

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

## Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Energie et Environnement

Présenté par :

**M.BELLAGUE Abderrahmene**

**M. MOUSSA Ishak**

Thème

**Etude d'une alimentation à base de  
panneaux photovoltaïques**

Soutenu publiquement, le 29 / 09 /2020 , devant le jury composé de :

M.G. ABDELLAOUI	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
M <sup>me</sup> .S.BOURI	MCA	UAB Tlemcen	Directeur de mémoire
M <sup>me</sup> .I.BOUSMAHA	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M.A.TAHOUR	Professeur	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2019 /2020

# *Dédicace*

Je dédie ce modeste travail aux êtres les plus chers, je cite :

Mes meilleurs parents, que dieu les garde et les protège.

Mes sœurs : Amani, Ihcene et Imene.

Mon grand père et ma grande mère.

Mes oncles et tantes ainsi que leurs épouses, époux et enfants.

Toutes mes amies, particulièrement : Abdelghani, Abdelmalek, Bilal,

Abdelkader, Abderrahmane et Acheraf.

Toute la promotion 2017/2020 de l'école supérieure de science appliquée de  
Tlemcen.

Abderrahmene BELLAGUE

# *Dédicace*

Je dédie ce modeste travail aux êtres les plus chers, je cite :

Mes chers parents, papa AZZEDINE et maman MALIKA,

que dieu les garde et les protège.

Mon frère Housseem.

Mes sœurs Lamis et Kods, que j'aime beaucoup.

Et Tous mes amis.

I.MOUSSA



# Remerciements

---

Nous profitons de cette opportunité pour remercier en premier lieu DIEU tout puissant de nous avoir accordé le courage, la patience et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous voudrions tout d'abord adresser toute notre reconnaissance à la directrice de ce mémoire, Madame BOURI Siham, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions très chaleureusement tous les membres de jury : M. ABDELLAOUI Ghouti, Mme BOUSMAHA Imene et M. TAHOUR Ahmed pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de notre travail.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions répondu à nos questions durant notre recherche.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à élaborer et réaliser ce modeste mémoire.

## Résumé

---

Dans ce mémoire, nous allons procéder à l'étude d'une alimentation à base d'énergie renouvelable, plus précisément la réalisation d'un kit pour camping alimenté par un générateur photovoltaïque. On a commencé par la modélisation mathématique de générateur et les convertisseurs DC/DC (hacheur parallèle), Après on a les simulé sous logiciel ISIS Proteus avec la commande P&O pour commander le hacheur.

**Mots clés :** Hacheur boost ; Convertisseur DC/DC ; Arduino ; P&O ; ISIS Proteus ; Panneaux photovoltaïques

## Abstract

---

In this thesis, we will proceed to the study of a renewable energy-based power supply, more precisely the realization of a kit for camping powered by photovoltaic generators. We started with the mathematical modeling of the generator and the DC/DC converter (parallel chopper), then we simulated them under isis proteus software with the P&O command to control the chopper.

**Keywords:** Parallel chopper; DC/DC convertor; Arduino; P&O; ISIS Proteus; photovoltaic generator.

## Table des figures

---

Chapitre I :	
Fig.I.1 : La biomasse	03
Fig.I.2 : Fonctionnement d'une éolienne	05
Fig.I.3 : L'énergie hydraulique	06
Fig.I.4 : La géothermie	08
Fig.I.5 : Installation de l'énergie solaire	09
Chapitre II	
Fig.II.1 : Le soleil	11
Fig.II.2 : Les rayonnements solaires	12
Fig.II.3 : Cellule photovoltaïque	14
Fig.II.4 : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	14
Fig.II.5 : Les différentes technologies photovoltaïques	16
Fig.II.6 : Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque ( $G=1000\text{W/m}^2$ , $25^\circ\text{C}$ )	17
Fig.II.7 : Durée de vie d'un panneau photovoltaïque	19
Fig.II.8 : Impacts des variations de l'irradiation sur la puissance et le courant d'un module photovoltaïque	20
Fig.II.9 : Impacts de la température sur les performances d'une cellule photovoltaïque	21
Fig.II.10 : Symbole d'un hacheur	23
Fig.II.11 : Un hacheur à deux quadrants	24
Fig.II.12 : Un hacheur à quatre quadrants	24
Fig.II.13 : Schéma d'un hacheur boost	25
Fig.II.14 : Schéma d'un hacheur dévolteur	26
Fig.II.15 : Schéma d'un hacheur élévateur/abaisseur	26
Fig.II.16 : L'organigramme de la méthode P&O	28
Fig.II.17 : L'algorithme de la méthode de tension de référence constante	29
Fig.II.18 : L'algorithme de la méthode d'incrémentation de la conductance	30
Fig.II.19 : Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension, $V_{co}$	31
Fig.II.20 : Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant de court-circuit, $I_{cc}$	32
Fig.II.21 : Schéma synoptique du système PV adapté par une commande MPPT	33
Fig.II.22 : Exemple de batteries plomb ouvert	36
Fig.II.23 : Batterie solaire AGM	37
Fig.II.24 : Batterie solaire Gel	38
Fig.II.25 : Batterie solaire lithium de LG	39
Fig.II.26 : Schéma de principe d'un onduleur de tension monophasé appliqué sur une charge inductive (AB).	40
Fig.II.27: Schéma d'un onduleur off-line	41

Fig.II.28: Schéma d'un onduleur In-line	42
Fig.II.29: Schéma d'un onduleur On-line	42
Chapitre III :	
Fig.III.1 : Circuit électrique d'une cellule photovoltaïque	44
Fig.III.2 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n cellules identiques	46
Fig.III.3 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n cellules identiques	46
Fig.III.4 : Schéma électrique du convertisseur	47
Fig.III.5 : Le cas numéro 1 (S est ON)	48
Fig.III.6 : Le cas numéro 2 (S est OFF)	48
Fig.III.7 : Schéma de principe d'un onduleur en pont	50
Fig.III.8 : L'allure de la tension aux bornes de la charge	50
Fig.III.9 : La tension aux bornes de la charge	51
Fig.III.10 : Courant d'une charge résistive	51
Fig.III.11 : Les cas possibles de commutations de l'onduleur	52
Fig.III.12 : L'allure de la tension et de courant aux bornes de la charge	53
Chapitre IV :	
Fig.IV.1 : Présentation de la carte Arduino Uno	56
Fig.IV.2 Présentation de Capteur de courant INA169)	57
Fig.IV.3 : Diviseur de tension	58
Fig.IV.4 Circuit de l'alimentation à bas d'énergie solaire	60
Fig.IV.5 Tension aux bornes de port USB	61
Fig.IV.6 : Tension délivrée par le PV	61
Fig.IV.7 : Courant délivrée par le PV	62
Fig.IV.8 : Tension à la sortie de hacheur	62
Fig.IV.9 : Commande MLI de l'onduleur	63
Fig.IV.10 : Tension aux bornes de la charge résistive	64
Fig.IV.11. : Courant aux bornes de la charge résistive	64
Fig.IV.12 : Tension aux bornes de la charge inductive	65
Fig.IV.13 Courant aux bornes de la charge inductive	65

# Table des matières

---

.....	1
.....	1
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur .....	1
<b>Mémoire de fin d'étude</b> .....	1
Remerciements .....	i
Résumé .....	ii
Abstract .....	ii
Table des figures .....	iii
Table des matières .....	iii
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Etat de l'art.....	3
<b>I.1. Introduction</b> .....	3
<b>I.2. La biomasse</b> .....	3
<b>I.2.1. Définition</b> .....	3
<b>I.2.2. Principe de fonctionnement de la biomasse</b> .....	3
<b>I.2.2.1. Production de chaleur par combustion</b> .....	4
<b>I.2.2.2. Production de chaleur par méthanisation</b> .....	4
<b>I.3. L'énergie éolienne</b> .....	4
<b>I.3.1. Définition</b> .....	4
<b>I.3.2. Principe de fonctionnement de l'éolienne</b> .....	4
<b>I.4. L'énergie hydraulique</b> .....	5
<b>I.4.1. Définition</b> .....	5
<b>I.4.2. Principe de fonctionnement</b> .....	6
<b>1. Le barrage</b> .....	6
<b>2. Le pilotage de la conduite de l'eau</b> .....	6
<b>3. La production d'électricité</b> .....	6
<b>4. Le réglage de la tension et l'écoulement de l'eau</b> .....	7
<b>I.5. La géothermie</b> .....	7
<b>I.5.1. Définition</b> .....	7
<b>I.5.2. Principe de fonctionnement</b> .....	7
<b>I.6. L'énergie solaire</b> .....	8
<b>I.6.1. Définition</b> .....	8
<b>I.6.2. Principe de fonctionnement</b> .....	8

1.6.2.1. L'énergie solaire thermique .....	8
1.6.2.2. L'énergie solaire photovoltaïque .....	9
<b>I.7. Conclusion .....</b>	<b>9</b>
Chapitre II : Les composants d'un système photovoltaïque .....	10
<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>10</b>
<b>II.2. Générateur photovoltaïque.....</b>	<b>10</b>
II.2.1. Le soleil.....	10
II.2.2. Le rayonnement solaire .....	11
II.2.3. L'effet photovoltaïque.....	12
<b>II.3. Cellule photovoltaïque .....</b>	<b>12</b>
<b>II.3.1. Cellules solaires au silicium</b> <b>II.3.1.1. Cellules solaires au silicium cristallin</b> <b>1) Cellules solaires au silicium monocristallin .....</b>	<b>13</b>
<b>II.3.1.2. Cellules solaires au silicium amorphe.....</b>	<b>14</b>
<b>II.3.1.3. Cellules solaires aux composites.....</b>	<b>14</b>
<b>II.4. Caractéristiques du panneau photovoltaïque .....</b>	<b>15</b>
<b>II.4.1. Courant de court circuit (short circuit current), <math>I_{sc}</math> .....</b>	<b>16</b>
<b>II.4.2. Tension à circuit ouvert, <math>V_{oc}</math>.....</b>	<b>16</b>
<b>II.4.3. Facteur de forme FF .....</b>	<b>17</b>
<b>II.4.4. Le rendement énergétique <math>\eta</math>.....</b>	<b>17</b>
<b>II.5. Facteurs influençant sur le rendement du panneau photovoltaïque.....</b>	<b>17</b>
<b>II.5.1. Dégradation des fabricants de modules photovoltaïques.....</b>	<b>17</b>
<b>II.5.2. Variation du rayonnement solaire .....</b>	<b>18</b>
<b>II.5.3. Température du module .....</b>	<b>19</b>
<b>II.6. Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques.....</b>	<b>19</b>
<b>II.6.1. Les avantages.....</b>	<b>19</b>
<b>II.6.2. Les inconvénients.....</b>	<b>20</b>
<b>II.7. Hacheur .....</b>	<b>21</b>
<b>II.7.1. Utilisation des hacheurs .....</b>	<b>21</b>
<b>II.7.2. Types d'hacheur .....</b>	<b>21</b>
<b>II.7.2.1. Classement en fonction de la direction du courant et de la tension de sortie.....</b>	<b>22</b>
<b>II.7.2.2. Classement selon le processus de commutation .....</b>	<b>23</b>
<b>II.7.2.3. Classement selon la tension de sortie .....</b>	<b>23</b>
<b>II.7.2.4. Classement en fonction de la perte de puissance survenue lors de la mise en marche ou de l'arrêt du dispositif de commutation.....</b>	<b>25</b>
<b>II.8. Commandes pour la recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT).....</b>	<b>26</b>
<b>II.8.1. Première catégorie.....</b>	<b>26</b>

II.8.1.1. La méthode de perturbation et observation (P&O) .....	26
II.8.1.2. La méthode de tension de référence constante .....	27
II.8.1.3. La méthode d'incrémentation de la conductance.....	28
II.8.2. Deuxième catégorie .....	29
II.8.2.1. Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension, $V_{co}$ .....	29
II.8.2.2. Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant de court-circuit, $I_{cc}$ .....	30
II.10. Batteries .....	32
II.10.1. Les critères déterminants pour choisir une batterie solaire .....	32
II.10.1.1. La capacité de stockage.....	32
II.10.1.2. La profondeur de décharge .....	33
II.10.1.3. L'espérance de vie .....	33
II.10.2. Les différents types de batteries solaires .....	33
II.10.2.1. Les batteries au plomb .....	33
II.10.2.2. Les batteries lithium.....	36
II.10. Onduleur .....	37
II.10.1. Définition.....	37
II.10.2. Le rôle de l'onduleur .....	38
II.10.3. Principe de fonctionnement .....	38
II.10.4. Types d'onduleurs .....	38
II.10.4.1. Onduleurs autonomes .....	38
II.10.4.2. Onduleurs non autonomes .....	41
II.11. Conclusion.....	41
Chapitre III : modélisation du système d'alimentation .....	42
III.1. Introduction .....	42
III.2. Modélisation du panneau photovoltaïque.....	42
III.2.1. Association des cellules photovoltaïques .....	44
III.2.1.1. Association en série.....	44
III.2.1.2. Association en parallèle .....	44
III.3. Modélisation du convertisseur boost.....	45
III.4. Modélisation de l'onduleur .....	48
III.4. Conclusion .....	52
Chapitre IV : Calcul et choix des composants de l'alimentation.....	53
IV.1. Introduction.....	53
IV.2. Calcul et choix des composantes .....	53
IV.2.1. Bloc de charge .....	53

<b>IV.2.2. Bloc d'alimentation</b> .....	54
<b>IV.2.3. Bloc convertisseur</b> .....	54
<b>IV.2.3.1. Bloc commande</b> .....	54
<b>IV.2.4. Bloc de puissance</b> .....	57
<b>IV.2.4.1. Choix du Transistor</b> .....	57
<b>IV.2.4.2 Choix de la Diode</b> .....	57
<b>IV.2.5. Bloc stockage</b> .....	58
<b>IV.3. Résultats de simulation</b> .....	59
<b>Les sorties du circuit</b> .....	60
<b>La sortie alternative (onduleur)</b> .....	62
<b>IV.4. Conclusion</b> .....	64
<b>Conclusion Générale</b> .....	65
<b>Bibliographie</b> .....	66
<b>Annexes</b> .....	68
<b>Arduino Uno</b> .....	68
<b>Choix du Transistor</b> .....	75
<b>Choix de la Diode</b> .....	77
<b>La Bobine</b> .....	78
<b>Les Condensateurs</b> .....	79

## Introduction Générale

---

Le système énergétique peut être considéré comme un réseau composé de production d'énergie, de stockage d'énergie, de transport, de distribution et de consommation. Les types d'énergie les plus importants du système énergétique apparaissent dans les secteurs des transports, du chauffage et de l'électricité. Ces secteurs s'appuient généralement sur des sources d'énergie traditionnelles basées sur des combustibles fossiles, tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Cependant, avec l'émergence d'alertes mondiales sur le changement climatique, il est crucial de remplacer les combustibles fossiles par un grand nombre de sources d'énergie renouvelables (comme le solaire, l'hydroélectricité et l'éolien) dans le système énergétique.

L'énergie solaire (la lumière rayonnante et la chaleur du soleil) a été utilisée par l'humanité grâce à une série de technologies en évolution depuis les temps anciens. L'énergie éolienne et houlomotrice, l'énergie hydroélectrique et la biomasse constituent des sources d'énergie renouvelables disponibles sur terre.

La technologie solaire est généralement définie comme une technologie passive ou active : la technologie solaire active utilise des panneaux photovoltaïques, la technologie solaire passive comprend les matériaux avec de bonnes propriétés thermiques et un espace de conception pour une circulation naturelle Air, et se réfère à la position du bâtiment par rapport au soleil.

La technologie solaire active développe l'approvisionnement énergétique et est considérée comme une technologie d'approvisionnement, tandis que l'énergie solaire passive réduit le besoin de ressources alternatives et est souvent considérée comme un besoin Technologie secondaire.

Les applications des énergies photovoltaïques sont nombreuses et variées. Pour classer ces applications, on distingue celles connectées aux réseaux électriques et celles isolées [1].

Notre projet est classé dans les applications isolées, car ce projet a pour but de réaliser une alimentation à base d'énergie photovoltaïque, qui va être comme une alimentation pour un kit solaire de camping, en associant tous les éléments nécessaires comme les batteries, le convertisseur DC/DC et la charge représentée par l'éclairage et le rechargement des appareils électroniques. Notre projet, le kit solaire, est adapté aux besoins des campeurs et adapté à leurs budgets.

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre portera sur une présentation des énergies renouvelables et ses différents domaines.
- Le deuxième chapitre est une généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque.

## Introduction Générale

---

- Le troisième chapitre traitera la modélisation des éléments nécessaires pour la réalisation du kit solaire de camping, à savoir la modélisation des panneaux photovoltaïques et le convertisseur DC/DC.
- Le quatrième chapitre : une simulation du kit solaire sous le logiciel Isis Proteus Professional 8 et discussion des résultats obtenus.

# Chapitre I : Etat de l'art

## I.1. Introduction

---

Il existe aujourd'hui différentes sources d'énergie pour produire l'électricité, comme les énergies renouvelables et non renouvelables. Les énergies renouvelables sont : l'énergie solaire, la géothermie, l'énergie hydraulique, la biomasse et l'éolien.

Dans ce chapitre, on décrira les différentes énergies renouvelables ainsi que leurs principes de fonctionnement.

## I.2. La biomasse

---

### I.2.1. Définition

La biomasse est le terme utilisé pour tous les matériels organiques extraits des plantes, des arbres, et des cultures agricoles dont le but est de collecter et stocker l'énergie du soleil par la photosynthèse. La bioénergie est donc la conversion de la biomasse en utilisable énergie comme la chaleur, l'électricité, et les carburants.

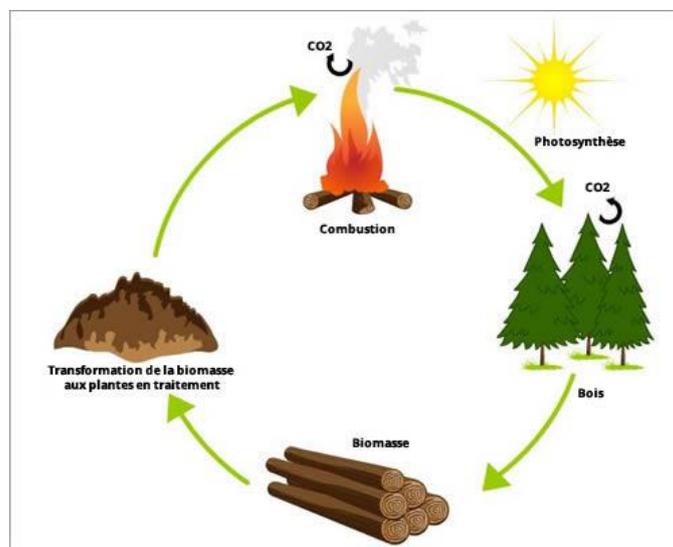


Fig.I.1 : La biomasse.

### I.2.2. Principe de fonctionnement de la biomasse

Il existe deux méthodes pour la production de l'énergie électrique à partir de la biomasse, la combustion et la méthanisation.

### I.2.2.1. Production de chaleur par combustion

La chaleur est produite par l'oxydation complète du combustible, en général en présence d'un excès d'air. L'eau chaude ou la vapeur ainsi obtenues sont utilisées dans les procédés industriels ou dans les réseaux de chauffage urbain. La vapeur peut également être envoyée dans une turbine ou un moteur à vapeur pour la production d'énergie mécanique ou, surtout, l'électricité. La production combinée de chaleur et d'électricité est appelée cogénération.

### I.2.2.2. Production de chaleur par méthanisation

La principale filière de cette voie est la méthanisation. Il s'agit d'un procédé basé sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique. Elle s'opère dans un digesteur chauffé et sans oxygène (réaction en milieu anaérobie). Ce procédé permet de produire :

- **Le biogaz** qui est le produit de la digestion anaérobie des matériaux organiques.
- **Le digestat** qui est le produit résidu de la méthanisation, composé de matière organique non biodégradable. [2]

## I.3. L'énergie éolienne

---

### I.3.1. Définition

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des Vents.

### I.3.2. Principe de fonctionnement de l'éolienne

Une éolienne est composée de quatre éléments principaux :

- **Un rotor** : Composé de pâles (en général deux ou trois) qui tourne sous l'effet du vent, est branché directement ou indirectement sur un générateur électrique.
- **Une nacelle** : Au sommet du mât, il abrite l'ensemble des éléments mécaniques, électriques ou électroniques indispensables au bon fonctionnement de l'éolienne.
- **Un mât** : Il permet de placer le rotor et la nacelle à une hauteur suffisante afin que l'effet d'entraînement puisse se produire, tout en supportant leur poids.
- **Un poste de livraison** : Il transfère l'électricité produite au réseau électrique.

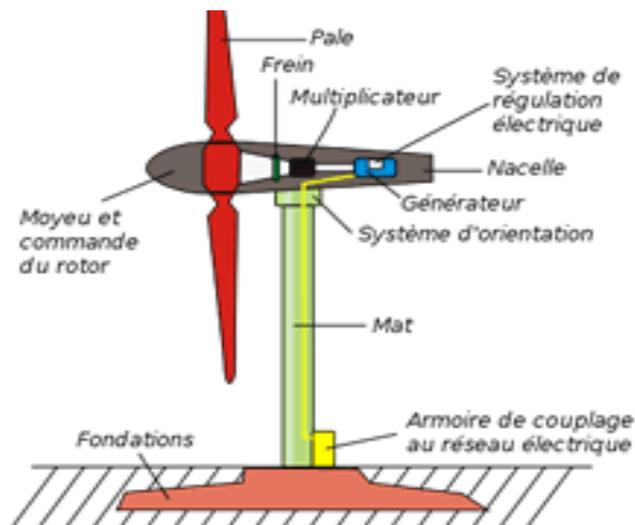


Fig.I.2 : Fonctionnement d'une éolienne.

### I.4. L'énergie hydraulique

---

#### I.4.1. Définition

L'énergie hydraulique permet de fabriquer l'électricité, dans les centrales hydroélectriques, grâce à la force de l'eau. Cette force dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (centrales de haute ou moyenne chute), soit du débit des fleuves et des rivières (centrales au fil de l'eau).

L'énergie hydraulique dépend du cycle de l'eau. Elle est la plus importante source d'énergie renouvelable.

Une centrale hydraulique est composée de 3 parties : [3]

- Le barrage qui retient l'eau
- La centrale qui produit l'électricité
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique



Fig.I.3 : L'énergie hydraulique.

### **I.4.2. Principe de fonctionnement**

Le principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique est directement issu de l'histoire et de l'expérience acquise sur la transformation d'une énergie cinétique comme celle de l'eau en énergie mécanique ou électrique. À l'image de nombreuses autres centrales, le fonctionnement d'une centrale hydraulique est donc fondé sur 4 étapes clés, à savoir :

#### **1. Le barrage**

Le barrage a évidemment un rôle de retenue de l'eau, le principe est de construire un barrage assez grand et solide pour être en mesure de stocker une grande quantité d'eau en retenant l'écoulement naturel de celle-ci grâce à cette technique, il se forme ensuite une sorte de lac devant le barrage.

#### **2. Le pilotage de la conduite de l'eau**

Une fois que le barrage a permis le stockage de l'eau, celle-ci est ensuite dirigée, selon un rythme précis, vers de grands tuyaux mécaniques que l'on appelle des conduites forcées. Le principe est de conduire, à l'aide de ces tuyaux l'eau vers la centrale hydraulique qui sera située en contrebas. Aujourd'hui, l'ensemble de ce processus est piloté de manière automatique. Autrefois, il fallait toutefois une intervention manuelle pour ouvrir et fermer les vannes, mouvements nécessaires à l'écoulement de l'eau.

#### **3. La production d'électricité**

La conduite est directement conçue pour pouvoir faire entrer l'eau directement dans la centrale à un endroit précis où celle-ci pourra être en mesure de faire tourner une turbine. Cette turbine entraînée par la force de l'eau fera ensuite tourner un alternateur qui produira un courant électrique alternatif.

### 4. Le réglage de la tension et l'écoulement de l'eau

La tension électrique alternative sera gérée par un transformateur afin de rendre le courant électrique transportable dans des lignes à très haute tension.

L'eau qui est passée dans la turbine a donc perdu de sa puissance et peut être rejetée dans la rivière via un canal de fuite spécialement destiné à cette évacuation.

## I.5. La géothermie

---

### I.5.1. Définition

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C).

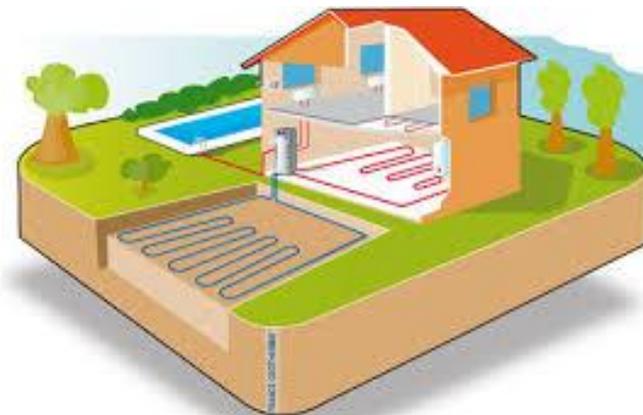


Fig.I.4 : La géothermie.

### I.5.2. Principe de fonctionnement

Le principe de la géothermie consiste à puiser dans une nappe phréatique ou le plus souvent à prélever l'énergie gratuite contenue dans le sol pour chauffer une habitation, cette énergie est constamment renouvelée par la nature, le soleil, le vent et la pluie. C'est donc une énergie renouvelable. Ce transfert d'énergie de l'extérieur vers l'intérieur est assuré par deux échangeurs, un détendeur et un générateur :

- L'évaporateur est un échangeur de chaleur qui prélevé l'énergie dans le sol, celui-ci est soit constitué de tuyaux en PEHD (tuyauterie souple) ou circule un fluide caloporteur (eau glycolée) formant une nappe horizontale soit par un forage

intégrant un échangeur vertical ou encore en prélevant la chaleur de l'eau directement dans une nappe phréatique. Le milieu où l'on prélève l'énergie est appelée la source froide.

- Le condenseur restitue cette énergie souvent par un chauffage au sol c'est-à-dire des tuyaux intégrés dans une chappe avant carrelage ou de ventilo-convecteurs (air pulsé), ou encore des radiateurs basse température. Le milieu où l'on restitue l'énergie est appelée la source chaude. Ce transfert d'énergie est possible grâce à un générateur et un compresseur. Cet ensemble constitue la pompe à chaleur. [4]

## I.6. L'énergie solaire

---

### I.6.1. Définition

Par définition, l'énergie solaire est l'énergie dont la matière première est le soleil. Elle est gratuite, inépuisable et en plus, disponible dans le monde entier. Synonyme d'écologie, cette source d'énergie est en plus propre, c'est-à-dire qu'elle n'émet aucun gaz à effet de serre.



Fig.I.5 : Installation de l'énergie solaire.

### I.6.2. Principe de fonctionnement

Il existe des techniques pour l'exploitation de l'énergie solaire, en énergie solaire thermique et en énergie solaire photovoltaïque.

#### I.6.2.1. L'énergie solaire thermique

Ce type d'énergie est produit à partir de panneaux solaires thermiques posés sur le toit de la maison pour capter la chaleur du soleil. Les panneaux solaires thermiques contiennent des fluides caloporteurs, une fois chauffés par le soleil, ces derniers chauffent à leur tour le ballon

d'eau chaude. L'énergie thermique solaire ainsi obtenue peut être employée de différentes façons : chauffage solaire, chauffe-eau, cuisinières...

### **I.6.2.2. L'énergie solaire photovoltaïque**

Si l'énergie solaire thermique est obtenue par la chaleur du soleil, l'énergie solaire photovoltaïque l'est par l'énergie même du rayonnement solaire. Autrement dit, les panneaux photovoltaïques, souvent installés sur le toit, recueillent les photons du soleil et les transforment en électricité. Ces panneaux photovoltaïques sont composés d'une superposition de couches de cellules dont l'une est chargée négativement et l'autre positivement. Dès qu'un photon traverse ces couches, il produit une tension électrique. Il ne reste plus qu'à raccorder un fil à la borne négative et un autre à la borne positive pour exploiter l'électricité produite. En gros, l'énergie solaire photovoltaïque fonctionne comme une pile.

## **I.7. Conclusion**

---

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur les énergies renouvelables. Dans ce qui suit, on étudiera les différents composants d'un système photovoltaïque.

## Chapitre II : Les composants d'un système photovoltaïque

### II.1. Introduction

---

Dans ce chapitre on va parler des éléments nécessaires pour une alimentation à base des panneaux photovoltaïques représentés par les cellules solaires et ses différentes technologies, les panneaux photovoltaïques et ses caractéristiques, les facteurs influençant sur leurs rendements, et aussi l'élément de stockage représenté par les batteries.

Mais avant tout ça, il est important de parler de la source qui est bien le soleil. Pour cela, on va commencer notre chapitre par l'origine des rayonnements solaire et ses différents types et comment obtenir l'électricité à partir de ces rayonnements (l'effet photovoltaïque).

### II.2. Générateur photovoltaïque

---

#### II.2.1. Le soleil

Le Soleil est l'étoile du système solaire. Dans la classification astronomique, c'est une étoile de type naine jaune d'une masse d'environ  $1,9891 \times 10^{30}$  kg, composée d'hydrogène (75 % de la masse ou 92 % du volume) et d'hélium (25 % de la masse ou 8 % du volume) [4].



Fig.II.1 : Le soleil

### II.2.2. Le rayonnement solaire

La vitesse de la lumière est de 300000 km/s, donc les rayons du soleil prennent environ 8 minutes pour atteindre la terre. Le constant solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au Soleil, sa valeur est communément prise égale à 1 360 W/m<sup>2</sup> (bien qu'elle varie de quelques % dans l'année à cause des légères variations de la distance Terre-Soleil).

Le flux reçu par la terre est inférieur aux flux initiaux, c'est à cause de son absorption par le gaz atmosphérique et la vapeur d'eau, alors le flux reçu dépend de l'épaisseur de l'atmosphère traversé. On peut diviser cette matière première de l'énergie solaire en trois parties ou rayonnements :

- **Le rayonnement direct** : les rayons du soleil qui nous parviennent en ligne droite.
  - **Le rayonnement diffus** : les rayons qui subissent de multiples réflexions et nous parviennent alors de toutes les directions à travers les nuages. Le rayonnement solaire est entièrement diffus lorsqu'on ne peut plus voir où se trouve le soleil.
  - **Le rayonnement global** : c'est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.
  - **Le rayonnement réfléchi** : par le sol et les objets qui se trouvent à la surface.
- [5]

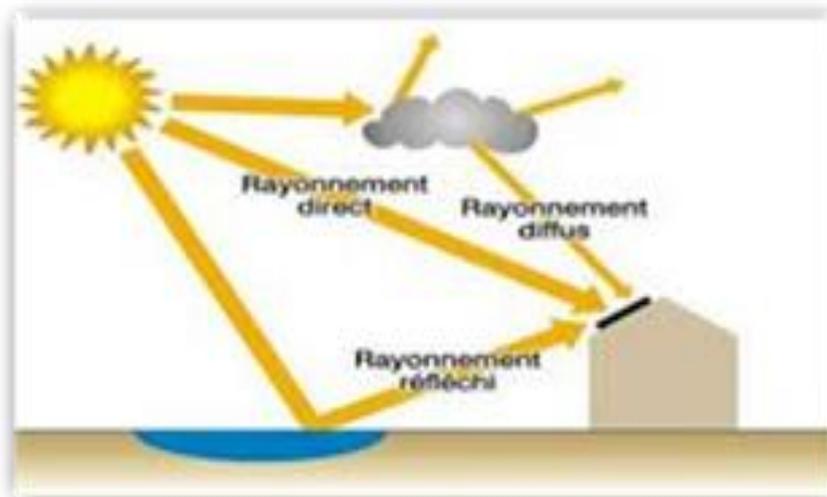


Fig.II.2 : Les rayonnements solaires.

### II.2.3. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert par Antoine Becquerel en 1839. C'est un effet photoélectrique caractérisé par la production d'un courant électrique entre deux pièces de matériaux différents en contact et exposées à la lumière ou, en général, au rayonnement électromagnétique.

L'effet photovoltaïque consiste à convertir la lumière solaire en énergie électrique au moyen de cellules photovoltaïques. Ces cellules sont des dispositifs à semi-conducteurs fabriqués à partir de silicium pur avec l'ajout d'impuretés de certains éléments chimiques. Les cellules photovoltaïques sont capables de générer de l'électricité en courant continu, en utilisant le rayonnement solaire comme source [6].

### II.3. Cellule photovoltaïque

---

C'est une composante électronique qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par l'effet photovoltaïque. Elle est faite de matériels semi-conducteur comme le silicium.

Pas comme une batterie, la cellule photovoltaïque n'utilise pas les réactions chimiques ou bien la nécessité de carburant pour produire l'énergie électrique. Et aussi pas comme un générateur électrique, la cellule photovoltaïque n'a pas des pièces mobiles [7]. Dans une cellule solaire, il y a deux couches de silicium :

- Une couche est dopée avec un dopant de type n (généralement Phosphores).
- Une couche est dopée avec un dopant de type p (généralement Bohr).

Lorsque les deux couches dopées de silicium sont en contact, les trous (+) du côté de type-p et les électrons (-) du côté type-n s'attirent, et les charges opposées commencent à se neutraliser mutuellement. Ce mouvement d'électrons va créer un champ électrique, et forme la région d'épuisement.

La région d'épuisement agit comme une barrière entre les deux contacts de Silicium, de sorte que les électrons et les trous ne se croisent et ne se combinent plus.

Lorsque la lumière du soleil frappe la cellule, le photon (paquets d'énergie lumineuse) excite les atomes de Silicium, provoquant des électrons à se mobiliser et à se libérer.

L'excès d'électrons reste sur le côté type-n en raison du champ électrique, tandis que les trous sont balayés vers le côté type-p par ce champ électrique.

L'excès d'électrons entraîne une charge négative supplémentaire d'un côté, et les trous créent une charge positive supplémentaire de l'autre côté.

Lorsque les deux contacts sont connectés dans un circuit, les électrons sont attirés par le côté type-p et voyagent sur le câble. Le résultat est bien un courant électrique.

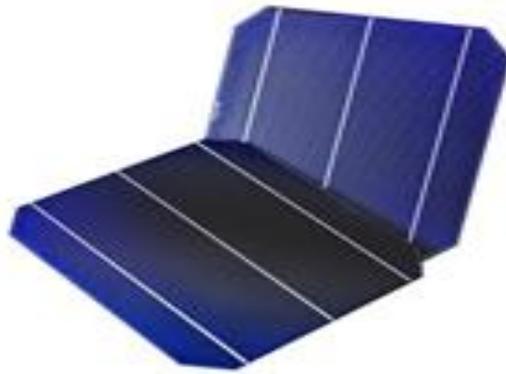


Fig.II.3 : Cellule photovoltaïque.

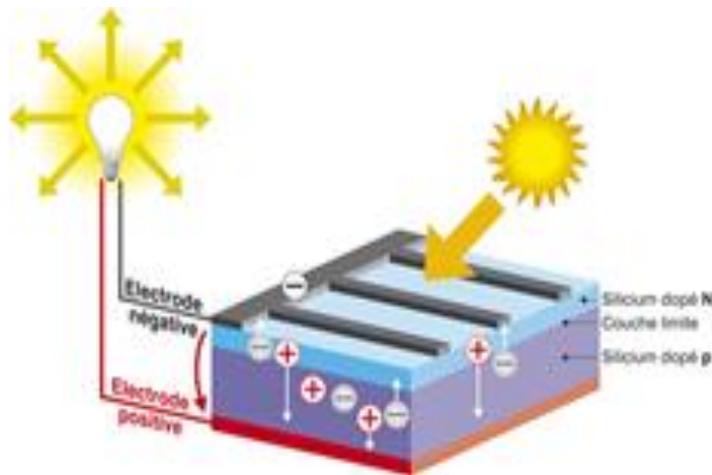


Fig.II.4 : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

### II.3.1. Cellules solaires au silicium

#### II.3.1.1. Cellules solaires au silicium cristallin

##### 1) Cellules solaires au silicium monocristallin

Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairement, il est à la base des panneaux « terrestres » les plus performants après ceux à l'arséniure de gallium.

- Rendement électrique des panneaux : 15 à 20 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 300 W.
- Gamme d'éclairement : 100 à 1 000 W/m<sup>2</sup>.
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance : télécommunications, habitat, centrales et toits solaires.

##### 2) Cellules solaires au silicium poly cristallin

Il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairagements modérés, et également moins onéreux.

- Rendement électrique des panneaux : 12 à 17 %
- Puissance des panneaux : 5 à 300 W.
- Gamme d'éclairement : 200 à 1 000 W/m<sup>2</sup>.

### II.3.1.2. Cellules solaires au silicium amorphe

Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe.

- Rendement électrique des panneaux : 5-7 % (jusqu'à 12 % pour les « multi-jonctions »).
- Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1 W.
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 90 W.
- Gamme d'éclairement : 20 lux (en intérieur) à 1 000 W/m<sup>2</sup> (en extérieur).
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes...), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi-transparentes, centrales au sol.

### II.3.1.3. Cellules solaires aux composites

#### 1) Cellules solaires aux composites monocristallins

Ce matériau à très haut rendement est un cas à part : très onéreux du fait des éléments utilisés, il n'est employé que pour des panneaux solaires de satellites ou sur des systèmes à concentration. Dans ces applications, le rendement et le poids sont les critères de sélection et non pas le prix !

- Rendement électrique : 25-40 %.
- Usage : satellites, concentrateurs.
- Particularité : prix très élevé.

#### 2) Cellules solaires aux composites polycristallins

Intéressant surtout pour son coût de fabrication devenu très basse ces dernières années, ce matériau, qui a longtemps souffert de problèmes de stabilité et de maîtrise des procédés industriels, est aujourd'hui le leader incontesté des couches minces.

- Rendement énergétique des panneaux : 8 à 10 %
- Puissance des panneaux : 70 à 90 W
- Gamme d'éclairement : extérieur
- Usage : centrales solaires principalement. [4].

La figure (II.5) représente les différentes technologies photovoltaïques :

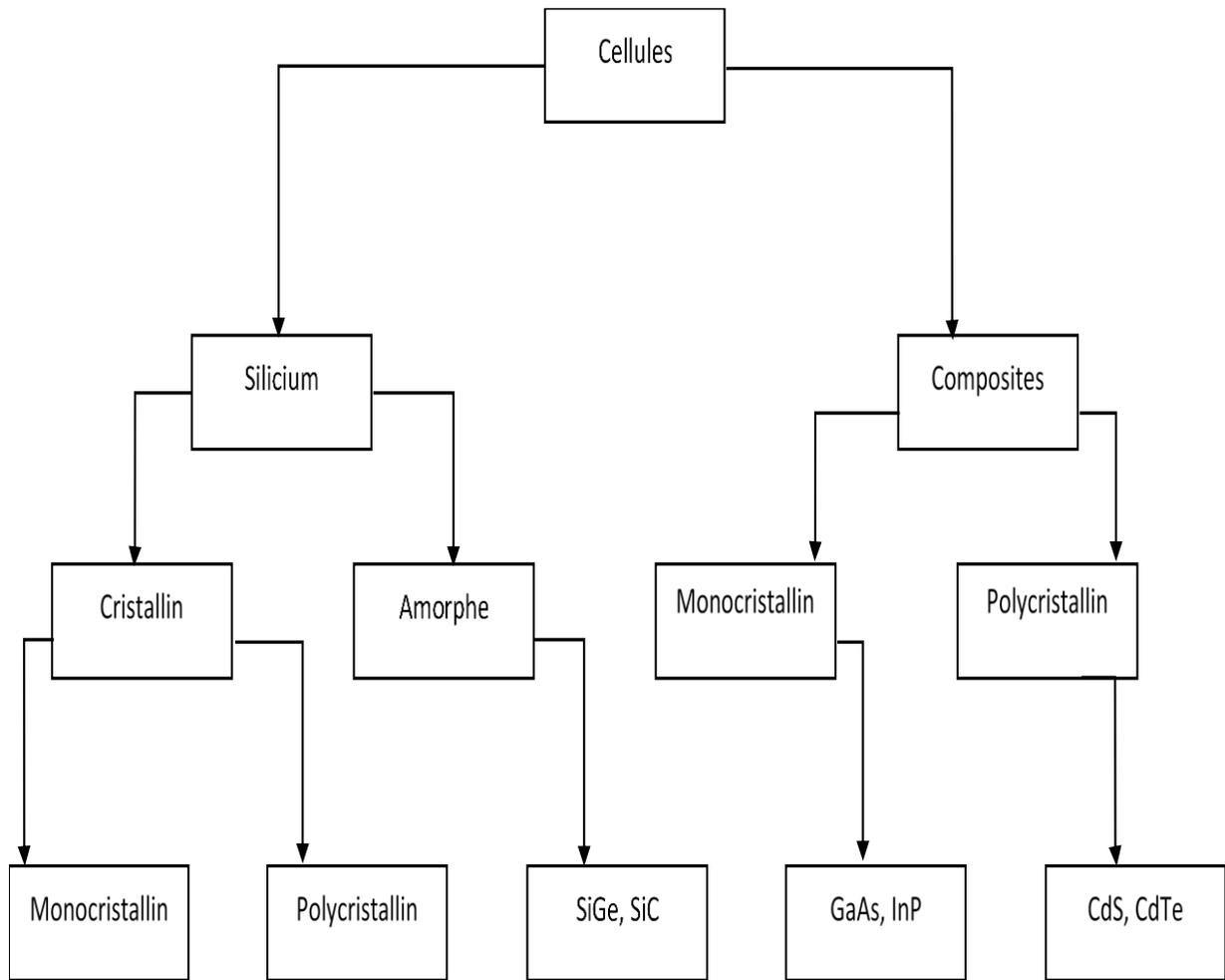
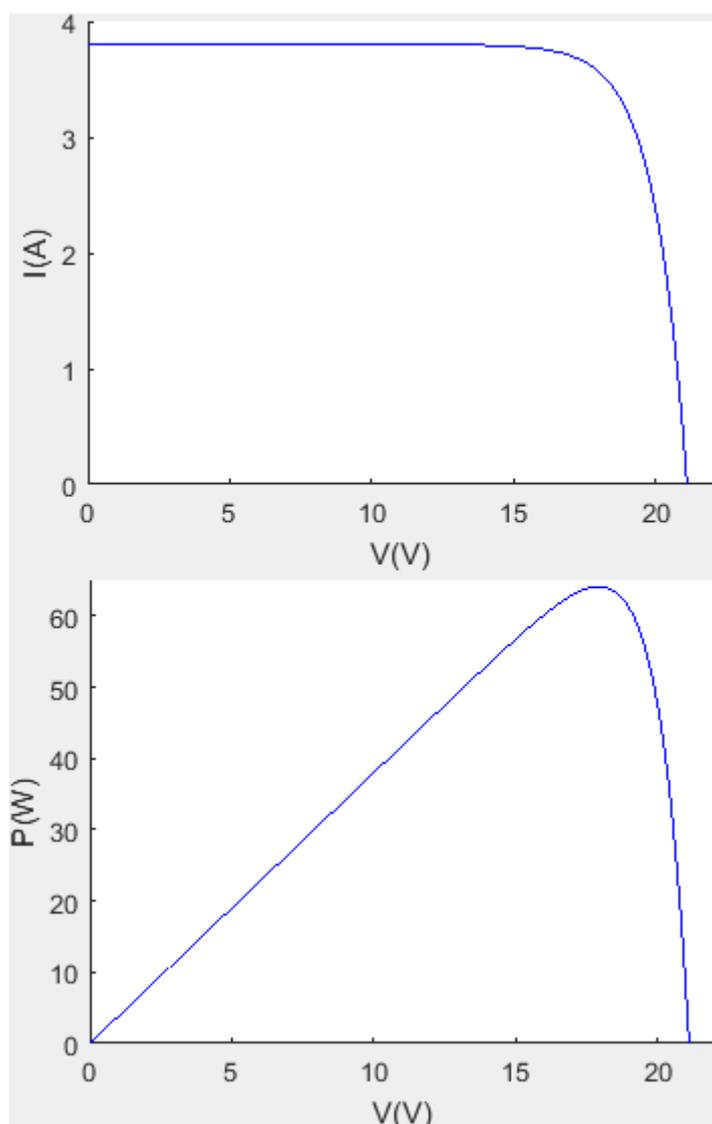


Fig.II.5 : Les différentes technologies photovoltaïques.

#### II.4. Caractéristiques du panneau photovoltaïque

---

La figure (II.6) montre les caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'une cellule du générateur photovoltaïque sous les conditions atmosphériques standards.



FigII.6 : Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque  
( $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ ).

A partir de ces caractéristiques on déduit les paramètres électriques de la cellule photovoltaïque :

### II.4.1. Courant de court circuit (short circuit current), $I_{sc}$

C'est le courant obtenu lorsqu'en court-circuitant les bornes de la cellule, il dépend de la longueur d'onde du rayonnement et la température.

### II.4.2. Tension à circuit ouvert, $V_{oc}$

C'est la tension correspondante à une intensité de courant nul, elle dépend de la barrière de potentiel et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse

$$V_{oc} = \frac{KT_j}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_{sh}} + 1 \right)$$

### II.4.3. Facteur de forme FF

C'est le facteur de performance des cellules photovoltaïques, ce facteur est le rapport entre la puissance maximale délivrée et le produit de courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Plus le rapport approche de l'unité, plus les cellules photovoltaïques ne sont de bonnes qualités.

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

Avec :

$I_{MPP}$  : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

$V_{MPP}$  : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

### II.4.4. Le rendement énergétique $\eta$

Le rendement énergétique d'une cellule est défini par le rapport entre la puissance électrique maximale ( $P_{max}$ ) et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule photovoltaïque :

$$\eta_{cell} = \frac{P_{max}}{G \times S_{cell}}$$

Avec :

$G$  : l'ensoleillement ( $W/m^2$ ) ;

$S_{cell}$  : surface active de la cellule ( $m^2$ ) ;

$P_{max}$  : puissance maximale mesurée dans les conditions de référence.

## II.5. Facteurs influençant sur le rendement du panneau photovoltaïque

---

### II.5.1. Dégradation des fabricants de modules photovoltaïques

Des systèmes photovoltaïques solaires garantissent généralement la durée de vie de 25 ans pour les modules, comme le montre la figure (II.7). La courbe de garantie promet généralement que les modules généreront au moins 90 % de la capacité nominale au cours des 10 premières années et environ 80 % au cours des 10 à 15 prochaines années.

Les panneaux photovoltaïques solaires se dégradent généralement à un rythme plus rapide dans les premières années de leur vie. En général, la production d'énergie nominale des panneaux solaires se dégrade généralement à environ 0,5 %/an. Les modules PV à couches minces se dégradent plus rapidement que les modules à base de silicium cristalline. Ces processus de dégradation peuvent être de nature chimique, électrique, thermique ou mécanique.

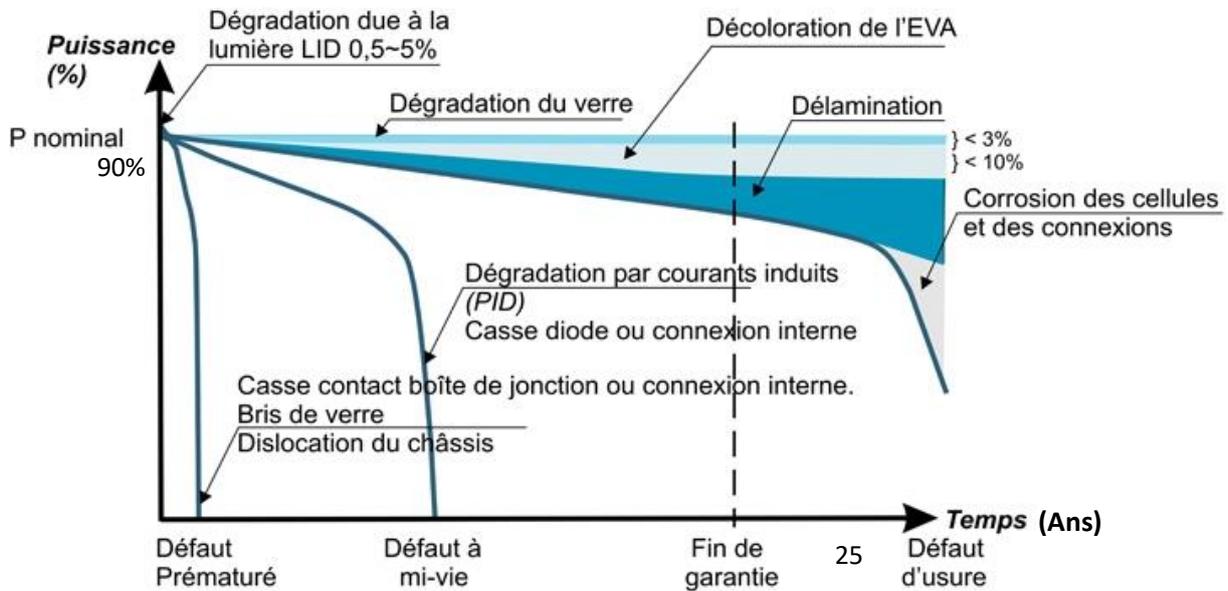


Fig.II.7 : Durée de vie d'un panneau photovoltaïque.

### II.5.2. Variation du rayonnement solaire

Les performances des modules photovoltaïques dans des conditions de lumière variables diffèrent considérablement, ce qui a un impact grave sur le rendement des systèmes photovoltaïques. Les variations de l'intensité du rayonnement solaire tombant sur un module photovoltaïque affectent bon nombre de ses paramètres, y compris le courant de court-circuit, la tension à circuit ouvert, la puissance, le facteur de forme et l'efficacité comme le montre la figure suivante.

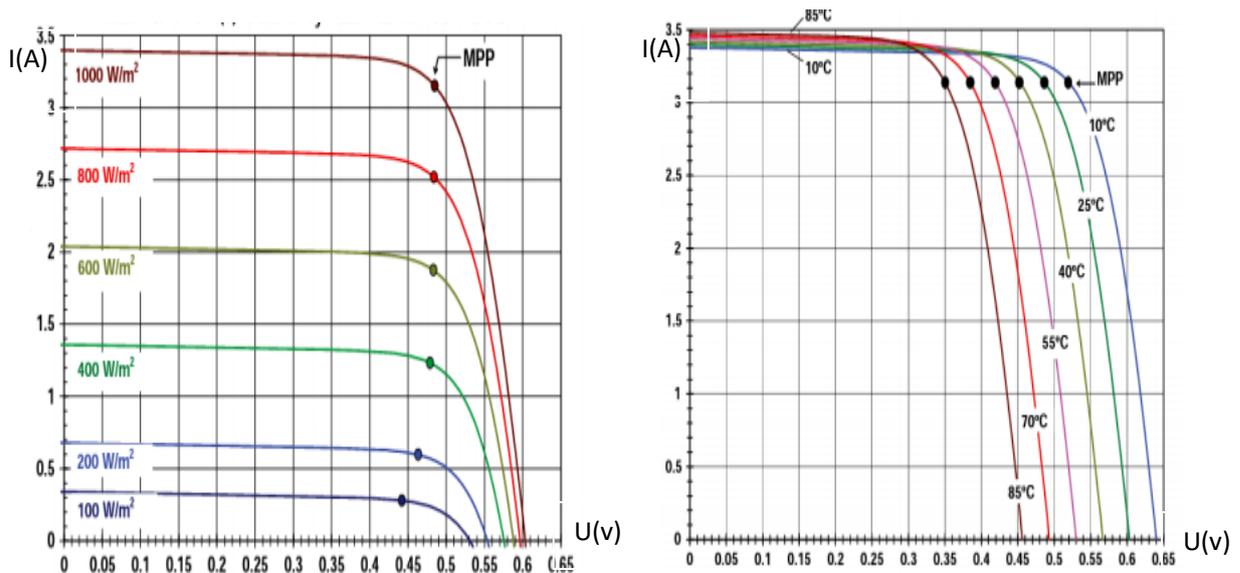


Fig.II.8 : Impacts des variations de l'irradiation sur la tension et le courant d'un module photovoltaïque.

### II.5.3. Température du module

Une cellule photovoltaïque, comme tout autre dispositif semi-conducteur, est très sensible à la température. L'efficacité et la puissance d'une cellule photovoltaïque diminue avec l'augmentation de sa température. Cela est principalement dû à l'augmentation des taux de recombinaison des transporteurs internes causée par l'augmentation des concentrations de transporteurs. [8]

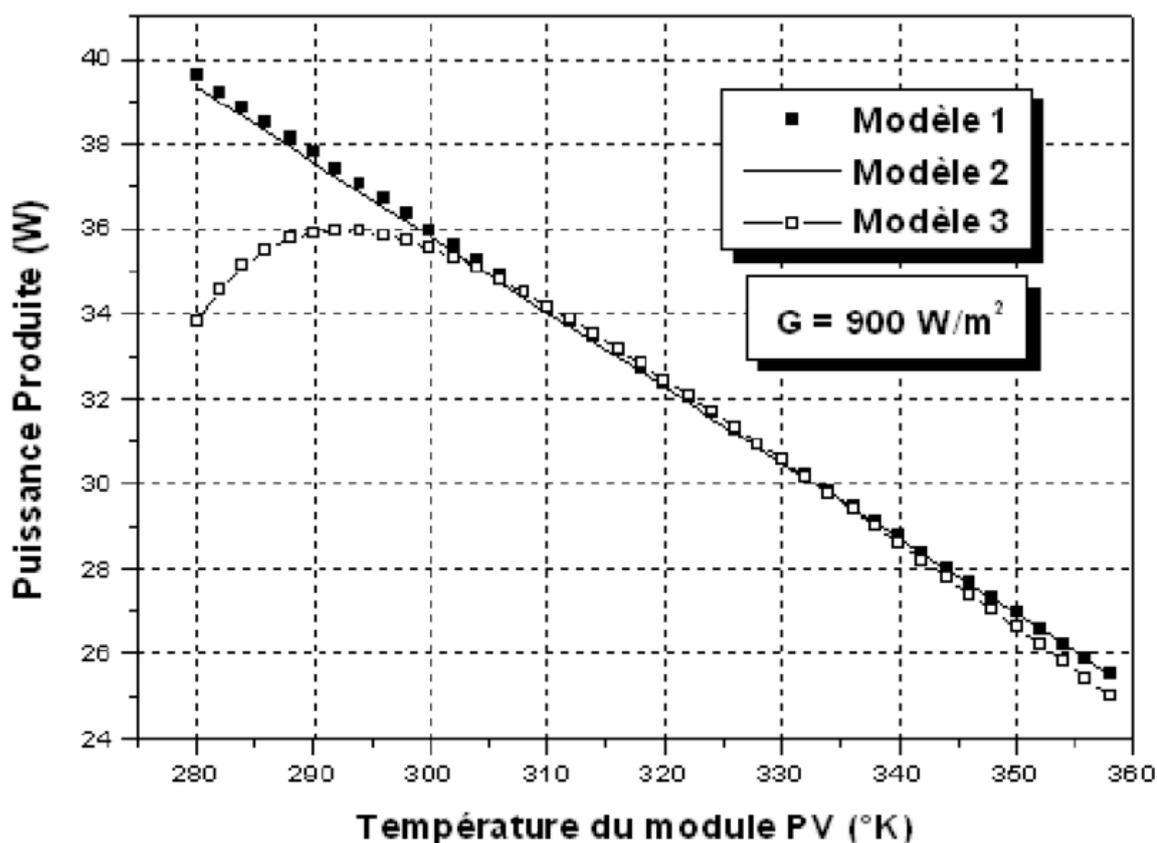


Fig.II.9 : Impacts de la température sur la puissance d'une cellule photovoltaïque.

## II.6. Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques

### II.6.1. Les avantages

#### ➤ Les panneaux solaires paient pour eux-mêmes

Bien que les panneaux solaires soient coûteux à installer, si on les installe, ils finiront par payer pour eux-mêmes à long terme, au fur et à mesure que les temps avancent et que la technologie progresse, les panneaux solaires ne feront que devenir plus efficaces. Aussi que les panneaux solaires deviennent plus populaires, leur prix sera réduit.

#### ➤ Ils aident à ralentir le réchauffement climatique

Le réchauffement climatique menace la survie de la société humaine, ainsi que les moyens de subsistance d'un certain nombre d'espèces différentes. Heureusement, des

décennies (voire des siècles) de recherche ont conduit à des systèmes efficaces de panneaux solaires qui créent de l'électricité sans produire de pollution par le réchauffement climatique. L'énergie solaire est certainement un pas dans la bonne direction dans les tentatives de ralentir la crise du réchauffement climatique.

### ➤ **Ils économisent de l'argent**

L'installation de panneaux solaires permettra d'économiser une bonne somme d'argent au fil du temps et de réduire le coût des factures d'électricité. En plus de faire économiser de l'argent, il existe des systèmes maintenant en place où on peut faire de l'argent à partir de l'énergie solaire. Si le système produit plus d'électricité qu'on a besoin, on peut revendre l'excédent au réseau par le biais du régime de tarifs de rachat.

### ➤ **Les panneaux solaires fournissent l'indépendance énergétique**

Semblable au coup de pouce de la sécurité énergétique, l'énergie solaire offre le grand avantage de l'indépendance énergétique. Le « carburant » utilisé pour produire de l'énergie solaire ne peut pas être acheté ou monopolisé de sorte qu'il est gratuit pour tous d'utiliser.

Une fois que les panneaux solaires installés, on a essentiellement une source indépendante d'électricité qui nous appartient. Cela ne doit pas être examiné et est important pour l'avenir non seulement pour nous, mais pour les entreprises, les villes et les pays.

## II.6.2. Les inconvénients

### ➤ **Cher à installer**

Un des plus grands inconvénients pour la plupart des gens lors de la décision si elles veulent installer des panneaux solaires est le coût initial.

### ➤ **Les panneaux solaires ne sont utilisés que pendant la journée :**

L'énergie solaire n'est pas disponible la nuit. Malheureusement, le soleil ne brille pas 24 heures par jour et l'énergie solaire compte sur elle pour produire son énergie. Étant donné que le stockage de l'électricité solaire n'est pas encore entièrement développé, vous devrez utiliser une source d'énergie alternative pour répondre à vos besoins pendant la nuit.

### ➤ **Ils peuvent être peu fiables à certains moments :**

Puisque pas toute la lumière du soleil peut être absorbée par des panneaux solaires et transformée en énergie, beaucoup de gens soutiennent que l'énergie solaire n'est pas fiable et inefficace. On estime actuellement qu'environ 40 % de la lumière du soleil est absorbée par le soleil, ce qui signifie qu'un gros morceau est gaspillé.

### ➤ Les panneaux solaires nécessitent beaucoup d'espace

Bien que ce ne soit pas vraiment un problème pour les propriétaires car ils peuvent simplement mettre les panneaux sur leurs toits. L'espace est un gros problème pour les grandes entreprises car elles auraient besoin de désigner une grande zone pour que le système soit efficace dans la fourniture d'électricité sur une base constante. [9]

## II.7. Hacheur

---

Un hacheur est un appareil électronique qui permet de convertir une tension fixe en une tension variable, par le branchement et le débranchement de l'alimentation et la charge avec une vitesse très élevée (il s'agit comme un interrupteur de grande vitesse), afin d'obtenir une tension hachée ou variable à la sortie. Il peut augmenter la tension de sortie, est dans ce cas on dit que c'est un hacheur survolteur, ou diminuer la tension de sortie, et dans ce cas on dit que c'est un hacheur dévolteur. Pour cela, il est également appelé un transformateur de courant continu.

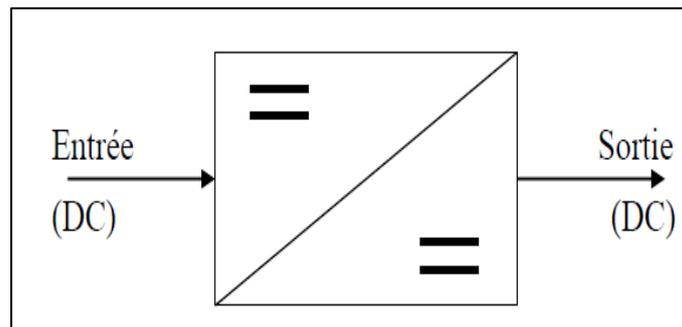


Fig.II.10. Symbole d'un hacheur

### II.7.1. Utilisation des hacheurs

Généralement, les circuits hacheurs sont utilisés comme sources d'alimentation dans les ordinateurs, les produits électroniques commerciaux et les instruments électroniques. Dans le domaine industriel et spécial on trouve l'hacheur utilisé dans les voitures électriques, les avions et les vaisseaux spatiaux, où une alimentation en courant continu réglée à bord est nécessaire. Dans le domaine des énergies renouvelables, on trouve l'hacheur pour convertir l'énergie solaire et convertir, ils sont utilisés pour contrôler les moteurs à courant continu comme les véhicules à batterie.

### II.7.2. Types d'hacheur

Il existe plusieurs classements pour les hacheurs, parmi les classements, on trouve :

- Le classement en fonction de la direction du courant et de la tension de sortie,
- Le classement selon le processus de commutation,
- Le classement selon la tension de sortie

- Le classement en fonction de la perte de puissance survenue lors de la mise en marche ou de l'arrêt du dispositif de commutation. [10]

### II.7.2.1. Classement en fonction de la direction du courant et de la tension de sortie

On trouve dans ce classement les hacheurs non réversibles (deux quadrant) et les hacheurs réversibles (quatre quadrant).

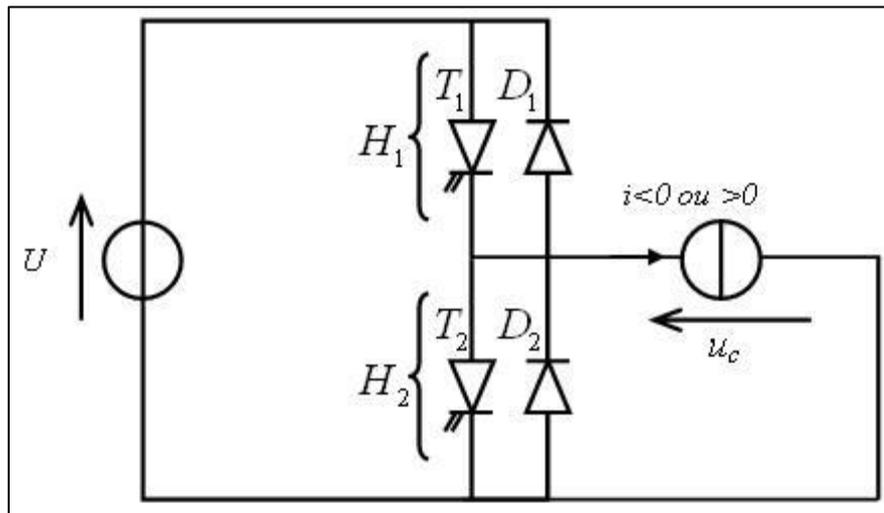


Fig.II.11. Un hacheur à deux quadrants.

Où :

$U$  : Tension d'entrée.

$u_c$  : Tension aux bornes de la charge.

$T_1$  et  $T_2$  : Des interrupteurs commandés

$D_1$  et  $D_2$  : Des diodes.

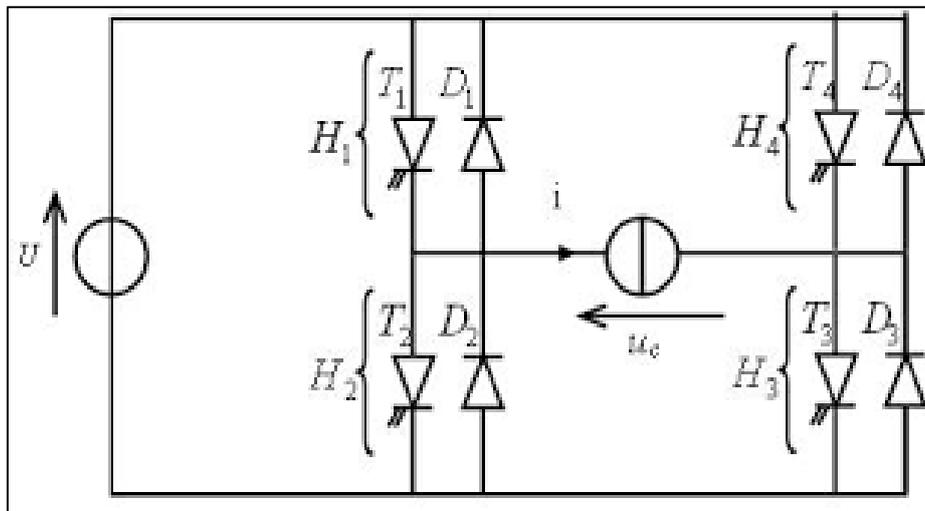


Fig.II.12. Un hacheur à quatre quadrants.

Où :

$U$  : Tension d'entrée.

$u_c$  : Tension aux bornes de la charge.

$T_1, T_2, T_3$  Et  $T_4$  : Des interrupteurs commandés.

$D_1, D_2, D_3$  et  $D_4$  : Des diodes.

### II.7.2.2. Classement selon le processus de commutation

Dans ce classement, il existe deux types d'hacheurs, les hacheurs à commutation naturel, qui sont dans les circuits d'entrée en courant alternatif et les hacheurs à commutation forcée, qui sont dans les circuits d'entrée en courant continu.

### II.7.2.3. Classement selon la tension de sortie

Dans ce classement, on trouve les hacheurs qui permettent d'élever la tension de sortie, et sont appelés les hacheurs boost (hacheurs survolteurs ou bien hacheur parallèle) et les hacheurs qui abaissent la tension de sortie, et sont appelées les hacheurs dévolteurs (hacheurs séries). Et aussi il existe des hacheurs élévateurs/abaisseurs.

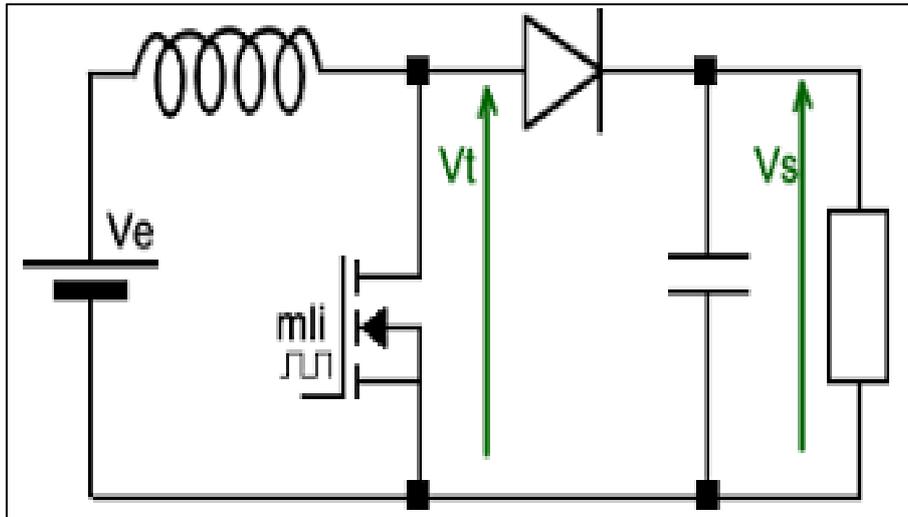


Fig.II.13. Schéma d'un hacheur boost.

Où :

$V_e$  : La tension d'entrée.

$V_t$  : La tension aux bornes de transistor.

$V_s$  : La tension de sortie.

MLI : Modulation de large impulsion.

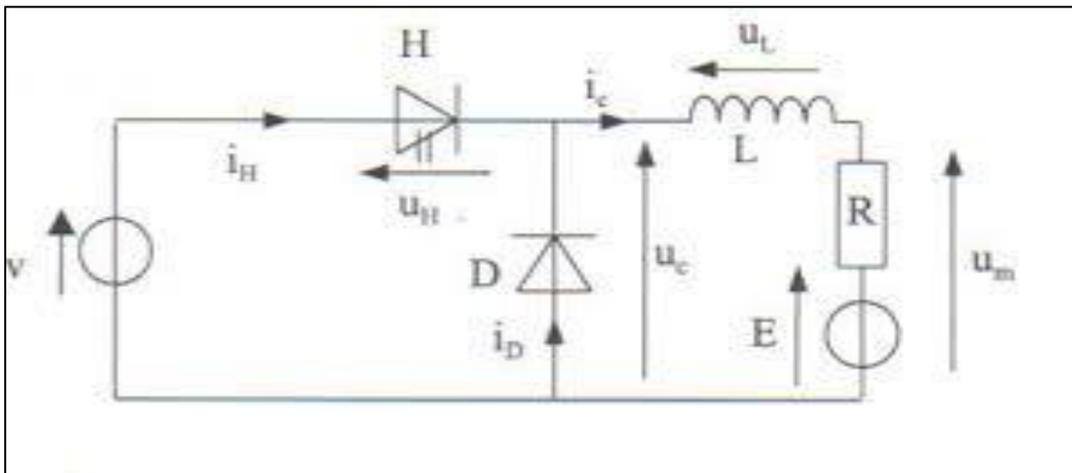


Fig.II.14. Schéma d'un hacheur dévolteur.

Où :

$V$  : Tension d'entrée.

$u_H$  : Tension aux bornes de switch.

$u_L$  : Tension aux bornes de la bobine.

$u_m$  : Tension aux bornes de la charge (moteur).

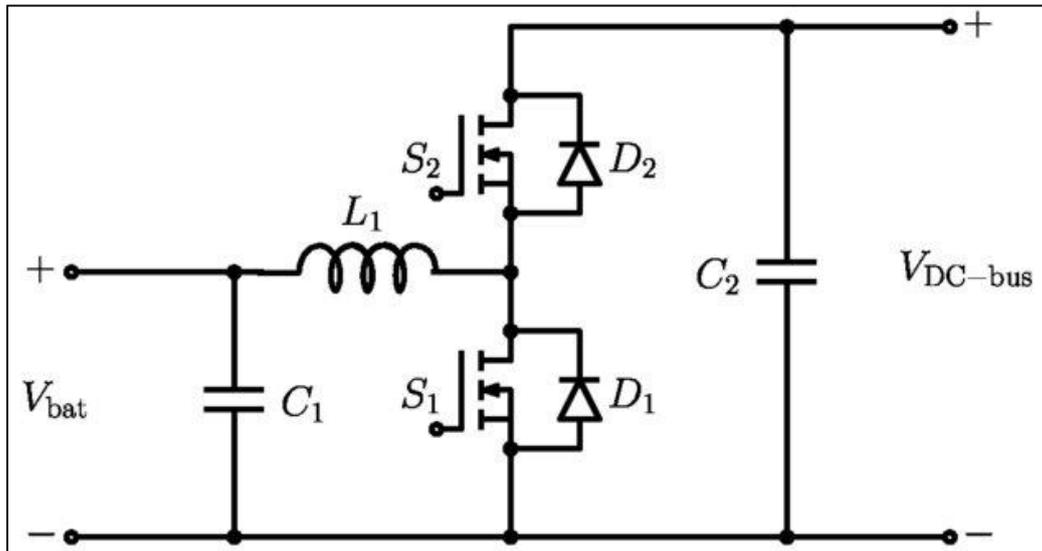


Fig.II.15. Schéma d'un hacheur élévateur/abaisseur.

Où :

$V_{bat}$  : Tension aux bornes de la batterie (comme une tension d'entrée).

$V_{DC-bus}$  : Tension aux bornes de la charge.

$S_1$  et  $S_2$  : Switch 1 et switch2.

$D_1$  et  $D_2$  : Diode 1 et diode 2.

$C_1$  et  $C_2$  : Condensateur 1 et condensateur 2.

#### II.7.2.4. Classement en fonction de la perte de puissance survenue lors de la mise en marche ou de l'arrêt du dispositif de commutation

Dans ce type de classement, on trouve :

- ❖ **Des hacheurs de commutation dur** : Comme la tension et le courant sur l'interrupteur d'alimentation sont non nuls, les pertes de puissance sont élevées pendant la période de commutation (de ON à OFF, de OFF à ON),
- ❖ **Commutation douce** : Comme la tension et / ou le courant sur l'interrupteur est nul, les pertes de puissance lors de la commutation sont très faibles.

### II.8. Commandes pour la recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT)

---

Le suivi du point de puissance maximale (MPP) d'un module photovoltaïque est une tâche essentielle dans un système de contrôle photovoltaïque, car il maximise la puissance de sortie du panneau photovoltaïque, et donc maximise l'efficacité du module.

L'extraction de la puissance optimale à partir des panneaux photovoltaïques a généralement été abordée de deux manières : la configuration optimale des panneaux photovoltaïques ou la conception d'algorithmes MPPT (Maximum Power Point Tracker) efficaces. Pour la commande MPPT, il existe plusieurs méthodes de commandes, on peut les diviser en Deux catégories [11].

#### II.8.1. Première catégorie

##### II.8.1.1. La méthode de perturbation et observation (P&O)

La méthode perturbation et observation (P&O), est largement utilisée parce qu'il a la particularité d'avoir une structure simple, et peu de paramètres de mesure, pour l'utiliser on considère que le PV fonctionne à un point qui n'est pas obligatoirement la MPP.

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau photovoltaïque avec de petites variations  $\Delta V$  et en observant la variation de l'énergie électrique délivrée à la sortie du panneau.

- Si  $P > 0$  : La perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.
- Si  $P < 0$  : Le point de fonctionnement s'éloigne du MPP, alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

La figure suivante donne l'organigramme de la méthode P&O [12].

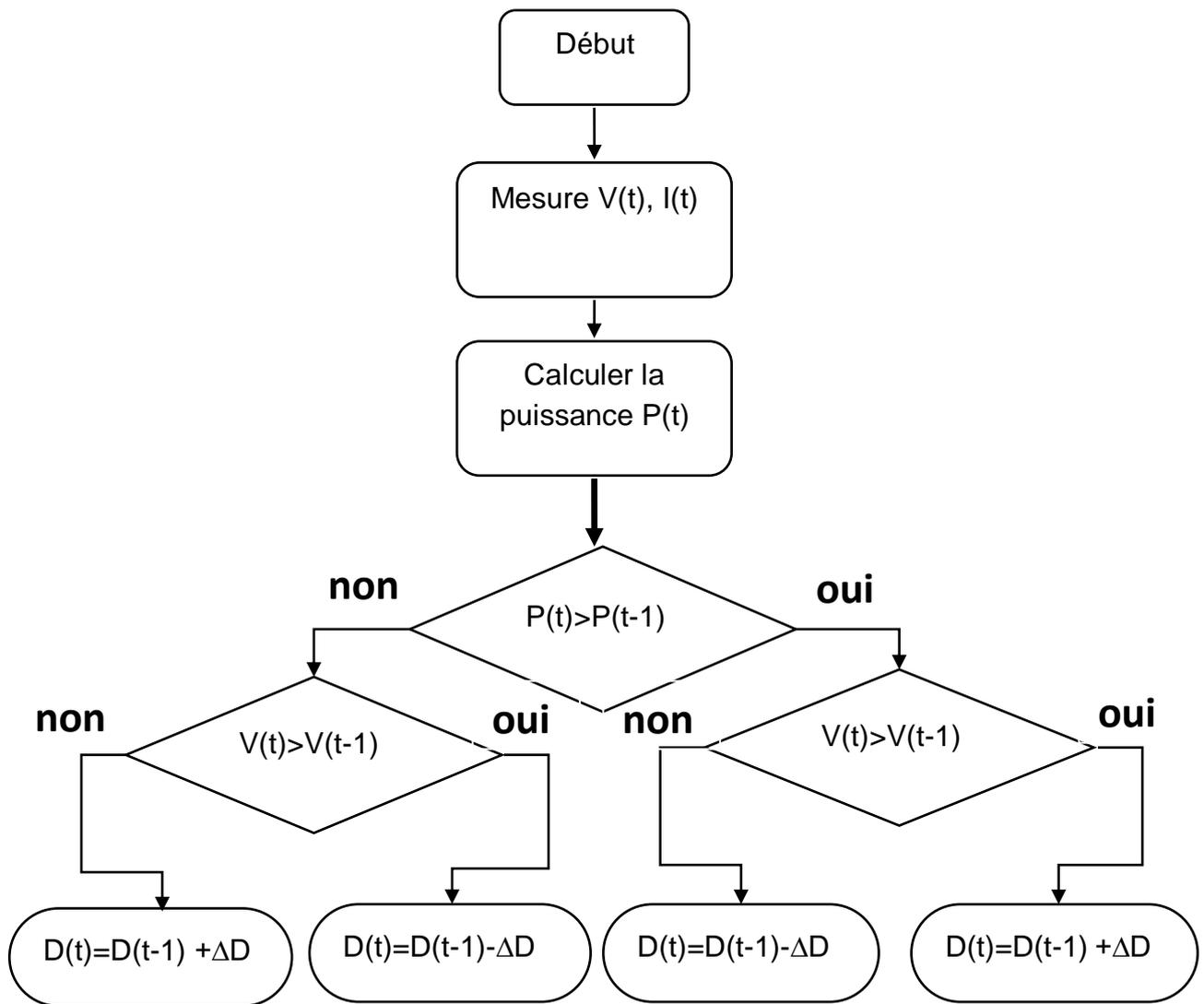


Fig.II.16 : L'organigramme de la méthode P&O.

### II.8.1.2. La méthode de tension de référence constante

Une technique MPPT très courante consiste à comparer la tension (ou le courant) du réseau PV avec une tension (ou un courant) de référence constante qui correspond à la tension (ou au courant) PV au point de puissance maximale dans des conditions atmosphériques spécifiques [11].

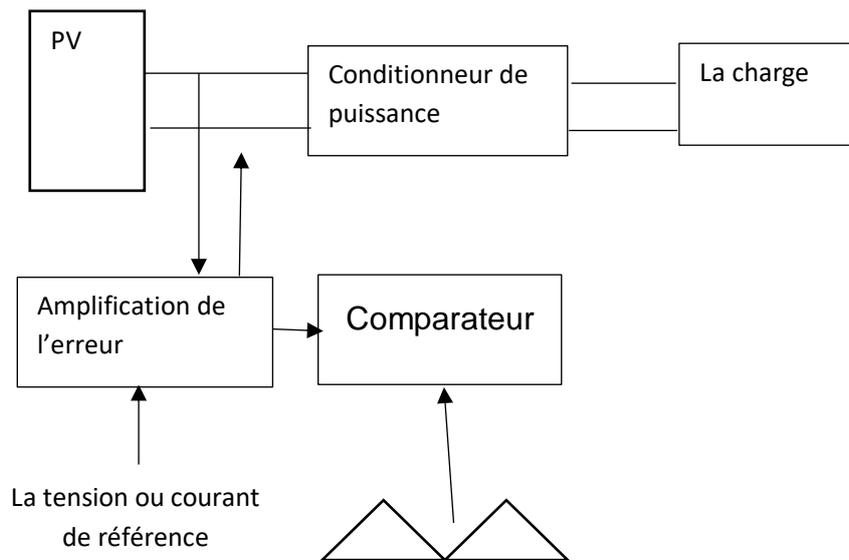


Fig.II.17 : L'algorithme de la méthode de tension de référence constante.

### II.8.1.3. La méthode d'incrémentement de la conductance

C'est une méthode basée sur la connaissance de la variation de conductance et des connaissances sur la position du point de fonctionnement par rapport à un MPP. La conductance c'est le rapport entre le courant et la tension. [13]

$$Cond = \frac{I}{V}$$

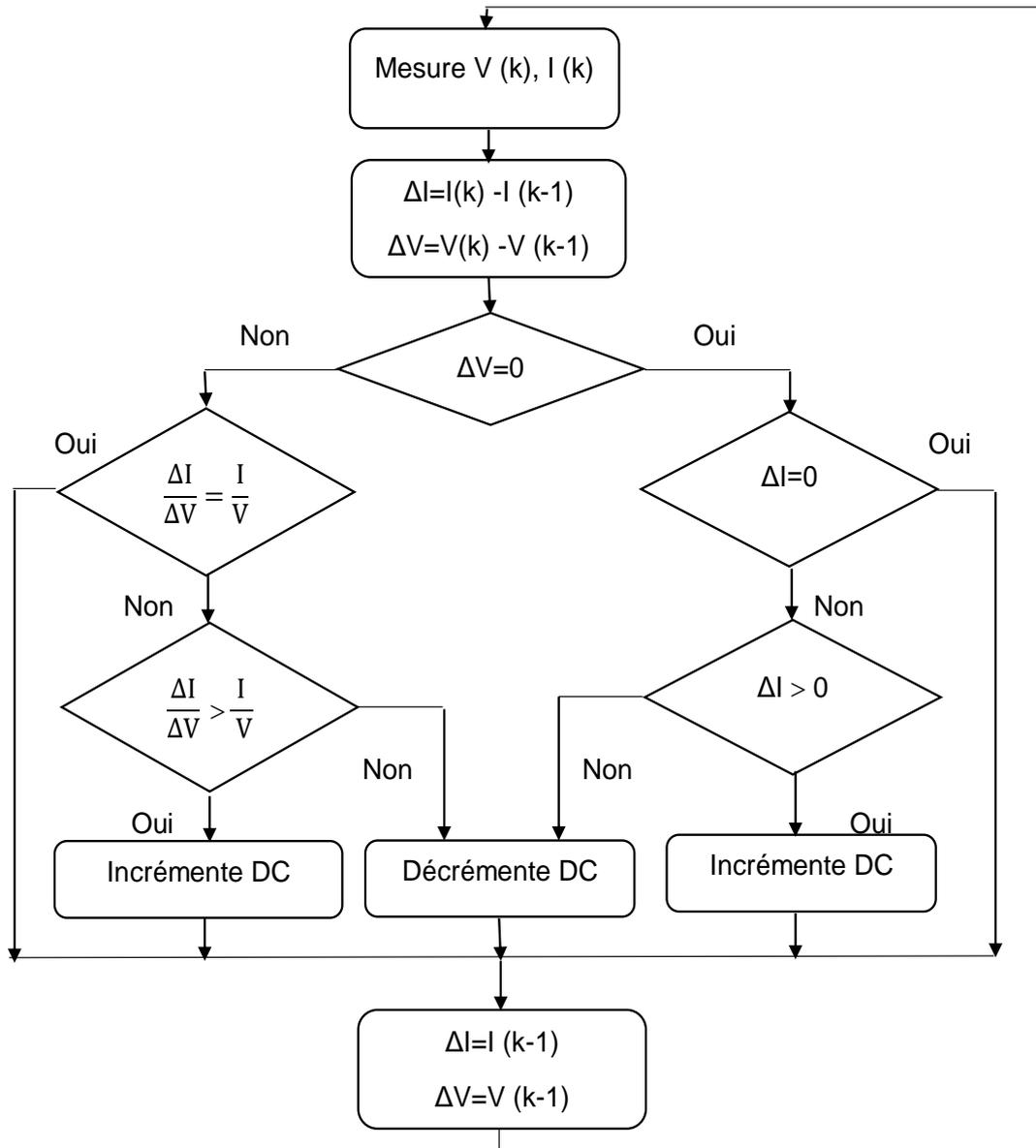


Fig.II.18 : L'algorithme de la méthode d'incrément de la conductance.

## II.8.2. Deuxième catégorie

### II.8.2.1. Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension, $V_{co}$

La méthode de fraction de la tension, qui appartient aux secondes catégories est basé sur une relation linéaire entre la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  et la tension au point de fonctionnement maximale  $V_{MPP}$  [14]

$$V_{MPP} = K_{pv} \cdot V_{co}$$

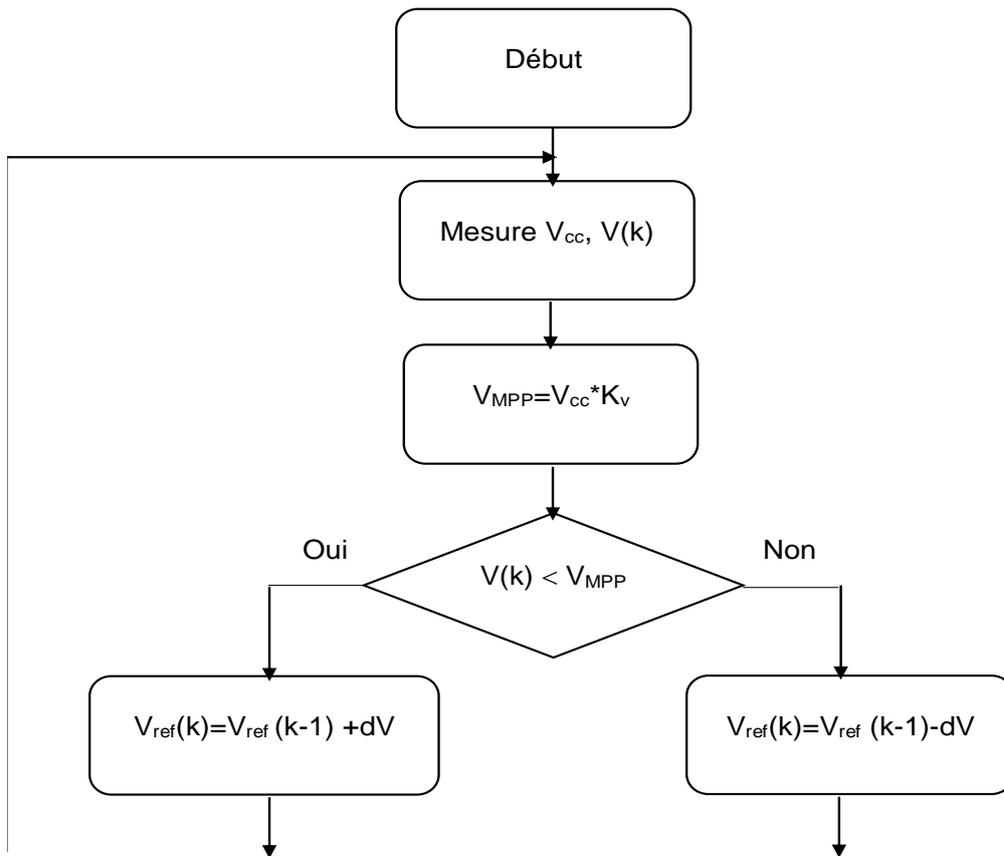


Fig.II.19 : algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension,  $V_{co}$ .

### II.8.2.2. Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant de court-circuit, $I_{cc}$

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante : [15]

$$I_{mp} = K \cdot I_{cc}$$

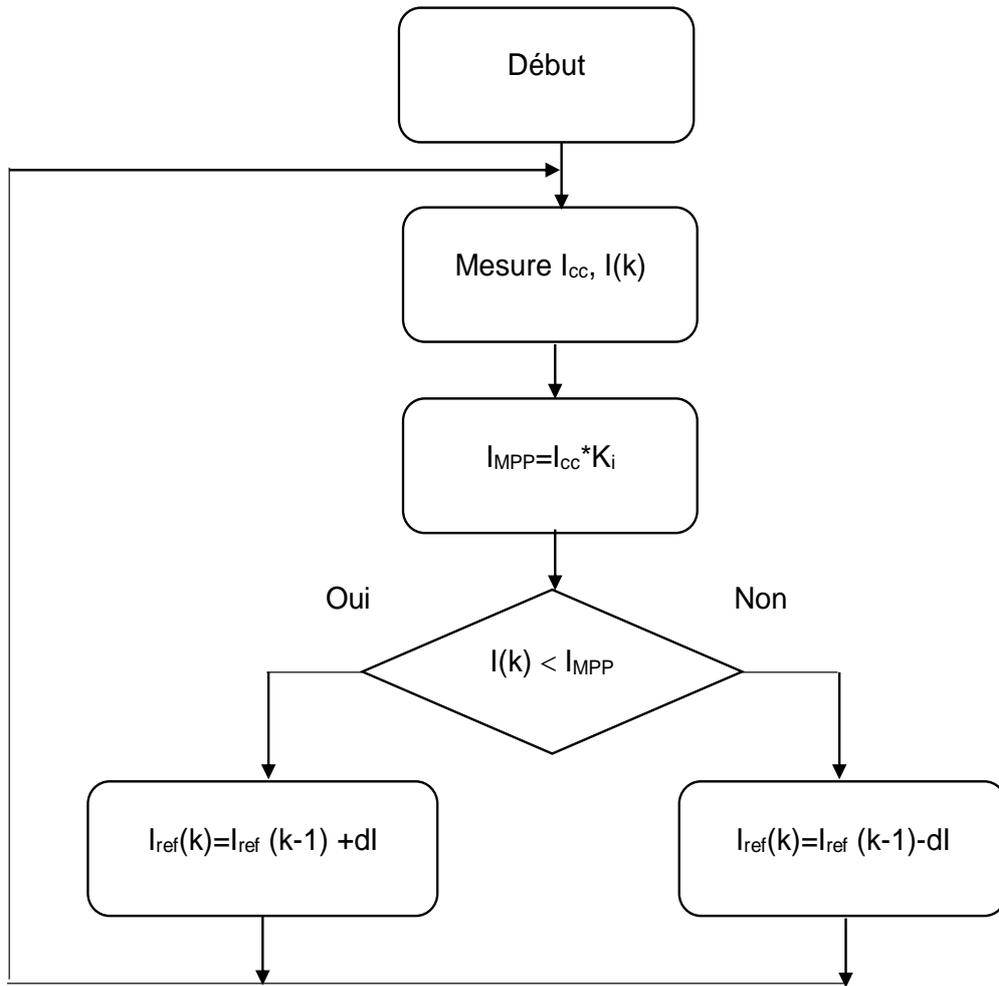


Fig.II.20 : Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant de court-circuit,  $I_{cc}$ .

Dans notre étude, on a choisi la commande perturbation et observation.

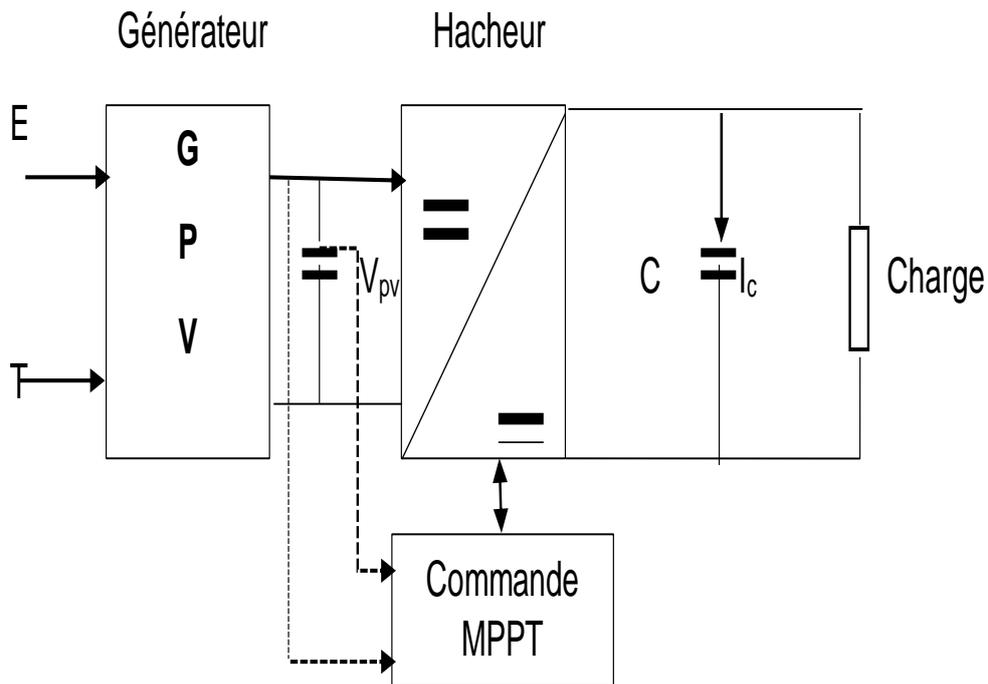


Fig.II.21 : Schéma synoptique du système PV adapté par une commande MPPT.

Le Point de fonctionnement Maximale du GPV à tout moment est garanti dans les systèmes photovoltaïques grâce à des commandes MPPT. Il comprend le contrôle du convertisseur statique en agissant automatiquement sur le rapport cyclique du hacheur pour atteindre le PPM de GPV. Plusieurs méthodes et algorithmes de suivi PPM ont été développés et mis en œuvre.

## II.10. Batteries

Une batterie solaire est un appareil destiné à stocker l'énergie électrique produite par les panneaux solaires photovoltaïques. Le courant qui y entre ou qui en sort est forcément continu (DC) et non alternatif (AC, comme dans le réseau électrique domestique). Les batteries sont indispensables dans les installations autonomes car les modules photovoltaïques ne fonctionnent que quand il y a de la lumière. Pour consommer de l'électricité le soir ou la nuit, il faut donc que les batteries en aient emmagasiné la journée. [16]

### II.10.1. Les critères déterminants pour choisir une batterie solaire

Les considérations relatives au choix d'une batterie incluent évidemment le coût, mais aussi la durée de vie, la capacité de stockage et la profondeur de décharge.

#### II.10.1.1. La capacité de stockage

L'énergie stockée dans une batterie, appelée capacité de la batterie, est mesurée en wattheures (Wh), en kilowattheures (kWh) ou en ampères-heures (Ah). Elle détermine le volume d'énergie pouvant être emmagasiné par la batterie puis redistribué dans la maison.

La capacité en wattheures (Wh) d'une batterie se calcule à partir de l'intensité de la batterie (donnée en ampère Ah) et en la multipliant par la tension exprimée en volt.

### EXEMPLE

Une batterie de 12 V ayant une capacité de 500 Ah permet de stocker environ :

$$100 \text{ Ah} \times 12 \text{ V} = 1\,200 \text{ Wh}$$

### **II.9.1.2. La profondeur de décharge**

En fonction de la technologie utilisée, et afin de prolonger la durée de vie des batteries, celles-ci ne se déchargent jamais complètement. C'est pourquoi les batteries sont largement "surdimensionnées" par rapport à l'installation en place, de façon à ce qu'elles ne se déchargent pas au-delà d'un certain seuil. Si ce seuil est donné par le fabricant à 50% par exemple, alors seulement 50% de la capacité de la batterie peut être utilisée. Cette méthode permet de mieux préserver les batteries sur la durée.

### **II.9.1.3. L'espérance de vie**

La durée de vie d'une batterie est généralement évaluée en nombre de cycles qu'elle peut effectuer avant de ne plus être fonctionnelle, c'est à dire sa capacité à se charger et à se décharger. Chaque batterie réduira lentement sa capacité au fur et à mesure du temps qui passe et de la profondeur quotidienne de décharge. Moins une batterie effectuera de cycles, moins elle s'usera rapidement. On estime qu'une batterie sera bientôt inefficace lorsqu'elle aura perdu environ 20% de sa capacité d'origine.

De nos jours, les batteries lithium sont les plus performantes avec une durabilité pouvant atteindre les 6000 cycles.

## **II.9.2. Les différents types de batteries solaires**

### **II.9.2.1. Les batteries au plomb**

Il existe plusieurs types de batteries au plomb :

- La batterie « plomb ouvert »
- La batterie AGM
- La batterie gel,

Chacun de ces modèles présentant des caractéristiques différentes

#### **1) La batterie « plomb ouvert »**

Jusqu'à tout récemment, la batterie plomb ouvert était la seule technologie de batterie pratique pour stocker l'électricité solaire. Ce type de batterie fonctionne notamment avec une solution d'acide sulfurique liquide. Il s'agit du même type de batterie que vous avez dans votre voiture, mais les versions de stockage solaire sont beaucoup plus volumineuses.

On l'entrepose plutôt dans des endroits frais ou climatisés, car la chaleur réduit considérablement sa durée de vie. Il faut aussi que le lieu soit aéré, car en se chargeant la batterie plomb ouvert libère de l'hydrogène. Evitez également de l'installer en plein air, au risque de la voir geler à cause du froid !

Sa réputation de technologie éprouvée et son prix accessible en font une batterie toujours utilisée, bien qu'il existe de nos jours d'autres modèles plus élaborés. On l'utilise surtout sur des résidences secondaires où elle est sollicitée de manière irrégulière, de façon à mieux préserver sa durée de vie. La batterie plomb ouvert a donc pour elle d'afficher un coût initial bas, mais le compromis se présente sous forme de maintenance – chaque mois, vous devez vérifier le niveau d'eau, en ajoutant de l'eau distillée pour la maintenir à niveau.

### AVANTAGE

- Pas cher.
- Technologie fiable, robuste et éprouvée.

### INCONVENIENTS

- Nécessite un entretien régulier
- Faible durée de vie (400-500 cycles), on la conseille pour des utilisations irrégulières
- Profondeur de décharge entre 60 et 80 %
- Volumineuse, elle prend beaucoup de place
- Elle émet de l'hydrogène et nécessite d'être placé dans un endroit aéré
- Toxique pour l'environnement



Fig.II.22 : Exemple de batteries plomb ouvert

### 2) La batterie AGM

Elle se présente sous la forme d'une batterie au plomb scellée. Son principal avantage est le fait qu'elle ne nécessite pas d'entretien. Elle présente en plus l'intérêt d'être étanche et de ne pas dégager d'hydrogène ni de chaleur durant les cycles de charge ou de décharge. Plus adaptée aux utilisations quotidiennes, elle peut faire l'objet d'une utilisation régulière, sans que ses performances en soient affectées.

Comme toutes les batteries au plomb, la batterie AGM est particulièrement sensible à l'élévation de la température. Elle est également plus chère que sa version au plomb ouvert et présente une faible durée de vie en cyclage en plus de présenter une profondeur de décharge de 80 % en général.

### **AVANTAGES**

- Ne nécessite pas d'entretien
- Ne dégage pas d'hydrogène ou de chaleur

### **INCONVENIENTS**

- Un peu plus chère.
- Son cycle de vie est relativement faible (600-700 cycles)
- Profondeur de décharge d'environ 80% dans la plupart des cas
- Toxique pour l'environnement



Fig.II.23 : Batterie solaire AGM

### **3) La batterie Gel**

La technologie de la batterie gel a tendance à supplanter les autres modèles à base de plomb de par ses caractéristiques plus performantes. Sur le marché du solaire, elle est considérée comme l'évolution haut de gamme des batteries au plomb.

Les batteries gel, à l'instar des batteries AGM, sont étanches et ne nécessitent pas d'entretien. Elles supportent également mieux les décharges profondes. À 50 % de décharge, elles peuvent durer plus de 1000 cycles. En termes de durée de vie, cela représente entre 6 et 10 ans pour une application solaire.

Notez néanmoins que la batterie gel supporte mal une vitesse élevée de charge et de décharge. Il lui faut donc une application en décharge lente pour optimiser son nombre de cyclages. De plus, elle présente un prix élevé : environ le double de la batterie plomb ouvert. Il faudra également la conserver dans un lieu frais ou climatisé.

### **AVANTAGES**

- Ne nécessite pas d'entretien
- Ne dégage pas d'hydrogène ou de chaleur
- Durée de vie importante : elle peut atteindre les 2500 cycles
- Profondeur de décharge d'environ 50 %

### **INCONVENIENTS**

- Double du prix d'une batterie plomb ouvert.
- Sensible au rythme élevé de charge et de décharge : elle doit avoir une application en décharge lente
- Toxique pour l'environnement



Fig.II.24 Batterie solaire Gel

### **II.9.2.2. Les batteries lithium**

Ce n'est pas un hasard si les batteries lithium comptent parmi les plus populaires du marché. En pleine expansion, cette technologie se retrouve partout dans notre quotidien : dans nos voitures et nos smartphones. Elle incarne l'innovation d'aujourd'hui et de demain comme tend à le démontrer la nouvelle batterie lithium Powerwall de Tesla.

Les batteries au lithium sont plus légères et plus compactes que les batteries au plomb. Elles peuvent également être déchargées plus profondément que les batteries au plomb. Elles sont particulièrement sollicitées pour leur durée de vie étendue : elles peuvent monter jusqu'à 6 000 cycles à un taux de décharge de 80%.

Côté bilan écologique, la batterie lithium fait aussi figure de bon élève comparativement aux batteries au plomb : son niveau de recyclage est proche de 70 %. Leur principal inconvénient, du moins pour le moment, est qu'elles sont nettement plus onéreuses que les

batteries au plomb pour un stockage identique, ce qui en fait un investissement encore peu rentable aujourd'hui.

### AVANTAGES

- Meilleure durée de vie du marché : jusqu'à 6000 cycles
- Elle peut être déchargée plus profondément que les batteries au plomb
- Ne nécessite pas d'entretien
- Recyclable à 70 %
- Compacte, elle prend moins de place
- Incarne le futur des moyens de stockage solaire

### INCONVENIENTS

- Prix onéreux
- Même capacité de stockage que les autres technologies au plomb pour un prix prohibitif, ce qui en fait un investissement peu rentable

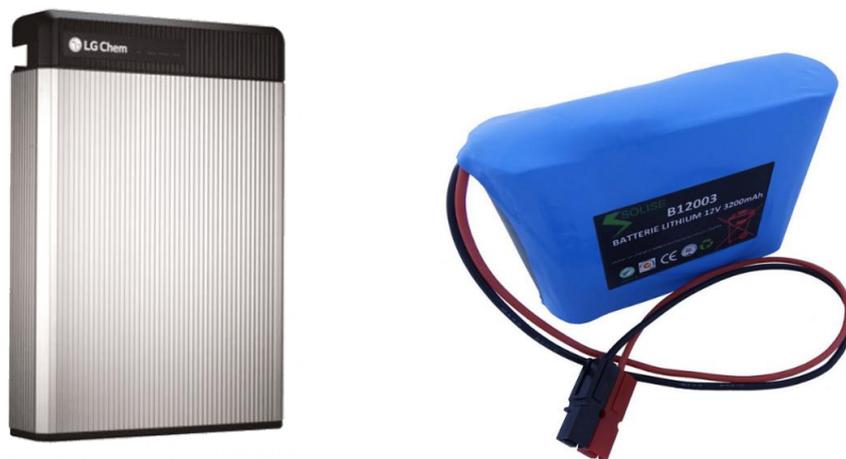


Fig.II.25 Batterie solaire lithium de LG

## II.10. Onduleur

---

### II.10.1. Définition

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique de tension ou de fréquence différente, c'est la fonction inverse d'un redresseur. Il n'est pas uniquement destiné à pallier les coupures de courant, son rôle est également de stabiliser la tension électrique et d'éliminer les parasites électriques.

### II.10.2. Le rôle de l'onduleur

L'onduleur est un maillon important dans la sécurité des systèmes informatiques, il a pour principale mission de prendre le relais du secteur lorsque des coupures de courant se produisent, laissant ainsi aux utilisateurs le temps de sauvegarder le travail en cours.

Les coupures ne sont pas les seuls incidents auxquels ces appareils doivent faire face, le filtrage ainsi que la régulation de la tension font aussi partie des fonctions importantes à assurer.

Un bon onduleur devra assurer la continuité de la fourniture d'électricité aux appareils, mais également veiller à ce que le courant soit de bonne qualité. Un onduleur se compose de trois parties :

- Le redresseur qui transforme le courant alternatif en un courant continu destiné à charger les batteries et à alimenter l'onduleur.
- Les batteries qui stockent l'énergie.
- L'onduleur qui transforme la tension continue délivrée par le redresseur ou les batteries en une tension alternative de 230 Volts à 50 Hz, identique à celle du secteur.

### II.10.3. Principe de fonctionnement

Les onduleurs sont basés sur une structure en pont en H, constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée généralement une modulation de largeur d'impulsion (MLI), on module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée.

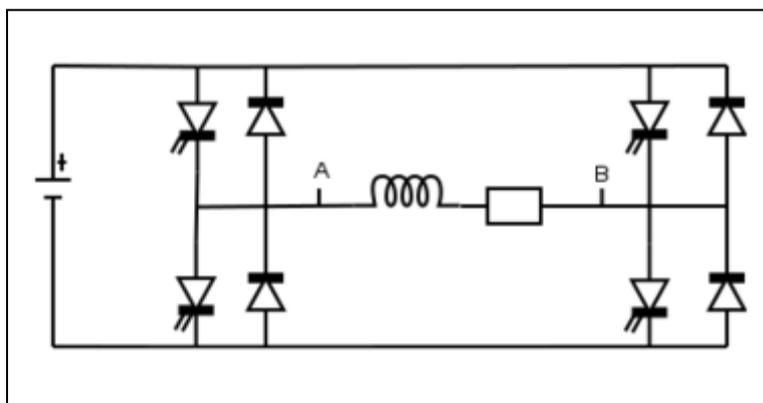


Fig.II. 26 : Schéma de principe d'un onduleur de tension monophasé appliqué sur une charge inductive (AB).

### II.10.4. Types d'onduleurs

#### II.10.4.1. Onduleurs autonomes

Un onduleur autonome délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas toujours besoin de réseau électrique pour fonctionner ; par exemple un convertisseur de voyage que l'on branche sur la prise allume-cigare d'une voiture utilise le

12 V continu du véhicule pour générer du 120 ou 230 V, alternatif en 50 ou 60 Hz. Ces onduleurs sont notamment employés pour la réception de la TV en mode nomade (récepteur satellite dans un camping-car par exemple) dépourvu d'entrée alimentation électrique basse tension (~12 V) [17]. Il existe 3 grands types d'onduleurs autonomes sur le marché :

- Les onduleurs Off-Line
- Les onduleurs In-Line ou Line interactive
- Les onduleurs On-Line [18]

### 1) Les onduleurs Off-Line

Les onduleurs Off-Line sont les versions de première génération et ne sont pratiquement plus produites.

De conception ancienne, ce type d'onduleur commute sur le circuit de secours, c'est à dire qu'il passe en mode batterie lorsqu'une chute de tension est relevée. Le temps que met l'onduleur pour passer sur le circuit de secours s'appelle temps de commutation.

Ce type d'onduleur dispose d'un temps de commutation relativement long suivant les cas (<6ms), ce qui peut poser certains problèmes suivant les environnements à protéger. De plus, les onduleurs Off-line ne proposent pas de fonction de régulation de tension et la plupart du temps ceux-ci se limitent au filtrage des parasites et aux baisses de tension. Enfin le signal de sortie n'est pas une sinusoïdale mais souvent une onde P.W.M. (Pulse Width Modulation).

On retrouve souvent ce type de dispositif sur les stations de travail bureautique. En résumé on dire que les onduleurs Off-Line son des outils de première gamme qui ne dispose pas de fonctionnalités avancées et manque de réactivité et de stabilité.

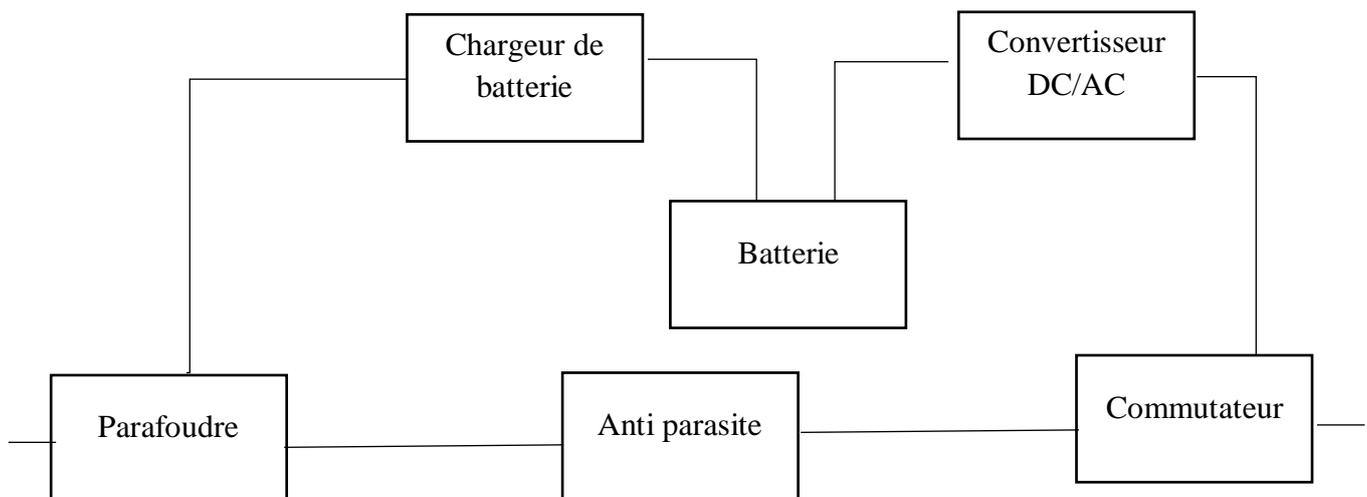


Fig.II.27: Schéma d'un onduleur off-line

## 2) Les onduleurs In-Line ou Line interactive (Gamme ALPHA d'UNITEK)

Les onduleurs In-Line ou Line interactive sont également des onduleurs à commutation mais ils sont dits intelligents. En effet, ils disposent d'un système commandé par microprocesseur dont le but est de diminuer le temps de commutation ( $< 2\text{ ms}$ ) et de réguler la tension de manière à simuler en sortie une onde sinusoïdale parfaite. Ils sont en général dotés d'un booster qui évite de solliciter les batteries lorsqu'une chute de tension est observée. Concrètement, le booster permet d'économiser sur la durée de vie des batteries.

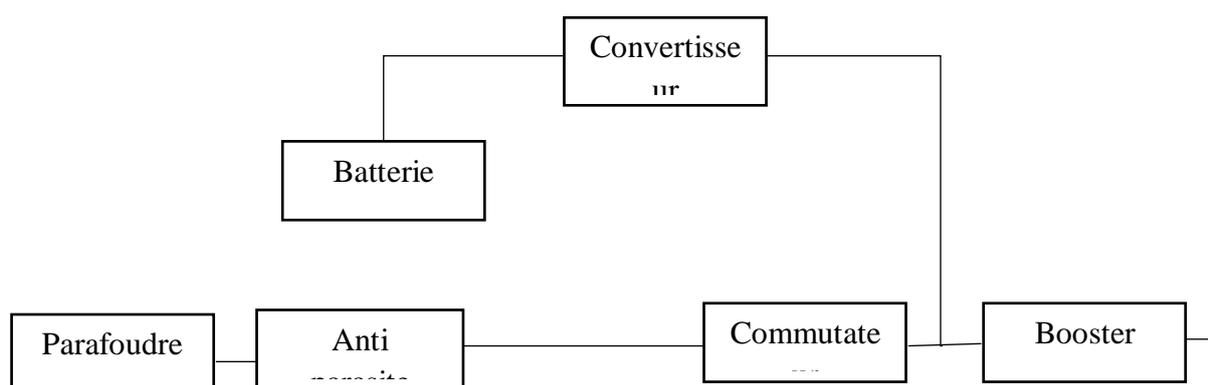


Fig.II.28: Schéma d'un onduleur In-line

## 3) Les onduleurs On-Line (Gammes DELTA & OMEGA d'UNITEK)

Les onduleurs On-Line régule la tension en continue car les batteries sont montées en série entre un chargeur/redresseur et l'onduleur. Dès lors, il n'y a plus de commutation ( $=0$ ). Avec cette gamme d'onduleur, on obtient une réactivité quasi parfaite, un signal parfaitement pur et régulé et une protection optimale de vos données et applications en cas de coupure subite.

Utilisable dans tout type de station de travail, ce mode de protection est le plus efficace, mais également le plus coûteuse.

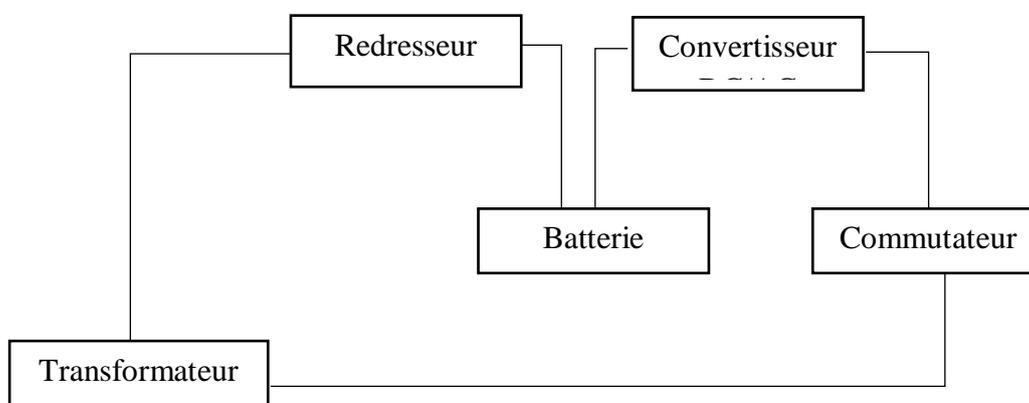


Fig.II.29 : Schéma d'un onduleur On-line

Pour résumé, on peut aisément diviser ces trois catégories d'onduleur en série d'entrée de gamme pour les off-line, milieu de gamme pour les in-line et Haut de gamme pour les on-line.

### **II.10.4.2. Onduleurs non autonomes**

L'onduleur non autonome se diffère de l'onduleur classique par le fait qu'il nécessite un signal d'entrée pour fonctionner afin de fournir un signal d'alimentation redressée. Comme tous les onduleurs électriques, il est utilisé dans le cadre d'un redressement de tension d'alimentation. Il permet au circuit récepteur la réception d'un signal électrique régulier en amplitude et en fréquence.

Parmi ses applications les plus courantes, il y a les variateurs de vitesse des machines alternatifs, les convertisseurs de tension continue/continue à découpage, le raccord des panneaux solaires au réseau électrique, etc.

## **II.11. Conclusion**

---

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes composantes d'un système photovoltaïque avec leur principe de fonctionnement général ainsi leurs applications. Le chapitre suivant sera consacré pour la modélisation de Panneau photovoltaïque, Convertisseur boost et un onduleur monophasé.

## Chapitre III : modélisation du système d'alimentation

### III.1. Introduction

Le but de ce chapitre est de modéliser les éléments du système d'alimentation à base des panneaux photovoltaïques par des équations mathématiques, afin de bien comprendre leur comportement et fonctionnement.

### III.2. Modélisation du panneau photovoltaïque

On vient de constater que c'est l'association avec le récepteur qui oblige le photogénérateur à travailler à un certain courant et à une certaine tension. En termes électroniques, on peut représenter une cellule photovoltaïque alimentant directement un récepteur de la façon suivante.

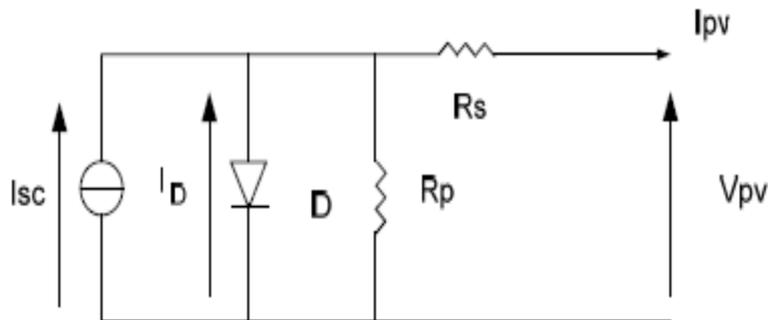


Fig.III.1 : circuit électrique d'une cellule photovoltaïque.

Pour modéliser la cellule, on exprime les grandeurs électriques relative à la représentation de la cellule sous forme d'équation, tel que, pour le courant circulant dans la diode [5] :

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) = I_0 \left( e^{\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{V_T}} - 1 \right) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$I_D$  : Le courant de la diode.

$I_{pv}$  : Le courant du panneau photovoltaïque.

$R_S$  : Résistance caractérisant les pertes par effets Joule dans le semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule.

$V_{pv}$  : La tension du panneau photovoltaïque.

$I_0$  : Le courant de polarisation inverse de saturation de la diode.

$V_D$  : La tension aux bornes de la diode, son expression est donnée par la relation :

$$V_D = V_{pv} + R_S \cdot I_{pv} \quad (\text{III.2})$$

$V_T$  : La tension thermique défini par :

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (\text{III.3})$$

Où :

$K$  : la constante de Boltzmann égale à  $1,3806503 \times 10^{-23}$  J/K.

$T$  : la température de fonctionnement de la cellule en degré Kelvin.

$q$  : la charge d'électrons.

La tension  $V_{pv}$  s'écrit donc :

$$V_{pv} = V_D - R_S \cdot I_{pv} \quad (\text{III.4})$$

$$I_p = \frac{V_{pv}}{R_p} = \frac{V_D - R_S \cdot I_{pv}}{R_p} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$I_p$  : le courant caractérisant les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau.

$R_p$  : résistance caractérisant les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau.

On obtient alors l'expression de  $I_{pv}$  pour une cellule :

$$I_{pv} = I_{SC} - I_D - I_p = I_{SC} - I_0 \left( e^{\frac{V_{pv} + R_S \cdot I_{pv}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{pv}}{R_p} - \frac{R_S}{R_p} \cdot I_{pv} \quad (\text{III.6})$$

Une cellule photovoltaïque seule ne peut pas fournir suffisamment de puissance afin d'alimenter une charge ou le réseau électrique. Il convient donc d'associer ces cellules entres elles dans le but de fournir plus de puissance. Une association en série augmentera la tension de sortie du panneau solaire, tandis qu'une association en parallèle augmentera le courant fournit à la charge. Il est alors nécessaire d'introduire deux nouveaux paramètres  $N_p$  et  $N_s$  représentant respectivement le nombre de cellules en parallèle et en série. L'expression de  $I_{pv}$  devient :

$$I_{pv} = N_p \cdot I_{SC} - N_p \cdot I_0 \left( e^{\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{N_s V_T} + \frac{R_S I_{pv}}{N_p V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{pv}}{R_p} - \frac{R_S}{R_p} \cdot I_{pv} \quad (\text{III.7}).$$

Avec :

$I_{sc}$  : Courant de court-circuit d'une cellule.

$R_p$  : Résistance caractérisant les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau.

$R_S$  : Résistance caractérisant les pertes par effets Joule dans le semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule.

$N_p$  : Nombre de cellules en parallèle.

$N_s$ : Nombre de cellules en série.

### III.2.1. Association des cellules photovoltaïques

#### III.2.1.1. Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

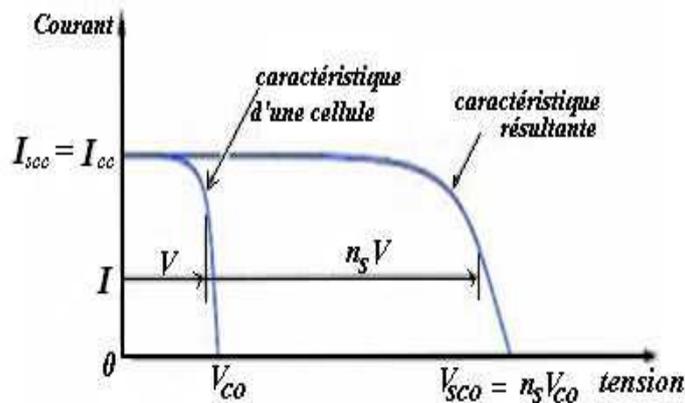


Fig.III.2 : caractéristique résultante d'un groupement en série de  $n_s$  cellules identiques.

#### III.2.1.2. Association en parallèle

Dans le cas du regroupement des cellules en parallèles les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. [19]

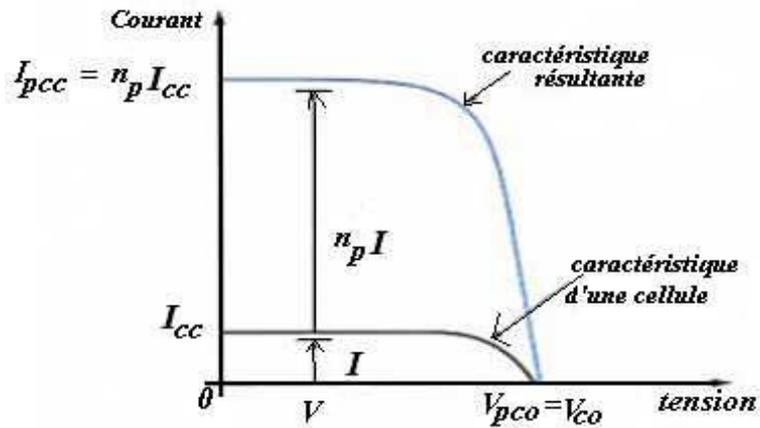


Fig.III.3 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de ns cellules identiques.

### III.3. Modélisation du convertisseur boost

Le convertisseur boost, ou hacheur parallèle est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

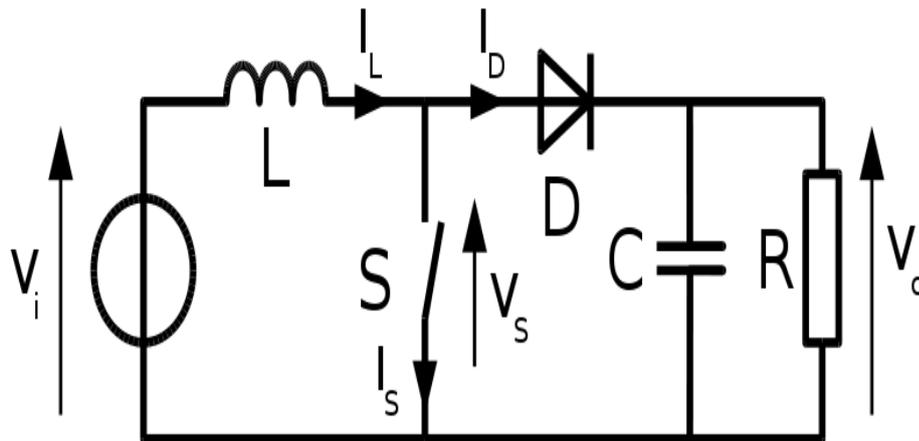


Fig.III.4 : Schéma électrique du convertisseur.

Lorsque S est fermé :

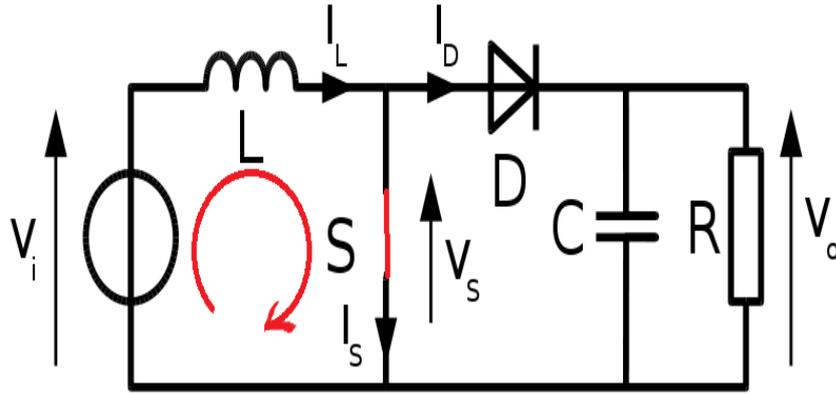


Fig.III.5 : Le cas numéro 1 (S est ON).

La tension aux bornes de l'inductance s'écrit de la forme :

$$V_i = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (\text{III.8})$$

À la fin de l'état passant, le courant \$I\_L\$ a augmenté de :

$$\Delta I_{Lon} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} di_L = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} \frac{V_i dt}{L} = \frac{V_i \alpha}{L} \quad (\text{III.9}).$$

Avec :

\$\alpha\$ : est le rapport cyclique qui représente la durée de la période \$T\$ pendant laquelle l'interrupteur \$S\$ conduit, il est compris entre 0 et 1.

\$V\_i\$ : la tension d'entrée de l'hacheur.

\$\Delta I\_{Lon}\$ : L'augmentation du courant dans la bobine.

**Lorsque S est ouvert :**

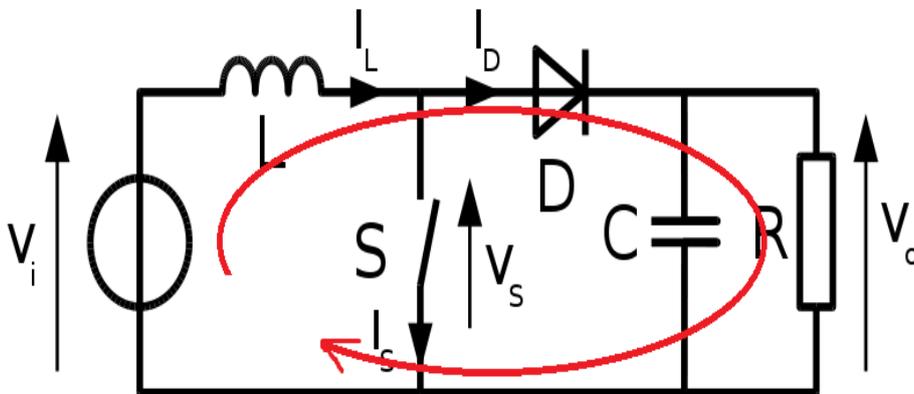


Fig. III.6 : Le cas numéro 2 (S est OFF).

Pendant l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge. Si on considère une chute de tension nulle aux bornes de la diode et un condensateur suffisamment grand pour garder sa tension constante, l'évolution de  $I_L$  est :

$$V_i - V_o = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

$V_o$  : la tension de sortie de l'hacheur.

Par conséquent, la variation de  $I_L$  durant l'état bloqué est :

$$\Delta I_{L\text{off}} = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T dI_L = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T \frac{(V_i - V_o) \cdot dt}{L} = \frac{(V_i - V_o)(1 - \alpha)}{L} \quad (\text{III.11})$$

En conséquence, le courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta I_{L\text{on}} + \Delta I_{L\text{off}} = 0$$

En remplaçant cette somme par leur expression, on obtient :

$$\Delta I_{L\text{on}} + \Delta I_{L\text{off}} = \frac{(V_i - V_o)(1 - \alpha)}{L} + \frac{V_i \cdot \alpha}{L} = 0$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (\text{III.12})$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1), qu'elle augmente avec  $\alpha$ , et que théoriquement elle peut être infinie lorsque  $\alpha$  se rapproche de 1. C'est pour cela que l'on parle de survolteur [20].

### III.4. Modélisation de l'onduleur

#### III.4.1. Circuit équivalent d'un onduleur monophasé

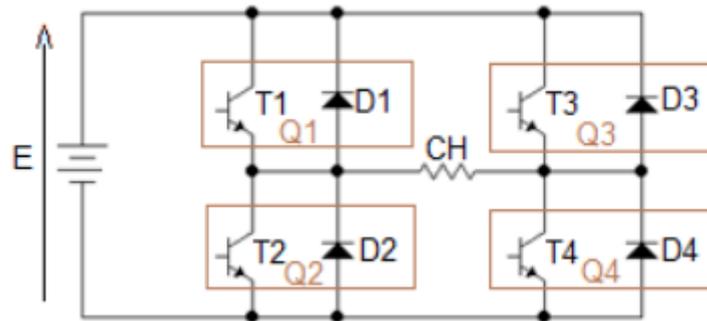


Fig.III.7. Schéma de principe d'un onduleur en pont. [21]

#### Principe de fonctionnement

Un onduleur en pont complet contient deux bras, chaque bras est composé de deux étages d'interrupteur de puissance ; chaque étage comporte deux composants à base des S-C (Transistor /Thyristor) avec diode placées en parallèles afin d'assurer la réversibilité des courants dans la charge.

- Les états des interrupteurs permettent de déterminer la valeur aux bornes de la charge :  
Pour  $0 < t < T/2$  : Les interrupteurs Q1, Q4 sont fermés et Q2, Q3 sont ouverts.

$$U_{ch} = R \times i(t) = +E \quad (\text{III.13})$$

- Pour  $T/2 < t < T$  : Les interrupteurs Q2, Q3 sont fermés et Q1, Q4 sont ouverts.

$$U_{ch} = R \times i(t) = -E \quad (\text{III.14})$$

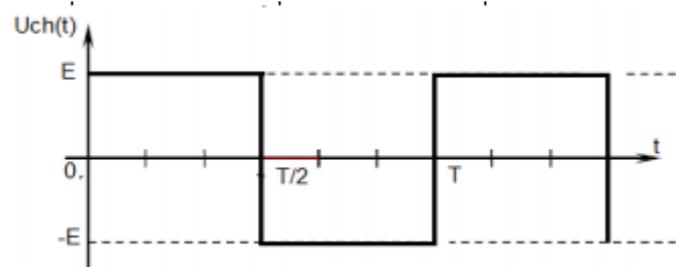


Fig.III.8. L'allure de la tension aux bornes de la charge. [22]

#### ➤ Charge résistive

- Pour  $0 < t < T/2$  : Les interrupteurs Q1, Q4 sont fermés et Q2, Q3 sont ouverts

$$i(t) = \frac{U_{ch}}{R} = \frac{+E}{R} \quad (\text{III.15})$$

- Pour  $T/2 < t < T$  : Les interrupteurs Q2, Q3 sont fermés et Q1, Q4 sont ouverts.

$$i(t) = \frac{U_{ch}}{R} = \frac{-E}{R} \quad (\text{III.16})$$

L'allure du courant suit l'allure de tension car les deux paramètres sont liés par la loi d'Ohm. Il faut noter que le courant dans les interrupteurs est toujours positif.

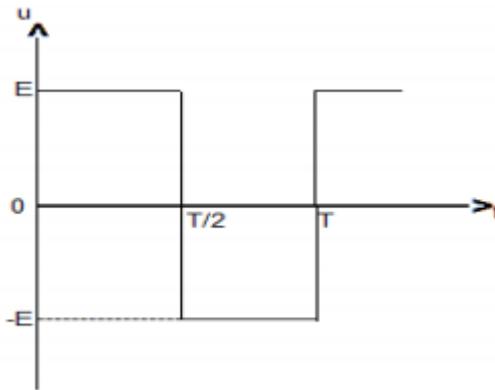


Fig. III.9: La tension aux bornes de la charge [22]

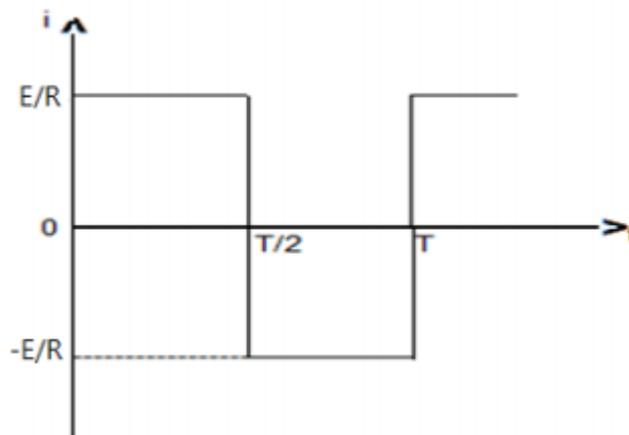


Fig. III.10 : Courant d'une charge résistive [22]

➤ Charge inductive :

La charge inductive simule un moteur alternatif et contrairement à la charge résistive l'allure de courant change.

- Pour  $0 < t < t_1$  : T1 et T4 sont commandés à la fermeture tandis que T2 et T3 sont ouverts donc :

$$U_{ch} = L \frac{di}{dt} + Ri = +E \quad (\text{III.17})$$

On trouve que le courant dans cet intervalle est négatif. Ce sont les diodes D1 et D4 qui conduisent.

$$i(t) = \frac{E}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) - I_M e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{III.18})$$

Dans cet intervalle la charge fournit l'énergie vers la source «**phase de restitution alternance**».

- Pour  $t_1 < t < T/2$  : A l' instant  $t_1$  le courant devient positif ce qui impose la conduction des transistors T1et T4 or les diodes D1 et D4 se bloquent. Les équations de  $U_{ch}(t)$  et  $i(t)$  restent les mêmes que (II-7) et (II-8) car on est toujours dans la même maille.

On est «**phase d'accumulation alternance**» ou la charge reçoit l'énergie.

- Pour  $T/2 < t < (T/2) + t_1$  :T2et T3 sont commandés à la fermeture donc :

$$U_{ch} = L \frac{di}{dt} + Ri = -E \quad (\text{III.19})$$

D'après (II-9) on trouve cette expression de courant :

$$i(t) = \frac{E}{R} \left( -1 + e^{-\frac{t-\frac{T}{2}}{\tau}} \right) + I_M e^{-\frac{t-\frac{T}{2}}{\tau}} \quad (\text{III.20})$$

Le courant est positif, ce qui veut dire que les diodes D2 et D3 conduisent le courant. Dans cet intervalle de temps la charge fournit l'énergie vers la source.

- pour  $(T/2) + t_1 < t < T$  à l' instant  $(T/2) + t_1$  le courant devient négatif ce qui impose la conduction des transistors T2 et T3 avec les diodes D2 et D3 qui sont bloquées. Dans ce cas la charge reçoit l'énergie.

Les équations de  $U_{ch}(t)$  et  $i(t)$  restent les mêmes que (II-9) et (II-10), car c'est la même maille.

Il y'a enchaînement de quatre mailles de conduction :

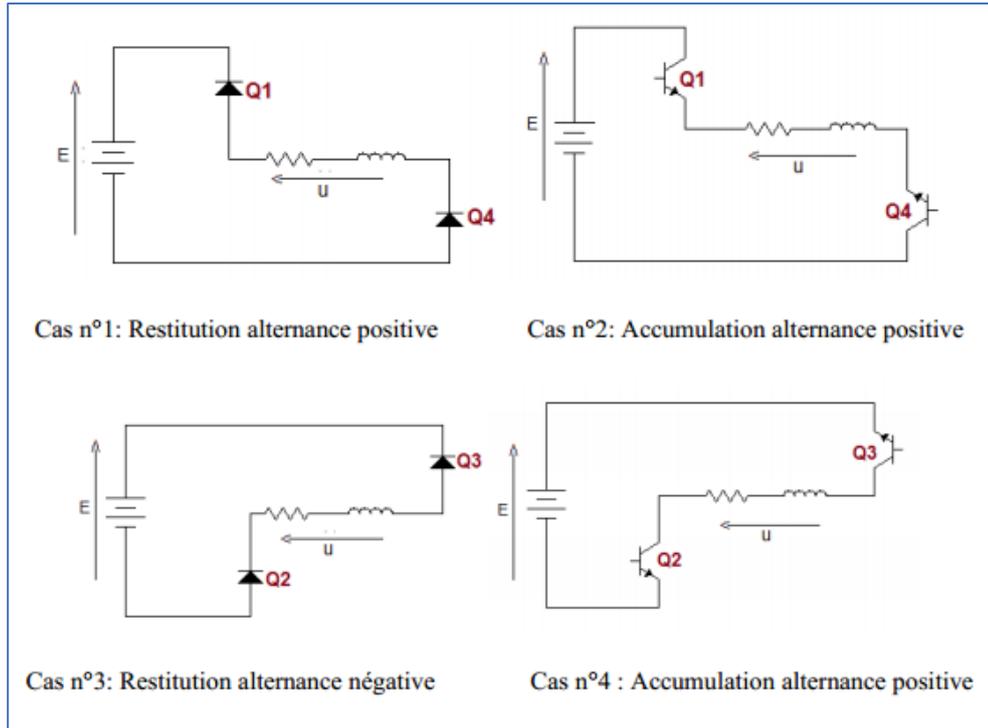


Fig. III.11 : Les cas possibles de commutation de l'onduleur [23]

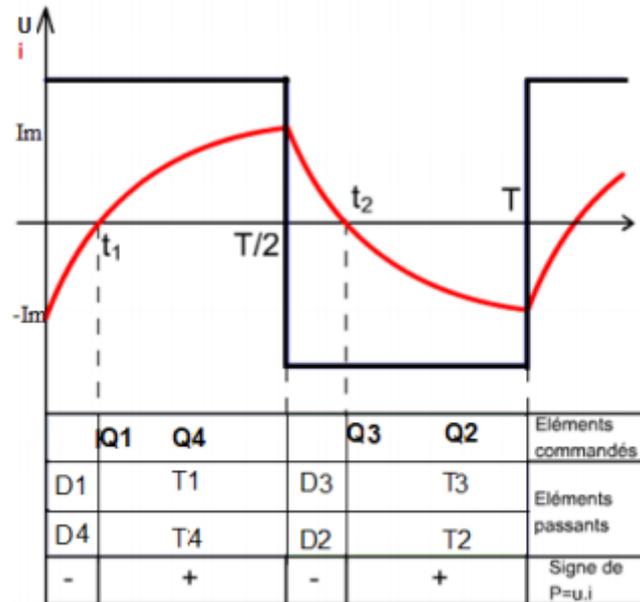


Fig. III.12 : L'allure de la tension et de courant aux bornes de la charge. [23]

### **III.4. Conclusion**

---

On a vu dans ce chapitre la modélisation des éléments nécessaires pour l'alimentation à base d'énergie renouvelable, telle que la cellule photovoltaïque et le convertisseur DC/DC qui est l'hacheur survolteur.

Dans le prochain chapitre, on va choisir les composants de l'alimentation et simuler le circuit sur le logiciel ISIS Proteus.

## Chapitre IV : Calcul et choix des composants de l'alimentation

### IV.1. Introduction

---

Le présent chapitre représente la simulation de circuit d'alimentation à base d'énergie renouvelable, qui est dans notre cas l'énergie solaire photovoltaïque. On choisit de faire notre simulation sur le logiciel Isis Proteus Professional 8, on va présenter dans ce chapitre les composantes électroniques utilisées et une discussion des résultats obtenus.

### IV.2. Calcul et choix des composantes

---

Afin de faciliter l'étude de notre circuit, qui représente une alimentation basée sur l'énergie photovoltaïque, on a divisé le circuit en quatre blocs :

- Bloc d'alimentation.
- Bloc convertisseur.
- Bloc de stockage.
- Bloc de charge.

#### IV.2.1. Bloc de charge

Pour déterminer les éléments nécessaires de notre alimentation, il faut commencer par la charge. On a comme cahier de charge :

- Trois ports USB de 10 W chacun pour charger les appareils électroniques pendant 2 heures.
- Trois lampes de 5 W chacune pour l'éclairage, pendant 5 heures.
- Sortie alternative de 100 W maximum, pendant une heure.

On calcule maintenant la puissance totale de la charge :

$$P_T = P_{ECL} + P_{USB} + P_{ALT}$$

$$P_T = (3 \times 5) + (3 \times 10) + (100)$$

$$P_T = 145 \text{ W}$$

L'énergie total consommée  $E_T$  :

$$E_T = E_{ECL} + E_{USB} + E_{ALT}$$

$$E_T = (3 \times 5 \times 5) + (3 \times 10 \times 2) + (100 \times 1)$$

$$E_T = 235 \text{ Wh} .$$

### IV.2.2. Bloc d'alimentation

La puissance d'un panneau photovoltaïque est exprimée en watts crête : c'est la puissance qu'il fournit à une intensité de 1 kW / m<sup>2</sup> sous ensoleillement nominal. En gros, cela signifie que c'est la puissance fournie dans la belle mi-saison, tant qu'il y a un peu de vent, il ne fera pas trop chaud. Habituellement, par un langage abusif, les gens utilisent des "watts" au lieu de "watts de pointe" pour définir la puissance d'un panneau.

Cependant, il n'y a pas toujours de signes de lever de soleil et le temps n'est pas toujours beau. Du coup, à Toulon, pour un panneau fixe de 100W incliné à 60 ° (bon pour l'hiver), le logiciel INES a indiqué qu'il fournirait en moyenne 230 wattheures par jour en décembre. Il s'agit d'une valeur moyenne, qui comprend le nombre de jours de beau temps et de mauvais temps calculé sur la base d'une décennie de climat historique. Le panneau fournit plus de fonctionnalités en été, mais si le système est utilisé tout au long de l'année, le pire des cas doit être envisagé [20].

Estimons que, sur cette petite installation, on perde dans les fils (effet joule), le régulateur de charge et la batterie 10% de l'énergie, il reste 207 Wh utilisables avec un panneau de 100wc. Pour un besoin de 235 Wh, on a :

$$207\text{Wh} \longrightarrow 100\text{Wc}$$

$$235\text{Wh} \longrightarrow V_p$$

$$V_p = \frac{235 \times 100}{207} = 113.52 \text{ Wc}$$

Un panneau de 114 Wc est donc suffisant mais on a choisi d'élargir la marge et d'utiliser trois panneaux de 50Wc chacun pour un total de 150Wc qui est plus que suffisant. (**Annexe C**)

Les panneaux se sont des panneaux flexibles léger de faible épaisseur le panneau est (**vpD7162891**)

### IV.2.3. Bloc convertisseur

#### IV.2.3.1. Bloc commande

Pour implémenter l'algorithme de la méthode perturbation et observation (**annexe B**), qui sert à trouver le point maximum de fonctionnement. Pour cela, il est nécessaire d'introduire une interface qui a pour but de relier la programmation avec le circuit d'hacheur boost, qui est bien l'interface Microcontrôleur, Ce dernier a des plusieurs types. Dans notre simulation, on a utilisé un Arduino Uno. (**Annexe A**)

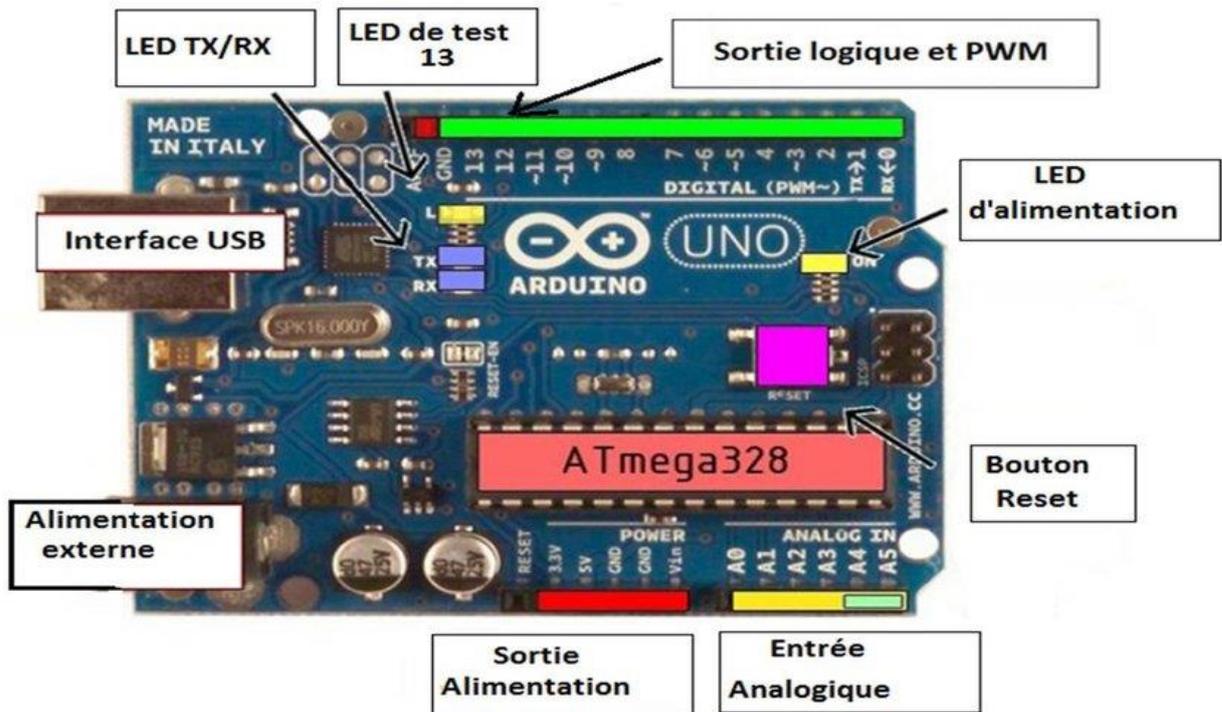


Fig.IV.1 Présentation de la carte Arduino Uno

Dans les applications d'électroniques de puissance, l'utilisation Bloc de mesure est nécessaire pour l'étude et l'extraction des différentes valeurs pour faire les calculs, afin d'assurer la convergence entre la théorie et la pratique. Dans notre simulation on a utilisé les capteurs.

#### IV.2.3.2.1. Capteurs

Pour la MPPT, il requise plusieurs capteurs, dans notre simulation sous Isis Proteus, on a utilisé deux capteurs électroniques : capteur de courant (INA169) et capteur de tension (diviseur de tension).

##### Capteur de courant INA169

L'INA169 sont des moniteurs à shunt de courant unipolaires de haute qualité. Une large gamme de tension d'entrée en mode commun, un courant de repos faible et rapide et un minuscule boîtier SOT23 permettent une utilisation dans une variété d'applications. Les tensions d'entrée en mode commun et d'alimentation sont indépendantes et peuvent aller de 2,7 V à 60 V pour l'INA169. Le courant de repos n'est que de 60μA, ce qui permet de connecter l'alimentation électrique de chaque côté du shunt de mesure du courant avec une erreur minimale. . (Voir annexe D)

##### a) Présentation de Capteur de courant INA169

Le schéma de base du circuit pour l'INA169. Le courant de charge,  $I_s$ , est tiré de l'alimentation,  $V_{IN}$ , à travers la résistance shunt,  $R_S$ . La chute de tension dans la résistance shunt,

$V_S$ , est forcée aux bornes de  $R_{GI}$  par l'amplificateur opérationnel interne, ce qui fait circuler le courant dans le collecteur de Q1. La résistance externe,  $R_L$ , convertit le courant de sortie en une tension,  $V_o$ , sur la broche OUT.

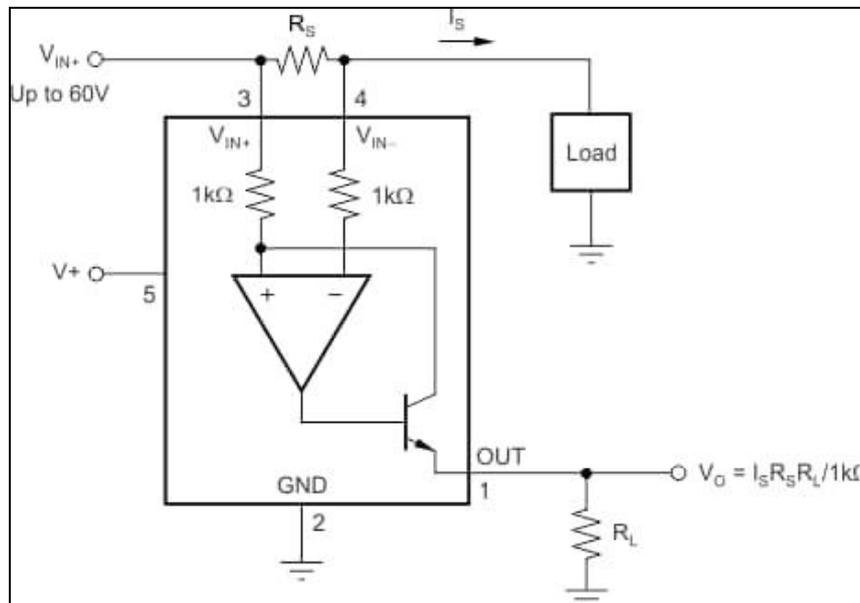


Fig.IV.2 Présentation de Capteur de courant INA169.

$$I_S = \frac{V_o \times 1K\Omega}{R_S \times R_L}$$

Avec :

$I_S$  : Le courant que nous voulons mesurer.

$V_o$  : Le voltage que nous avons mesuré à la sortie de l'INA169.

$1k\Omega$  : une valeur de résistance constante que nous devons inclure en raison des internes de l'INA169.

$R_S$  : La valeur de la résistance shunt. Si vous ne modifiez pas la carte, alors celle-ci est réglée sur  $10\Omega$ .

$R_L$  : La valeur de la résistance de sortie. Si vous ne modifiez pas la carte, elle est définie à  $10k\Omega$ .

### 1) Capteur de tension

Le capteur de tension est un élément essentiel dans notre circuit car il nous aide à calculer la puissance fournie par le générateur photovoltaïque en donnant la valeur de la tension vue que l'arduino ne supporte que 5 V de tolérance et notre circuit fournie jusqu'à 21 V.

Pour résoudre ce problème on a utilisé un diviseur de tension, ce dernier est un capteur qui a pour but d'introduire un intervalle de tension entrant à l'arduino  $V_{out}$  comprise entre 0 et 5 équivalente à l'intervalle de la tension du panneau  $V_{pv}$  à travers l'équation suivante. (**Annexe E**).

$$V_{out} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_{pv}$$

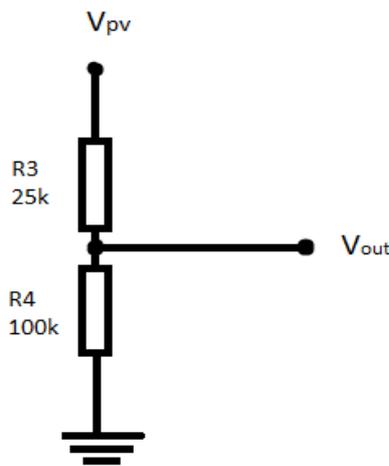


Fig.IV.3 : Diviseur de tension.

### IV.2.4. Bloc de puissance

#### IV.2.4.1. Choix du Transistor

Le transistor doit être dimensionné pour supporter le courant maximal délivré à la charge. Nous choisissons un MOSFET « IRFP250 ». Ce MOSFET peut fonctionner avec une tension  $V_{DSS}$  jusqu'à 200V et une fréquence de 100KHz, et il peut supporter un courant  $I_D$  allant jusqu'à 33A (**annexe F**)

#### IV.2.4.2 Choix de la Diode

La diode utilisée doit être rapide et pouvant supporter le courant maximal fourni à la charge, son rôle est d'éviter le retour du courant provenant de la charge. On va placer une diode « schottky 18TQ045 » qui présente une tension de blocage inverse 45V et un courant moyen maximal de 18A (**annexe G**)

### 1) Choix de 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. . (Voir annexe H) La valeur minimale de l'inductance est donnée par :

$$L > \frac{\alpha(1 - \alpha)^2}{2.f} R$$

Avec :

$\alpha$  : Le rapport cyclique compris entre 0 et 1.

f : la fréquence de commutation. f=50KHz

R : la charge. R=70Ω

### 2) Choix de Condensateur

On place en entrée comme en sortie des condensateurs chimiques pour filtrer les variations des tensions d'entrée et de sortie. Les valeurs des capacités sont calculées en fonction de l'ondulation voulue ainsi que les grandeurs moyennes désirées (annexe I)

$$C > \frac{\alpha}{R \times f \times \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right)}$$

Avec :

$\alpha$  : Le rapport cyclique compris entre 0 et 1.

f : la fréquence de commutation. f=50KHz

R : la charge. R=70Ω

$\Delta V_o$  : L'ondulation voulue.  $\Delta V_o = 0.5$

$V_o$  : La tension qu'on veut filtrer.

### IV.2.5. Bloc stockage

Une batterie est définie par sa tension en volts et sa 'capacité' en Ampères. Heures. La durée de vie de la batterie se calcule en cycles. Plus on décharge profondément une batterie, moins elle sera capable de fournir de cycles.

L'idéal est de ne pas décharger sa batterie de plus de 10% de sa capacité, on considère qu'elle n'est pas cyclée et ne vieillit (presque) pas. Mais cela coûte cher et ça pèse lourd. Du coup on accepte de la décharger de 20 à 30%, c'est raisonnable et le nombre de cycles, selon la technologie, reste assez élevé. Par exemple pour une batterie pas chère, type plomb ouvert, à 20% de décharge, on se trouve sensiblement à 400 cycles.

### IV.3. Résultats de simulation

Après la modélisation des éléments nécessaires de notre circuit, tel que l'hacheur, l'onduleur et le panneau photovoltaïque. La simulation du circuit sous logiciel Isis Proteus a pour but de vérifier le fonctionnement de circuit et d'étudier leur comportement. La simulation et les résultats sont les suivants :

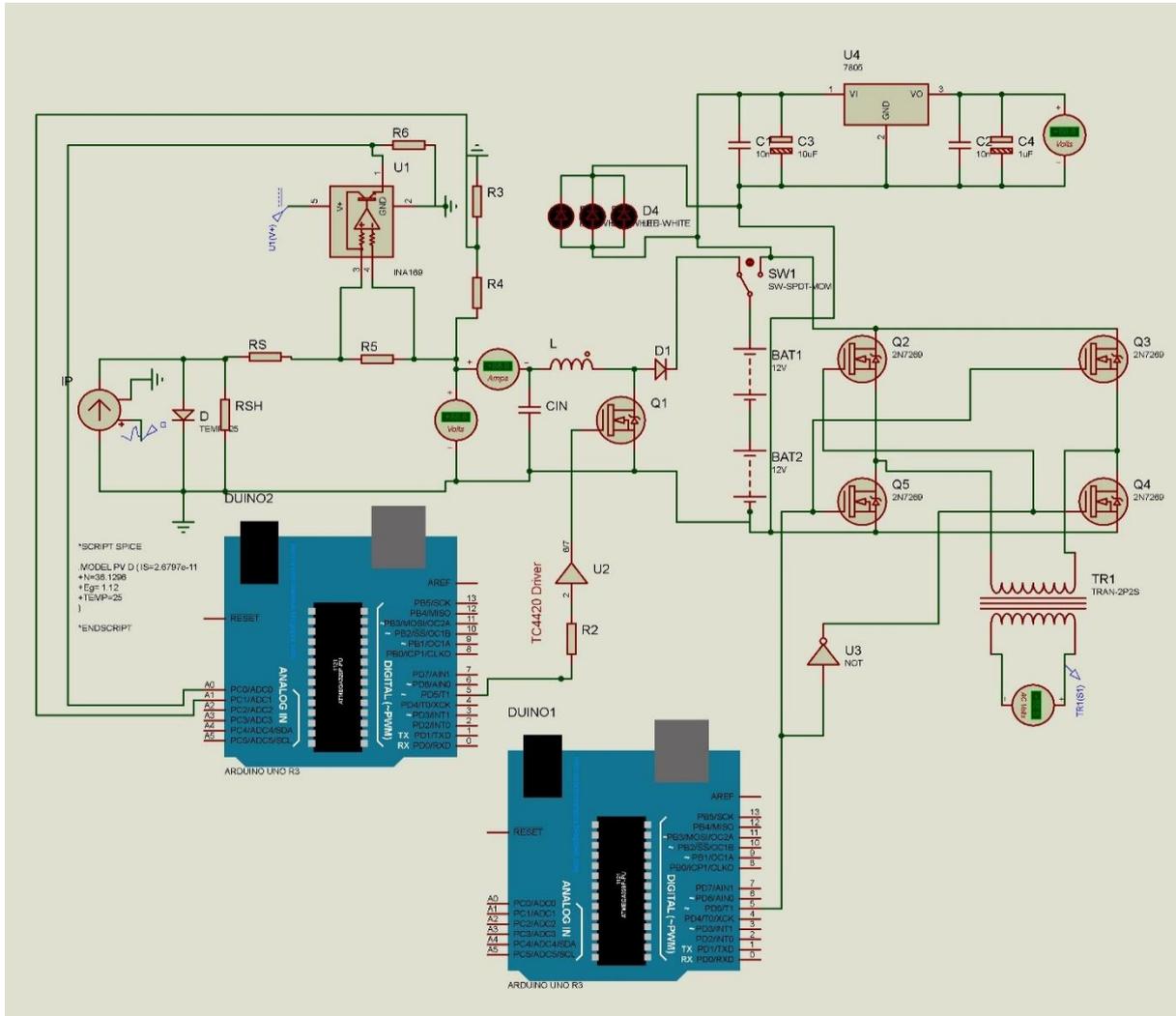


Fig.IV.4 : Circuit de l'alimentation à base d'énergie solaire.

### Les sorties du circuit

Pour notre alimentation à base d'énergie renouvelable, on a comme sorties, trois lampes, deux ports USB de 5V chaqu'un, et une sortie alternative représenté par un onduleur monophasé.

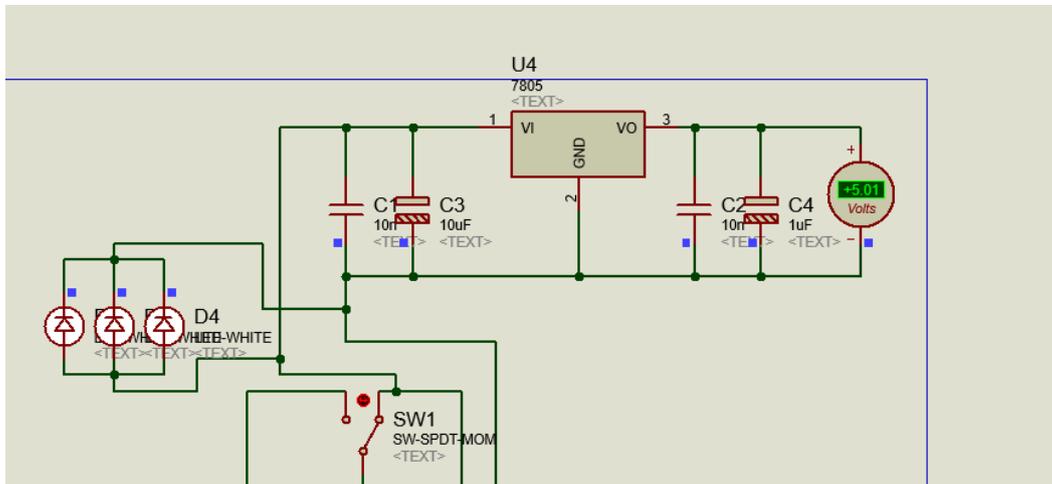


Fig.IV.5 Tension au borne du port USB.

Comme on voit dans le circuit que la tension de sortie pour recharger les appareils électroniques est assuré par le voltage nécessaire qui est 5V.

### Tension et courant aux bornes du panneau photovoltaïque

La tension d'entrée de notre circuit est représenté par un groupe de panneaux photovoltaïques, les figures uivantes illustrent la tension et le courant aux bornes du PV :

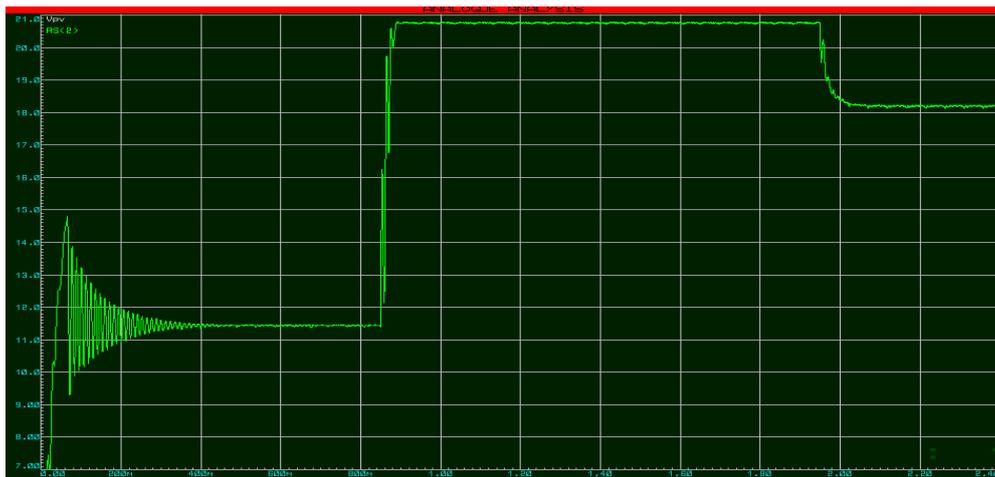


Fig.IV.6 Tension délivré par le PV.

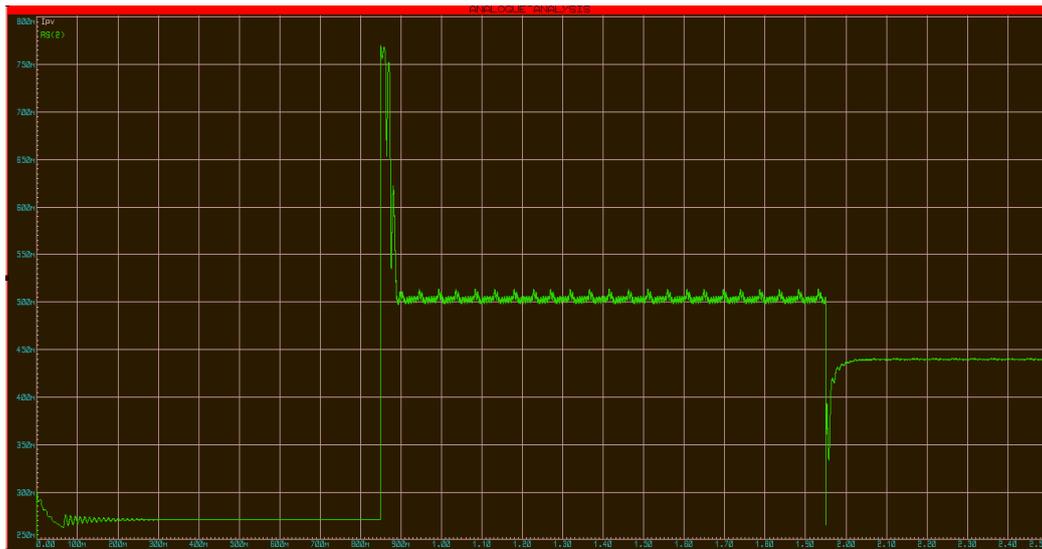


Fig.IV.7 Courant délivré par le PV.

### Tension et courant à la sortie du hacheur

Un hacheur parallèle a pour but d'augmenter la tension d'entrée à une valeur nécessaire pour charger les batteries avec un rendement élevé.

la tension à la sortie du hacheur est représenté par la figure suivante :



Fig.IV.8 Tension à la sortie du hacheur.

On constate que la tension à la sortie du hacheur est de 24V, donc l'hacheur a assuré une tension plus grande que la tension d'entrée délivré par le PV, qui est suffisant pour charger les batteries.

### La sortie alternative (onduleur)

Pour la sortie alternative, elle représenté par un onduleur monophasé commandé par la commande de modulation de large impulsion MLI généré par un arduino (**voire annexe J**).

La commande de l'onduleur est représentée par la figure suivante :

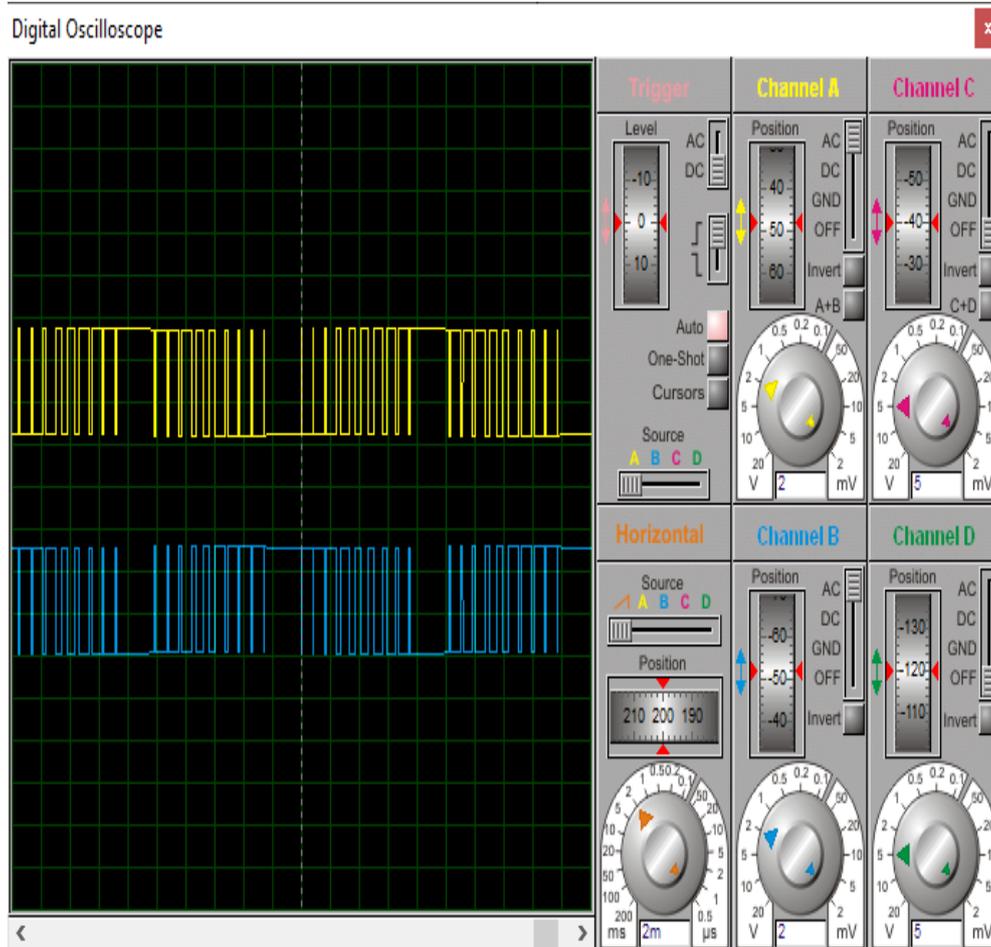


Fig.VI.9. Commande MLI de l'onduleur.

### Pour une charge résistive

La tension et le courant aux bornes de la charge résistive est représenté par les figures suivantes :

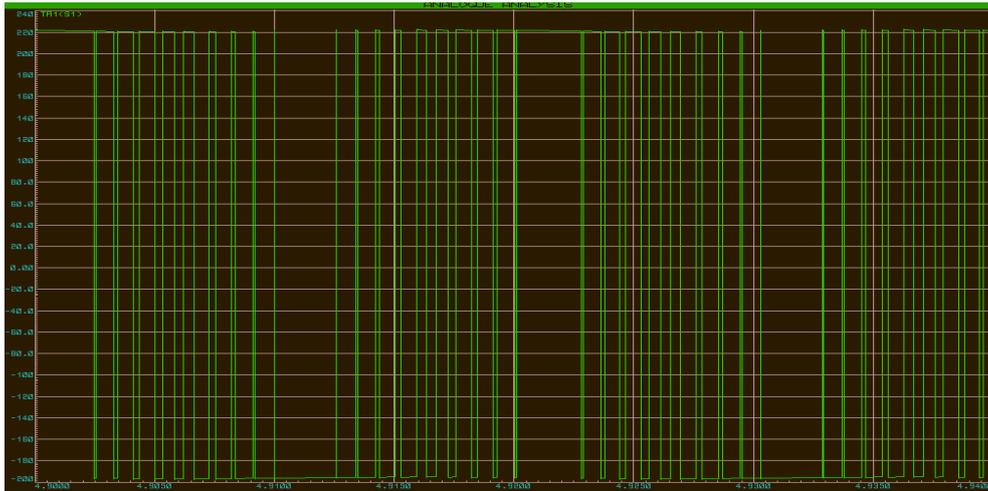


Fig.IV.10 Tension aux bornes de la charge resistive.

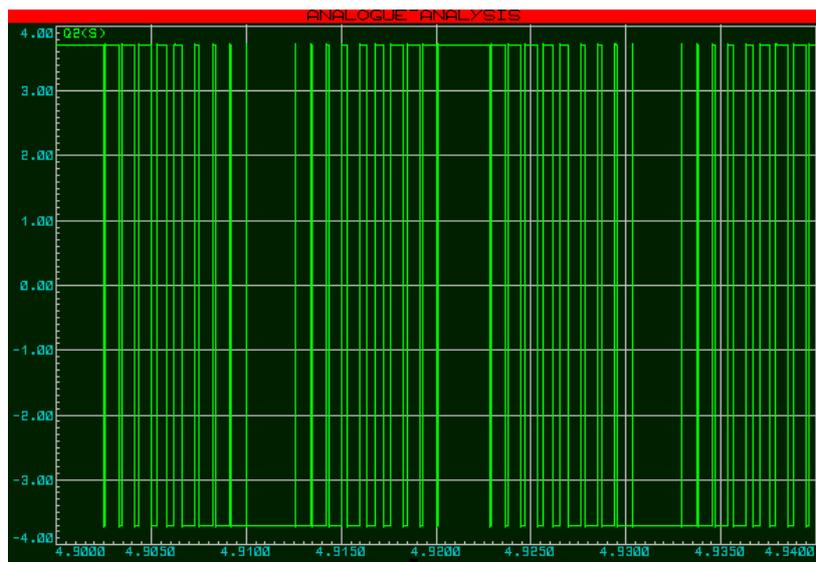


Fig.IV.11 Courant aux bornes de la charge resistive.

### Pour une charge inductive

La tension et le courant aux bornes de la charge résistive est représenté par les figures suivantes :

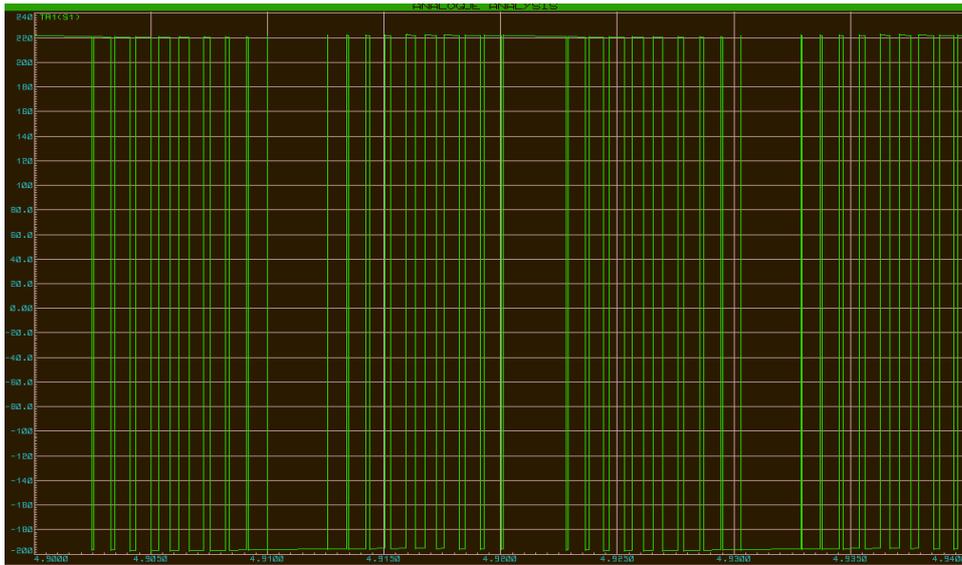


Fig.IV.12 Tension aux bornes de la charge inductive.

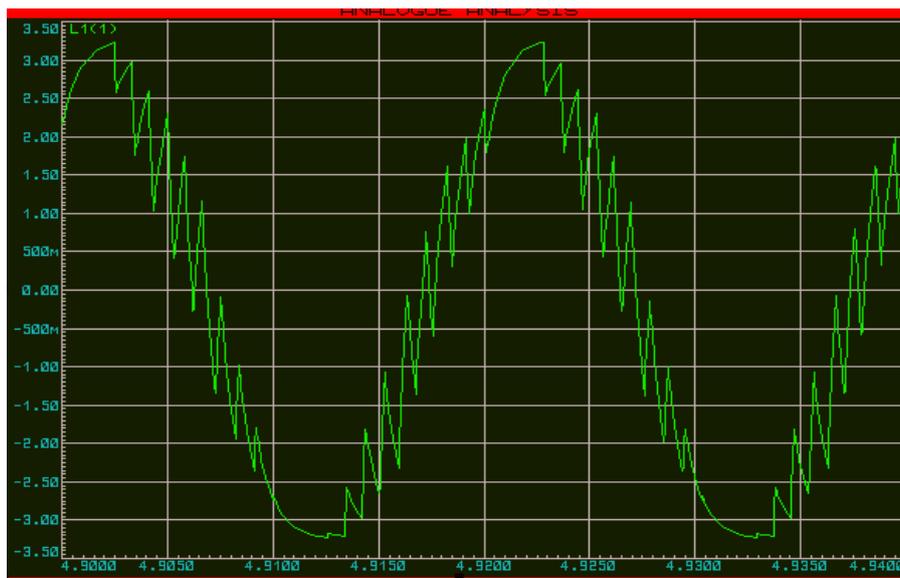


Fig.IV.13 Courant aux bornes de la charge inductive..

### IV.4. Conclusion

On a vu dans ce chapitre la simulation de notre circuit, qui est une alimentation à base d'énergie photovoltaïque, afin d'assurer l'alimentation dans un camping.

Pour cela on a commencé tout d'abord par la représentation des composants utilisés qui sont disponible aux marchés, ensuite, on a vérifié le courant et la tension de chaque bloc commençant par le GPV, le convertisseur DC/DC, et enfin la sortie alternative représenté par un onduleur monophasé pour une charge purement résistive et une charge inductive.

### Conclusion Générale

---

L'objectif de ce mémoire est de réaliser une alimentation à base d'énergie renouvelable, qui a pour but d'assurer l'alimentation en énergie électrique d'un kit de camping. Pour cela on a choisi tout d'abord quelle source des énergies renouvelables utilisées. Donc, après la présentation de sources renouvelables, on a choisi l'énergie solaire photovoltaïque. Car, en ALGERIE le climat est généralement ensoleillé, donc l'utilisation des panneaux photovoltaïques sera utile et de rendement élevé.

On a commencé notre travail par la modélisation des composants essentiels tels que, les panneaux photovoltaïques, le hacheur parallèle et l'onduleur. La modélisation a pour but d'étudier le fonctionnement du circuit et son comportement.

Après la modélisation, on a fait la simulation du circuit à l'aide du logiciel Isis Proteus Professional 8, qui est très utilisé dans le domaine d'électronique de puissance. Grâce à la simulation sous ce logiciel, on a fait l'extraction des différents résultats tel que la tension et le courant électrique entrant et sortant de chaque composant électronique, cela nous a permis de vérifier le fonctionnement du circuit avant de le réaliser.

### Bibliographie

---

- [1] Abdelkhalik., MEKARET Fayssal et ZIDOURI. 2018. Etude, simulation et réalisation d'un mini onduleur pour systèmes photovoltaïques. Tlemcen : s.n. 2018. Mémoire de master.
- [2] Alonso, Alba Elena Garcéa. 2017. Maximum power point tracknig algorithms for solar photovoltaic system. 2017. Projet fin d'étude.
- [3] ANNE LABOURET, PASCAL CUMUNEL, JEAN-PAUL BRAUN, BENJAMIN FARAGGI. 2005. Cellules solaires, Les bases de l'énergie photovoltaïque. Paris : EDITIONS TECHNIQUES ET SCIENTIFIQUES FRANÇAISES ETSF, 2005.
- [4] CAILLAUD, JEAN. L'énergie solaire. s.l. Terminal bac pro, lycée des métiers de l'énergie, métallerie, et de la vente.
- [5] Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par Incrément de la Conductance. F. OUDIAI, K.LAGHA-MENOUER, A. HADJ ARAB, R. ZIRMI. Tizi-Ouzou : Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou, RP 17, 1500, Tizi-Ouzou, ALGERIE. Second International Seminar on Fossil, New and Renewable Energy, 13-14 November 2019, Boumerdes, Algeria.
- [6] cours d'électronique de puissance, concersion cotinu-alternatif, Onduleurs. Université Joseph Fourier.
- [7] H. Abbes, H.Abid, K.Loukil, A.Toumi et M.Abid. 30 septembre 2014. Etude comparative de cinq algorithmes de commande. Etude comparative de cinq algorithmes de commande. 30 septembre 2014.
- [8] <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Convertisseur%20Boost/fr-fr/>.  
www.dictionnaire.sensagent.leparisien.fr. [En ligne]
- [9] <https://housebuyers4u.co.uk/blog/advantages-disadvantages-solar-panels/>.  
www.housebuyers4u.co.uk. [En ligne]
- [10] L'avenir : l'éthanol d'origine lignocellulosique. France, Ministère en charge de l'énergie : s.n.
- [11] M.A Serhan. 2005. Maximum power point trachking system: an adaptive algorithm for solar panels. L'université américaine de BEIRUT. 2005. Thèse de doctorat.
- [12] Nabi, AARIDDA. Juin 2014. Etude et simulation des étages DC-DC et DC-AC d'un onduleur photovoltaïque. Juin 2014. Mémoire de master.
- [13] Planas, Oriol. 9 juin 2017. Ingénieur Technique Industriel, spécialité mécanique. 9 juin 2017.
- [14] —. 2015. www.lenergie-solaire.net. <https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-photovoltaique/effet-photovoltaique>. [En ligne] 3 mai 2015.

## Bibliographie

---

- [15] 2017. Power Electronics A to Z. <http://www.completepowerelectronics.com/>. [En ligne] 9 octobre 2017.
- [16] S.Ashok. [www.britannica.com](http://www.britannica.com). <https://www.britannica.com/technology/solar-cell>. [En ligne]
- [17] Saad Tapuchi, Dmitry Baimel. 14 Mars 2019. Improved Fractional Open Circuit Voltage MPPT. Department of Software Science, Tallinn University of Technology. 14 Mars 2019.
- [18] Secchi, Angelo. 1875. Le soleil. 1875.
- [19] SINGO, Akassewa Tchapo. Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome. Université Henri Poincaré, Nancy-I en génie électrique. Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur.
- [20] Sofiane, Mr. MOUSSOUNI Nasser Eddine et OUADFEL. 2017. Etude et réalisation d'un onduleur de tension monophasé. Université de Béjaia. Béjaia : s.n. 2017. Mémoire de master.
- [21] Tati Fethalah, Ben Lamoudi Oussama. 2018. Etude et réalisation d'un Système photovoltaïque Optimisé par Logique Floue. Université KASDI MERBAH OUARGLA. : s.n. 2018. Mémoire de master.
- [22] Vidyanandan, K.V. février, 2017. An overview of facteur affecting the performance of solar PV system. Février, 2017.
- [23] [www.europ-computer.com](http://www.europ-computer.com). [http://www.europ-computer.com/dossiers/dossier\\_6\\_17.html](http://www.europ-computer.com/dossiers/dossier_6_17.html). [En ligne]

## Annexes

---

### Annexe A

#### Arduino Uno

##### Définition de la carte Arduino Uno

L'Arduino Uno est un microcontrôleur programmable qui permet, comme son nom l'indique, de contrôler des éléments mécaniques : systèmes, lumières, moteurs, etc. Cette carte électronique permet donc à son utilisateur de programmer facilement des choses et de créer des mécanismes automatisés, sans avoir de connaissances particulières en programmation.

La carte Arduino Uno est basée sur un ATmega328 cadencé à 16 MHz. C'est la plus simple et la plus économique carte à microcontrôleur d'Arduino. Des connecteurs situés sur les bords extérieurs du circuit imprimé permettent d'enficher une série de modules complémentaires.

##### Présentation de la carte Arduino Uno

Actuellement, il existe plus de 20 versions de module Arduino, on cite l'Arduino Uno, l'Arduino Mini, l'Arduino Nano, l'Arduino Diecimila, et l'Arduino Mega2560. Parmi ces types, On a choisi une carte Arduino Uno. Elle contient beaucoup de caractéristiques qui seront données par la suite.

Microcontrôleur	ATmega328
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'alimentation (recommandée)	7-12V
Consommation maxi admise sur port USB (5V)	500 mA avant déclenchement d'un fusible
Broches E/S numériques	14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM pour commander les moteurs)
Broches d'entrées analogiques	6 (utilisables aussi en broches E/S numériques)

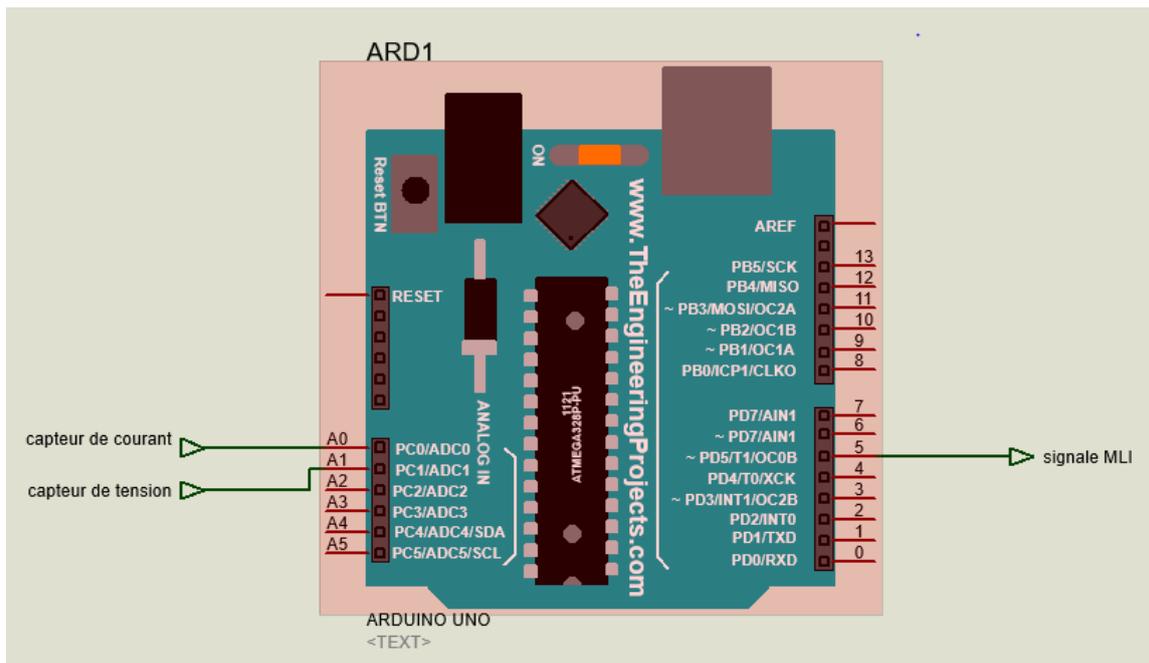
Intensité maxi disponible par broche E/S (5V)	40 mA par sortie, mais ATTENTION : 200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S)
Mémoire Programme Flash	32 Ko
Mémoire RAM (mémoire volatile)	2 Ko
Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)	1 Ko
Vitesse d'horloge	16 MHz

**Brochage de la carte arduino uno**

Pour le brochage on a

Branche le capteur de courant et le capteur de tension dans les pins d'analogue A0 et A1 respectivement comme entre pour utilise cette valeur dans la programmation du MPPT.

Pour la sortie on a le pin digital numéro « 5 » qui est relie a travers un driver a la gâchette du MOSFET tout on gênera un signale MLI de rapport cyclique variable.



Brochage de l'arduino

## Annexe B

## Programmation de l'algorithme P&amp;O

```

int duty = 75;
const int v = A0;
const int I = A1;
int vk = 0;
int ik = 0;
int p = 0;
int delP = 0;
int vprev = 0;
int p_prev = 0;
int delv = 0;
const int PWM = 5;

void setup() {
  pinMode (PWM, OUTPUT);
}

```

```

void loop() {
  vk = analogRead(v);
  ik = analogRead(I);
  vk=(5/1023)*vk;
  ik=(5/1023)*ik;
  p = vk*ik;
  delP = p - p_prev;
  delv = vk-vprev;
  if(delP!=0 || delv !=0)
  {
    if (delP > 0){
      if (delv < 0){
        duty++;
      }else{
        duty--;
      }
    } else {
      if (delv<0){
        duty--;
      }else{
        duty++;
      }
    }
  }
  else{
    duty = duty;
  }
  digitalWrite (PWM, HIGH);
  delayMicroseconds (duty);
  digitalWrite (PWM, LOW);
  delayMicroseconds (100-duty);

  p_prev=p;
  vprev=vk;
}

```

# Annexes

## Annexe C

No. de Modèle	SGM-30W18V	SGM-50W18V	SGM-100W/18	SGM-160W/18	SGM-200W/18V
<b>Garantie</b>					
Garantie	10 Années				
Garantie de Puissance	10 ans à 90% de puissance sortie, 25 ans à 80% de puissance sortie				
<b>Caractéristique Electrique (STC)</b>					
Puissance Maximal (Pmax)	30 Wp	50 Wp	100 Wp	160 Wp	200 Wp
Tension à Puissance Maximal (Vmax)	17,8 V	17,8 V	17,8 V	17,7 V	17,8 V
Courant à Puissance Maximum (Cmax)	1,69 A	2,81 A	5,62 A	8,71 A	11,24 A
Tension Circuit Ouvert (Voc)	21,3 V	21,3 V	21,3 V	21,1 V	21,23 V
Courant Circuit Court (Isc)	1,82 A	3,03 A	6,07 A	9,4 A	12,13 A
Tolérance de Puissance (+)	+ 3 %	+ 3 %	+ 3 %	+ 3 %	+ 3 %
Tolérance de Puissance (-)	- 3 %	- 3 %	- 3 %	- 3 %	- 3 %
<i>Conditions de Test Standard (STC): masse d'air AM 1,5, irradiation 1000W/m<sup>2</sup>, température des cellule</i>					
<b>Caractéristique de Température</b>					
Coefficient Température (Pmax)	-0,39 %/°C				
Coefficient Température (Voc)	-0,29 %/°C				
Coefficient Température (Isc)	0,05 %/°C				
<b>Caractéristiques Maximum</b>					
Tension Maximale du Système	1000 V				
<b>Caracteristiques Matériel</b>					
Type Cellule	Monocristallin				

## Annexe D

## Capteur de courant INA169

L'INA169 sont des moniteurs à shunt de courant unipolaires de haute qualité. Une large gamme de tension d'entrée en mode commun, un courant de repos faible et rapide et un minuscule boîtier SOT23 permettent une utilisation dans une variété d'applications. Les tensions d'entrée en mode commun et d'alimentation sont indépendantes et peuvent aller de 2,7 V à 60 V pour l'INA169. Le courant de repos n'est que de  $60\mu\text{A}$ , ce qui permet de connecter l'alimentation électrique de chaque côté du shunt de mesure du courant avec une erreur minimale.



INA139, INA169

SBOS181F – DECEMBER 2000 – REVISED FEBRUARY 2017

### INA1x9 High-Side Measurement Current Shunt Monitor

#### 1 Features

- Complete Unipolar High-Side Current Measurement Circuit
- Wide Supply and Common-Mode Range
- INA139: 2.7 V to 40 V
- INA169: 2.7 V to 60 V
- Independent Supply and Input Common-Mode Voltages
- Single Resistor Gain Set
- Low Quiescent Current:  $60\mu\text{A}$  (Typical)
- 5-Pin, SOT-23 Packages

#### 2 Applications

- Current Shunt Measurement:
  - Automotive, Telephone, Computers
- Portable and Battery-Backup Systems
- Battery Chargers
- Power Management
- Cell Phones
- Precision Current Source

#### 3 Description

The INA139 and INA169 are high-side, unipolar, current shunt monitors. Wide input common-mode voltage range, high-speed, low quiescent current, and tiny SOT-23 packaging enable use in a variety of applications.

Input common-mode and power-supply voltages are independent and can range from 2.7 V to 40 V for the INA139 and 2.7 V to 60 V for the INA169. Quiescent current is only  $60\mu\text{A}$ , which permits connecting the power supply to either side of the current measurement shunt with minimal error.

The device converts a differential input voltage to a current output. This current is converted back to a voltage with an external load resistor that sets any gain from 1 to over 100. Although designed for current shunt measurement, the circuit invites creative applications in measurement and level shifting.

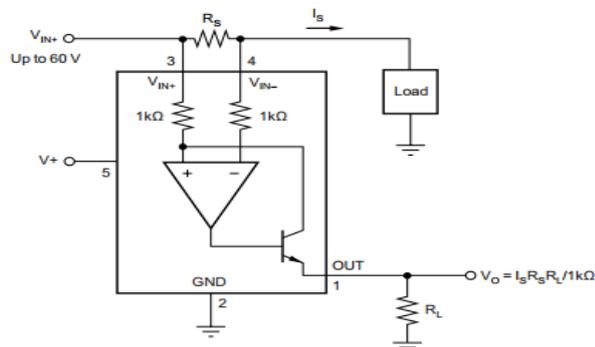
Both the INA139 and INA169 are available in 5-pin SOT-23 packages. The INA139 device is specified for the  $-40^\circ\text{C}$  to  $+125^\circ\text{C}$  temperature range, and the INA169 is specified from  $-40^\circ\text{C}$  to  $+85^\circ\text{C}$ .

#### Device Information<sup>(1)</sup>

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
INA139	SOT-23 (5)	2.90 mm × 1.60 mm
INA169		

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

#### Typical Application Circuit



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

## Annexes

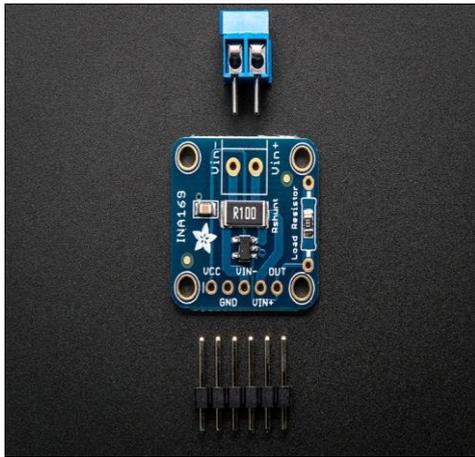


Photo du capteur dans la réalité

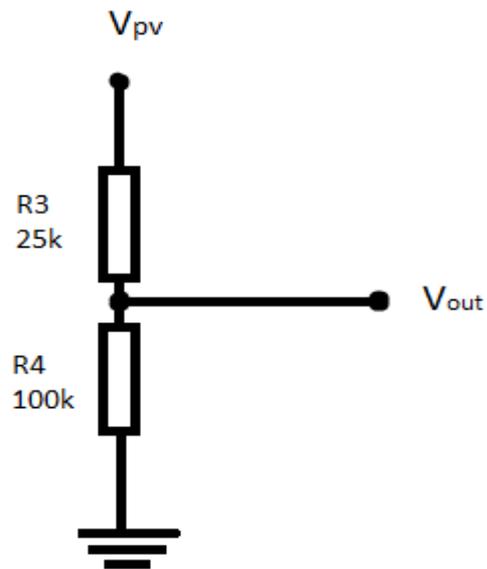
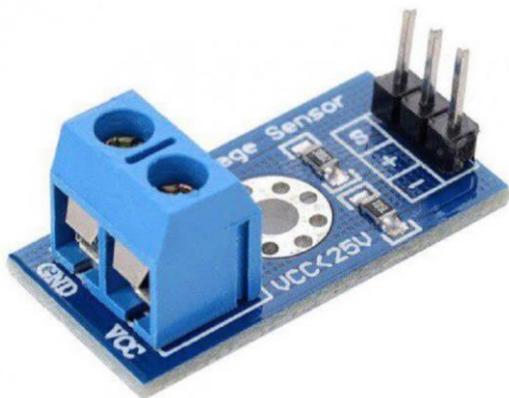
## Annexe E

## Capteur de tension

Le capteur de tension est un élément essentiel dans notre circuit car il nous aide à calculer la puissance fournie par le générateur photovoltaïque en donnant la valeur de tension. Vu que l'arduino ne supporte que 5 V de tolérance et notre circuit fournit jusqu'à 21 V.

Pour résoudre ce problème on a utilisé un diviseur de tension, ce dernier est un capteur qui a pour but d'introduire un intervalle de tension entrant à l'arduino  $V_{out}$  comprise entre 0 et 5 équivalent à l'intervalle de la tension du panneau  $V_{pv}$  à travers l'équation suivante. [16].

$$V_{out} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_{pv}$$



Diviseur de tension.

## Annexe F

## Choix du Transistor

Le transistor doit être dimensionné pour supporter le courant maximal délivré à la charge. Nous choisissons un MOSFET « IRFP250 ». Ce MOSFET peut fonctionner avec une tension  $V_{DS}$  jusqu'à 200V et une fréquence de 100KHz, et il peut supporter un courant  $I_D$  allant jusqu'à 33A.



IRFP250, SiHFP250

Vishay Siliconix

## Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY		
$V_{DS}$ (V)	200	
$R_{DS(on)}$ ( $\Omega$ )	$V_{GS} = 10\text{ V}$	0.085
$Q_g$ (Max.) (nC)	140	
$Q_{gs}$ (nC)	28	
$Q_{gd}$ (nC)	74	
Configuration	Single	

## FEATURES

- Dynamic  $dV/dt$  Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC

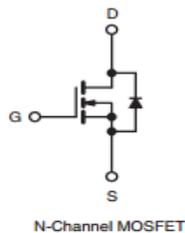
RoHS\*  
COMPLIANT

## DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220AB package is universally preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220AB devices. The TO-247AC is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.

TO-247AC

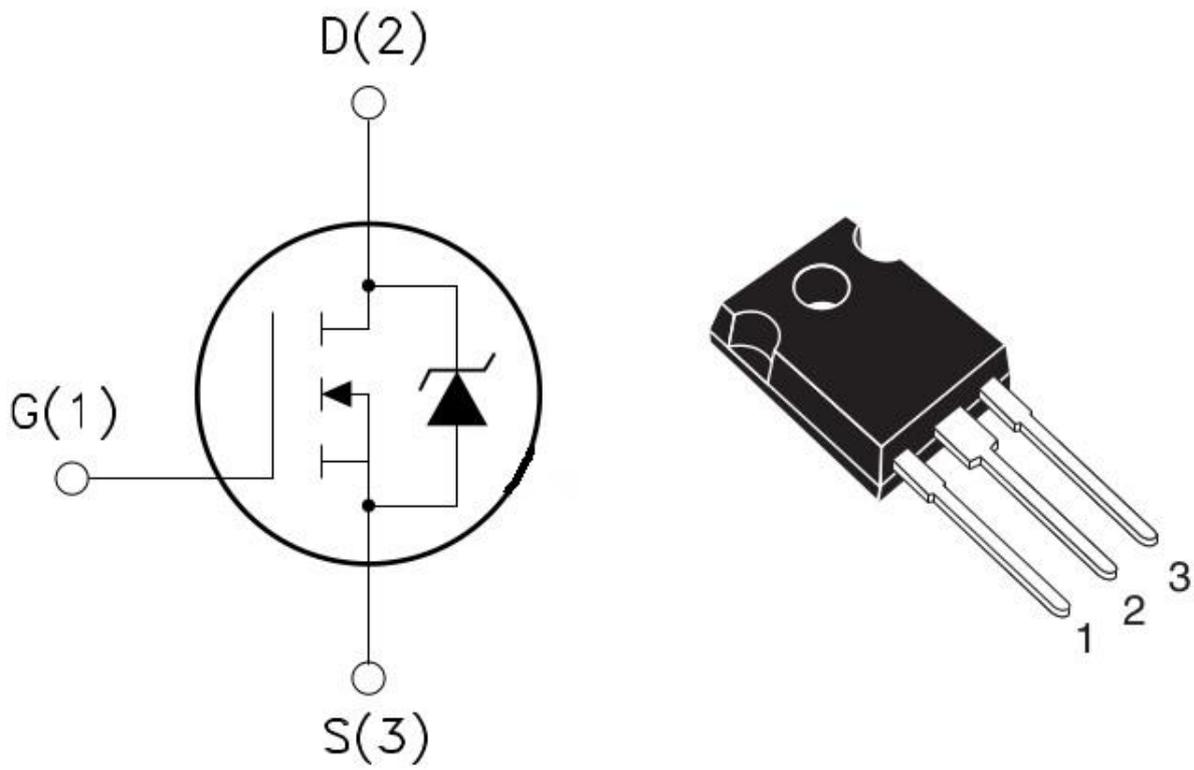


ORDERING INFORMATION	
Package	TO-247AC
Lead (Pb)-free	IRFP250PbF SiHFP250-E3
SnPb	IRFP250 SiHFP250

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted)			
PARAMETER	SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage	$V_{DS}$	200	V
Gate-Source Voltage	$V_{GS}$	$\pm 20$	V
Continuous Drain Current	$V_{GS}$ at 10 V	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	30
		$T_C = 100\text{ }^\circ\text{C}$	19
Pulsed Drain Current <sup>a</sup>		120	A
Linear Derating Factor		1.5	W/ $^\circ\text{C}$
Single Pulse Avalanche Energy <sup>b</sup>	$E_{AS}$	410	mJ
Repetitive Avalanche Current <sup>a</sup>	$I_{AR}$	30	A
Repetitive Avalanche Energy <sup>a</sup>	$E_{AR}$	19	mJ
Maximum Power Dissipation	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	$P_D$	190
Peak Diode Recovery $dV/dt$ <sup>c</sup>	$dV/dt$	5.0	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	- 55 to + 150	$^\circ\text{C}$
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s	300 <sup>d</sup>	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw	10	lbf · in
		1.1	N · m

## Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- $V_{DD} = 50\text{ V}$ , starting  $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $L = 683\text{ }\mu\text{H}$ ,  $R_\theta = 25\text{ }\Omega$ ,  $I_{AS} = 30\text{ A}$  (see fig. 12).
- $I_{SO} \leq 30\text{ A}$ ,  $dI/dt \leq 190\text{ A}/\mu\text{s}$ ,  $V_{DD} \leq V_{DS}$ ,  $T_J \leq 150\text{ }^\circ\text{C}$ .
- 1.6 mm from case.



Le brochage du MOSFET IRFP 250.

## Annexe G

## Choix de la Diode

International  
**IOR** Rectifier

18TQ...  
18TQ...S

SCHOTTKY RECTIFIER

18 Amp

$$I_{F(AV)} = 18\text{Amp}$$

$$V_R = 35 \text{ to } 45\text{V}$$

## Major Ratings and Characteristics

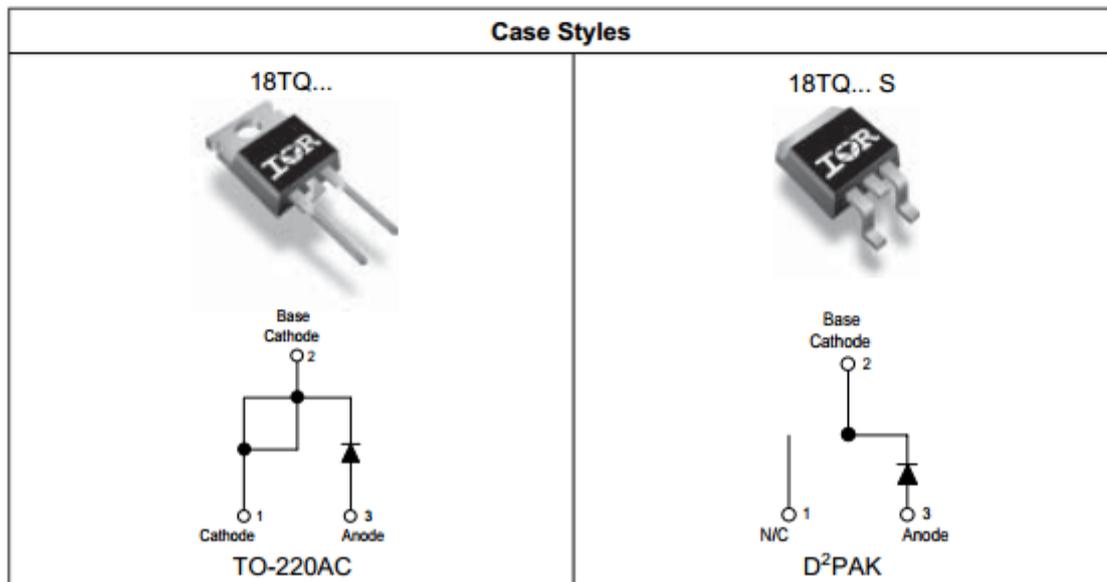
Characteristics	18TQ	Units
$I_{F(AV)}$ Rectangular waveform	18	A
$V_{RRM}$ range	35 to 45	V
$I_{FSM}$ @ $t_p = 5 \mu\text{s}$ sine	1800	A
$V_F$ @ 18 Apk, $T_J = 125^\circ\text{C}$	0.53	V
$T_J$ range	-55 to 175	$^\circ\text{C}$

## Description/Features

The 18TQ Schottky rectifier series has been optimized for low reverse leakage at high temperature. The proprietary barrier technology allows for reliable operation up to  $175^\circ\text{C}$  junction temperature. Typical applications are in switching power supplies, converters, free-wheeling diodes, and reverse battery protection.

- $175^\circ\text{C}$   $T_J$  operation
- High purity, high temperature epoxy encapsulation for enhanced mechanical strength and moisture resistance
- Low forward voltage drop
- High frequency operation
- Guard ring for enhanced ruggedness and long term reliability

## Case Styles



## Annexe H

### 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.

La valeur minimale de l'inductance est donnée par :

$$L > \frac{\alpha(1 - \alpha)^2}{2F} R$$

- $\alpha$  : Le rapport cyclique compris entre 0 et 1.  $\alpha = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}} = \frac{30 - 21}{30} = 0.3$
- F : la fréquence de commutation. F=50KHz
- R : la charge. R=70 $\Omega$

$$L > \frac{0.3(1 - 0.3)^2}{2 \times 50000} \times 70 = 0.735 \text{ nH}$$

Pour notre circuit on a choisi  $L = 20\text{mH}$  .



Une bobine.

## Annexe I

## Les Condensateurs

Nous plaçons en entrée comme en sortie des condensateurs chimiques pour filtrer les variations des tensions d'entrée et de sortie. Les valeurs des capacités sont calculées en fonction de l'ondulation voulues ainsi que des grandeurs moyennes désirées

$$C > \frac{\alpha}{R \times F \times \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right)}$$

- $\alpha$  : Le rapport cyclique compris entre 0 et 1.  $\alpha = \frac{V_{out}-V_{in}}{V_{out}} = \frac{30-21}{30} = 0.3$
- F : la fréquence de commutation. F=50KHz
- R : la charge. R=70 $\Omega$
- $\Delta V_o$  : l'ondulation voulue.  $\Delta V_o = 0.5$
- $V_o$  : la tension qu'on veut filtrer.

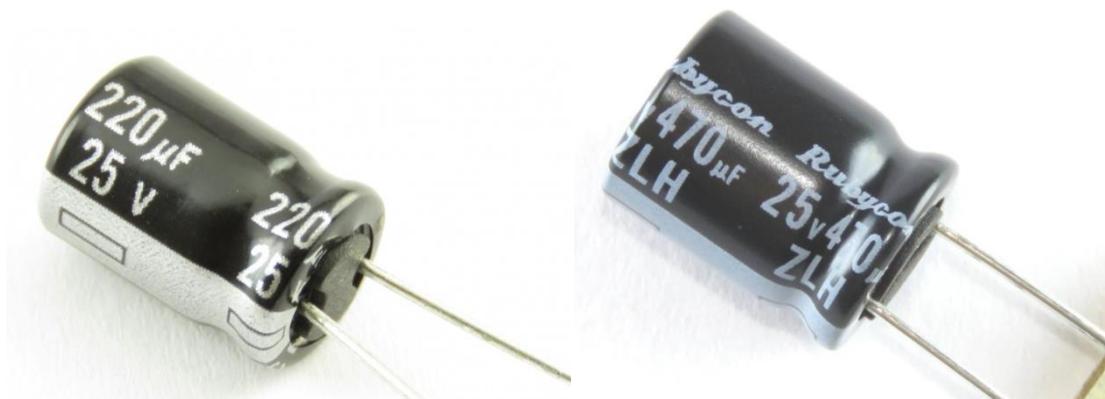
$$C1 > \frac{0.3}{70 \times 100000 \times \left(\frac{0.5}{21}\right)} = 1.8nF$$

$$C2 > \frac{0.3}{70 \times 100000 \times \left(\frac{0.5}{30}\right)} = 2.57nF$$

Les valeurs des condensateurs que nous utiliserons sont :

C1=220uF

C2=470uF



Les deux capacités choisies



Le panneau solaire (vpD7162891)

## Annexe J

```

const int wave = 5;
void setup() {
  pinMode (wave, OUTPUT);
}

void loop() {
digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (80);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (720);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (160);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (640);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (240);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (650);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (320);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (480);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (400);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (400);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (650);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (240);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (680);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (160);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (720);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (80);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (2560);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (4);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (800);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (80);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (720);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (160);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (680);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (240);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (650);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (400);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (400);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (480);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (320);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (240);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (650);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (640);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (240);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (640);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (160);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (720);
  digitalWrite (wave, HIGH);
  delayMicroseconds (80);
  digitalWrite (wave, LOW);
  delayMicroseconds (2682);
}

```