



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

# Ecole Nationale Polytechnique

## Département d'Electronique

*Projet de fin d'études*

*Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Electronique*

### *Thème*

***Conception et réalisation d'une commande  
MPPT par la méthode P&O à base d'un  
microcontrôleur PIC16F876***

**Proposé et dirigé par**

**M. C.LARBES**

**Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique**

**Présenté par**

**DAHMANI Mohamed**

*Promotion 2014*

**ENP : 10, Avenue Hacène Badi, El Harrach, Alger**

# Remerciements

Au terme de ce travail,

J'adresse mes remerciements à Monsieur Chérif LARBES Professeur à l'École Nationale Polytechnique, pour l'appui scientifique et pour sa disponibilité durant la préparation de mon projet de fin d'études ainsi que pour tout le savoir qu'ils m'a transmis durant ces deux années.

Je tiens également à remercier Monsieur Rachid ZERGUI docteur à l'École Nationale Polytechnique, de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Je remercie aussi Monsieur M. Mourad HADDADI professeur à l'École Nationale Polytechnique, d'avoir accepté d'examiner et évaluer ce travail.

Je tiens à remercier Mr A.Elhamid LOUKRIZ doctorant à l'École Nationale Polytechnique pour son aide pendant notre réalisation ainsi que Mr Ahmed BENYAHIA ingénieur de Labo d'Electronique et tout les enseignants de l'École Nationale Polytechnique spécialement ceux du département d'Électronique, pour leur encadrement tout au long de notre formation.

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents à qui je dois mon parcours jusqu'à présent ;ce travail n'est que l'aboutissement de leurs efforts et leur contribution.*

*A mes chers frères et sœurs et leurs petites familles à qui je souhaite beaucoup plus de succès, sans oublier mes très chers amis.*

*Et à toute la promotion des électroniciens 2014*

***Mohamed***

## ملخص

الطاقة الشمسية الضوئية هي إحدى الطاقات المتجددة والنظيفة. ويمكن أن يكون لها تأثير كبير في المستقبل القريب، واستبدال الأحفورية بشكل جزئي إذا تم حل مشكل التكلفة العالية والكفاءة المنخفضة. بهدف تحسين تقنيات أدائها و تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) للوحدات الضوئية. يهدف العمل المنجز في هذا المشروع دراسة وتصميم وتنفيذ عنصر تحكم MPPT. ويستند هذا الأخير على خوارزمية التشويش والمراقبة (P & O). وذلك باستخدام متحكم PIC16F876 ومحول DC-DC من نوع Buck-boost. يتم وصف مختلف مراحل التصميم والتنفيذ في هذه المذكرة.

كلمات مفتاحية : وحدة كهروضوئية, MPPT, محول DC-DC, ميكروكونتروالر PIC16F876 .

## Résumé

L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable et propre. Elle pourrait avoir un grand impact dans un avenir proche et se substituer partiellement aux énergies fossiles si les problèmes de son coût élevé et de son faible rendement sont résolus. Dans l'objectif d'améliorer son rendement les techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) des modules photovoltaïques sont utilisées. Le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études a pour objectif d'étudier, de concevoir et de réaliser une commande MPPT. Cette dernière est basée sur l'algorithme perturber et observer (P&O). Un microcontrôleur PIC16F876 et un convertisseur DC-DC de type Buck-Boost sont utilisés dans la réalisation hardware. Les différentes étapes de conception et de réalisation sont décrites dans ce mémoire.

**Mots-clés** : Modules solaires photovoltaïques, MPPT, Convertisseur DC-DC, Microcontrôleur PIC16F876.

## Abstract

The photovoltaic solar energy is a renewable and clean energy. It could have a big impact in the near future and partially replace fossil fuels if the problems of the high cost and low efficiency are resolved. In order to improve its efficiency, techniques of maximum power point tracking (MPPT) of the photovoltaic modules are used. The work carried out within this final year project aims to study, design and implement an MPPT controller. The latter is based on the algorithm perturb and observe (P&O). The PIC16F876 microcontroller and a Buck-Boost DC-DC converter are used in the hardware implementation. The different steps of the design and the implementation are described in this thesis.

Keywords: Solar photovoltaic modules, MPPT, DC-DC converter, Microcontroller PIC16F876.

## Liste des Figures

<b>Figure I.1</b> : Distance terre-soleil photovoltaïque raccordée au réseau.....	5
<b>Figure I.2</b> : Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	5
<b>Figure I.3</b> : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.....	7
<b>Figure I.4</b> : Cellule au Silicium Monocristallin.....	8
<b>Figure I.5</b> : Cellule au Silicium Poly-cristallin .....	8
<b>Figure I.6</b> : Cellule au Silicium amorphe (couche mince).....	9
<b>Figure I.7</b> : Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle connectée une charge...	9
<b>Figure I.8</b> : Caractéristique $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque.....	11
<b>Figure I.9</b> : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un générateur PV en fonction de différentes.....	11
irradiations à $T=25^{\circ}\text{C}$	
<b>Figure I.10</b> : Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un générateur PV en fonction de différentes...	12
températures à $S=1000 \text{ w/m}^2$	
<b>Figure I.11</b> : Caractéristiques du groupement série des modules photovoltaïques.....	13
<b>Figure I.12</b> : Caractéristiques du groupement parallèle des modules photovoltaïques.....	13
<b>Figure I.13</b> : Caractéristique d'un groupement mixte.....	14
<b>Figure I.14</b> : Exemples d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en	
.parallèles avec leurs diodes de protections.....	15
<b>Figure I.15</b> : Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.....	16
<b>Figure I.16</b> : Installation ou centrale électrique.....	17
<b>Figure II.1</b> : Signal PWM pour la commande de l'interrupteur (transistor).....	20
<b>Figure II.2</b> : Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Buck.....	21
<b>Figure II.3</b> : Circuits équivalents de Buck, S fermé en (a), S ouvert en (b).....	22
<b>Figure II.5</b> : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck.....	25
<b>Figure II.6</b> : Circuit électrique d'un convertisseur Boost.....	26
<b>Figure II.7</b> : Circuits équivalents de Boost, S fermé en (a), S ouvert en (b).....	26
<b>Figure II.8</b> : Schéma électrique du convertisseur Buck-Boost.....	29
<b>Figure II.9</b> : Circuits équivalents du buck-boost, S fermé (a), S ouvert (b).....	29
<b>Figure III.1</b> : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	33

<b>Figure III.2 :</b> Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal.....	34
<b>Figure III.3 :</b> Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence en fonction de tension à circuit ouvert du panneau.....	36
<b>Figure III.4 :</b> Principe de la méthode à contre réaction de tension avec cellule pilote.....	37
<b>Figure III.7 :</b> Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction de $I_{sc}$ .....	37
<b>Figure III.8 :</b> $dP/dV$ à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance.....	39
<b>Figure III.9 :</b> Organigramme de la méthode P&O.....	40
<b>Figure III.10 :</b> Divergence de la méthode P&O.....	41
<b>Figure III.11 :</b> Organigramme de le méthode IncCond.....	43
<b>Figure IV. 1 :</b> Modélisation du panneau PV.....	45
<b>Figure IV.2 :</b> Variations du courant, de la tension et de la puissance à l'entrée et à la sortie du hacheur en fonction de l'irradiation.....	46
<b>Figure IV.3 :</b> Schéma synoptique des différent étages de la carte de commande MPPT.....	48
<b>Figure IV.4 :</b> Circuit d'alimentation de 5 volts et alimentation symétrique $\pm 12$ .....	49
<b>Figure IV.5 :</b> Schema du hacheur à réaliser.....	51
<b>Figure IV.6 :</b> Brochage du MOSFET.....	51
<b>Figure 1.7 :</b> Câblage du driver IR2118.....	52
<b>Figure IV.8 :</b> Brochage d'optocoupleur.....	52
<b>Figure IV.9 :</b> Capteur de Tension.....	53
<b>Figure IV.10 :</b> Capteur de courant LA55-p.....	53
<b>Figure IV.11 :</b> Fonctionnement d'un capteur à effet hall.....	54
<b>Figure IV.12 :</b> Chaine de mesure de courant .....	55
<b>Figure IV.13 :</b> structure interne d'un PIC.....	55
<b>Figure IV.14 :</b> Structure du schéma électrique.....	57
<b>Figure IV.15 :</b> Prototype du hacheur réalisé .....	57
<b>Figure IV.16 :</b> Signal PWM et tension de sortie du Hacheur « 1er test ».....	58
<b>Figure IV.17 :</b> Signal PWM et tension de sortie du Hacheur « 2emme test ».....	58
<b>Figure IV.18 :</b> Signal pwm et tension de sortie du hacheur 3emme test .....	59
<b>Figure IV.19 :</b> Tension aux bornes de l'inductance.....	59
<b>Figure IV.20 :</b> Changement du signal PWM.....	61

# Nomenclature

$f_s$	: Fréquence de commutation
$T_s$	: Période de commutation
D	: Rapport cyclique
DC	: Direct Curent
$I_x$	: Courant pour la lettre X
$V_x$	: Tension pour la lettre X
$P_x$	: Puissance pour la lettre X
L	: Inductance
C	: Condensateur
M	: Rapport de conversion
W	: Energie dans l'inductance
K	: Interrupteur électronique
$T_{on}$	: Temps de fermeture de K
$t_{off}$	: Temps d'ouverture de K
$\eta$	: Rendement
PV	: Photovoltaïque
GPV	: Générateur Photo Voltaïque
PPM	: Point de Puissance Maximum
MPPT	: Maximum Power Point Tracker
P&O	: Perturbation and Observation
$I_{ph}$	: photo-courant
$I_s$	: courant de saturation
T	: Température

q : la constante de charge élémentaire d'électron

k : constante de Boltzmann

n1, n2 : facteurs d'idéalité de la diode

Vco : Tension en circuit ouvert

Icc : Le courant de court-circuit

PWM : Pulse Width Modulation

MOSFET : Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor

G : Grille/ Gate

S : Source

Tr : temps de montée (rise time)

tf : temps de décroissance (fall time)

ton : temps de la mise en conduction (turn-on time)

toff : temps de la mise en blocage

Rth : Résistance thermique.

CB : Capacité de Bootstrap

PIC : Program Interface Controller

RISC : Reduce Instructions Construction Set

μC : Microcontrôleur



## SOMMAIRE

Résumé	
Liste de figures	
Nomenclature	
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïque</b>	
<b>I.1.Introduction .....</b>	<b>3</b>
I.2. Energie solaire.....	4
I.3. Rayonnement solaire.....	4
<b>I.4.Conversion photovoltaïque .....</b>	<b>5</b>
I.4.1 .L'effet photovoltaïque .....	6
I.4.2. Le principe de conversion photovoltaïque .....	6
I.4.3.Rendement Photovoltaïque .....	7
<b>I.5. La cellule solaire .....</b>	<b>7</b>
I.5.1.Définition .....	7
I.5.2.Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques .....	8
I.5.2.1.Cellule au silicium monocristallin .....	8
I.5.2.2.Cellule au silicium poly-cristallin .....	8
I.5.2.3. Cellule au silicium amorphe .....	8
I.5.3.Modèle électrique d'une cellule solaire .....	9
<b>I-6. Module photovoltaïque .....</b>	<b>10</b>
I.6.1. Caractéristique d'un module solaire.....	10
I.6.2. Association de modules photovoltaïques .....	12
I.6.3. Protections d'un GPV .....	14
<b>I.7. Les Différents Types de Systèmes Photovoltaïques.....</b>	<b>15</b>
<b>I.8. avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....</b>	<b>17</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>18</b>
<b>Chapitre II : Les convertisseurs DC-DC (Les hacheurs )</b>	
<b>II.1.Introduction .....</b>	<b>20</b>
II.2.Types de convertisseurs .....	20
<b>II.2.1. Hacheur dévolteur « Buck » .....</b>	<b>21</b>

# Sommaire

---

II.2.1.1. Modèle mathématique équivalent .....	22
II.2.1.2. Les ondulations des courants et des tensions .....	23
II.2.1.3. Etude en régime continu .....	24
II.2.1.4. Rapport de conversion et rendement .....	24
<b>II.2.2. Hacheur survolteur « Boost » .....</b>	<b>26</b>
II.2.2.1. Modèle mathématique équivalent .....	26
II.2.2.2. Les ondulations des courants et des tensions .....	27
II.2.2.3. Etude en régime continu .....	28
II.2.2.4. Rapport de conversion et rendement .....	28
<b>II.2.3. Hacheur buck-boost.....</b>	<b>29</b>
II.2.3.1. Modélisation mathématique .....	29
II.2.3.2. Les ondulations des courants et des tensions.....	30
II.2.3.4. Rapport de conversion et rendement .....	31
II.2.3.3. Etude en régime continu .....	31
<b>Conclusion</b>	
<b>Chapitre III : Poursuite du point de puissance maximale</b>	
III.1.Introduction.....	33
III.2.Principe de la recherche du point de puissance maximal .....	33
<b>III.3. Méthodes de poursuite du point de puissance maximal.....</b>	<b>35</b>
III.3.1 Méthodes à contre réaction de tension .....	35
III.3.1.1.Méthode à tension de référence fixe .....	35
III.3.1.2 Méthode à tension de référence en fonction de Voc .....	35
III.3.1.3. Méthode à Tension de référence externe (Cellule pilote) .....	36
III.3.2. Méthodes à contre réaction de courant.....	37
III.3.2.1.. Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit Isc ..	37
III.3.2.2. Méthode à courant de référence externe (Cellule pilote) .....	38
III.3.3. Méthodes à contre réaction de puissance .....	38
III.3.3.1. Algorithme Perturbation et Observation (P&O) .....	38
III.3.3.2.Algorithme de l'Incrémentation de la Conductance (IncCond) .....	41
<b>III.3.4.Autres méthodes.....</b>	<b>43</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>44</b>
<b>Chapitre IV : Réalisation et résultats pratiques</b>	
Introduction .....	46
IV.1.Résultats de simulation .....	46

# Sommaire

---

IV.1.2. Interprétation des résultats .....	48
IV.1.3. Conclusion .....	48
IV.2. Réalisation et résultat expérimentaux .....	49
IV.2.1. Etage d'alimentation .....	50
IV.2.2. Le convertisseur DC/DC (Hacheur Buck-Boost) .....	50
IV.2.2.1. Calcul des composants de la carte de puissance .....	50
IV.2.2.1.1. La bobine .....	50
IV.2.2.1.2. Les Condensateurs .....	51
IV.2.2.1.3. La diode .....	51
IV.2.2.1.4. Le MOSFET .....	52
IV.2.3. Partie commande .....	52
IV.2.3.1. Driver du MOSFET .....	52
IV.2.3.2. L'optocoupleur .....	52
IV.2.3.3. Etude des capteurs .....	53
IV.2.3.3.1. capteur de tension .....	53
IV.2.3.3.2. capteur de courant .....	53
IV.2.3.4. Choix du pic .....	54
IV.2.3.4.1. Généralités sur les microcontrôleurs .....	56
IV.2.3.4.2. structure interne d'un microcontrôleur .....	56
IV.2.3.4.3. Critères de Choix du microcontrôleur PIC .....	57
IV.2.3.4.4. justification du choix du pic16F876 .....	57
IV.2.4. Structure du schéma électrique .....	57
IV.2.5. Réalisation et essais expérimentaux .....	57
IV.2.5.1. Réalisation de la carte de puissance (hacheur Buck-boost) .....	58
IV.2.5.2. tests effectués .....	59
IV.2.5.2.1. test du convertisseur DC-DC .....	59
IV.2.5.2.2. Estimation des pertes du convertisseur DC-DC .....	61
IV.2.5.2.3. Application à un GPV .....	62
Conclusion .....	62
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>63</b>

## **Bibliographie**

## *Introduction générale*

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

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

D'après l'Agence Internationale de l'Énergie « AIE », une surface de 145.000km<sup>2</sup>, soit 4% de la surface des déserts arides de modules photovoltaïques, suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux [1].

L'Algérie se situe dans l'une des régions les plus ensoleillées du monde, elle bénéficie d'une forte capacité d'exportation de l'énergie électrique solaire. La surface du désert seul est estimée à plus d'un million et demi de km<sup>2</sup> : un potentiel géant en énergie solaire, cette dernière, si elle est bien exploitée, peut facilement couvrir, à elle seule tout le besoin national en terme d'énergie électrique. Au-delà de toutes considérations hypothétiques, il apparaît que le photovoltaïque se présente comme une solution d'avenir car il offre une multitude d'avantages.

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

Une adaptation de puissance entre la source et la charge s'avère importante pour un meilleur fonctionnement et afin d'assurer la fiabilité du système. Avec le développement d'une électronique de puissance spécifique dédiée aux applications photovoltaïques, beaucoup de systèmes de conversion innovants ont été conçus, notamment des onduleurs ayant des étages d'adaptation en entrée assurant la recherche du PPM. En effet, ces dispositifs permettent aujourd'hui d'adapter et d'optimiser la production photovoltaïque par le biais de convertisseurs de puissance DC-DC insérés entre les modules photovoltaïques et l'entrée de l'onduleur.

Ainsi, des hacheurs réalisant la conversion DC-DC ont été utilisés pour maximiser l'énergie pouvant être soutirée des panneaux photovoltaïques grâce à un contrôle MPPT, mais également pour adapter le niveau de tension du générateur PV à celui du bus continu. Un onduleur est nécessaire pour réaliser la conversion DC-AC, commandé en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

L'objectif de ce travail a pour de réaliser un convertisseur DC-DC de type buck\_boost (survolteur-dévolteur) muni d'une commande **MPPT** numérique par la méthode perturbation et observation à l'aide d'un microcontrôleur.

Le premier chapitre est consacré à une synthèse de différentes caractéristiques d'un système photovoltaïque ainsi que le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque.

Dans le second chapitre, nous allons étudier la partie puissance et commande des convertisseurs à courant continue « Buck » dévolteur, « Boost » survolteur, « Buck – Boost » survolteur- dévolteur présentant le model mathématique de chaque convertisseur ainsi que son fonctionnement.

Dans le troisième chapitre, on présentera les méthodes MPPT et en particulier la méthode perturbe and observe.

le dernier chapitre est consacré à la simulation du convertisseur DC-DC et la commande MPPT puis la réalisation électronique présentant tout les détails ainsi que les résultats obtenus. Et on termine par une conclusion générale et perspective.

***Chapitre I :***  
***Généralités sur les systèmes***  
***photovoltaïques***

**I.1.Introduction :**

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Elles regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Il existe plusieurs types de sources d'énergies renouvelables parmi eux : l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Les sources d'énergies renouvelables proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies ensuite avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant des batteries pour stocker d'énergie électrique qui sera utilisée pendant les heures sans soleil [3].

**I.2. Energie solaire :**

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure, pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à 1367W/m<sup>2</sup>. [3][4]

En une heure, la terre reçoit suffisamment d'énergie du soleil ( $1,2 \cdot 10^{17}$  Watts heures) pour combler ses besoins pour presque une année. Ce qui fait du soleil une source d'énergie inépuisable. Les panneaux solaires photovoltaïques permettent de profiter de cette énergie gratuite en la transformant en énergie électrique. La figure I.1 illustre la distance séparant la terre du soleil.

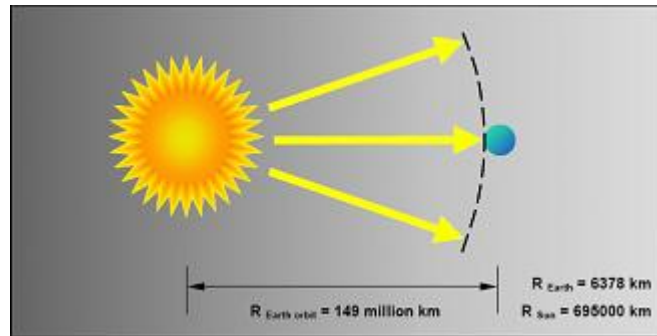


Figure I.1 : Distance terre-soleil

### I.3. Rayonnement solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de  $0,22 \mu\text{m}$  à  $10 \mu\text{m}$ . La figure (I-2) représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement en :

- 9% dans la bande des ultraviolets ( $<0,4 \mu\text{m}$ ),
- 47% dans la bande visible ( $0,4$  à  $0,8 \mu\text{m}$ ),
- 44% dans la bande des infrarouges ( $>0,8 \mu\text{m}$ )

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de  $1,37$  kilowatt au mètre carré ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ), à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement  $1200 \text{ W}/\text{m}^2$  [5][6].

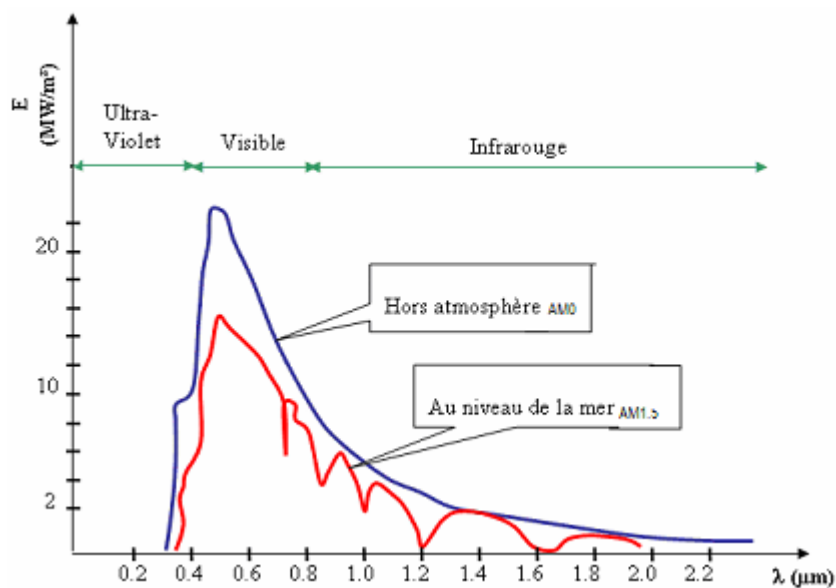


Figure I.2 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [6]



**I.4. Conversion photovoltaïque :**

La possibilité de transformer directement l'énergie lumineuse, et en particulier le rayonnement solaire en énergie électrique est apparue en 1954 avec la découverte de l'effet photovoltaïque. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière permettant la transformation de l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire ou photopile, est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque.

**I.4.1. L'effet photovoltaïque :**

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

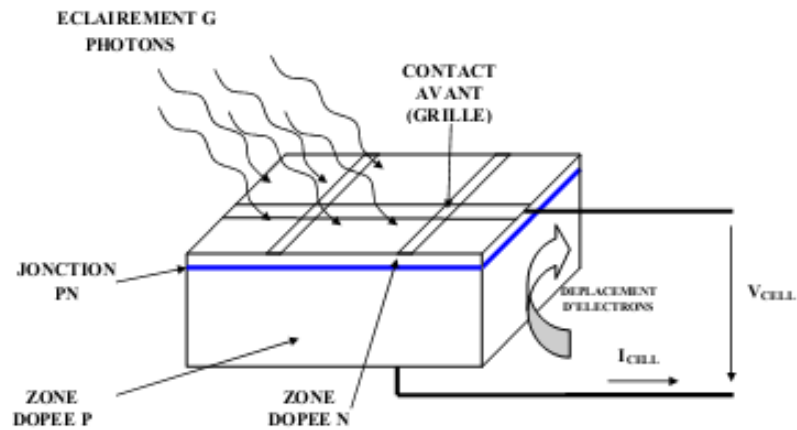
L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Telephone, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [7].

**I.4.2. Le principe de conversion photovoltaïque :**

✓ Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque?

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un paire électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule figure (I.3) [9].



**Figure I.3 :** Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.

### I.4.3. Rendement Photovoltaïque :

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques, il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Le rendement est aussi le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire.

Il caractérise ces composants et définit leur performance. Le rendement est fonction du type de semi-conducteur utilisé et est directement lié au «band gap». Pour le silicium cristallin, le rendement théorique maximum est de 44 % . Le silicium n'est pas le meilleur matériau, son «band gap» est de 1.10 eV, celui de l'arséniure de gallium (GaAs) a un «band gap» quasi optimal de 1.4 eV. Le rendement commercial des cellules monocristallines est de l'ordre de 12 à 17 % maximum.

Les principales pertes sont dues à :

- ✓ une absorption incomplète des photons.
- ✓ la réflexion optique à la surface des cellules, c'est la raison pour laquelle une couche antireflet ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ...) est déposée à la surface des cellules.
- ✓ pertes dues à la résistance série (résistance de contact des deux grilles). [5][6]

## I.5. La cellule solaire :

**I.5.1. définition :** Les cellules photovoltaïques 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 [5].

### I.5.2. Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques :

### I.5.2.1. Cellule au silicium monocristallin :

Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal, figure I.4. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie. Il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Le rendement de ce type des cellules est de 13 à 17% [7].

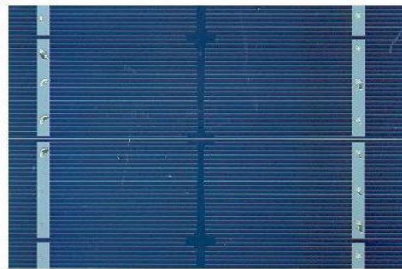


Figure I.4 : Cellule au Silicium Monocristallin

### I.5.2.2. Cellule au silicium poly-cristallin :

Les panneaux PV avec des cellules polycristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations (figure I.5) différentes des cristaux (tonalités différentes).

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines [7].



Figure I.5 : Cellule au Silicium Poly-cristallin

### I.5.2.3. Cellule au silicium amorphe :

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement.

Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Figure I.6 [7].

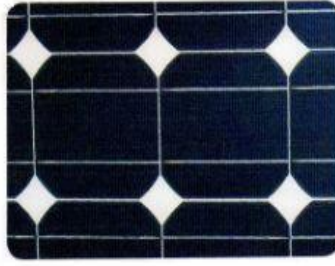


Figure I.6 : Cellule au Silicium amorphe (couche mince)

### I.5.3. Modèle électrique d'une cellule solaire-model précis :

Comme il a été déjà mentionné, dans une cellule solaire illuminée, il se crée des porteurs de charges libres. Le nombre de ces porteurs de charge est proportionnel à l'intensité du rayonnement incident. Il en est de même pour le photo courant à l'intérieur de la cellule. Par conséquent, le modèle précis d'une cellule solaire peut être représenté par le circuit électrique équivalent illustré sur la figure I.7. 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, deux résistances parasites sont prises en considération pour une description plus exacte. 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.

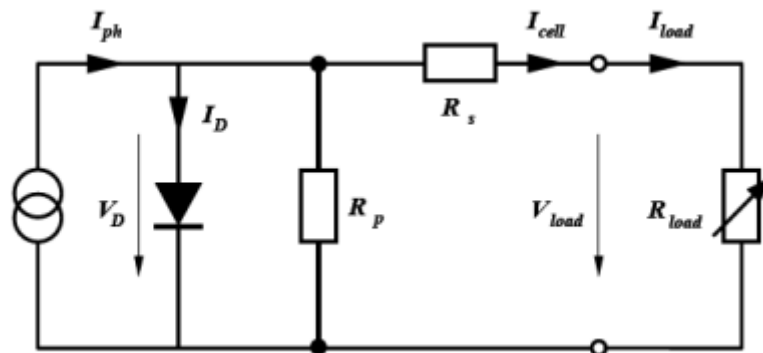


Figure I.7 : Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire connectée à une charge. Avec :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - \frac{V_D}{R_p} \quad (I.1)$$

Tel que  $I_D = I_s \left( e^{\frac{qV_{cell}}{nkT}} - 1 \right)$  (I.2)

Et  $V_D = V_{cell} + R_s I_{cell}$  (I.3)

Donc :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V_{cell} + R_s I_s}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \quad (I.4)$$

Avec  $V_{th}$  est la tension thermique

$$V_{th} = \frac{nKT}{q}$$

Et :

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

$q$  : charge électrique élémentaire [ $1,6 \cdot 10^{-19}$  As]

$I_{ph}$  : photo-courant

$K$  : constant de Boltzman =  $1,381 \cdot 10^{-23}$  j/K

$I_D$  : courant à travers la diode

$n$  : facteur d'idéalité de la jonction

$V_D$  : tension à la borne de la diode

$I_s$  : courant de saturation de la jonction non éclairée

$R_p$  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) [5].

## I-6 Module photovoltaïque :

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  ou la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ . Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle [6].

### I.6.1. Caractéristique d'un module solaire:

#### I.6.1.1. Caractéristiques courant-tension :

La figure I.8 représente la courbe  $I=f(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température. L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ .

Le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point  $P_m$  où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie. Pour cela, certains régulateurs solaires sont utilisés pour réaliser une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point  $P_m$ . [6]

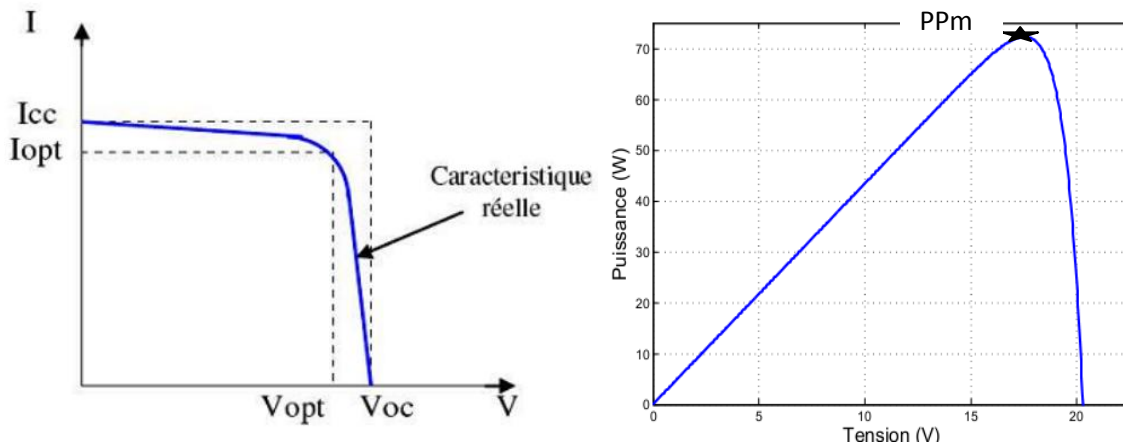


Figure I.8 : Caractéristique  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  d'un module photovoltaïque.

**I.6.1.2. Influence de l'éclairement sur les courbes  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  :**

La figure I.9 présente un exemple de courbes pour différents niveaux de rayonnement à une température de  $25^{\circ}C$ .

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais est légèrement variée pour des valeurs plus élevées d'éclairement.

Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule ( $P_m$ ) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissances maximales se situent à peu près à la même tension.

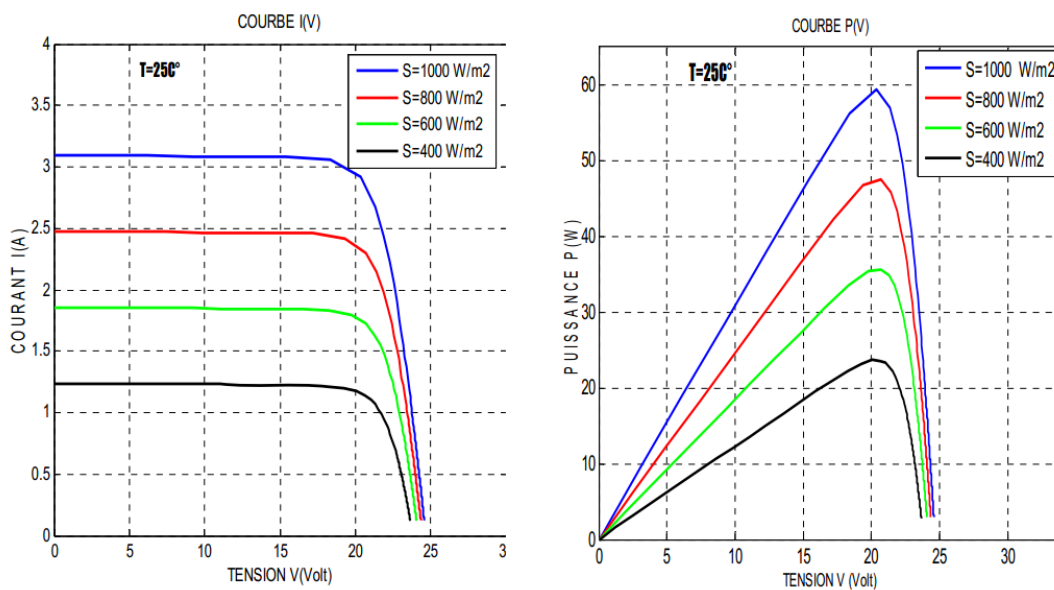
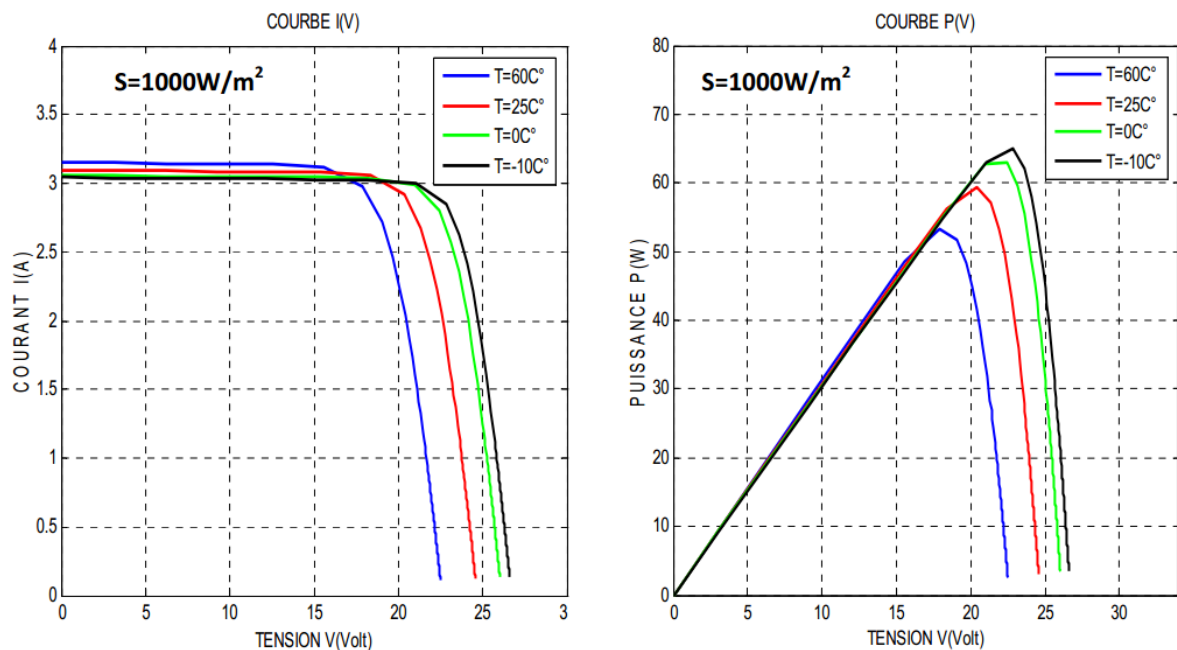


Figure I.9 : Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un générateur PV en fonction de différentes irradiations à  $T=25^{\circ}C$

### I.6.1.3. Influence de la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ :

La figure I.10 présente des courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  pour différentes températures de fonctionnement et avec une irradiation constante  $1000\text{w/m}^2$ . On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du module diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de  $25^\circ\text{C}$  [6].



**Figure I.10** : Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  d'un générateur PV en fonction de différentes températures à  $S=1000\text{ w/m}^2$

## I.6.2. Association de modules photovoltaïques :

### I.6.2.1 Groupement en série :

Dans un groupement de  $n_s$  modules en série tous sont traversés par un même courant. La Figure ci-dessous montre la caractéristique résultante ( $I_{sc}$ ,  $V_{sco}$ ) d'un tel groupement dans des conditions idéales, obtenue pour  $n_s$  module identiques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ) en sommant les caractéristiques élémentaires à courant constant :  $V_{sco} = n_s \cdot V_{co}$ . (figure I.11) [7].

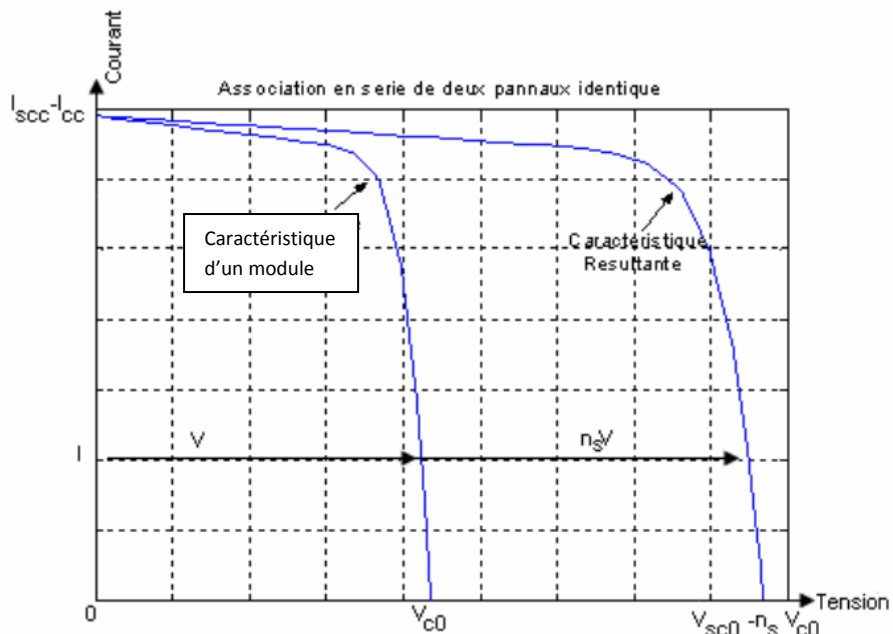


Figure I.11 : Caractéristiques du groupement série des modules photovoltaïques

I.6.2.2 Groupement en parallèle :

Dans un groupement en parallèle figure (I.12), les modules étant soumis à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

$I_{pcc} = n_p I_{cc}$ : le courant de court-circuit.

$V_{pco} = V_{co}$ : la tension de circuit ouvert.

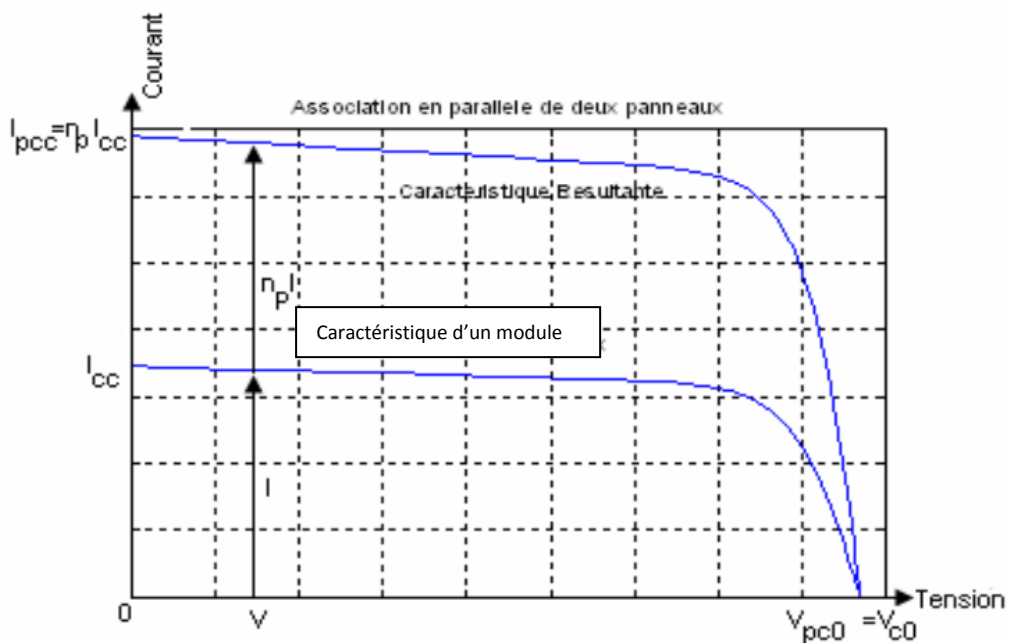


Figure I.12 : Caractéristiques du groupement parallèle des modules photovoltaïques



### I-6.2.3. Groupement mixte (série-parallèle) :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série – Parallèle, pour  $n_s$  et  $n_p$  respectivement les nombres totaux de modules en série et en parallèle.

$I_{gcc} = n_p \cdot I_{cc}$ : courant de court-circuit du générateur résultant.

$V_{gco} = n_s \cdot V_{co}$ : tension du circuit ouvert du générateur résultant.

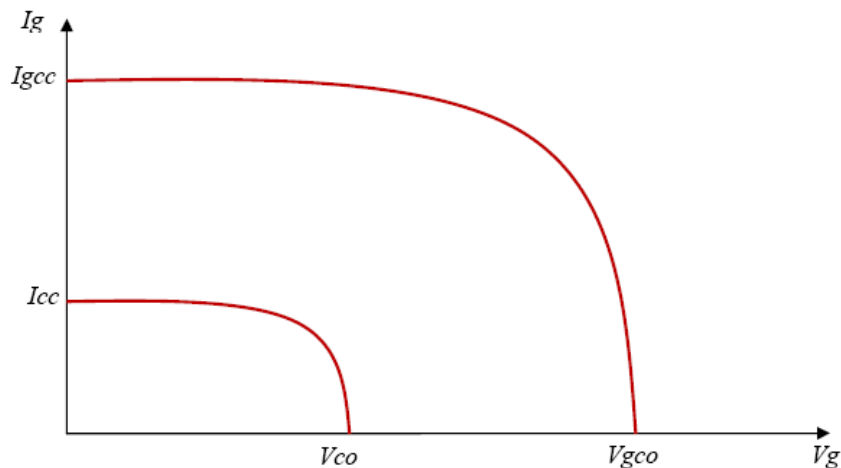
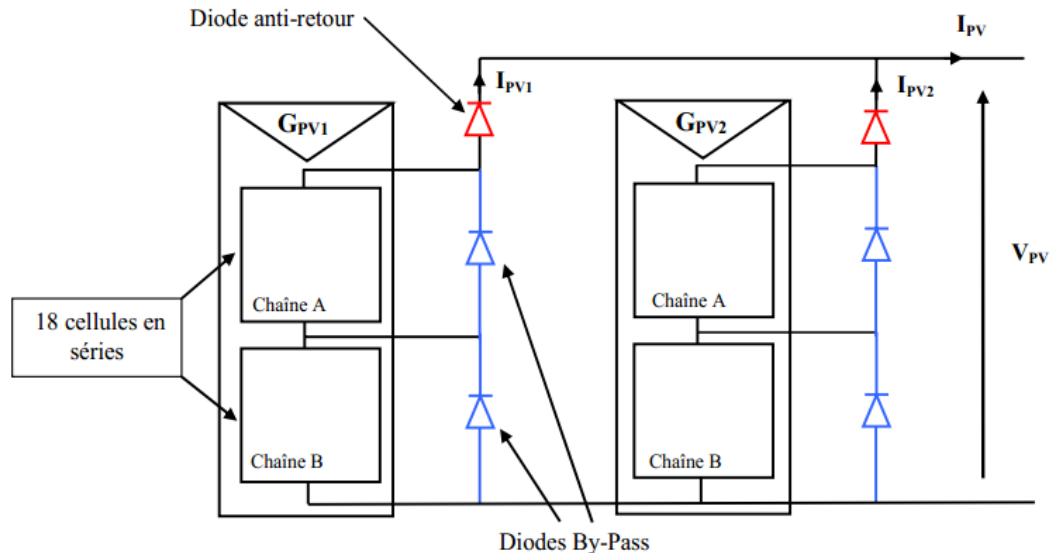


Figure I.13 : Caractéristique d'un groupement mixte.

### I.6.3. Protections d'un GPV :

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules photovoltaïques afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles (figure I.14) :

- la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance [8].



**Figure I.14** : Exemples d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèles avec leurs diodes de protections.

## I.7. Les Différents Types de Systèmes Photovoltaïques

### I.7.1. Alimentations électriques faibles puissances

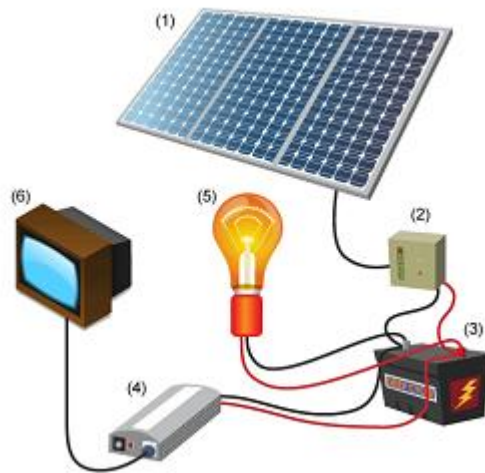
Il s'agit des alimentations électriques faibles telles que les calculatrices ou les chargeurs de piles. Des modules photovoltaïques (PV) peuvent faire fonctionner n'importe quel appareil alimenté par des piles.

### I.7.2. Installations électriques photovoltaïques autonomes

En site isolé, le champ photovoltaïque (1) (figure I.15) peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système de régulation (2) et une batterie (3) d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du Soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques.

Le régulateur de charge (2) a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie. En site isolé, on peut aussi utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif (6). Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur (4).

On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes, comme les balises en mer, les lampadaires urbains, le pompage solaire et les maisons en sites isolés.



**Figure I.15 :** Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.

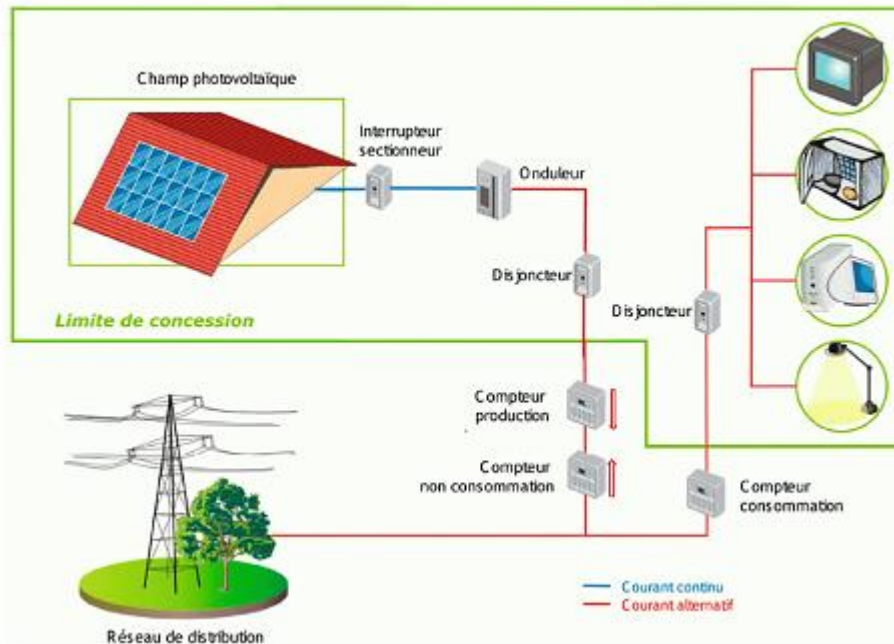
La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales ou sahariennes, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens.

Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits.[5]

### **I.7.3. Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau :**

Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.

Deux compteurs d'énergie sont nécessaires : un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation[5].



**Figure I.16 :** Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau

#### I.7.4. Installations ou centrales électriques photovoltaïques hybride :

Il s'agit de systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes telle une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération en plus du générateur photovoltaïque. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise.

#### I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont:

- Sa gratuité.
- Pas de pollution.
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Son coup de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.

Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont :

- Le coût élevé de l'installation
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.

- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre on a présenté des notions générales sur les systèmes photovoltaïques, synthèse d'assemblage des modules et une spécification des différentes zones de fonctionnement et les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Afin de rendre cette énergie exploitable des équipements complémentaires sont nécessaires tel que les régulateurs de charge, les convertisseurs DC/DC, DC/AC...Le chapitre suivant présente les convertisseurs DC-DC.

***Chapitre II***  
***Les convertisseurs DC-DC***  
***(Les Hacheurs)***

## II.1.Introduction :

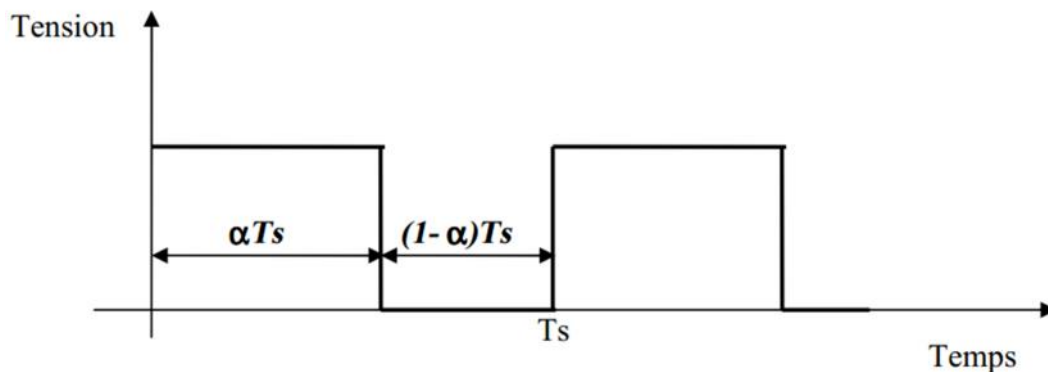
Les hacheurs sont des convertisseurs statiques de type continu-continu. Leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse. Ce type de convertisseurs n'est constitué que d'interrupteur et éléments réactifs (Selfs. Capacités) qui dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [12].

Dans cette partie nous essayons de présenter quelques détail convertisseurs DC/DC utilisés dans les systèmes photovoltaïque ainsi que les models mathématiques qui en dérivent.

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commandé par un signal PWM (Pulse Wide Modulation) ayant une fréquence constante ( $f_s$ ) et un rapport cyclique variable ( $\alpha$ ). Le temps de fermeture égal à  $\alpha T_s$  et le temps d'ouverture est égal à  $(1-\alpha)T_s$  (figure I.1) Où :

$T_s$  est la période de commutation qui est égale à  $1 / f_s$  .

$\alpha$  représente le rapport cyclique du commutateur  $0 < \alpha < 1$



**Figure II.1** : Signal PWM pour la commande de l'interrupteur (transistor).

## II.2.Type de convertisseurs :

Il existe différents types de convertisseurs DC-DC. Une première distinction est à faire entre le convertisseur à isolement galvanique entre la sortie et l'entrée, et le convertisseur qui présente une borne commune entre l'entrée et la sortie.

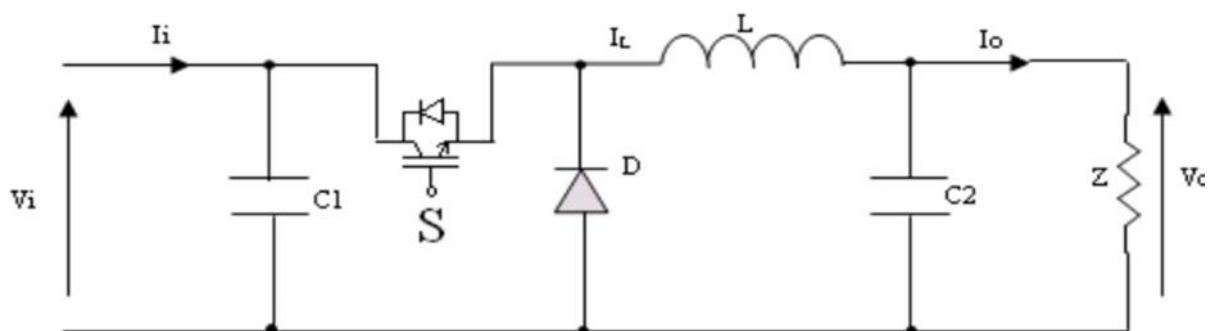
Notez que dans le cas de l'isolement galvanique le rendement se verra affecté d'au moins 10%, ce qui est inadmissible dans notre cas pour des applications en énergie photovoltaïque. Dans les convertisseurs à stockage d'énergie, on distingue :

- Les convertisseurs élévateurs (BOOST) dans lesquels  $V_e > V_s$ .
- Les convertisseurs abaisseurs (BUCK) dans lesquels  $V_e < V_s$ .
- Il y a aussi le type (BUCK-BOOST) : mélange entre les deux précédents. qui comporte plusieurs topologies comme le BUCK-BOOST classique, tel que  $V_s$  est inversée par rapport à  $V_e$  par exemple : le FLYBACK.FORWARD...[10].

### II.2.1. Hacheur dévolteur « Buck » :

Le convertisseur Buck est un convertisseur de puissance de type DC-DC, appelé aussi « abaisseur », il permet d'obtenir sur ses bornes de sortie une tension inférieure à la tension d'entrée, mais son courant de sortie est plus élevé. Ce convertisseur appartient à la famille des alimentations à découpage, il est constitué d'une cellule de commutation formée par deux semi-conducteurs, dont l'un possède un amorçage commandé par exemple un transistor MOSFET et l'autre une commande spontanée (une diode) (figure II.2) [13].

Le transistor MOSFET travaille en régime de commutation avec une période  $T_s$ . Dans la première fraction  $T_s$  le transistor est dans un état de saturation et la diode est bloquée, alors l'inductance  $L$  se charge d'énergie avec augmentation du courant  $I_L$ , Dans la deuxième fraction de temps  $(1 - \alpha)T_s$  l'inductance  $L$  libère cette énergie à la charge  $Z$  avec une diminution de courant  $I_L$ . Alors le circuit est décomposé en deux circuits linéaires qui correspondent à chaque état du transistor  $S$ . figure II.3 [12].



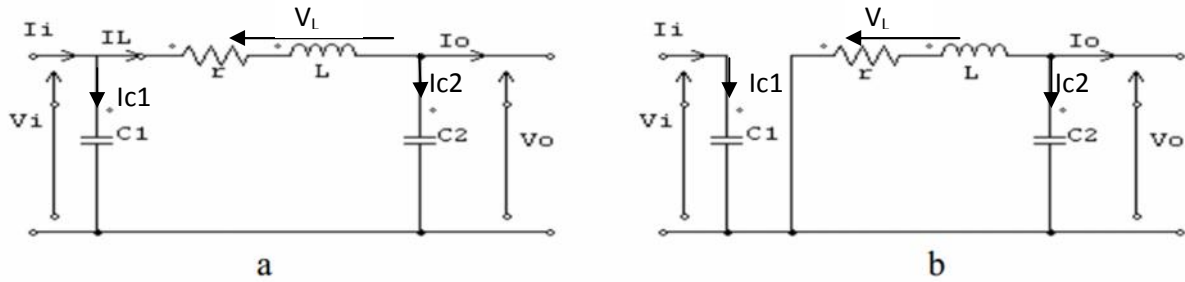
**Figure II.2** : Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Buck.

#### II.2.1.1. Modèle mathématique équivalent :

Pour extraire le modèle mathématique du convertisseur, il faut l'étudier dans les deux phases de fonctionnement ( $S$  fermé, et  $S$  ouvert), puis faire un modèle approximé qui englobe



les différentes grandeurs moyennes d'entrée et de sortie du convertisseur. La figure ci-dessous représente les circuits équivalents du convertisseur buck dans les deux cas.



**Figure II.3 :** Circuits équivalents de Buck, S fermé en (a), S ouvert en (b).

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure II.3, on obtient les systèmes d'équations suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L - i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} + r i_L = v_i - v_o \end{array} \quad 0 < t < T_S \quad (a) \quad (II.1) \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_L - i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} + r i_L = -v_o \end{array} \quad T_S < t < (1 - \alpha) T_S \quad (b) \quad (II.2) \right.$$

Pour trouver une représentation dynamique valable sur toute la période  $T_s$ , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{T_S} = \frac{dx}{dt}_{(\alpha T_S)} \alpha T_S + \frac{dx}{dt}_{(1-\alpha) T_S} (1 - \alpha) T_S \quad (II.3)$$

Tel que le terme  $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{T_S}$  représente la valeur moyenne de la grandeur  $\frac{dx}{dt}$  sur la période  $T_s$ . En appliquant la relation II.3 sur les systèmes d'équations (II.1) et (II.2), et après

arrangement, on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

Pour :  $0 < t < T_s$

$$\begin{cases} i_o = i_L - C_2 \frac{dv_o}{dt} \\ i_L = \frac{1}{\alpha} \left( i_L - C_1 \frac{dv_i}{dt} \right) \\ v_i = \frac{1}{\alpha} \left( v_o + r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} \right) \end{cases} \quad (\text{II. 4})$$

### II.2.1.2. Les ondulations des courants et des tensions :

Pour le dimensionnement des différents composants du circuit, et afin de minimiser les ondulations des courants et des tensions sans faire un surdimensionnement des composants, ce qui accroîtrait le poids et le prix du circuit, un calcul de ces composants en fonction des ondulations voulues est nécessaire. Cette remarque est très importante pour le dimensionnement de l'inductance L afin de respecter le courant admissible par le MOSFET.

En appliquant la relation  $v = L \frac{di_L}{dt}$  et par l'approximation des segments d'exponentielles par des droites, la pente du courant  $I_L$  pendant la première période de fonctionnement est donnée par :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_L}{L} = \frac{v_i - v_o - r_L i_L}{L} \quad (\text{II. 5})$$

Donc l'augmentation de courant  $i_L$  durant l'état passant  $\alpha T_s$  est donné par :

$$2\Delta I_L = \int_0^{\alpha T_s} \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_i - V_o - r_L I_L}{L} \alpha T_s \quad (\text{II. 6})$$

La valeur de l'inductance L à choisir pour une certaine ondulation  $I_L$  est donnée par :

$$L = \frac{V_i - V_o - r_L I_L}{2\Delta I_L} \alpha T_s \quad (\text{II. 7})$$

Pour le calcul des capacités C1 et C2, et avec les mêmes démarches précédentes nous avons :

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{i_{C1}}{C_1} \approx \frac{I_i - I_L}{C_1} \quad (\text{II. 8})$$

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{i_{C2}}{C_2} \approx \frac{I_i - I_o}{C_2} \quad (\text{II.9})$$

Les valeurs des ondulations crête à crête des tensions d'entrée et de sortie sont :

$$\Delta V_i = \frac{I_i - I_L}{C_1} \cdot \alpha T S \quad (\text{II.10})$$

$$\Delta V_o = \frac{I_i - I_o}{C_2} \cdot \alpha T S \quad (\text{II.11})$$

Les valeurs des condensateurs C1 et C2 peuvent être calculés par :

$$C_1 = \frac{I_i - I_L}{2\Delta V_i} \cdot \alpha T S \quad (\text{II.12})$$

$$C_2 = \frac{I_i - I_o}{2\Delta V_o} \cdot \alpha T S \quad (\text{II.13})$$

### II.2.1.3. Etude en régime continu :

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations II.4 donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_i = I_L \\ I_o = I_L \\ V_i = \frac{1}{\alpha} (V_o + r_L I_L) \end{array} \right. \quad (\text{II.14})$$

### II .2.1.4. Rapport de conversion et rendement :

Le rapport de conversion M est défini comme étant le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée comme :

$$M(\alpha) = \frac{V_o}{V_i} = \eta \alpha \quad (\text{II.15})$$

Où  $\eta$  est le rendement du convertisseur défini comme étant le rapport entre la puissance de sortie sur la puissance d'entrée :

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o I_o}{V_i I_i} \quad (\text{II.16})$$

Les relations II.14 et II.15 donnent :

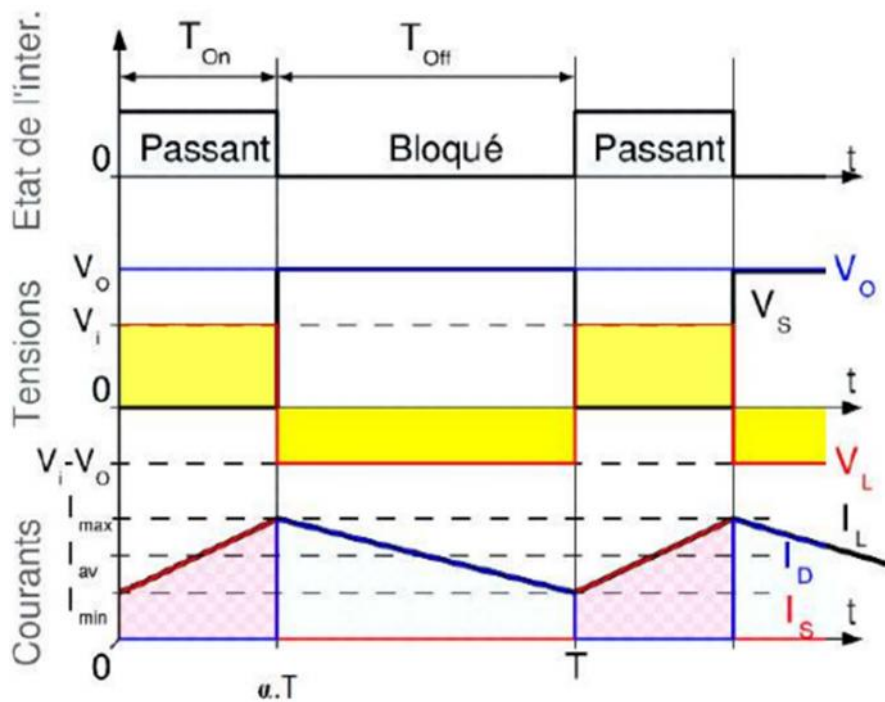
$$M(\alpha) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + \frac{r_L I_L}{V_o}} \alpha = \frac{1}{1 + \frac{r_L}{Z}} \alpha = \eta \alpha \quad (\text{II.17})$$

Avec :  $\eta = 1 / (1 + \frac{r_L}{Z})$  (II.18)

Avec Z l'impédance complexe de la charge.

A partir des relations (II.17) et (II.18) on conclut que le rapport de conversion M reste linéaire en fonction de  $\alpha$  et reste confiné entre zéro et la valeur du rendement, et que des charges Z importantes causent une grande perte dans le transfert de puissance à travers le convertisseur ainsi qu'une tension de sortie faible.

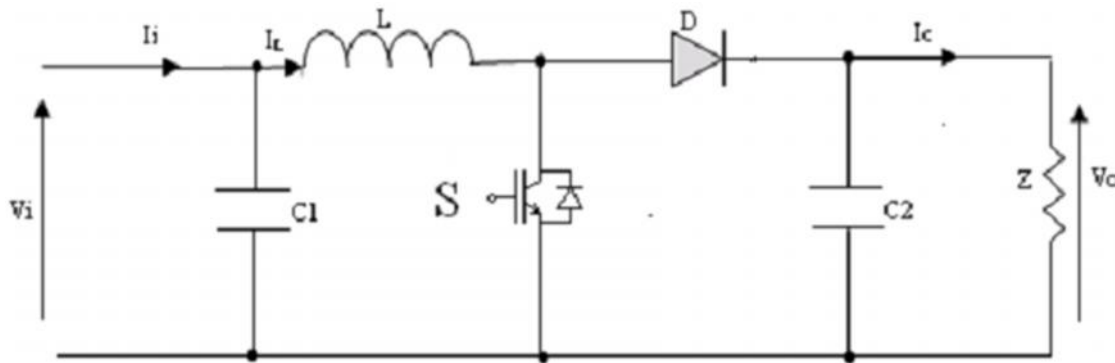
Les formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck sont représentées par la figure II.5 [10].



**Figure II.5 :** Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck

**II.2.2. Hacheur survolteur « Boost » :**

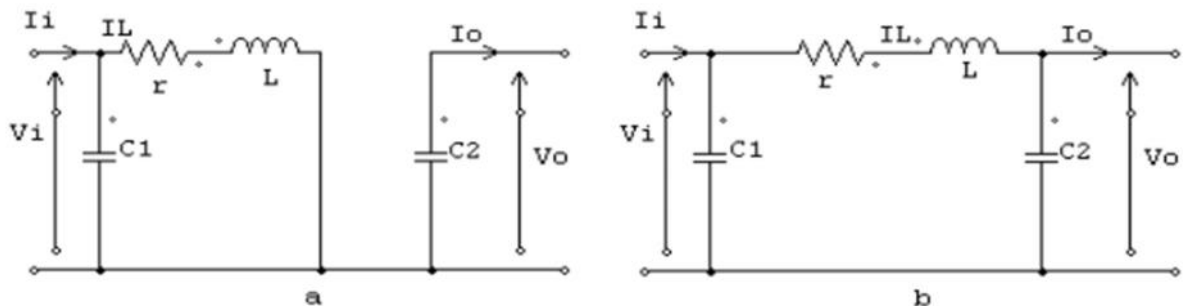
Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension, abaisseur de courant. Le Schéma ci-dessous représente le circuit électrique du Boost. Durant le temps  $T_s$ , le transistor  $S$  est fermé et  $D$  est bloquée, le courant dans l'inductance croît progressivement, au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. Le transistor  $S$  s'ouvre et  $D$  conduit et l'inductance  $L$  délivre le courant  $I_L$  et ainsi génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge  $Z$  à travers la diode  $D$ .



**Figure II.6 :** Circuit électrique d'un convertisseur Boost

**II.2.2.1. Modèle mathématique équivalent :**

Comme pour le circuit Buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents (figure II.7) des deux phases de fonctionnement nous donne :



**Figure II.7 :** Circuits équivalents de Boost, S fermé en (a), S ouvert en (b).

Pour le premier intervalle de temps :  $0 < t < .T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - r_L i_L \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Pour le deuxième intervalle  $\alpha \cdot T_s < t < T_s$

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L - i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - v_o - r_L i_L \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

En appliquant la relation II.3 sur les systèmes d'équations II.19 et II.2, comme pour le buck, on trouve le modèle en valeur moyenne du boost :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1 \frac{dv_i}{dt} \\ i_o = (1 - \alpha) i_L - C_2 \frac{dv_o}{dt} \\ v_i = (1 - \alpha) v_o + r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

### II.2.2.2. Les ondulations des courants et des tensions :

Comme pour le circuit Buck la pente du courant  $I_L$  et des tensions  $V_{C1}$  et  $V_{C2}$  pendant la première intervalle de fonctionnement est donnée par :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{v_L}{L} = \frac{v_i - r_L i_L}{L} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} \approx \frac{i_{C1}}{C_1} = \frac{I_i - I_L}{C_1} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} \approx \frac{i_{C2}}{C_2} = \frac{-I_o}{C_2} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

De la même manière que pour le buck à partir de ces équations et des valeurs crête à crête des courants et des tensions, les composants à choisir pour des ondulations données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} L = \frac{V_i - r_L I_L}{2\Delta I_L} \cdot \alpha T_S \\ C_1 = \frac{I_i - I_L}{2\Delta V_i} \cdot \alpha T_S \\ C_2 = \frac{-I_o}{2\Delta V_o} \cdot \alpha T_S \end{array} \right. \quad (\text{II.23})$$

### II.2.2.3. Etude en régime continu :

Comme pour le circuit Buck, en remplaçant les dérivées des signaux par des zéros, on peut remplacer les signaux du convertisseur par leurs grandeurs moyennes, cela simplifiera ainsi le système d'équations II.21 :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_L = I_i \\ I_o = (1 - \alpha) I_L \\ V_i = (1 - \alpha) V_o + r_L I_L \end{array} \right. \quad (\text{II.24})$$

### II.2.2.4. Rapport de conversion et rendement :

A partir de l'équation II.24 on peut calculer le rapport de conversion  $V_i/V_o$

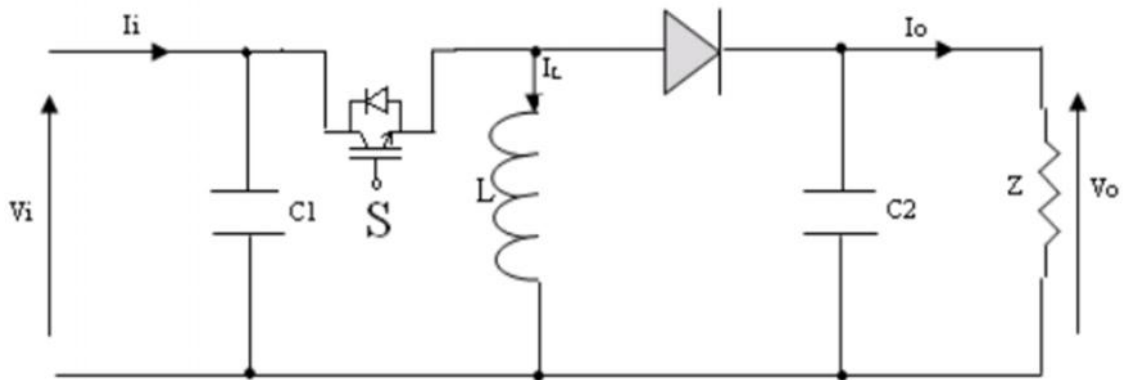
$$\begin{aligned} M(\alpha) = \frac{V_o}{V_i} &= \frac{1}{(1 - \alpha) + \frac{r_L I_L}{V_o}} = \frac{1}{1 + \frac{r_L I_L}{(1 - \alpha)^2 V_o}} \frac{1}{1 - \alpha} = \frac{1}{1 + \frac{r_L}{(1 - \alpha)^2 Z}} \frac{1}{1 - \alpha} \\ &= \eta \frac{1}{1 - \alpha} \end{aligned} \quad (\text{II.25})$$

$$\text{Où} \quad \eta = \frac{1}{1 + \frac{r_L}{(1 - \alpha)^2 Z}}$$

On remarque que le rendement ne dépend pas seulement de la charge complexe  $Z$  du convertisseur et des résistances parasites des composants, mais il dépend aussi du rapport cyclique  $\alpha$ . Ainsi il est recommandé, pour que le Boost fournisse un bon rendement, de ne pas dépasser des rapports cycliques supérieurs à une certaine valeur, fixée par la qualité de l'inductance et la charge utilisée.

**II.2.3. Hacheur buck boost:**

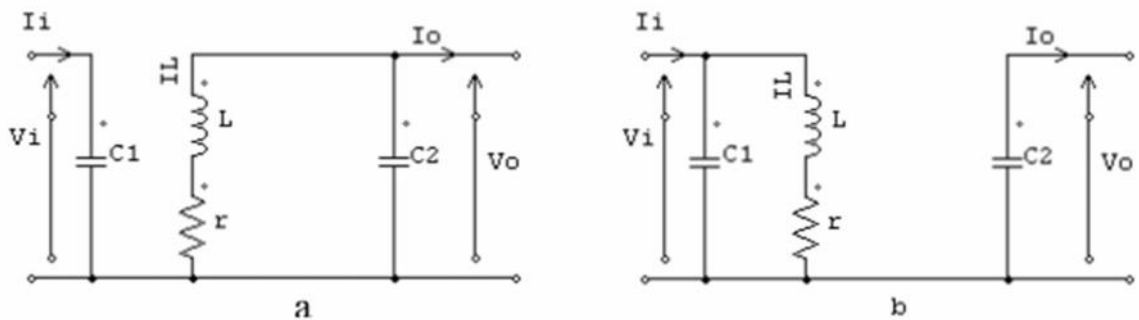
Ce dernier a acquis les caractéristiques et les propriétés électriques des deux types évoqués précédemment. Il présente donc une sorte d'un transformateur hybride (abaisseur/élevateur) pour une tension d'entrée/sortie continue ; son schéma de base est illustré par la figure II.8.



**Figure II.8 :** Schéma électrique du convertisseur Buck-Boost.

**II.2.3.1. Modélisation mathématique :**

La figure II.9 montre les deux schémas équivalents du buck-boost pour les deux intervalles de fonctionnement.



**Figure II.9:** Circuits équivalents du buck-boost, S fermé (a), S ouvert (b)

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents précédents, on obtient :

Pour le première intervalle  $T_s$  :



$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - r_L i_L \end{array} \right. \quad (II.26)$$

Et pour le deuxième intervalle (1- ) Ts

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o - i_L \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_o - r_L i_L \end{array} \right. \quad (II.27)$$

En appliquant la relation II.3 sur les systèmes d'équations II.26 et II.27, on trouve le modèle moyenne du buck-boost :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_l = \frac{1}{\alpha} (i_i - C_1 \frac{dv_i}{dt}) \\ i_o = -(1 - \alpha)i_L - C_2 \frac{dv_o}{dt} \\ V_i = \frac{1}{\alpha} (-(1 - \alpha)v_o + r_L i_L + L \frac{di_L}{dt}) \end{array} \right. \quad (II.28)$$

### II.2.3.2. Les ondulations des courants et des tensions :

En suivant les mêmes procédures précédentes, on trouve les mêmes résultats que pour le circuit Boost, les valeurs crête à crête des courants et des tensions sont

$$\left\{ \begin{array}{l} 2\Delta I_L = \frac{V_i - r_L I_L}{L} \cdot \alpha T_s \\ 2\Delta V_i = \frac{I_i - I_L}{C_1} \cdot \alpha T_s \\ 2\Delta V_o = \frac{-I_o}{C_2} \cdot \alpha T_s \end{array} \right. \quad (II.29)$$

Les composants à choisir pour des ondulations données sont donnés par :

$$\left\{ \begin{array}{l} L = \frac{V_i - r_L I_L}{2\Delta I_L} \cdot \alpha T_S \\ C_1 = \frac{I_i - I_L}{2\Delta V_i} \cdot \alpha T_S \\ C_2 = \frac{-I_o}{2\Delta V_o} \cdot \alpha T_S \end{array} \right. \quad (\text{II.30})$$

### II.2.3.3. Etude en régime continu :

Comme précédemment, en remplaçant les dérivées des signaux par des zéros, on peut remplacer les signaux du convertisseur par leurs grandeurs moyennes, ce qui donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_i = I_L \\ I_o = (1 - \alpha) I_L \\ V_i = V_o / [-(1 - \alpha) + r_L I_L / V_o] \end{array} \right. \quad (\text{II.31})$$

### II.2.3.4. Rapport de conversion et rendement :

A partir des relations (II.31), on peut calculer le rapport de conversion  $V_i/V_o$  comme suit :

$$M(\alpha) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o \alpha}{-(1 - \alpha)V_o + r_L I_L} = \frac{1}{1 + \frac{r_L}{(1 - \alpha)^2 V_o}} \left( -\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) = \eta \bar{M}(\alpha)$$

Où

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{r_L}{(1 - \alpha)^2 V_o}} \quad (\text{II.32})$$

# *Chapitre III :*

## *Poursuite du point de puissance maximale*

### III.1.introduction :

Du point de vue source d'énergie, pour un GPV, la production de la puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température et de la nature de la charge sur laquelle le GPV débite. La caractéristique Puissance/Tension résultante de ce fonctionnement présente un maximum qui varie en fonction de ces paramètres. Un convertisseur MPPT (Maximum Power Point Tracker) doit donc être utilisé afin de suivre ces changements. Un convertisseur MPPT est un système de conversion de puissance muni d'un algorithme de contrôle approprié permettant d'extraire le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

Les premières utilisations du MPPT remontent à 1968 dans le cadre d'applications spatiales ayant pour générateur électrique des modules photovoltaïques. Un grand nombre de procédures et techniques ont été développées. Elles varient en complexité, capteurs nécessaires, vitesse de convergence, coût, efficacité, matériel pour la réalisation, etc.

Dans ce contexte, cette partie sera consacrée à l'étude du fonctionnement d'une commande MPPT et les différentes techniques utilisées de manière à ce que la puissance optimale délivrée par le panneau solaire soit quasiment transférée à la charge de façon automatique quelles que soient l'intensité d'éclairement et la valeur de la charge[5][14].

### III.2.Principe de la recherche du point de puissance maximale

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. La figure (III.1) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire munie d'une commande MPPT.

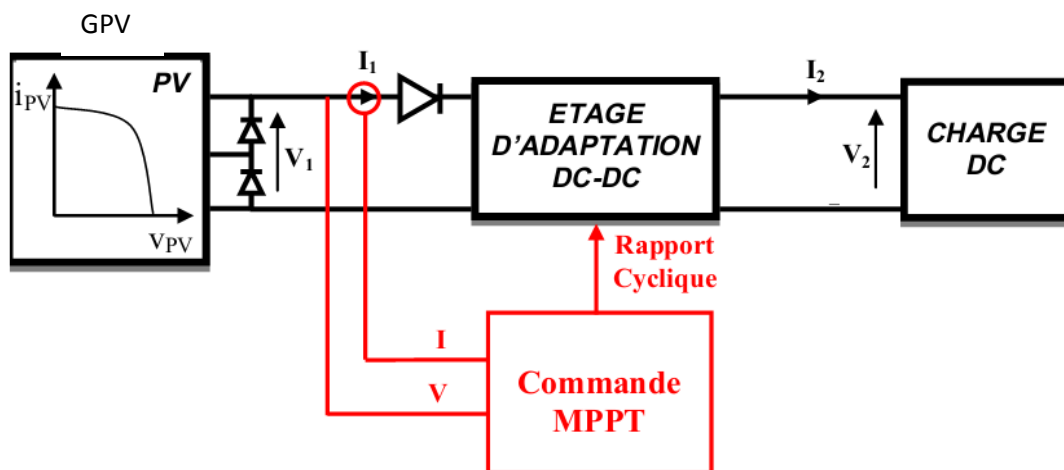


Figure III.1 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

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

La figure III.2 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), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents.[15]

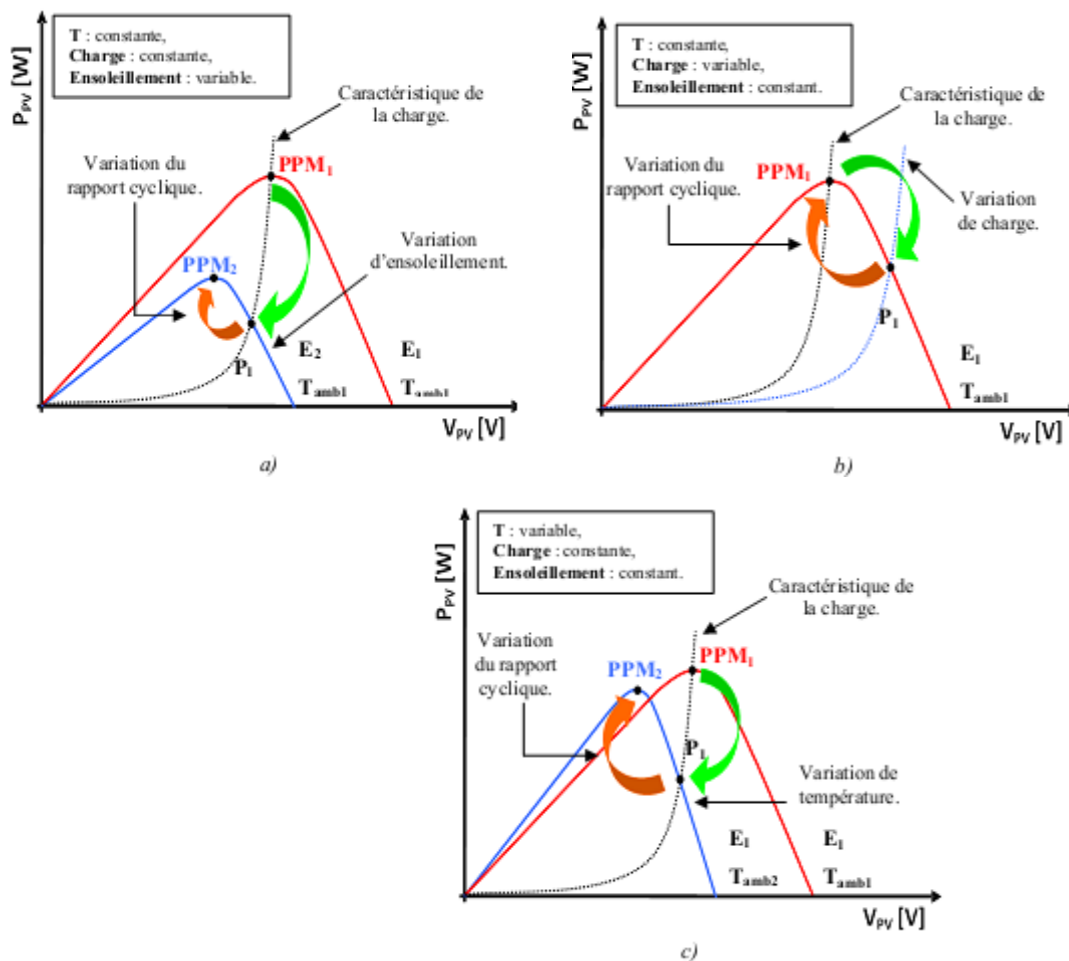


Figure III.2 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale

### III.3. Méthodes de poursuite du point de puissance maximal :

#### III.3.1 Méthodes à contre réaction de tension :

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des modules par la comparaison de cette tension avec une tension de référence pour générer une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler cette erreur. en refère à la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) on a trois types de méthodes :

##### III.3.1.1.Méthode à tension de référence fixe :

C'est la méthode basée sur une simple comparaison entre la tension de sortie des modules avec une tension de référence prédéfinie pour ajuster continuellement le rapport cyclique  $\alpha$  du convertisseur DC-DC. Cette tension correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points des puissances maximales relevées par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température en agissant simplement sur les différents facteurs de pondération lors de la mise au point afin de générer le maximum de puissance.[16]

##### III.3.1.2 Méthode à tension de référence en fonction de $V_{oc}$ :

Pour un ensoleillement et une température donnés la tension qui correspond à la puissance maximale du module est exprimée comme une fonction linéaire de la tension en circuit ouvert du module. En négligeant la résistance série de la cellule, l'expression de la puissance de sortie du module  $P$  est :

$$P=V*I=(I_{sc} - I_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right)) * V \quad (III.1)$$

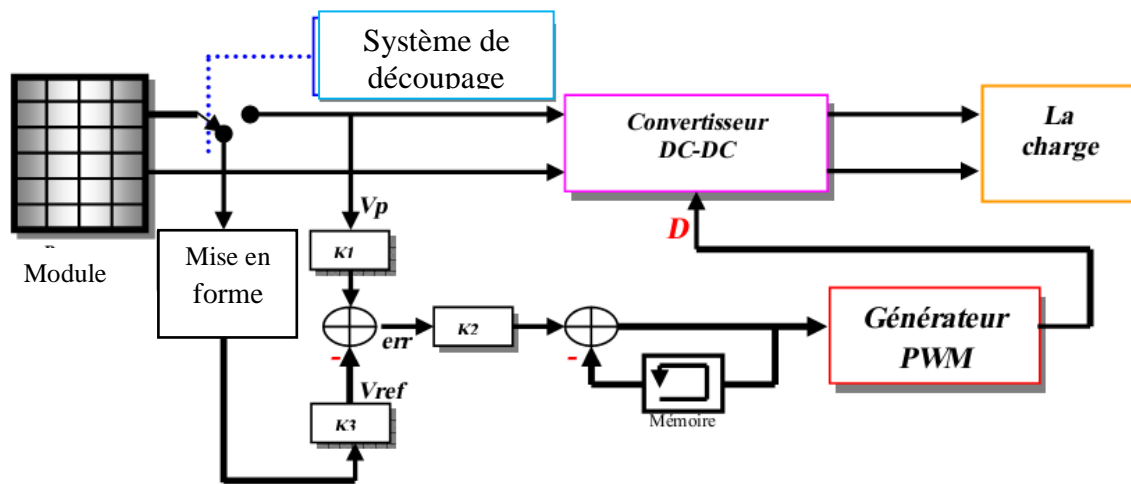
La puissance est maximale lorsque sa dérivé est nulle pour une tension optimale  $V_{mp}$  on remplace le courant de court circuit en fonction de la tension de circuit ouvert :

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_{sc}}{I_0}\right) \quad (III.2)$$

On obtient

$$\frac{q}{KT} V_{mp} + \ln\left(1 + \frac{q}{KT} V_{mp}\right) = \frac{q}{KT} V_{oc} \quad (III.3)$$

La fonction  $V_{oc}=f(V_{mp})$  est pratiquement linéaire et elle est de la forme  $V_{mp}=A*V_{oc}+a$  Pour cela la tension en circuit ouvert du module est prélevée régulièrement par le débranchement du module pour une courte durée pour ajuster la tension de référence précédente par une certaine proportionnalité généralement égale à 0.77 (figure III.3). En exploitant cette propriété, on peut traquer en permanence le point de puissance maximale.



**Figure III.3** : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence en fonction de tension à circuit ouvert du module.

L'avantage est que la commande de la tension de fonctionnement du module photovoltaïque prend en considération l'éclairement et la température, le vieillissement et l'accumulation de la poussière sur la surface de cellules. Et l'inconvénient c'est que l'ajustement de la tension de référence à 77% de la tension à vide du module est toujours une fraction fixe, cette méthode ne peut pas être considérée comme un vrai moyen de poursuite du MPP. L'exactitude de l'ajustement de la tension de fonctionnement à la tension maximale  $V_{mp}$  de puissance dépend du choix de cette fraction comparée au vrai rapport  $V_{mp}/V_{oc}$ .

### III.3.1.3. Méthode à Tension de référence externe (Cellule pilote) :

Une cellule pilote est ajoutée au module solaire (C'est une cellule photovoltaïque simple qui est électriquement indépendante du reste de la rangée figure III.4). La tension à circuit ouvert de cette cellule mesurée continuellement va nous donner une information implicite de la tension en circuit ouvert de l'ensemble des modules solaires, en multipliant cette tension par le nombre de cellules en série [17].

Cette méthode évite l'interruption du système mais Il y a des inconvénients car la cellule pilote utilisée comme référence pour le comportement de la rangée n'est pas facile à mettre en application. La superficie qui est très limitée, l'emplacement de la cellule, font que la cellule pilote ne soit pas toujours fidèle à ce qu'est ressentie par le panneau.

Pour limiter cette inconvénient on place une cellule pilote individuelle pour chaque petit groupe de modules puis on estime le facteur pour le fonctionnement optimum. Et Comme pour les méthodes précédentes, cette méthode utilise un facteur fixe pour estimer la tension  $V_{mp}$  à partir de la tension  $V_{oc}$ , ce qui implique que le MPP n'est pas traqué parfaitement.

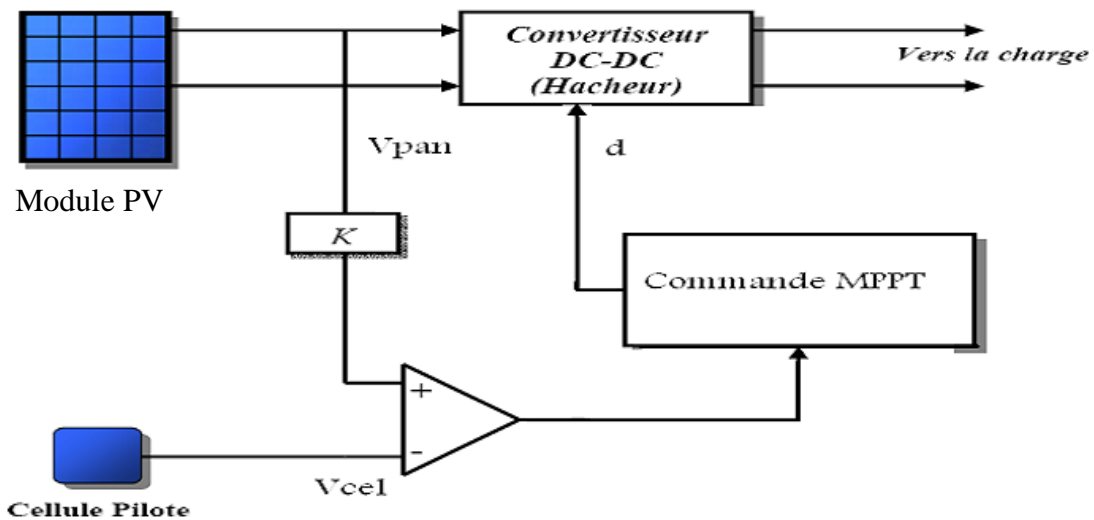


Figure III.4 : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec cellule pilote

### III.3.2. Méthodes à contre réaction de courant

Par analogie avec les méthodes de contre réaction de tension on a le schéma suivant :

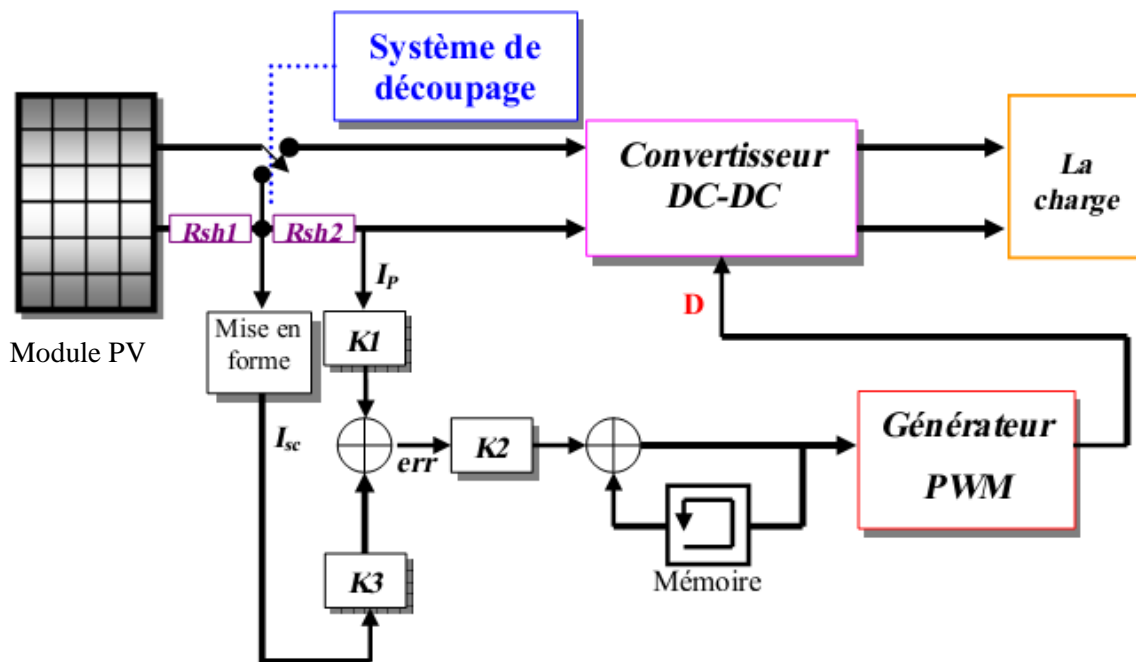


Figure III.7 : Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction de  $I_{sc}$

#### III.3.2.1.. Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit $I_{sc}$ :

Cette technique provient du fait que, sous des conditions atmosphériques variables, le courant  $I_{MPP}$  est approximativement linéairement lié au courant  $I_{sc}$  du GPV. Il a été montré que :

$I_{MPP} = k I_{sc}$  avec  $k$  constante de proportionnalité.  $k$  est généralement comprise entre 0.78 et 0.92.



La mesure du courant  $I_{SC}$  durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le module et mesurer le courant  $I_{SC}$  à l'aide d'un capteur de courant. Ceci augmente le nombre de composants et donc le coût. La puissance de sortie est aussi réduite lors de la mesure du courant  $I_{SC}$  de plus, le MPP n'est jamais atteint. [5]

### III.3.2.2. Méthode à courant de référence externe (Cellule pilote) :

Dans cette méthode l'utilisation d'une cellule pilote comme source d'information du courant de court-circuit de l'ensemble des modules est impossible par le fait que court-circuiter en permanence cette cellule cause un échauffement supplémentaire qui va fausser l'information générée par cette cellule et conduire à sa destruction rapide.[17]

### III.3.3. Méthodes à contre réaction de puissance :

Les méthodes à contre réaction de puissance se basent sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module afin que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures de courant  $I$  et de tension  $V$  du module puis la multiplication de ces deux grandeurs  $P=V.I$ .

#### III.3.3.1. Algorithme Perturbation et Observation (P&O) :

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité de sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et en observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV. Sur la figure III.8, on voit que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente ( $dP/dV >0$ ), alors il est clair que la perturbation a déplacé le point de fonctionnement vers le MPP. L'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue ( $dP/dV <0$ ), alors la perturbation a éloigné le point de fonctionnement du MPP. L'algorithme inversera la direction de la perturbation suivante. Cet algorithme est résumé sur le tableau III.1 et l'organigramme de la figure III.9 [5]. L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression :

$$V(k) = V(k - 1) + \Delta V \cdot \text{sign} \left( \frac{dP}{dV} \right) \quad | \quad V = V_{k-1} \quad (\text{III.4})$$

Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le MPP soit atteint. Le système oscille alors autour du MPP, ce qui provoque des pertes de puissance. Les oscillations peuvent être minimisées en diminuant la taille de la perturbation.

Cependant, une taille de perturbation trop petite ralentit considérablement la poursuite du MPP. Il existe alors un compromis entre la précision et la rapidité.

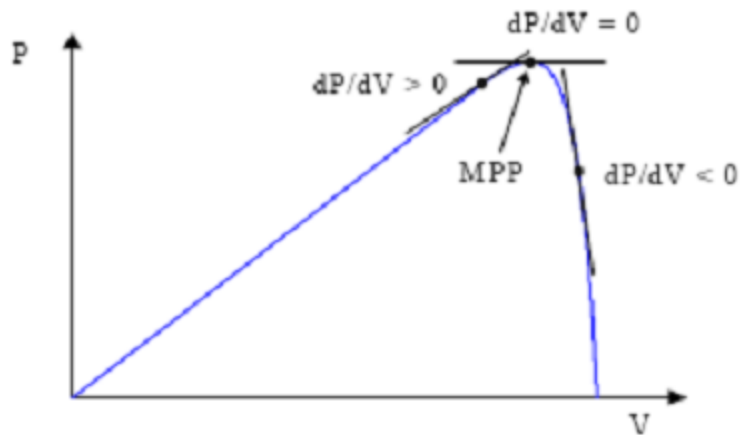


Figure III.8 :  $dP/dV$  à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance

Perturbation	Changement dans la puissance	Perturbation suivante
Positive	Positive	Positive
Positive	Négative	Négative
Négative	Positive	Négative
Négative	Négative	Positive

Tableau III.1 : Résumé de l’algorithme P&O

Il est important de noter qu’avec l’algorithme P&O, la variable à contrôler peut être soit la tension soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d’un changement climatique. On a vu que la variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

Deux capteurs sont généralement nécessaires pour mesurer la tension et le courant à partir desquels la puissance est calculée. Parfois, le courant est estimé à partir de la tension mesurée, éliminant ainsi le besoin du capteur de courant.

L’utilisation d’un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés.

Un inconvénient de la méthode P&O est qu'elle peut échouer lors d'un rapide changement des conditions atmosphériques comme l'illustre la figure III.10. Commencant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation  $\Delta V$  dans la tension  $V$  amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de  $P_1$  à  $P_2$ , sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C.

Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme croit que ceci est le résultat de sa propre action et le sens de la perturbation restera le même. Par conséquent, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP et continuera à s'éloigner si l'éclairement augmente (ou diminue) progressivement. Pour palier à ce problème, on pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre une décision sur le sens de la perturbation [5].

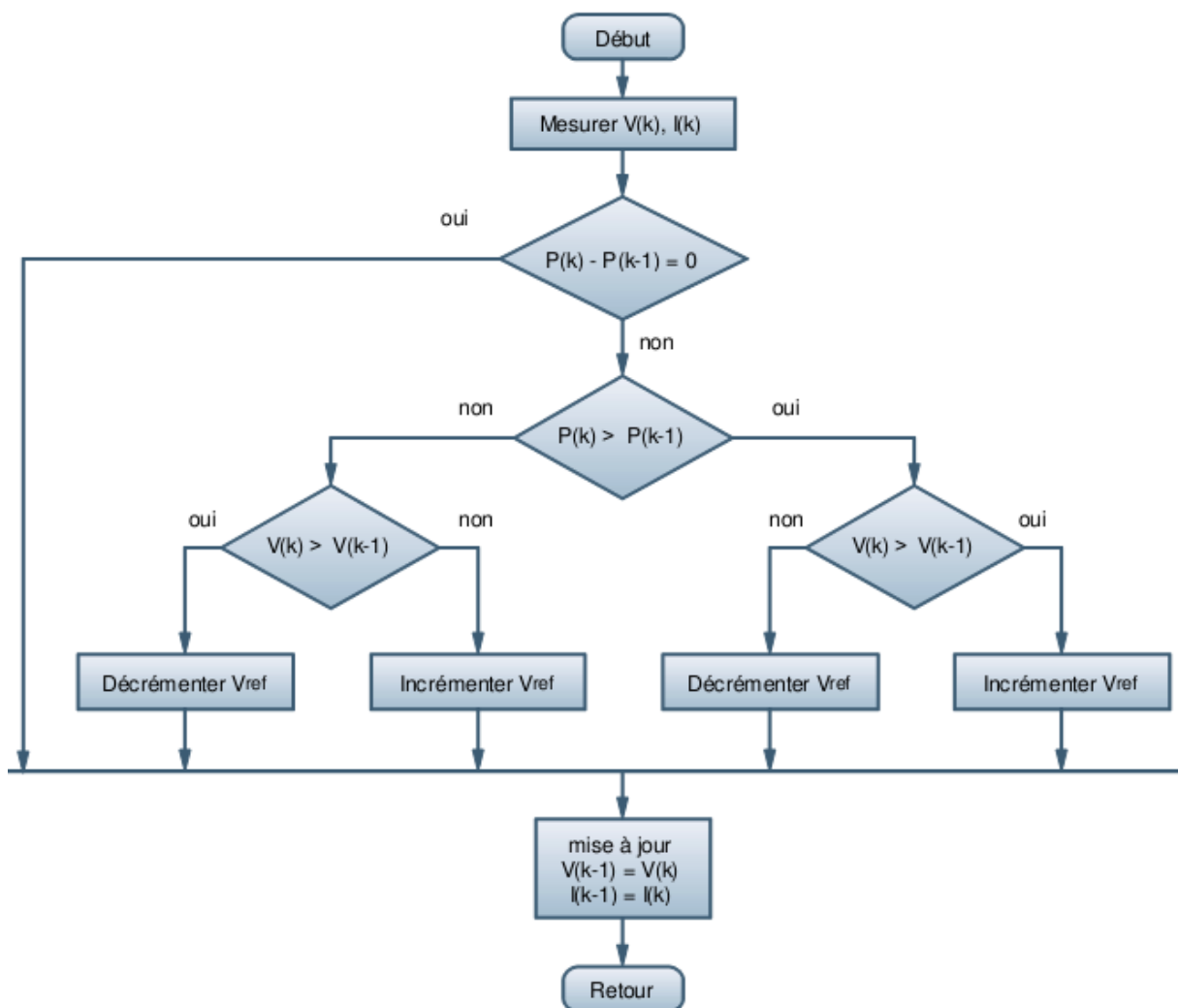


Figure III.9 : Organigramme de la méthode P&O

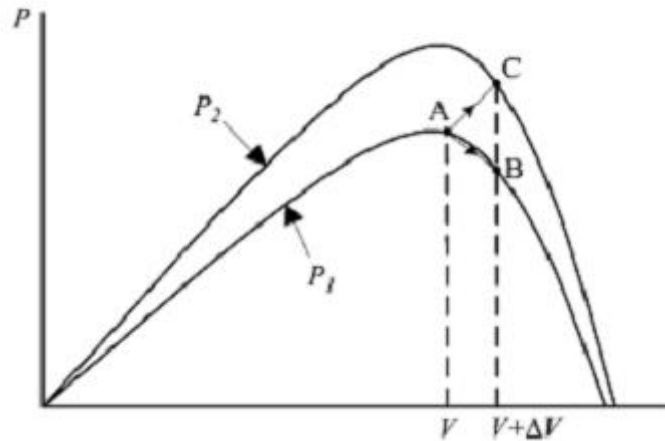


Figure III.10 : Divergence de la méthode P&O

**III.3.3.2. Algorithme de l'Incrémentation de la Conductance (IncCond) :**

Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite (figure III.8)

$$\begin{cases} dP/dV = 0 & \text{au MPP} \\ dP/dV > 0 & \text{à gauche du MPP} \\ dP/dV < 0 & \text{à droite du MPP} \end{cases} \quad (III.5)$$

Puisque : 
$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (III.6)$$

Alors, l'équation (III.5) peut être écrite comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} & \text{au point MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} & \text{à gauche du point MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} & \text{à droite du point MPP} \end{cases} \quad (III.7)$$

Le MPP peut donc être poursuivi en comparant la conductance instantanée ( $G_{ci} = I/V$ ) à l'incrémentation de la conductance ( $\Delta G_{ci} = \Delta I/\Delta V$ ), comme le montre l'organigramme de la figure III.11.  $V_{ref}$  est la tension de référence pour laquelle le module PV est forcé à fonctionner. Au MPP,  $V_{ref} = V_{MPP}$ . Une fois que le MPP est atteint, le point de fonctionnement correspondant est maintenu, à moins qu'un changement dans  $\Delta I$  est noté, indiquant un changement des conditions atmosphériques et donc du MPP. L'algorithme augmente ou diminue  $V_{ref}$  pour suivre le nouveau MPP.

La taille de l'incrément détermine la rapidité de la poursuite du MPP. Une poursuite rapide peut être obtenue avec un incrément plus grand, mais le système ne pourrait pas fonctionner exactement au MPP et oscille autour de celui-ci. Il y a donc, comme pour la méthode P&O, un compromis entre rapidité et précision. Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme IncCond pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape.

Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  sur le courant de court-circuit  $I_{sc}$ . Ces deux solutions assurent que le vrai MPP est poursuivi s'il existe plusieurs maxima locaux.

Une manière moins évidente pour effectuer la méthode IncCond est d'utiliser la conductance instantanée et l'incrément de la conductance pour générer un signal d'erreur

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (\text{III.8})$$

D'après l'équation III.7 et III.8, l'erreur est nulle au MPP. Un régulateur PI peut donc être utilisé pour annuler cette erreur.

La mesure de la tension et du courant instantanés du module PV nécessite deux capteurs. La méthode IncCond se prête parfaitement à la commande par microcontrôleur, qui peut garder en mémoire les valeurs précédentes de la tension et du courant.

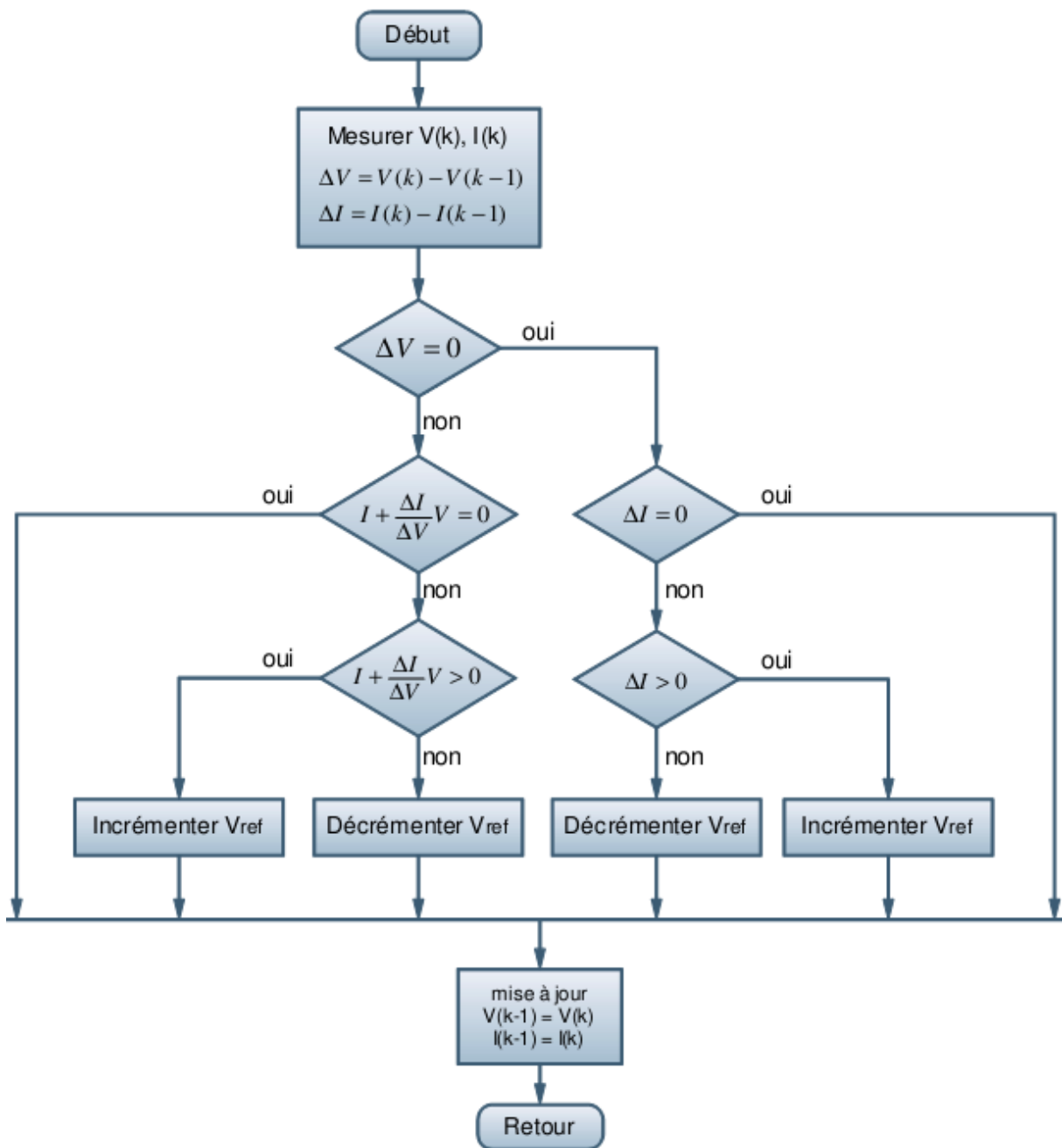


Figure III.11 : Organigramme de la méthode IncCond.

### III.3.4. Autres méthodes :

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer :

- les algorithmes basés sur la logique floue
- les algorithmes à base de réseau de neurones
- la méthode de l'oscillation forcée
- les algorithmes d'identification en temps réel du MPP

**III.4. Conclusion :**

Dans cette partie, nous avons présenté la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de la description du convertisseur MPPT. Nous avons expliqué le principe de recherche du MPP. Ensuite, on a présenté quelques méthodes MPPT chaque méthode présente des avantages comme des inconvénients.

Dans le prochain chapitre, on entamera la simulation et l'implémentation la carte de puissance et commande, qui vont nous permettre de faire travailler le système en sa puissance maximale. Après une étude de la partie puissance, la partie commande, un contrôleur MPPT est basé sur la méthode « P&O » utilisant un microcontrôleur PIC.

***Chapitre IV***  
***Simulation et résultats***  
***pratiques***



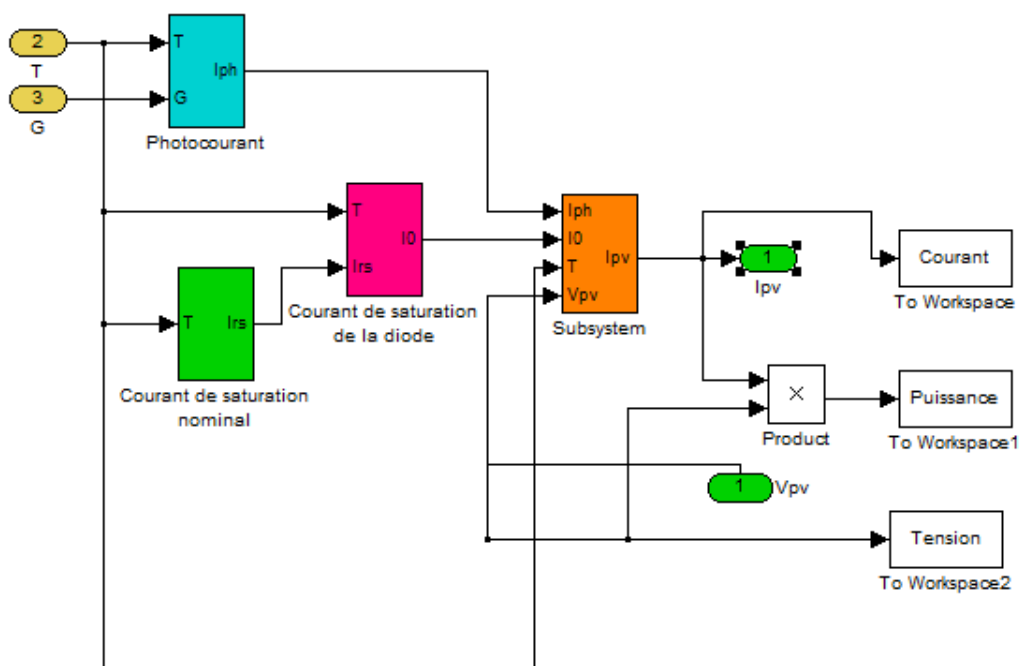
**Introduction :**

Ce chapitre est consacré à la simulation et la réalisation de la carte de commande de MPPT ainsi que l'étage de puissance, qui est un convertisseur de type Buck-boost, nous décrivons dans ce qui suit les différentes étapes de conception et réalisation. pour valider l'algorithme MPPT choisi défini au chapitre III (perturbation & observation), nous avons testé à travers une simulation sous MATLAB/SIMULINK notre système pour diverses valeurs de l'irradiation et température.

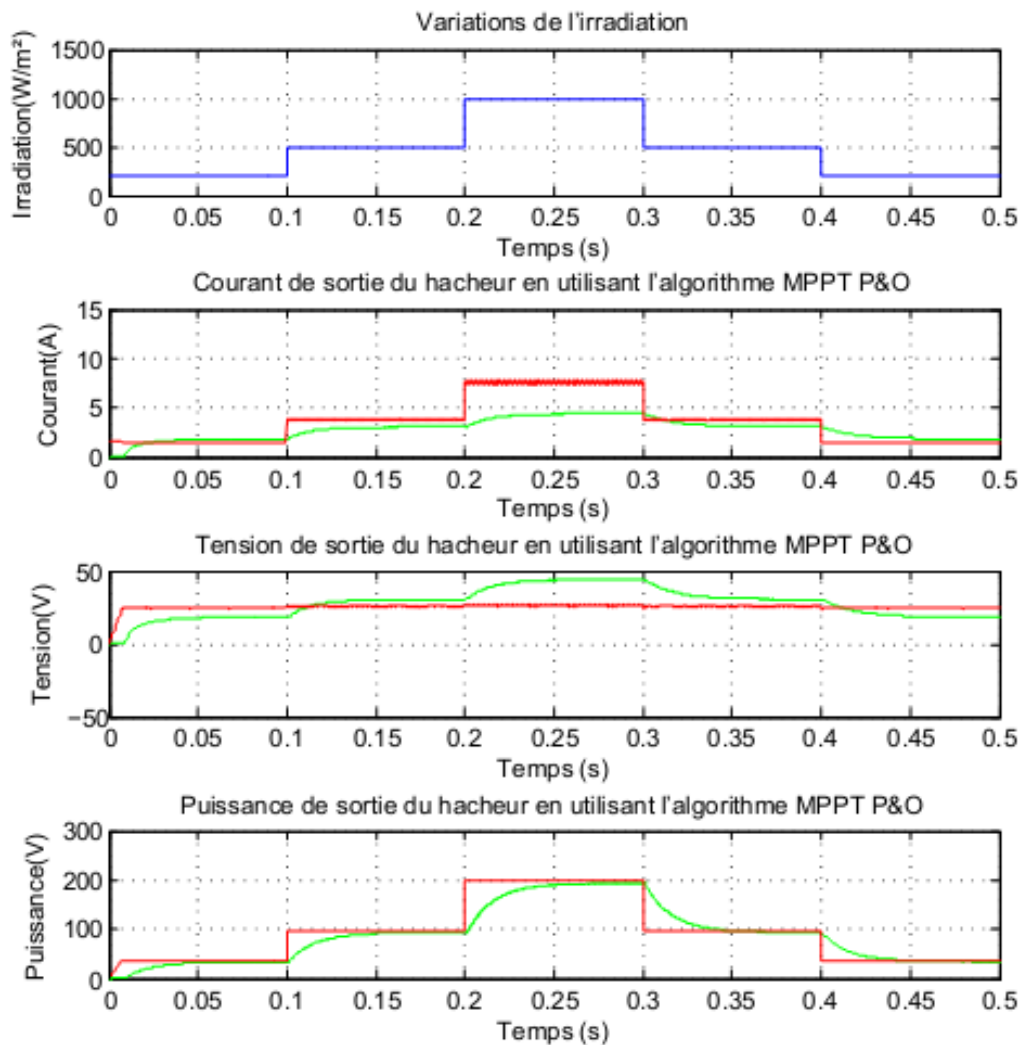
**IV.1. Simulation sous MATLAB/SIMULINK :**

Cette étape est nécessaire dans notre conception, l'objectif est de vérifier le comportement de l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O) en présence d'un changement de l'irradiation, et ainsi sa capacité à maintenir le fonctionnement au point de puissance maximale. Le test présenté est réalisé en appliquant des changements brusques de l'irradiation pour  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

La figure ci-dessous représente le modèle du module photovoltaïque utilisé dans l'environnement Simulink.



**Figure IV. 1 :** Modélisation du module PV sous SIMULINK



**Figure IV.2 :** Variations du courant, de la tension et de la puissance à l'entrée et à la sortie du hacheur en fonction de l'irradiation pour  $T=25^{\circ}C$

#### IV.1.2. Interprétation des résultats :

La figure VI.2 montre bien que l'algorithme P&O permet d'avoir une bonne poursuite de la puissance de référence avec une dynamique acceptable. Néanmoins, nous constatons qu'il y a toujours des oscillations autour du point de la puissance maximale, mais qui restent faibles. La tension de sortie du GPV reste presque constante dans la plage (25V à 50V) par contre, le courant PV varie de manière importante avec l'irradiation solaire.

### IV.1.3. Conclusion :

La puissance récupérée par les modules photovoltaïques dépend principalement de l'irradiation solaire et de la température. L'algorithme MPPT (P & O) nous permet via le hacheur buck-boost d'extraire le maximum de puissance du module. Malgré les oscillations au tour du point de puissance maximale les résultats obtenus par la simulation montrent l'efficacité de l'algorithme P&O.

### IV.2. Réalisation et résultat expérimentaux :

Dans cette partie nous présentons les résultats des différentes réalisations effectuées au sein de ce travail qui sont les suivantes :

- La réalisation d'une carte d'alimentation pour assurer l'alimentation du capteur de courant +/-12v et 5v pour le microcontrôleur.
- La réalisation d'un convertisseur buck-boost tout en montrant les différents calculs qui permettent la détermination des valeurs de l'inductance et des condensateurs, ainsi que le choix de l'interrupteur de commande.
- La carte de commande qui a comme entrées la tension et le courant du générateur photovoltaïque et le signal PWM comme sortie, cette carte de commande fonctionne suivant l'algorithme défini au chapitre III (perturbation & observation). Ce dernier est implémenté sur un pic 16F876 qui génère le signal PWM. Ce signal commande directement le transistor MOSFET du convertisseur.

La figure (IV.3) représente le principe général de la commande sous forme d'un schéma bloc

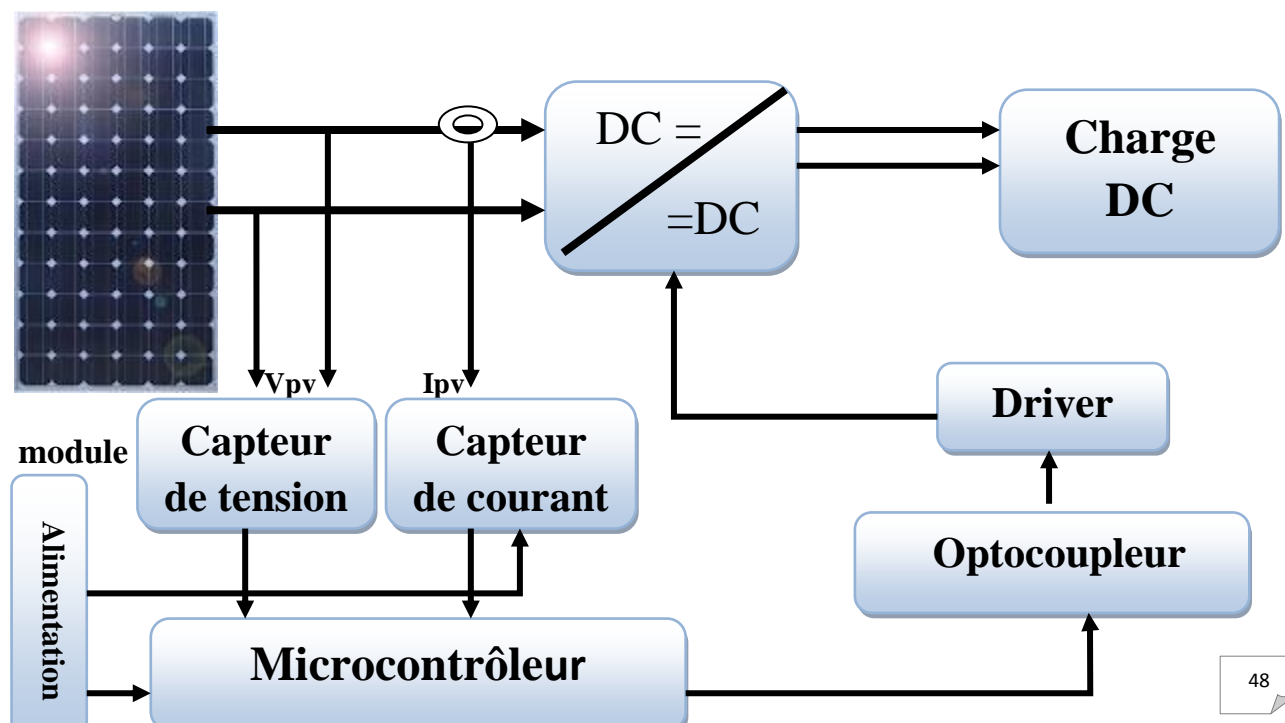
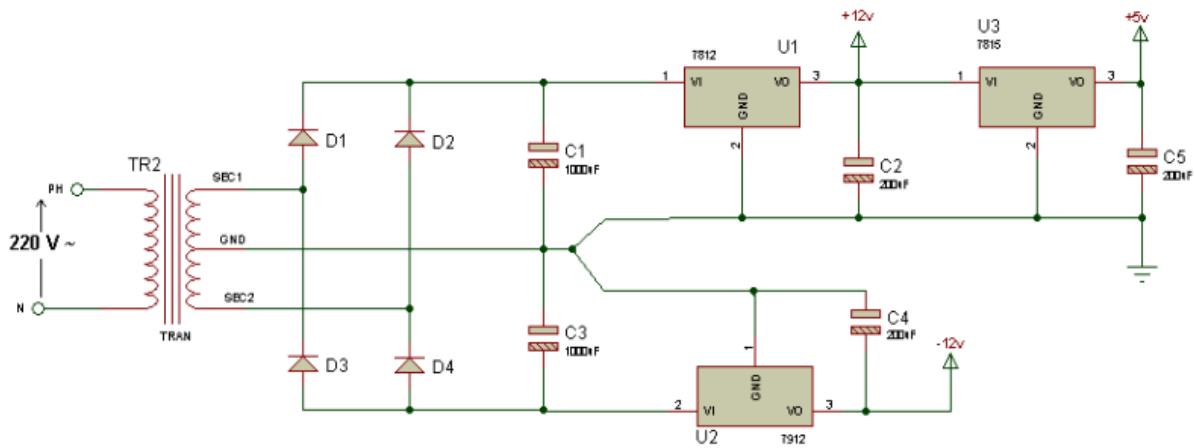


Figure IV.3 : Schéma synoptique des différents étages de la carte de commande MPPT

**IV.2.1. Etage d'alimentation :**

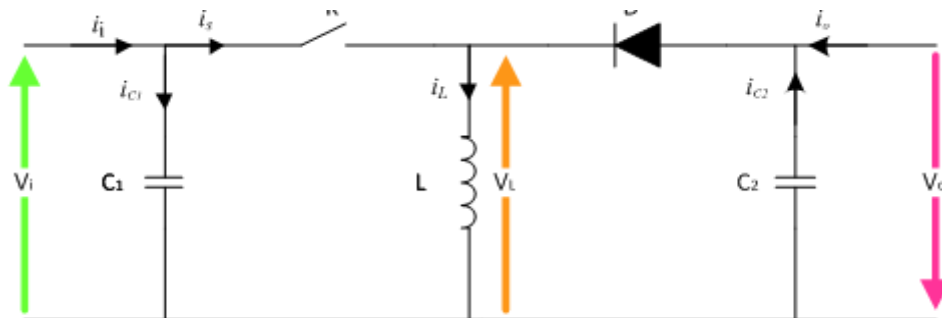
La carte de commande que nous avons réalisé, est constitué de plusieurs composants, chaque composant nécessite une ou deux alimentations. Le microcontrôleur nécessite une alimentation positive de 5V ainsi que le capteur de courant (LA-55p) doit être alimenté par deux tensions positive et négative (+12V, -12V). D'où la nécessité de réaliser un étage d'alimentation, afin de répondre à ces besoins. Pour cela on a réalisé un étage d'alimentation. La figure IV.4 représente le montage d'alimentation qui délivre une tension de (+5v et ±12v) directement a partir des régulateurs de tension (7805,7812 et 7912).



**Figure IV.4 :** circuit d'alimentation de 5 volts et alimentation symétrique ±12

**IV.2.2. Le convertisseur DC/DC (Hacheur Buck-Boost) :**

L' hacheur « Buck-Boost » a pour rôle d'augmenter ou abaisser la tension de l'entrée à une tension désirée à la sortie selon le rapport cyclique. Dans notre cas, la tension d'entrée du hacheur est celle du module solaire (on a prit deux modules en parallèle) :  $V_e = 22\text{ V}$  avec un courant  $I_{in} = 7\text{ A}$ . La tension à la sortie  $V_o = 60\text{ V}$  (fonctionnement en boost).



**Figure IV.5 :** schéma du circuit du hacheur

### IV.2.2.1. Calcul des composantes de la carte de puissance :

Déterminer les caractéristiques de la carte de puissance est une étape critique dans la construction du MPPT. Tout composant inadapté peut logiquement empêcher un fonctionnement optimal de cette carte de puissance.

**IV.2.2.1.1. La bobine :** Cet élément est le plus délicat à déterminer. En effet, une inductance trop faible ne permet pas le fonctionnement de la carte de puissance, et une inductance trop forte quant à elle provoquerait d'importantes pertes de puissance par effet Joule.

Calcul du courant de sortie : dans le cas où notre convertisseur Buck-boost fonctionne dans la plage du rapport cyclique [0.5 0.9] il est élévateur de tension donc :

$$I_o = (V_{in} \times I_{in}) / V_o \implies I_o = 22 \times 7 / 60 ; I_o = 2.56 \text{ A}$$

L'amplitude des variations du courant autour de sa valeur continue varie entre 10 et 20 %. En prenant 10 % et en remarquant qu'en régime établi aucun courant ne circule dans le condensateur de sortie on peut estimer  $\Delta I_L$ :  $\Delta I_L = 0.1 \times 1.83 = 0.256 \text{ A}$

Le rapport cyclique : pour un hacheur buck-boost on a  $V_o/V_{in} = D/(1-D)$  ainsi  $D = 0.72$  La fréquence de fonctionnement est de 50 KHz donc  $T = 20 \mu\text{s}$ . On peut calculer la valeur de l'inductance de la bobine avec la relation suivante :  $L = (V_{in} \times D \times T) / (2 \times \Delta I_L)$

Donc :  $L = 2.16 \text{ mH}$  en effet l'inductance critique pour un convertisseur Buck-boost est donnée par la formule  $L = R \times (1-D)^2 / 2f$  [18].

$L_{min} = 8.1 \text{ mH}$  pour cela on a pris une inductance dont la valeur 22 mH

### IV.2.2.1.2. Les Condensateurs :

Il était nécessaire de placer deux condensateurs l'un à l'entrée pour éliminer les bruits provenant du module solaire et l'autre à la sortie pour filtrer les variations de la tension à la sortie du convertisseur.

$$C_{out} = \frac{I_o}{2\Delta V_o} D T_s \quad \text{tel que } \Delta V_o = 0.1 \times V_o \text{ donc } C_{out} = 23 \mu\text{F}$$

Pour cela, on a utilisé un condensateur de 1000  $\mu\text{F}$  à l'entrée qui supporte une tension de 25 V et un autre dont la valeur 100  $\mu\text{F}$  à la sortie qui supporte une tension de 160 V.

### IV.2.2.1.3. La diode :

Le choix de la diode est déterminé selon des caractéristiques bien étudiées tels que la tension de claquage, la vitesse de commutation et le courant maximal. La diode qu'on a utilisée est « SBL2040 » C'est une diode de type Schottky dont les caractéristiques :

- Faible tension de seuil 0.55 V ce qui permet de limiter la chute de tension.
- Une vitesse de commutation de 2  $\mu$ s. Pour notre circuit la valeur est de 20[ $\mu$ s].
- Un courant direct de 20 A.

### IV.2.2.1.3. Le MOSFET :

On a choisi un MOSFET à canal N ( IRFP 460 ) qui peut fonctionner avec des tensions  $V_{ds}$  jusqu' à 500 [V], et des courants  $I_d$  jusqu' à 20 A. De même il a une faible résistance en fonctionnement de  $R_{ds(on)} = 0.27 \Omega$ .

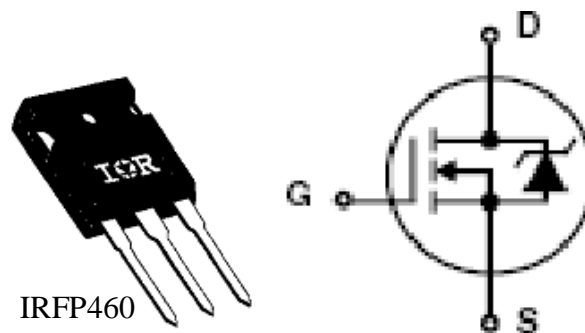


Figure IV.6 : Brochage du MOSFET

### IV.2.3. Partie commande :

**IV.2.3.1. Driver du MOSFET :** Pour rendre passant un MOSFET, il suffit d'appliquer une tension entre la grille et la source supérieure à 10 V environ. Or dans la structure du convertisseur buck-boost, la source du MOSFET est flottante. Il est alors impossible d'appliquer directement à la grille le signal de commande référencé à la masse provenant du microcontrôleur. Pour remédier à ce problème, on a utilisé le driver IR2118 dont le principe général est le suivant : lors de la phase de roue libre du Buck-boost, une capacité dite BootStrap se charge par l'intermédiaire de l'alimentation, puis lorsque le signal de commande passe à l'état haut, la capacité se décharge dans la résistance de grille ce qui met le MOS en conduction. Le câblage du driver est illustré sur la figure IV.6. la capacité BootStrap est

dimensionnée tel qu'elle doit être capable de fournir la charge nécessaire à la grille du MOSFET pour le faire commuter tout en conservant une tension entre  $V_B$  et  $V_S$  de 10 à 14V.

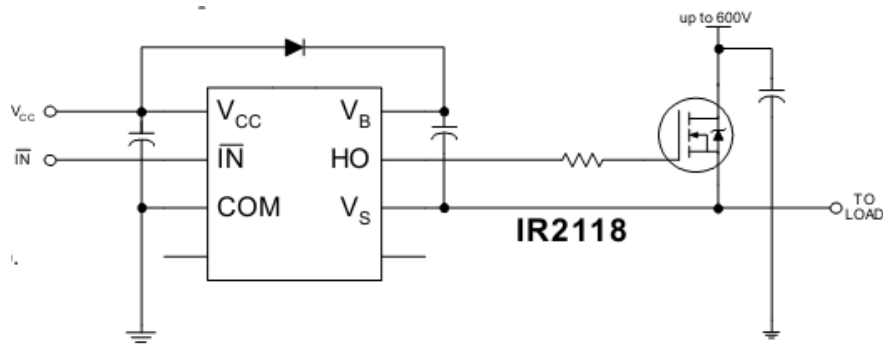


Figure 1.7 : Câblage du driver IR2118

#### IV.2.3.2. L'optocoupleur :

Les optocoupleurs sont utilisés dans la séparation et l'isolation entre la partie commande et la partie puissance des circuits d'électroniques de puissance. S'il y a un problème dans la partie puissance, ce même problème ne crée pas des défauts dans la partie commande (microcontrôleur) et vice versa. Pour isoler notre circuit on a utilisé un optocoupleur HCPL-2200 à portes de logique optiquement couplées qui combinent une LED GaAsP et un photo-détecteur intégré. La figure IV.7 représente le brochage de cet optocoupleur.

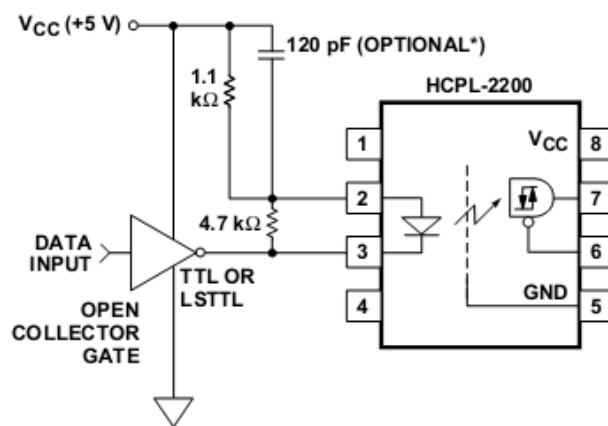


Figure IV.8: Brochage de l'optocoupleur HCPL 2200.

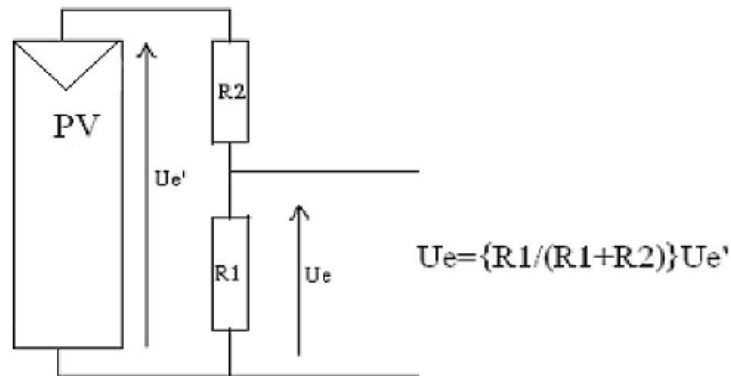
#### IV.2.3.3. Etude des capteurs :

Les capteurs assurent l'interface de mesures dans un système, ils sont utilisés pour les phénomènes physiques les plus variés pour mesurer des paramètres analogiques. Un capteur utilisé pour une application quelconque doit être relatif aux grandeurs caractérisant ce système : tension, courant. Certains de ces capteurs délivrent de très faible tension de l'ordre

de quelques millivolts et il faut prendre les précautions nécessaires pour que leurs connexions avec l'unité de traitement n'introduisent pas d'erreurs inacceptables.

#### IV.2.3.3.1. capteur de tension :

Conception : La tension maximale délivrée par le module photovoltaïque est de l'ordre de 21V. Avec une telle valeur de tension, on ne peut pas l'appliquer directement à l'entrée du PIC, d'où la nécessité de mettre un diviseur de tension.



**Figure IV.9 :** Capteur de Tension

Les valeurs des résistances sont fixées de telle manière à réduire l'ordre de grandeur de la tension du générateur photovoltaïque pour qu'elle soit compatible aux valeurs de référence du microcontrôleur. La valeur max de tension du Panneau  $V_p = 22 \text{ V}$  le pont diviseur doit être divisée la tension du GPV pour que le  $\mu\text{C}$  reçois 5 volts au maximum volt.

$V_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_p = 5 \text{ volt}$  .On fixe la valeur de  $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$  on trouve apres les calcules

$R_2 = 220 \text{ k}\Omega$ . Pour assurer que le pont fonctionne bien on utilise un potentiomètre.

#### IV.2.3.3.2. Capteur de courant :

Pour la mesure du courant du GPV on a utilisé un capteur de courant LA-55p à effet hall à boucle fermée qui permet la mesure des courants DC et AC et fournit l'isolement électrique entre le conducteur portant le courant et la sortie du capteur, il a trois pins deux pour l'alimentation +/-12v dans notre cas et l'autre c'est pour la mesure figure IV.3.



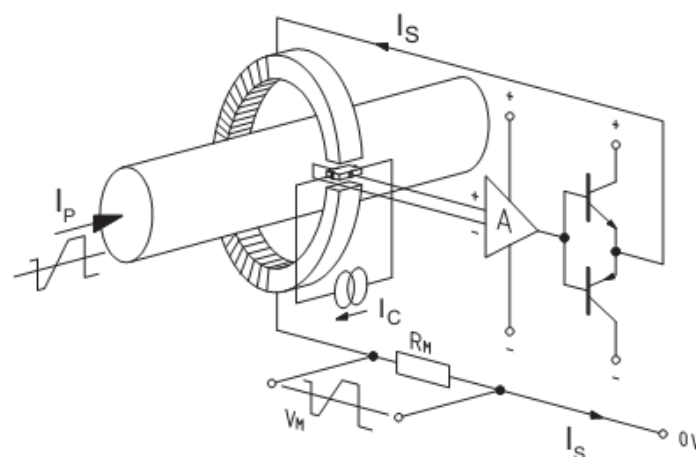


**Figure IV.10 :** Capteur de courant LA55-p.

### Principe de fonctionnement :

Les capteurs à boucle fermée (figure IV.10) utilisent la tension de Hall comme signal de contre-réaction. Ce signal pilote le courant  $I_S$  d'un bobinage secondaire de manière que ce flux secondaire compense exactement le flux créé par le courant primaire. Le flux total dans le noyau et dans la cellule de Hall reste alors toujours théoriquement nul. Le courant secondaire  $I_S$ , réduit en proportion du rapport de transformation, est nettement inférieur au courant à mesurer  $I_P$  dans la mesure où le nombre de spires  $N_S$  du secondaire est supérieur à celui  $N_P$  du primaire. Lorsque les ampères-tours des deux bobines sont égaux, le flux magnétique est compensé (flux total = 0).

Le courant secondaire  $I_S$  est donc l'image exacte du courant  $I_P$  à mesurer. L'insertion d'une résistance de mesure  $R_M$  en série avec l'enroulement secondaire (figure IV.4) permet de récolter une tension à l'image du courant à mesurer.



**Figure IV.11 :** Fonctionnement d'un capteur à effet hall

Avantage:

- Mesure des courants continus, alternatifs et à forme d'onde complexe
- Isolation galvanique du système de mesure face au circuit à mesurer

- Excellente précision et très bonne linéarité.

Pour assurer un bon fonctionnement de notre capteur LA55-p un suiveur de tension à base d'amplificateur opérationnel LT082 alimenté par +/-5v pour la protection du microcontrôleur est utilisé comme indique la figure ci-dessous.

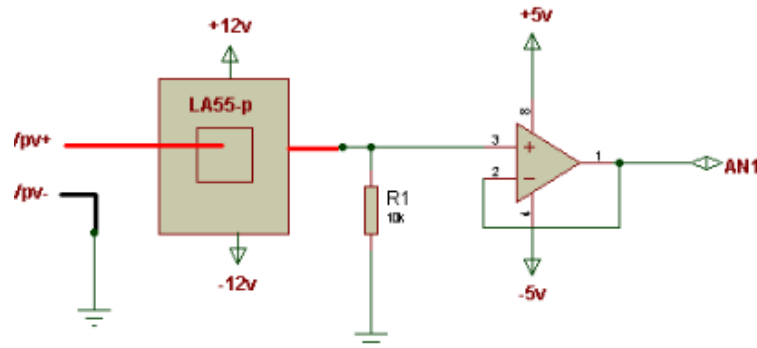


Figure IV.12 : Chaîne de mesure de courant

#### IV.2.3.4.Choix du pic :

**IV.2.3.4.1.Généralités sur les microcontrôleurs :** Un microcontrôleur est un composant programmable. Il regroupe dans un seul boîtier compact un processeur, une mémoire, des périphériques. Il existe des dizaines de modèles : les 8051 d'Intel, les 68HC11 de Motorola, les PIC de Microchip, etc..... Un PIC n'est rien qu'un microcontrôleur, c'est-à-dire une unité de traitement d'informations de type microprocesseur à laquelle est ajouté des périphériques internes permettant de réaliser des montages sans nécessiter l'ajout de composants externes.

Les PIC de Microchip sont des composants dits RISC contenant un processeur à jeu d'instructions réduit « RISC » ( Reduced Instructions Construction Set ). La famille des PIC est subdivisée en 3 grandes familles : la famille Base-Line qui utilise des mots d'instructions de 12 bits, la famille Midle-Range qui utilise des mots d'instructions de 14 bits (et dont fait partie le 16F876) et la famille High-End qui utilise des mots de 16 bits. Les PICs, au même titre que les microprocesseurs, sont composés essentiellement de registres ayant chacun une fonction bien déterminée.

Les caractéristiques des PICs varient en fonction de :

- La mémoire EEPROM intégrée ;
- La taille de la RAM interne ;
- Le type de la mémoire programmée : FLASH, EPROM
- Les convertisseurs analogique/numériques intégrés

#### IV.2.3.4.2. structure interne d'un microcontrôleur :

La figure ci-dessous montre la structure interne d'un microcontrôleur

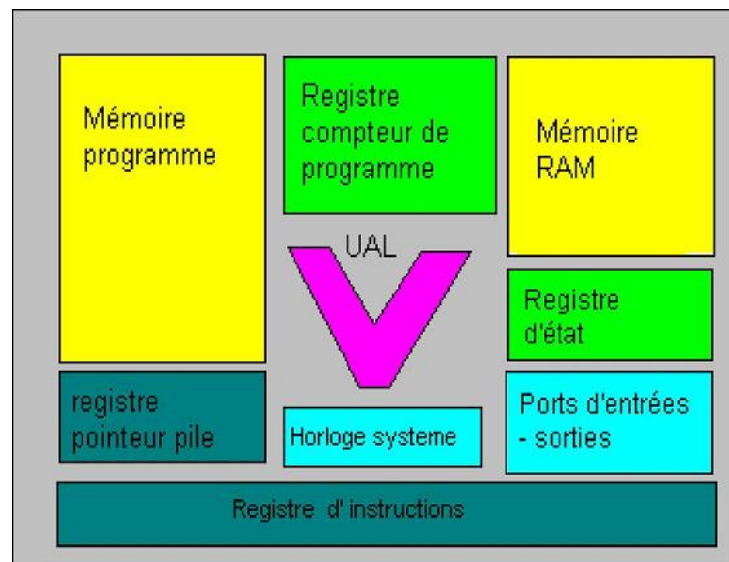


Figure IV.13 : structure interne d'un PIC

#### IV.2.3.4.3. Critères de Choix du microcontrôleur PIC :

Les critères de choix du microcontrôleur sont les suivantes :

- Disponibilité .
- le nombre d'entrées-sorties pour l'application.
- Le  $\mu$ C doit être doté d'un minimum de pins pour simplifier au maximum la réalisation de la carte.
- Il faut vérifier si l'application nécessite un convertisseur analogique /numérique ce qui va centrer un peu plus vers le choix d'une famille de PIC.
- La rapidité d'exécution est aussi un élément important, il faut consulter les caractéristiques des composants.
- Le  $\mu$ C doit être doté d'une mémoire qui satisfait notre application.

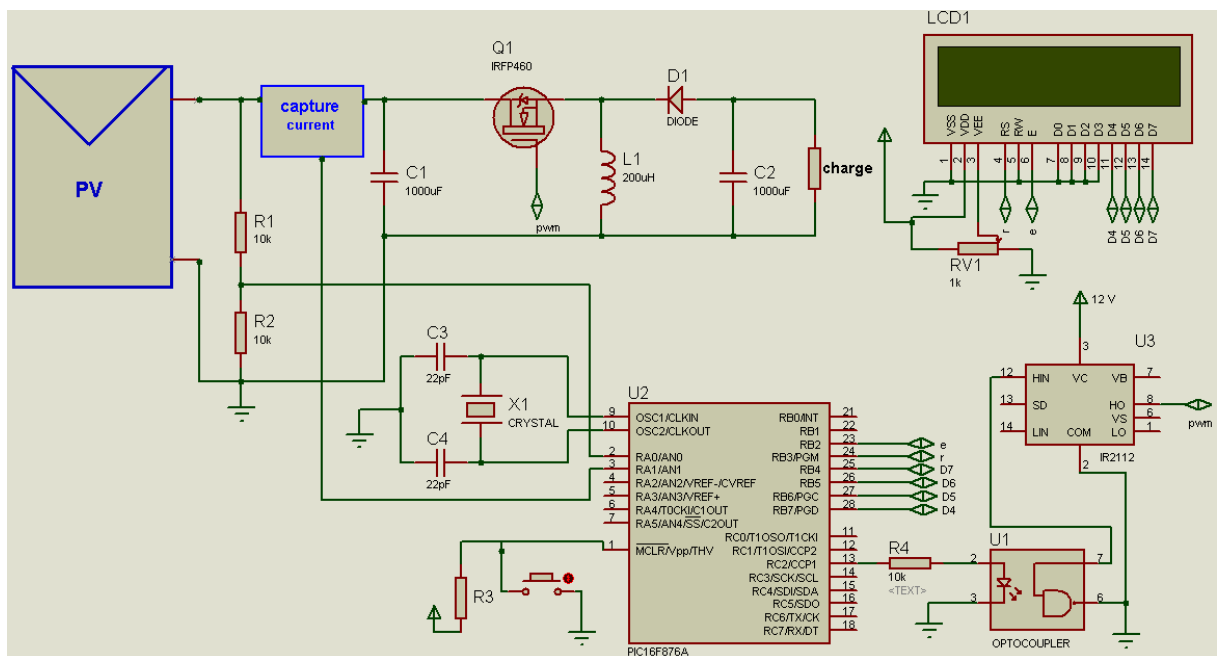
**IV.2.3.4.4. Justification du choix du pic 16F876 :**

- Disponible sur le marché
- Il a plus de mémoire : 8 k mots.
- En plus des entrées / Sorties programmables et des interruptions,
- IL a des convertisseur Analogique / Digital 10 bits : afin de convertir les tensions délivrées par les différents capteurs (capteur de tension et capteur de courant) images respectives de la tension aux bornes du GPV et du courant délivré . .
- Plusieurs TIMERS.
- Des sorties PWM ou Modulation de Largeur d'Impulsion (M.L.I).

**IV.2.5. Réalisation et essais expérimentaux :**

**IV.2.5.1. Structure du schéma électrique :**

La figure ci-dessous présente le schéma électronique du circuit sous proteus



**Figure IV.14 : Schéma électronique du circuit sous proteus**

**IV.2.5.2. Réalisation de la carte de puissance (hacheur Buck-boost) :**

Après la détermination des valeurs des composants de la carte de puissance, il est nécessaire de passer à la réalisation de celle - ci. On a utilisé le logiciel « ARES » pour faire le circuit imprimé la figure ci-dessous représente le circuit final.



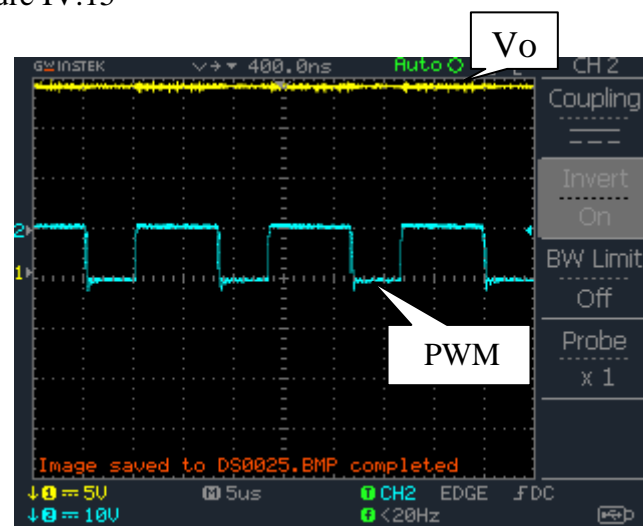
**Figure IV.15 :** Prototype du hacheur réalisé

#### IV.2.5.2. Tests effectués :

##### IV.2.5.2.1. Test du convertisseur DC-DC :

Dans un premier temps on a testé notre convertisseur en utilisant un générateur de tension pour différentes valeurs de tensions d'entrée et rapport cyclique du signal de commande :

**Le 1<sup>er</sup> test :**  $V_e = 10 \text{ V}$  et le rapport cyclique est  $D = 65 \%$  Les résultats obtenus sont représentés sur la figure IV.15



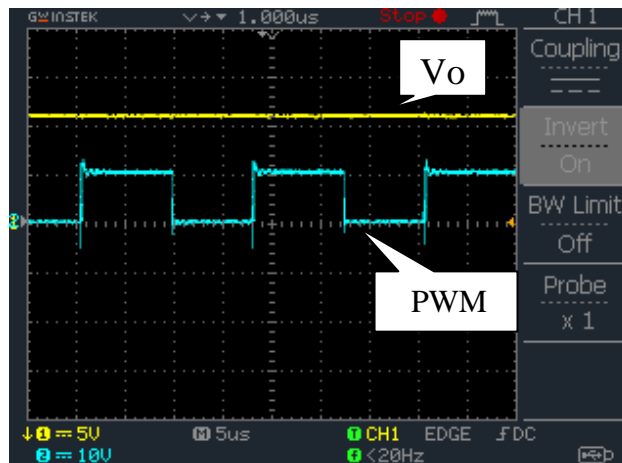
**Figure IV.16 :** Signal PWM et tension de sortie du Hacheur « 1<sup>er</sup> test »

Théoriquement on a la relation suivante :  $V_o / V_i = D / (1 - D)$   $V_o = V_i * D / (1 - D)$

$V_o = 18.57 \text{ V}$  cette valeur est proche de la valeur obtenue expérimentalement

$V_{o_{exp}} = 19 \text{ V}$ .

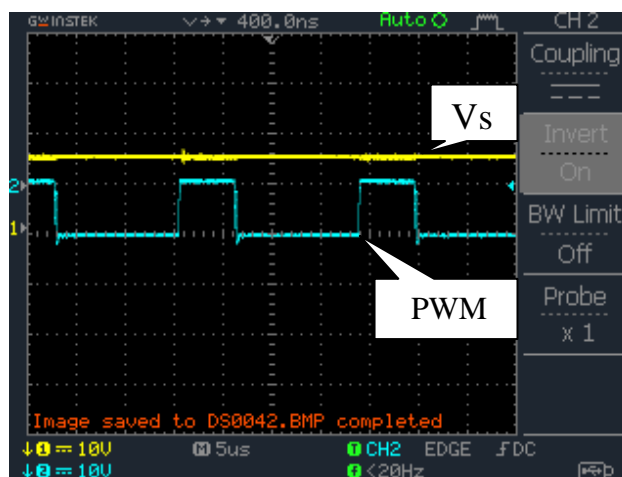
**Le 2ème test :**  $V_e = 10 \text{ V}$  et le rapport cyclique est  $D = 55 \%$  Les résultats obtenus sont représentés sur la figure IV.16



**Figure IV.17 :** Signal PWM et tension de sortie du Hacheur « 2<sup>ème</sup> test »

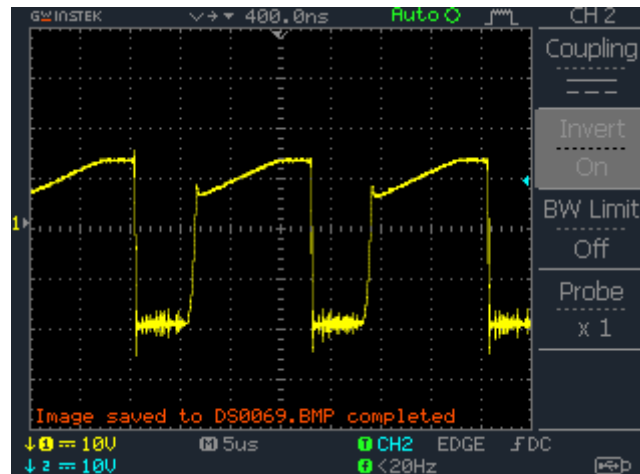
Théoriquement on a  $V_o = 12.22 \text{ V}$  et pratiquement on a  $V_{oexp} = 11.8 \text{ V}$ .

**Le 3ème test :**  $V_e = 20 \text{ V}$  et le rapport cyclique est  $D = 35 \%$  Les résultats obtenus sont représentés sur la figure IV.17



**Figure IV.18 :** signal PWM et tension de sortie du Hacheur 3<sup>ème</sup> test

Théoriquement on a  $V_o = 10.76 \text{ V}$  et pratiquement on a  $V_{oexp} = 14 \text{ V}$

**Tension aux bornes de l'inductance :****Figure IV.19 :** Tension aux bornes de l'inductance

La figure IV.18 montre bien que pendant l'alternance positive où l'interrupteur est à l'état ON la tension aux bornes de l'inductance est la tension d'entrée qui est égale à 10 V dans ce cas et pendant l'alternance négative où l'interrupteur est bloqué la tension aux bornes de l'inductance est la tension de sortie. Ce qui est bien vérifié par le modèle mathématique défini au chapitre 3 donc l'interrupteur est bien commandé .

**IV.2.5.2.2. Estimation des pertes du convertisseur DC-DC :**

Pour déterminer l'origine des pertes du convertisseur, on a effectué un essai réalisé dans des conditions proches de celles où le panneau photovoltaïque délivre 20 V. Le rapport cyclique était de 70% et le courant est de 3 A.

Pertes par commutation dans le Mosfet :

$$P_s = V_{ds} * I_d * (T_r + T_f) * f \quad \text{tel que } V_{ds} = V_i + V_{out} \quad T_r = 59 \text{ ns} \quad T_f = 58 \text{ ns}$$

$$P_s = 1.17 \text{ W}$$

Pertes par conduction dans le Mosfet :  $P_c = (R_{Dson} * I_d^2) * D$  tel que  $R_{dson} = 0.27 \Omega$  donc

$$P_c = 1.701 \text{ W} \text{ donc la puissance dissipée est } P_d = 2.87 \text{ W}$$

Pertes dans la diode de Schottky :

Pertes par conduction :

$$P_{cond} = V_D I_{Dmoy} + R_d I_d^2 \quad \text{donc } P_{cond} = 0.9 \text{ W}$$

Pertes dans l'inductance :

$$P_{ind} = RL \cdot I_L^2 = 6.61 \text{ W} + \text{les pertes magnétiques.}$$

Calcul de la résistance thermique du radiateur :

$$\phi_{sa} = \frac{T_j - T_a}{P_D} - (\phi_{jc} + \phi_{cs})$$

$\Phi_{sa}$  : Résistance thermique

$\Phi_{jc}$  : Résistance thermique entre la jonction et le boîtier.

$\Phi_{cs}$  : Résistance thermique entre le boîtier et le dissipateur.

$T_j$  : Température de jonction.

$T_a$  : température ambiante.

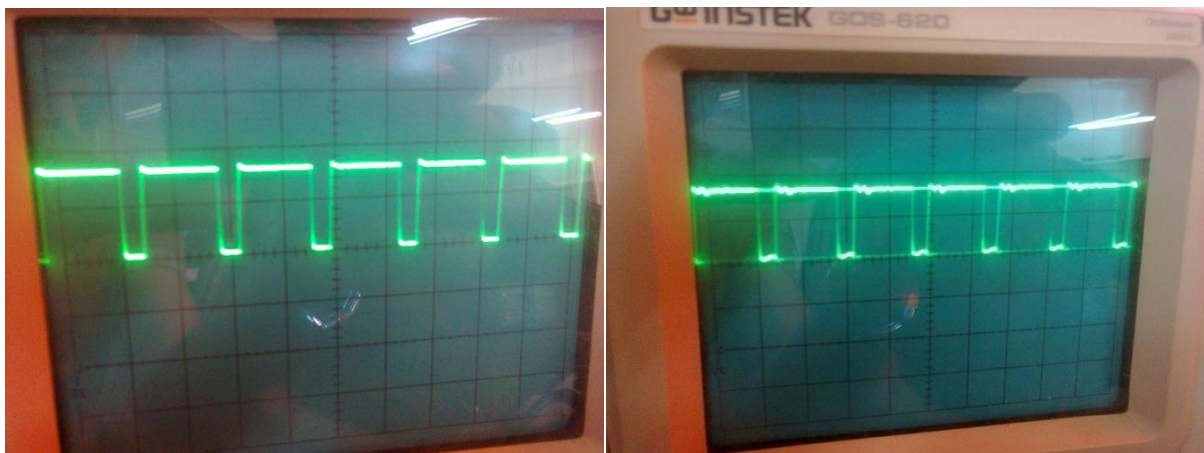
$P_D$  : La puissance dissipée.

Tel que  $T_{jmax} = 150^\circ\text{C}$   $T_a = 28^\circ\text{C}$   $P_D = 2.52 \text{ W}$ ,  $\Phi_{jc} = 0.45^\circ\text{C/W}$   $\Phi_{cs} = 0.24^\circ\text{C/W}$

Donc la résistance thermique  $\Phi_{sa} = 47.72^\circ\text{C/W}$

#### IV.2.5.2.1. Application à un GPV :

Après avoir programmé l'algorithme P&O pour la poursuite du point de puissance maximale sur un microcontrôleur PIC16F876 nous avons utilisé deux modules solaires à 36 cellules, en parallèle comme générateur photovoltaïque, nous avons constaté que le rapport cyclique D à la sortie de la carte de commande varie en fonction de l'éclairement et de la température figure IV.19 ce qui montre la bonne poursuite du point de puissance maximale malheureusement vu le manque d'instruments de mesures nous n'avons pas pu faire tous les tests souhaités pour la validation de la poursuite du PPM.



**Figure IV.20 :** Changement du signal PWM avec l'éclairement



**Conclusion :**

Au terme de cette partie, il est important de noter que la mise en pratique des études théoriques s'avère une étape très difficile, il n'est pas évident d'avoir une réalisation qui marche dès la première fois, c'est difficile de détecter la source du problème, chose que nous avons constatée au cours de notre étude pratique, car au cours des simulations plusieurs phénomènes qui apparaissent dans la réalité ne sont pas pris en considération.

## *Conclusion Générale*

Le travail que nous avons effectué avait comme objectif de concevoir et réaliser un étage d'adaptation pour un système photovoltaïque en fixant son point de fonctionnement à sa puissance optimale.

Nous avons procédé à une étude globale et une extraction du modèle mathématique des différents organes constituant le système photovoltaïque à savoir : les cellules photovoltaïques et leurs comportements lors des changements environnementaux, les hacheurs et leurs types ainsi que les différents types de stratégies de poursuite du point de puissance maximale.

Des simulations ont été effectuées pour voir le comportement du système photovoltaïque et l'efficacité de l'algorithme P&O à ensoleillement variable et une température fixe .

Nous avons réalisé un convertisseur buck-boost commandé par un microcontrôleur PIC16F876. L'utilisation du logiciel MikroC nous permet de développer facilement des programmes dans des algorithmes facilement évolutifs. L'application à un générateur de tension a bien fonctionné, l'application de la commande MPPT à un GPV nous a donné un bon résultat, chose qu'on a remarqué lors de la variation du rapport cyclique du signal de commande en fonction du changement de l'éclairement mais vu le manque des instrument on a pas pu prendre des mesures pour vérifier la poursuite du PPM.

Ce de recherche travail peut être poursuivi dans quelques points. Le premier point est l'amélioration du rendement du convertisseur qui est pour l'instant peu optimisé. Le second point l'algorithme de recherche du point de puissance maximale et d'utiliser d'autres algorithmes, insérer un étage de régulation de tension et de courant à la sortie du hacheur pour des applications spécifiées.

En ce qui nous concerne et pour résumer, nous avons pu, au cours de cette période, approfondir nos connaissances dans le domaine des convertisseurs DC/DC, des générateurs photovoltaïques, des microcontrôleurs ainsi que dans le domaine des composants de puissance en général. Cela apparaît comme une bonne base qui nous permet d'envisager une suite de ces travaux.

# Bibliographie

---

- [1] <http://www.new-energy-solution.org/pages/technologie/photovoltaique/effet-photovoltaique.html> : consulté en Mars 2014
- [2] D.LINCOT, « La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire », Découverte N° 344-345, Janvier-Février 2007, France.
- [3] C. CABAL, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque" Université Toulouse III – Paul Sabatier 2007.
- [4] F. KININGER, "Photovoltaic Systems Technology", thèse de doctorat University of Kassel, 2003.
- [5] F.CHEKIRED, "Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA" mémoire de magister 2008, ENP, Alger Algérie.
- [6] O.BOUKLI-HACENE, "Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique" mémoire de magister 2011 université de TLEMCCEN.
- [7] M.ADOUANE "Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique" mémoire de magister 2008, ENP, Alger Algérie.
- [8] A. RUFER "Cours d'Electronique de puissance Conversion DC/DC" Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- [9] M. ANGEL CID PASTO "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques" thèse de doctorat INSA Toulouse
- [10] M.BIRANE "Etude et simulation des systèmes photovoltaïque avec micro-convertisseur" mémoire de magistère 2011, ENP, Alger Algérie.
- [11] S.MOUHADJER "Easy Way to Electronic Converter Designers to Design a Buck Converter Application for Photovoltaic Systems" International Journal of Computer Applications Volume 50 – No.15, July 2012

## Bibliographie

---

- [12] K.SOBAlHI “Etude et réalisation d’un hacheur de tracking de point de puissance maximale (MPPT) à contre réaction de tension“ mémoire de magister 2003 ENP Alger.
- [13] M.S.RODRIGUEZ “Réalisation d’un étage d’adaptation pour générateur photovoltaïque “ INSA Toulouse 2008.
- [14] S.MOUHADJER “Contribution à l’optimisation du rendement des générateurs photovoltaïques et éoliens par l’intégration des systèmes électroniques d’adaptation à commande MPPT“ thèse de doctorat université de Tlemcen.
- [15] C.CABAL “Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque“ Doctorat de université de Toulouse 2008.
- [16] Z.SMARA “Etude de différentes stratégies de commande des systèmes de poursuite de la puissance maximale“ thèse de magister 2009 ENP Alger.
- [17] K.NECHE “Aide à la mise au point d’un banc de test photovoltaïque“ PFE 2008 ENP Alger.
- [18] Cours d’Electronique De Puissance IUT GEII – 2<sup>ème</sup> année – Option EEP