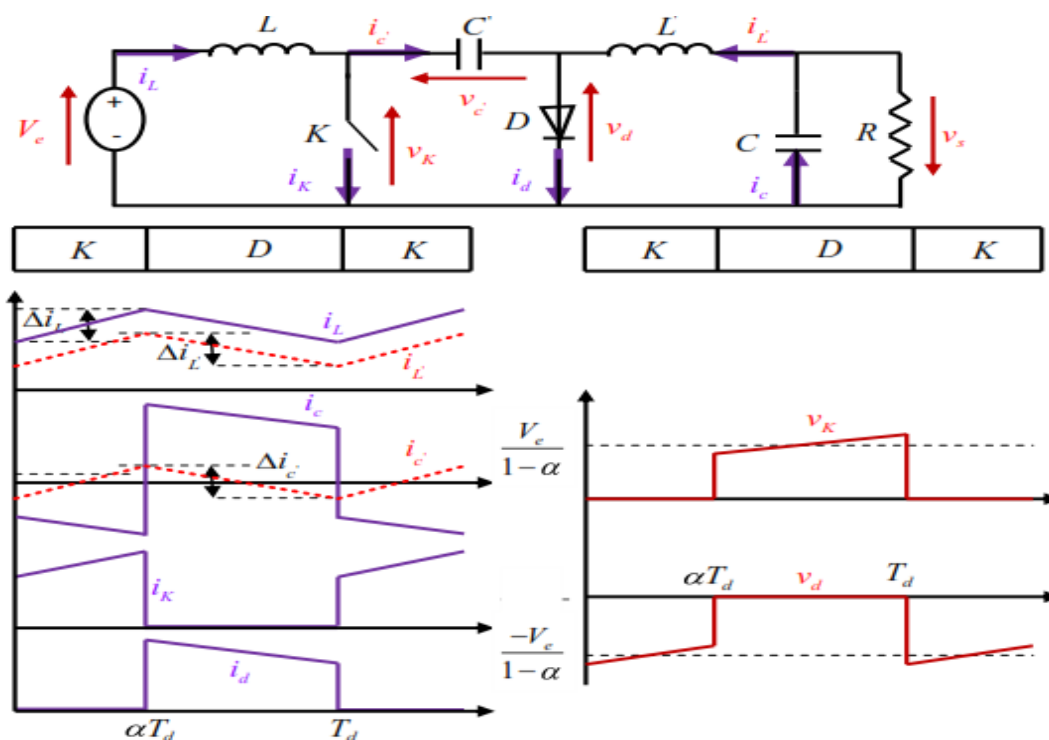


Figure 2.10. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Cuk
L'expression reliant les courants moyens est :

$$I_L = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right) I_L' = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right) I_s \quad (2.29)$$

Les ondulations de courant dans les deux inductances :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (2.30)$$

$$\Delta i_{L'} = \frac{\alpha V_e}{L' f} \quad (2.31)$$

L'ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i_{L'}}{8 C f} = \frac{\alpha V_e}{8 C L' f^2} \quad (2.32)$$

L'ondulation de la tension aux bornes de CI

$$\Delta V_{C'} = \frac{(1-\alpha) I_L}{C' f} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1-\alpha) R C' f} \quad (2.33)$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont :

$$\begin{aligned} V_{k,max} &= |V_{d,max}| = V_{C',max} \\ &= \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_{C'}}{2} \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$i_{k,max} = i_{d,max} = I_L + I_{L'} + \frac{\Delta i_L + \Delta i_{L'}}{2} \quad (2.35)$$

2.4.5. Convertisseur Sepic

De la même façon, on commence par donner le circuit de principe du convertisseur Sepic et ses formes d'ondes de courant et de tension obtenues en mode de conduction continu à la **figure 2.10**. Les caractéristiques de ce convertisseur sont identiques à celles du Cuk, mais il n'est pas inverseur en tension.

La tension de sortie moyenne est donnée par:

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{1 - \alpha} \quad (2.36)$$

L'expression reliant les valeurs moyennes des courants est :

$$I_L = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha}\right) I_{L'} = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha}\right) I_s \quad (2.37)$$

Les ondulations de courant dans les deux inductances :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L f} \quad (2.38)$$

$$\Delta i_{L'} = \frac{\alpha V_e}{L' f} \quad (2.39)$$

L'ondulation de la tension de sortie:

$$\Delta V_s = \frac{\alpha^2 V_s}{(1 - \alpha) R C f} \quad (2.40)$$

L'ondulation de la tension aux bornes de C'

$$\Delta V_{C'} = \frac{(1 - \alpha) I_L}{C' f} = \frac{\alpha^2 V_e}{(1 - \alpha) R C' f} \quad (2.41)$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont :

$$\begin{aligned} V_{k,max} &= |V_{d,max}| = V_{C',max} + V_{s,max} \\ &= \frac{V_e}{1 - \alpha} + \frac{\Delta V_{C'} + \Delta V_s}{2} \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$i_{k,max} = i_{d,max} = I_L + I_{L'} + \frac{\Delta i_L + \Delta i_{L'}}{2} \quad (2.43)$$

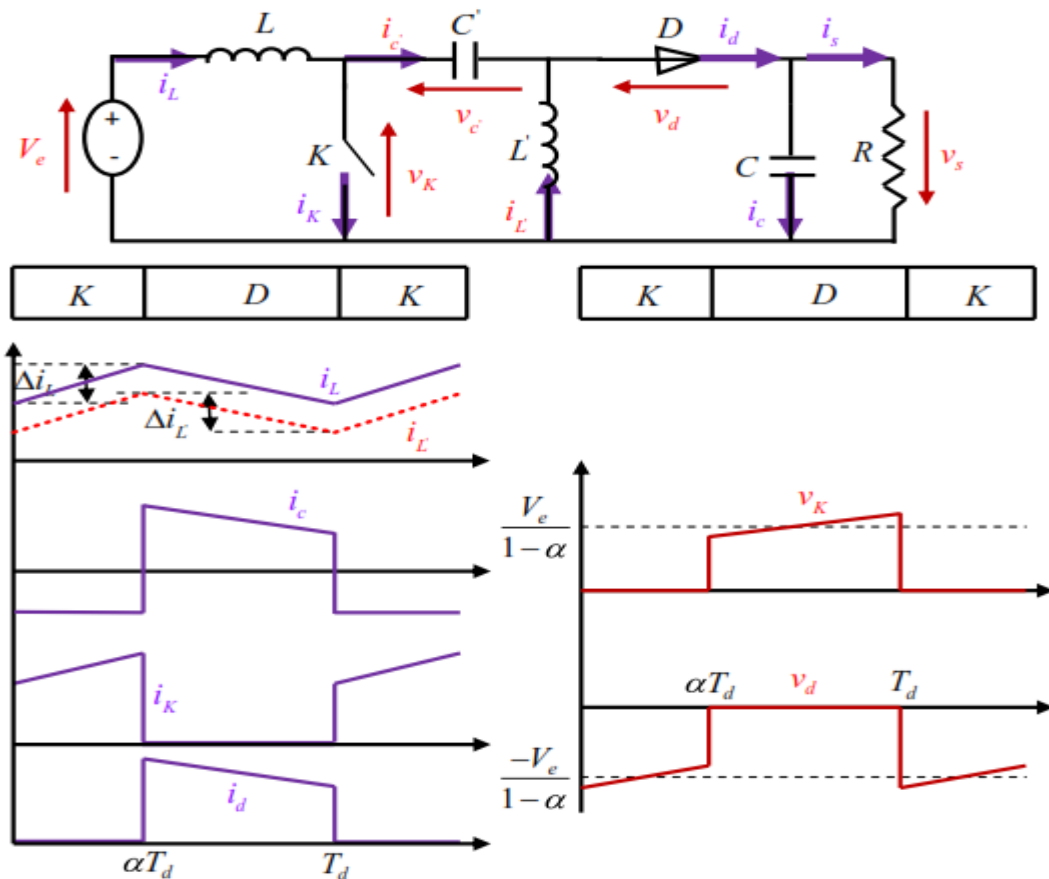


Figure 2.11. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Sepic

2.5. Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur :

Un panneau solaire PV est un générateur d'électricité continu basse tension. Il est préférable de mettre un dispositif élévateur de tension comme étage adaptateur d'impédance entre la source et la charge. Tous les convertisseurs cités précédemment excepté le Buck, peuvent jouer ce rôle d'élévateur de tension. D'ailleurs, les structures Buck-Boost, Cuk et Sepic sont élévatrices pour un rapport cyclique supérieur à un demi. Si on regarde à la complexité des structures, le Boost est le plus simple. Les contraintes en tension et en courant sur les interrupteurs et les diodes sont presque similaires pour les différentes topologies élévatrices.

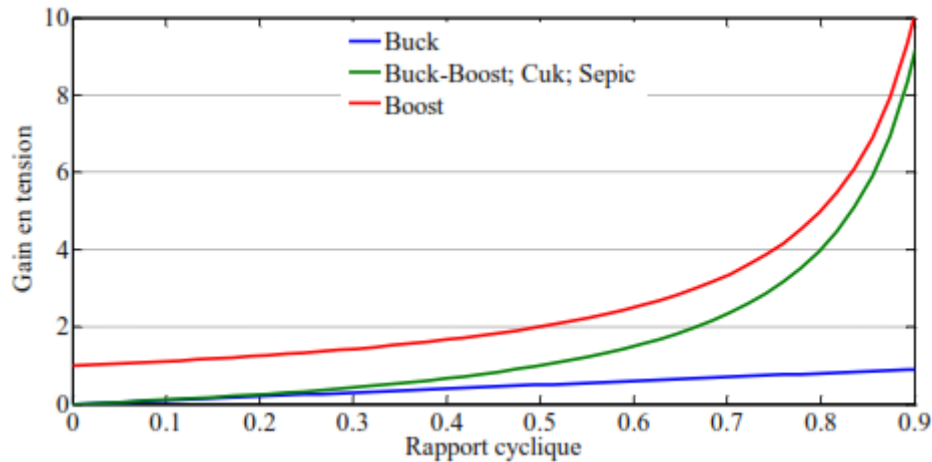


Figure 2.12. Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs.

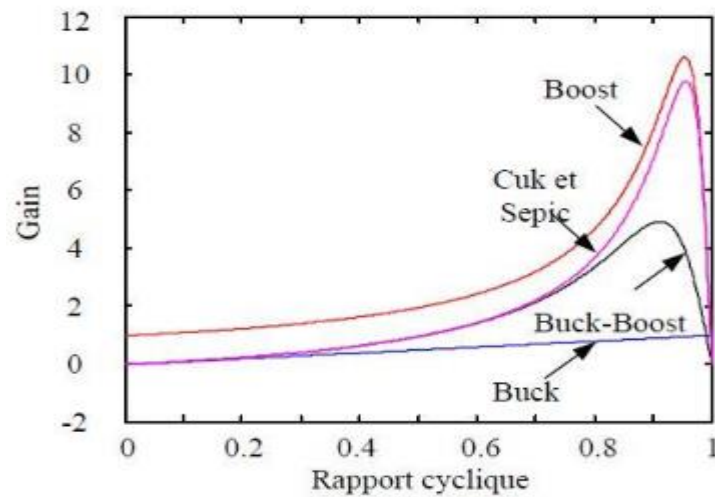


Figure 2.13. Evolution du gain en tension en tenant compte des éléments parasites des convertisseurs

Si on les compare du point de vue gain en tension, aussi le Boost prend la première place comme le montre la **figure 2.12** qui donne l'évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique.

Enfin, une comparaison de ces convertisseurs est donnée par le **Tableau 2.1** qui récapitule l'analyse faite auparavant sur les différents convertisseurs. On peut remarquer aussi que la diode D présente dans les convertisseurs Sepic et Boost peut jouer le rôle de protection du GPV ce qui permet de dispenser de la diode anti-retour et de faire des économies par rapport aux autres topologies. Pour mieux différencier entre les convertisseurs, HUANG a tracé le gain en tension en fonction du rapport cyclique (**Figure 2.12**) en tenant compte des éléments parasites des convertisseurs [18].

paramètres convertisseurs	Gain en Tesion $\frac{V_s}{V_e}$	Contraintes en Tension $V_{k,max} = V_{d,max} $	Contraintes en Courant $i_{k,max} = i_{d,max}$
Boost	$\frac{1}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2}$
cuk	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_{e'}}{2}$	$I_L + I_{L'} + \frac{\Delta I_L + \Delta I_{L'}}{2}$
sepic	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_{e'} + \Delta V_s}{2}$	$I_L + I_{L'} + \frac{\Delta I_L + \Delta I_{L'}}{2}$
Buck-boost	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta I_L}{2}$
buck	α	V_e	$I_L + \frac{\Delta I_L}{2}$

Tableau 2.1. Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs continu-continu.

2.6. Dimensionnement d'un convertisseur de type SEPIC

Après le choix de convertisseur en choisie un mode pour étude les équations suivantes que nous avons choisi cette mode il est le mode contenu contenu. [19,20,21]

2.6.1. Rapport cyclique

Le rapport cyclique est donné par :

$$\alpha = \frac{V_{out} + V_D}{V_{IN(min)} + V_{out} + V_D} \quad (2.44)$$

Avec V_{IN} la tension d'entrée, V_{out} la tension de sortie et V_D la tension de seuil de la diode.

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

Le rapport cyclique varie en fonction de la tension d'entrée appliquée afin d'avoir une tension de sortie constante. Ainsi le rapport cyclique maximal est :

$$\alpha_{max} = \frac{V_{out} + V_D}{V_{IN(min)} + V_{out} + V_D} \quad (2.45)$$

2.6.2. 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 :

$$\Delta I_L = I_{IN} \times 40\% = I_{out} \times \frac{V_{out}}{V_{IN(min)}} \times 40\% \quad (2.46)$$

Soit les valeurs d'inductances calculées par :

$$L1 = L2 = L = \frac{V_{IN(min)}}{\Delta I_L \times f} \times \alpha_{ma} \quad (2.47)$$

Avec f la fréquence de découpage.

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

$$I_{L1(peak)} = I_{out} \times \frac{V_{out} + V_D}{V_{IN(min)}} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad (2.48)$$

$$I_{L2(peak)} = I \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad (2.49)$$

Si les inductances L1 et L2 sont bobinées sur le même circuit magnétique, les valeurs d'inductances sont remplacées par 2L à cause de la mutuelle inductance. Les valeurs d'inductances sont alors :

$$L1' = L2' = \frac{L}{2} = \frac{V_{IN(min)}}{2 \times \Delta I_L \times f} \times \alpha_{max} \quad (2.50)$$

2.6.3. Condensateur de couplage

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

$$I_{C1(rms)} = I_{out} \sqrt{\frac{V_{out} + V_D}{V_{IN(min)}}} \quad (2.51)$$

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

$$\Delta V_{C1} = \frac{I_{out} \times \alpha_{max}}{C1 \times f} \quad (2.52)$$

2.6.4. 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 :

$$C2 = \frac{I_{out} \times \alpha_{max}}{V_{ripple} \times 0.5 \times f} \quad (2.53)$$

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

2.6.5. Transistor

Le transistor doit être capable de supporter une tension $V_K = V_{IN} + V_{out}$, et être traverser par un courant crête égal à $I_{k(peak)} = I_{L1(peak)} + I_{L2(peak)}$.

Le courant efficace est donné par :

$$I_{k(rms)} = I_{out} \sqrt{\frac{(V_{out} + V_{IN(min)} + V_D) \times (V_{out} + V_D)}{V_{IN(min)}^2}} \quad (2.54)$$

Il faudra veiller à ce que la puissance dissipable par le transistor soit inférieure aux pertes par conduction et par commutations (voir Radiateur).

2.6.6. 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 inverse de $V_D = V_{IN(max)} + V_{out(max)}$. Le courant moyen dans la diode est égal au courant de sortie I_{out} .

Il faudra veiller à ce que la puissance dissipable par la diode soit inférieure aux pertes par conduction et par commutations (voir Radiateur). Il est recommandé de choisir des diodes Schottky pour limiter ses pertes.

2.6.7. Radiateur

Un composant électronique traversé par un courant électrique produit de la chaleur par pertes par effet joule. Lorsque ce courant est élevé, cette chaleur est perceptible. Ces pertes sont de deux types :

- les pertes par conduction
- les pertes par commutation

	Trasitoeur MOSFET	Diode
Pertes par conduction	$R_{ds_{on}} \times D_{Def}^2$	$V_F \cdot \langle I_F \rangle \cdot R_o \cdot I_F^2$
Pertes par commutation	$\frac{1}{2} \times V_{DS} \times I_D (t_r + t_f) \times f$	$Q_{rr} \times V_r \times f$

Tableau 2.2 présent les pertes des convertisseur

Il arrive que les pertes par commutation soit supérieures aux pertes par conduction. En particulier lorsque la fréquence est élevée. Les pertes par conduction tendent à diminuer compte tenu des l'évolution des semi-conducteurs et de la diminution de la valeur de la résistance interne $R_{ds_{on}}$ dans le cas de MOSFET.

Ces pertes peuvent être supérieures à la puissance maximale dissipée par le semi-conducteur. Cette puissance dépend de la température ambiante, conventionnellement 25°C, de la température maximale de la jonction ($T_{(v-j)max}$) et de la résistance thermique jonction-boitier ($R_{th(c-j)}$), elle est définie par la relation suivante :

$$P_{tot} = \frac{T_{(v-j)max} - 25}{R_{th(j-c)}} \quad (2.55)$$

Si la température dépasse $T_{(v-j)max}$, la puissance dissipable est nulle, et la jonction est détruite. Afin de maintenir la température du composant acceptable, il est nécessaire de monter un dissipateur thermique ou un radiateur sur le composant. Dans ce cas :

$$P_D = \frac{T_{(V-j)max} - T_{amb}}{R_{th(j-amb)}} \quad (2.56)$$

L'écart entre les deux températures se calcule en appliquant la loi d'Ohm thermique. La puissance maximale dissipable est :

$$P_D = \frac{T_{(V-j)max} - T_{amb}}{R_{th(j-c)} + R_{th(c-r)} + R_{th(r-amb)}} \quad (2.57)$$

A partir de cette formule, on en déduit la valeur de la résistance thermique du dissipateur:

$$R_{th(r-amb)} = \frac{T_{(V-j)max} - T_{amb}}{P_D} - (R_{th(j-c)} + R_{th(c-r)}) \quad (2.57)$$

La valeur calculée de $R_{th(r-amb)}$ permet de choisir le dissipateur thermique adéquate.

2.7. Prise en compte des éléments parasites

Etude faites avec les hypothèses suivantes

- Le condensateur de sortie a une capacité suffisante pour fournir une tension de sortie constante aux bornes de la charge, au cours d'un cycle de fonctionnement.
- La chute de tension aux bornes de la diode est nulle.
- Pas de pertes par commutations dans les semi-conducteurs.
- Pas de pertes dans les composants de manière générale.

Ces hypothèses sont très éloignées de la réalité, et ont des effets importants sur le fonctionnement du convertisseur.

En réalité, les composants présentent une résistance interne. Le gain théorique est le suivant $G_{th} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ Ce gain est limité par les résistances séries des composants (inductances, condensateurs). En ne prenant en compte que la résistance interne de l'inductance d'entrée R_{L1} ce gain devient $G_{re} = \frac{\alpha}{(1-\alpha) \left[1 + \frac{R_L}{R_{CH}} + \frac{1}{(1-\alpha)^2} \right]}$ **La Figure 2.17**

présente l'influence de la résistance interne de l'inductance d'entrée sur le gain en fonction du rapport cyclique. Ainsi, on remarque que le gain théorique tendant vers l'infini pour un rapport cyclique unitaire est très loin de la réalité.

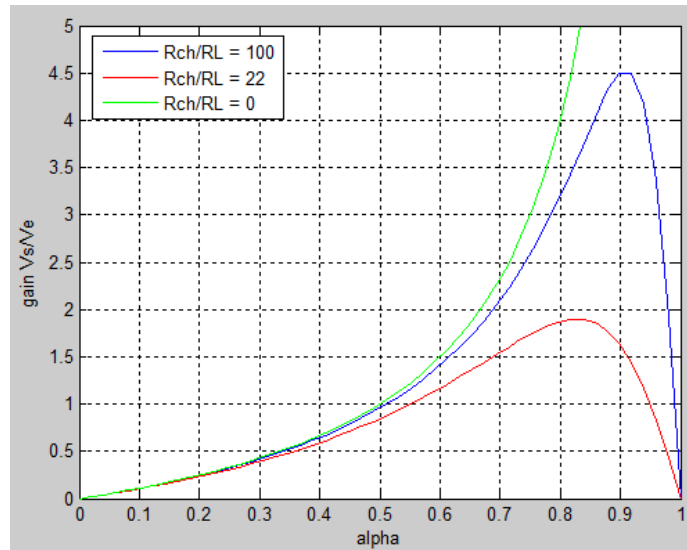


Figure 2.1423

. Évolution de la tension de sortie en fonction du rapport cyclique quand la résistance parasite de l'inductance augmente

Cette fonction atteint son maximum pour :

$$\alpha_{max} = 1 - \sqrt{\frac{R_L}{R}} \qquad \alpha_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R}{R_L}}$$

Le gain en tension retombe à zéro ce qui montre l'impossibilité d'avoir des rapports d'élévations quelconques. La difficulté est de quantifier ces résistances afin de connaître le gain maximal du convertisseur et de savoir si celui-ci pourra répondre au cahier des charges. Pour pallier ce problème, il est possible d'introduire un transformateur qui permet d'obtenir un rapport d'élévation plus grand.

2.8. Conclusion

Le SEPIC est le convertisseur idéal pour la charge des batteries possédant une tension de sortie positive contrairement au buck-boost.

Ce chapitre a présenté une analyse du fonctionnement du convertisseur SEPIC et ses performances ainsi que des directives d'optimisation de sa conception qui vont nous aider pour le montage de notre convertisseur.

CHAPITRE :03

**Poursuite du point de
puissance maximale**

3.1. Introduction

Les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque dépendent de l'éclairement solaire et de la température, Comme on a vu dans le chapitre précédent. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. À cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur photovoltaïque et le récepteur un convertisseur statique DC-DC (hacheur) commandé permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont connues sous le nom de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) associées à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Un générateur photovoltaïque est un générateur, dont la caractéristique Courant-Tension est fortement non linéaire [21].

3.2. Etat de l'art sur les techniques MPPT dans les applications photovoltaïques

La puissance de fonctionnement des panneaux solaires est facile à calculer. Elle vaut le produit tension courant. Mais, la détermination de la puissance de référence est plus délicate vue que cette dernière est fonction des paramètres météorologiques (température et éclairement). Cette référence variable, caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser. Alors, une commande pour la poursuite du PPM s'impose. Cette commande, dite algorithme MPPT, peut être plus ou moins compliquée. Elle est basée généralement sur l'ajustement du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le PPM. Différentes méthodes MPPT ont été publiées dans la littérature afin d'obtenir un fonctionnement optimal. Beaucoup de chercheurs s'intéressent au rappel et à la comparaison des différentes techniques MPPT qui existent dans la littérature [22], [23-24]. BHATNAGAR cite plus de trente techniques MPPT dans son article [22]. ESRAM et CHAPMAN comparent plusieurs algorithmes MPPT selon leurs dépendances des paramètres des panneaux solaires et de leurs complexités d'implémentation [25]. On peut classifier ces méthodes selon PASTOR par [26] :

- Le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte ;
- Les paramètres d'entrées de la commande : commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée ou de sortie du CS ;

- Le type de recherche ou contrôle.

3.3. Principe De La Commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{PPM} et I_{PPM}). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [27]. Il peut être représenté par le schéma de la **Figure 3.1**

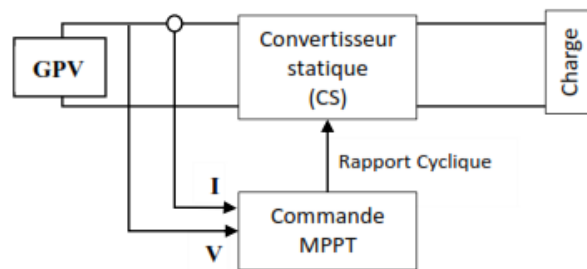


Figure 3.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur sepic, une commande MPPT et une charge.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP [28].

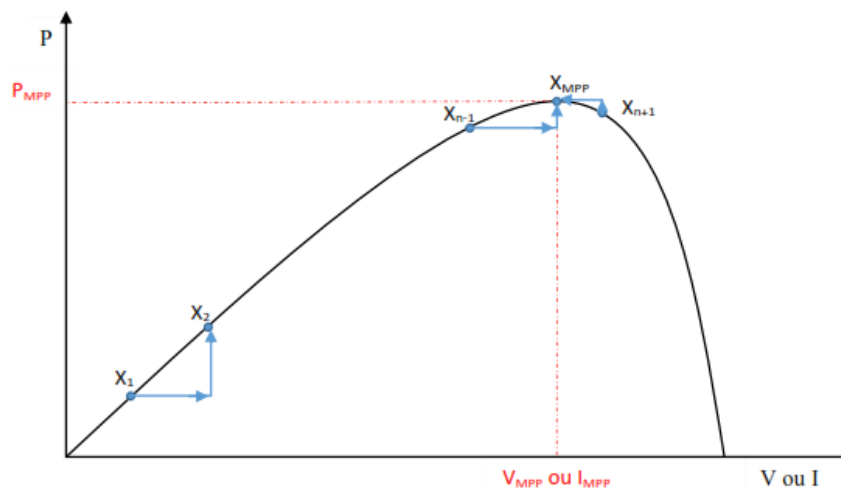


Figure 3.2 Principe de la commande MPPT

3.4 Classification Des Commandes MPPT

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [29].

3.4.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les paramètres d'entrée.

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

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb&Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{OPT} et I_{OPT}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{OC} et I_{CC}). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [29].

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

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple ;les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie. Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [29].

3.4.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

a. MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [30-29].

b. MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [30-29].

3.5 Les Algorithmes MPPT

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

3.5.1. Premiers types de commande MPPT

BOEHRINGER a appliqué la première commande MPPT au PV en 1968 [31]. C'est un algorithme simple pouvant être implanté numériquement (**Figure 3.3**). Il est destiné aux applications spatiales qui avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres.

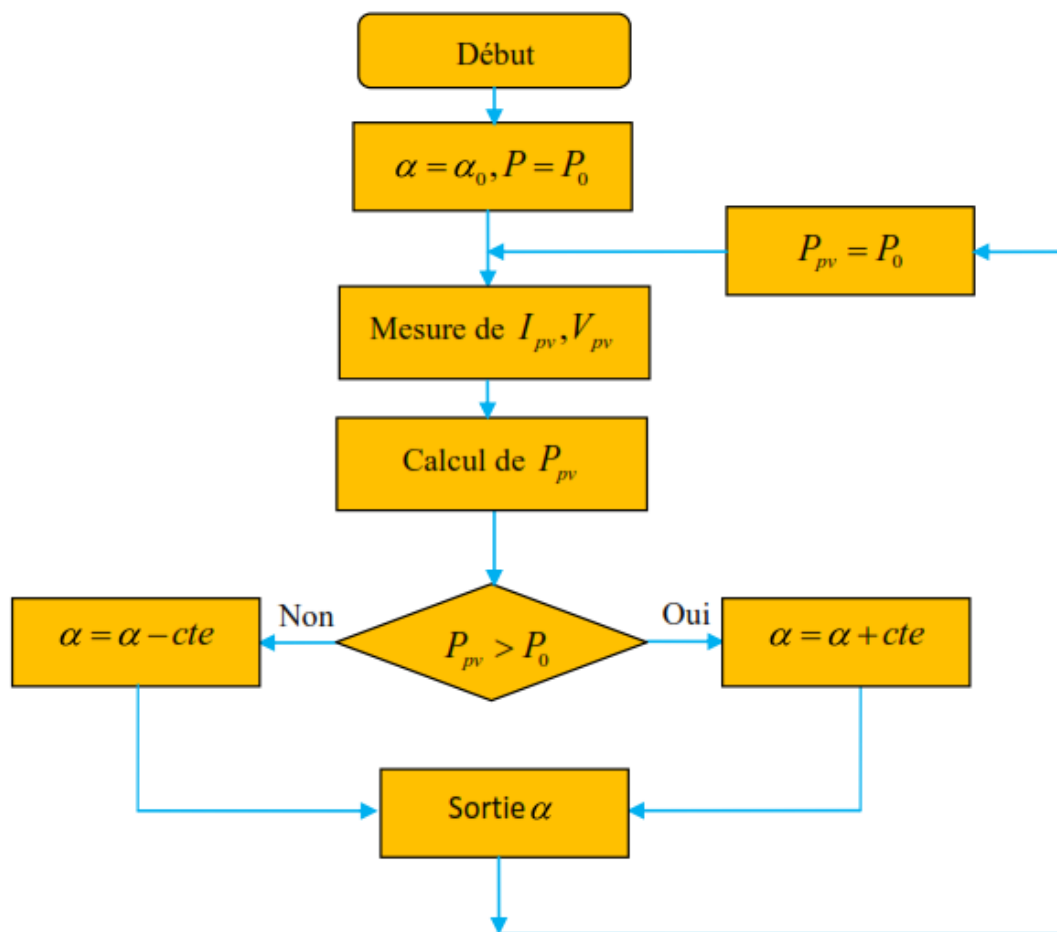


Figure 3.3. Organigramme de la première commande MPPT

3.5.2. Méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert

Cette méthode se base sur l'utilisation d'une cellule PV comme consigne étalon. Cette cellule étalon, non chargée, placée à côté des modules PV, mesure en temps réel la valeur de la tension en circuit ouvert qui permettra de déterminer la tension de référence. Pour déterminer le point de fonctionnement correspondant au point de puissance maximale en fonction de la tension V_{oc} , on trace le graphe $V_{opt} = f(V_{oc})$. Cette fonction obtenue n'est pas linéaire. Pour faciliter le calcul, on doit la rendre linéaire. Ce qui donne [32]:

$$V_{opt} = 0.7V_{oc} + 0.328 \quad (3.1)$$

Avec V_{opt} la tension PV correspondant au PPM

Malgré que le point de fonctionnement soit proche de la puissance maximale, quelques reproches à cette méthode sont soulevés:

- Dépendance totale de la cellule étalon qui peut subir des modifications et des anomalies ;
- Non prise en compte des dérives de caractéristiques des modules photovoltaïques ;
- La tension V_{opt} représente 75 à 95% de la V_{oc} , donc la linéarisation réduit la précision

3.5.3. Algorithme de perturbation et observation

L'algorithme de perturbation et observation (communément désignée par P&O) est de type « hill climbing » (mot anglais qui veut dire « grimper une colline »). Il est le plus utilisé dans la littérature et surtout dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Cet algorithme a pour objectif de faire fonctionner le système à sa puissance maximale par l'incrémentation ou décrémentation de la tension du point de fonctionnement et l'observation de l'effet de cette perturbation sur la puissance débitée par le GPV. Selon cette observation, l'algorithme décide sur l'acte à faire pendant la prochaine itération. Quatre cas de situation pour P&O sont envisagés par la **figure 3.4** et récapitulés dans le **Tableau 3.1**.

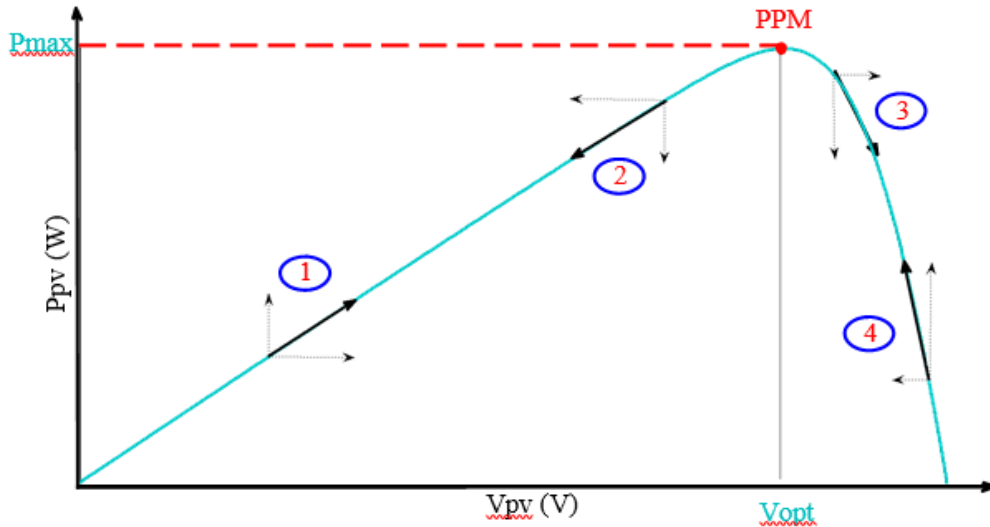


Figure 3.4. Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.

Cas n°	ΔV	ΔP	$\frac{\Delta P}{\Delta V}$	Sens de la poursuite	Action de contrôle
1	+	+	+	Bon	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
2	-	-	+	Mauvais	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
3	+	-	-	Mauvais	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$
4	-	+	-	Bon	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$

Tableau 3.1. Principe de l’algorithme P&O

L'algorithme P&O (**Figure 3.5**) a comme avantage la précision et la rapidité de réaction. Il permet de déterminer le point de puissance maximale pour un ensoleillement et une température ou un niveau de dégradation des caractéristiques.

Le problème avec cet algorithme est:

- l'oscillation autour du PPM dans les conditions de fonctionnement normales.
- la mauvaise convergence de l'algorithme dans le cas des variations brusques de la température et/ou de l'ensoleillement.

Il faut noter que ces oscillations peuvent être réduites si on fixe un faible pas d'incrémenter mais au détriment du temps de convergence. Alors, un compromis doit être fait entre précision et rapidité lors du choix de ce pas de mise à jour.

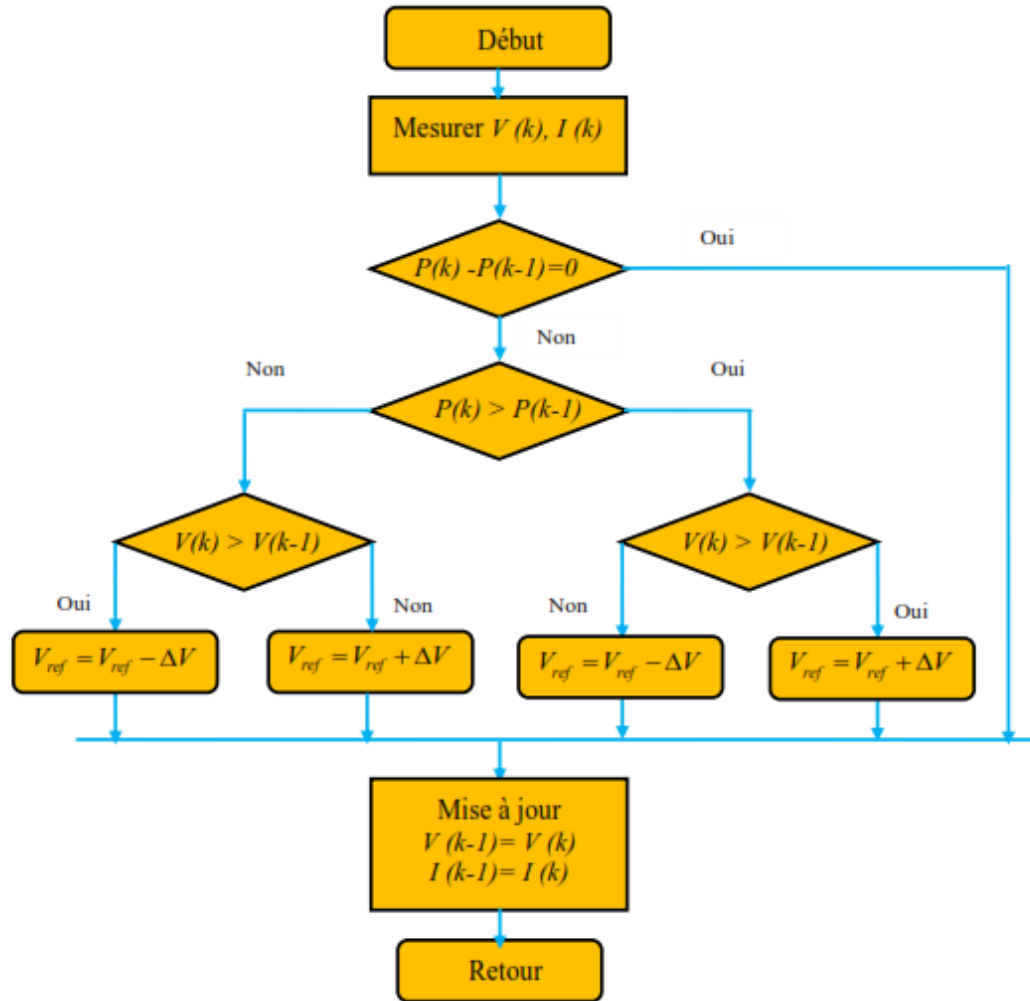


Figure 3.5. Organigramme de la méthode P&O

3.5.4. Algorithme Hill Climbing

La technique Hill Climbing (HC) [33, 34] est une méthode mathématique d'optimisation. Comme son nom l'indique, elle fait monter le point de fonctionnement le long d'une caractéristique pour atteindre le maximum de la fonction puissance du GPV contre le rapport cyclique du convertisseur α (Figure 3.6). La perturbation est appliquée pour plusieurs itérations sur le paramètre α en l'incrémentant ou en le décrémentant de $\Delta\alpha$ jusqu'à avoir la dérivée $d\alpha/dP$ nulle. La figure 2.1 présente l'algorithme d'exécution de cette technique. La méthode HC est plus simple à mise en œuvre car elle possède une seule boucle de régulation. Cependant, elle présente des oscillations et peut même diverger lors du changement rapide des conditions atmosphériques.

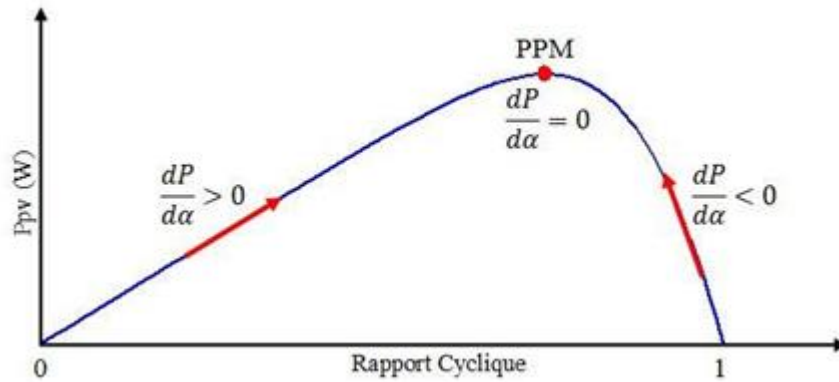


Figure 3.6. Principe de la méthode HC

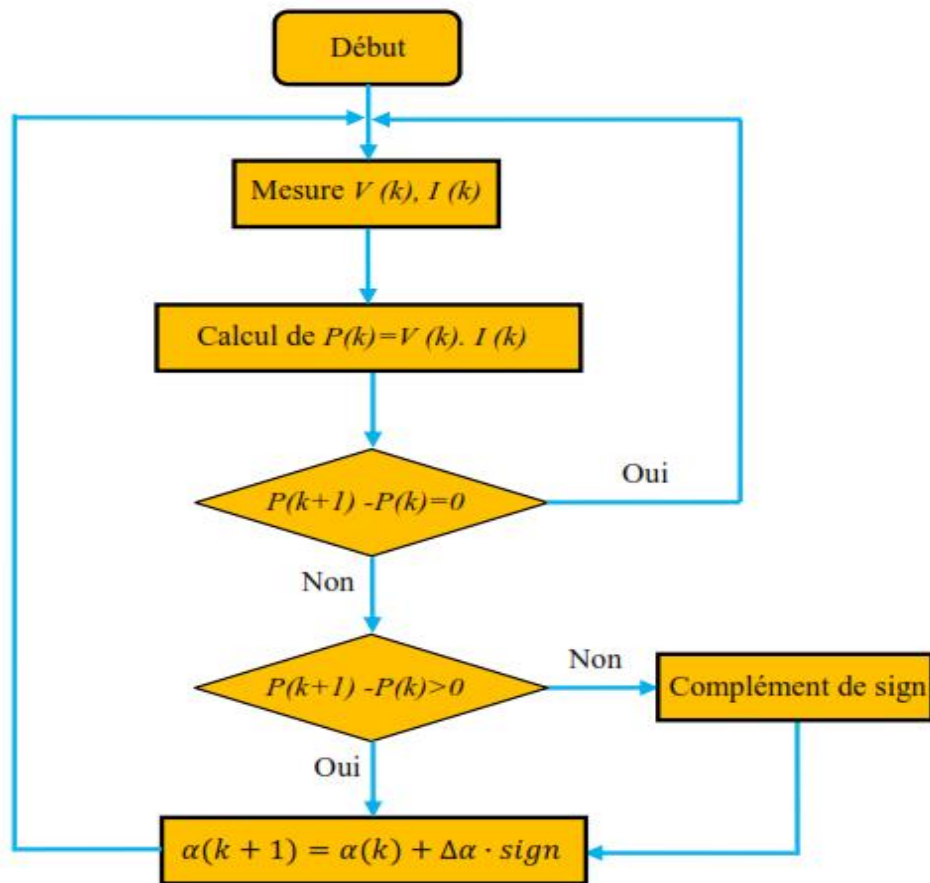


Figure 3.7. Algorithme de la méthode HC

3.5.5. Algorithme d'incrément de la conductance

L'algorithme d'incrément de conductance (IncCond), appelée dans la littérature anglo-saxonne « Incremental Conductance », est aussi l'une des techniques de « HC » où la commande MPPT essaye de faire monter le point de fonctionnement (PF) du

GPV le long de la caractéristique P-V jusqu'à atteindre le PPM. Elle permet la recherche du PPM en se basant sur l'égalité de la conductance ($G = I/V$) et de l'incrément de la conductance ($\Delta G = \Delta I/\Delta V$) (voire la **figure3.8**) Cet algorithme nécessite la connaissance de la valeur initiale du PFV_{ref} et le pas de mise à jour de la tension de référence (ΔV) (**Figure 3.9**).

La puissance maximale est obtenue lorsque la dérivée de la puissance du GPV par rapport à la tension s'annule:

$$\frac{dP}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I \approx V \frac{\Delta I}{\Delta V} + I \quad (3.2)$$

En comparant la conductance et l'incrément de la conductance, trois positions du PF peuvent être distinguées :

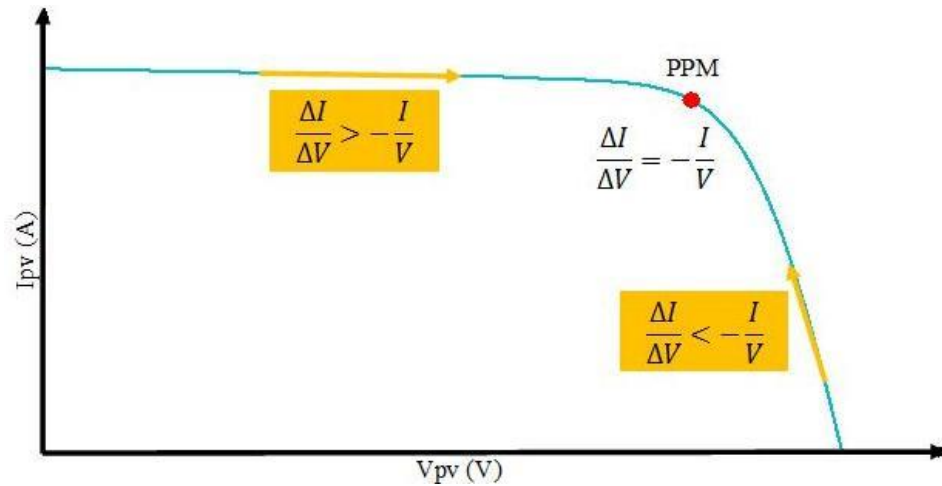


Figure 3.8. Caractéristique de fonctionnement de la méthode IncCond

$$\begin{aligned} \text{Si } \frac{dP}{dV} = 0 & \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad , \text{ le PF est sur le PPM} \\ \text{Si } \frac{dP}{dV} > 0 & \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad , \text{ le PF est à gauche du PPM} \\ \text{Si } \frac{dP}{dV} < 0 & \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad , \text{ le PF est à droite du PPM} \end{aligned} \quad (3.3)$$

L'avantage de cet algorithme est la précision et la vitesse de recherche du PPM quand les conditions atmosphériques changent rapidement. Ceci peut être un remède au problème de l'algorithme P&O [35]. Cet algorithme présente des difficultés de mise en œuvre due à la complexité du circuit de commande et le calcul en temps réel de la dérivée nécessite un processeur de calcul rapide [35]. Autrement dit, l'exécution de la commande

IncCond nécessite plus de temps par rapport P&O. Pratiquement, même IncCond présente des oscillations autour du PPM. Une comparaison sur le rendement MPPT entre les deux techniques les plus utilisées P&O et IncCond est faite par la référence [36]. Le résultat trouvé est de 89,9% pour IncCond contre 81,5% pour P&O.

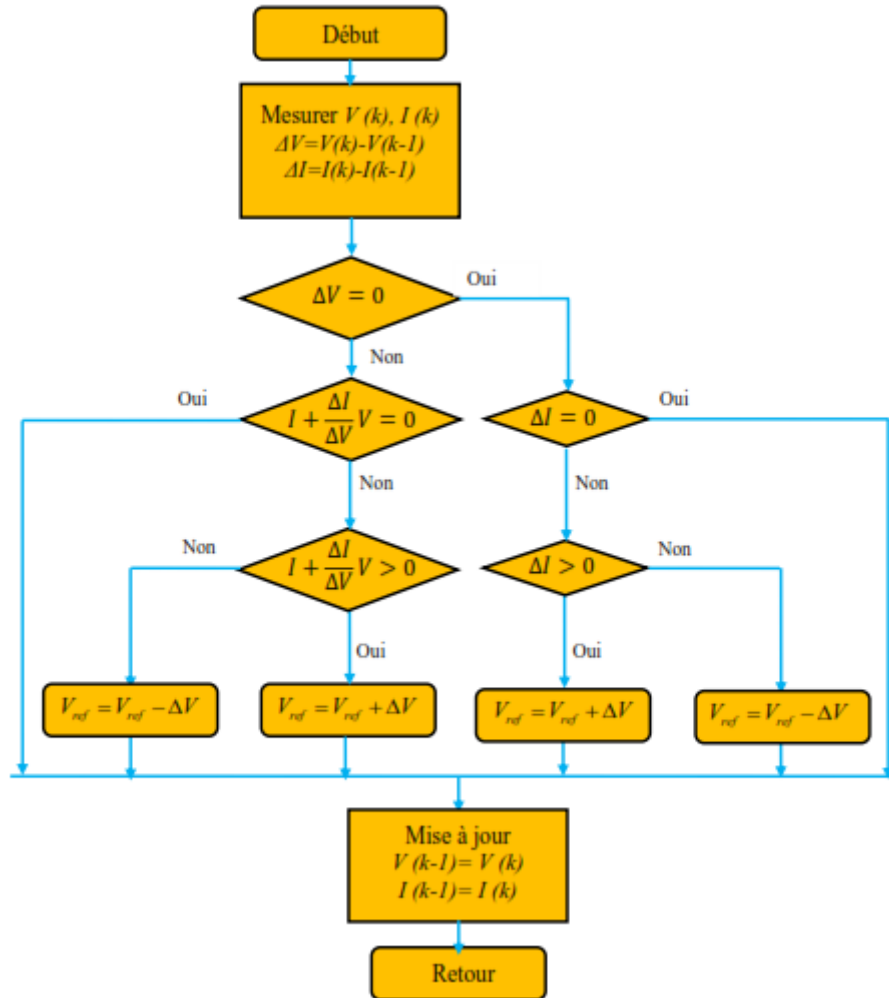


Figure 3.9. Organigramme de la méthode IncCond

3.6. Techniques de la commande PWM

Les techniques de la commande PWM (pulse width modulation), appelée aussi modulation de largeur d'impulsions sont multiples. Cependant quatre catégories seulement ont été développées et sont donnée comme suit :

- Les modulations sinus-triangle effectuant la comparaison d'un signal de référence à une porteuse, en général triangulaire.
- Les modulations pré-calculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre harmonique.
- Les modulations post-calculées encore appelées PWM régulières symétriques

ou PWM vectorielles dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.

- Les modulations stochastiques pour lesquelles l'objectif fixé est le blanchiment du spectre (bruit constant et minimal sur l'ensemble du spectre). Les largeurs des impulsions sont réparties suivant une densité de probabilité. Le développement considérable de la technique de modulation de largeur d'impulsion ouvre une large étendue d'application dans les systèmes de commande et beaucoup d'autres fonctions. Elle permet une réalisation souple et rentable des circuits de commande des hacheurs.

3.6.1. Principe de la commande PWM :

Le principe de base de la commande PWM est fondé sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation et de largeur variable. La technique la plus répandue pour l'obtention d'un signal PWM est de comparer deux signaux :

- Le premier, appelé signal de référence, est un signal continu qui varie entre deux seuils définis en fonction de l'application.
 - Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques du convertisseur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.
- L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs [37].

3.7. Choix du langage de programmation

3.7.1. Le langage de programmation :

Comme nous l'avons mentionné, le langage de l'IDE Arduino est un mélange entre le C et le C++, il possède un jeu d'instruction très riche. Ces instructions décrivent :

- Les données, qui peuvent être numériques (*byte, int, word,...*), logiques (*booleen, ...*), sous forme de tableaux (*array*), caractères ou chaînes de caractères (*char, string*), ou constantes particulières (True/False, HIGH/LOW) ...etc.
- Les fonctions arithmétiques et mathématiques : comme les fameuses quatre opérations arithmétiques (+, -, * et /) simples ou composées, les fonctions mathématiques (*abs, min, max,...*) et trigonométriques (*cos, sin, ...*).
- Les opérateurs logiques (&&, !, ...) et les opérateurs de comparaisons (=, <, >, ...).

..).

- Les structures de contrôle comme les boucles (*for*, *while*,...), les prises de décision (*if-else*,...), les sauts (*break*, *goto*, *continue*,...).
- Gestions du temps (*delay*) et des entrées /sorties numérique (*pinMode*, *digitalWrite/Read*) ou analogique (*analogRead/Write*).
- Fonctions diverses pour générer des nombres aléatoires (*random*, *randomSeed*), et pour manipuler des bits (*low/highByte*, *bitRead/Write/Set/Clear*,...), ainsi que pour gérer les interruptions (*attach/detach/noInterrupt*).
- Gestion du port série (*Serial.begin/.end/.available/.read/.print*,...etc).

3.7.2. Description de l'IDE :

L'IDE est un logiciel de programmation qui permet d'écrire, de modifier un programme et de le convertir en une série d'instructions compréhensibles pour la carte. Il programme par code, contenant une cinquantaine de commandes différentes. A l'ouverture, l'interface visuelle du logiciel contient le menu, des boutons de commande en haut, une page blanche vierge, une bande noire en bas, comme ceci :

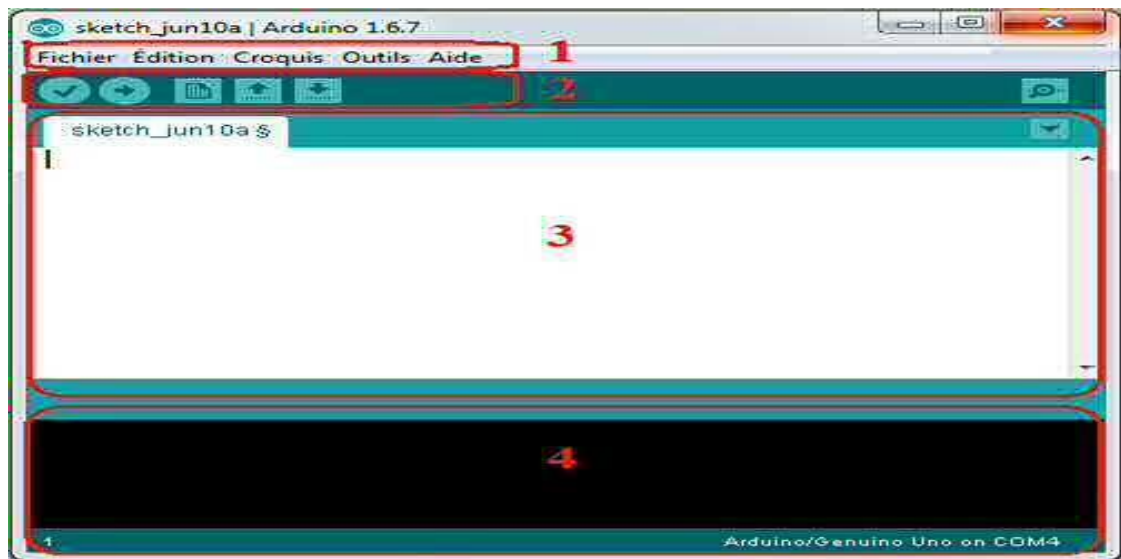
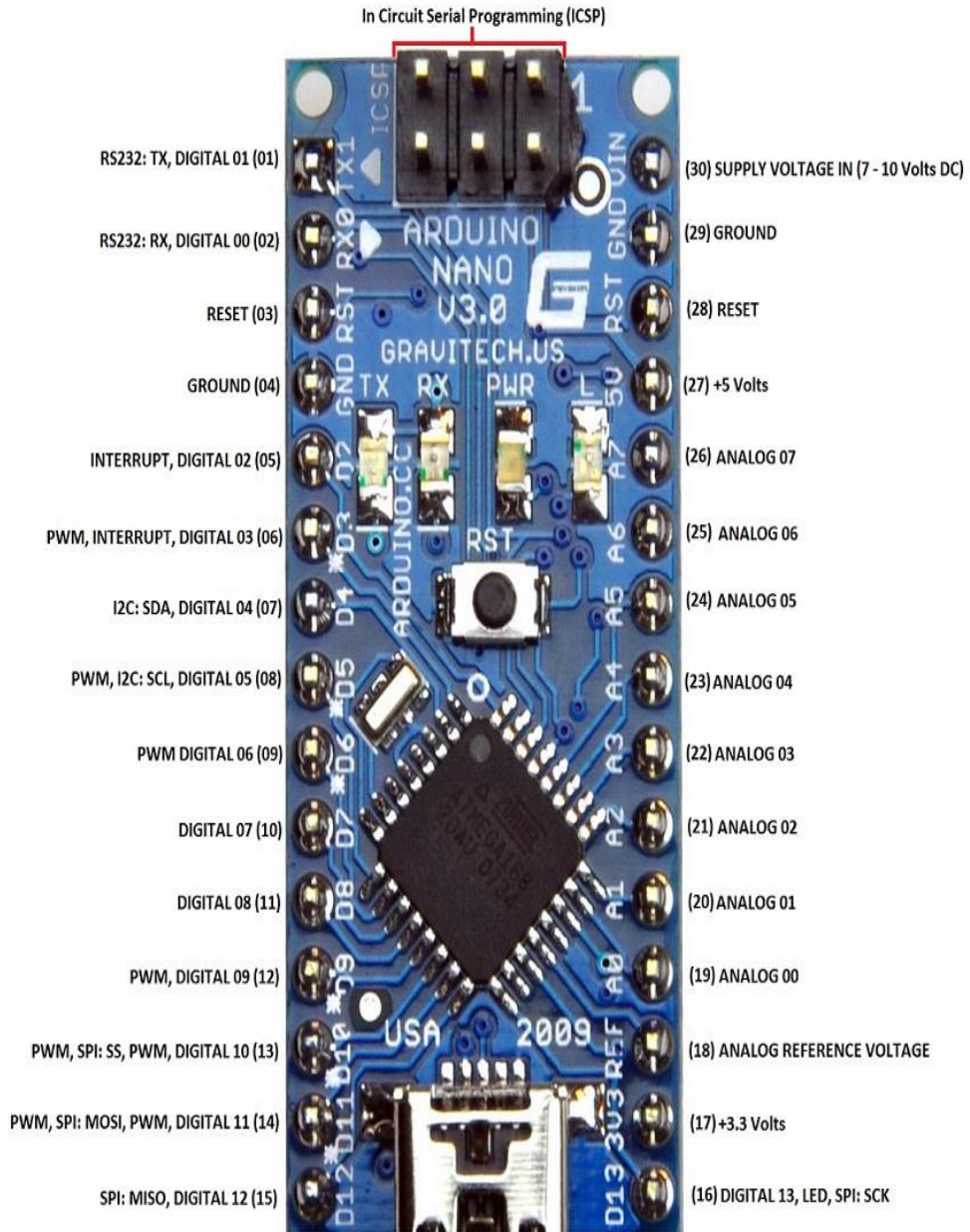


Figure 3.10 : IDE.

. **Menu** : Les différents éléments du menu permettent de créer de nouveaux sketches (programmes), de les sauvegarder, et de gérer les préférences du logiciel et les paramètres de communication avec votre carte Arduino. Le menu comprend : **Fichier** : pour créer, sauvegarder en spécifiant la destination, et d'appeler un programme ; **Édition** : Pour couper, copier, coller, supprimer, sélectionner,...etc. ; **Croquis** : regroupe les fichiers réalisés ; **Outils** : pour spécifier le type de la carte, le port série, formater, recharger et réparer l'encodage, graver la séquence d'initialisation, de la carte branchée sur

l'ordinateur.

3.7.3. datasheet d'une carte arduino :



Arduino Nano V3 - Pin Description

www.CircuitsToday.com

Figure 3.11 carte aduino nano

3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, l'intérêt de l'étage d'adaptation dans la chaîne de conversion PV a été abordé. Cet étage consiste en un convertisseur DC/DC avec un algorithme de commande. Différentes topologies de convertisseurs DC/DC non isolés ont été comparées. La structure de type SEPIC a été adoptée pour sa simplicité et son gain en tension relativement plus élevé. Quelques méthodes de poursuite de la puissance maximale citées dans la littérature depuis 1968 sont présentées. Des améliorations sur les méthodes Perturbation et observation P&O et l'incrémental de la conductance IncCond, pour corriger la divergence en cas de changement brusque d'éclairement, ont été présentées. La commande MPPT basée sur le mode de glissement présentant de meilleures performances par rapport aux autres avec la carte arduino que nous choisissons pour générer leur MOSFET ou IGBT, sera décrite en détail dans le chapitre suivant.

CHAPITRE :04

Résultat de réalisation et simulation

4.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à la simulation et la réalisation de la commande MPPT du convertisseur DC/DC de type **SEPIC**.

Dans ce chapitre on utilise dans un premier temps le logiciel **MATLAB/SIMULINK** pour simulé ce Project, puis on une passe au logiciel **Proteus** pour voir la faisabilité de réalisation de notre prototype.

4.1.2. Spécification :

a) panneau solaire :

Victron – 100W-12V	
Dimensions Module	1195 x 545 x 35 mm
Poids	8 kg
Puissance nominale Pmpp*	100 W
Tension à puissance max. Vmpp*	18 V
Courant à puissance max. Impp*	5,56 A
Tension en circuit ouvert Voc	22,4 V
Courant de court-circuit Isc	6,53 A
Puissance nominale (tolérance +/- 3%)	100 W
Type de cellules	Monocristallin
Nombre de cellules couplées en série	36
Tension maximale système	1000 V
Coefficient de température de Pmpp (%)	-0,48/°C
Coefficient de température de Voc (%)	-0,34/°C
Coefficient de température de Isc (%)	+0,037/°C

Tableau 4.1. spécifications d'un panneau solaire

b) Batterie solaire :

Batterie GEL solaire VICTRON 165 Ah 12V

c) condition de charge :

Maximum courant de charger 8.5 A

Minimum tension de charge 12 V

4.2 Dimensionnements d'un convertisseur SEPIC :

Pour le dimensionnement des composant de notre convertisseur DC/DC SEPIC on utilise abouti a un modèle dans SIMULINK/MATLAB. **(Figure 4.1)**

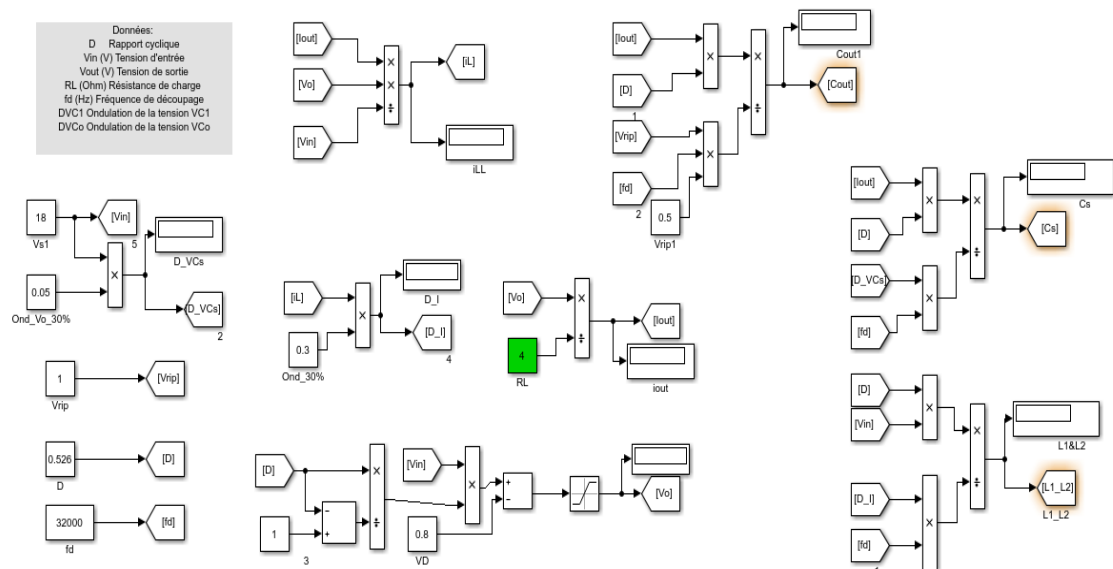


Figure 4.1. Modèle Simulink de dimensionnements d'un SEPIC

4.2.1. Résultats de simulation obtenu :

Composants	Valeurs
Inductance L1et L2	300μH
Condensateur Cs	88μF

Condensateur Cout

157 μ F

Tableau 4.2. valeurs des composants de convertisseur

4.2.2. Simulation d'un GPV dans MATLAB/SIMULINK :

les résultats de simulation de la caractéristiques (I_V) et (P_V) dans les condition standard est représenté sur la figure 4.2.

Figure 4.2. Caractéristique (I_V) et (P_V) dans les conditions standard (25°/1000 W/m²) dans simulink.

Les résultats de simulation de la caractéristiques (I_V) et (P_V) avec variation de la température et l'irradiance est représenté Tension re 4.3.

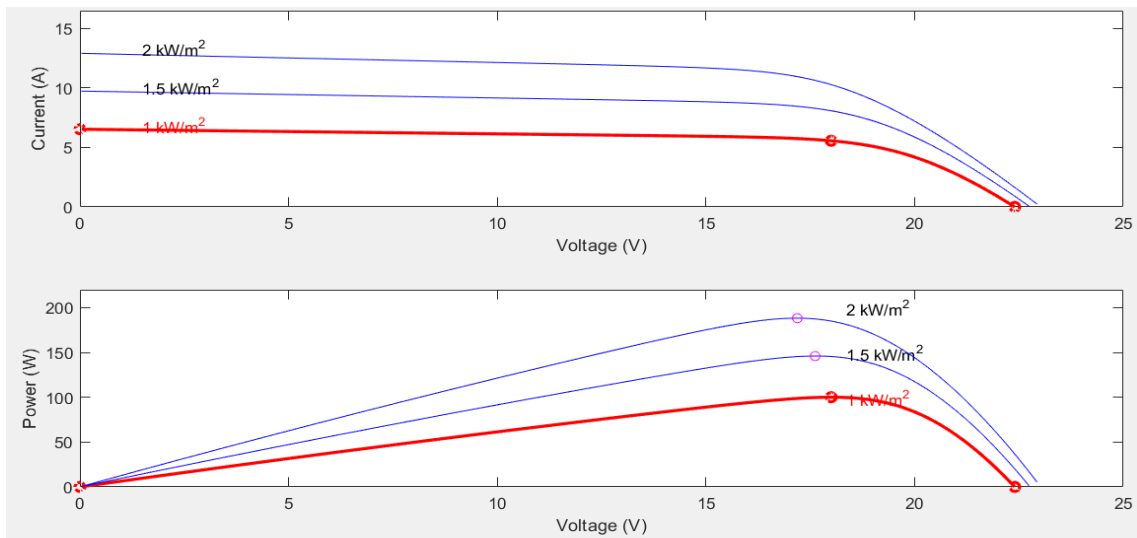


Figure 4.3. Les caractéristique (I-V) et (P-V) dans le cas de variation de l'irradiance et la température (25°).

On observe une augmentation dans la puissance avec l'augmentation dans l'irradiance est vice versa.

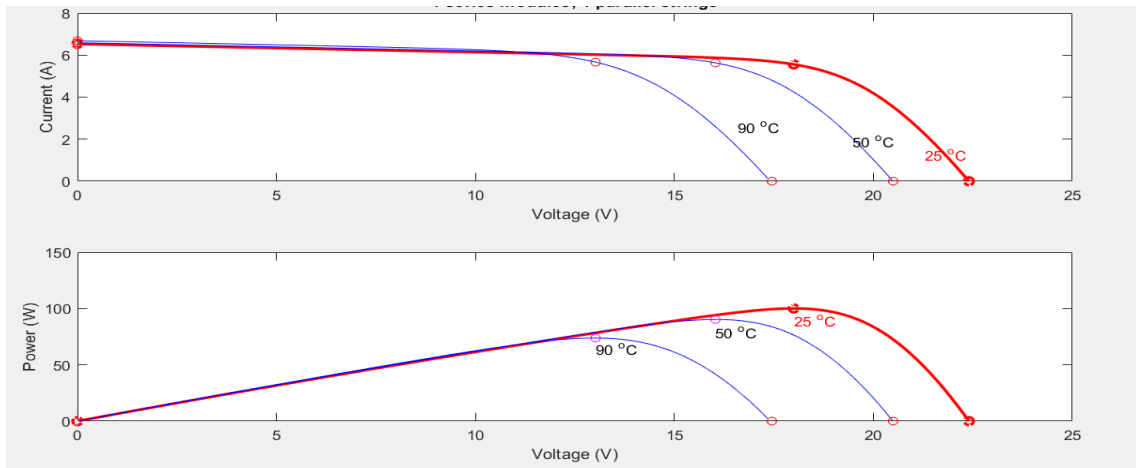


Figure 4.4. Les caractéristique (I_V) et (P_V) dans le cas de variation la température et l'irradiance (1000 W/m²).

4.3. Algorithme MPPT P&O organigramme :

La figure 4.5 représente l'algorithme P&O que on a utilisée pour la commande MPPT.

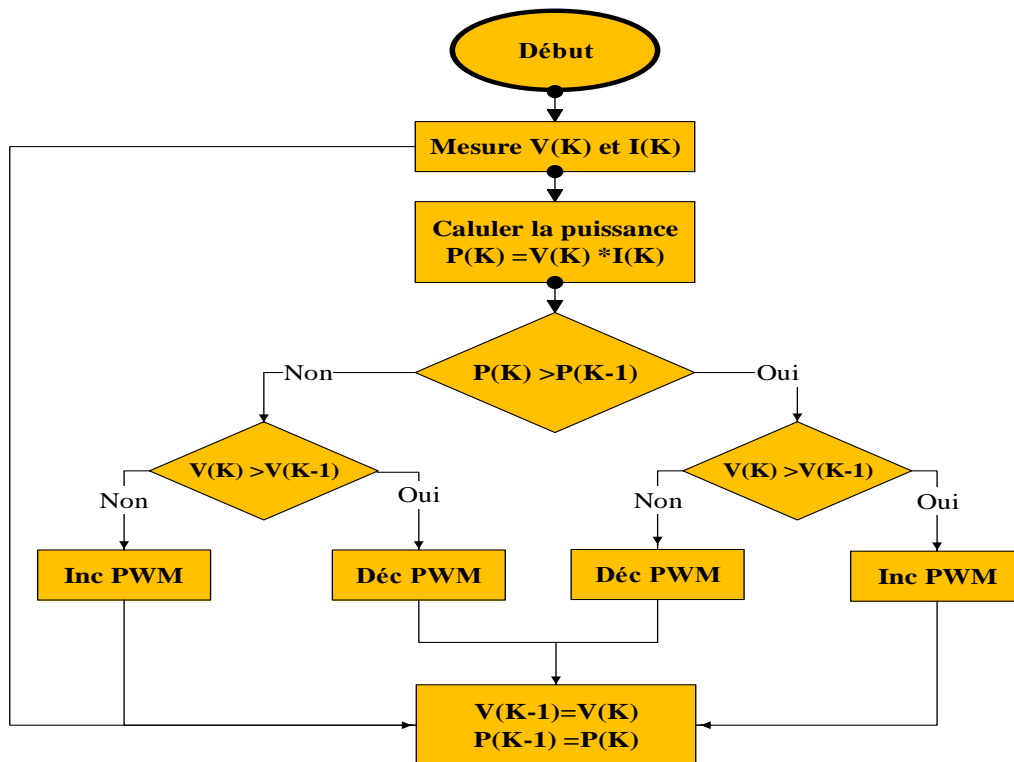


Figure 4.5. Algorithme MPPT P&O [38]

4.4. Schéma bloc d'un MPPT de P&O :

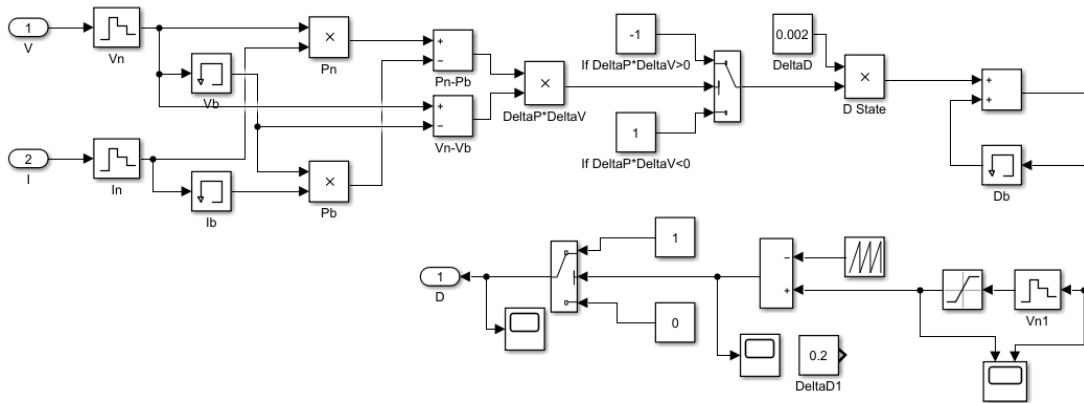


Figure 4.6. Schéma block de l'algorithme P&O dans SIMULINK/MATLAB

4.5. Schéma bloc global:

La figure 4.7 représente le convertisseur DC/DC SEPIC avec un panneau photovoltaïque connectée à la batterie 12V commandée avec la commande P&O.

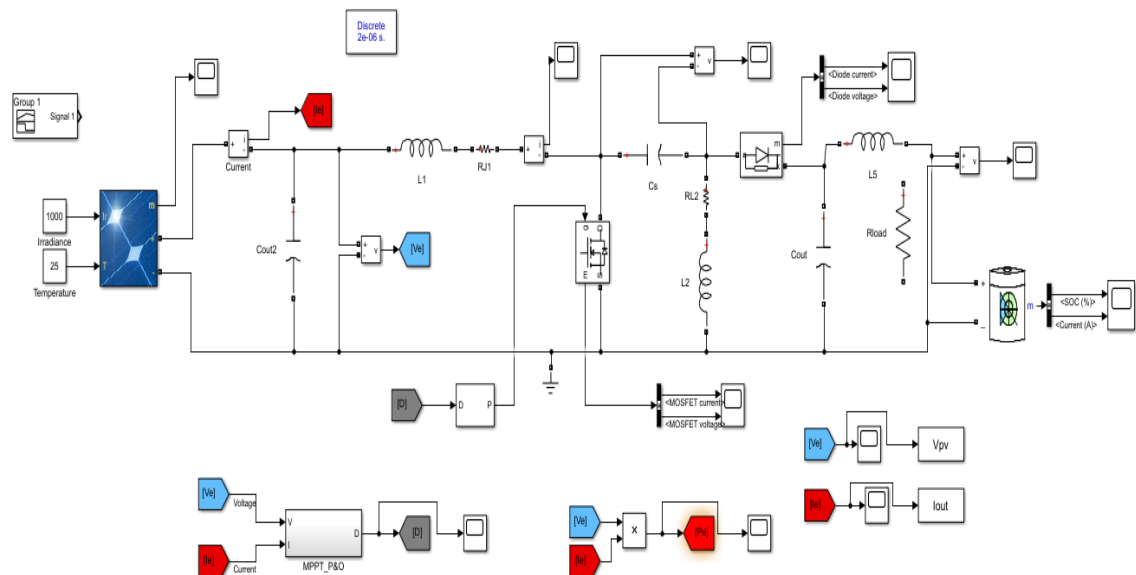


Figure 4.7. Simulation de convertisseur avec commande P&O

La figure 4.8 représente les courbe de courant et l'état de charge de la batterie :

Le premier courbe présente l'évolution de charge de la batterie et son courant chaque 0.5 ms, on observée une ondulation dans la deuxième courbe de courant à cause de la charge et décharge de l'inductance.

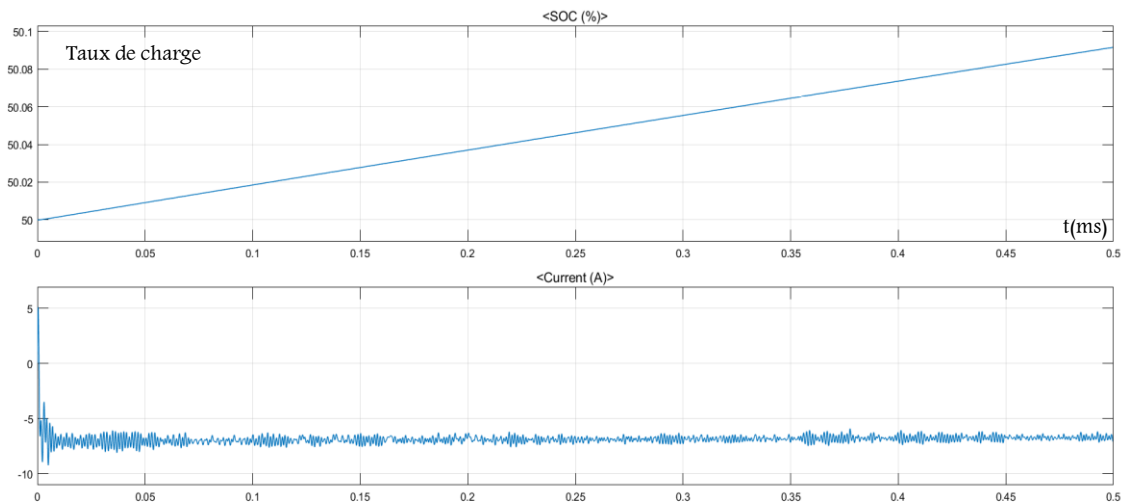


Figure 4.8. La charge de batterie avec leur courant

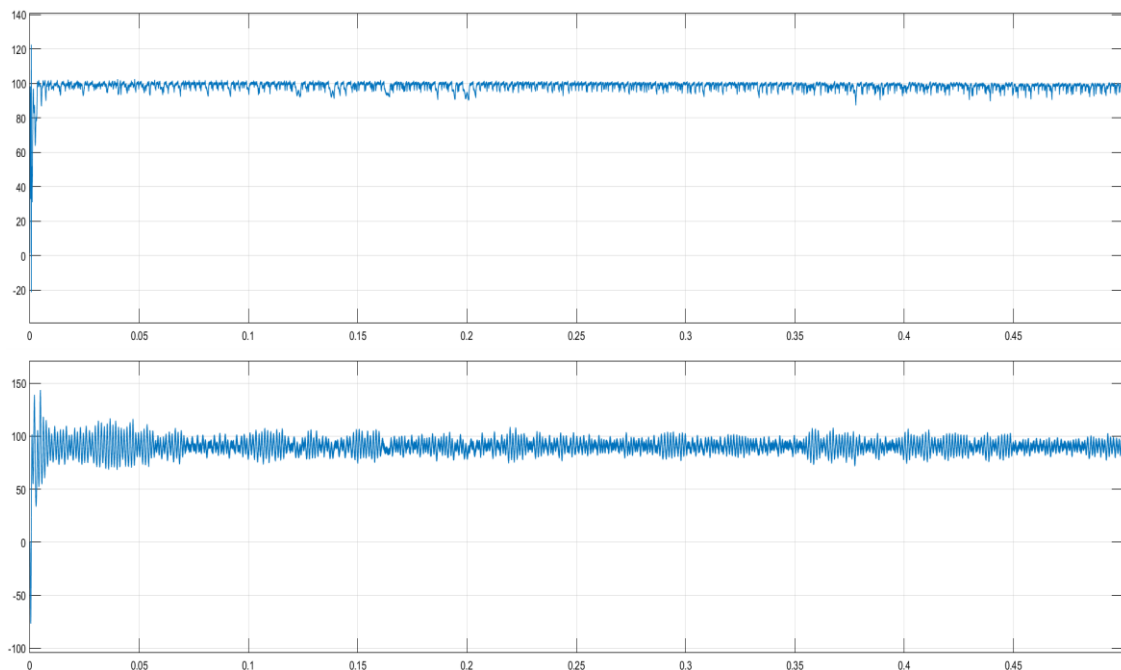


Figure 4.9 comparaison entre la puissance d'entrée et la puissance de sortie.

On observe que la puissance d'entrée est presque le même (le principe de conservation de puissance de convertisseur), mais la puissance de sortie est contient quelque ondulation, qui crée par les bobines.

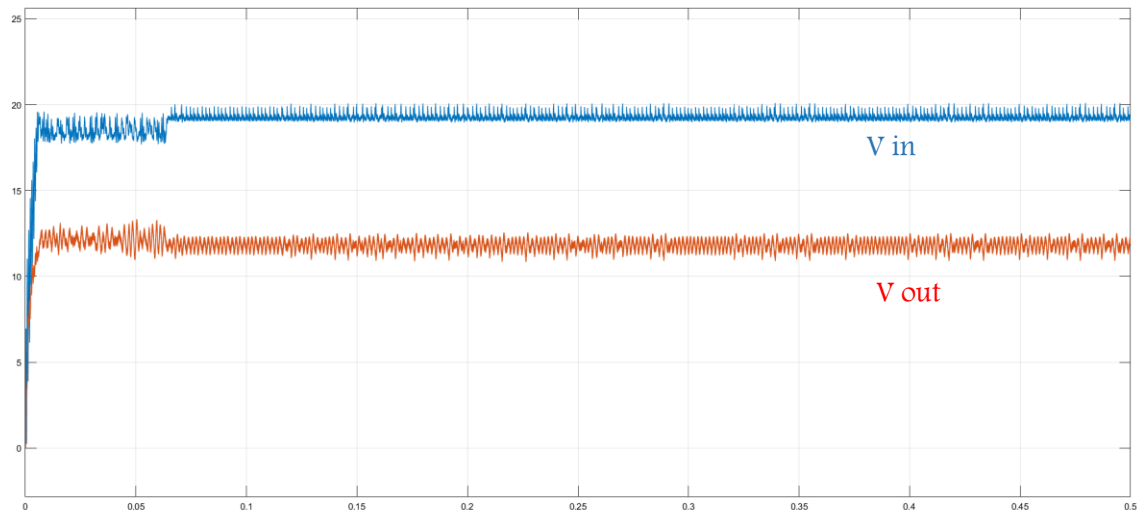





Figure 4.10 comparaison entre la tension de sortie et tension d'entrée

Puise que la batterie a besoin d'une tension de charge supérieur à 12V, il faut donc faire fonctionné notre convertisseur comme abaisseur de tension de panneau.

4.4. Test et simulation de fonctionnement de composant avec un prototype :

Ce **tableau 4.3** présenté les composant que nous avons utilisé dans le test de prototype et définie le rôle de tous composants :

Désignation	Fonction	Les composants
IR2153	Driver pour MOSFET	
IRFZ44N	MOSFET (NMOS)	
MBR1060CT	Diode Schottky	





Resistance 4Ω (100Watt)	Resistance bobinée boitier aluminium	
Standard Voltage Sensor Module	Module de mesure de tension (0V – 25 V) (diviseur de tension)	
ACS712	Module pour la mesure du courant par effet hall	
LM2596s	DC-DC step-down power supply module 3A adjustable step-down module LM2596 voltage regulator 24V 12V 5V 3V	

Tableau 4.3 présenté Composants pour la réalisation du dispositif MPPT

4.4.1. Simulation et réalisation d'un convertisseur SEPIC avec panneau solaire (prototype) :

Pour testé notre prototype, nous avant commencé par simulée le module PV dans le logiciel Proteus comme le montre la **Figure (4.11)**

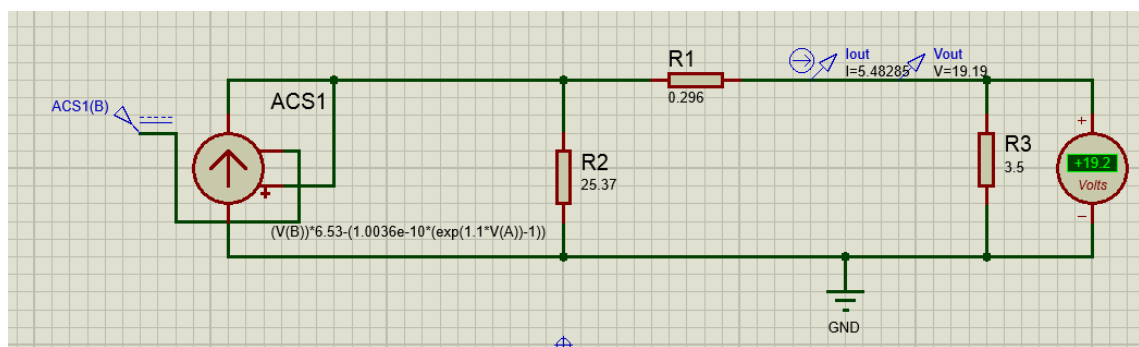


Figure 4.11 Simulation d'un module photovoltaïque sous le logicielle Proteus.

puis on a simulé le convertisseur SEPIC avec un signal PWM et générateur et driver (IR2104).

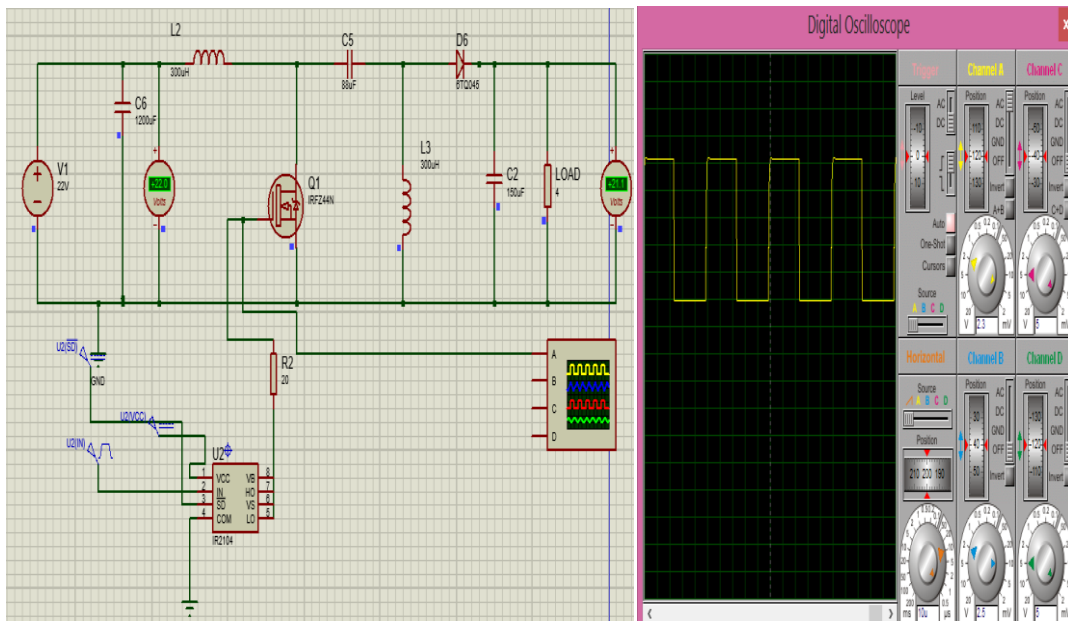


Figure 4.12 Simulation du convertisseur SEPIC avec le générateur PWM.

La **figure (4.13)** montre le convertisseur SEPIC avec un model PV.

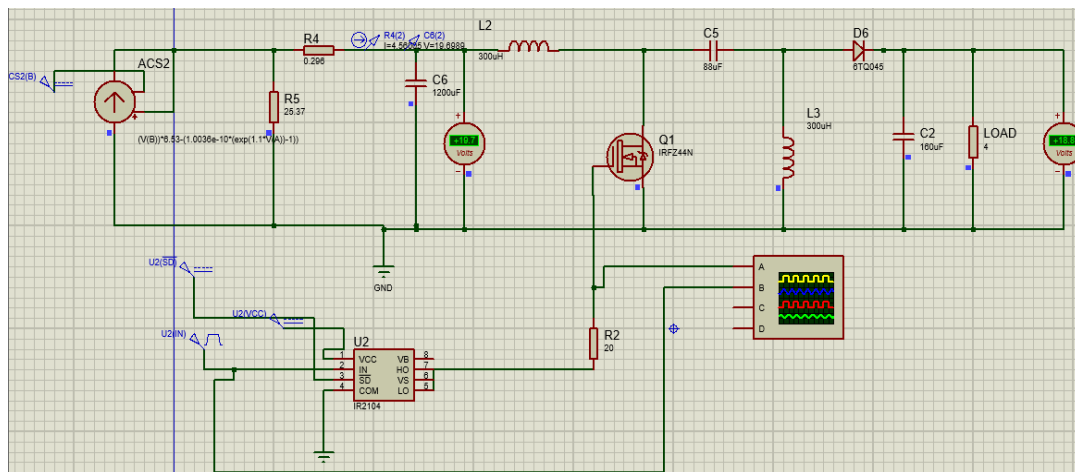


Figure 4.13. Simulation d'un convertisseur SEPIC avec le module PV dans Proteus.

Dans la **Figure (4.14)** on montre la carte Arduino pour générée un signal PWM qui est utilisée pour commander le MOSFET .

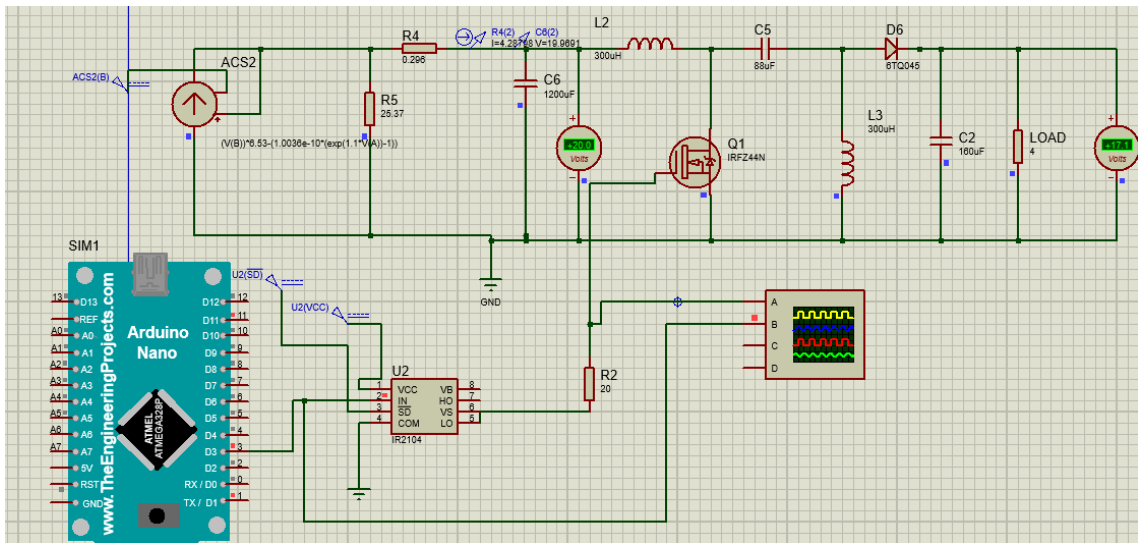


Figure 4.15. Simulation de circuit avec l'utilisation de signal PWM de l'Arduino.

Après avoir confirmé les résultat de simulation on passe a la réalisation pratique du convertisseur SEPIC, que on la testé avec une générateur PWM dans un premier phase.

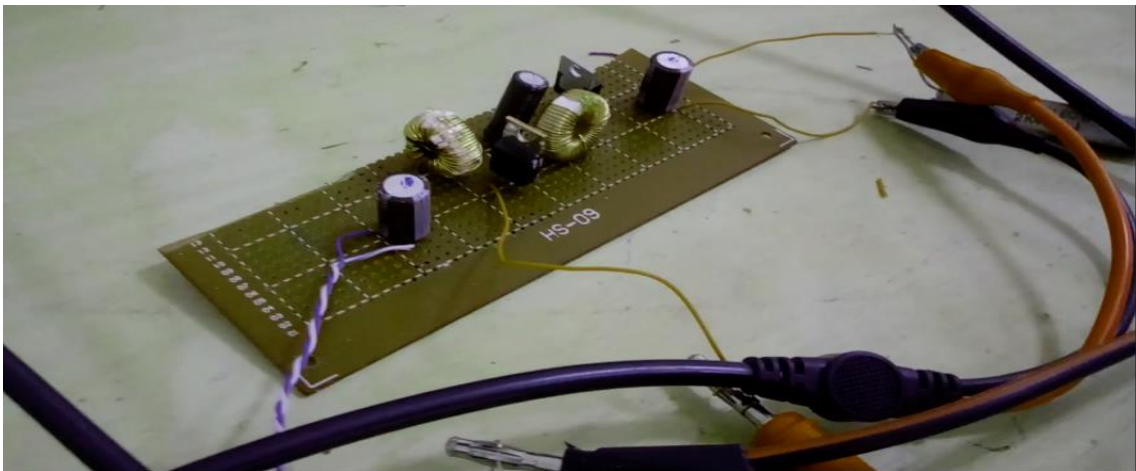
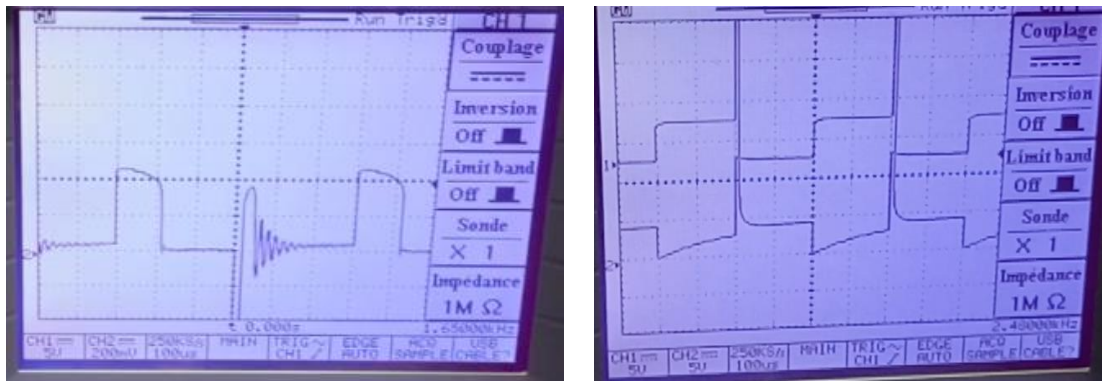


Figure 4.16 Réalisation prototype d'un convertisseur SEPIC

les résultats de mesure (Figure 4.17) de le tension dans la bobine L1 dans les deux modes de transfère : Mode DCM(Déconnecté : Mode de Conduction) et mode CCM (Connecté : Mode de Conduction).

Pour cela on a augmenter la fréquence PWM jusqu'à ce qu'elle devienne inferieure au temps de charge de bobine).



DCM

CCM

Figure 4.17 La tension de bobine avec deux modes (DCM et CCM)

4.4.1. Réalisation et configurations d'un générateur PWM avec TIMER :

Pour créer un signal PWM dans la carte ARDUINO on ajout une bibliographie au l'IDE. Cette méthode ne peut pas fonctionner 100% avec les interruptions ou par méthode plus simple et réalisables par configuration les registres des TIMERS.

On a trois type des TIMERS (0, 2 codée sur 8 bit, et 1 codée 16 bit) en choisit le **TIMER2** pour configurée ce TIMER comme montré dans les tableaux suivants [39]:

	7bit	6bit	5bit	4bit	3bit	2bit	1bit	0bit
TCCR2A	COM2A1	COM2A0	COM2B1	COM2B0	-	-	WGM21	WGM20

Tableau 4.4. Contrôleur de registre de comptage 2A

COM2A1	COM2A0	Descriptions
0	0	OC2A désactivée
0	1	WGM22 =0 : opération de Port Normale, OC2A déconnecté WGM22 =1 : basculer : OC2A comparaison au haut
1	0	Mode non-inversée (HIGH a bas , LOW au haut)
1	1	Mode inversée (LOW a bas, HIGH au haut)

Tableau 4.5. Configurerions PWM modes (COM2A0, COM2A1)

COM2B1	COM2B0	Descriptions
0	0	OC2B désactivée
0	1	Réservée
1	0	Mode non-inversée (HIGH a bas , LOW au haut)
1	1	Mode inversée (LOW a bas, HIGH au haut)

Tableau 4.6. Configurerions PWM modes (COM2B0, COM2B1)

	7bit	6bit	5bit	4bit	3bit	2bit	1bit	0bit
TCCR2B	FOC2A	FOC2B	-	-	WGM22	CS22	CS21	CS20

Tableau 4.7 Contrôleur de registre de comptage 2B

CS22	CS21	CS20	Descriptions
0	0	0	TIMER/compteur 2 désactivée
0	0	1	Pas de prescaler
0	1	0	Horloge /8
0	1	1	Horloge /32
1	0	0	Horloge /64
1	0	1	Horloge /128
1	1	0	Horloge /256
1	1	1	Horloge /1024

Tableau 4.8 Configuration de CS bits

Mode	WGM22	WGM21	WGM20	TOP	Descriptions
0	0	0	0	0xFF	Normale

1	0	0	1	0xFF	PWM Phase corrélée
2	0	1	0	OCRA	CTC
3	0	1	1	0xFF	Rapide PWM
4	1	0	0	-	Réservée
5	1	0	1	OCR0A	PWM Phase corrélée
6	1	1	0	-	Réservée
7	1	1	1	OCR0A	Rapide PWM

Tableau 4.9 Forme d'onde d'un bit de mode générateur

Nous utilisons le TIMER/2, parce qu'il est le meilleur pour notre application, qu'il contient deux sortie OC2A et OC2B synchronisée, et leur bande des fréquences est très large part à port le TIMER0 parce qu'il contient tous les valeurs de prescaler.

Cette TIMER est exécutable dans 4 modes :

1. Rapide PWM avec le max haut (0xFF).
2. Rapide PWM avec variable haut (OCR2A).
3. Phase correcte PWM mode avec le max haut (0XFF).
4. Phase correcte PWM mode avec variable haut (OCR2A).

Nous chosions le deuxième mode parce que nous utilisant (OCR2B) pour varie le rapport cyclique avec une résistance variable.

Pour calculer la fréquence de PWM, on à l'équation suivant :

$$PWM_{fréquence} = Horloge_{vitesse} / [Prescaler_{valeur} \times (1 + TOP_{valeur})] \quad (4.1)$$

```
int x ;
int v ;
void setup() {
  pinMode (3, OUTPUT) ;
  pinMode (A0, INPUT) ;
  TCCR2A = 0 ; //reset the registre
  TCCR2B = 0 ; //reset the registre
  TCCR2A = 0b10100011 ; // fast pwm mode
  TCCR2B = 0b00000001 ; // no prescaler and WGM02 is 1
  //OCR2A = 100 ;
  OCR2B = 128 ; // control value |
}
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  v = analogRead(A0) ;
  x = v/5;
  OCR2B = x ; // control value
  delay (100);
}
```

Figure 4.18 Code PWM dans ARDUINO IDE

Dans ce concept de réalisation nous utilisons une résistance variable pour varier la valeur du rapport cyclique à partir de l'Arduino, maintenant on explique la relation entre les deux suivants :

Les portes analogiques de l'Arduino lisent des valeurs entre [0 - 1023], c.-à-d. des tensions entre [0 V - 5 V], Alors le rapport cyclique est entre [0 - 255].

Alors :
$$x = v / 5 \tag{4.2}$$

V : la tension de l'entrée analogique de l'Arduino.

X : la valeur de rapport cyclique de sortie.

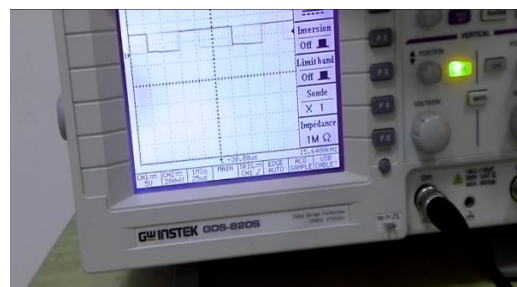
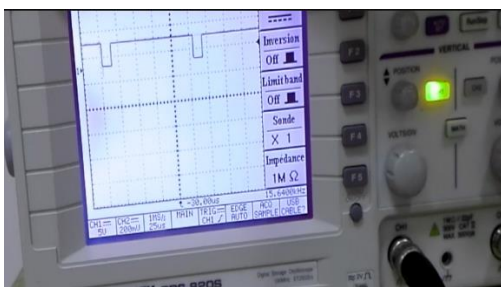
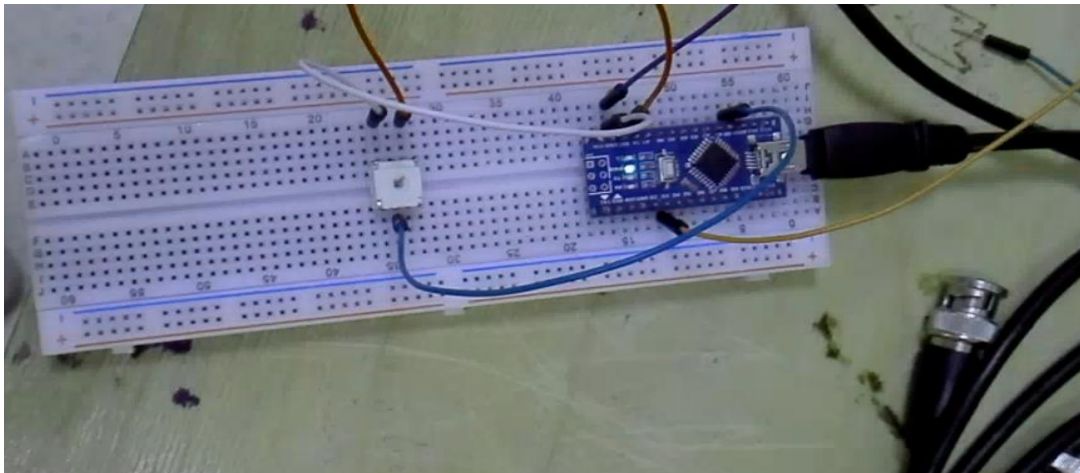
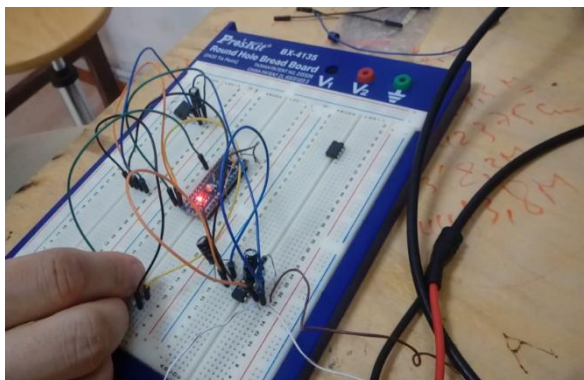


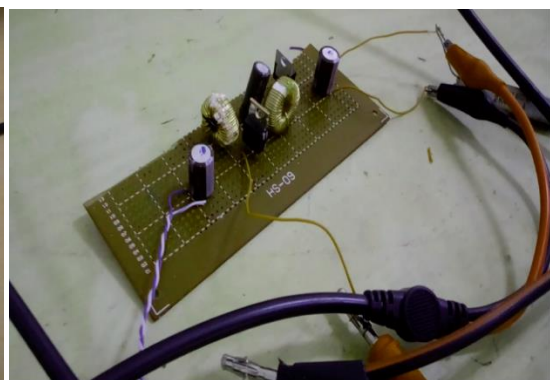
Figure 4.19. Résultat de réalisation PWM dans oscilloscope.

4.4.2. Réalisation de la partie puissance avec l'Arduino :

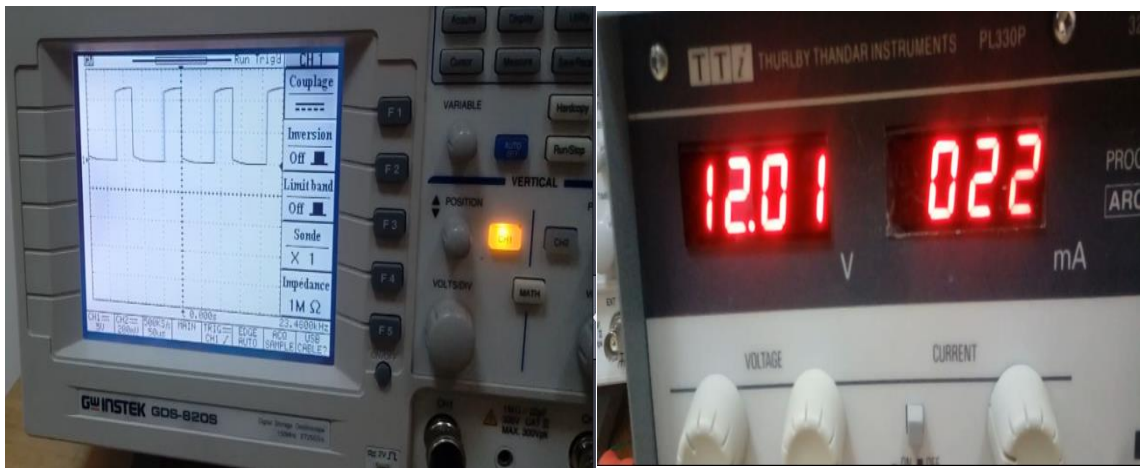
Après le test pratique de PWM avec l'ARDUINO, On branche le avec le convertisseur SEPIC et une alimentation de 18v mais il y a un problème de saturation de tension de la gâchette de MOSFET, c.à.d. la tension qui est arrivé à partir de l'ARDUINO est 5v mais la gâchette supporté minimum 12v, Alors en utilisant un driver IR2112 (12v-20v) pour résoudre cette problème.



Générateur PWM avec driver (12 V)



SEPIC alimenter avec PWM



Sortie de driver

Alimentation de driver

Figure 4.20. Réalisation du convertisseur SEPIC avec l'Arduino et le driver.

4.5. Implémentation des capteurs (tension et courant) :

4.5.1. Capteur de courant ACS-712 :

Pour mesurer le courant d'un module PV dans différentes conditions nous avons utilisé le capteur de courant à effet-hall qui est capable de mesurer les deux modes de tension DC/AC.

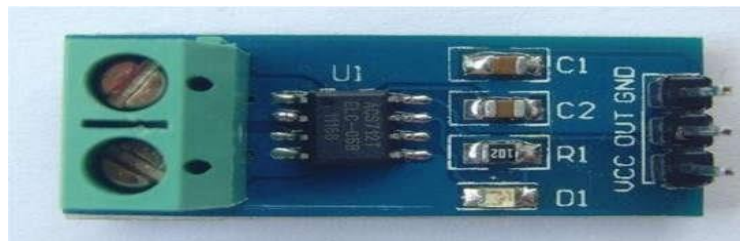


Figure 4.21. ACS-712 hall effect capteur de courant

Ce capteur mesure le courant à partir de la tension de l'entrée, parce que il y a une relation linéaire entre eux, qui :

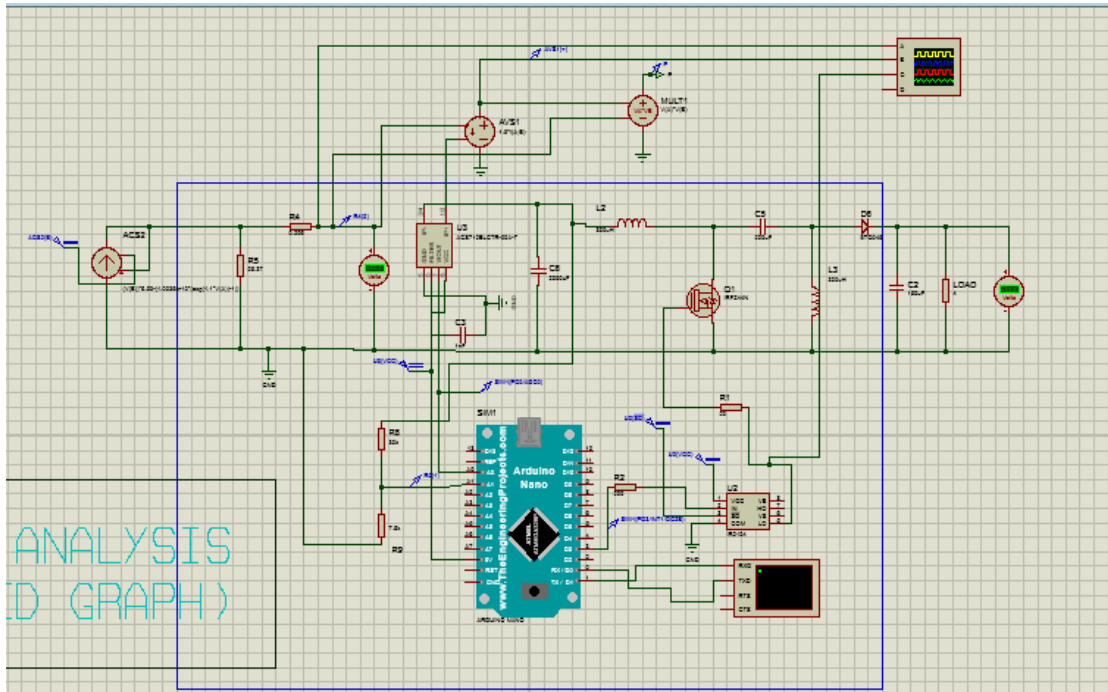
$$(I)V = (V(I) - 2.5V) / 0.1 \quad (4.3)$$

4.5.2. Capteur de tension :

En utilisant le module standard de capteur de tension (diviseur de tension), qui contient deux résistances.

$R1 = 30 \text{ KOhm}$ et $R2 = 7.5 \text{ KOhm}$, c.à.d.

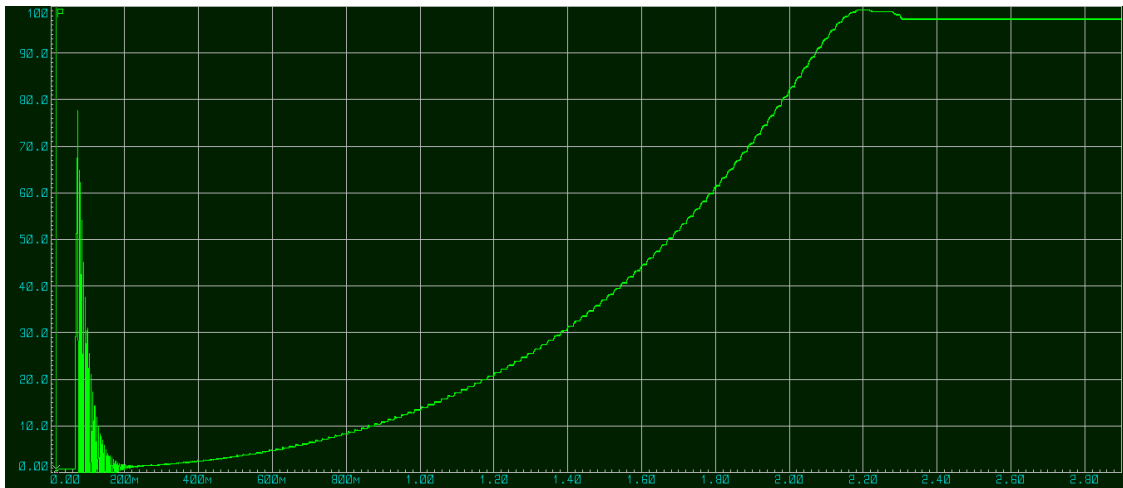
4.6. Simulation de schéma final avec les capteurs (tension et courant) :



Le figure (4.22) présente le schéma final de notre projet

```
Power : 91.64
Current: 4.69
voltage: 19.54
after changing the duty cycle
voltage : 19.54
Power : 91.60
Current: 4.66
voltage: 19.59
Pmax is reached: 91.25
after changing the duty cycle
voltage : 19.59
Power : 91.25
Current: 4.57
voltage: 19.68
Pmax is reached: 89.96
after changing the duty cycle
voltage : 19.68
Power : 89.96
Current: 4.59
voltage: 19.68
```

Résultat dans Virtual terminal



Puissance en fonction de temps

Figure 4.23. Résultats de la commande MPPT du SEPIC

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un système photovoltaïque (MPPT, SEPIC PV), ce système à été simulé dans deux environnement MATLAB/SIMULINK, et PROTUS

On a abouti à MATLAB/SIMULINK pour dimensionner les déferente composants et pour voir la pré-simulation de notre projet.

On a abouti le logicielle PROTUS pour voir la faisabilité de notre prototype avec la carte Arduino nano.

D'après les résultats obtenus de la simulation sous Proteus et des tests pratiques, on remarque que le système PV transfert la puissance maximale fournie par le module PV à la charge.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Notre travail présenté porte sur l'analyse d'une étude et simulation d'un système **PV** adapté par une commande MPPT simple qui assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le module PV dans **MATLAB/SIMULINK** et dans **proteus** à base d'une carte **Arduino**, et même temps nous avons réalisé un prototype de convertisseurs **SEPIC** et testé avec l'**Arduino** pour générer un signal **PWM**.

Dans un premier temps, nous avons étudié le générateur PV pour différentes puissances générées (cellules, modules et champs) et nous avons fait la modélisation des modules PV ainsi ses paramètres électriques.

Nous avons étudié, dans un deuxième temps, quelques types des convertisseurs **DC-DC** qui utilisés dans les systèmes PV et en fait de comparaison entre les convertisseurs, et en choisi le convertisseur **SEPIC** avec des arguments dans ce travail. Ainsi, en présentant le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes **MPPT**. Nous avons étudié la commande perturbation et observation qui est utilisée dans ce mémoire cause de sa simplicité, et son exigence seulement des mesures de tension et du courant du module PV.

Ensuite, nous avons donné une généralité sur la carte Arduino utilisées pour commander les systèmes PV dans logiciel proteus, en particulier la carte Arduino nano. L'Arduino est une famille de cartes électronique à microcontrôleur open-source basées sur une interface entrée/sortie simple et sur un environnement de développement proche du **langage C**.

Arduino nano possède toutes les fonctionnalités d'un microcontrôleur classique en plus de sa simplicité d'utilisation. Elle offre plusieurs pins (broches) d'entrée/sortie numérique dont six pouvant générer des PWM (*Pulse width Modulation*) et permet aussi de mesurer des grandeurs analogiques grâce à ces six entrées analogiques. Cette carte Arduino peut aussi s'alimenter et communiquer avec un ordinateur grâce à son port USB.

Nous présentons aussi l'étude des différents composants du système PV, tel que le module **PV VICTRON-100W-12V**, le convertisseur **SEPIC**, le capteur de courant et le capteur de tension, la carte Arduino nano comme interface entre le bloc de commande et l'afficheur **LCD** pour présenter les résultats de la simulation et des tests pratiques.

Finalement, nous avons fait une simulation sous Proteus du système PV à base d'une carte Arduino nano. D'après les résultats obtenus de la simulation sous Proteus et des tests pratiques, nous remarquons que le système PV transfère la puissance.

Références Bibliographiques

- [1] L. Protin, S. Astier, “convertisseurs photovoltaïques”, Techniques de l’ingénieur, Ref D3360 – Vol DA, <http://ti.idm.fr>
- [2] Gilbert M. Masters. Renewable and Efficient Electric Power Systems. John Wiley & Sons.2004
- [3] Corinne ALONSO, “Contribution à l’optimisation, la gestion et le traitement de l’énergie”, Mémoire pour l’habilitation à diriger les recherches, *UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III*
- [4] M.F. Shraif, “Optimisation et mesure de chaîne de conversion d’énergie photovoltaïque en énergie électrique” Thèse de l’université Paul Sabatier, LAAS/CNRS, N ° 02569,Toulouse-France, 2002.
- [5] A.Benayad, « modélisation des panneaux photovoltaïques par les méthodes de soft computing. » mémoire de magister, département de génie électrique, université de béjaia 2011.
- [6] Alain Bilbao « leurreta réalisation de commandes mppt numériques » diplôme ingénieur technique industriel, septembre 2006
- [7] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud Et I. Youm « étude et modélisation d’un générateur photovoltaïque » revue des énergies renouvelables vol. 11 n°3 sénégal, 2008
- [8] Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [9] R. Khezzar et al. « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d’un module photovoltaïque ». revue des Energie Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379-388, 2010.
- [10] C. Cabal, " Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque.", Thèse Doctorat de l’Université Toulouse 3 Paul Sabatier, France, 2008.
- [11] G.J. Yu, Y.S. Jung, J.Y. Choi, G.S. Kim, “A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms”, *Sol. Energy* 76 (2004), pp. 455-463.
- [12] G. Escobar, S. Pettersson, C.N.M. Ho, M. Karppanen, T. Pulli, « PV current

sensorless MPPT for a single-phase PV inverter», *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society IECON*,2011, pp. 3906 – 3911.

[13] A.A. Ghassami, S.M. Sadeghzadeh, A. Soleimani, “A high performance maximum power point tracker for PV Systems”, *Electr. Power Energy Syst.* 53 (2013), pp. 237-243.

[14] E. Mamarelis, G. Petrone , G. Spagnuolo, ‘A two-steps algorithm improving the P&O steady state MPPT efficiency’, *Applied Energy* 113 (2014), pp. 414–421

[15] W. Xiao, N. Ozog, and W. G. Dunford, “Topology Study of Photovoltaic Interface for Maximum Power Point Tracking”, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, vol. 54, n°. 3, 2007, pp. 1696-1704

[16] T. Kitano, M. Matsui, D. Xu “Power sensor-less MPPT control scheme utilizing power balance at DC link-system design to ensure stability and response”, *27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON '01*, vol. 2, 29 Nov.-2 Dec. 2001, pp.1309–1314.

[17] D. Shmilovitz, “On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters”, *IEE Proceedings Electric Power Applications*, vol. 152, n° 2, mars 2005, pp. 239-248.

[18] H. Bin, " Convertisseur continu-continu à rapport de transformation élevé pour applications pile à combustible", Thèse Doctorat de l’institut national polytechnique de Lorraine, France, 2009.

[19]JEAN-PAUL FERRIEUX ET FRANÇOIS FOREST : « Alimentation à découpage, Convertisseurs à résonance, Principes-composants-modélisation », Dunod, 3^{ième} édition, 1999.

[20]WÜRTH ELEKTRONIK, « Trilogy of magnetic », 4th extended and revised edition, 2009.

[21] M. L. Louazene, « Etude technico-économique d’un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla », Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2008.

[22] A. P. Bhatnagar, B. R. K. Nema, “Conventional and global maximum power point

- tracking techniques in photovoltaic applications: A review”, *J. Renew. Sustainable Energy* 5, 032701, pp. 1-23, 2013.
- [23] K. Ishaque, Z. Salam, “A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition”, *Renew Sustain Energy Rev*, vol. 19, 2013, pp. 475–88.
- [24] R. Faranda, S. Leva, “MPPT techniques for PV systems: Energetic and cost comparison”, *IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburgh, PA, 2008, pp. 1–6.
- [25] T. Esum, P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” *IEEE Trans. Energy Convers.* 22(2), 2007, pp. 439–449.
- [26] A. C. Pastor, "Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques", Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse (France), 29 septembre 2006.
- [27] Amarouayache Mohamed, « contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechnique option ,2014
- [28] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, france: dunod, 1999.
- [29] M. Angel Cid Pastor, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », docteur de l'institut national des sciences appliquées de toulouse, 2006
- [30] M. Boukli-Hacene Omar « conception et réalisation d'une génération photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique » magister en automatique productique informatique 2010/2011.
- [31] A. F. Boehinger, “Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1968, pp. 102-111.
- [32] J.B.R. Enslin, M.S. Wolf, D.B. Snyman, W. Swiegers, "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44 (6), Dec. 1997, pp.769 -773.
- [33] H. Al-Atrash, I. Batarseh, K. Rustom, “Statistical modeling of DSP-based hill-climbing MPPT algorithms in noisy environments”, *Conference and Exposition in Twentieth Annual IEEE Conference in Applied Power Electronics, APEC 2005*, vol. 3, pp. 1773–1777.
- [34] W. Xiao, W. Dunford, “A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems”, *IEEE 35th annual Conference in Power electronics*

specialists, PESC 04. 2004, vol. 3, pp. 1957–1963.

[35] T. Tafticht, "Analyse Et Commande D'un Système Hybride Photovoltaïque Eolien", *Thèse de Doctorat de L'université Du Québec A Trois-Rivières (Canada), décembre 2006.*

[36] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hshino, and M. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions", *Proc. Inst. Elect. Eng. vol. 142, n°1, Jan. 1995, pp. 59-64.*

[37] R. CHAPARDE 'Commande électronique des machines à courant continu' Eyrolles 1975.

[38] <https://www.instructables.com/id/Arduino-PV-MPPT-Solar-Charger>

[39] <https://sites.google.com/site/qeewiki/books/avr-guide/pwm-on-the-atmega328>

Résumé

Dans ce travail, on a étudié et on a analysé la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande MPPT spécifique « perturbation et observation » assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV à partir de l'utilisation d'un convertisseur SEPIC. Dans notre analyse, on a conçu un système PV où le générateur PV, dans les conditions standards de test (CST), une puissance crête de 100W, un courant optimal de 5.56 A et une tension optimale de 18V. Les résultats de simulation obtenus sous **MATLAB/SIMULINK** et sous Proteus avec l'utilisation du programme d'Arduino.

Mots clés : Système PV - Commande MPPT - Modélisation – Simulation-Arduino - **MATLAB/SIMULINK** - Proteus.

Abstract

In this work, we studied and analyzed the simulation of the PV operation, which was adapted by the MPPT control and disturbance while ensuring the maximum power of the photovoltaic generator is maintained using the SEPIC transformer, which has the characteristic of maintaining the maximum power, which controlled from MPPT algorithm. In our analysis, we designed a PV system where the photovoltaic generator under standard test conditions (CST) has a maximum power of 100W, the optimum current of 5.56A and the optimum voltage of 18V. Simulation results obtained in **MATLAB / SIMULINK** and in Proteus with the use of the Arduino IDE program.

Keywords: PV system - MPPT control - Modeling - Simulation - .Arduino - **MATLAB / SIMULINK** – Proteus.

ملخص

في هذا العمل قمنا بدراسة وتحليل المحاكاة للتشغيل الكهربائي للنظام الكهروضوئي (PV) الذي تم تكييفه بواسطة "اضطراب وملاحظة" خاص بالتحكم MPPT مع ضمان استمرار الحد الأقصى من الطاقة التي يوفرها مولد الكهروضوئي وذلك باستخدام محول SEPIC الذي لديه الخاصية التي تسمح بالمحافظة على استمرار الحد الأقصى من الطاقة انطلاقاً من تحكم MPPT. في تحليلنا، قمنا بتصميم نظام PV حيث يكون للمولد الكهروضوئي في ظل ظروف الاختبار القياسية (CST)، طاقة قصوى تبلغ 100W، والتيار الأمثل 5.56 A والجهد الأمثل من 18V. نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها في **MATLAB / SIMULINK** وفي Proteus مع استخدام برنامج

Arduino IDE

الكلمات المفتاحية: نظام PV - تحكم MPPT - النمذجة - المحاكاة - **Arduino** - **MATLAB / SIMULINK** - Proteus

SIMULINK - Proteus