

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique  
Département d'Electronique

**Mémoire de Fin d'Etude de  
MASTER ACADEMIQUE**  
domaine : Sciences et technologies  
Filière : Génie électrique  
Spécialité : Microélectronique

***Présenté par***

AMOKRANE Anissa

BENGUASMIA Zoubida

Thème

***Etude et simulation d'un régulateur de charge MPPT  
pour système photovoltaïque autonome***

**Promoteur :**

Mr. Rachid ZIRMI

*Mémoire soutenu publiquement le .... /09/2018 devant le jury composé de :*

**Année :2017-2018**

# *Remerciements*

*Avant tout nous tenons nos remerciements à notre Dieu de nos avoir Donné la force et le courage.*

*A la suite Nous tenons à remercier vivement Mr. R.ZIRMI notre promoteur qui a fourni des efforts énormes, par ses Informations ses conseils et ses encouragements.*

*Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour L'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance Et tous les professeurs de département de Génie Électrique et informatique*

*A tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie prenante de ce travail.*

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

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique  
Département d'Electronique

**Mémoire de Fin d'Etude de  
MASTER ACADEMIQUE**  
domaine : Sciences et technologies  
Filière : Génie électrique  
Spécialité : Microélectronique

***Présenté par***

AMOKRANE Anissa

BENGUASMIA Zoubida

Thème

***Etude et simulation d'un régulateur de charge MPPT  
pour système photovoltaïque autonome***

**Promoteur :**

Mr. Rachid ZIRMI

*Mémoire soutenu publiquement le .... /09/2018 devant le jury composé de :*

**Année :2017-2018**

## *Dédicaces*

*Avant tous, je remercie Dieu le tout puissant de  
m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser  
ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la mémoire de mon père que DIEU garde  
son âme dans son vaste paradis*

*A ma très chère maman, que dieu la garde et la  
protège pour son soutien moral et financier, pour  
son encouragement et sacrifices qu'elle a enduré.*

*a tous mes frères et sœur*

*A tout familles BENGUESMIA, BELKESSAM*

*Aux chers amis (es)*

*A tous ce que j'aime et qui m'aiment*

*A tous mes collègues d'études surtout ceux de Microélectronique.*

*Loubida*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*Mes très chers parents préférés  
dans cet univers, pour l'amour  
et l'affection qu'ils m'ont offert,  
pour les conseils fructueux qui m'ont été prodigués,  
grand merci et que Dieu vous garde pour moi.*

*Mes chères sœurs  
Farida, Hassina, Malika, Nadia,  
pour leur encouragement*

*Mes très chers frères  
Meziane, Damel et a Aghilas  
Et toute ma famille*

*Mes amis et collègues  
qui m'on apporté leur soutien  
moral et intellectuel  
tout au long de ma démarche.*

*A tous mon remerciement, mon respect et ma gratitude*

*Anissa*

# Table des matières

Table des matières .....	iii
Nomenclature .....	iv
Liste des Abréviations .....	vi
Sommaire	
Introduction générale .....	1

## Chapitre I : Etude de système photovoltaïque

I.1.Introduction .....	3
I.2.Structure système photovoltaïque .....	3
I.2.1. Le Générateur photovoltaïque.....	3
a. La cellule .....	3
b. Groupement de Cellules Photovoltaïques .....	9
c. Caractéristique I/V.....	12
d. Rendement d'un GPV .....	13
I-2-2-Le convertisseur DC/DC (régulateur) .....	13
a. Fonctions de régulateur .....	14
b. Types de régulateurs.....	14
I.2.3. Système de stockage et la charge .....	15
I.2.4. La charge .....	16
I.3.Conclusion .....	16

## Chapitre II : Convertisseur MPPT

II.1. Introduction.....	17
II.2. Convertisseurs DC-DC .....	17
II.3. Types de convertisseurs.....	17

II.3.1. Convertisseur survolteur .....	18
II.3.2. Convertisseur dévolteur .....	20
II.3.3. Convertisseur dévolteur-survolteur .....	21
II.4. Principe de la MPPT .....	23
II.5. La commande MPPT .....	24
II.5.1. Principe du PWM .....	25
II.5.2. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche .....	26
II.5.3. Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée .....	26
II.6. Poursuite du point de puissance maximale .....	27
II.7. Conclusion .....	31

### **Chapitre III : Etude et simulation du système PV**

III.1. Introduction .....	32
III.2. L'outil OrCad PSpice .....	32
III.3. Système photovoltaïque choisis .....	32
III.4. Structure du système photovoltaïque .....	33
III.4.1. Structure générateur photovoltaïque .....	33
III.4. 2. Structure du convertisseur buck .....	34
III.4. 3. Structure de la commande MPPT.....	35
III.4.4. Structure du circuit CCB .....	36
III.5. Etude du système PV dans Pspice .....	37
III.6. Résultats de simulation .....	38
III.7. Conclusion .....	41
Conclusion générale .....	42

Références bibliographiques

Annexes

$I_{ph}$	Photo- courant
$I_{cell}$	Courant délivré par la cellule
$V_{cell}$	Tension aux bornes de la cellule
$I_{load}$	Courant à travers la charge
$I_D$	Courant à travers la diode
$V_{load}$	Tension aux bornes de la charge
$I_{cell}$	Courant fourni par la cellule [A]
$V_{cell}$	Tension aux bornes de la cellule [ V]
$Q$	Charge électrique élémentaire [ $1.6.10^{-19}$ As]
$k$	Constante de Boltzmann [ $8.5.10^{-5}$ eV / $k=1.381.10^{-23}$ J/K ]
$T$	Température absolue de la cellule [ K]
$I_S$	Courant de saturation de la jonction non éclairée [A]
$n$	Facteur d'idéalité de la jonction
$R_p$	Résistance parallèle.
$R_s$	Résistance série.
$P_{max}$	Puissance maximale fournie par le module en STC.
$S_m$	Surface du module
$P_{sol}$	Puissance du rayonnement solaire
$I_{sc}$	Courant de court-circuit (short-circuit)
$V_{th}$	Tension thermique
$I_{ssc}$	Courant de court-circuit d'un module
$V_{soc}$	Tension de court-circuit d'un module
$\eta_{cell}$	Rendement de la cellule
$\eta_{connexion}$	Rendement de la connexion
$\eta_{diode}$	Rendement de la diode
$D$	Rapport cyclique
$I_{opt}$	Courant optimal
$V_r$	Une tension de référence
$V_p$	L'erreur entre une fraction

GPV	Générateur photovoltaïque.
PV	Photovoltaïque.
PPT	Le point de puissance maximal.
MPPT	Maximum power point tracking.
$P_{MAX}$	Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque
$V_{PV}$	La tension aux bornes du GPV.
$I_{PV}$	Le courant que peut délivrer un GPV.
$P_{PV}$	La puissance d'un GPV.
$I_{cel}$	La tension aux bornes de la cellule PV.
$V_{opt}$ et $I_{opt}$	Tension et Courants optimaux correspondant à
$\eta$	Le rendement d'un module PV.
DC	Courant continu.
AC	Courant alternative.
$\alpha$	Le rapport cyclique.
PWM	Pulse with modulation.
MOSFT	Métal Oxide Silicon Field Effet Transistor.
P&O	Perturbation et Observation.
IGBTS	Transistors bipolaires à gâchette isolée.
GTO	Thyristor extinction par la gâchette (Gate Turn-off).
STC	Standard Test Conditions.

### CHAPITRE I

Figure (I.1) : Schéma d'une Structure système photovoltaïque

Figure (I.2) : Structure d'une cellule photovoltaïque

Figure (I.3) : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Figure (I.4) : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale connectée une charge

Figure (I.5) : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle connectée à une charge

Figure (I.6) : Courbes I(V) d'une cellule de 100cm<sup>2</sup> pour plusieurs irradiations sous une température de 25°C

Figure (I.7) : Courbes I(V) d'un module à différentes températures pour une irradiance fixe

Figure (I.8) : Représentation d'un module photovoltaïque pouvant constituer un GPV

Figure (I.9) : Groupement en série de cellules PV

Figure (I.10) : Caractéristique I/V d'un groupement en série des cellules PV

Figure (I.11) : Groupement en parallèle de cellules PV

Figure (I.12): Caractéristique I/V d'un groupement en parallèle

Figure (I.13): Groupement mixte de cellules PV

Figure (I.14) : Courbe  $i = f(v)$  d'un panneau photovoltaïque

Figure (I.15) : Courbe de puissance d'un module PV

Figure (I.16) : Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge.

### CHAPITRE II

Figure (II.1) : Schéma de principe d'un survolteur

Figure (II.2) : Schémas équivalents du convertisseur survolteur (a) : K fermé ;(b) : ouvert

Figure (II.3) : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur dévolteur

Figure (II.4) : Schémas équivalents du convertisseur dévolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert

Figure (II.5) : Schéma de base d'un dévolteur / survolteur

Figure (II.6) : Schémas équivalents du Convertisseur dévolteur-survolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert

Figure (II. 7) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal

Figure (II.8): Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT

Figure (II.9): Principe du PWM (DC/DC)

Figure (II.10) : Organigramme de l'algorithme P&O

Figure (II.11) : Organigramme de l'algorithme d'incrémentement de l'inductance

Figure (II.12): Principe de la méthode à contre réaction de tension avec référence

Figure (II.13): Organigramme de l'algorithme à tension de référence fixe.

### CHAPITRE III

Figure (III.1) : schéma synoptique de système PV adapté par un convertisseur Buck, une commande MPPT muni du circuit CCB

*Figure (III.3) : Circuit électrique réel du module PV*

Figure (III.2) : Structure du convertisseur d'énergie buck (dévolteur)

Figure(III.4): Schéma synoptique de la commande MPPT (CFT)

Figure (III.5) : Schéma synoptique du circuit CCB.

Figure (III.6) : Schéma du système photovoltaïque complet implanté dans Pspice

Figure (III.7) : Signaux générés par la commande MPPT ( $V_{s1}$ ) et par le circuit CCB qui commande le MOSFET ( $V_{s2}$ )

Figure (III.8) : Simulation dans Pspice des grandeurs électriques à l'entrée et à la sortie du convertisseur.

Tableau (II.1) : Différentes structures de convertisseurs statiques et leurs rendements.

Tableau (III.2) : Résistance  $R_{21}$  en fonction de la tension  $V_{PVO}$  lorsque  $R_{20} = 10 \text{ K}\Omega$

La demande sur l'énergie électrique ne cesse d'augmenter ces dernières années, dans ce sens il y a beaucoup de sources pour la produire mais il y a aussi des contraintes liées à sa production, tels que l'effet de pollution et de réchauffement climatique global...etc. Ces contraintes conduisent les recherches vers le développement des sources d'énergie renouvelables et non polluantes ; dont l'énergie solaire photovoltaïque représente certainement l'un des sources d'énergie renouvelable la plus adéquate.

L'énergie PV est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux PV composés des cellules PV ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi utilisable.

Les panneaux solaires, bien qu'ils soient en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles. C'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissances qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie. Une caractéristique électrique importante de ces panneaux est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé le point de puissance maximale (MPP), définie par une tension et un courant donnés, ce point se déplace en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, température, etc.). Ce rendement peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de poursuite du point de puissance maximale (dite technique MPPT). Cette technique fait appel à une interface entre le panneau et la charge qui est généralement un dispositif de conversion de puissance.

Dans les applications photovoltaïques (PV), le système PV doit présenter un rendement élevé, une commande MPPT, à bas coût, et d'un convertisseur DC/DC de type Buck (dévolteur) sont indispensables afin de minimiser ces pertes.

L'objectif principal de notre travail est l'étude d'un convertisseur DC/DC commandé par un circuit de avec MPPT permet d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque (GPV) et donc améliorer le rendement de la chaîne de conversion.

Dans ce travail, nous allons étudier puis nous simuler à l'aide du logiciel de simulation Pspice le fonctionnement d'un convertisseur avec MPPT dans un système PV, de moyennes puissances (100 W) dont la régulation de la puissance sera effectuée par une commande MPPT (CFT) muni d'un circuit (CCB) . Le rôle de la commande est d'une part de commander correctement l'interrupteur du convertisseur, et d'autre part de fixer une tension fixe optimale  $V_{opt}$  à la sortie du module PV.

Afin de mener à bien notre travail nous avons adopté la méthodologie suivante

- Dans le premier chapitre, nous présentons des notions générales sur le système photovoltaïque, tel que générateur photovoltaïque (GPV), le convertisseur DC/DC régulateur l'unité de stockage.
- Le deuxième chapitre, sera consacré à l'étude de convertisseur statistiques qui sera contrôlé par la commande MPPT, le principe de la recherche de point de puissance maximal, la classification des la commande MPPT et des études théoriques de quelques méthodes de recherche.

- Le troisième chapitre, présentera le convertisseur dévolteur (buck), la commande MPPT(CFT) tout en donnant les principaux résultats de simulation Pspice.
- Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

## I.1.Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de la cellule PV est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [1].

## I.2.Structure système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est généralement constitué d'un générateur PV, d'un convertisseur d'énergie, d'une unité de stockage (batteries). Pour la conversion de l'énergie solaire produite par les panneaux photovoltaïques, on utilise des convertisseurs pour réguler le niveau de la tension DC à la sortie du PV au niveau exigé par l'unité de stockage.



Figure (I.1) : schéma d'une Structure système photovoltaïque

### I.2.1.Le Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque permet de transformer l'énergie issue des photons en électricité, en utilisant le principe de l'effet photovoltaïque. Ce phénomène consiste à transformer la lumière en électricité.

#### a.La cellule PV

Les cellules photovoltaïques (photon : grain de lumière et volt : unité de tension) sont des composants électroniques à semi-conducteurs (généralement faites de silicium sous ses différentes formes). Elles convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité courant continu basse tension (effet photovoltaïque). Comme l'énergie lumineuse est le soleil, on parle alors de cellules solaires (Figure 2).

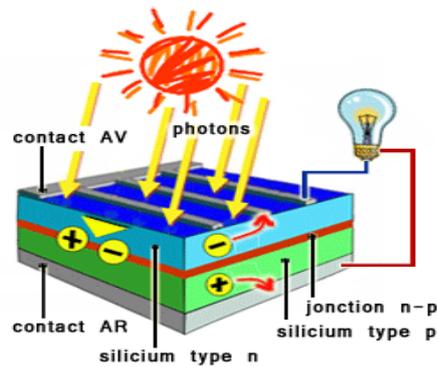
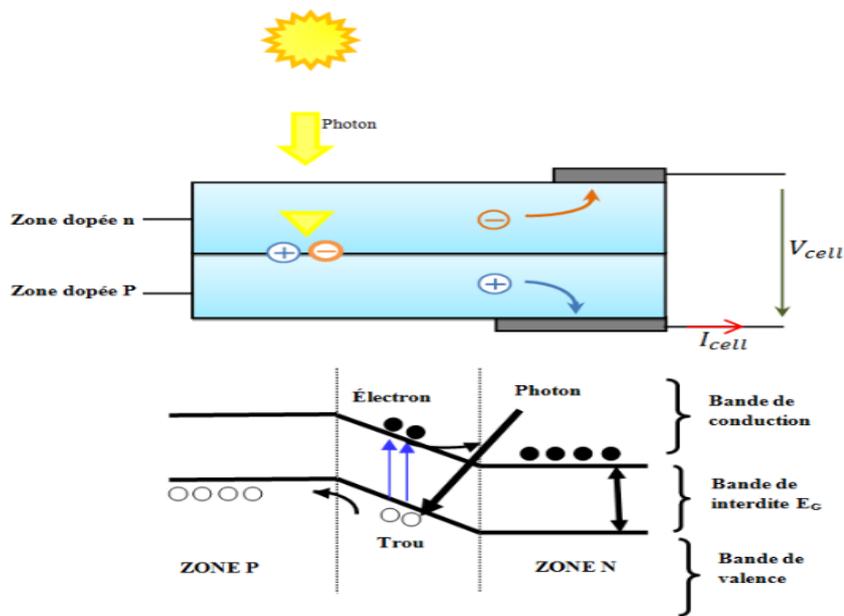


Figure (I.2) : Structure d'une cellule photovoltaïque [3]

• **Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque**

Lorsque cette cellule est éclairée, les photons de la lumière transmettent leurs énergies aux électrons du matériau. Si cette énergie est supérieure à la bande interdite du matériau, alors les électrons de celui-ci passent de la bande de valence à la bande de conduction et il y a création d'une paire électron-trou. La connexion d'une charge à cette cellule va créer un courant proportionnel à l'éclairement [2].



Figure(I.3) : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire [11]

• **Les différents types de cellules solaires photovoltaïques:**

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quelque soit le type, le rendement reste assez faible. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [3]:

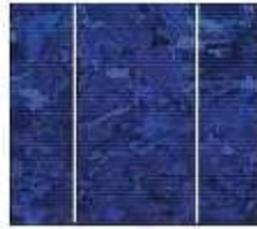
### ➤ Les cellules monocristallines

Elles ont le meilleur rendement. Cependant, elles coûtent trop chers dues à leur fabrication complexe.



### ➤ Les cellules poly cristallines :

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible.



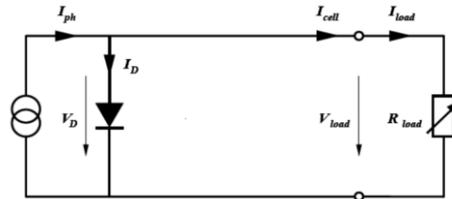
### ➤ Les cellules amorphes

Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisés couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires. L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible.



- Modélisation de la cellule photovoltaïque
  - Cellule PV idéale - Modèle simple

Une cellule PV idéale peut être représentée par le circuit électrique équivalent illustré sur la figure (I.4). Ce circuit est constitué d'une diode qui représente la jonction P-N de la cellule, et d'une source de courant constant dont l'amplitude du courant dépend de l'intensité du rayonnement [4]. Une résistance ajustable est connectée à la cellule en guise de charge. L'utilisation du circuit électrique équivalent permet de modéliser les caractéristiques ou le comportement de la cellule PV.



Figure(I.4) : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale connectée à une charge

Avec :

$I_{ph}$ : photo-courant

$I_{cell}$ : courant délivré par la cellule

$V_{cell}$ : tension aux bornes de la cellule

$I_{load}$ : courant à travers la charge

$I_D$ : courant à travers la diode

$V_{load}$ : tension aux bornes de la charge

Le courant de la cellule PV idéale illuminée est donné par (Loi de Kirchoff)

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{qV_{cell}}{nkT}} - 1 \right) \quad (I.1)$$

avec :

$I_{cell}$  : courant fourni par la cellule [A]

$V_{cell}$  : tension aux bornes de la cellule [V]

q: charge électrique élémentaire [  $1.6 \cdot 10^{-19} As$  ]

k : constante de Boltzmann [  $8.5 \cdot 10^{-5} eV / k = 1.381 \cdot 10^{-23} J/K$  ]

T : température absolue de la cellule [K]

$I_s$  : courant de saturation de la jonction non éclairée [A]

n : facteur d'idéalité de la jonction

Le courant de saturation  $I_s$  caractérise le phénomène de diffusion des porteurs minoritaires dans la zone de déplétion.

Lorsque les bornes du circuit sont court circuité ( $R_{load}= 0$ ), la tension de sortie est nulle, d'après L'équation (I.1), le courant fournit par la cellule est à son maximum. Ce courant est appelé courant de court-circuit  $I_{sc}$ (short-circuit)

$$I_{sc} = I_{ph} \tag{I.2}$$

Pour une charge infiniment grande (circuit ouvert), le courant de sortie est nul et la tension aux bornes de la cellule est maximale. Cette tension est appelée tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ (open-circuit). A partir de l'équation (I.1), on peut écrire :

$$V_{th} = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) = V_{th} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \tag{I.3}$$

$$V_{th} = \frac{nkT}{q} \quad , \text{ est appelée tension thermique.}$$

$V_{oc}$  est déterminé par les propriétés du semi-conducteur, car il dépend de  $I_s$  qui lui-même dépend de la densité de courant de saturation du matériau utilisé.

➤ **Cellule PV réelle - Modèle précis**

En ce qui concerne le comportement d'une cellule solaire réelle, deux résistances parasites sont prises en considération pour une description plus exacte [5] [6] [7] [8].

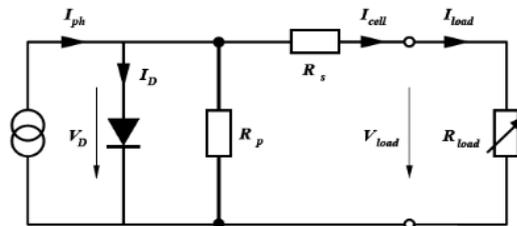


Figure (I.5) : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle connectée à une charge

Avec :

$R_p$  résistance parallèle caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dû à la non idéalité de la jonction P-N et des impuretés près de la jonction.

$R_s$  résistance série représentant les diverses résistances de contact et la résistance du semi-conducteur.

En pratique, la résistance parallèle  $R_p$  est très importante (de l'ordre du méga Ohm) et la résistance série  $R_s$  est très faible (de l'ordre de quelques milli-ohms).

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - \frac{V_D}{R_p} \tag{I.4}$$

$$I_D = I_{ph} \left( e^{\frac{V_D}{V_{th}}} - 1 \right) \tag{I.5}$$

$$V_{cell} = V_{cell} + R_s I_{cell} \tag{I.6}$$

D'où :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{(V_{cell} + R_s I_{cell})}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \tag{I.7}$$

• **Effets des Variations Climatiques sur la Cellule Photovoltaïque**

➤ **Variations de l'énergie incidente (ensoleillement)**

Le courant produit par la cellule dépend de sa surface ainsi que de l'irradiation. La (Figure I.6) montre la caractéristique I(V) d'une cellule de 100 cm<sup>2</sup> maintenue à une température constante de 25°C, pour différentes irradiations.

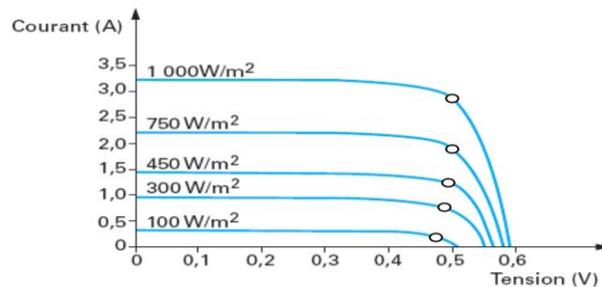


Figure (I.6) : Courbes I(V) d'une cellule de 100 cm<sup>2</sup> pour plusieurs irradiations sous une température de 25°C [3]

➤ **Variations de la température**

La température des cellules est un paramètre qui modifie également les caractéristiques électriques d'un module PV. La tension dite de circuit ouvert  $V_{CO}$  dépend fortement de cette grandeur. Cela va alors modifier la puissance ainsi que le point où se trouve le PPM. La (Figure I.7) représente les courbes I(V) d'un module avec une irradiation constante de 1000W/m<sup>2</sup> mais une température variant de 10°C à 70°C. Dans cette plage de fonctionnement, la baisse de la puissance due à la hausse de la température du module.

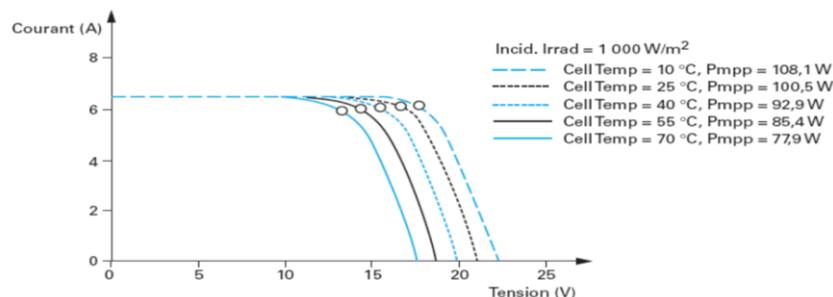


Figure (I.7) : Courbes I(V) d'un module à différentes températures pour une irradiance fixe

**• Rendement Photovoltaïque**

Le rendement d'une cellule est le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité. Il caractérise ces composants et définit leur performance.

Le rendement est directement lié au «band gap» et dépend du type de semi-conducteur utilisé dans la fabrication de la cellule tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe). La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède une caractéristique d'être non toxique, son rendement théorique maximum est de 44 %. ce dernier n'est pas le meilleur matériau, car a un «band gap» est de 1.10 eV. Par rapport aux cellules solaires de type GaAs ont un «band gap» quasi optimal de 1.4 eV mais sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiale.

Les principales pertes sont dues à :

- une absorption incomplète des photons.
- les photons très énergétiques voient la part d'énergie supérieure perdue en chaleur.
- la réflexion optique à la surface des cellules, c'est la raison pour laquelle une couche anti reflet ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ...) est déposée à la surface des cellules.
- la grille en face avant ne favorise pas la transmission optique maximale du rayonnement solaire. Sa forme géométrique est cependant très optimisée par les constructeurs. Chez certains la grille est faite par laser pour en diminuer la surface.
- pertes dues à la résistance série (résistance de contact des deux grilles)

**b . Groupement des Cellules Photovoltaïques**

Un groupement de plusieurs cellules forme un sous réseau alors qu'un générateur photovoltaïque (GPV) est constitué en général de 2 à 4 sous réseaux, chacun de 12 à 24 cellules en série (Figure I.8). Des diodes de protection sont ajoutées pour assurer une bonne utilisation du module quelles que soient les conditions. Elles permettent d'éviter de perdre toute la puissance du panneau en cas de défaut ou d'ombrage total d'une cellule en court-circuitant le groupement défaillant. Le sous réseau en défaut est alors perdu, mais les autres sous réseaux peuvent continuer à produire de la puissance.

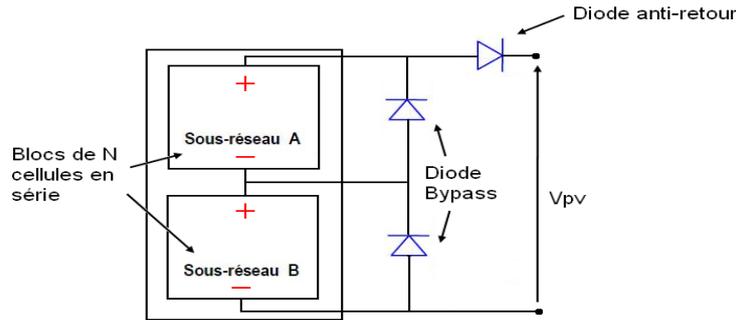


Figure (I.8) : Représentation d'un module photovoltaïque pouvant constituer un GPV

• Groupement en série

La tension générée par une cellule solaire est limitée (de l'ordre de 0.5 V). Pour produire plus de puissance, des cellules solaires identiques sont assemblées pour former un module solaire (ou panneau photovoltaïque). La plupart des modules solaires photovoltaïques sont composés de 36 ou 72 cellules connectées 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 l'addition des tensions élémentaires de chaque cellule. Le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert d'une association série de  $N_s$  cellules sont donnés par [19] .

- le courant de court-circuit d'un module reste le même

$$I_{scc} = I_{sc} \tag{I.8}$$

- la tension de circuit ouvert d'un module devient

$$V_{soc} = N_s V_{oc} \tag{I.9}$$

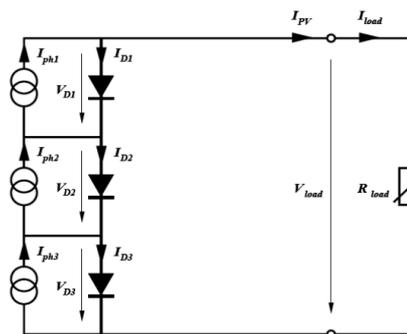


Figure (I.9): Groupement en série de cellules PV

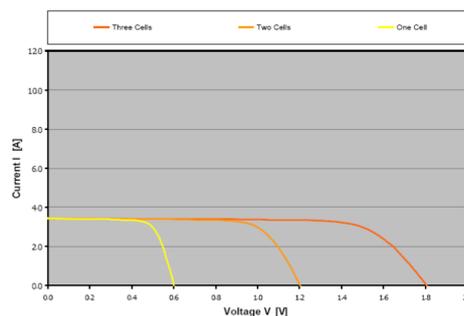


Figure (I.10) : Caractéristique I/V d'un groupement en série des cellules PV

• Groupement en parallèle

Par association de  $N_p$  cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des

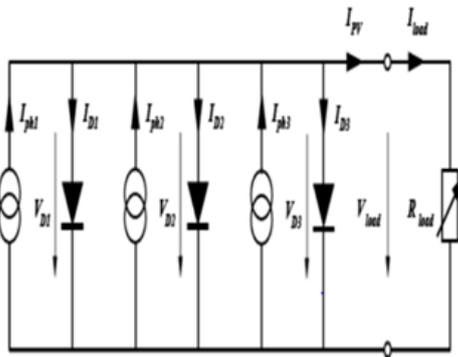
cellules. Le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert d'une association parallèle de  $N_p$  cellules sont donnés par :

- le courant de court-circuit d'un module devient

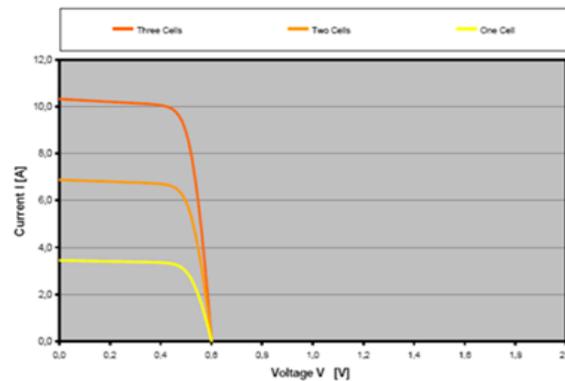
$$I_{SSC} = N_p I_{SC} \tag{I.10}$$

- la tension de circuit ouvert d'un module reste la même

$$V_{SOC} = V_{OC} \tag{I.11}$$



Figure(I.11):Groupement en parallèle de cellules PV



Figure(I.12):Caractéristique I/V d'un groupement en parallèle

• **Groupement mixte**

Les cellules solaires sont souvent branchées en série pour former des chaînes ou modules, plusieurs modules sont connectés en parallèle pour former un panneau.

Les diodes en noir sont des diodes bypass. Les diodes en blanc sont des diodes de blocage, elles sont branchées en série avec les modules. Ces diodes accomplissent une fonction de blocage, elles permettent d'éviter le retour du courant dans les modules, empêchant ainsi les modules de devenir des charges. Ceci survient lorsqu'un module est sous l'ombre, lorsqu'il y a un court-circuit ou lorsqu'un module est endommagé. Dans les systèmes qui intègrent des batteries,des diodes de blocage entre les panneaux et les batteries sont utilisées pour éviter que ces dernières ne se déchargent dans les panneaux pendant la nuit [4].

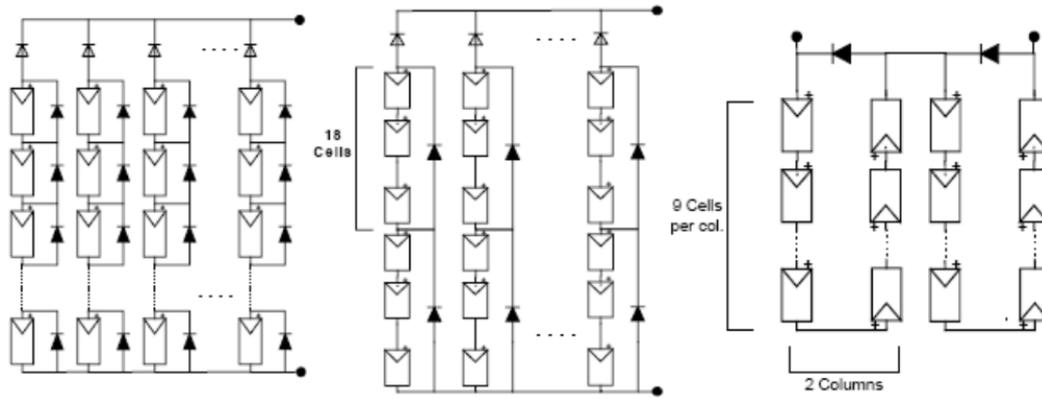
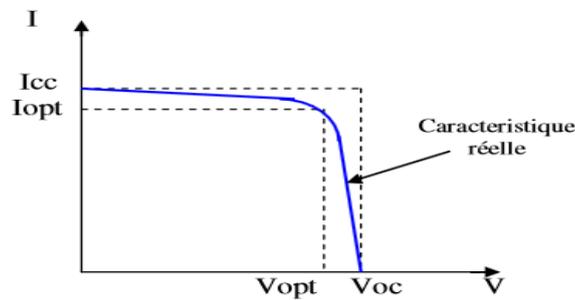


Figure (I.13): Groupement mixte de cellules PV

**c.Caractéristique I/V**

Le module PV produit une puissance à un point appelé point de fonctionnement qui appartient à la courbe caractéristique. Les coordonnées de ce point sont la tension  $V_{MPP}$  et le courant  $I_{MPP}$  de fonctionnement. Le MPP correspond au point de fonctionnement pour lequel le GPV opère avec un maximum de rendement et de puissance .

La figure (I.14) représente , la caractéristique (I/V) d'un générateur photovoltaïque typique non linéaire dans des conditions constantes d'irradiation et de température :



Figure(I.14) : Courbe  $i = f(v)$  d'un panneau photovoltaïque

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Le panneau photovoltaïque est donc considéré comme une source de puissance. On s'aperçoit alors l'existence d'un point  $P_m$  où la puissance se trouve être maximale. Il est sans aucun doute intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée, seule une charge dont la caractéristique passe par le point  $P_m$  permettra d'extraire la puissance maximale. Certains régulateurs solaires réalisent donc une adaptation d'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point de puissance maximale, c'est ce que l'on appelle le Maximum Power Point Tracking (MPPT).

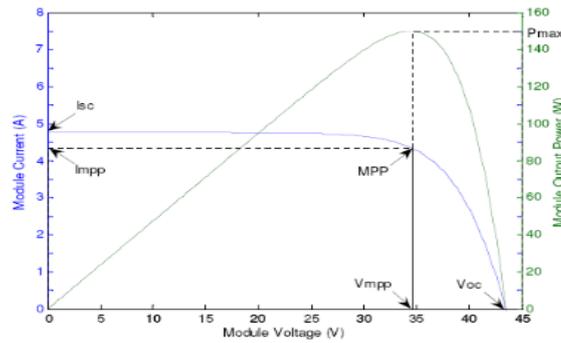


Figure (I.15) : Courbe de puissance d'un module PV

La figure (I.15) présente un exemple de la caractéristique (P/V) et (I/V) d'un module PV. Elle illustre l'importance de faire fonctionner le système au MPP pour tirer le maximum de la puissance disponible [8]

**d.Rendement d'un GPV**

En général, le rendement d'un module PV, fourni par le fabricant, est donné dans les STC par la relation :

$$\eta = \frac{P_{max}}{S_m P_{sol}} = \frac{I_{mpp} V_{mpp}}{S_m P_{sol}} \tag{I.12}$$

avec :  $P_{max}$ : Puissance maximale fournie par le module en STC.

$S_m$  :Surface du module

$P_{sol}$ : Puissance du rayonnement solaire

En réalité, le rendement du module  $\eta$  est le rendement d'une cellule  $\eta_{cellule}$  diminué des pertes dues aux connexions ( $\eta_{connexion}$ ) des cellules entre elles, à la transparence des matériaux d'encapsulation  $\eta_{encapsulation}$  et éventuellement à la chute de tension dans la diode de blocage ( $\eta_{diode}$ ) lorsqu'il faut protéger le module contre une éventuelle décharge nocturne de la batterie lorsque celle-ci existe. Il est donné par :

$$\eta = \eta_{cellule} \cdot \eta_{connexion} \cdot \eta_{diode} \tag{I.13}$$

**I.2.2. Le convertisseur DC/DC (régulateur)**

Le régulateur de charge solaire est un composant indispensable d'un système solaire photovoltaïque autonome. Il est mis comme adaptateur dans le système solaire entre les panneaux solaires et le parc à batterie.

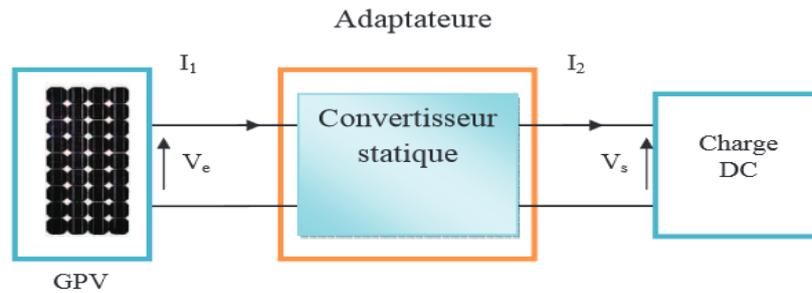


Figure (I.16) : Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge

### a. Fonctions de régulateur

Le régulateur de charge principalement sert avant tout à contrôler l'état de charge de la batterie. Il existe plusieurs valeurs limites correspondant chacune à un type de protection différent : surcharge, décharge profonde, température de fonctionnement, court-circuit, etc.

Les nouvelles générations de régulateurs, sont de plus en plus perfectionnées et proposent des fonctionnalités plus nombreuses et de plus en plus évoluées.

Un régulateur de charge solaire remplit 2 fonctions principales :

- Sa première fonction est qu'il protège la batterie contre la surcharge ; il coupe le courant allant du panneau solaire vers la batterie quand la batterie est pleinement chargée; Il est donc limiteur de charge.
- Sa deuxième fonction est qu'il protège la batterie contre la décharge profonde ; quand les utilisations sont branchées sur la sortie du régulateur de charge, il déconnecte les utilisations quand la batterie descend en dessous d'un seuil critique d'état de charge de la batterie; Il est donc limiteur de décharge.

### B .Types de régulateurs photovoltaïques

On peut distinguer deux grandes familles de régulateurs, si on s'intéresse particulièrement à leur structure, ceux où la connexion est directe entre le module photovoltaïque et la batterie, et ceux où la connexion comporte un étage intermédiaire d'adaptation d'impédance. Dans ces deux types de famille on peut citer :

- **Les régulateur série / shunt**

Ces régulateurs à connexion directe doivent intégrer les fonctionnalités de charge, décharge et sécurité citées précédemment. Deux types de régulateurs sont appropriés à ces exigences : le régulateur série et le régulateur shunt.

La différence majeure entre les deux structures est le moyen de déconnecter l'énergie produite par le module photovoltaïque de la batterie. Dans la majorité des régulateurs, les interrupteurs sont des MOSFET.

- **Le régulateur « PWM » (Pulse Width Modulation)**

Certains régulateurs réalisent une commande PWM, le rapport cyclique variant selon l'énergie à fournir à la batterie afin de réaliser une charge à tension constante. Celui-ci est un peu plus subtil que le « tout ou rien » : Les régulateurs solaires traditionnels intégrant la technologie PWM relient les panneaux solaires aux batteries. Dans cette utilisation directe, la tension de sortie des panneaux est réduite à la tension nominale des batteries.

- **Le régulateur « MPPT »**

Le régulateur MPPT est un convertisseur qui optimise en permanence les paramètres électriques de fonctionnement entre les systèmes suivants :

- Le système photovoltaïque (constitue de un ou plusieurs panneaux solaires)
- Le dispositif batterie (compose d'une ou plusieurs batteries)

Il calcule alors le niveau de puissance maximum que le panneau peut délivrer, et la batterie est capable de recevoir, à partir de cette valeur de puissance, il détermine la tension la plus adaptée afin de fournir une intensité optimum pour la batterie.

La puissance est égale au produit de la tension et du courant, ainsi, si la tension est réduite, le courant augmente nécessairement pour maintenir le ratio entrée/sortie égal. Pour un rendement de 100% : Puissance d'Entrée = Puissance de Sortie.

Le régulateur de charge MPPT permet une plus grande souplesse au niveau du choix des panneaux. En effet, tous les types de module photovoltaïque peuvent être utilisés du moment que l'on reste dans les tolérances de tension (V) et de courant (A) du régulateur.

### **I-2-3-Système de stockage**

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conditions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales [10] :

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou mauvais temps par exemple).
- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celle fournies par le générateur PV.

Il existe plusieurs types de stockage dans le système PV, les puissances rencontrées sont inférieures au MW, le seul stockage d'énergie électrique possible est le stockage électrochimique. Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans le système photovoltaïque sont [11] :

- Les batterie au plomb acide qui sont la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité.
- les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale [12].

#### **I.2.4.La charge [13]**

La charge et l'équipement électrique alimenté par le système, pouvant être de type continu comme des équipements de télécommunication, le pompage d'eau, ou de type alternatif dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur.

### **I-3-Conclusion**

Ce chapitre est consacré à la présentation des différents composants d'un système photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque. En suite on fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur les convertisseurs DC-DC et leur commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

## II.1. Introduction

La puissance délivrée par un GPV dépend fortement du niveau d'ensoleillement, de la température des cellules, la courbe caractéristique présente un point de puissance maximale MPP (Maximum Power Point). Un convertisseur MPPT (Maximum Power Point Tracker) est un système de conversion de puissance muni d'une commande permettant d'extraire le maximum de puissance que le GPV peut fournir. Cette commande elle peut être numérique ou analogique. son principe de fonctionnement est basé sur la variation de rapport cyclique  $\alpha$  de convertisseur statique (CS), à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie de panneau PV.

Dans ce chapitre, nous présentons quelques types des convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes PV. Comme le convertisseur dévolteur, le convertisseur survolteur et le convertisseur mixte (dévolteur-survolteur). Puis la classification des circuits de commande avec MPPT (analogique et numérique).

## II.2. Convertisseurs DC-DC

Un convertisseur électronique DC/DC (dans le cadre du PV) a pour rôle de faire l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est fait en maintenant le PF sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.).

Si les pertes internes PL du convertisseur sont négligeables, alors les puissances d'entrée et de sortie sont égales. Dans ce qui suit, le principe de fonctionnement de quelques types de convertisseurs DC/DC est décrit.

## II.3. Types de convertisseurs

Il y a plusieurs types de convertisseurs. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie soit isolée ou non isolée.

- Concernant, les topologies isolées, ils emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues sont le Flyback, en demi-pont et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté [II. 1]. [14].

- Concernant, les topologies non isolées, ils ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Ces topologies sont classées en trois catégories :

- Elévateurs (Boost)
- Abaisseurs (Buck)
- Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost)

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau.

La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost, le Cuk, et le Sepic. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC. [15].

### II.3.1. Convertisseur survolteur

Le convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « Boost ». Il est utilisé pour convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. Son schéma de principe est présenté sur la figure (II.1) [16].

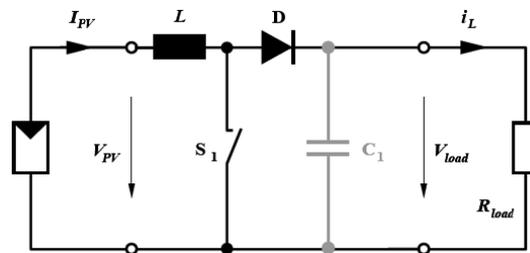


Figure (II.1) : Schéma de principe d'un survolteur

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du convertisseur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. La figure (II.2) représente les deux schémas équivalents du convertisseur survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements [16].

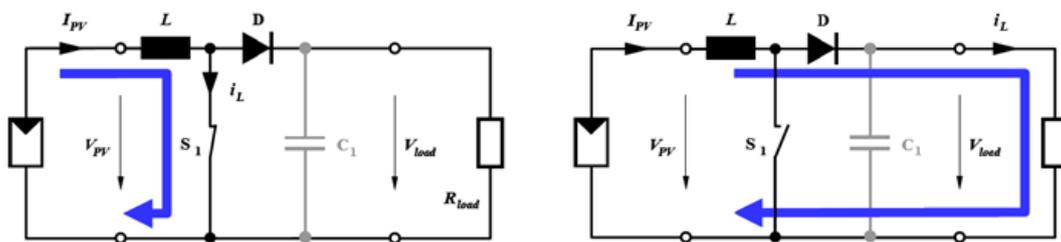


Figure (II.2) : Schémas équivalents du convertisseur survolteur  
(a) : K fermé ;(b) : ouvert

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement, on aura les deux systèmes d'équations suivantes :

Pour la première période  $dT_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1} = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2} = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = -v_i(t) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Pour la deuxième période  $(1-d) T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_i(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période  $T_s$ , on utilise généralement l'expression suivante [16], [17].

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{ds}{dtDT_s} dT_s + \frac{dx}{dt(1-D)T_s} (1-D)T_s \quad (\text{II.3})$$

Où  $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$  est la valeur moyenne de la dérivée de  $x$  sur une période . Cette relation est valide Si  $\frac{ds}{dtDT_s}$  et  $\frac{dx}{dt(1-D)T_s}$  sont constants sur les périodes  $dT_s$  et respectivement  $(1-D)T_s$  .

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.1) et (II.2), on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur.

$$\begin{cases} i_l(t) = i_i(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_0(t) = (1-d)i_l - c_2 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ v_i(t) = l \frac{di_l}{dt} = (1-d)v_0 \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations devient :

$$\begin{cases} i_0 = (1-d)i_1 \\ i_i = i_1 \\ V_i = (1-d)V_0 \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Le rapport de conversion est défini comme étant le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée comme suit [16], [17] :

$$M = \frac{V_0}{V_i} = \frac{d}{1-d} \quad (\text{II.6})$$

Donc le boost survolteur est bien élévateur de tension.

II.3.2. Convertisseur dévolteur

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom « Buck ». Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure. La figure (II.3) représente le schéma de principe du convertisseur dévolteur [16], [18].

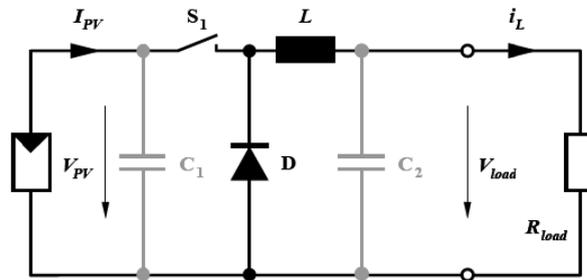


Figure (II.3) : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur dévolteur

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du convertisseur dévolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. La figure (2.4) représente les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur pour les deux cycles deux fonctionnements [16], [17].

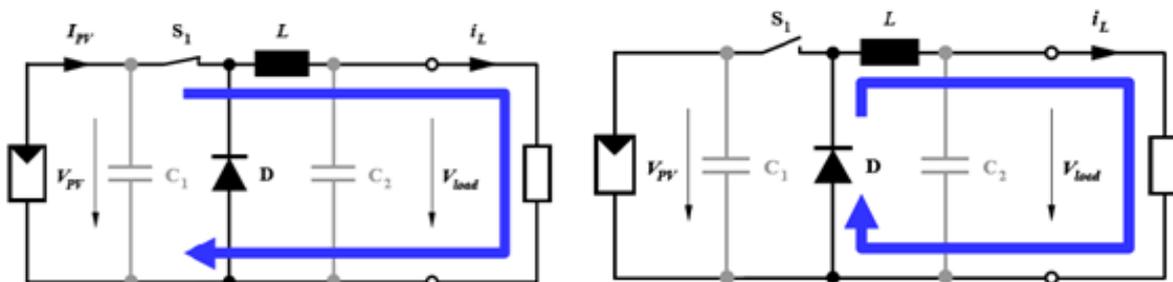


Figure (II.4) : Schémas équivalents du convertisseur dévolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert

Comme pour le convertisseur survolteur, en appliquant les lois de Kirchoff sur les deux circuits de la figure (II.4), on obtient les systèmes d'équations suivants :

Pour la première période dTs :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{cases} \quad (II.7)$$

Pour la deuxième période (1-d) Ts :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = -v_0(t) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.7) et (II.8), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur.

$$\begin{cases} i_0(t) = i_L(t) - c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ i_L(t) = \frac{1}{d} (i_l(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt}) \\ v_i(t) = \frac{1}{d} (L \frac{di_L(t)}{dt} + v_0(t)) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations devient :

$$\begin{cases} i_0 = di_l \\ i_0 = i_l \\ dV_i = V_0 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Le rapport de conversion du convertisseur dévolteur est donné par [16], [17] :

$$M = \frac{V_0}{V_i} = d \quad (\text{II.11})$$

Donc le buck série est bien abaisseur de tension.

### II.3.3. Convertisseur dévolteur-survolteur

Le convertisseur dévolteur-survolteur a acquis les caractéristiques et les propriétés électriques des deux types évoqués précédemment. Il présente donc une sortie d'un transformateur hybride (abaisseur/élevateur) pour une tension d'entrée/sortie continue, son schéma de base est illustré par la figure (II.6) [16], [17].

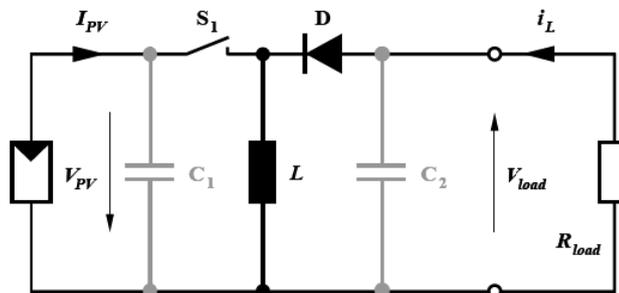


Figure (II.5) : Schéma de base d'un dévolteur / survolteur

La figure (II.6) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles de fonctionnement [16], [17].

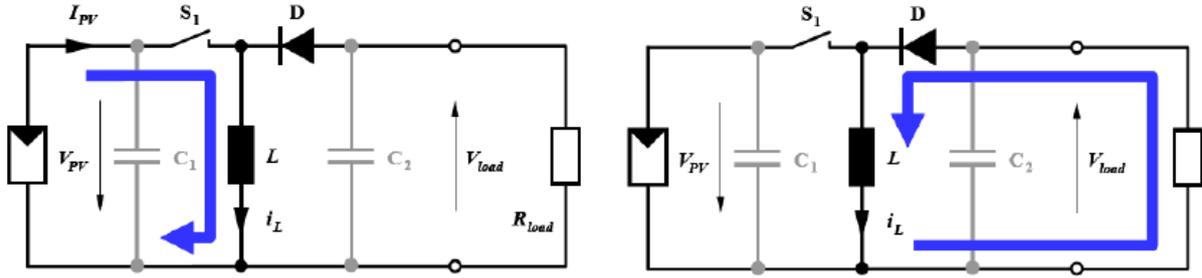


Figure (II.6) : Schémas équivalents du Convertisseur dévolteur-survolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert

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

Pour la première période  $d.T_s$ .

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_i(t) \end{cases} \quad (II.12)$$

Pour la deuxième période  $(1-d) T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_0(t) \end{cases} \quad (II.13)$$

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.12) et (II.13), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur.

$$\begin{cases} i_L(t) = \frac{1}{d} (i_i - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt}) \\ i_0(t) = -\frac{1}{d} (1-d)i_L - c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ V_i(t) = -\frac{1}{d} (1-d)V_0 + L \frac{di_L}{dt} \end{cases} \quad (II.14)$$

Comme précédemment, en annulant les dérivées des variables dynamiques, en remplaçant ces signaux par leurs grandeurs moyennes. Le système d'équations devient :

$$\begin{cases} I_0 = dI_L \\ I_0 = -(1-d)I_1 \\ dV_i = -(1-d)V_0 \end{cases} \quad (II.15)$$

A partir le système d'équations (II.15), on peut calculer le rapport de conversion du convertisseur dévolteur-survolteur [16], [17] :

$$M(d) = \frac{V_0}{V_i} = -\frac{d}{1-d} \quad (\text{II.16})$$

Donc ce buck-boost (abaisseur/élevateur) de tension.

#### • Rendement du convertisseur statique

Les convertisseurs Buck et Boost présentent un meilleur rendement. En effet, il existe d'autres configurations de convertisseur, mais dont le rendement est plus faible. Le tableau (I.1) ci dessus donne une idée sur le rendement de quelques convertisseurs connus. L'expression du rendement du convertisseur est donné par :

$$\eta_{conv} = \frac{P_{out}}{P} \quad (\text{I.17})$$

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

Tableau (II.1) : Différentes structures de convertisseurs statiques et leurs rendements.

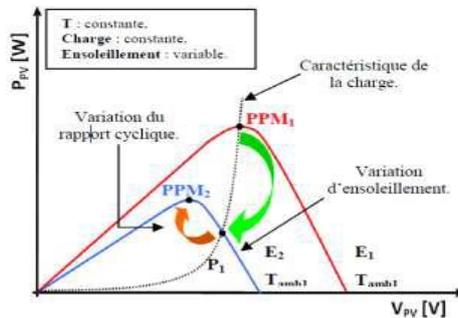
## II.4. Principe de la MPPT

Un MPPT, on anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge.

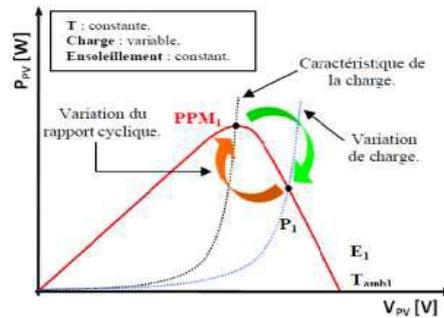
Un contrôleur MPPT est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique(CS) en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP.

La figure (II.7) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximale PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas -a-), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Pour une variation de charge (cas -b-), nous pouvons constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action de la commande. Un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas -c-). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du

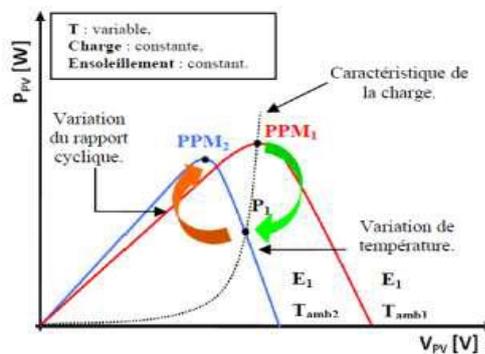
PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique.



a) suite à une variation d'ensoleillement,



b) suite à une variation de charge,



c) suite à une variation de température.

Figure II. 7 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal

## II.5. La commande MPPT

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique: analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes du MPPT plus ou moins complexes [28, 29]

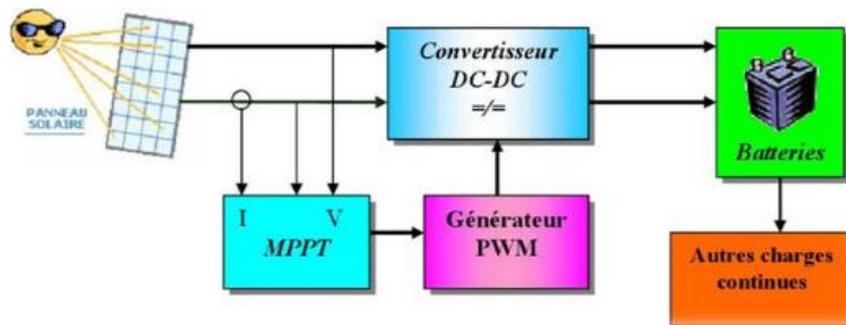


Figure (II.8): Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT

La figure (II.8) représente le schéma synoptique d'un système photovoltaïque. Le principe de la commande MPPT délivre l'action de contrôle appropriée afin de suivre le point de puissance maximale à chaque instant.

Dans les convertisseurs DC-DC, la tension de sortie doit être régulée pour être constamment égale à une tension de référence, du fait que la tension d'alimentation  $V$  et les caractéristiques de la charge peuvent varier.

### II.5.1. Principe du PWM

Une méthode pour réguler la tension de sortie  $V_0(t)$  afin d'obtenir une tension moyenne  $V_{0\text{ moy}}$  fixe consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de l'interrupteur  $D = \frac{T_{ON}}{T}$  sans modifier  $T$ .

Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM (Pulse Width Modulation).

Le signal de contrôle de l'interrupteur  $S$  devra être élaboré par comparaison entre le rapport cyclique  $D$  et une tension en dents de scie  $V_{DS}$  comme suit :

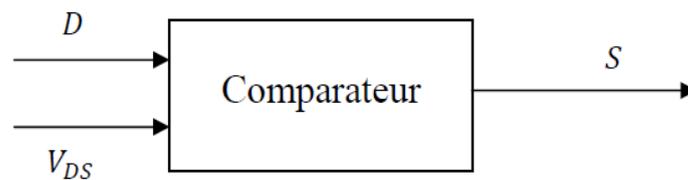


Figure (II.9) : Principe du PWM (DC/DC)

- Lorsque  $D > V_{DS}$  :  $S = 1$ , l'interrupteur  $S$  est commandé à la fermeture (état ON).
- Lorsque  $D < V_{DS}$  :  $S = 0$ , l'interrupteur  $S$  est commandé à l'ouverture (état OFF).

## II.5.2. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

- **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 basés sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisé 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. [5, 18]

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 (cette commande est utilisée dans notre travail).

- **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 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.

L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction

## II.5.3. Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée

- **Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du convertisseur :**

Ce type de commandes MPPT effectue une recherche du MPP selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. La commande nécessite alors la mesure du courant et de la tension en entrée du convertisseur. [19]

D'autres types de commandes MPPT sont basées sur la régulation du courant du GPV, supposant que ce dernier soit une image proportionnelle à la puissance. Ceci permet de s'approcher le plus proche possible du courant optimal  $I_{opt}$ . Ce type de commande ayant besoin d'un seul capteur est plus facile à mettre en œuvre et a un coût bas.

- **Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur :**

Dans la littérature, il existe des algorithmes basés sur les paramètres de sortie du CS. En effet, ce type utilise la tension et le courant de sortie du CS ou alors uniquement l'un des deux. Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de  $P_{MAX}$  est faite à travers le rendement du convertisseur. Plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, tous les systèmes avec un seul capteur sont imprécis.

La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial.

## II.6. Poursuite du point de puissance maximale

L'amélioration du rendement du système PV nécessite la maximisation de la puissance du générateur PV. Cela est possible si le point de fonctionnement est bien choisi en adaptant de la charge à la source de tension. Le convertisseur DC-DC jouera le rôle d'un adaptateur d'impédance assurant ainsi le fonctionnement au point optimal qui permet de produire la puissance maximale du générateur PV [14].

Donc, pour assurer le fonctionnement d'un GPV a son point de puissance maximale (PPM),des contrôleur MPPT sont utilisés ,ces contrôleurs sont destinés a minimiser l'erreur entre la Puissance de fonctionnement et puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques baser sur des méthode optimale)

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du module et la multiplication de ces deux grandeurs  $P_{PV} = I_{PV} * V_{PV}$  puis la régulation se réalise par la commande MPPT. Cette commande fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) à une valeur de référence constante, à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

Ces mesures sont utilisées par diverses méthodes qui poursuivent le MPP réel de la ragée. Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque PV , comme la méthode de perturbation et observation, l'algorithme d'incrémentation de l'inductance, la méthode du courant constant, et la méthode de la tension constante.

- **Méthode de perturbation et observation**

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension, ce qui engendre une variation de la puissance. une augmentation de la tension provoque un accroissement de la puissance, le point de fonctionnement se trouve à gauche du

PPM, si au contraire la puissance décroît, il est à droite. De la même manière, on peut faire un raisonnement pour une diminution de la tension.

En résumé, pour une perturbation de la tension, si la puissance augmente, la direction de la perturbation est maintenue. Si non, elle est inversée pour que le point de fonctionnement converge vers le PPM [20].

La figure (II.10) montre l'organigramme de la méthode perturbation et observation [14].

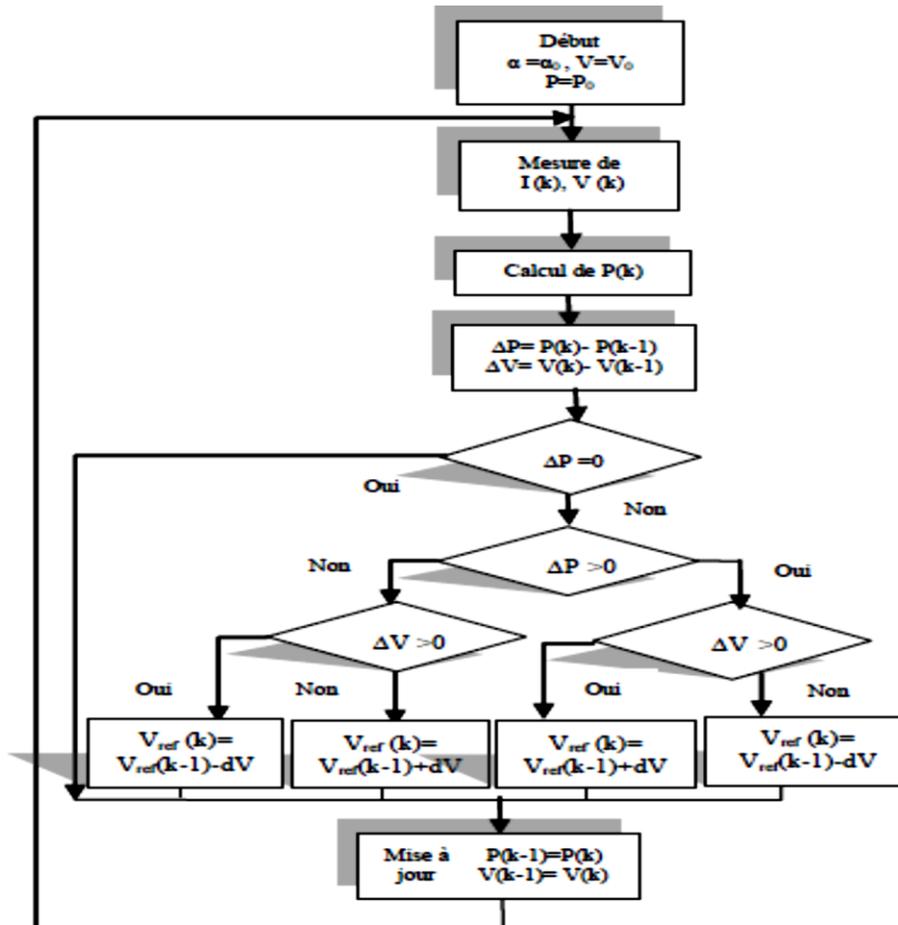


Figure (II.10) : Organigramme de l'algorithme P&O

• **Méthode d'incrémentation de l'inductance**

Cette commande se résulte de la recherche de la pente de la caractéristique Puissance- Tension au point de puissance maximale PPM par le calcul de la dérivée de la puissance du panneau PV par rapport à la tension qui est égale à zéro à ce point. La pente est positive à gauche du point MPP et négative à droite.

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = I * V \tag{II.18}$$

La dérivé partielle  $\frac{DP}{DV}$  est donnée par

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \tag{II.19}$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \tag{II.20}$$

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

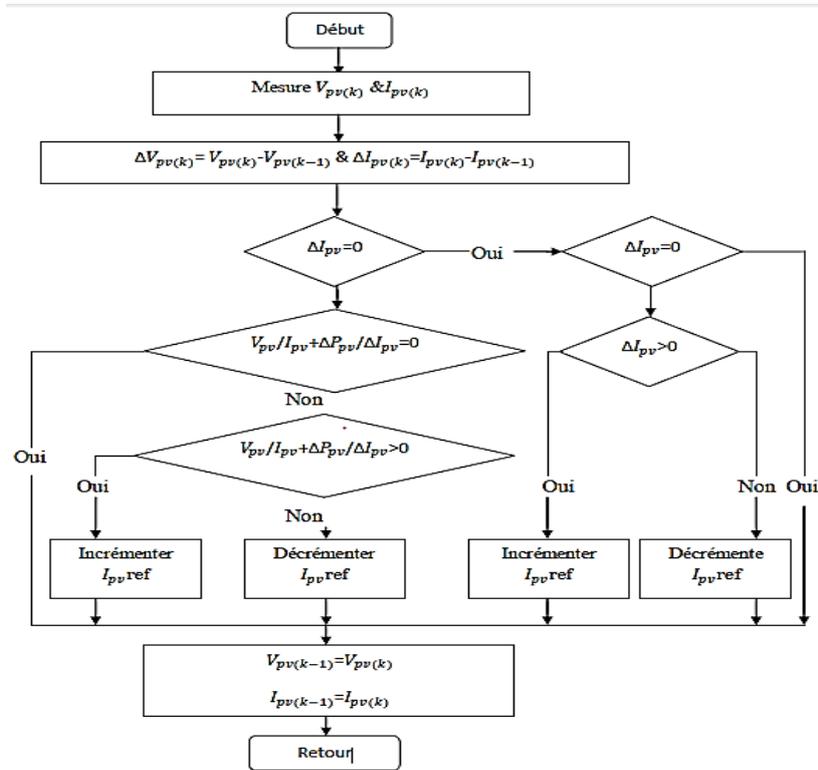


Figure (II.11) : Organigramme de l’algorithme d’incrément de l’inductance

Puisque la tension V du panneau est toujours positive, les relations (II.21) expliquent que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source G égale l’incrémentale conductance ΔG de la source avec un signe moins, et qu’elle est à gauche de ce point lorsque la conductance G est supérieure à l’incrémentale conductance ΔG et vice-versa, comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 \text{ si } \frac{I}{V} > - \frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} = 0 \text{ si } \frac{I}{V} = - \frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \text{ si } \frac{I}{V} < - \frac{dI}{dV} \end{cases} \tag{II.21}$$

La figure (II.11) présente l’organigramme de poursuite du PPM par la méthode d’incrément de l’inductance [16].

- **Méthode du courant constant**

Sous des conditions atmosphériques variables, le courant optimal est approximativement linéairement lié au courant de court-circuit du générateur PV. Il a été montré que [21], [20] :

$$I_{opt} = K_2 I_{cc} \quad (\text{II.22})$$

Où  $K_2$  est constante de proportionnalité. Comme pour la méthode de la tension constante, la constante  $K_2$  est déterminée pour le générateur PV utilisé.

La constante  $K_2$  est généralement comprise entre 0.78 et 0.92. La mesure du courant de court-circuit durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant de court-circuit à l'aide d'un capteur de courant. Ceci augmente le nombre de composants et donc le coût. La puissance de sortie est réduite lors de la mesure du courant de court-circuit. De plus, le MPP n'est jamais atteint [21].

- **Méthode de la tension constante**

Dans ce cas on se repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler cette erreur. la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures au long des périodes de l'année [22]. Dans cette méthode la tension de référence est prédéfinie. Elle correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points de puissances maximales relevées par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température.

Afin de générer le maximum de puissance on fait varier simplement les différents facteurs de pondération lors de la mise au point.

La figure (II.12) présente le schéma synoptique de cette méthode.

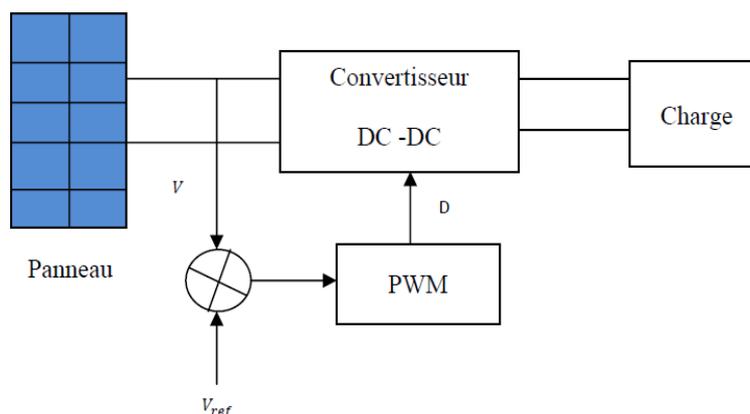


Figure II.12: Principe de la méthode à contre réaction de tension avec référence

Plusieurs études ont montré que le rapport entre la tension optimale et celle en circuit ouvert est approximativement constante. Ceci est la base du fonctionnement à tension constante qui peut être interprété par l'expression suivante [21], [20] :

$$V_{opt} = K_1 V_{oc} \tag{II.23}$$

Où  $K_1$  est une constante de proportionnalité. Bien que cette méthode soit extrêmement simple, il est difficile de choisir la valeur optimale de la constante.

D'après les résultats de recherches, le facteur  $K_1$  est généralement compris entre 0.71 et 0.78 [21]. Une fois que la constante  $K_1$  est déterminée, la tension optimale peut être calculée à l'aide de l'expression, avec la tension de circuit ouvert mesurée périodiquement en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance (circuit ouvert). La tension de circuit ouvert est alors prise comme tension de fonctionnement pour un certain temps, puis le cycle est répété.

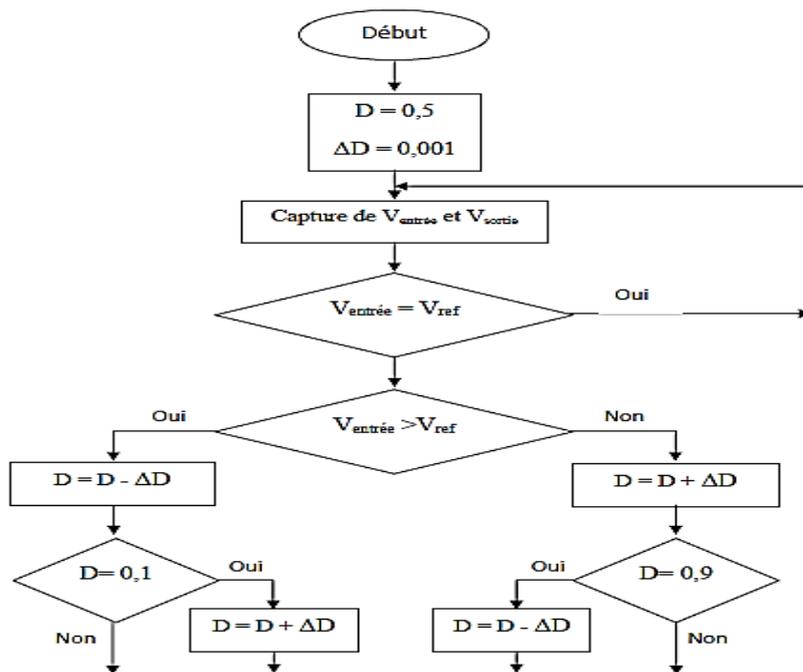


Figure (II.13) : Organigramme de l'algorithme à tension de référence fixe.

## II.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques convertisseurs continus-continus. Comme le convertisseur dévolteur, convertisseur survolteur et convertisseur dévolteur-survolteur. On a présenté aussi la commande MPPT des convertisseurs DC-DC pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement.

### III.1. Introduction

Afin d'assurer la poursuite de point de puissance maximal, on a exploité un convertisseur dévolteur « Buck », une commande MPPT « CFT » muni d'un circuit « CCB ».

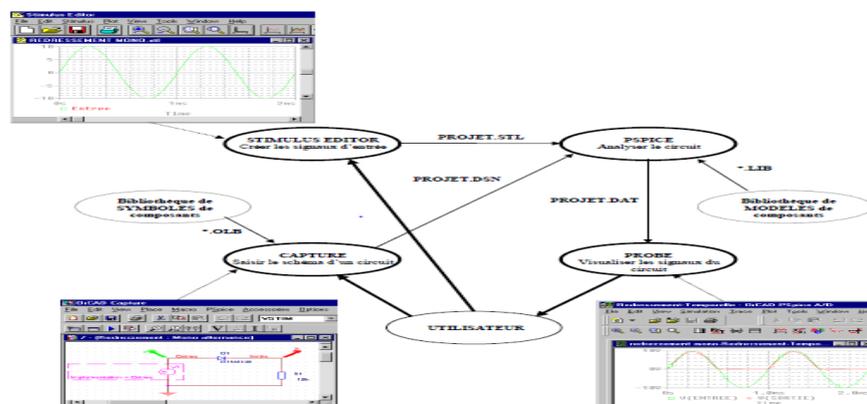
Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude d'un convertisseur MPPT ainsi que une simulation de système complet. Ce dernier comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur MPPT et une charge.

Le contrôle de la puissance et la simulation ont été effectués sous le logiciel OrCad PSpice.

### III.2. L'outil OrCad PSpice

OrCad PSpice est un logiciel de simulation mixte (analogique et/ou logique). La mise en œuvre d'une simulation repose principalement sur :

- une description des composants et des liaisons figurant sur un schéma, sous forme de fichier «Circuit»
- une description des signaux d'entrée appliqués sur le schéma sous forme de fichier « Stimulus ».
- une description des modèles de simulation des composants sous forme de fichiers « modèles ».



La visualisation des résultats de simulation s'effectue dans une partie du logiciel appelée «Probe ».

Les différentes étapes nécessaires pour mener à bien une simulation. Certaines actions s'effectuent :

- Sur le schéma, dans OrCad Capture.
- Dans l'éditeur de stimulus PSpice Stimulus Editor.
- Dans le simulateur OrCad PSpice.

### III.3. Système photovoltaïque choisis

La figure (III.1) représente le schéma synoptique d'un système photovoltaïque qui est constitué par:

- Un module photovoltaïque qui fournit une puissance de 46.5 W, sous une tension 13.8V et le courant de 3.1A
- Un convertisseur dévolteur (buck) fonctionne à une fréquence de 10 kHz [23]
- Une commande MPPT (CFT) qui fixe une tension au générateur photovoltaïque [30,31], muni d'un circuit de commande buck (CCB). Le circuit CCB a pour rôle de commander correctement l'interrupteur de puissance du convertisseur à l'ouverture et à la fermeture.
- Une charge qui peut être, soit une résistance de valeur inférieure à la valeur optimale de la résistance du module, soit une batterie supportant une tension de valeur inférieure à la tension optimale du module.

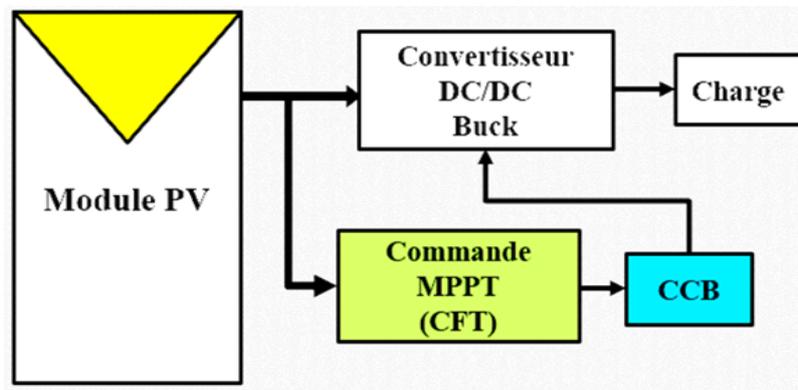


Figure (III.1) : Schéma synoptique de système PV adapté par un convertisseur Buck, une commande MPPT muni du circuit CCB

### III.4. Structure du système photovoltaïque

#### III.4.1. Structure du générateur photovoltaïque

On a représenté le module PV par le circuit équivalent (figure III.2) composé d'un générateur de courant qui produit  $I_{ph}$  et une diode parallèle, on a modalisé les perte de tension par une résistance en série  $R_s = 0.5\Omega$ , et le courant de fuite par une résistance en parallèle  $R_p = 1k\Omega$ .

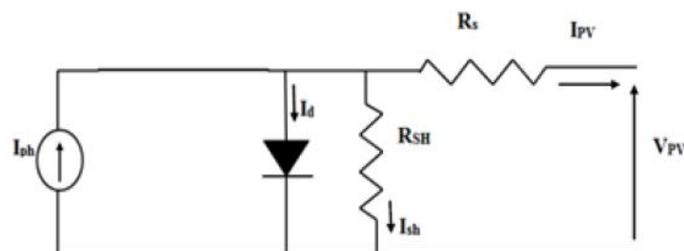


Figure (III.2) : Circuit électrique réel du module PV

Le courant généré par le module PV est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{pv} - I_d - I_{sh} \tag{III.1}$$

### III.4.2. Structure du convertisseur buck

La structure du convertisseur DC-DC de type buck est représentée sur la figure (III.3).

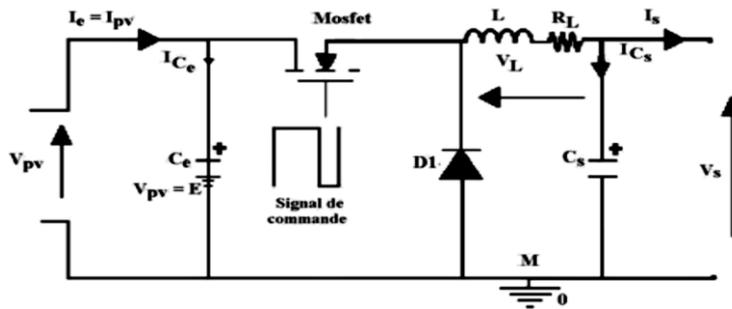


Figure (III.3) : Structure du convertisseur d'énergie buck (dévolteur)

- Les inductances et capacités (L, C<sub>e</sub>, C<sub>s</sub>), permettent essentiellement de filtrer le courant et de minimiser le taux d'ondulation de la tension à l'entrée et la sortie des convertisseurs [25.26.27].
- L'interrupteur du convertisseur est un transistor Mosfet de puissance (IRF 540). Ce transistor est choisi puisqu'il présente des performances satisfaisantes: faibles pertes de puissance par commutation et présentant une très faible résistance R<sub>Dson</sub> [24.23].
- La diode D est une diode 'roue libre' de type MUR8100. Elle permet d'évacuer l'énergie stockée dans la self pendant le blocage de l'interrupteur. une diode Schottky de puissance dont la chute à l'état passant est faible pour minimiser les pertes en conduction

### III.4.3. Structure de la commande MPPT

La régulation de la puissance fournie par le générateur PV est réalisée par la commande MPPT de type CFT (Fig. III.4) [24.23]. Cette commande régule la tension de sortie du générateur PV à une valeur de référence constante. Les différents blocs de cette commande sont:

- L'amplificateur de différence qui calcule l'erreur entre une fraction ( V<sub>p</sub>) de la

tension réelle ( $V_{PV}$ ) aux bornes du panneau PV et une tension de référence ( $V_r$ ) (nous avons choisi des paramètres pour que ( $V_r = 2.4$  V)). Les résistances R20 et R21 sont calculées de telle manière à avoir une erreur nulle, lorsque la tension à la sortie du module est fixée à une valeur  $V_{PVO}$  .[24.23]:

$$V_p = V_r = V = 2.4 \text{ V} \tag{III.2}$$

$$R_{21} = \frac{R_{20}}{\frac{V_{PVO} - 3}{V} - 2} \tag{III.3}$$

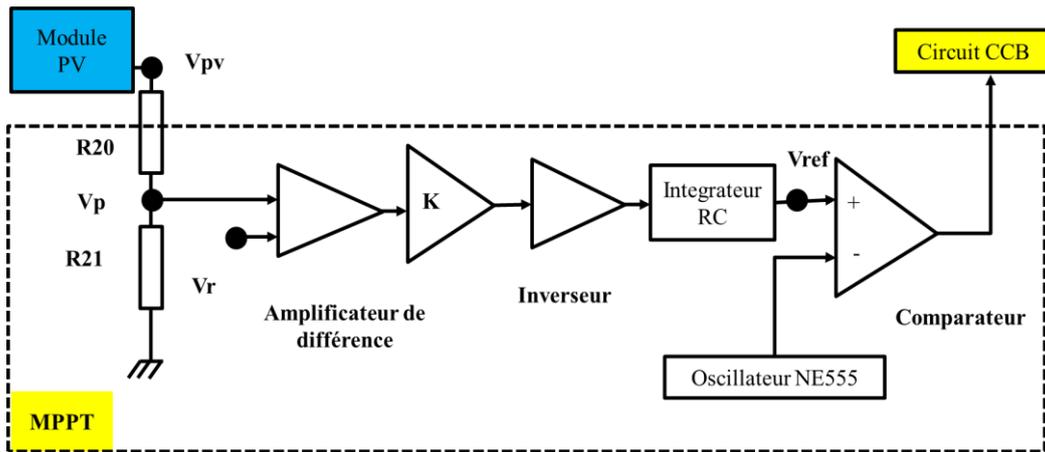
Sur le **Tableau (III.2)**, nous avons représenté les valeurs de la résistance R21 en fonction de la tension  $V_{PVO}$ , lorsque  $R_{20} = 10 \text{ k}\Omega$  .

**Tableau (III.2) :** Résistance R21 en fonction de la tension  $V_{PVO}$  lorsque  $R_{20} = 10 \text{ K}\omega$

$V_{pvo}$ (V)	16.38	15.2	15	14,531	14	13.5
$R_{21}$ (k $\Omega$ )	1.877	2.068	2.105	2.195	2.307	2.42

L'amplificateur non inverseur a pour rôle d'amplifier l'erreur.

- L'amplificateur inverseur a pour rôle de changer le signe de l'erreur.
- L'intégrateur (circuit RC), de constante de temps  $\tau_0$ , a pour rôle de générer la tension de référence ( $V_{ref}$ ). Si cette tension augmente (diminue), le point de fonctionnement du générateur PV se déplace vers les conditions du circuit fermé (ouvert).
- Le comparateur LM319 qui compare la tension ( $V_{ref}$ ) à celle en dent de scie fournie par l'oscillateur NE 555, pour générer à la sortie du comparateur un signal modulé en largeur d'impulsion et de fréquence 10 kHz. Il est à noter que l'amplitude de ce signal ne peut commander correctement l'interrupteur du convertisseur. Pour ce faire, nous avons intercalé entre le convertisseur et le comparateur, le circuit CCB.



Figure(III.4): Schéma synoptique de la commande MPPT (CFT)

### III.4.4. Structure du circuit CCB

La figure représente le schéma synoptique du circuit CCB qui est formé par:

Un oscillateur NE555, un circuit de pompage de charge, un inverseur à transistor bipolaire et un driver.

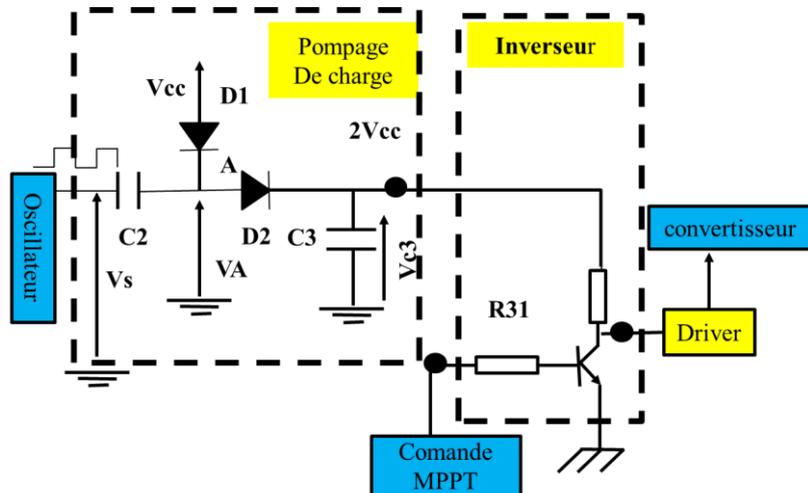


Figure (III.5) : Schéma synoptique du circuit CCB.

Le principe de fonctionnement de circuit est le suivant :

- L'oscillateur génère un signal carré à l'entrée de la pompe de charge. Lorsque sa sortie est nulle, le premier condensateur  $C_2$  se charge et la tension  $V_A$  est égale à la tension  $V_{CC}=12V$  (moins la chute de tension dans la diode  $D_1$ ). De la même manière, le condensateur

C3 se charge et la tension  $V_{C3}$  est égale à la tension  $V_{CC}$  (moins la chute de tension dans les deux diodes D1 et D2).

- Lorsque la sortie d'oscillateur bascule à  $V_{CC}$ , la tension VA augmente et atteint la valeur  $2 \cdot V_{CC}$  (moins la chute de tension dans la diode D1). En conséquence, suite à la charge du condensateur C3, la tension supportée par le condensateur C3 atteint la valeur  $2 \cdot V_{CC}$  (moins les chutes de tension dans les diodes D1 et D2).

- Cette dernière tension polarise un transistor bipolaire (NPN) fonctionnant en régime de commutation (inverseur). Le signal fourni par la commande MPPT (Figure III.3) est injecté à la base de ce transistor bipolaire et le signal du collecteur de celui-ci est injecté au transistor Mosfet du convertisseur à travers le Driver. Le signal ainsi fourni, d'amplitude d'environ  $2 \cdot V_{CC}$ , est largement suffisante pour assurer l'ouverture et la fermeture du transistor MOSFET

### **III.5. Etude du système PV dans Pspice**

Nous avons implanté le circuit du système PV sur Pspice comme la figure (III.6) l'indique, puis nous avons relevé les différentes grandeurs électriques (tensions, courants et puissances) du système en utilisant une charge résistive de  $1.2 \Omega$ , à une température de  $27^\circ\text{C}$ .

Les différents paramètres de la commande MPPT sont calculés pour réguler la tension à la sortie du générateur PV à la valeur 15 V.

Puisque la source de l'interrupteur IRF 540 est flottante, le circuit CCB est intercalé entre la sortie du comparateur (Figure III.3) et la grille de l'interrupteur, ce dernier augmente la tension générée par le comparateur et assure la fermeture et l'ouverture de l'interrupteur MOSFET.

Les résultats typiques sont représentés sur les figures (III.7) et (III.8)

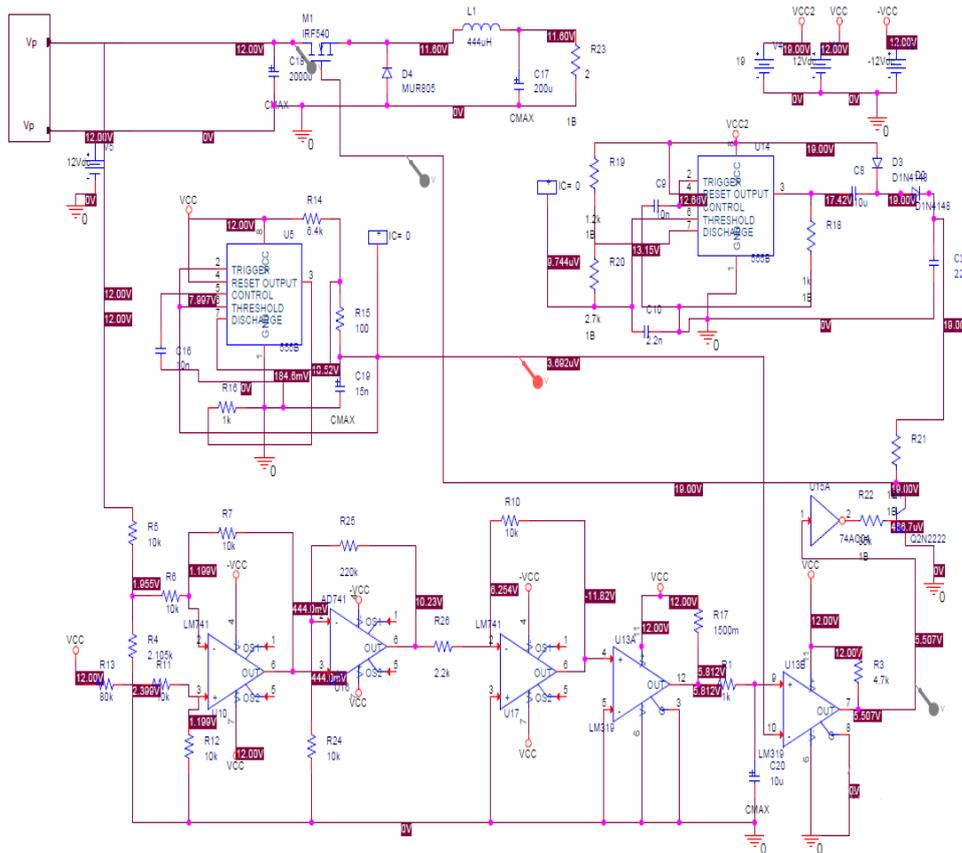


Figure (III.6) : Schéma du système photovoltaïque complet implanté dans Pspice

### III.6. Résultats de simulation

Il apparaît que:

- La commande MPPT génère un signal carré à sa sortie, d’une amplitude de 5.6 V (Figure III.6), puisque la régulation de la tension du générateur est fixée à 15 V, alors cette amplitude ne peut pas fermer l’interrupteur Mosfet.
- Le circuit CCB génère bien un signal à sa sortie d’une amplitude de 19 V qui est largement suffisante pour fermer l’interrupteur Mosfet (Figure III.7), ce signal a une fréquence de 10 kHz et un rapport cyclique de 0.545.

Nous avons conclu que la commande MPPT et le circuit CCB génèrent bien un signal qui commande le MOSFET pour l’ouverture et à la fermeture.

- Les différentes grandeurs électriques à l’entrée et à la sortie du convertisseur (Figure III.8) montrent que:

- Le système converge vers les conditions optimales au bout de 20 ms;
- Les différentes grandeurs électriques oscillent autour de leurs valeurs optimales:
- \* la tension d'entrée (sortie) du convertisseur oscille autour de 15 V (7 V),
- \* le courant d'entrée (sortie) du convertisseur oscille autour de 3.1 A (5.4 A),
- \* la puissance d'entrée (sortie) du convertisseur oscille autour de 46.5 W (37.8W)

Par ailleurs, nous avons vérifié que les oscillations obtenues dépendent fortement de la constante du temps  $\tau_0$  de l'intégrateur (R26, C1): lorsque  $\tau_0$  augmente (diminue) le système devient lent (rapide) et l'amplitude des oscillations diminue (augmente).

Si la constante du temps  $\tau_0$  est très faible alors le système PV devient instable.

Les valeurs obtenues montrent que, la commande MPPT utilisée régule bien le fonctionnement électrique du générateur PV autour des conditions optimales.

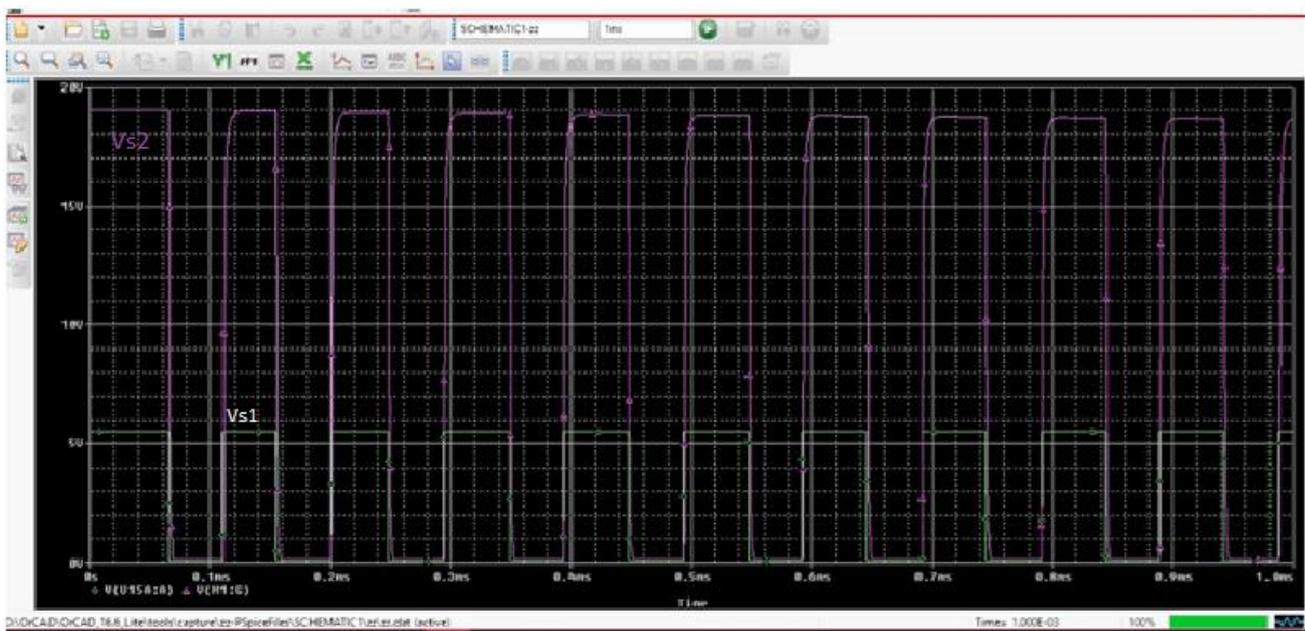
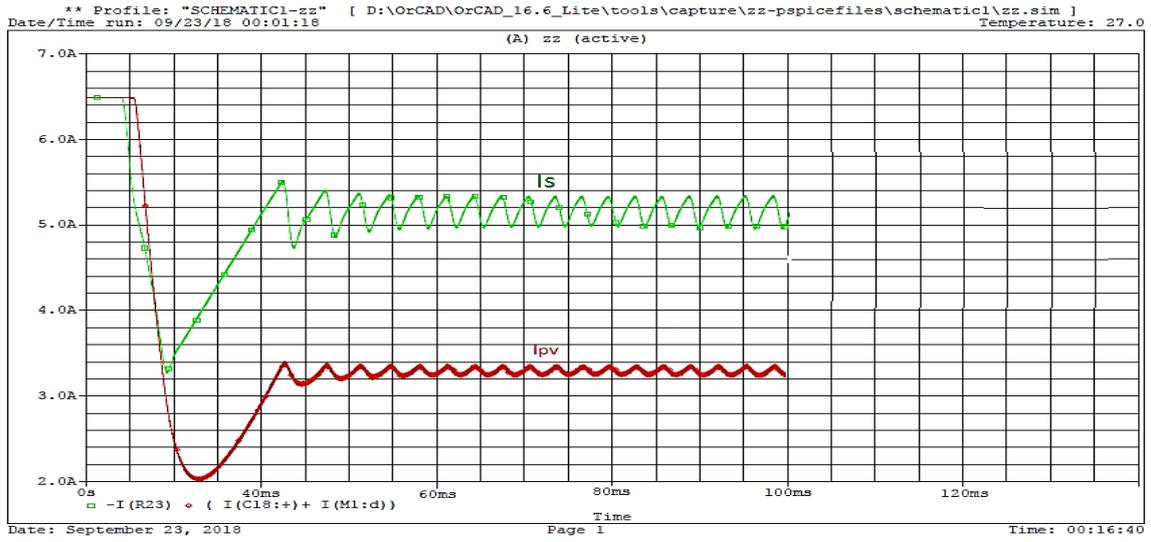
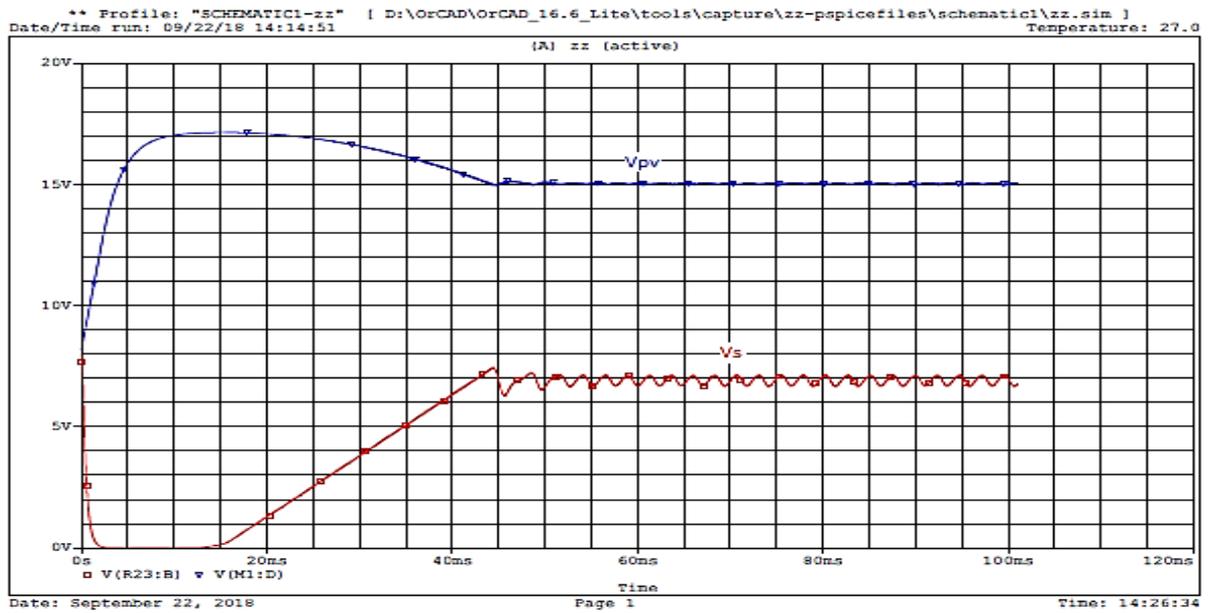


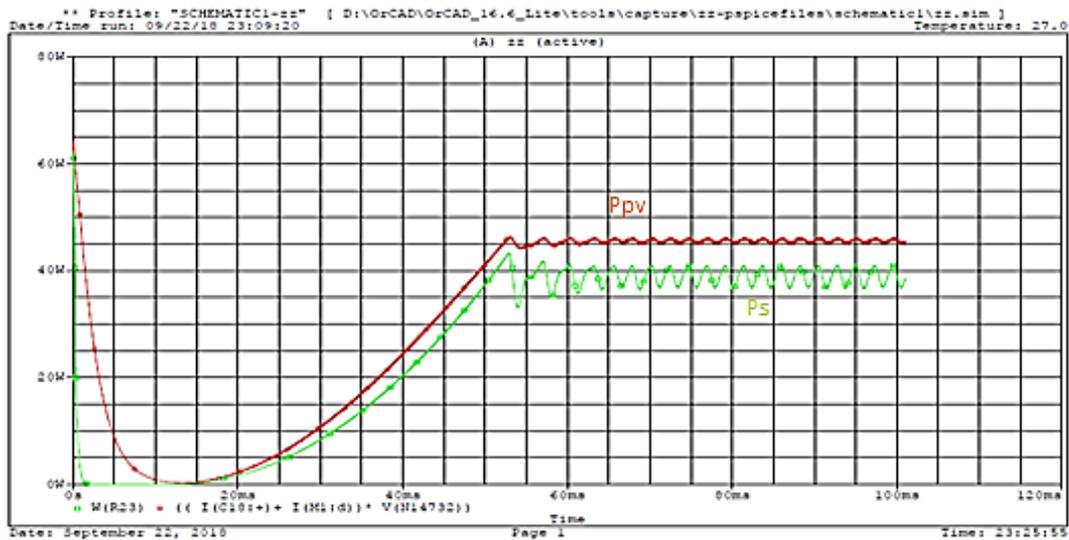
Figure.III.7 : Signaux générés par la commande MPPT ( $V_{s1}$ ) et par le circuit CCB qui commande le MOSFET ( $V_{s2}$ )



(a)



(b)



(c)

Figure (III.7): Simulation dans Pspice des grandeurs électriques à l'entrée et à la sortie du convertisseur.(A)- courants (B)- tensions (C)- Puissances

### III.7.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé avec le simulateur Pspice le fonctionnement optimal d'un système PV, de moyennes puissances (100 W) dont la régulation de la puissance est effectuée par une commande MPPT CFT muni d'un circuit CCB.

Le rôle de la commande est d'une part de commander correctement l'interrupteur du convertisseur, et d'autre part de fixer une tension fixe optimale  $V_{opt}$  à la sortie du module PV.

Dans ce travail, nous avons étudié puis analysé dans le simulateur Pspice le fonctionnement d'un convertisseur DC/DC (buck : dévolteur), dans un système PV de moyennes puissances (100 W), dont la régulation de la puissance est effectuée par une commande MPPT (CFT) muni d'un circuit CCB. Le rôle de la commande est d'une part de commander correctement l'interrupteur du convertisseur, et d'autre part de fixer une tension fixe optimale  $V_{opt}$  à la sortie du module PV. Nous avons montré que toutes les grandeurs électriques (tensions, courant et puissances) oscillent autour des valeurs fixées (optimum).

L'avantage de cette commande est sa simplicité de réalisation et son coût bas. Nous avons montré que la commande MPPT(CFT) ainsi conçue joue correctement son rôle: elle régule la tension de sortie du module à sa valeur optimale.

Les résultats obtenus montrent d'une part le bon fonctionnement de chaque bloc du système, et d'autre part l'oscillation de la puissance fournie par le générateur PV autour du point de puissance maximale (PPM). Les différents résultats obtenus dans Pspice sont validés à partir du système PV étudié.

En comparant avec les résultats de littérature. Ces résultats montrent que la commande MPPT et le circuit CCB conçus jouent correctement leurs rôles: optimisation de la puissance électrique fournie par le module PV.

L'ensemble des résultats obtenus dans ce travail montre que le prototype photovoltaïque développé peut être utilisé dans une installation PV afin d'optimiser le fonctionnement des panneaux et stocker l'énergie produite dans les batteries, de tensions inférieures à celles optimales du panneau PV.

- [1] **Alain Bilbao Ibarreta** " Réalisation de commandes MPPT Numériques « Rapport de stage  
Projet Fin d'Etudes Universtat Rovira Virgili 2006.
- [2] Jean-Claude MULLER, Electricité photovoltaïque, Technique de l'ingénieur, BE857
- [3] **M.L. Louazane** "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque  
sur le site de Ouargla "Mémoire de Magister Université El Hadj Lakhdar-Batna  
16/06/2008.
- [5] **Antonio Luque and Steven Hegedus**, "Handbook of Photovoltaic Science and  
Engineering", JohnWiley & Sons Ltd, 2003
- [6] **Akihiro Oi**, "Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System", Faculty of  
California Polytechnic State University, 2005
- [7] **Hannes Knopf**, "Analysis, Simulation and Evaluation of Maximum Power Point Tracking  
(MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle", Portland State University, 1999
- [8] **Lionel Vechiu**, "Modélisation et Analyse de l'Intégration des Énergies Renouvelables  
dans un Réseau Autonome", Université du Havre, 2005
- [9] **A. DJAFOUR**, Etude d'un système de production d'hydrogène solaire. Thèse doctorat,  
Université de Batna, 2013.
- [10] **N. Achaïbou, A. Malek , N Bacha**, « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide  
dans l'installation PV », Revue des Energies Renouvelables, N. spécial (CHEMSS),  
pp61-66,2000.
- [11] **A. Zerga**, F. Benyarou et B. Benyoucef, « Optimisation du rendement d'une cellule  
solaire NP au silicium monocristallin », Revue des Energies Renouvelable, 1998, pp.95-  
100.
- [12] **D. Thévenard and M. Ross**, « Validation and Verification of component Models and  
System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada, 2003.
- [13] **Amara Karima**, « Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de  
puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension ». Mémoire de Magister, université UMTO.
- [14] **A. O**, *Design and simulation of photovoltaïque water pumping système*, Thèse de  
Magister de l'université California, USA, Septembre 2005.
- [15] **M. Hadjab**, *Développement des performances d'un système photovoltaïque*, mémoire de  
Magister, université de Sidi Bèl Abbès, Jan 2011.
- [16] **P.Derk** «ElectrochemicalEnergy Storage for Renewable Sourceand Grid  
Blancing»,ouvrage ISBN:978-0-444-62616-5,2014.

- [17] **N. Abouchabana**, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [18] **Minwon Park, In-Keun Yu, Member IEEE**, "A Study on the Optimal Voltage for MPPT obtained by Surface Temperature of Solar Cell ", Changwon National University, 2000
- [19] **M. Angel Cid Pastor**, "Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques", Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006
- [20] **O. Benseddik**, «Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque», Mémoire de Master, Université de Ouargla, Algérie, 2011.
- [21] **O. Bouli-hacene**, « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique », Thèse de magister, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2011.
- [22]: **J. Fadat**, *Chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque, Commande MPPT*, La Revue 3EI n° 43 – Décembre 2005, ESIEE-Amiens 14 Quai de la Somme – BP 100 – 80 082 Amiens.
- [23] **T. Mrabti**, M. El Ouariachi, B. Tidhaf, Ka. Kassmi, E. Chadli and K. Kassmi, 'Regulation of Electric Power of Photovoltaic Generators with DC-DC Converter (Buck Type) and MPPT Command', International Conference on Multimedia Computing and Systems, ICMCS'09 IEEE, pp. 322 - 326, Ouarzazate, Morocco, April 2-4, 2009.
- [24] **M. El Ouriachi**, T. Mrabti, B. Tidhaf, Ka. Kassmi and K. Kassmi, 'Regulation of the Electric Power Provided by the Panels of the Photovoltaic Systems', International Journal of Physique Sciences, Vol. 4, N°5, pp. 294 - 309, 2009.
- [25] **M.F. Shraif**, 'Optimisation et Mesure de Chaînes de Conversion d'Energie Photovoltaïque en Energie Electrique', Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse (France), LAAS, CNRS, 2002.
- [26] **E. Matagne**, Document de Travail, 'Energie Solaire Photovoltaïque', Université catholique de Louvain, Faculté des Sciences Appliquées, Octobre 2000.
- [27] **H. Knopf**, 'Analysis, Simulation and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle', Thesis, Portland State University, 1999.
- [28] **S. Issaadi**, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
- [29] **N. Abouchabana**, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009

## Low Cost, High Accuracy IC Op Amps

### AD741

#### FEATURES Precision Input Characteristics

Low VOS: 0.5 mV max (L)

Low VOS Drift: 5 mV/8C max (L)

Low  $I_b$ : 50 nA max (L)

Low IOS: 5 nA max (L)

High CMRR: 90 dB min (K, L)

#### High Output Capability

AOL = 25,000 min, 1 kV Load (J, S) TMIN to TMAX

VO = 610 V min, 1 kV Load (J, S)

Chips and MIL-STD-883B Parts Available

### GENERAL DESCRIPTION

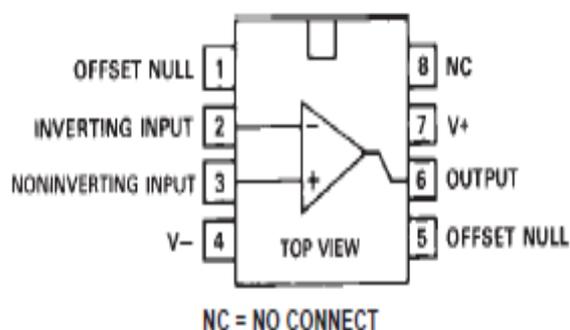
The Analog Devices AD741 Series are high performance monolithic operational amplifiers. All the devices feature full short circuit protection and internal compensation. The Analog Devices AD741J, AD741K, AD741L, and AD741S

are specially tested and selected versions of the standard AD741 operational amplifier.

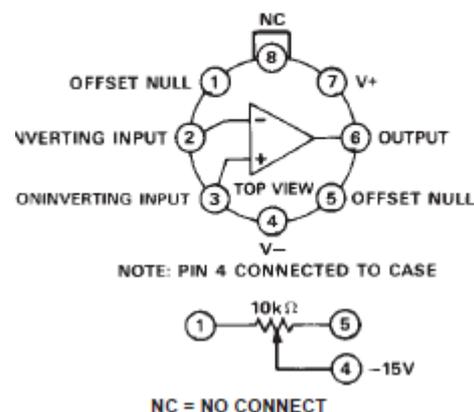
Improved processing and additional electrical testing guarantee the user precision performance at a very low cost. The AD741J, K and L substantially increase overall accuracy over the standard AD741C by providing maximum limits on offset voltage drift and significantly reducing the errors due to offset voltage, bias current, offset current, voltage gain,

power supply rejection and common-mode rejection. For example, the AD741L features maximum offset voltage drift of 5  $\mu\text{V}/\text{C}$ , offset voltage of 0.5 mV max, offset current of 5 nA max, bias current of 50 nA max and a CMRR of 90 dB min. The AD741S offers guaranteed performance over the extended temperature range of  $-55\text{C}$  to  $+125\text{C}$ , with max offset voltage drift of 15  $\mu\text{V}/\text{C}$ , max offset voltage of 4 mV, max offset current of 25 nA, and a minimum CMRR of 80 dB.

#### Mini-DIP (N) Package



#### CONNECTION DIAGRAMS TO-99 (H) Package



Model	AD741C			AD741			AD741J			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
OPEN-LOOP GAIN $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ , $V_O = \pm 10 \text{ V}$ $R_L = 2 \text{ k}\Omega$ , $V_O = \pm 10 \text{ V}$ $T_A = \text{min to max } R_L = 2 \text{ k}\Omega$							50,000	200,000		V/V V/V V/V
OUTPUT CHARACTERISTICS Voltage @ $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ , $T_A = \text{min to max}$ Voltage @ $R_L = 2 \text{ k}\Omega$ , $T_A = \text{min to max}$ Short Circuit Current							$\pm 10$	$\pm 13$		V V mA
FREQUENCY RESPONSE Unity Gain, Small Signal Full Power Response Slew Rate Transient Response (Unity Gain) Rise Time $C_L \leq 10 \text{ V p-p}$ Overshoot										MHz kHz V/ $\mu\text{s}$ $\mu\text{s}$ %
INPUT OFFSET VOLTAGE Initial, $R_S \leq 10 \text{ k}\Omega$ , Adjust to Zero $T_A = \text{min to max}$ Average vs. Temperature (Untrimmed) vs. Supply, $T_A = \text{min to max}$										mV mV $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ $\mu\text{V/V}$
INPUT OFFSET CURRENT Initial $T_A = \text{min to max}$ Average vs. Temperature										nA nA $\text{nA}/^\circ\text{C}$
INPUT BIAS CURRENT Initial $T_A = \text{min to max}$ Average vs. Temperature										nA nA $\text{nA}/^\circ\text{C}$
INPUT IMPEDANCE DIFFERENTIAL	0.3	2.0		0.3	2.0		1.0			M $\Omega$
INPUT VOLTAGE RANGE <sup>1</sup> Differential, max Safe Common-Mode, max Safe Common-Mode Rejection, $R_S \leq 10 \text{ k}\Omega$ , $T_A = \text{min to max}$ , $V_{IN} = \pm 12 \text{ V}$										V V dB
POWER SUPPLY Rated Performance Operating Power Supply Rejection Ratio Quiescent Current Power Consumption $T_A = \text{min}$ $T_A = \text{max}$										V V $\mu\text{V/V}$ mA mW mW mW
TEMPERATURE RANGE Operating Rated Performance Storage										$^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C}$

**AD741 Series—SPECIFICATIONS (typical @ +25°C and @15 V dc, unless otherwise noted)**

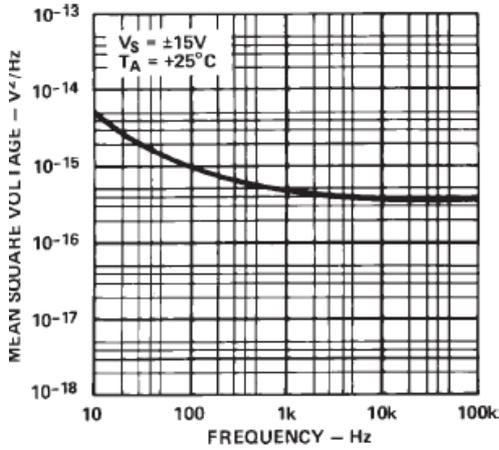


Figure1. Input Noise Voltage vs Supply.Frequency

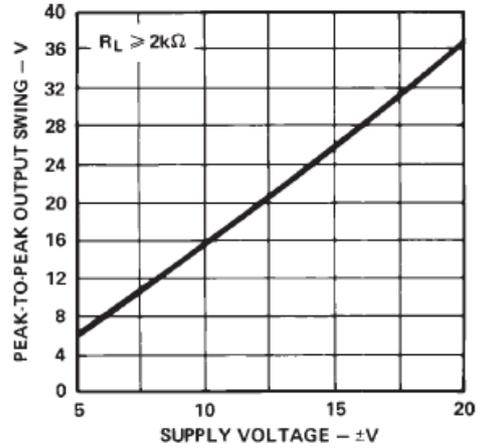


Figure2. Output Voltage Swing vs. Voltage

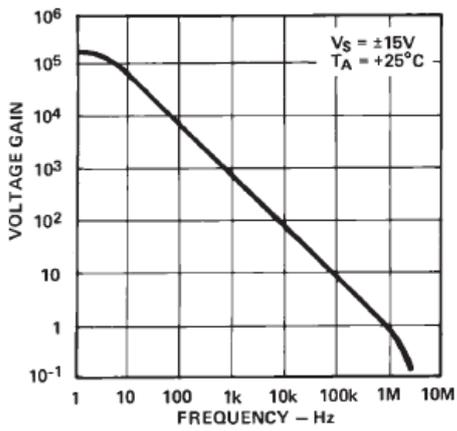


Figure 3. Open-Loop Gain vs. Frequency

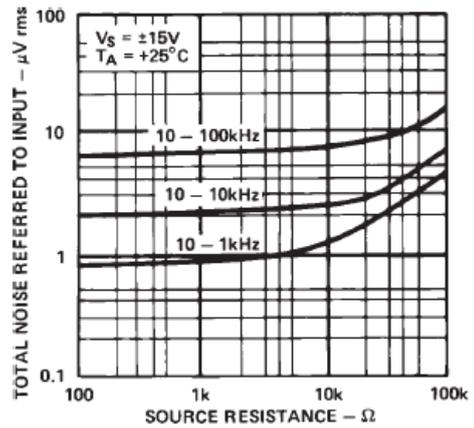


Figure 4. Broad Band Noise vs. Source Resistance

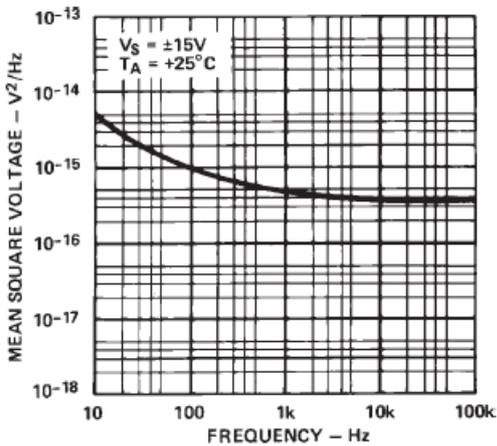


Figure 5. Input Noise Voltage vs. Frequency Supply

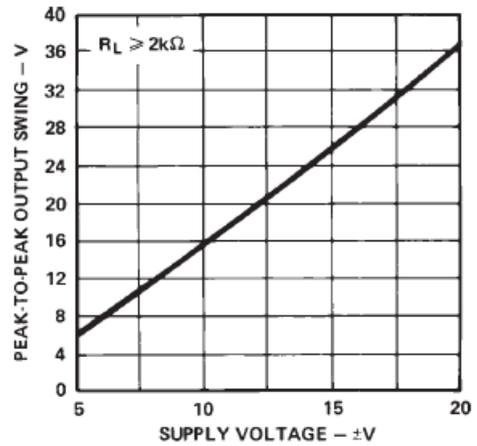


Figure 6. Output Voltage Swing vs.

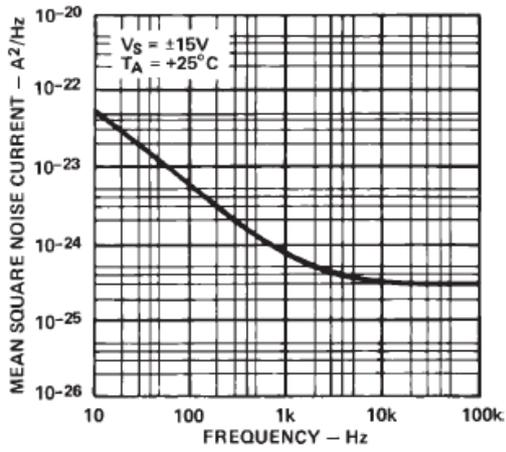


Figure 8. Input Noise Current vs. Frequency

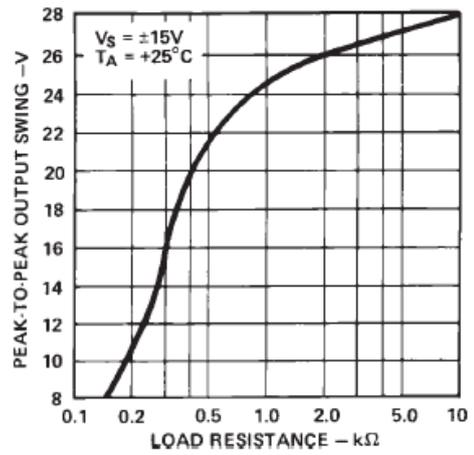


Figure 11. Output Voltage Swing vs. Load Resistance

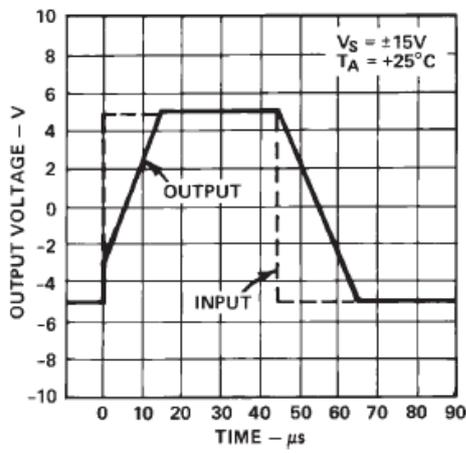


Figure 9. Voltage Follower Large Signal Pulse Response Swing

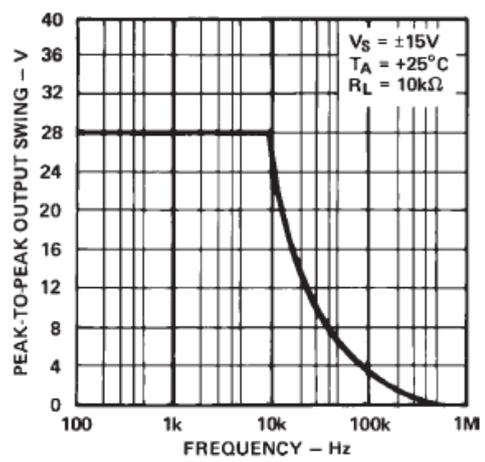


Figure 12. Output Voltage vs. Frequency

## LT119A/LT319A LM119/LM319

ELECTRICAL CHARACTERISTICS The denotes the specifications which apply over the full operating temperature range, otherwise specifications are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

SYMBOL PARAMETER CONDITIONS LT119A LM119

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	LT119A			LM119			SYMBOL	
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
$V_{OS}$	Input Offset Voltage	$V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_{CM} = 0$		0.3	0.5		4		mV	
		(Note 4)	●	0.5	1.0		0.7	4	mV	
				1.2	2.0		7		mV	
CMRR	Common Mode Rejection Ratio		90	106				dB		
$I_{OS}$	Input Offset Current	(Note 4)	●	20	40		30	75	nA	
					75		100		nA	
$I_B$	Input Bias Current	(Note 4)	●	150	500		150	500	nA	
					1000		1000		nA	
$A_V$	Voltage Gain		20	40		10	40	V/mV		
	Response Time	(Note 5)		80		80		ns		
$V_{SAT}$	Saturation Voltage	$V_{IN} \leq -5\text{mV}$ , $I_O = 25\text{mA}$ , $V^+ \geq 4.5\text{V}$ , $V^- = 0\text{V}$		0.75	1.5		0.75	1.5	V	
		$V_{IN} \leq -6\text{mV}$ , $I_{SINK} \leq 3.2\text{mA}$ $T_A \geq 0^\circ\text{C}$		0.23	0.4		0.23	0.4	V	
		$T_A \leq 0^\circ\text{C}$			0.6		0.6		V	
	Output Leakage Current	$V_{IN} \geq 5\text{mV}$ , $V_{OUT}$ to $V^- = 35\text{V}$	●	0.2	2		0.2	2	$\mu\text{A}$	
				1	10		1	10	$\mu\text{A}$	
	Input Voltage Range	$V_S = \pm 15\text{V}$	●	-12	$\pm 13$	12	-12	$\pm 13$	12	V
		$V^+ = 5\text{V}$ , $V^- = 0\text{V}$	●	1		3	1		3	V
	Differential Input Voltage		●		$\pm 5$		$\pm 5$		V	
$I_S$	Supply Current	$V^+ = 5\text{V}$ , $V^- = 0\text{V}$		4.3			4.3		mA	
	Positive Supply Current	$V_S = \pm 15\text{V}$		8	11.5		8	11.5	mA	
	Negative Supply Current	$V_S = \pm 15\text{V}$		3	4.5		3	4.5	mA	

The denotes the specifications which apply over the full operating temperature range, otherwise specifications are at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ .

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	LT319A			LM319			SYMBOL
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
$V_{OS}$	Input Offset Voltage	$V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_{CM} = 0\text{V}$		0.3	0.5		8		mV
		$R_S \leq 5\text{k}$	●	0.5	1		2	8	mV
		(Note 4)			2		10		mV
CMRR	Common Mode Rejection Ratio		90	106				dB	
$I_{OS}$	Input Offset Current	(Note 4)	●	30	40		80	200	nA
					60		300		nA
$I_B$	Input Bias Current	(Note 4)	●	150	500		250	1000	nA
					1000		1200		nA
$A_V$	Voltage Gain		20	40		8	40	V/mV	
	Response Time	(Note 5)		80		80		ns	
$V_{SAT}$	Saturation Voltage	$V_{IN} \leq -10\text{mV}$ , $I_{SINK} = 25\text{mA}$		0.75	1.5		0.75	1.5	V
		$V^+ \geq 4.5\text{V}$ , $V^- = 0\text{V}$ , $V_{IN} \leq -10\text{mV}$ , $I_{SINK} \leq 3.2\text{mA}$	●	0.3	0.4		0.3	0.4	V
	Output Leakage Current	$V_{IN} \geq 10\text{mV}$ , $V_{OUT}$ to $V^- = 35\text{V}$		0.2	10		0.2	10	$\mu\text{A}$
	Input Voltage Range	$V_S = \pm 15\text{V}$	●		$\pm 13$		$\pm 13$		V
		$V^+ = 5\text{V}$ , $V^- = 0\text{V}$	●	1		3	1		3
	Differential Input Voltage		●		$\pm 5$		$\pm 5$		V
$I_S$	Supply Current	$V^+ = 5\text{V}$ , $V^- = 0\text{V}$		4.3			4.3		mA
	Positive Supply Current	$V_S = \pm 15\text{V}$		8	12.5		8	12.5	mA
	Negative Supply Current	$V_S = \pm 15\text{V}$		3	5		3	5	mA

## Le timer 555

- Présentation
- Caractéristique statique
- Montage en monostable ou mono vibreur
- Montage en astable ou multivibrateur

### Plan

Circuit minuterie ou base de temps (timer)

Introduit en 1971 par la société Signetics pour remplacer les minuteries mécaniques des machines à laver

mais toujours d'actualité : 1 milliard d'unités fabriquées par an !

### Présentation

#### Description

Circuit intégré dans un boîtier, généralement de type DIL (Dual-in-line) à 8 pattes (pins)

\_ 23 transistors, 2 diodes, 15 résistances

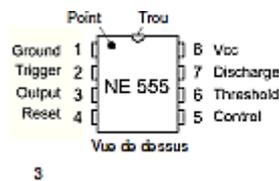
\_ superficie de 0,5 cm<sup>2</sup>

#### Applications :

- \_ Bistable ou flip flop, deux états stables (passer à 1 ou à 0 à des instants donnés)
- \_ Astable, « deux états quasi stables » (signal d'horloge de période constante,...)
- \_ Monostable, un seul état stable (signal impulsionnel, passage à 1 ou à 0 mer)

Introduit en 1971 par la société Signetics pour remplacer les minuteries mécaniques des machines à laver mais toujours d'actualité : 1 milliard d'unités fabriquées par an !

Circuit intégré dans un boîtier, généralement de type DIL (Dual-in-line) à 8 pattes (pins).



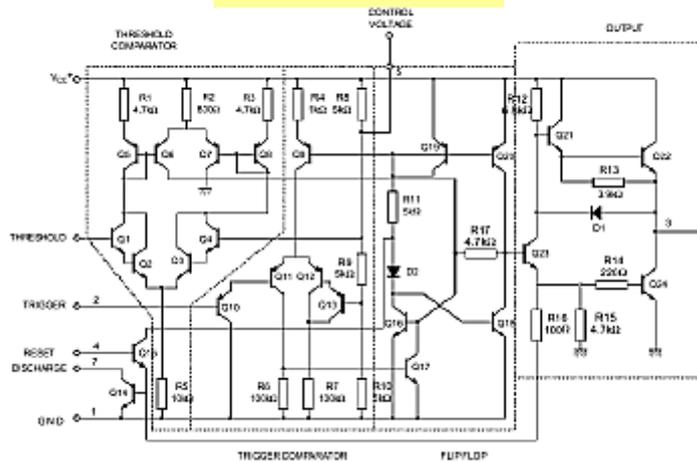
3

#### Principales caractéristiques :

- \_ Fréquence maximale : 2 MHz
- \_ Tension d'alimentation : 4,5V à 16V
- \_ Stabilité en température : 0,005% par °C
- \_ Courant de sortie maximum : 200 mA

Dans un 556, deux timers 555 sont intégrés dans un seul boîtier

Anatomie du 555



Nécessité d'une description par blocs fonctionnels

Décomposition fonctionnelle

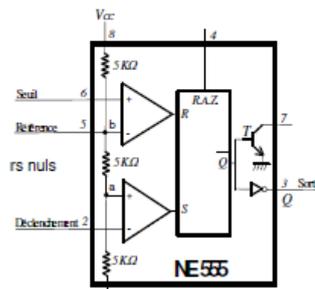
Fonctionnalités :

- 1 diviseur résistif
- 2 comparateurs
- 1 bascule RS
- 1 transistor de décharge

Courants d'entrée des comparateurs nuls  
 ->  $V_a = 1/3 \cdot V_{cc}$  et  $V_b = 2/3 \cdot V_{cc}$

Entrées spécifiques :

- \_ Seuil (force R à 1 lorsque  $V_6 > 2/3 V_{cc}$ )
- \_ Déclenchement (force S à 1 lorsque  $V_2 < 1/3 V_{cc}$ )



Caractéristique statique

- $0 < V_e \leq V_{cc}/3$ , R=0, S=1, Q=1, Q=0
- $V_{cc}/3 < V_e \leq 2/3 V_{cc}$ , R=0, S=0, Q=1, Q=0
- $2/3 V_{cc} < V_e \leq V_{cc}$ , R=1, S=0, Q=0, Q=1
- $V_{cc}/3 < V_e \leq 2/3 V_{cc}$ , R=0, S=0, Q=0, Q=1
- $0 < V_e \leq V_{cc}/3$ , R=0, S=1, Q=1, Q=0

Lorsque  $V_e = 0$ , l'entrée (-) du comparateur du bas, force sa sortie à l'état haut :

$V_a = 1/3 V_{cc}$ .

La sortie Q de la bascule RS est à l'état haut.

Si on augmente la tension  $V_e$ , dès qu'elle arrive au  $1/3 V_{cc}$ ,

l'entrée S passe à 0 ( $V_b$  plus grand que  $V_a$ )

mais la sortie 3 reste à l'état haut.

Tant que la tension  $V_e$  reste  $\ll$  au  $2/3 V_{cc}$ , l'entrée R est à 0 donc inactive.

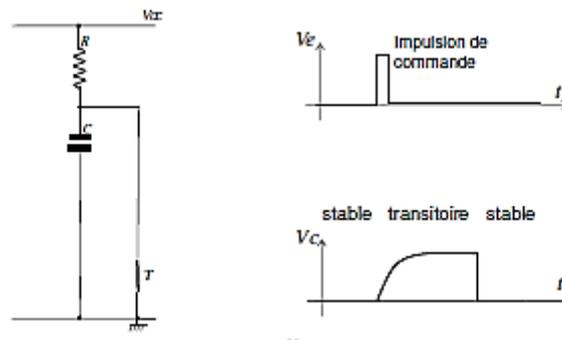
La sortie restera à l'état haut tant que  $V_e$  n'aura pas atteint  $2/3 V_{cc}$ .

### Montage en monostable (ou monovibrateur)

**Exemple :**

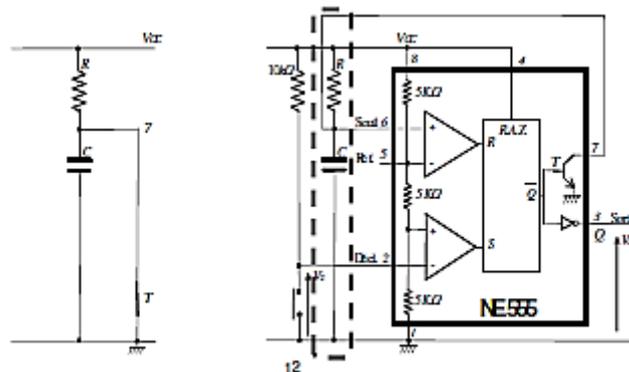
\_ un état stable, l'interrupteur  $T$  est fermé,  $V_c(t)=0$

\_ Ouverture de  $T$  et création d'un état transitoire de durée constante ( $q$ )

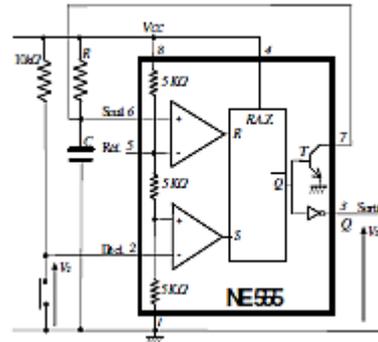
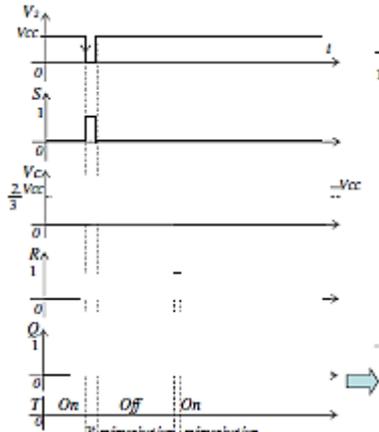


### Schéma d'un montage monostable à base d'un 555

Le transistor est celui contenu dans le 555

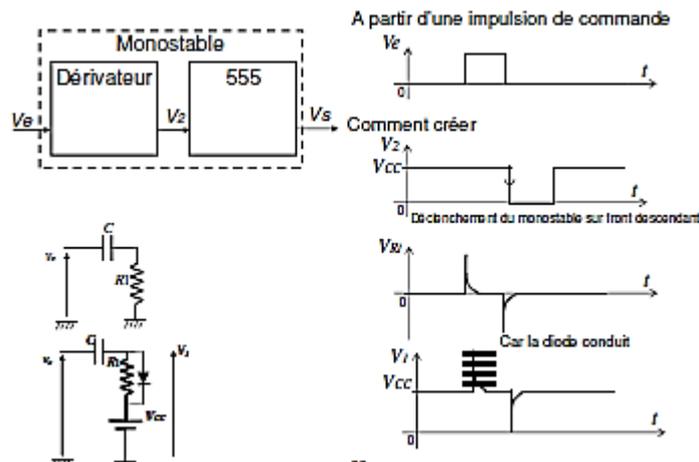
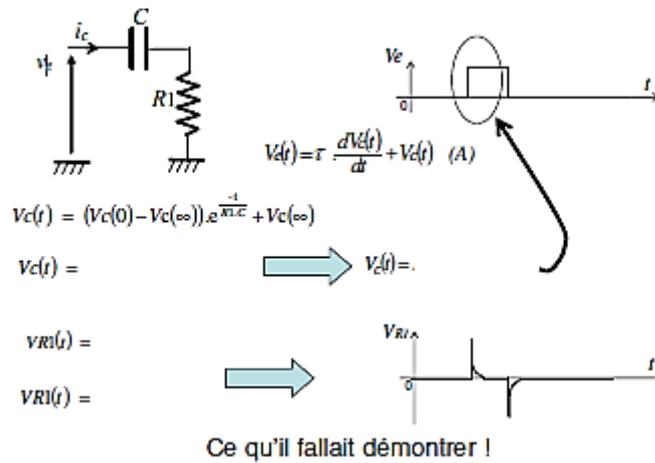


Montage en monostable (ou monovibrateur)



Technique de déclenchement

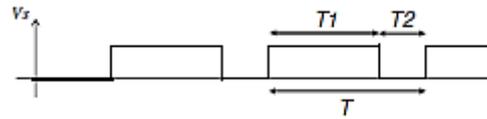
Détermination de  $V_{RI}(t)$



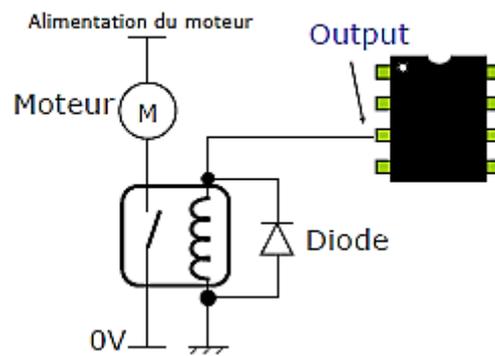
## Montage en astable (ou multivibrateur)

Circuit logique à aucun état stable

- Ne nécessite aucun signal d'entrée
- Fonctionne comme un générateur de signaux carrés



## Connecter un relais



## LM741 Single Operational Amplifier

### Description

The LM741 series are general purpose operational amplifiers.

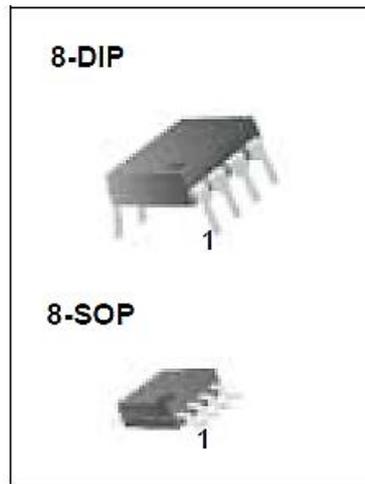
It is intended for a wide range of analog applications.

The high gain and wide range of operating voltage provide superior performance in integrator, summing amplifier, and

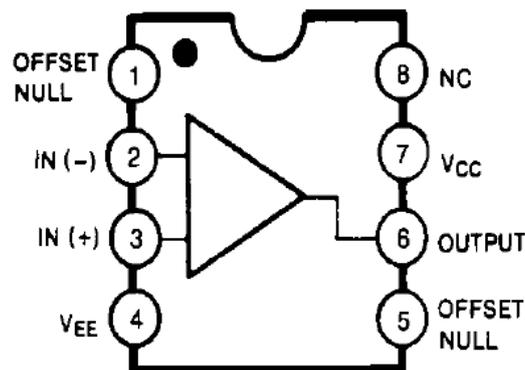
general feedback applications.

### Features

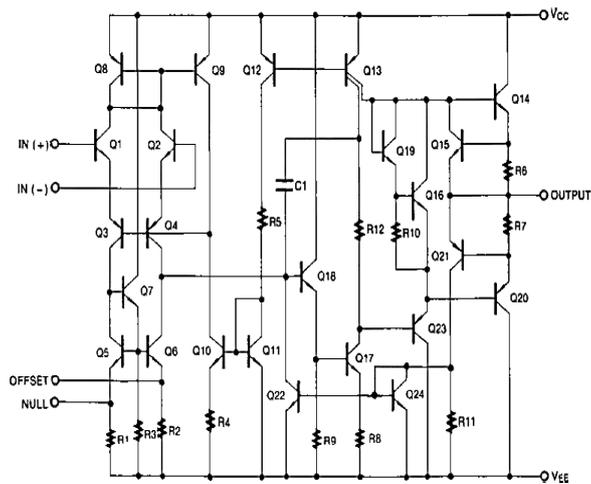
- Short circuit protection
- Excellent temperature stability
- Internal frequency compensation
- High Input voltage range
- Null of offset



### Internal Block Diagram



## Schematic Diagram

Absolute Maximum Ratings ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ )

Parameter	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	$V_{CC}$	$\pm 18$	V
Differential Input Voltage	$V_{I(DIFF)}$	30	V
Input Voltage	$V_I$	$\pm 15$	V
Output Short Circuit Duration	-	Indefinite	-
Power Dissipation	$P_D$	500	mW
Operating Temperature Range LM741C LM741I	$T_{OPR}$	0 ~ +70 -40 ~ +85	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{STG}$	-65 ~ +150	$^\circ\text{C}$

## Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY	
$V_{DS}$ (V)	100
$R_{DS(on)}$ ( $\Omega$ )	$V_{GS} = 10\text{ V}$   0.077
$Q_g$ (Max.) (nC)	72
$Q_{gs}$ (nC)	11
$Q_{gd}$ (nC)	32
Configuration	Single

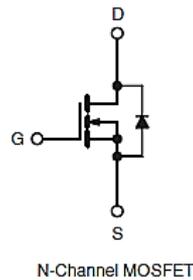
### FEATURES

- Dynamic  $dV/dt$  Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- 175 °C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Lead (Pb)-free Available

### DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching,

ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness. The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



### Notes

a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig.

ORDERING INFORMATION	
Package	TO-220
Lead (Pb)-free	IRF540PbF
	SiHF540-E3
SnPb	IRF540
	SiHF540

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted					
PARAMETER	SYMBOL		LIMIT	UNIT	
Drain-Source Voltage	$V_{DS}$		100	V	
Gate-Source Voltage	$V_{GS}$		$\pm 20$		
Continuous Drain Current	$V_{GS}$ at 10 V	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	28	A	
		$T_C = 100\text{ }^\circ\text{C}$	20		
Pulsed Drain Current <sup>a</sup>	$I_{DM}$		110		
Linear Derating Factor			1.0	$W/^\circ\text{C}$	
Single Pulse Avalanche Energy <sup>b</sup>	$E_{AS}$		230	mJ	
Repetitive Avalanche Current <sup>c</sup>	$I_{AR}$		28	A	
Repetitive Avalanche Energy <sup>a</sup>	$E_{AR}$		15	mJ	
Maximum Power Dissipation	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$		$P_D$	150	W
Peak Diode Recovery $dV/dt^e$	$dV/dt$		5.5	V/ns	
Operating Junction and Storage Temperature Range	$T_J, T_{stg}$		- 55 to + 175	$^\circ\text{C}$	
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s		300 <sup>d</sup>		
Mounting Torque	6-32 or M3 screw		10	lbf · in	
			1.1	N · m	

b.

11).

$V_{DD} = 25\text{ V}$ , starting  $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $L = 440\text{ }\mu\text{H}$ ,  $R_G = 25\text{ }\Omega$ ,  $I_{AS} = 28\text{ A}$  (see fig. 12).

c.  $I_{SD} \leq 28\text{ A}$ ,  $dI/dt \leq 170\text{ A}/\mu\text{s}$ ,  $V_{DD} \leq V_{DS}$ ,  $T_J \leq 175\text{ }^\circ\text{C}$ .

d. 1.6 mm from case. Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

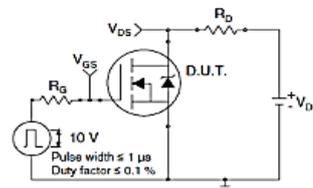
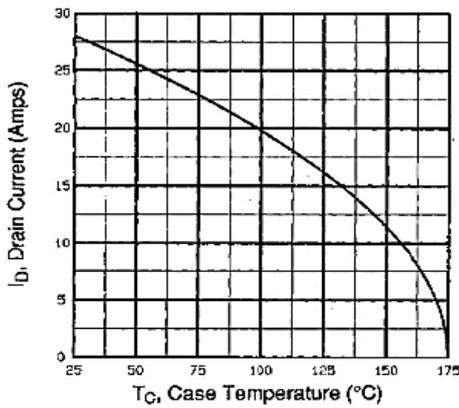


Fig. 10a - Switching Time Test Circuit

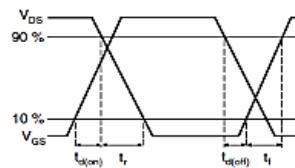


Fig. 9 - Maximum Drain Current vs. Case Temperature

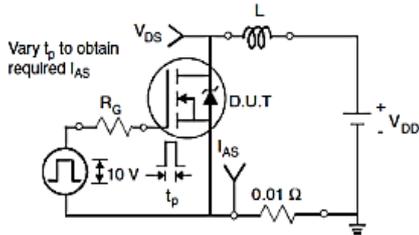
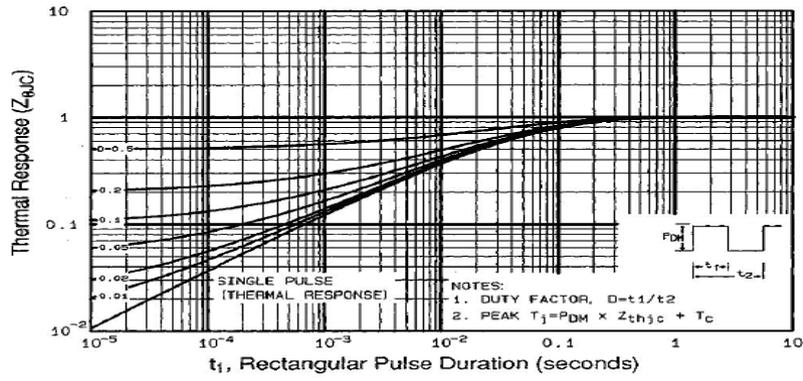


Fig. 12a - Unclamped Inductive Test Circuit

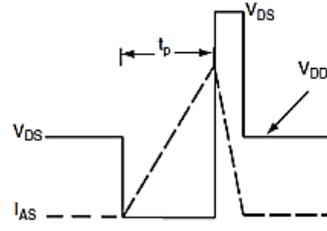
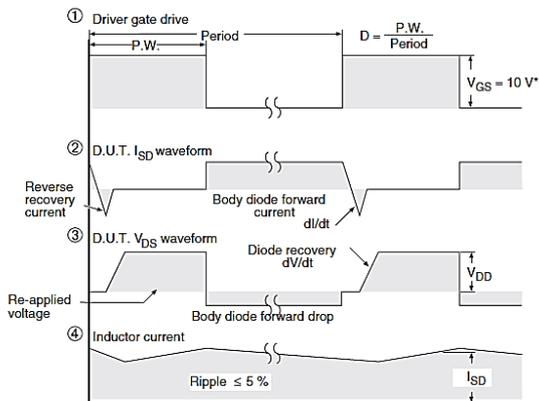
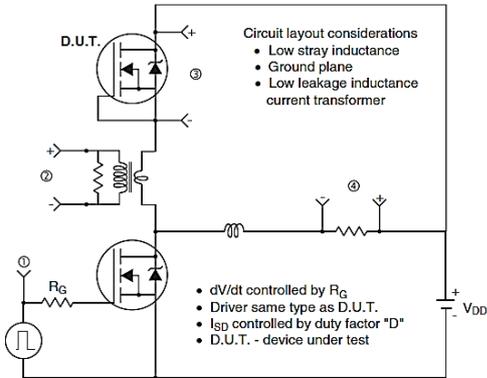


Fig. 12b - Unclamped Inductive Waveforms

Peak Diode Recovery dV/dt Test Circuit



\* VGS = 5 V for logic level devices

Fig. 14 - For N-Channel

# MUR8100E, MUR880E

MUR8100E is a Preferred

SWITCHMODEE

Power Rectifiers

## Ultrafast “E” Series with High Reverse Energy Capability

The MUR8100 and MUR880E diodes are designed for use in switching power supplies, inverters and as free wheeling diodes.

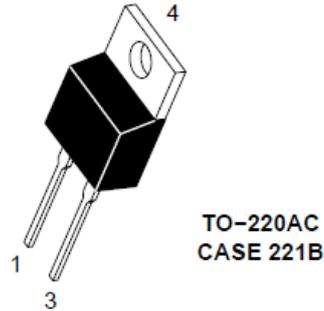
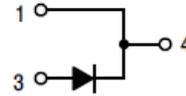
### Features

- 20 mJ Avalanche Energy Guaranteed
- Excellent Protection Against Voltage Transients in Switching Inductive Load Circuits
- Ultrafast 75 Nanosecond Recovery Time
- 175°C Operating Junction Temperature
- Popular TO-220 Package
- Epoxy Meets UL 94 V-0 @ 0.125 in.
- Low Forward Voltage
- Low Leakage Current
- High Temperature Glass Passivated Junction
- Reverse Voltage to 1000 V
- Pb-Free Package is Available

### Mechanical Characteristics

- Case: Epoxy, Molded
- Weight: 1.9 grams (approximately)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable

## ULTRAFAST RECTIFIERS 8.0 A, 800 V – 1000 V



MARKING DIAGRAM



U8x0E = Device Code  
x = 8 or 10

### ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping†
MUR8100E	TO-220	50 Units / Rail
MUR8100EG	TO-220 (Pb-Free)	50 Units / Rail
MUR880E	TO-220	50 Units / Rail

## MUR8100E, MUR880E

### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	$V_{RRM}$ $V_{RWM}$ $V_R$	800 1000	V
Average Rectified Forward Current (Rated $V_R$ , $T_C = 150^\circ\text{C}$ )	$I_{F(AV)}$	8.0	A
Peak Repetitive Forward Current (Rated $V_R$ , Square Wave, 20 kHz, $T_C = 150^\circ\text{C}$ )	$I_{FM}$	16	A
Non-Repetitive Peak Surge Current (Surge Applied at Rated Load Conditions Halfwave, Single Phase, 60 Hz)	$I_{FSM}$	100	A
Operating Junction and Storage Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-65 to +175	$^\circ\text{C}$

Maximum ratings are those values beyond which device damage can occur. Maximum ratings applied to the device are individual stress limit values (not normal operating conditions) and are not valid simultaneously. If these limits are exceeded, device functional operation is not implied, damage may occur and reliability may be affected.

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

Characteristic	Symbol	Value	Unit
Maximum Instantaneous Forward Voltage (Note 1) ( $I_F = 8.0\text{ A}$ , $T_C = 150^\circ\text{C}$ ) ( $I_F = 8.0\text{ A}$ , $T_C = 25^\circ\text{C}$ )	$V_F$	1.5 1.8	V
Maximum Instantaneous Reverse Current (Note 1) (Rated DC Voltage, $T_C = 100^\circ\text{C}$ ) (Rated DC Voltage, $T_C = 25^\circ\text{C}$ )	$i_R$	500 25	$\mu\text{A}$
Maximum Reverse Recovery Time ( $I_F = 1.0\text{ A}$ , $di/dt = 50\text{ A}/\mu\text{s}$ ) ( $I_F = 0.5\text{ A}$ , $i_R = 1.0\text{ A}$ , $I_{REC} = 0.25\text{ A}$ )	$t_{rr}$	100 75	ns
Controlled Avalanche Energy (See Test Circuit in Figure 6)	$W_{AVAL}$	20	mJ

1. Pulse Test: Pulse Width = 300  $\mu\text{s}$ , Duty Cycle  $\leq 2.0\%$ .

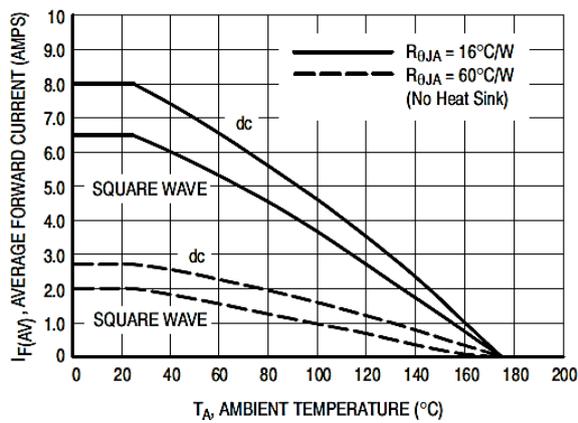


Figure 4. Current Derating, Ambient

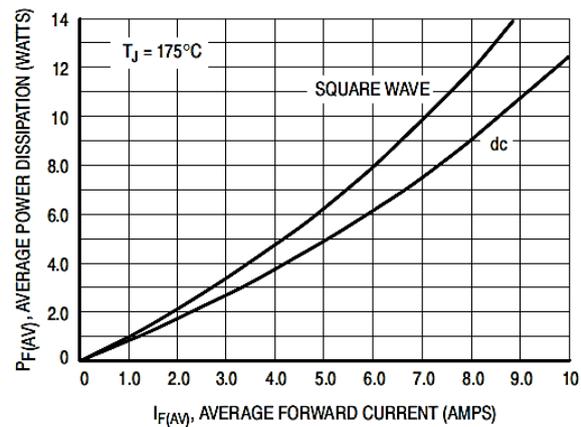


Figure 5. Power Dissipation

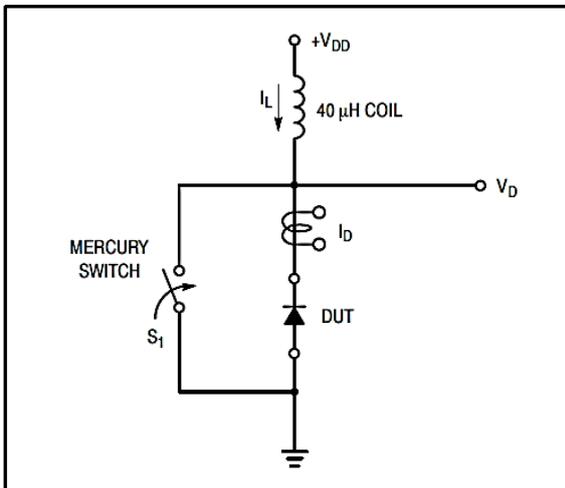


Figure 6. Test Circuit Waveforms

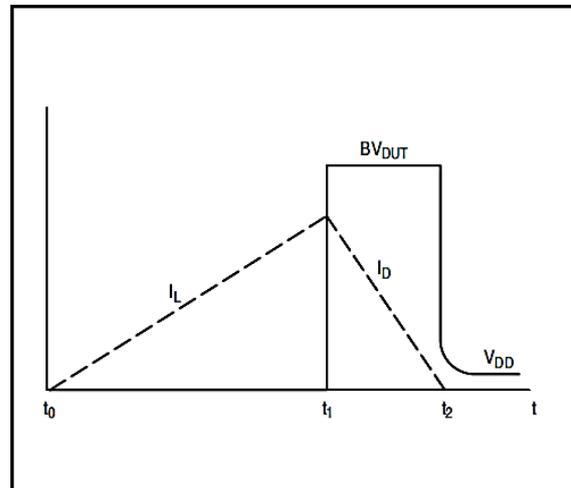


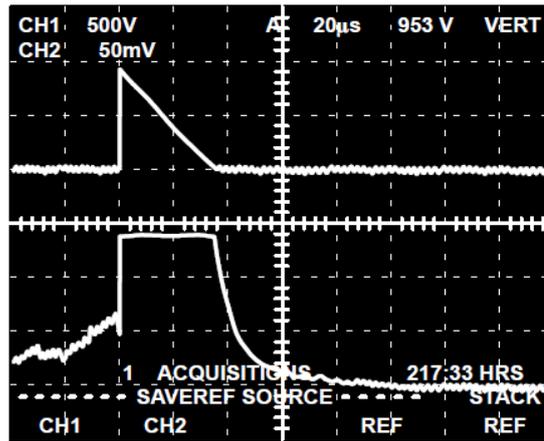
Figure 7. Current-Voltage Waveforms

EQUATION (1):

$$W_{\text{AVAL}} \approx \frac{1}{2} L I_{\text{LPK}}^2 \left( \frac{B V_{\text{DUT}}}{B V_{\text{DUT}} - V_{\text{DD}}} \right)$$

EQUATION (2):

$$W_{\text{AVAL}} \approx \frac{1}{2} L I_{\text{LPK}}^2$$



CHANNEL 2:  
I<sub>L</sub>  
0.5 AMPS/DIV.

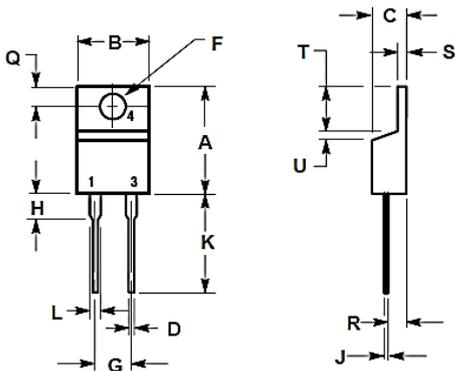
CHANNEL 1:  
V<sub>DUT</sub>  
500 VOLTS/DIV.

TIME BASE:  
20 µs/DIV.

Figure 8. Current-Voltage Waveforms

PACKAGE DIMENSIONS

TO-220  
CASE 221B-04  
ISSUE D



- NOTES:  
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.  
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.596	0.620	15.11	15.75
B	0.380	0.405	9.65	10.29
C	0.160	0.190	4.06	4.82
D	0.025	0.035	0.64	0.89
F	0.142	0.147	3.61	3.73
G	0.190	0.210	4.83	5.33
H	0.110	0.130	2.79	3.30
J	0.018	0.025	0.46	0.64
K	0.500	0.562	12.70	14.27
L	0.045	0.060	1.14	1.52
Q	0.100	0.120	2.54	3.04
R	0.080	0.110	2.04	2.79
S	0.045	0.055	1.14	1.39
T	0.235	0.255	5.97	6.48
U	0.000	0.050	0.000	1.27

## **Résumé**

L'énergie des éléments plus fondamentaux et nécessaires à la vie, en raison de la hausse continue de la demande d'énergie est devenue nécessaire de trouver d'autres sources de production d'énergie grâce à l'utilisation des énergies renouvelables et des sources plus importantes de l'utilisation de l'énergie solaire en raison de leurs nombreux avantages.

Dans ce travail, nous avons étudié et simulé dans le simulateur Pspice, le fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) destiné au stockage de l'énergie électrique, produite par les panneaux PV, dans les batteries de tensions inférieures à celles optimales des panneaux PV. Dans ce système, la régulation de la puissance est effectuée par le biais d'un convertisseur DC/DC, de type Buck (dévolteur), et d'une commande MPPT qui fixe la tension optimale du panneau PV à une valeur fixe (Commande CFT). Les résultats obtenus montrent d'une part le bon fonctionnement de chaque bloc du système, et d'autre part l'oscillation de la puissance fournie par le générateur PV autour du point de puissance maximale (PPM).

L'ensemble des résultats obtenus dans ce travail montre que le prototype photovoltaïque développé peut être utilisé dans une installation PV afin d'optimiser le fonctionnement des panneaux et stocker l'énergie produite dans les batteries, de tensions inférieures à celles optimales du panneau PV.

**Mots clés :** Energie photovoltaïque (PV) - Panneaux PV - Système PV – Caractérisations Électriques - Commande MPPT - Convertisseur DC/DC Buck – Simulateur Pspice - Grandeurs électriques optimales - Point de puissance maximale (PPM).