

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D' ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseaux électriques

*Présenté par*

**HADJERAS Mouloud**

**KHALES Aissa**

Thème

## Etude et dimensionnement d'un convertisseur dédié aux systèmes photovoltaïques

*Mémoire soutenu publiquement le 06 / 07 / 2017. Devant le jury composé de :*

**M Nabil MEZZAI**

M C B, UMMTO, Président.

**M Said AISSOU**

M A B, UMMTO, Encadreur.

**M Djamel ZIANE**

M C B, UMMTO, Examineur.

**M Ahmed NAHI**

M A A, UMMTO, Examineur.

2016 / 2017

*Avant tout nous remercions ALLAH  
de nous avoir donné la force et le courage.*

*Nos vifs remerciements vont à l'encontre de notre encadreur Monsieur Said  
AISSOU, pour sa grande disponibilité lors de nos différentes sollicitations et  
ses précieux conseils pour l'élaboration de ce projet. Nous remercions le  
président et les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en examinant  
notre travail*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous ceux et celles qui ont  
contribué de près ou de loin à l'élaboration et la finalisation de ce mémoire.*

The background features a white page with three blue circular elements of varying sizes. Each circle is composed of concentric rings in different shades of blue, creating a 3D effect. Two thin, light blue lines intersect at a point in the upper left quadrant, forming a V-shape that frames the central text. The text is centered and written in a bold, black, italicized serif font.

*Table des  
matières*

***Introduction générale*** ..... 1

***Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque***

I.1 Introduction .....3

I.2 Les énergies renouvelables.....3

    I.2.1 L'énergie éolienne .....3

    I.2.2 L'énergie hydraulique .....4

    I.2.3 L'énergie de la biomasse .....5

    I.2.4 L'énergie solaire .....6

        I.2.4.1 L'énergie solaire thermique .....6

I.3 L'énergie solaire photovoltaïque .....6

    I.3.1 Histoire .....7

    I.3.2 Pourquoi le soleil ? .....8

    I.3.3 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....8

I.4 La cellule photovoltaïque .....9

    I.4.1 L'effet photovoltaïque .....10

    I.4.2 Matériau semi-conducteur .....10

    I.4.3 La jonction PN .....11

    I.4.4 Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque .....13

        I.4.4.1 Courant de court-circuit.....13

        I.4.4.2 Tension de circuit ouvert .....13

        I.4.4.3 Influence de l'ensoleillement sur la cellule photovoltaïque .....13

        I.4.4.4 Influence de la Température sur la cellule photovoltaïque .....14

    I.4.5 Types de cellules.....14



---

II.4 Simulation du module photovoltaïque .....	33
II.4.1 Bloc de simulation du module photovoltaïque sous MATLAB/Simulink .....	34
II.4.2 Influence de l'ensoleillement.....	34
II.4.3 L'influence de la température.....	37
II.5 Commande de maximisation de puissance .....	39
II.5.1 Principe de la maximisation de puissance .....	40
II.5.2 Les méthodes de maximisation de puissance MPPT.....	42
II.5.2.1 Les méthodes indirectes .....	42
II.5.2.1.1 Méthode de la tension de circuit ouvert.....	42
II.5.2.1.2 Tension de court circuit .....	43
II.5.2.2 Les méthodes directes .....	43
II.5.2.2.1 La méthode incrémentation de la conductance.....	43
II.5.2.2.2 La méthode Perturbe & Observé ( <i>P&amp;O</i> ) .....	46
II.6 Conclusion .....	48

**Chapitre III :**

***Les convertisseurs statiques***

III.1. Introduction.....	49
III.2. Les différents convertisseurs .....	49
III.2.1. Les convertisseurs DC/AC (Onduleur).....	50
III.2.1.1. Principe de fonctionnement d'un onduleur.....	50
III.2.1.1.1. Onduleur Monophasé .....	50
III.2.1.1.1.1. Onduleur monophasé en demi-pont .....	50
III.2.1.1.1.2. Onduleur monophasé en pont (Pont H).....	51
III.2.1.1.2. Onduleur triphasée .....	52
III.2.2. Le convertisseur DC-DC (Hacheur) .....	53

---

III.2.2.1. Convertisseur Buck (Hacheur série).....	53
III.2.2.2. Le convertisseur Buck-Boost (hacheur série et parallèle).....	54
III.2.2.3. Le convertisseur Boost (Hacheur parallèle).....	55
III.2.2.3.1. Principe de fonctionnement.....	56
III.3. Modélisation du convertisseur boost (hacheur parallèle).....	57
III.3.1. Principe de fonctionnent.....	58
III.4. Dimensionnement des composants de Hacheur boost.....	60
III.4.1. Dimensionnement de l'inductance.....	60
III.4.1.1. Le choix du tore.....	61
III.4.1.2. Calcul de l'inductance L.....	61
III.4.1.3. Calcul du nombre de spire.....	62
III.4.2. Dimensionnement du condensateur de filtrage.....	64
III.4.2.1. Calcul de la capacité C.....	64
III.4.3. Choix des composant électronique.....	64
III.4.3.1. Choix de la Diode.....	64
III.4.3.2. Choix du transistor MOSFET.....	65
III.5. Evaluation des performances du hacheur survolteur(Boost).....	65
III.5.1. Simulation avec le logiciel PSIM.....	65
III.5.2. Discussion et résultats.....	68
III.6. Conclusion.....	69

**Chapitre IV :**

**Commande P.O d'un système PV**

IV.1. Introduction.....	70
IV.2. Description du système étudié.....	70
IV.2.1. Paramètres du système étudié.....	71

IV.3. Simulation à paramètres constants .....	71
IV.3.1. Test N°1 : Pour un faible ensoleillement .....	72
IV.3.2. Test N°2 : Pour un moyen ensoleillement .....	73
IV.3.3. Test N°3 : Pour un fort ensoleillement .....	74
IV.4. Simulation à paramètres variables.....	76
IV.5. Conclusion .....	77
 <b>Conclusion générale</b> .....	 78

The background features a white page with three blue circular motifs. Each motif consists of three concentric circles: a dark blue inner circle, a medium blue middle ring, and a light blue outer ring. The circles are arranged vertically, with the largest at the top, a smaller one in the middle, and another large one at the bottom. Two thin, light blue lines intersect at the top left and extend diagonally across the page, framing the central text.

***Nomenclatures  
et abréviations***

## *Nomenclatures et Abréviations*

<b><i>MPPT</i></b>	Maximum Power Point Tracking.
<b><i>PPM</i></b>	Point de puissance maximal (PPM).
<b><i>GPV</i></b>	Générateur photovoltaïque.
<b><i>PV</i></b>	Photovoltaïque.
<b><i>eV</i></b>	Electron Volt.
<b><i>Si</i></b>	Silicium.
<b><i>V<sub>co</sub></i></b>	Tension à circuit ouvert.
<b><i>I<sub>cc</sub></i></b>	Courant de court-circuit.
<b><i>E</i></b>	Ensoleillement.
<b><i>T</i></b>	Température absolue de la cellule en (kelvin).
<b><i>STC</i></b>	Standards Tests Conditions
<b><i>N<sub>s</sub></i></b>	Nombre de cellules connectées en séries.
<b><i>N<sub>p</sub></i></b>	Nombre de cellules connectées en parallèles.
<b><i>DC</i></b>	Direct Current
<b><i>AC</i></b>	Alternative current
<b><i>I<sub>ph</sub></i></b>	Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident);
<b><i>V<sub>ppm</sub></i></b>	Tension du point de puissance maximale;
<b><i>I<sub>ppm</sub></i></b>	Courant du point de puissance maximale.
<b><i>R<sub>s</sub></i></b>	La résistance série;
<b><i>R<sub>p</sub></i></b>	La résistance parallèle.
<b><i>V<sub>t</sub></i></b>	Tension thermique.

$N$	Facteur d'idéalité de la photopile.
$k$	Constant de Boltzmann ( $1,38.10^{-23}$ J/K).
$q$	Charge élémentaire de l'électron ( $1,6.10^{-19}$ C).
$I_o$	Courants de saturation des diodes.
$I_d$	Le courant circulant dans la diode.
$I_{ph}$	Le photo-courant.
$A$	Coefficient d'idéalité de la cellule ou du module photovoltaïque.
$P_1, P_2,$ $P_3, P_4$	Paramètres constants du module photovoltaïque.
$E_g$	Energie du gap ( $1.76.10^{-19}$ eV).
$I_{pv}$	Courant fourni par la cellule (A) ;
$V_{pv}$	Tension aux bornes de la cellule (V);
$P_{pv}$	Puissance de la cellule photovoltaïque (W).
$k_v$	Correspondant à un facteur de tension
$G$	La conductance.
$\Delta G$	L'incrément de la conductance.
$S_1$ et $S_2$	Interrupteurs de puissance.

The page features three decorative blue circles of varying sizes, each composed of concentric rings in different shades of blue. Two thin, light blue lines intersect at the center, forming an 'X' shape that divides the page into four quadrants. The circles are positioned in the top-right, center, and bottom-right areas.

# *Liste des figures*

**Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque**

**Figure I.1** : Ferme éolienne Kabertène (Adrar) .....4

**Figure I.2** : Schéma d'une centrale hydraulique .....4

**Figure I.3** : Source de la biomasse .....5

**Figure I.4** : Exemple d'un chauffe-eau solaire .....6

**Figure I.5** : Principe de l'énergie solaire photovoltaïque .....7

**Figure I.6** : Schéma d'une cellule photovoltaïque .....10

**Figure I.7** : La caractéristique (Courant I - Tension V) inverse .....12

**Figure I.8** : La caractéristique (Courant I - Tension V) .....12

**Figure I.9** : Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques d'une cellule PV .....13

**Figure I.10** : Influence de la température sur la caractéristique d'une cellule photovoltaïque .....14

**Figure I.11** : Cellule monocristalline .....15

**Figure I.12** : Cellule poly-cristalline .....15

**Figure I.13** : Cellule amorphe .....16

**Figure I.14** : Caractéristique courant-tension de ( $N_s$ ) cellule série .....17

**Figure I.15** : Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule parallèle .....18

**Figure I.16** : Modules photovoltaïques .....19

**Figure I.17** : Un module photovoltaïque avec une cellule 'hot spot' .....19

**Figure I.18** : Association série-parallèle, avec des diodes By-pass - Anti-retour .....20

**Figure I.19** : Champ photovoltaïque .....20

**Figure I.20** : Composants d'un champ de modules photovoltaïque .....21

**Figure I.21** : Système hybride (photovoltaïque-éolienne) .....22

**Figure I.22** : Installation de production électrique raccordée au réseau .....23

**Figure I.23** : Système photovoltaïque autonome .....24

***Chapitre II : Etude et modélisation d'une cellule photovoltaïque***

**Figure II.1** : Schéma équivalent du modèle électrique idéale d'une cellule photovoltaïque.....27

**Figure II.2** : Schéma équivalent du modèle à deux diodes .....30

**Figure II.3** : Schéma équivalent du modèle à une diode .....32

**Figure II.4** : Schéma bloc du module photovoltaïque .....34

**Figure II.5** : Caractéristiques **courant-tension** avec ensoleillement variable.....35

**Figure II.6** : Caractéristique puissance-tension avec ensoleillement variable.....35

**Figure II.7** : Caractéristiques courant-tension avec variation de température .....37

**Figure II.8** : Caractéristiques puissance-tension avec variation de température .....37

**Figure II.9** : Principe d'une connexion avec un étage d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et une charge .....39

**Figure II.10** : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale .....41

**Figure II.11** : Trajectoire par Incrémentation de la Conductance.....44

**Figure II.12** : Algorithme (*MPPT*) basé sur la méthode Incrément de Conductance .....45

**Figure II.13** : Schéma de converge vers le (*PPM*) par (*P&O*) .....46

**Figure II.14** : Algorithme (*MPPT*) a base de la méthode (*P&O*).....47

***Chapitre III : Les convertisseurs statiques***

**Figure III.1** : Les différents types de convertisseurs statiques .....49

**Figure III.2** : Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont .....51

**Figure III.3** : Schéma de principe d'un onduleur monophasé en pont.....52

**Figure III.4** : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé en Pont .....52

**Figure III.5** : Convertisseur Buck (Hacheur sérié) .....53

<b>Figure III.6 :</b> Signaux typique de convertisseur Buck.....	54
<b>Figure III.7 :</b> Convertisseur Buck-Boost .....	54
<b>Figure III.8 :</b> Schéma synoptique d'un hacheur survolteur « Boost ».....	55
<b>Figure III.9 :</b> Signaux typique de convertisseur Boost.....	57
<b>Figure III.10 :</b> Schéma électrique du hacheur à la période $[0, \alpha T]$ .....	58
<b>Figure III.11 :</b> Schéma électrique du hacheur à la période $[\alpha T, T]$ .....	59
<b>Figure III.12 :</b> Allure du courant de la bobine.....	61
<b>Figure III.13 :</b> Logiciel utilisé pour le calcul du nombre de spires .....	63
<b>Figure III.14 :</b> Caractéristiques des interrupteurs de puissance .....	65
<b>Figure III.15 :</b> Bloc de simulation de hacheur Boost .....	66
<b>Figure III.16 :</b> Allure de la tension de sortie pour $\alpha = 0.3$ .....	66
<b>Figure III.17 :</b> Allure du courant de sortie $\alpha = 0.3$ .....	66
<b>Figure III.18 :</b> Allure de la tension de sortie pour $\alpha = 0.5$ .....	67
<b>Figure III.19 :</b> Allure du courant de sortie $\alpha = 0.5$ .....	67
<b>Figure III.20 :</b> Allure de la tension de sortie pour $\alpha = 0.8$ .....	67
<b>Figure III.21 :</b> Allure du courant de sortie pour $\alpha = 0.8$ .....	68

#### ***Chapitre IV : Commande P.O d'un système PV***

<b>Figure IV.1 :</b> Schéma synoptique du système photovoltaïque global .....	71
<b>Figure IV.2 :</b> Réponse de la puissance pour un faible ensoleillemnt.....	72
<b>Figure IV.3 :</b> Caractéristique puissance-tension à faible ensoleillement.....	73
<b>Figure IV.4 :</b> Réponse de la puissance pour un moyen ensoleillement .....	73
<b>Figure IV.5 :</b> Caractéristique puissance-tension à un moyen ensoleillement.....	74
<b>Figure IV.6 :</b> Réponse de la puissance pour un fort ensoleillement .....	74
<b>Figure IV.7 :</b> Caractéristique puissance-tension pour un fort ensoleillement .....	75

**Figure IV.8** : Profils ensoleillements et températures en fonction du temps.....76

**Figure IV.9** : Réponse de la puissance pour un ensoleillement et température variables .....77

The background features a white page with a large, light blue 'V' shape. Inside the 'V', there are three blue circles of varying sizes, each composed of concentric circles in different shades of blue. The text is centered within the 'V' shape.

*Liste des  
tableaux*

**Tableau II.1** : Valeurs des paramètres du module utilisé .....33

**Tableau II.2** : Comparaison des résultats de simulation avec variation d'ensoleillement.....36

**Tableau II.3** : Comparaison des résultats de simulation avec variation de la température .....38

**Tableau IV.1** : Paramètres du système étudié .....71

**Tableau IV.2** : Paramètres de simulation sous conditions constantes .....72

**Tableau IV.3** : Les différentes valeurs obtenues lors de la simulation.....75

The background features a large, light blue triangle pointing downwards, defined by thin lines. Inside this triangle are three concentric circles in shades of blue, arranged vertically. The top circle is the largest, the middle one is the smallest, and the bottom one is the largest. The text is centered within the triangle.

***Introduction  
générale***

### **Introduction générale**

La production d'énergie est un défi de grandes importances pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrielles ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. L'énergie a trois origines, fossile, fissile et renouvelable. La plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Ces ressources provoquent des émissions de gaz à effet de serre et deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation [1].

Les énergies renouvelables présentent l'avantage d'être inépuisables et moins polluantes. Par énergies renouvelables, nous entendons des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques, selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

L'énergie photovoltaïque, basée sur la conversion du rayonnement électromagnétique solaire en électricité, représente l'une des ressources énergétiques renouvelables à part entière [1]. Même si cette ressource est maintenant de mieux en mieux reconnue en tant que source potentielle d'énergie, cela n'a pas été facile face aux nombreux préjugés existants sur ce sujet. On a reproché par exemple à l'énergie solaire d'être intermittente (jour, nuit, saison), de ne pas être fiable et de dépenser plus d'énergie pour la conception d'un panneau solaire qu'il ne peut en fournir durant toute sa durée de vie. Ces affirmations sont aujourd'hui dénigrées par les progrès techniques accomplis sur les cellules photoélectriques également sur le traitement de l'énergie. Actuellement, la plupart des panneaux photovoltaïques produisent largement plus d'énergie au cours de leur vie que l'énergie nécessaire à leur production. Les progrès de fabrication ont été considérables ces dernières années permettant d'avoir des fonctionnements de générateurs photovoltaïques garantis au-delà de 25 ans avec en plus des coûts de fabrication qui tendent à baisser quand on ramène le prix de l'installation au prix du Watt Crête [2], [3].

Malgré cela, il reste encore quelque progrès à faire dans ce domaine. En effet, la production d'électricité à partir de l'énergie photovoltaïque dépend fortement des conditions météorologiques variables (ensoleillements et températures) qui engendrent une production aléatoire. La génération d'énergie est certes garantie, mais se fait avec des pertes importantes de production et donc est plus chère que prévue. Ces différents constats ont motivé différents travaux de recherche pour rendre viables des sources photovoltaïques. La littérature est très prolifique dans ce domaine en émergence et propose régulièrement une grande quantité de commandes spécifiques qui effectuent une recherche de point de puissance maximale (*MPPT*) lorsque le GPV est couplé à une charge à travers un convertisseur statique. La difficulté actuelle est d'arriver à connaître les performances exactes de ces nouvelles commandes et d'en faire le choix [4].

L'objectif principal de ce manuscrit est l'étude et le dimensionnement d'un convertisseur dédié aux systèmes photovoltaïques.

Pour atteindre notre objectif, nous avons scindé notre mémoire en quatre chapitres :

Après une introduction générale portant sur l'utilité d'exploitation de l'énergie photovoltaïque, le premier chapitre présente des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque à savoir (mode de fonctionnement, matériaux intervenant dans la fabrication des cellules photovoltaïques).

La modélisation d'un générateur photovoltaïque sous différentes conditions d'ensoleillements et de températures, ont fait l'objet du travail présenté dans le deuxième chapitre. Ensuite, nous allons présenter les structures de commande les plus utilisées pour l'optimisation d'un système photovoltaïques. Dans ce contexte, deux types de structures selon le mode de recherche direct ou indirect sont rappelés.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter, les convertisseurs statiques les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques, ainsi que la modélisation et la simulation du convertisseur élévateur de tension (hacheur Boost).

Le chapitre quatre, sera consacré aux résultats de simulation. Nous exposerons les résultats de simulation d'un système photovoltaïque avec commande de maximisation de puissance, sous différentes conditions méthodologiques.

Une conclusion générale ainsi que des perspectives clôturent ce travail.



The background features several decorative elements: a large blue circle with a white ring and a smaller blue circle inside, located in the top right; a smaller version of the same design in the middle right; and a large blue circle with a white ring and a smaller blue circle inside, located in the bottom right. Two thin blue lines cross the page diagonally, one from the top left to the middle right, and another from the top right to the bottom right.

CHAPITRE

---

1

*Généralités sur l'énergie  
photovoltaïque*

## I.1 Introduction

Dans le domaine énergétique, on distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil, elles sont disponibles indéfiniment.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par la définition des énergies renouvelables ensuite on s'intéresse à l'énergie solaire, la construction des cellules photovoltaïques et les matériaux de leurs réalisations, on termine cette partie par la présentation des différents types de cellules photovoltaïques ainsi que leurs principes de fonctionnement.

## I.2 Les énergies renouvelables

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement **le soleil** (rayonnement), mais aussi **la lune** (marée) et **la terre** (énergie géothermique). On distingue plusieurs types d'énergies renouvelables [5].

### I.2.1 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie descendante du moulin à vent du moyen âge. La première éolienne a été mise en service en France à Dunkerque en 1990. Cette énergie est développée avec l'éolienne électrique [6].

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui provient du vent. Le soleil chauffe inégalement la terre, le déplacement de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère donne naissance à une énergie cinétique appelée, le vent.

Une éolienne est un aérogénérateur, qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [7].

La figure (I.1) représente une ferme d'éolienne, centrale de production d'électricité [8].



Figure I.1 : Ferme éolienne Kabertène (Adrar) [8].

### I.2.2 L'énergie hydraulique

L'énergie hydroélectrique exploite l'énergie potentielle des flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins, etc.). L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur.

Un cinquième des besoins en énergie totaux de la terre sont couverts par l'énergie hydraulique. Elle est produite dans le monde entier par environ 45.000 barrages [5].

Chaque année, environ 3 500 TéraWatts-heure d'électricité sont produits dans le monde à partir de l'énergie hydraulique [6].

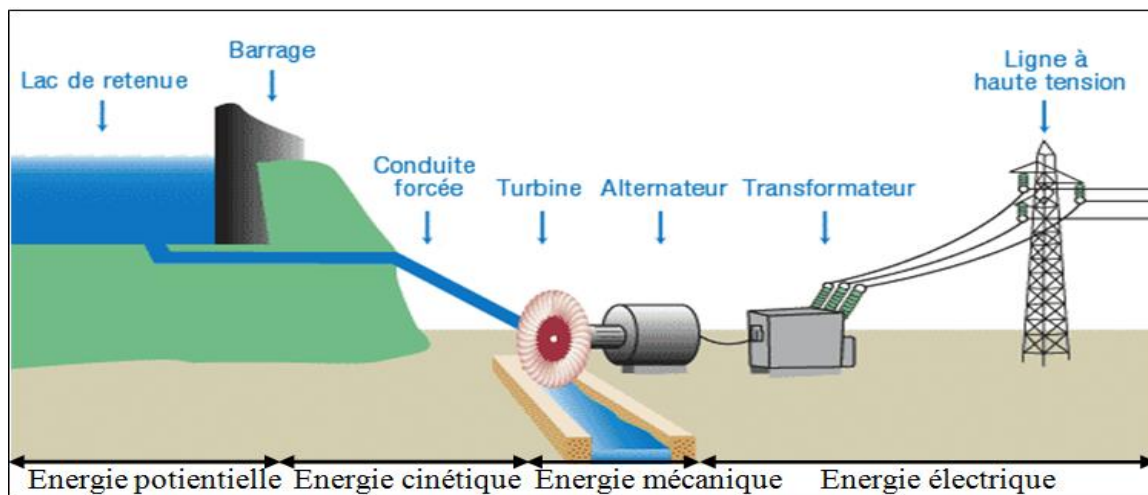


Figure I.2 : schéma d'une centrale hydraulique [5].

### I.2.3 L'énergie de la biomasse

Dans le domaine de l'énergie, le terme de biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie.

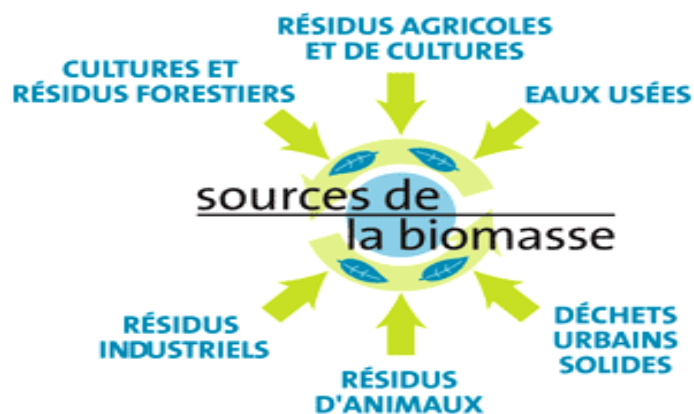
Elle comprend trois familles principales :

a) **Les biocarburants** : un biocarburant est un carburant produit à partir de :

- Matériaux organiques : Huile végétale carburant (l'huile de colza, l'huile de tournesol).
- Bioéthanol : fabriquer à partir du saccharose (betterave, canne à sucre...) ou de l'amidon (blé, maïs, etc.).

b) **Les bois énergie ou biomasse solide** : le bois peut être considéré comme une énergie renouvelable tant que le volume prélevé ne dépasse pas l'accroissement naturel de la forêt. 1 mètre cube, pour un contenu énergétique de 1 500 à 2 000 kWh.

c) **Biogaz ou Méthanisation** : la méthanisation est un procédé biologique de transformation de la matière organique en biogaz, par l'action de bactéries en absence de l'oxygène : on parle de «digestion anaérobie» [5].



**Figure I.3** : Sources de la biomasse.

Les centrales à biomasse sont mises en marche quand la demande d'électricité est élevée afin d'assurer un approvisionnement en énergie d'appoint.

## I.2.4 L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le soleil sous forme de lumière et de chaleur. L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen des capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, c'est l'énergie électrique photovoltaïque.

### I.2.4.1 L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique provient de la chaleur transmise par le soleil par rayonnement, dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production du froid, etc.).

La figure (I.4) représente un exemple de chauffe eau solaire [9].

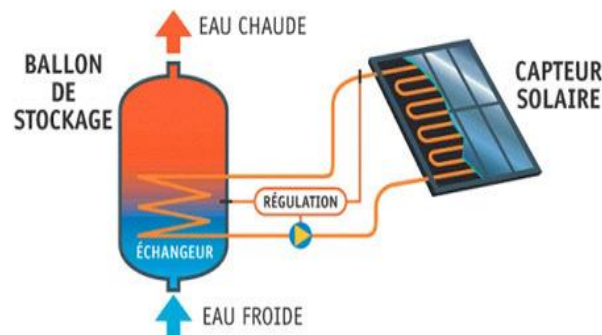


Figure I.4 : Exemple d'un chauffe-eau solaire [9].

## I.3 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque [25], [26].

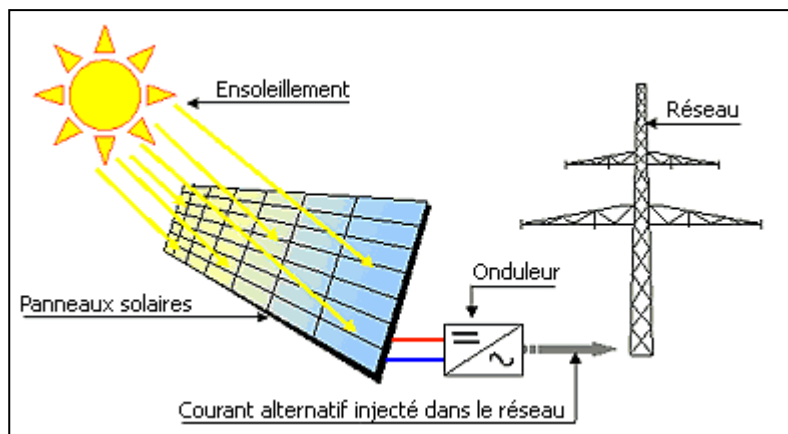


Figure I.5 : Principe de l'énergie solaire photovoltaïque.

### I.3.1 Histoire

Le soleil se trouve à la base de toutes les énergies. Il produit la chaleur et la lumière nécessaires à la vie sur terre. Ce rayonnement solaire est utilisé pour chauffer et pour produire de l'électricité.

La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible.

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français **Antoine Becquerel** (1788 - 1878) en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (nom du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité).

#### Quelques dates importantes [9], [18]

**1954** : Une cellule photovoltaïque pour l'industrie spatiale est mise au point.

**1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

**Vers 1970** : Des applications autonomes terrestre apparaissent (phare, bouée, balise, pompes solaire).

**1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie.

1995 : premières installations photovoltaïques raccordées au réseau en Allemagne et au Japon.

### I.3.2 Pourquoi le soleil ?

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300 000 km/h, les rayons du soleil mettent donc environ 8minutes à nous parvenir [27].

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. c'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0,22 et 10 microns ( $\mu\text{m}$ ). Sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent, L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9 % dans la bande des ultraviolets ( $< 0,4\mu\text{m}$ ).
- 47 % dans la bande visible ( $0,4$  à  $0,8 \mu\text{m}$ ).
- 44 % dans la bande des infrarouges ( $> 0,8\mu\text{m}$ ) [29].

L'Algérie avec sa situation géographique, occupe une position privilégiée dans l'exploitation d'énergie solaire avec une durée d'ensoleillement qui varie de 2650 heures /an dans le nord et a 3500 heures/an dans le sud, l'une des plus élevées au monde, en développant cette énergie notre pays pourrait couvrir son besoin d'énergie ainsi que celui de tout le nord africain ce qui engendrerait des profits considérables provenant de la revente de cette énergie [18].

### I.3.3 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

#### Avantages [28]

- L'énergie photovoltaïque peut être installée partout, même en ville.
- L'énergie photovoltaïque est renouvelable et gratuite.
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voire de générer des revenus.
- Le contrat d'achat est conclu pour une durée de 25 ans.

- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.
- L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de son propriétaire.
- Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

### Inconvénients [28]

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante.
- Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans).

## I.4 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque ou photopile (composant optoélectronique) ; est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique par un processus appelé « effet photovoltaïque » [20].

La cellule photovoltaïque élémentaire est un générateur d'électricité de très faible puissance. Une cellule élémentaire de quelque dizaine de centimètres carrés délivre au maximum quelque watt [22].

La cellule photovoltaïque (Figure I.6) est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur, absorbant l'énergie lumineuse et la transformant en courant électrique. Le rendement énergétique d'une cellule (PV) varie selon le matériau utilisé [20].

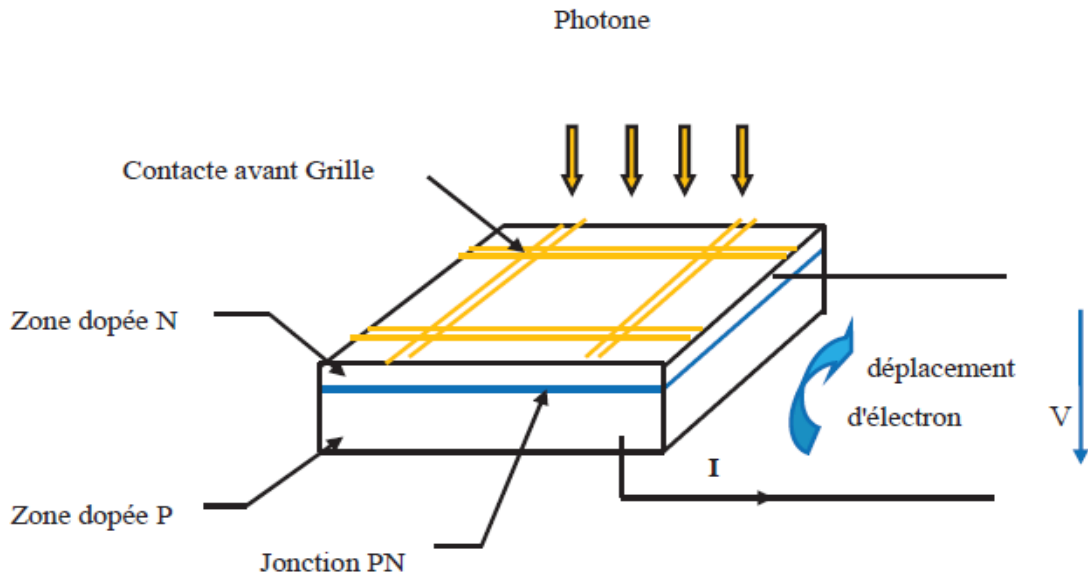


Figure I.6 : Schéma d'une cellule photovoltaïque [44].

### I.4.1 L'effet photovoltaïque

Il correspond à l'apparition d'une différence de potentiel entre les deux cotés d'une jonction semi-conducteur sous l'action d'une radiation lumineuse. En plaçant en série différents semi-conducteurs sensibles à la lumière, il y a apparition d'une polarité dans ce dispositif, en effet pour une longueur d'onde suffisamment courte, un photon ayant une énergie supérieure ou égale au gap du semi-conducteur, il pourra créer une paire électron-trou, une différence de potentiel apparaîtra aux bornes du semi-conducteur [20], [24].

### I.4.2 Matériau semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux.

Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

C'est l'énergie du "band gap", en électronvolts ( $eV$ ). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur qui est comprise entre  $1,0$  et  $1,8 eV$  pour les applications photovoltaïques.

Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule [23].

Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie du band gap vont libérer un électron négatif, laissant un "trou" positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique  $E$  de part et d'autre de la cellule.

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du "dopage" par des impuretés. On a deux types de dopage possible, dopage de type n (négatives) et dopage de type p (positif).

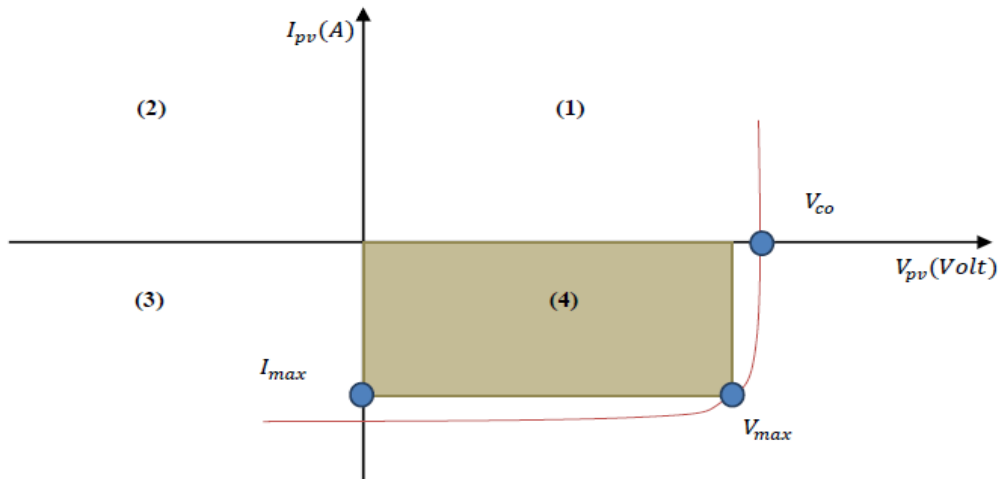
Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type n et type p) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libres (électrons et trous), un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque [23].

### I.4.3 La jonction PN

La jonction PN est un dispositif semi-conducteur constitué d'un cristal dont une partie a été dopée N et l'autre dopée P, les deux parties étant séparées par un plan dit de jonction. Si on sépare la jonction en deux parties et qu'on relie la région N au pôle négatif d'un générateur et la région P au Pôle positif (polarisation directe). Les électrons libres de la région N, ainsi que les trous Libres de la région P, vont vers la jonction, vu le sens de polarisation. Si les deux parties Sont en contact, un courant passe. Les électrons sont injectés dans la région P et les trous dans la région N. On dit qu'il y a injection de porteur minoritaires. Si l'on polarise la Jonction en sens inverse, les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-).

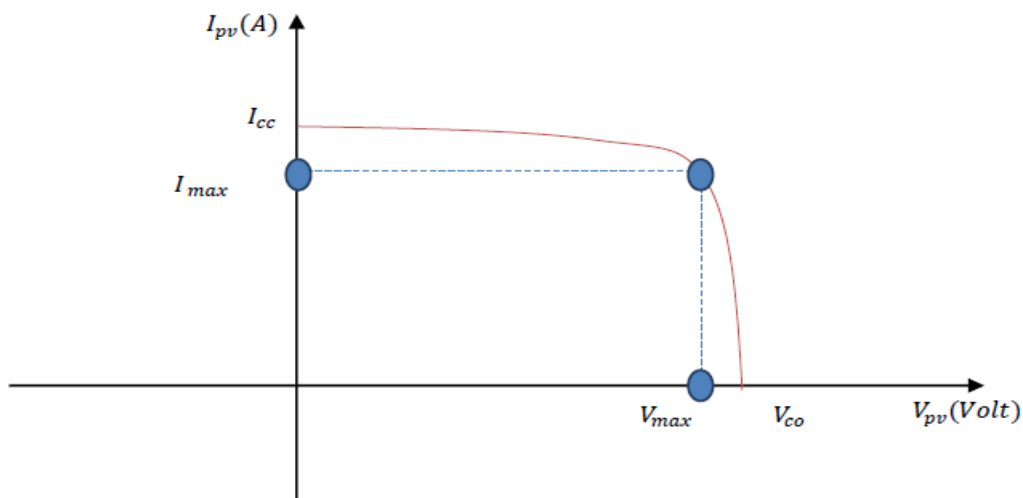
Si on soumet une jonction PN de faible épaisseur à un flux lumineux, des paires électron-trou sont créées par les photons dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite du matériau. Il en résulte une augmentation du courant inverse de saturation proportionnelle au flux lumineux. Physiquement, cet effet se traduit de deux manières Selon le quadrant de fonctionnement du dispositif : dans le 3ème quadrant, le système fonctionne en récepteur dont la résistance varie fortement avec l'ensoleillement, c'est la Photorésistance ; dans le 4ème

quadrant, le système fonctionne en générateur dont le courant de court-circuit est proportionnel à l'ensoleillement et dont la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe (0.5 à 0.8 Volts pour Si); c'est la cellule photovoltaïque à jonction PN [19].



**Figure I.7 :** La caractéristique (Courant  $I$  - Tension  $V$ ) inverse [22].

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser uniquement au quadrant (4), pour la réalisation des cellules photovoltaïques. Pour cela, nous allons représenter la caractéristique dans un nouveau repère  $I_{pv} = f(V_{pv})$  donné par la figure (I.8), où le courant de saturation inverse est compté positivement.  $I_{cc}$  Représente le courant de court-circuit et  $V_{co}$  la tension en circuit ouvert de la cellule photovoltaïque [21].



**Figure I.8 :** La caractéristique (courant  $I$  - tension  $V$ ) [22].

### I.4.4 Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque

A partir de la caractéristique courant-tension (Figure I.8) sous ensoleillement de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule.

#### I.4.4.1 Courant de court-circuit

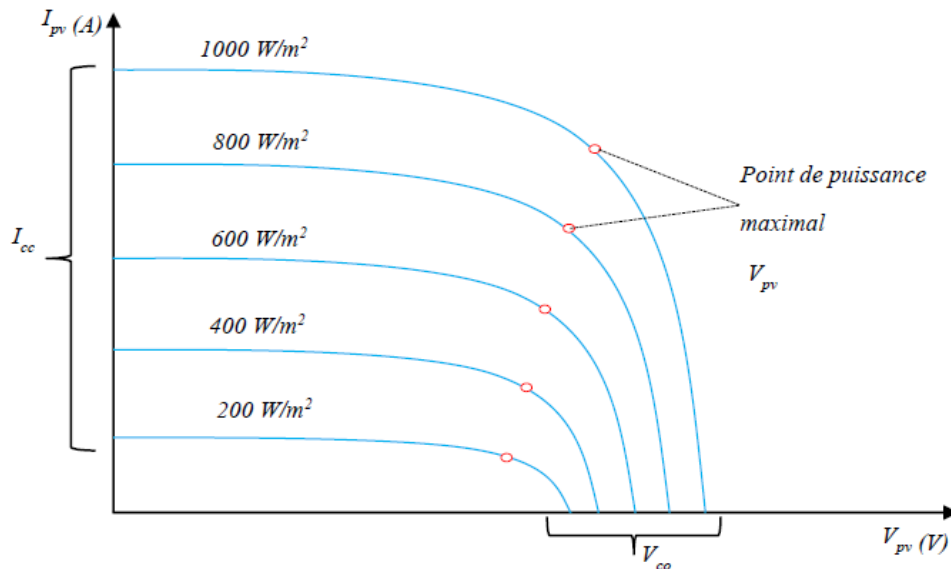
Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule, il croît linéairement avec l'ensoleillement de la cellule et dépend de la surface éclairée et de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [19].

#### I.4.4.2 Tension de circuit ouvert

Si l'on place une cellule sous une source lumineuse constante, sans aucune charge à ces borne, celle-ci va produire une tension continue d'environ **0,6 V**, appelée tension de circuit ouvert  $V_{co}$  ou à vide [19].

#### I.4.4.3 Influence de l'ensoleillement sur la cellule photovoltaïque

La figure (I.9) présente un exemple des caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour différents valeurs d'ensoleillement.



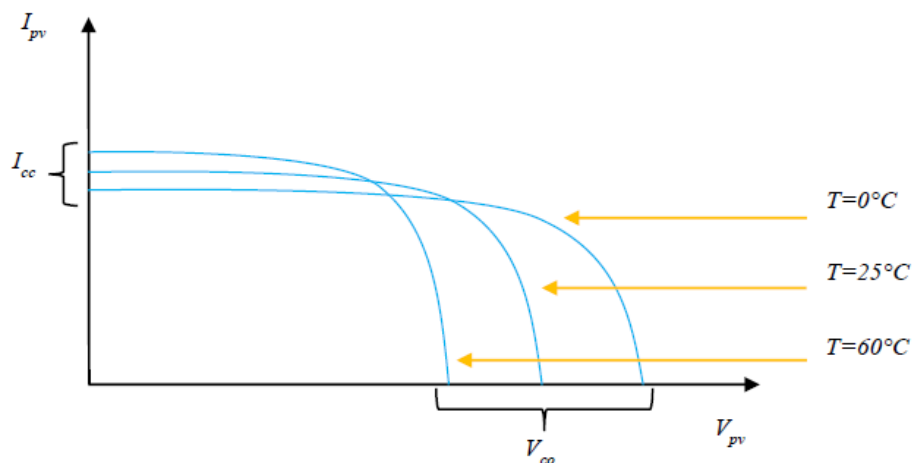
**Figure I.9 :** Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.

[22].

D'après les figures donner par [22], on constate que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension du circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement [22].

#### I.4.4.4 Influence de la Température sur la cellule photovoltaïque

La figure (I.10) présente un exemple de caractéristiques  $I_{pv}=f(V_{pv})$  pour différentes températures de fonctionnement a un ensoleillement constant de  $1000W/m^2$ .



**Figure I.10 :** Influence de la température sur la caractéristique d'une cellule photovoltaïque [22].

L'auteur dans [22] affirme que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue [22].

Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte.

#### I.4.5 Types de cellules

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. Aujourd'hui, la majorité des cellules photovoltaïques sont fabriqués à partir de **silicium cristallin** (monocristallin ou poly-cristallin) ou en **silicium amorphe**. Ces technologies coexistent sur le marché dans des proportions équivalentes depuis de nombreuses années malgré des prix et des rendements très différents [10].

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles.

Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes.

#### I.4.5.1 Les cellules monocristallines

C'est la première génération de photopiles. Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme et en forme octogonales [10], [11].

##### Avantages

- Durée de vie importante ( $\pm 30$  ans).
- Un taux de rendement jusqu'à 18 %.  
(23% en Laboratoire).

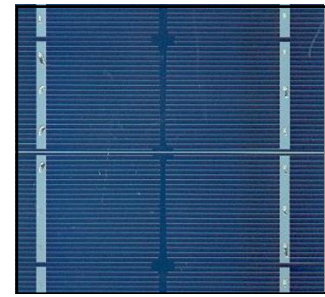


Figure I.11  
Cellule monocristalline

##### Inconvénients

- Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère.
- Rendement faible sous un faible ensoleillement.

#### I.4.5.2 Les cellules poly-cristallines

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, leurs forme est rectangulaire, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [11].

##### Avantages

- Coût de production moins élevé ; donc le meilleur marché que le monocristallin
- Durée de vie importante ( $\pm 30$  ans)

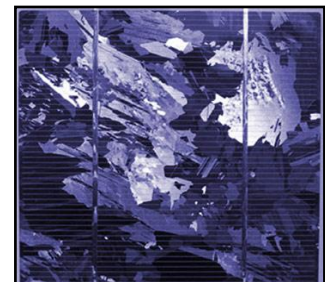


Figure I.12  
Cellule poly-cristalline

##### Inconvénient

- Rendement faible sous un faible ensoleillement, 11 à 13 % (18% en laboratoire).

### I.4.5.3 Les cellules amorphes

Les cellules photovoltaïques amorphes sont fabriquées avec un gaz de silicium. Ce gaz peut être projeté ensuite sur différents supports comme des plaques de verre, du plastique souple ou encore du métal, via un procédé de vaporisation sous vide. Les cellules sont de couleur gris foncé [12].

#### Avantages

- Il s'agit d'un type de cellule bon marché, que l'on retrouve dans la plupart des objets du quotidien fonctionnant à l'énergie solaire (calculatrice et montre solaire par exemple). Cette technologie est pratique car utilisable sur de nombreux supports et elle ne requiert pas beaucoup d'ensoleillement.
- Cout de production bien plus bas.

#### Inconvénients

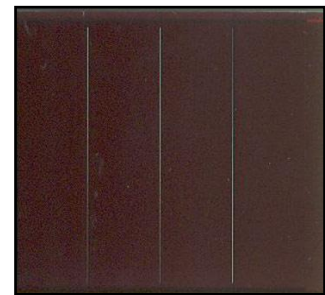
- Le rendement est faible (7 à 8 %).
- Rendement plus bas : 8 à 10 % (13% en laboratoire).
- Durée de vie des panneaux sont limitée à une dizaine d'année.

Notons également que de nouvelles technologies viennent concurrencer le silicium : il s'agit des couches minces. Parmi elles, les cellules *CIS*, *CIGS*, *HIT*, etc.).

### I.4.6 Association des cellules photovoltaïques

Dans la condition standard de test, la puissance maximale pour une cellule silicium ( $S_i$ ) de  $100 \text{ cm}^2$  tourne aux alentours de  $1,25 \text{ W}$ . Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes.

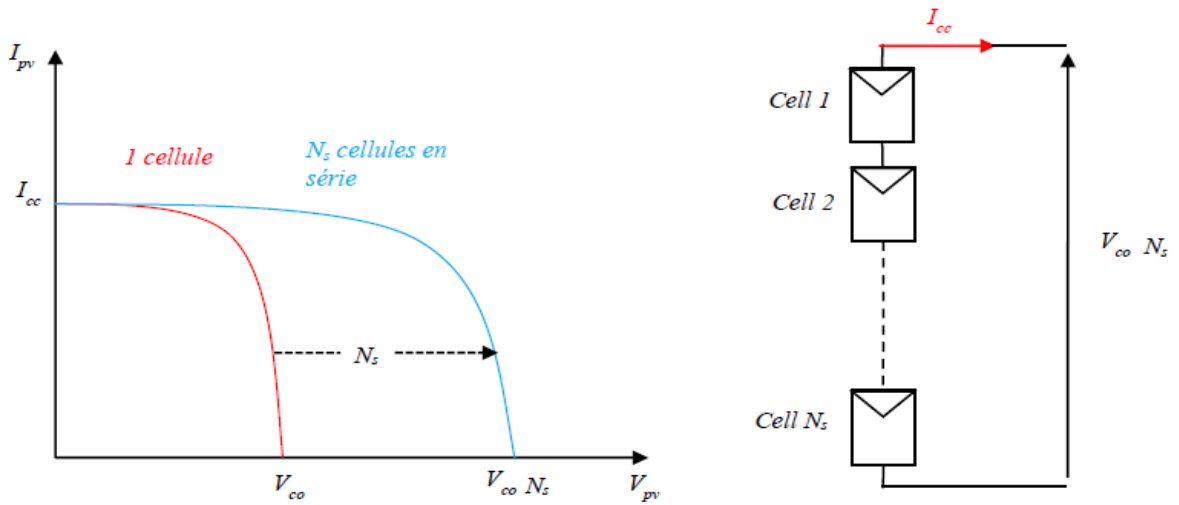
Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.



**Figure I.13**  
Cellule amorphe.

**I.4.6.1 Association en série**

Une association de ( $N_s$ ) cellule en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant d'association en série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation (I.1) résume la caractéristique électrique d'une association série de ( $N_s$ ) cellules [21].



**Figure I.14 :** Caractéristique courant-tension de ( $N_s$ ) cellule série [22].

Avec

$$V_{PV} = N_s * V_{co} \dots \dots \dots (I. 1)$$

$$I_{PV} = I_{cc} \dots \dots \dots (I. 2)$$

$V_{pv}$ : La tension aux bornes du module photovoltaïque de  $N_s$  cellules en série.

$I_{pv}$ : La tension aux bornes du module photovoltaïque de  $N_s$  cellules en série.

**I.4.6.2 Association en parallèle**

Une association parallèle de ( $N_p$ ) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en

parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [21].

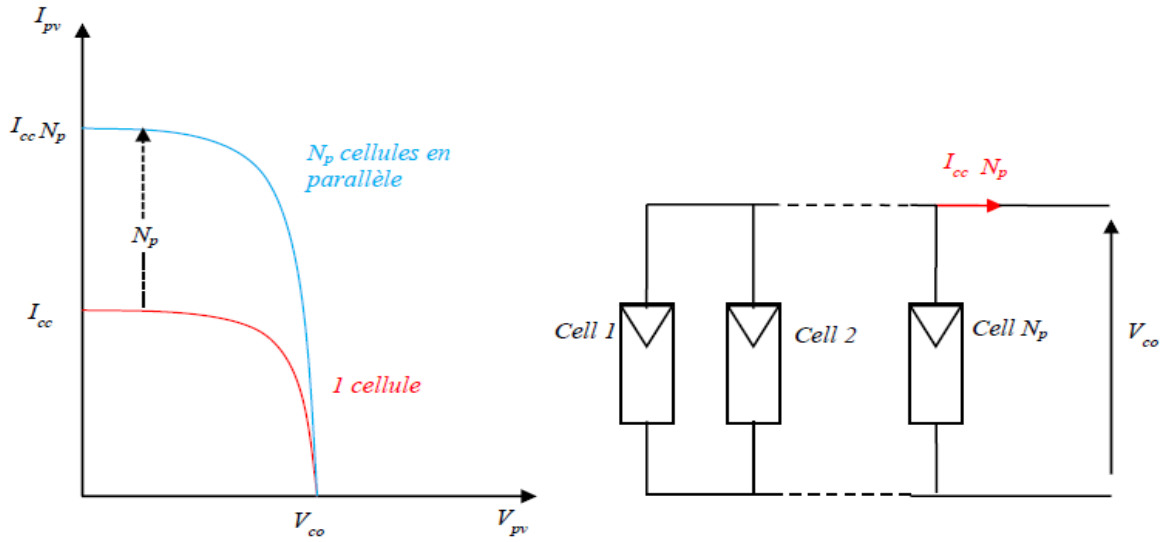


Figure I.15 : Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule parallèle [22].

Avec

$$I_{pv} = N_p * I_{sc} \dots \dots \dots (I.3)$$

$$V_{pv} = V_{co} \dots \dots \dots (I.4)$$

$I_{pv}$ : Le courants générer par le module photovoltaïque de  $N_p$  cellules en parallèle.

$V_{co}$  : La tension aux bornes du module photovoltaïque de  $N_p$  cellules en parallèle.

### I.5 Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module photovoltaïque. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

On trouve sur le marché des modules de différentes puissances. Leur rendement dépend de la quantité de l'ensoleillement disponible, de leur orientation et de leur inclinaison ainsi que du matériau qui les compose [29], [30].

La figure (I.16) représente un exemple de modules photovoltaïques.



Figure I.16 : Modules photovoltaïques [14].

### I.5.1 Protection d'un module photovoltaïque

Il est très importants de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules dues à de l'ombrage de la poussière, etc. peuvent endommager les cellules de façon permanente.

Deux types de protection sont généralement indispensables au bon fonctionnement d'un module photovoltaïque.

#### I.5.1.1 La diodes By-pass

La protection par diodes parallèles (ou by-pass) a pour but de protéger une série de cellules dans le cas d'un déséquilibre lié à la défektivité d'une ou plusieurs des cellules de cette série ou d'un ombrage sur certaines cellules; Une telle cellule est appelée "*Hot spot*" [31].

La Figure (I.17) montre un cas d'ombrage au niveau de la deuxième rangée, le courant passe par la diode by-pass pour cause d'ombrage.

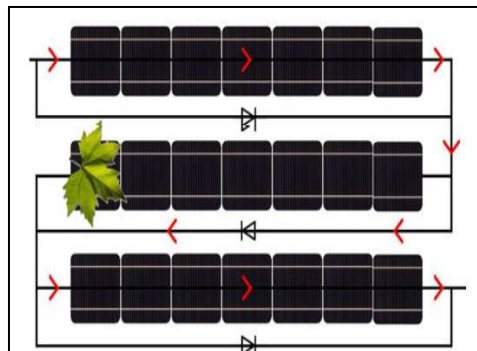
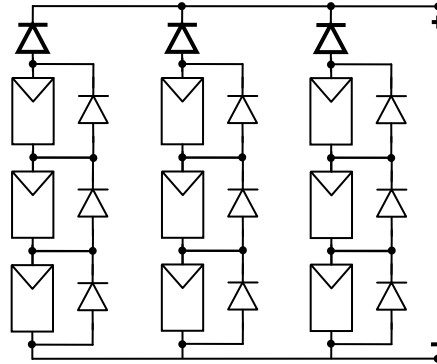


Figure I.17 : Un module photovoltaïque avec une cellule "*Hot spot*" [31].

### I.5.1.2 La diode Anti-retour

La diode en série placée entre le module et la batterie empêche pendant l'obscurité le retour de courant vers le module. Elle est dans ce cas appelée diode anti-retour comme le montre la figure (I.18) [31].



**Figure I.18** : Association série-parallèle, avec des diodes By-pass - Anti-retour.

## I.6 Le champ photovoltaïque

Le champ photovoltaïque est constitué d'un ensemble de panneaux photovoltaïques, des liaisons électriques qui les régissent ainsi que des supports sur lesquels ils sont installés. Lorsque l'on parle de champ photovoltaïque on parle de l'installation complète des panneaux sur le toit ou au sol.

Il existe plusieurs types de configuration des branchements des champs photovoltaïques, en parallèle, en série ou encore sous une configuration utilisant les deux. Les interactions entre les panneaux dépendent souvent du lieu et des contraintes du terrain où l'on souhaite installer le champ [13].

La figure (I.19) représente un exemple d'un champ photovoltaïque.



**Figure I.19** : Champs photovoltaïque [14].

Plusieurs modules peuvent être installés ensemble pour former un champ. En général, plus la surface d'un module ou d'un champ est grande, plus la production d'électricité sera importante.

Il faut également installer des diodes ou des fusibles en série sur chaque chaîne de modules. Ces protections sont utiles pour éviter qu'en cas d'ombre sur une chaîne, elle se comporte comme un récepteur et que le courant y circule en sens inverse et l'endommage.

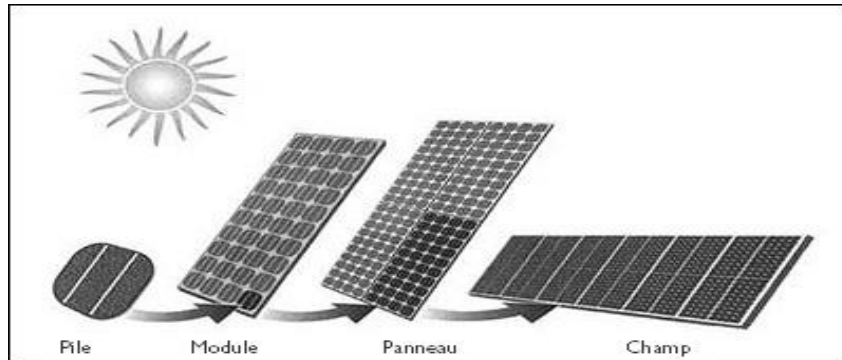


Figure I.20 : Composants d'un champ de modules photovoltaïque.

## I.7 Types de système photovoltaïque

Pour une production personnelle ou à plus grande échelle, dans un secteur raccordé au réseau électrique ou en site isolé, l'électricité photovoltaïque peut être une option intéressante.

On distingue trois grands types d'applications susceptibles d'être alimentées par l'énergie solaire photovoltaïque.

### I.7.1 Les systèmes hybrides

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires. En pratique, les modules de systèmes photovoltaïque sont souvent alliés à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie. Afin de garantir un approvisionnement constant en électricité.

Ils conviennent mieux lorsque la demande d'énergie est élevée ( pendant l'hiver ou tout au long de l'année ), lorsque l'énergie doit être fournie sur demande ou si votre budget est limité.

Un système hybride peut être relié au réseau, fonctionner en autonomie ou être soutenu par le réseau [32]. La figure (I.21) représente un exemple d'un système hybride PV + éolienne.



**Figure I.21** : Système hybride (photovoltaïque - éolienne).

### **I.7.2 Les systèmes raccordés au réseau**

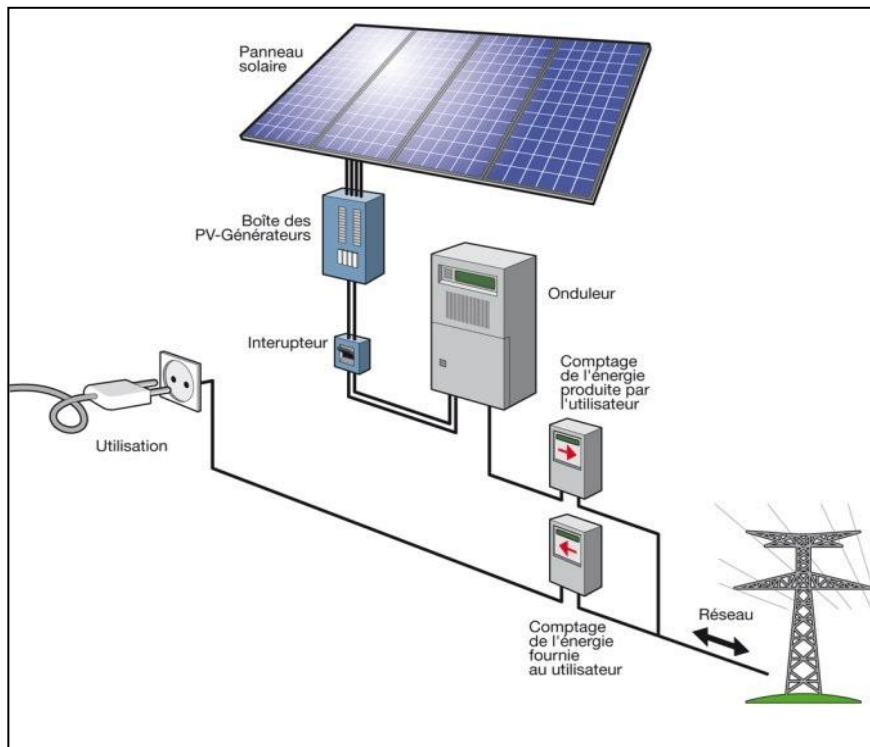
Il s'agit du système photovoltaïque le plus populaire pour les maisons et entreprises situées en zones développées. La connexion au réseau local d'électricité permet d'injecter et de revendre l'électricité produite. En cas d'ensoleillement insuffisant, l'électricité est importée du réseau. Un onduleur est utilisé pour transformer le courant continu produit par le système photovoltaïque en courant alternatif afin d'alimenter les équipements électriques standards.

Les systèmes raccordés au réseau permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public. Le propriétaire d'une installation de production raccordée au réseau a le choix entre deux options :

- Soit vendre la totalité de sa production (option dite : « Vente de la totalité »). Cette option oblige à créer un point de raccordement au réseau indépendant du point de raccordement destiné à la consommation.

- Soit consommer sa production localement en fonction de son besoin et ne vendre que l'excédent (option dite « Vente de l'excédent »), le réseau vient faire l'appoint quand la production est insuffisante par rapport à la consommation [32], [33].

La figure (I.22) montre un exemple d'une installation de production d'électricité raccordée au réseau pour la revente d'énergie.



**Figure I.22:** Installation de production électrique raccordée au réseau [32].

### I.7.3 Les systèmes autonomes

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux, ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum.

Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie donc c'est pour disposer d'électricité au cours de périodes sans lumière (la nuit notamment) [32], [33].

La figure (I.23) montre un exemple d'un système de production d'énergie électrique autonome.

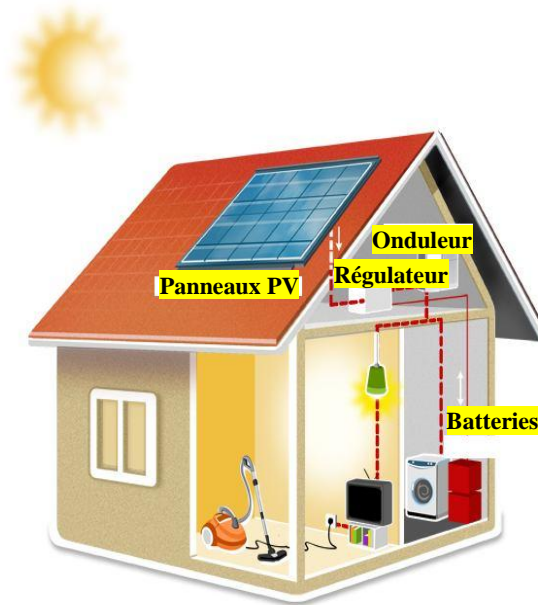


Figure I.23 : Système photovoltaïque autonome [33].

- Les modules (panneaux) photovoltaïques produisent un courant électrique continu.
- Le régulateur optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection.
- L'onduleur transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteur *AC*.
- Les batteries sont chargées de jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps.
- Des récepteurs *DC* spécifiques sont utilisables. Ces appareils sont particulièrement économes.

## **I.8 Conclusion**

L'énergie solaire photovoltaïque est une des sources d'énergies renouvelables, ainsi qu'une des technologies les plus importants dans le développement durable.

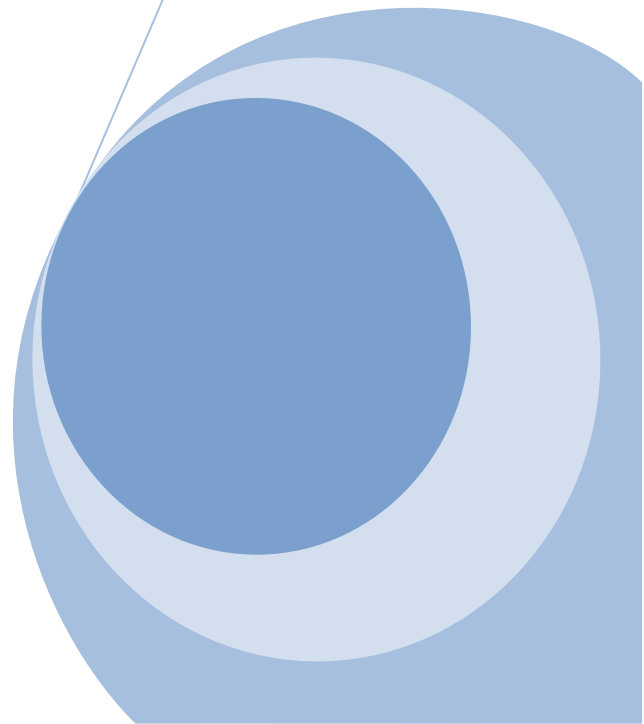
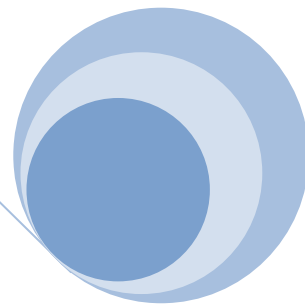
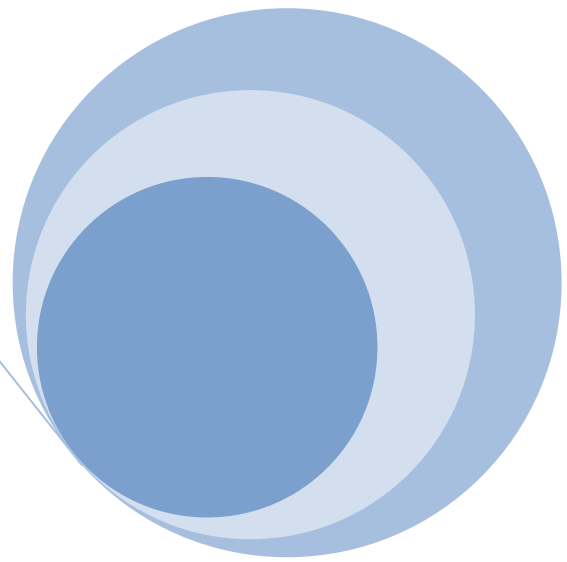
Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les modes de production de l'énergie électrique à partir d'une cellule photovoltaïque. Nous avons mis en évidence les paramètres influençant sur le comportement des cellules à savoir ensoleillement et température. Nous avons abordé le mode de production d'énergie électrique par la mise en série et/ou parallèle des cellules ou bien des modules photovoltaïques et leurs protections contre les courts-circuits. Nous avons aussi présenté les différentes configurations électriques à savoir les structures connectées au réseau, les configurations hybrides et autonomes.

Les caractéristiques électriques des modules photovoltaïques sont très influencées par les conditions météorologiques (ensoleillement et température). Au chapitre suivant, nous nous intéressons à la modélisation d'un module photovoltaïque sous différentes conditions d'ensoleillements et de températures. Nous allons présenter les modèles mathématiques les plus utilisés pour la représentation d'une cellule ou d'un module photovoltaïque, ainsi que la simulation du modèle le plus proche de l'expérimentale.

CHAPITRE

---

*Etude et modélisation d'une  
cellule photovoltaïque*



## II.1 Introduction

Dans le domaine photovoltaïque, les fabricants fournissent des paramètres électriques pour les modules photovoltaïques aux conditions *STC* (Ensoleillement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ ).

Toutefois, ces conditions ne sont pas toujours évidentes, se produisant rarement à l'extérieur, elles sont principalement réalisées dans des conditions de laboratoire en utilisant un simulateur solaire, par conséquent, plusieurs chercheurs proposent l'étude mathématique ou bien la modélisation de ces modules.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (Donnée de base) c'est-à-dire les données météorologiques au site, les données relatives aux utilisations et aux équipements.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la caractérisation du module photovoltaïque *SUNTECH-STP80S-12*. Dans un premier temps, nous allons commencer par un rappel des équations et des modèles mathématiques du plus simple au plus élaboré. Ensuite, nous allons passer à la simulation du modèle le plus proche de l'expérimentale sous *MATLAB/Simulink*. En second temps, une étude de l'influence des paramètres météorologiques (ensoleillement et température) sur le comportement des cellules photovoltaïque sera proposée. Finalement, nous proposons les techniques de maximisation de puissance pour un fonctionnement optimal des systèmes photovoltaïques.

## II.2 Modélisation de la cellule photovoltaïque

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément.

Selon cette philosophie, plusieurs modèles électriques ont été proposés dans la littérature pour représenter la cellule photovoltaïque [35].

### II.3 Les différents modèles électrique des cellules photovoltaïques

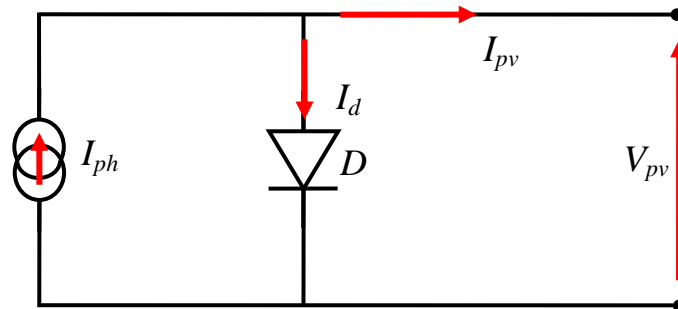
En littérature, il existe plusieurs modèles mathématiques qui décrivent le comportement du générateur photovoltaïque [36].

Parmi ces modèles on peut citer les suivants [15], [22] :

- Modèle idéale.
- Modèle explicite.
- Modèle à deux diodes.
- Modèle à une diode.

#### II.3.1 Modèle idéale

C'est le modèle le plus simple pour représenter une cellule photovoltaïque, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Le circuit équivalent simplifié (Figure II.1) de la cellule photovoltaïque se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle.



**Figure II.1** : Schéma équivalent du modèle électrique idéal d'une cellule photovoltaïque [45].

La source de courant produit le photo-courant  $I_{ph}$ , qui est directement proportionnel à l'ensoleillement ( $E$ ). A partir de la loi de Kirchhoff (la somme de tous les entrant et sortant d'un point est égale à zéro), on déduit l'équation courant-tension ( $I-V$ ) du circuit équivalent simplifié [37], [38].

En appliquant la loi des nœuds :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \dots \dots \dots (II. 1)$$

Avec

$$I_d = I_o \left( e^{\left(\frac{V_{pv}}{V_t}\right)} - 1 \right) \dots \dots \dots (II. 2)$$

$$V_t = \frac{NkT}{q} \dots \dots \dots (II. 3)$$

L'équation (II.1) devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o \left( e^{\left(\frac{V_{pv}}{V_t}\right)} - 1 \right) \dots \dots \dots (II. 4)$$

En circuit ouvert

$$I_{pv} = 0 \dots \dots \dots (II. 5)$$

$$V_{pv} \rightarrow V_{co}$$

$$I_{ph} - I_d = 0 \dots \dots \dots (II. 6)$$

On aura

$$I_{ph} - I_o \left( e^{\left(\frac{V_{pv}}{V_t}\right)} - 1 \right) = 0 \dots \dots \dots (II. 7)$$

$$V_{co} = V_t \log \left( \left(\frac{I_{ph}}{I_o}\right) + 1 \right) \dots \dots \dots (II. 8)$$

Avec

$V_t$  : Tension thermique;

$T$  : température absolue de la cellule en (kelvin);

$N$  : Facteur d'idéalité de la photopile;

$k$  : Constant de Boltzmann ( $1,38.10^{-23} J/K$ );

$q$  : Charge élémentaire de l'électron ( $1,6.10^{-19} C$ ).

$I_o$  : Courant de saturation inverse de la diode;

$I_{pv}$  : Courant générer par la cellule photovoltaïque;

$I_{ph}$  : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident);

$I_d$  : Le courant circulant dans la diode;

$V_{pv}$  : Tension de la cellule photovoltaïque;

$V_{co}$  : Tension à circuit ouvert.

### II.3.2 Modèle explicite

Le modèle explicite est développé par **Borowy** et **Salameh** en 1996. Ce modèle explicite se caractérise par sa résolution très simple. Il nécessite seulement quatre paramètres ( $I_{cc}, V_{co}, I_{ppm}, V_{ppm}$ ) [18].

$$I_{pv} = I_{cc} N_p \left[ 1 - \left( e^{\left( \frac{N_s V_{ppm}}{C_2 V_{co}} \right)} - 1 \right) \right] \dots \dots \dots (II. 9)$$

Avec

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_{ppm}}{V_{cc}} \right) e^{\left( -\frac{V_{ppm}}{C_2 V_{cc}} \right)} \dots \dots \dots (II. 10)$$

$$C_2 = \frac{\left( \frac{V_{ppm}}{V_{oc}} - 1 \right)}{\ln \left( 1 - \frac{I_{ppm}}{I_{cc}} \right)} \dots \dots \dots (II. 11)$$

$N_s$  : Nombre de cellules connectées en séries;

$N_p$  : Nombre de cellules connectées en parallèles.

$V_{ppm}$  : Tension du point de puissance maximale;

$I_{ppm}$  : Courant du point de puissance maximale.

$V_{co}$  : Tension du circuit ouvert;

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit.



L'équation (II.13) devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left[ e^{\left( \frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{AkT} \right)} - 1 \right] - I_{s2} \left[ e^{\left( \frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{AkT} \right)} - 1 \right] - \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \right) \dots \dots \dots (II.16)$$

Avec

$V_{pv}$  : Tension de la cellule ou du module photovoltaïque;

$I_{pv}$  : Courant de la cellule ou du module photovoltaïque;

$I_{ph}$  : Représente le photo-courant.

$I_{d1}$  : Le courant circulant dans la première diode;

$I_{d2}$  : Le courant circulant dans la deuxième diode.

$R_s$  : La résistance série;

$R_p$  : La résistance parallèle.

$k$  : La constante de Boltzmann, ( $1,38.10^{-23} J/K$ );

$A$  : Coefficient d'idéalité de la cellule ou du module photovoltaïque;

$q$  : Charge élémentaire, ( $1,6.10^{-19} C$ ).

### II.3.4 Modèle à une diode

C'est le modèle le plus cité dans la littérature. Le module photovoltaïque est caractérisé par un schéma électrique simplifié (Figure II.3), qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance série ( $R_s$ ) qui représente la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles, et une résistance parallèle ( $R_p$ ) caractérisant les courants de fuite de la jonction [15] [33].

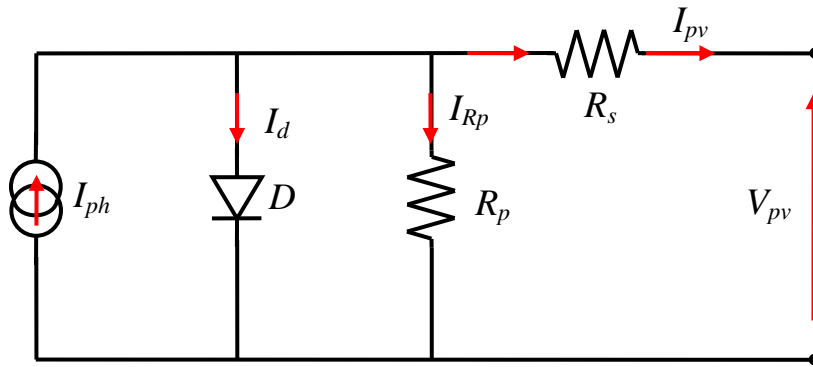


Figure II.3: Schéma équivalent du modèle à une diode [10], [15].

Le courant généré par la cellule photovoltaïque est donné par la loi des nœuds.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{R_p} \dots \dots \dots (II. 17)$$

Avec

$$I_{ph} = P_1 E_s [1 + P_2 (E_s - E_{s\text{ réf}}) + P_3 (T_j - T_{j\text{ réf}})] \dots \dots \dots (II. 18)$$

$$I_d = I_0 \left[ e^{\left( \frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{k A N_s T_j} \right)} - 1 \right] \dots \dots \dots (II. 19)$$

Avec

$$I_{R_p} = \frac{V_{pv}}{R_p} \dots \dots \dots (II. 20)$$

$I_0$  est le courant de saturation, il est donné par :

$$I_0 = P_4 T_j^3 e^{\left( \frac{-E_g}{k T_j} \right)} \dots \dots \dots (II. 21)$$

Avec

$P_1, P_2, P_3, P_4$  : Paramètres constants.

$E_{sréf}$  : L'ensoleillement sous conditions *STC*, ( $E_{sréf} = 1000 \text{ W/m}^2$ );

$T_{jréf}$  : La température sous conditions *STC*, ( $T_{jréf} = 25^\circ\text{C}$ ).

$N_s$  : nombre de cellules en série dans un module;

$N_p$  : Nombre de cellules en parallèle dans un module;

$q$  : La charge d'électron, ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ );

$k$  : Constante de Boltzmann, ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ );

$A$  : Facteur d'idéalité de la diode;

$E_g$  : Energie du gap ( $1,76 \cdot 10^{-19} \text{ eV}$ ).

La caractéristique courant-tension (*I-V*) selon les différentes équations, dépend fortement de l'ensoleillement (*E*) et de la température (*T*). Dans la suite de notre travail, nous allons nous intéresser à l'influence des paramètres météorologiques sur le module photovoltaïque.

## II.4 Simulation du module photovoltaïque

Dans ce travail, nous allons simuler le comportement d'un module photovoltaïque *SUNTECH STP80S-12*. [Annexe A]. D'après l'auteur dans [22], ce modèle à une diode est considéré comme le modèle le plus proche de l'expérimental.

Les paramètres du module photovoltaïque sous les conditions *STC* ( $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ ), est comme suit :

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Puissance maximale du panneau <math>P_{max}</math></i>	<i>80 W</i>
<i>Courant au point de puissance maximale <math>I_{ppm}</math></i>	<i>4.65 A</i>
<i>Tension au point de puissance maximale <math>V_{ppm}</math></i>	<i>17.5 V</i>
<i>Courant de court-circuit <math>I_{cc}</math></i>	<i>5 A</i>
<i>Tension en circuit ouvert <math>V_{co}</math></i>	<i>21.9 V</i>

**Tableau II.1:** Valeurs des paramètres du module étudié. [Annexe A]

### II.4.1 Bloc de simulation du module photovoltaïque sous MATLAB/Simulink

Le schéma bloc élaboré pendant notre étude est représenté sur la figure (II.4), il comporte cinq variables :

- Les deux variables d'entrées qui sont :
  - $E$  : Ensoleillement sur le plan des cellules ( $W/m^2$ ) ;
  - $T$  : Température de jonction des cellules ( $^{\circ}C$ ).
- Les trois variables de sorties :
  - $I_{pv}$  : Courant fourni par la cellule (A) ;
  - $V_{pv}$  : Tension aux bornes de la cellule (V) ;
  - $P_{pv}$  : Puissance de la cellule photovoltaïque (W).

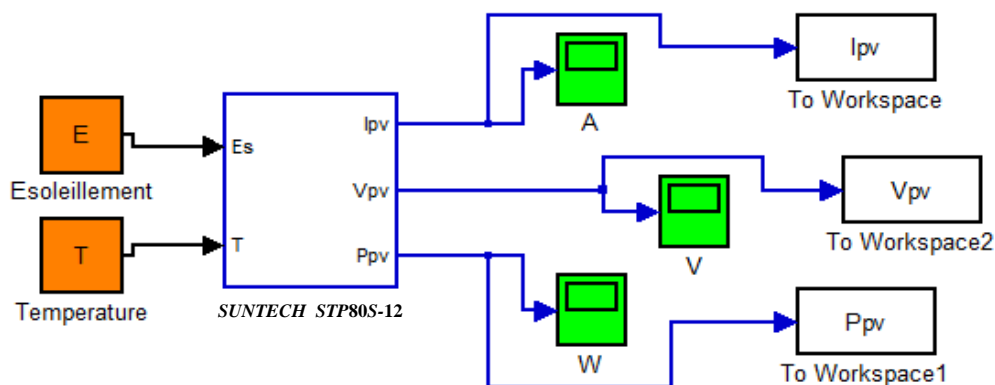


Figure II.4 : Schéma bloc du module photovoltaïque.

### II.4.2 Influence de l'ensoleillement

Afin de visualiser l'influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques  $I_{pv}=f(V_{pv})$  et  $P_{pv}=f(V_{pv})$ , nous allons simuler le modèle à une diode en faisant varier l'ensoleillement entre  $200 W/m^2$  et  $1000 W/m^2$  avec un pas de  $200 W/m^2$  et la température reste constante à  $25^{\circ}C$ . Les résultats de la simulation sont représentés sur les figures (II.5) et (II.6).

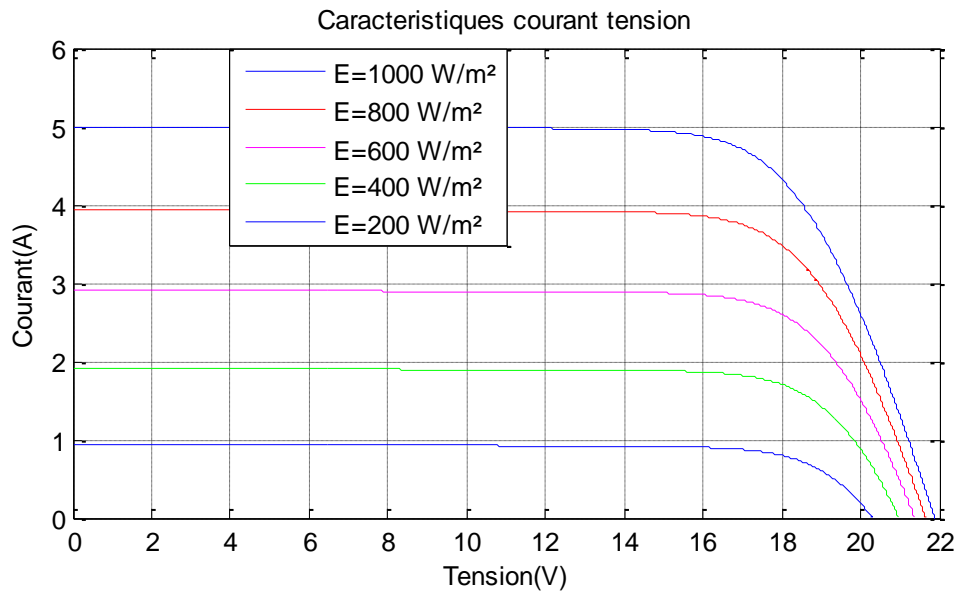


Figure II.5 : Caractéristiques **courant-tension** avec ensoleillement variable.

La figure (II.5) montre l'influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques  $I_{pv}=f(V_{pv})$ . On constate que le courant subit une variation importante, mais la tension reste presque constante.

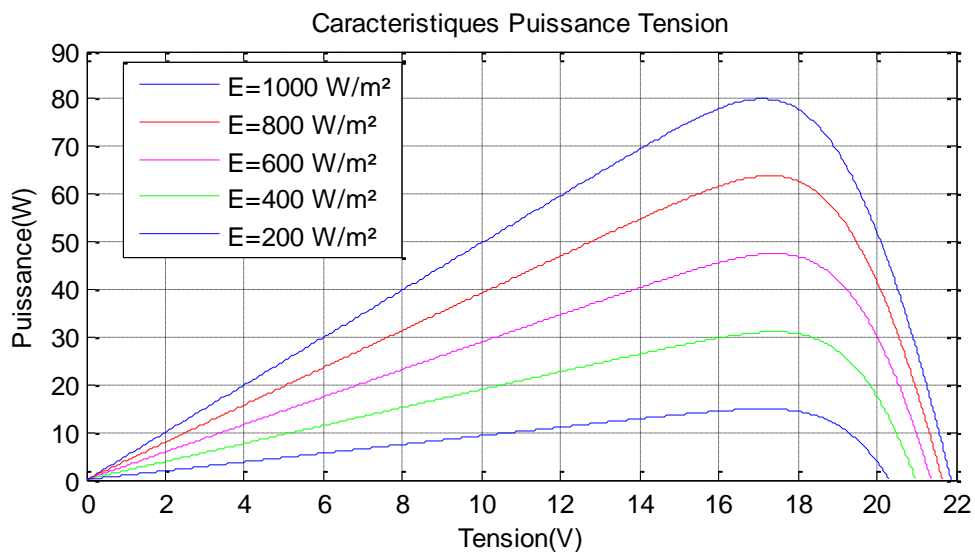


Figure II.6 : Caractéristique **puissance-tension** avec ensoleillement variable.

La figure (II.6) montre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'ensoleillement. On constate que la puissance délivrée est influencée par l'ensoleillement  $P_{pv}=f(V_{pv})$ .

Afin de voir l'influence de la variation d'ensoleillement, nous avons regroupé tous les résultats dans le tableau suivant :

$T_{STC} (°C)$	$T_{STC} = 25 °C$					
	$V_{CO} (V)$	$I_{CC} (A)$	$P_{max} (W)$	$\Delta V_{CO} (V)$	$\Delta I_{CC} (A)$	$\Delta P (W)$
$200 W/m^2$	20.310	0.941	13.628	0.590	4.059	66.372
$400 W/m^2$	20.980	1.911	29.646	0.920	3.089	50.354
$600 W/m^2$	21.380	2.911	46.008	0.520	2.089	33.992
$800 W/m^2$	21.660	3.939	62.410	0.240	1.061	17.590
$1000W/m^2$	21.900	5.000	80.000	0	0	0

**Tableau II.2:** Comparaison des résultats de simulation avec variation d'ensoleillement.

Avec

$$\Delta P = P_{max} - P_{E_i} \dots \dots \dots (II. 22)$$

$$\Delta I_{CC} = I_{cc_{max}} - I_{cc_{E_i}} \dots \dots \dots (II. 23)$$

$$\Delta V_{CO} = V_{co_{max}} - V_{co_{E_i}} \dots \dots \dots (II. 24)$$

Dans les conditions *STC* le module photovoltaïque produit sa puissance maximale donné par le constructeur sur la plaque signalétique du module (**80W**).

D'après les résultats des simulations obtenus, On constate que quand l'ensoleillement diminue la puissance et le courant photovoltaïque diminue dans les mêmes proportions, contrairement a la tension qui reste pratiquement constante.

Afin d'augmenter l'ensoleillement reçu par les cellules photovoltaïques, il est conseillé d'orienter ces dernière pour que les rayons solaires s'exposent perpendiculairement. Pour ce faire, nous proposant l'utilisation des panneaux à inclinaison variable pour être plus efficaces.

### II.4.3 L'influence de la température

La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. Donc l'étude de l'influence de la température sur un générateur photovoltaïque est importante. En faisant varier la température de  $25^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $45^{\circ}\text{C}$  avec un pas de  $5^{\circ}\text{C}$ , les caractéristiques du module photovoltaïque en fonction de la température à un ensoleillement fixé à  $1000 \text{ W/m}^2$ , sont données par les figures (II.7) et (II.8).

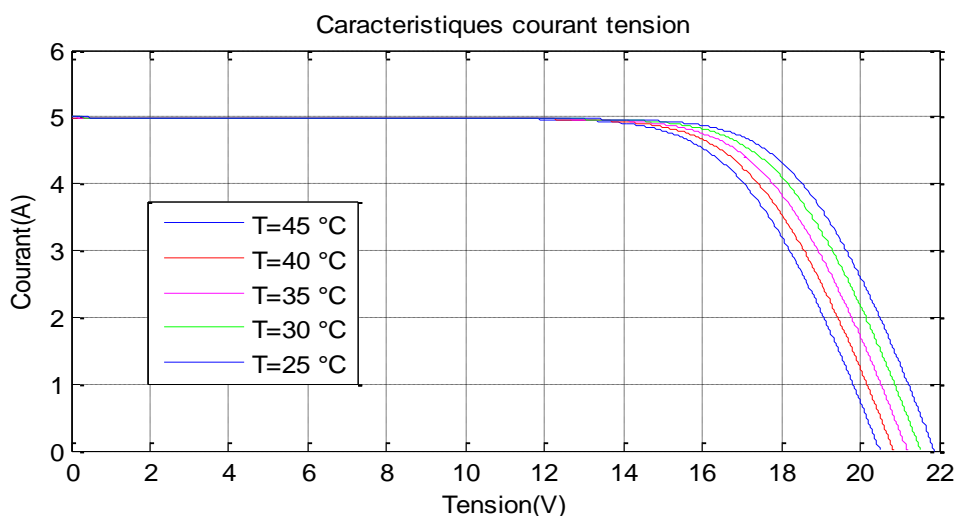


Figure II.7 : Caractéristiques **courant-tension** avec variation de température.

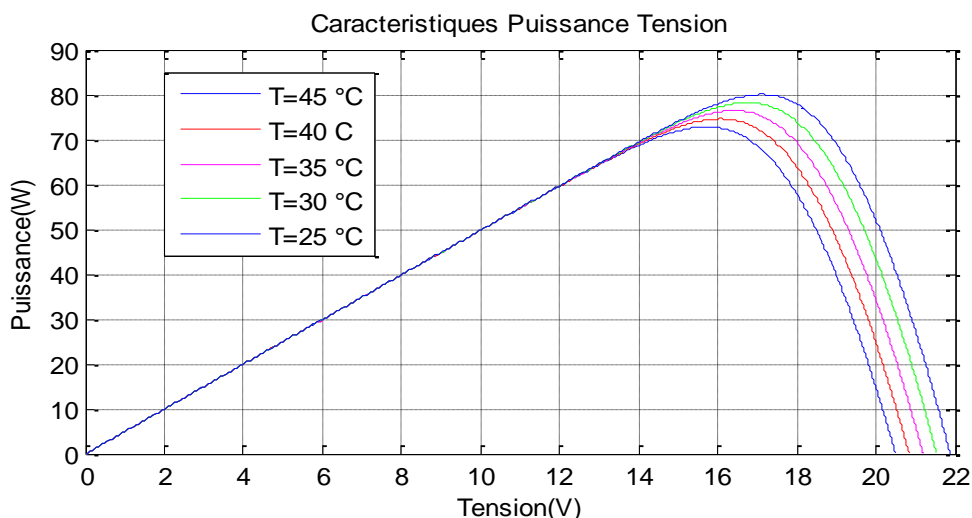


Figure II.8 : Caractéristiques **puissance-tension** avec variation de température.

On remarque que la température à une influence négligeable sur les valeurs du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ). Par contre, la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) baisse assez fortement lorsque la température augmente. Par conséquent la puissance diminue.

Afin de voir l'influence de la variation de température sur le comportement du GPV, nous avons regroupé tous les résultats dans le tableau suivant :

$E_{STC} (w/m^2)$	$E_{STC} = 1000 w/m^2$					
	$V_{CO} (V)$	$I_{CC} (A)$	$P_{max} (W)$	$\Delta V_{CO} (V)$	$\Delta I_{CC} (A)$	$\Delta P (W)$
25 °C	21.900	5.000	80.000	0	0	0
30 °C	21.540	4.999	78.185	0.360	0.001	1.815
35 °C	21.190	4.999	76.384	0.710	0.001	3.616
40 °C	20.850	4.999	74.491	1.050	0.001	5.509
45 °C	20.500	4.999	72.247	1.400	0.001	7.753

**Tableau II.3:** Comparaison des résultats de simulation avec variation de température.

Le calcul de la variation de puissance  $\Delta P$ , variation de tension  $\Delta V_{CO}$  et du courant  $\Delta I_{CC}$  est donné par les équations suivants :

$$\Delta P = P_{max} - P_{T_i} \dots \dots \dots (II. 26)$$

$$\Delta I_{CC} = I_{cc_{max}} - I_{cc_{T_i}} \dots \dots \dots (II. 27)$$

$$\Delta V_{CO} = V_{co_{max}} - V_{co_{T_i}} \dots \dots \dots (II. 28)$$

Dans les conditions *STC* ( $E=1000W/m^2, T = 25°C$ ), le module photovoltaïque produit une puissance maximale de (**80W**).

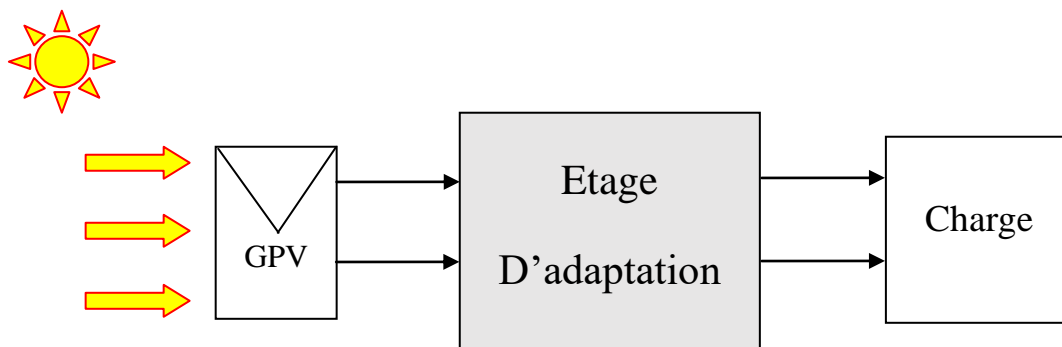
On constate que la température influence sur les caractéristiques électriques du module photovoltaïque, en effet d'après les résultats de simulation la puissance et la tension sont inversement proportionnelle à la variation de température.

Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

La caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque (*GPV*), peut être divisée en trois zones de fonctionnement. Dans la première zone, le *GPV* fonctionne comme une source de courant, la seconde zone représente le mode générateur de tension, la zone trois de la caractéristique du générateur photovoltaïque représente une source de puissance, là où le courant et la tension sont optimaux, qui correspond au point de puissance maximale. Pour atteindre cette zone optimale une technique de maximisation de puissance (*PPM*) est recommandée.

## II.5 Commande de maximisation de puissance

Une commande de maximisation de puissance, ou bien « *Recherche du Point de Puissance Maximum* » en anglo-saxon « *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* » est une commande qui permet la poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque. Elle est généralement associée à un étage intermédiaire d'adaptation qui permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance en agissant sur le rapport cyclique de ce dernier. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et ensoleillement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ). Un contrôleur (*MPPT*) permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge au module photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge à chaque instant [45].



**Figure II.9:** Principe d'une connexion avec un étage d'adaptation entre un générateur Photovoltaïque et une charge [44].

La Figure (II.9) représente le schéma de principe d'un système photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation *DC-DC* entre le générateur photovoltaïque et la charge.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande (*MPPT*) (*Maximum Power Point Tracking*) qui lui permet de rechercher le (*PPM*) que peut fournir un module solaire photovoltaïque [39].

### II.5.1 Principe de la maximisation de puissance

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum [22].

La figure (II.10) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal (*PPM1*) vers un nouveau point (*PPM2*) de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

Pour une variation d'ensoleillement (**cas a**), Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum (*PPM2*).

Pour une variation de charge (**cas b**), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du générateur photovoltaïque (**cas c**). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.

En résumé, le suivi du (*PPM*), réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée (*MPPT*) agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (*CS*) pour rechercher et atteindre le (*PPM*) du générateur photovoltaïque. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes (*MPPT*) plus ou moins performantes basées sur les propriétés du générateur photovoltaïque [42].

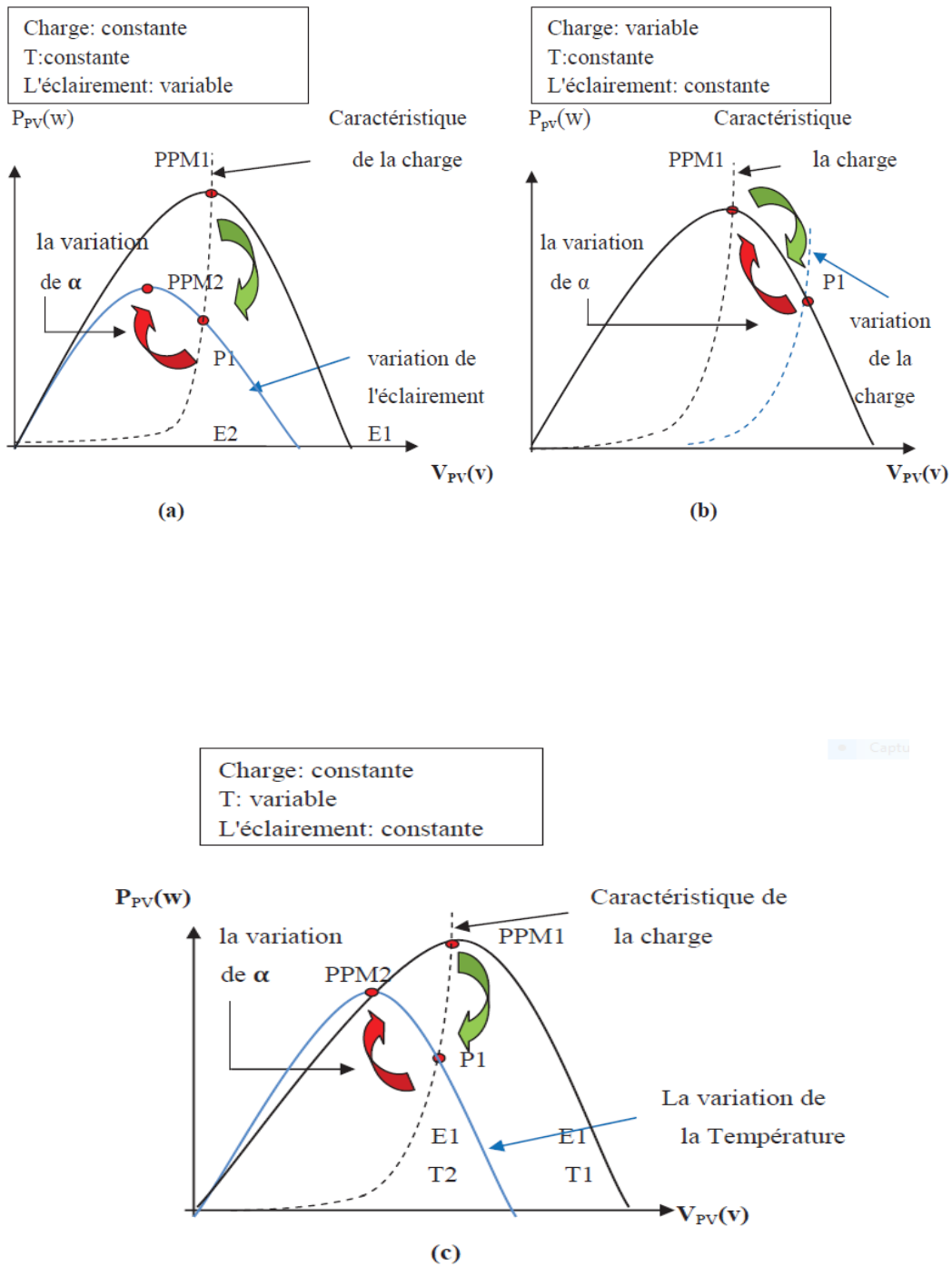


Figure II.10: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale [22].

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

## II.5.2 Les méthodes de maximisation de puissance MPPT

Les systèmes photovoltaïques dépendent fortement des paramètres météorologiques tels que la température et ensoleillement.

La puissance d'un système photovoltaïque peut être très variable, autant que cette énergie est propre et disponible, il faut probablement consommer le maximum de sa production, soit on fait du stockage pour pouvoir l'utiliser dans les périodes non ensoleillées l'injecte dans le réseau.

Afin d'exploiter cette énergie à son maximum plusieurs méthodes de maximisation de puissance sont proposées dans la littérature. Deux catégories peuvent être présentées méthodes directes et indirectes :

### II.5.2.1 Les méthodes indirectes

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques dans différentes conditions météorologiques (Température, Ensoleillement) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser.

Parmi ces méthodes on trouve : la méthode d'ajustement de courbe, la méthode « *look-up table* », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque, la méthode de court circuit [44].

#### II.5.2.1.1 Méthode de la tension de circuit ouvert

Cette technique de recherche du point de puissance maximale (*PPM*) est très simple. Elle consiste à comparer la tension du panneau ( $V_{pv}$ ) avec une tension de référence qui correspond à la tension optimale ( $V_{opt}$ ). L'erreur de tension est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur, afin de faire coïncider les deux tensions. La tension de référence est obtenue à partir de la connaissance de la relation linéaire existante entre ( $V_{opt}$ ) et tension du circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) d'un module photovoltaïque :

$$V_{opt} = K_v V_{oc} \dots \dots \dots (II. 29)$$



La conductance et l'incrément de la conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation par rapport à la tension ( $V_{pv}$ ).

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \dots \dots \dots (II.32)$$

Ainsi on a noté avec ( $G$ ) la conductance et avec ( $\Delta G$ ) l'incrément de la conductance :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \dots \dots \dots (II.33)$$

$$\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \dots \dots \dots (II.34)$$

La courbe de la figure (II.11) représente la trajectoire de la puissance par incrément de la conductance pour avoir le maximum de la courbe, on doit chercher le point d'annulation de la dérivée de la puissance, ce qui correspond au point de puissance maximale [41].

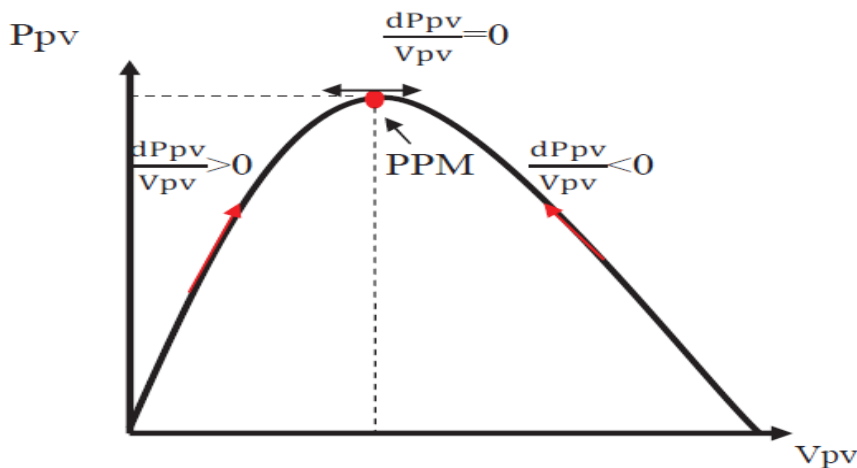


Figure II.11 : Trajectoire par Incrément de la Conductance [42].

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$  : Le point de fonctionnement est à gauche du ( $PPM$ );

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$  : Le point de fonctionnement sur le ( $PPM$ );

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$  : Le point de fonctionnement à droite de ( $PPM$ ).

$P_{pv}$  : La puissance du générateur photovoltaïque;

$I_{pv}$  : Le courant du générateur photovoltaïque;

$V_{pv}$  : La tension du générateur photovoltaïque;

$G$  : La conductance;

$\Delta G$  : L'incrément de la conductance.

Pour éviter que la différentielle de la tension du module ( $dV_{pv}$ ) ne devienne nulle, lorsque le (*MPP*) est atteint dans les précédents cycles, ce qui va conduire à une division par zéro, l'algorithme fait un test de ( $dV_{pv}$ ) qui doit être différent de zéro.

Si ( $dV_{pv}$ ) est nul et ( $dI_{pv}=0$ ). Alors le (*PPM*) est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement, dans le cas contraire l'algorithme test le signe de ( $dI_{pv}$ ) pour déterminer la position du (*PPM*) et ajuste la tension de référence correspondante. La figure (II.12) montre l'algorithme d'incrémement de la conductance.

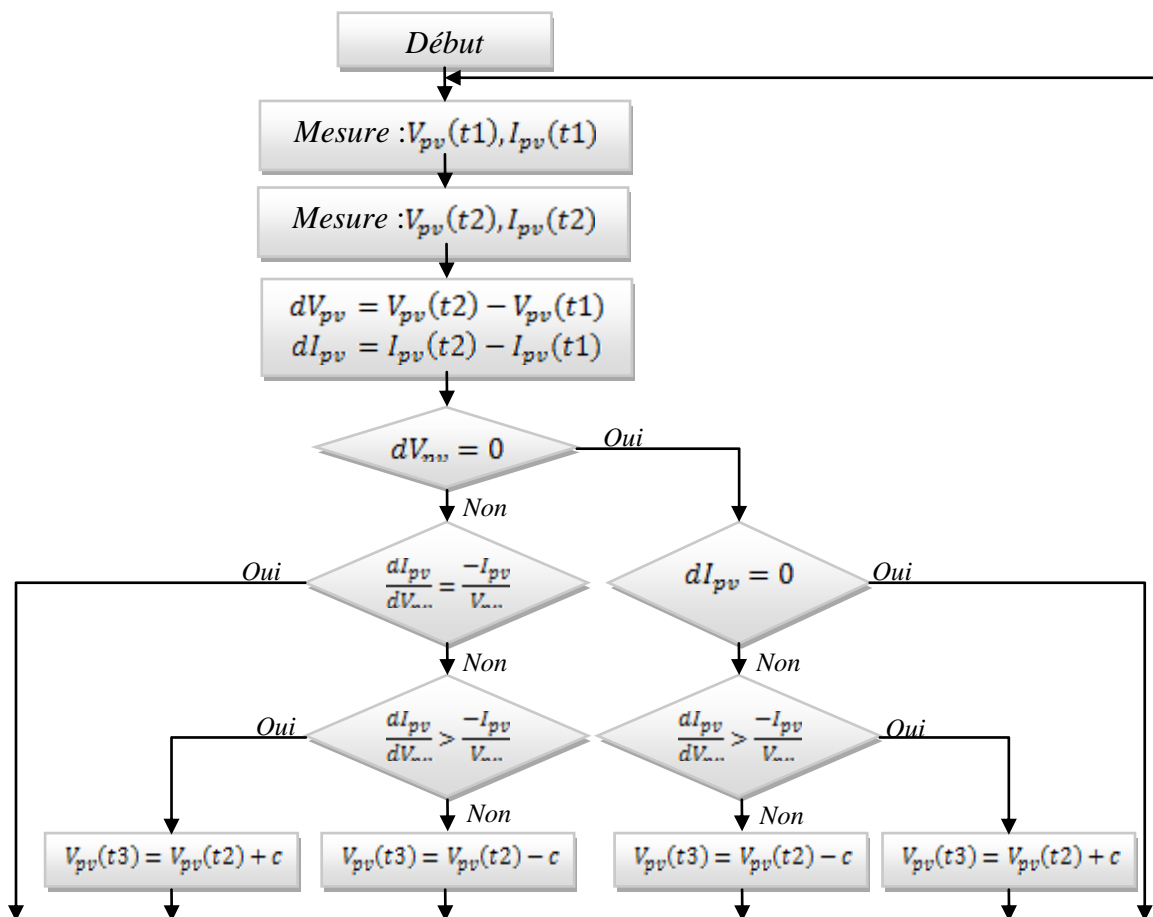


Figure II.12 : Algorithme (*MPPT*) basé sur la méthode Incrément de Conductance [22].

### II.5.2.2.2 La méthode Perturbe & Observe (P&O)

Le principe des commandes (*MPPT*) de type (*P&O*) consiste à perturber la tension ( $V_{pv}$ ) d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance ( $P_{pv}$ ) qui en résulte ainsi, comme l'illustre la figure (II.13), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension ( $V_{pv}$ ) engendre un accroissement de la puissance ( $P_{pv}$ ), cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du (*PPM*).

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le (*PPM*). Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au (*PPM*), et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande.

La figure (II.13) montre de le schéma de converge vers le point de puissance maximal par la méthode perturber et observer (*P&O*) [43].

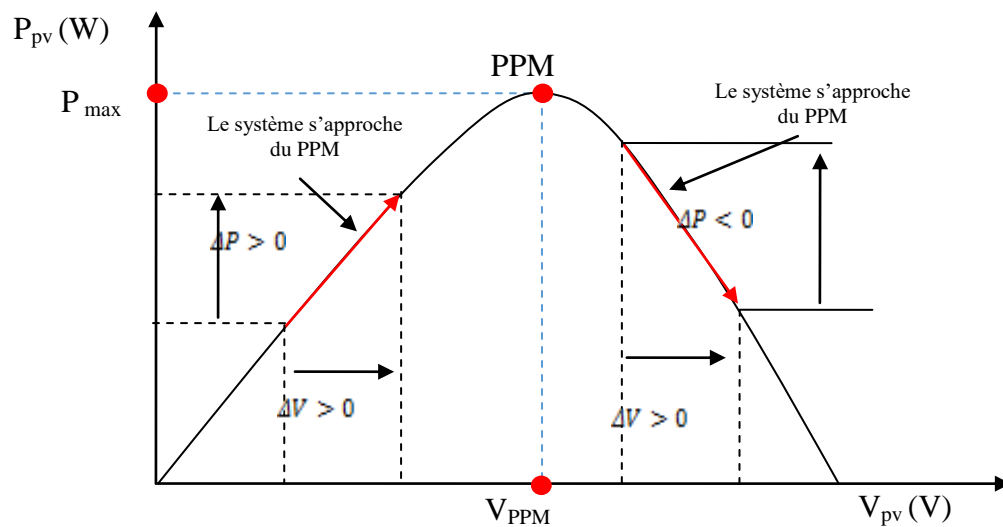


Figure II.13 : Schéma de convergence vers le (*PPM*) par (*P&O*) [22].

La figure (II.14) représente l'algorithme classique associé à une commande (*MPPT*) de type (*P&O*), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (Courant et tension du générateur photovoltaïque) sont nécessaires pour déterminer la puissance du photovoltaïque à chaque instant [40].

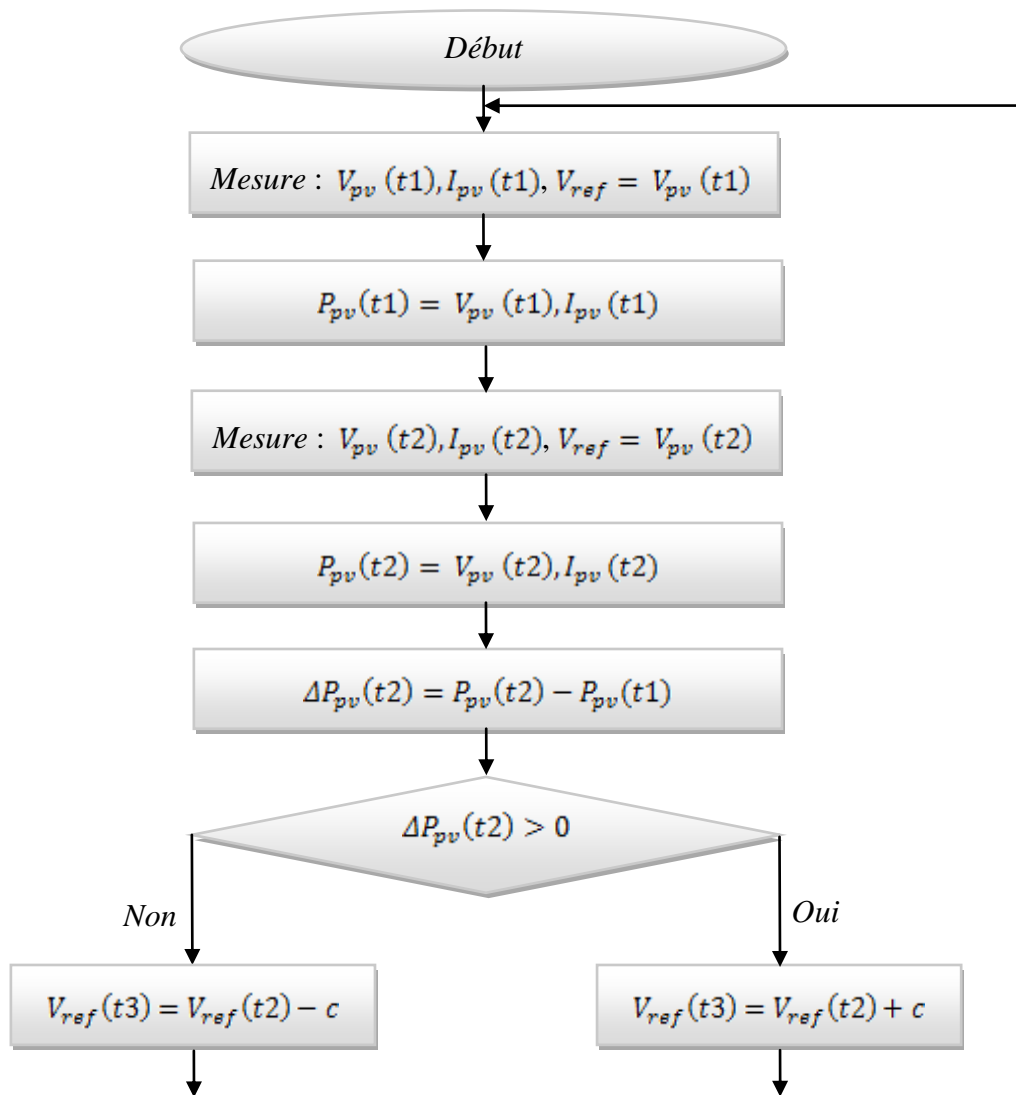


Figure II.14 : Algorithme *MPPT* à base de la méthode (*P&O*) [22].

La méthode (*P&O*) est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du (*PPM*) qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du (*PPM*) doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du (*PPM*), une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du (*PPM*), il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [40].

## **II.6 Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la modélisation d'un système photovoltaïque. Nous avons commencé par la modélisation d'une cellule photovoltaïque et rappelé les différents modèles existant dans la littérature. Nous avons choisi le modèle à une diode qui présente le modèle le plus proche de l'expérimental, ensuite nous avons effectué la simulation de ce modèle avec la variation des conditions météorologiques (Température, Ensoleillement).

Nous avons présenté les résultats de simulation dans plusieurs conditions de température et ensoleillement. A partir des résultats obtenus, nous avons constaté que les caractéristiques électriques d'un module et/ou cellule photovoltaïque sont très influencés par ces paramètres. En effet, la puissance photovoltaïque est très variable avec la variation d'ensoleillement et de la température. Les techniques de maximisation de puissance peuvent être une solution pour avoir le maximum de puissance d'un générateur photovoltaïque. Dans ce contexte, nous avons rappelé les techniques de maximisation de puissance les plus utilisés qui consistent à agir sur le rapport cyclique d'un convertisseur d'électronique de puissance.

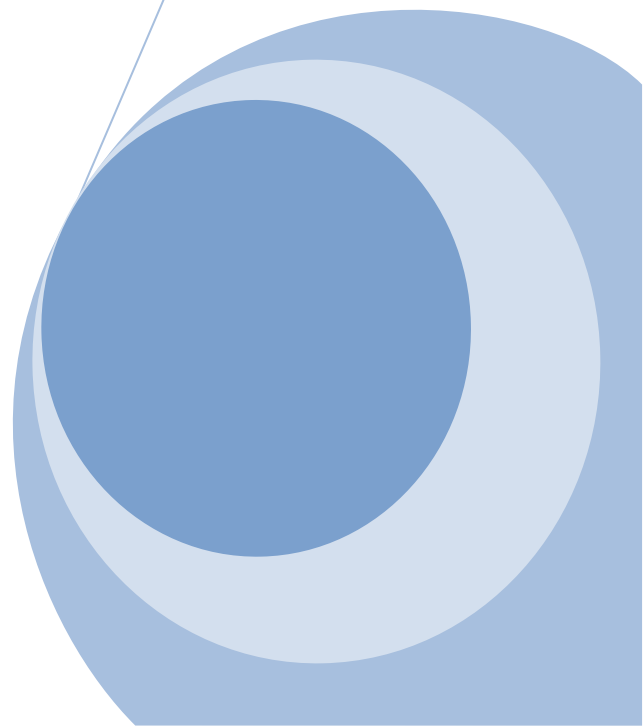
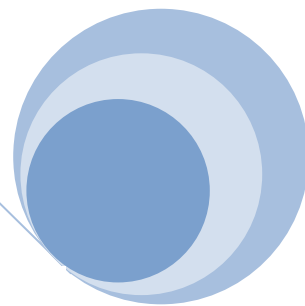
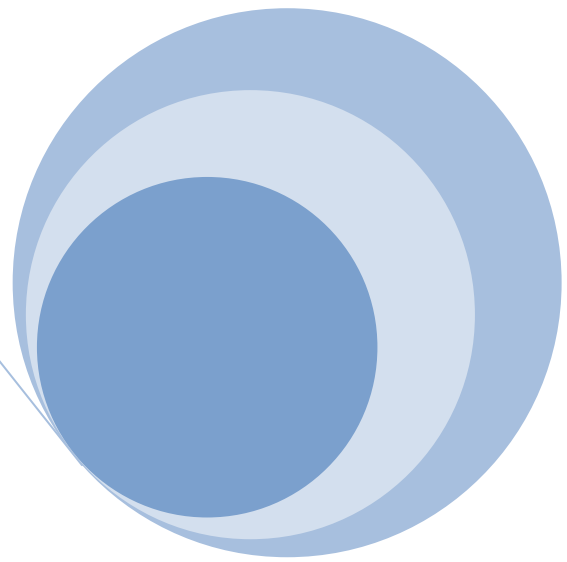
Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter les convertisseurs les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques, ensuite nous nous intéresseront au dimensionnement d'un convertisseur *DC/DC* auquel est associé, une commande de maximisation de puissance.

CHAPITRE

---



*Les convertisseurs  
statiques*



## II.1. Introduction

Dans un système d'énergie renouvelable, des convertisseurs sont toujours utilisés soit pour charger des batteries, transformer le courant continu en courant alternatif ou bien redressent du courant alternatif en continu [54].

Afin de permettre un bon transit de puissance, trois types de convertisseurs sont souvent utilisés dans les systèmes d'énergies renouvelables soit les onduleurs, les hacheurs ou bien les redresseurs [54].

Dans ce chapitre, nous allons rappeler les différents types de convertisseurs d'électronique de puissance les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïque à savoir : les convertisseurs *DC/DC* (hacheur), les convertisseurs continue/alternatif *DC/AC*, (onduleur). Ensuite, nous nous intéressons aux convertisseurs *AC/DC* (hacheur) et leurs différentes topologies, ainsi que la modélisation et dimensionnement du hacheur Boost (élevateur).

## II.2. Les différents convertisseurs

Dans le domaine de l'électronique de puissance, il existe plusieurs types de convertisseurs, selon le besoin d'utilisation, parmi cela on trouve :

- Les convertisseurs continue/continue (*DC => DC*), ex : Hacheur.
- Les convertisseurs continue/alternatif (*DC => AC*), ex : Onduleur.
- Les convertisseurs continu/alternatif (*AC => DC*), ex : Redresseur.

La figure (III.1) représente les différents types de convertisseurs statiques, qu'on peut trouver dans le domaine d'électronique de puissance.

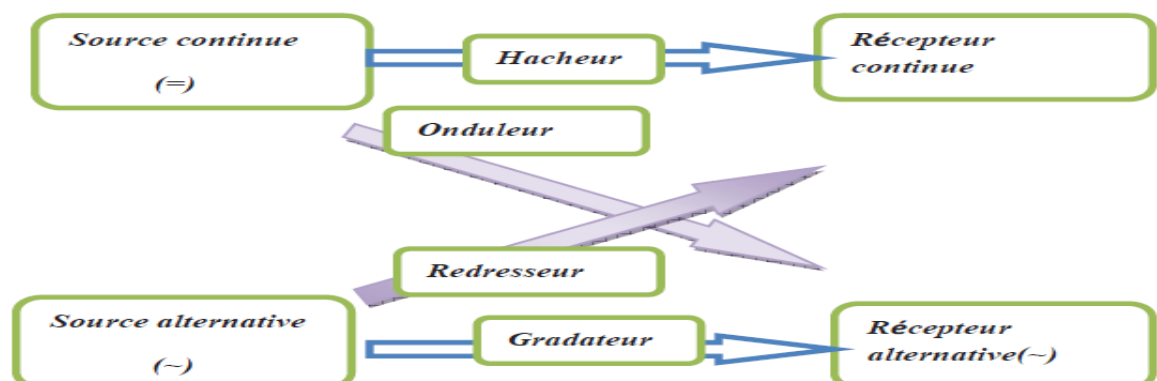


Figure III.1 : les différents types de convertisseurs statiques [46].

### III.2.1. Les convertisseurs DC/AC (Onduleur)

L'onduleur est un convertisseur statique *DC/AC* de haute performance. Il convertit la tension continue, en tension alternative contrôlée de façon très précise. La source de tension continue peut être, par exemple un, panneaux solaires [44].

#### III.2.1.1. Principe de fonctionnement d'un onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie alternative à un autre niveau de tension (ou de courant). Il est dit autonome s'il assure de lui même sa fréquence et sa forme d'onde [50].

Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion

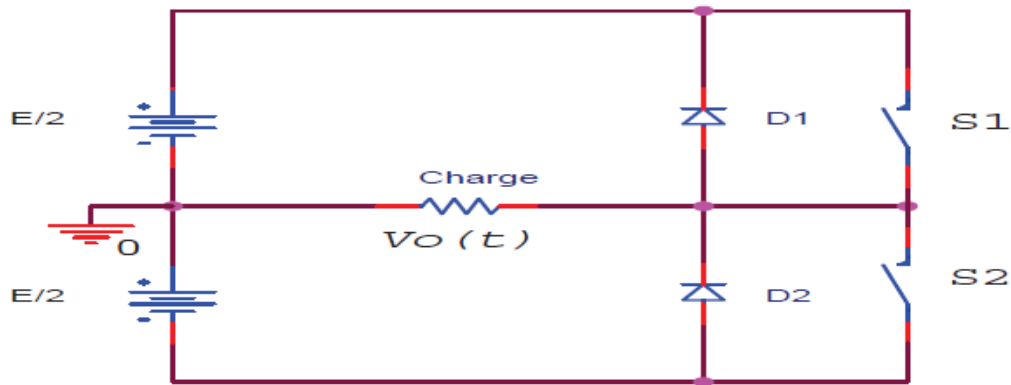
- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.

##### III.2.1.1.1. Onduleur Monophasé

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie [44].

###### III.2.1.1.1.1. Onduleur monophasé en demi-pont

Le schéma de principe d'un tel onduleur monté en demi-pont est montré sur la figure (III.2)



**Figure III.2 :** Schéma de principe d'un onduleur monophasé en Demi-pont [44].

Il est constitué principalement de deux interrupteurs de puissance notés  $S_1$  et  $S_2$  à commande complémentaire. La durée de conduction de chacun des interrupteurs est alors d'un demi-cycle ( $180^\circ$ ) correspondant à la fréquence du signal de sortie requis.

Lors de la fermeture de l'interrupteur  $S_1$ , la tension aux bornes de la charge serait donc de  $+E/2$ , et prend la valeur  $-E/2$  quand le second interrupteur,  $S_2$  est fermé.

La conduction simultanée des deux interrupteurs est évitée par l'élaboration d'une commande adéquate qui tient compte des différentes caractéristiques des imperfections de ces interrupteurs de puissance.

Les diodes  $D1$  et  $D2$ , dites de récupération, assurent la conduction d'un courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par rapport à la tension aux bornes de la charge [50].

### III.2.1.1.1.2. Onduleur monophasé en pont (Pont H)

L'onduleur en pont est représenté en figure (III.3), il comporte quatre interrupteurs de puissance désignées par  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  et  $S_4$  quand les interrupteurs  $S_1$  et  $S_2$ , sont fermés simultanément la tension imposée aux bornes de la charge prend la valeur  $+E$  et de  $-E$  lors de la fermeture simultanée des deux autres interrupteurs  $S_3$  et  $S_4$ .

Deux interrupteurs du même bras ne peuvent pas conduire simultanément, par cause d'un court-circuit de la source de tension continue [45].

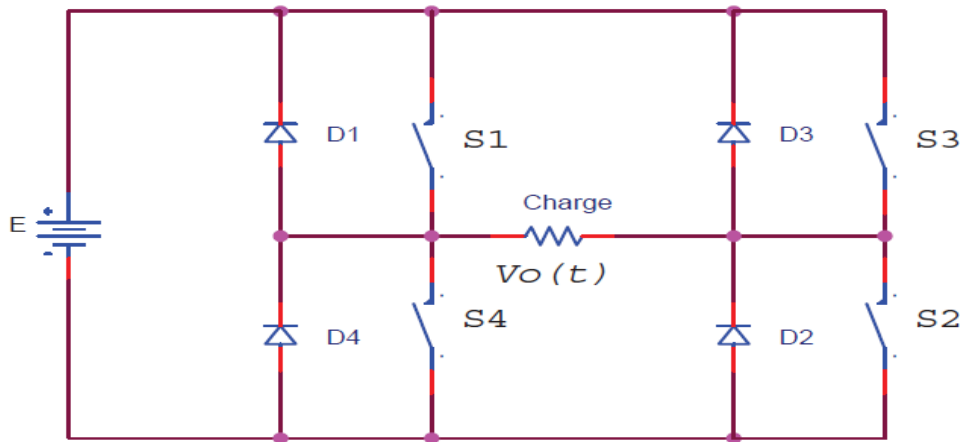


Figure III.3 : Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont [45].

### III.2.1.1.1. Onduleur triphasée

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre [47].

La figure (III.4), illustre la topologie d'un onduleur triphasé à six interrupteurs de puissance. Le décalage entre les signaux de commande est de 60°.

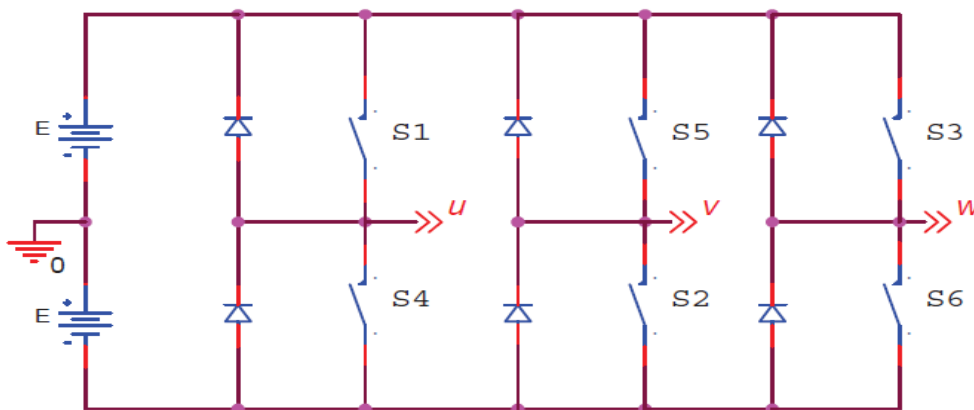


Figure III.4 : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé en Pont [44].

### III.2.2. Le convertisseur DC-DC (Hacheur)

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension ou de courant en une énergie continue, à un autre niveau de tension ou de courant. Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [48]. Les différentes topologies de base de circuit de conversion (*DC/DC*), seront décrites dans le paragraphe suivant

#### III.2.2.1. Convertisseur Buck (Hacheur série)

Le hacheur série est un convertisseur direct (*DC/DC*). La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue est de type source de courant, est présentée sur la figure(III.5). L'interrupteur **T** peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

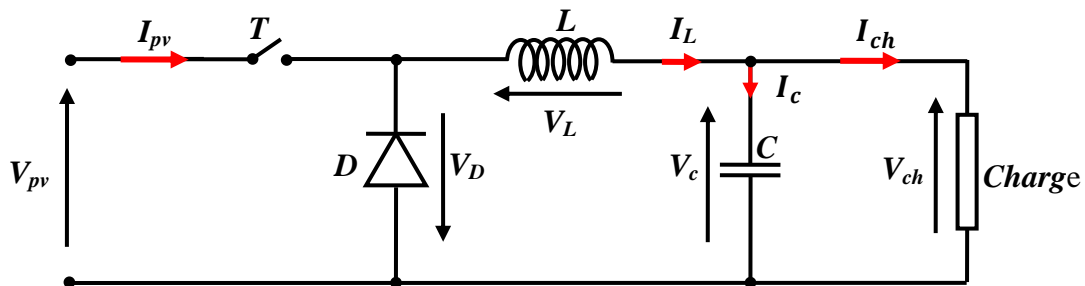


Figure III.5 : Convertisseur Buck (Hacheur sérié) [50].

C'est un convertisseur qui donne en sortie une tension plus petite que celle de l'entrée. Il est dit "hacheur abaisseur ou dévolteur". Le fonctionnement de ce convertisseur peut être divisé en deux phases suivant l'état de l'interrupteur **T**.

Dans la première phase, l'interrupteur **T** est fermé, la tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = V_{pv} - V_{ch}$ . Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux bornes de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse.

Dans la deuxième phase, l'interrupteur est ouvert et la diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = -V_{ch}$ . Le courant qui la traversant décroît linéairement aussi [50].

Les formes d'ondes en conduction continue sont représentées à la figure (III.6). En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, ce qui impose la relation suivante :

$$V_c = V_{ch} \dots \dots \dots (III.1)$$

La figure(III.6) montre les caractéristiques courant et tension du convertisseur Buck.

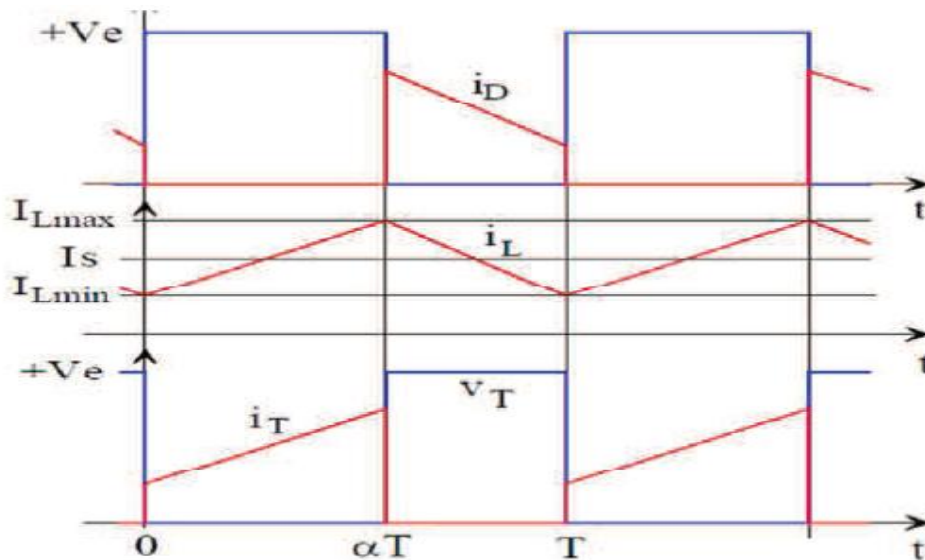


Figure III.6 : Signaux typiques du convertisseur Buck [45].

### III.2.2.2. Le convertisseur Boost (Hacheur parallèle)

C'est un convertisseur qui permet l'élévation de la tension de sortie. La structure du convertisseur élévateur est présentée sur la figure (III.8). Le fonctionnement de ce convertisseur peut être divisé en deux phases suivant l'état de l'interrupteur  $T$ .

La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type continu (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur  $T$  peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

On utilise un convertisseur boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue [45].

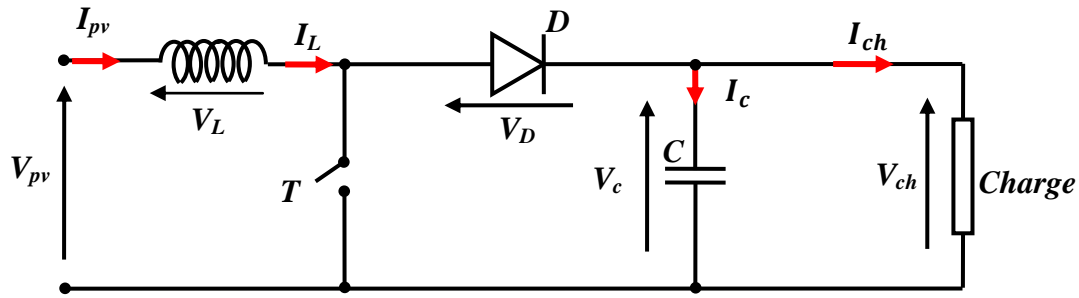


Figure III.7 : Schéma synoptique d'un hacheur survolteur « Boost » [50].

### III.2.2.3.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur **T**.

Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque l'interrupteur **T**, est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance et la tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = V_{pv}$ . Donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode **D** est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

Dans la deuxième phase, l'interrupteur est ouvert. Ceci génère une tension négative aux bornes de l'inductance pour empêcher la décroissance du courant, la diode devient passante, la tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = V_{pv} - V_{ch}$

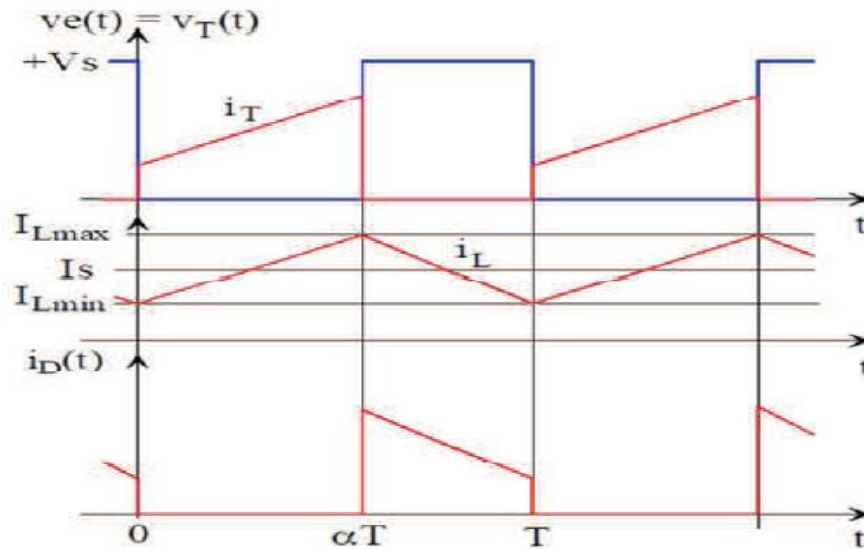
Dans cette phase la capacité de sortie se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par la tension d'entrée  $V_{pv}$ [53].

Donc la relation entre la tension de sortie et de l'entrée est donnée par :

$$\frac{V_c}{V_{pv}} = \frac{V_{ch}}{V_{pv}} \dots \dots \dots (III.2)$$

Les formes d'ondes en conduction continue sont représentées à la figure (III.6). En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, ce qui impose la relation suivante [53] :

La figure(III.9), représente les signaux typiques du convertisseur boost.



**Figure III.8 :** Signaux typiques de convertisseur Boost [50].

Le convertisseur Boost a montré un grand intérêt . En effet, son élévation de tension, son bon rendement, sa fiabilité et son coût faible sont des avantages déterminants [54].

Dans ce travail, nous allons nous intéresser au convertisseur *DC/DC* hacheur élévateur de tension dédié au système photovoltaïque. Le convertisseur sera piloté par commande MPPT.

### III.2.2.3. Le convertisseur Buck-Boost (hacheur à accumulateur inductif)

Le hacheur est un convertisseur (*DC/DC*) à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge). L'interrupteur *T* peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

C'est un convertisseur qui peut donner à sa sortie une tension supérieure ou inférieure à celle d'entrée suivant la valeur de rapport cyclique.

Le circuit du convertisseur Buck-boost DC/DC est montré sur le schéma figure (III.7). Il se compose d'un transistor de puissance utilisé comme commutateur contrôlable, d'un inducteur  $L$ , d'une diode  $D$ . Et d'un condensateur de filtre  $C$  et la résistance de charge  $R$  [46].

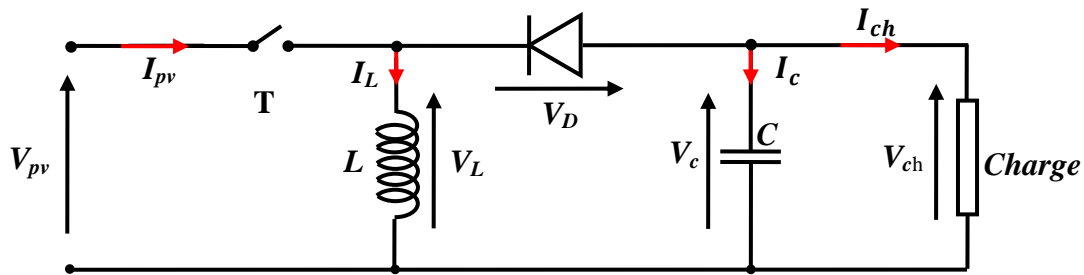


Figure III.9 : Convertisseur Buck-Boost [50].

### II.3. Modélisation du convertisseur boost (hacheur parallèle)

Le hacheur survolteur présenté sur la figure (III.8) est composé d'une inductance ( $L$ ) qui a pour rôle d'emmagasiner l'énergie électrique, d'une diode ( $D$ ), d'un condensateur ( $C$ ) de sortie afin de filtrer la tension, d'un interrupteur de puissance ( $T_p$ ) pour la commutation, et une charge ( $R$ ) [51].

#### III.2.3. Principe de fonctionnement

Nous allons diviser en deux phases distinctes le fonctionnement du hacheur survolteur selon l'état de l'interrupteur  $T$  (fermé/ouvert) [50].

- **De 0 à  $\alpha T$** : phase d'accumulation d'énergie

L'interrupteur est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode  $D$  est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation [50].

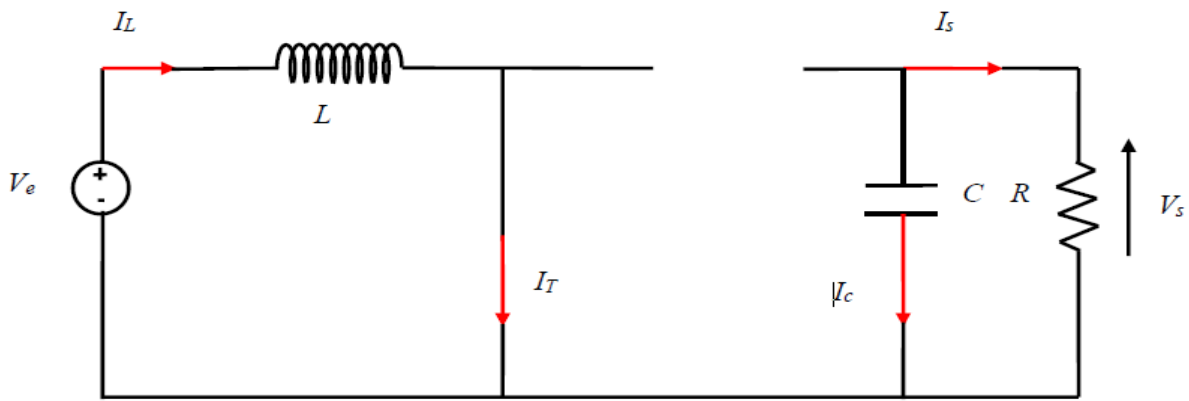


Figure III.10 : Schéma électrique du hacheur à la période  $[0, \alpha T]$ .

Le courant  $I_L$  évolue de la manière suivante :

$$\frac{V_e}{L} = \frac{di_{Lon}}{dt} \dots \dots \dots (III.5)$$

$$I_{Lon} = \int_0^{\alpha T} \frac{V_e dt}{L} = \frac{V_e}{L} t + cte \dots \dots \dots (III.6)$$

- De  $\alpha T$  à  $T$

L'interrupteur  $T_p$  est ouvert (état bloqué), l'inductance se trouve alors en série avec la source. Sa f.é.m. s'additionne à celle de la source (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse en suite la diode  $D$ , le condensateur  $C$  et la charge  $R$ . Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la charge [51].

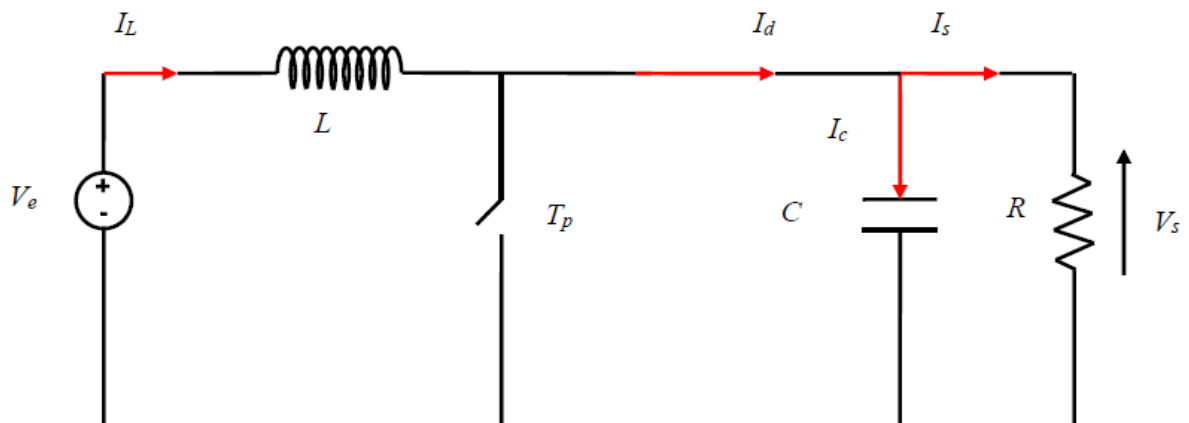


Figure III.11 : Schéma électrique du hacheur à la période  $[\alpha T, T]$ .

Si l'on considère une chute de tension nulle aux bornes de la diode, l'évolution de  $I_{Loff}$  se traduit comme suit [51] :

En considérant que le régime permanent est atteint, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} L I_L^2 \dots \dots \dots (III. 9)$$

Le condensateur est supposé suffisamment grand pour lisser la tension de la charge et la garder constante, la tension de cette dernière est donnée par :

$$V_{ch} = \frac{1}{1 - \alpha} V_{pv} \dots \dots \dots (III. 10)$$

On déduit la relation du courant suivante [51] :

$$I_{ch} = (1 - \alpha) I_{pv} \dots \dots \dots (III. 11)$$

En se basant sur l'expression (III.10), 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 théoriquement elle peut être infinie lorsque  $\alpha$  se rapproche de 1, c'est pour cela que l'on parle de survolteur.

#### II.4. Dimensionnement des composants du Hacheur boost

Dans cette partie, nous allons voir comment choisir les éléments qui permettent de réaliser et d'assurer le fonctionnement d'un hacheur survolteur.

Pour dimensionner les composants d'un hacheur élévateur, il faut connaître les grandeurs d'entrées et celles de la sortie (tension, courant et puissance) [52].

$$I_e = \frac{P_e}{V_e} \dots \dots \dots (III. 12)$$

Soit :

$$I_{emax} = \frac{P_{emax}}{V_{emax}} \dots \dots \dots (III.13)$$

$dI = 15\%$  afin de diminuer les pertes par hystérésis.

$$dI = 0.15I_{emax} \dots \dots \dots (III.14)$$

### III.4.1. Dimensionnement de l'inductance

La détermination de la bobine est importante pour un bon fonctionnement, car une inductance trop faible ne permettrait pas le fonctionnement de la carte de puissance et une inductance trop forte provoquerait d'importantes pertes de puissance par effet joule. Son dimensionnement se fait de telle sorte à minimiser l'ondulation du courant. L'allure de ce courant est représentée par la figure (III.12) [51].

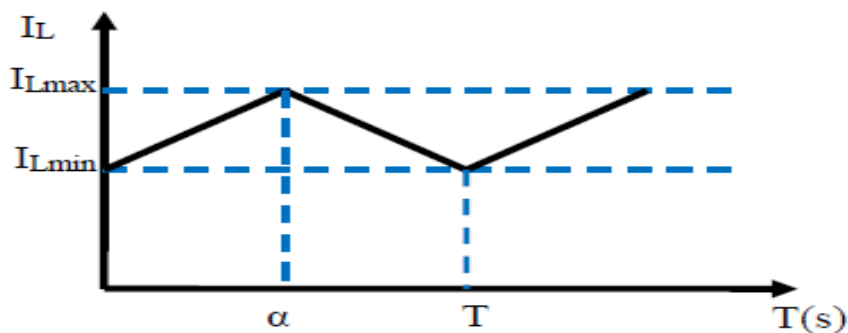


Figure III.12 : Allure du courant de la bobine [51].

#### III.4.1.1. Le choix du tore

Le tore choisi est en ferrite, il permet de réduire les pertes à température élevée et sa fréquence d'utilisation est comprise entre 10KHZ et 100KHZ, il faut également prévoir un tore avec un diamètre suffisamment grand pour faire passer le nombre souhaité de spire.

Le calcul de l'inductance débute par le calcul du courant d'entrée maximal.

On impose la fréquence de découpage en haute fréquence et on vérifie si l'ondulation de courant est correcte en basse fréquence.

Après calcul, l'inductance peut se trouver dans le marché ou bien être fabriquée [53].

### III.4.1.2. Calcul de l'inductance L

On dimensionne L ainsi :

$$I_{Lmax} = \frac{V_e}{L} \alpha T = \frac{V_e}{Lf} \alpha_{max} \dots \dots \dots (III. 15)$$

$$\Delta I = \frac{V_e}{Lf} (1 - \alpha) \alpha T \dots \dots \dots (III. 17)$$

$$\Delta I_{max} = \frac{V_e}{Lf} \dots \dots \dots$$

$$L = \frac{\alpha V_e}{f \Delta I} \dots \dots \dots (III. 18)$$

**dl** : L'ondulation de courant.

**f** : La fréquence de commutation.

Pour dimensionner l'inductance L, il faut connaître le courant et la tension d'entrée de convertisseur ainsi que sa puissance [53].

$$V_e(\text{tension d'entrée}) = 21.9V ,$$

$$P_e(\text{puissance d'entrée}) = 80W ,$$

$$\alpha(\text{le rapport cyclique}) = \frac{1}{2} .$$

D'après l'équation (III.10) ,  $V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e$ , donc  $V_s = 2V_e = 43.8V$ .

On Calcule  $I_{emax}$  de l'équation (III.13),  $I_{emax} = \frac{P_{emax}}{V_{emax}} = \frac{80}{21.9} = 3.65 A$ .

Si on impose une fréquence de découpage de 100 kHz.

De l'équation (III.14),  $dl = 0.15 I_{emax} = 0.15 * 3.65 = 0.55A$ .

De l'équation (III.18),  $L = \frac{0.5 \cdot 17.5}{100 \cdot 10^3 \cdot 0.55} = 0.16 \text{mH}$ .

Donc  $L=0.16\text{mH}$ .

### III.4.1.3. Calcul du nombre de spire

L'expression (III.16), nous permet de calculer le nombre de spire de la bobine :

$$L = N^2 AL \dots\dots\dots (III.19)$$

Donc :

$$N = \sqrt{\frac{L}{AL}} \dots\dots\dots (III.20)$$

Avec :

$L$  : inductance en  $mH$ ,

$N$  : nombre de tours,

$AL$  : inductance du tore par tours carrés en  $nH/tr^2$ [52].

Pour notre cas nous allons utilisé le logiciel « *Coil32 v11* », on lui donnant les paramètres du TOR (diamètre et hauteur), il nous a permis de calculer le nombre de spire et la longueur du fil nécessaire pour avoir l'inductance souhaité. L'interface de ce logiciel est représentée sur la figure (III.13).

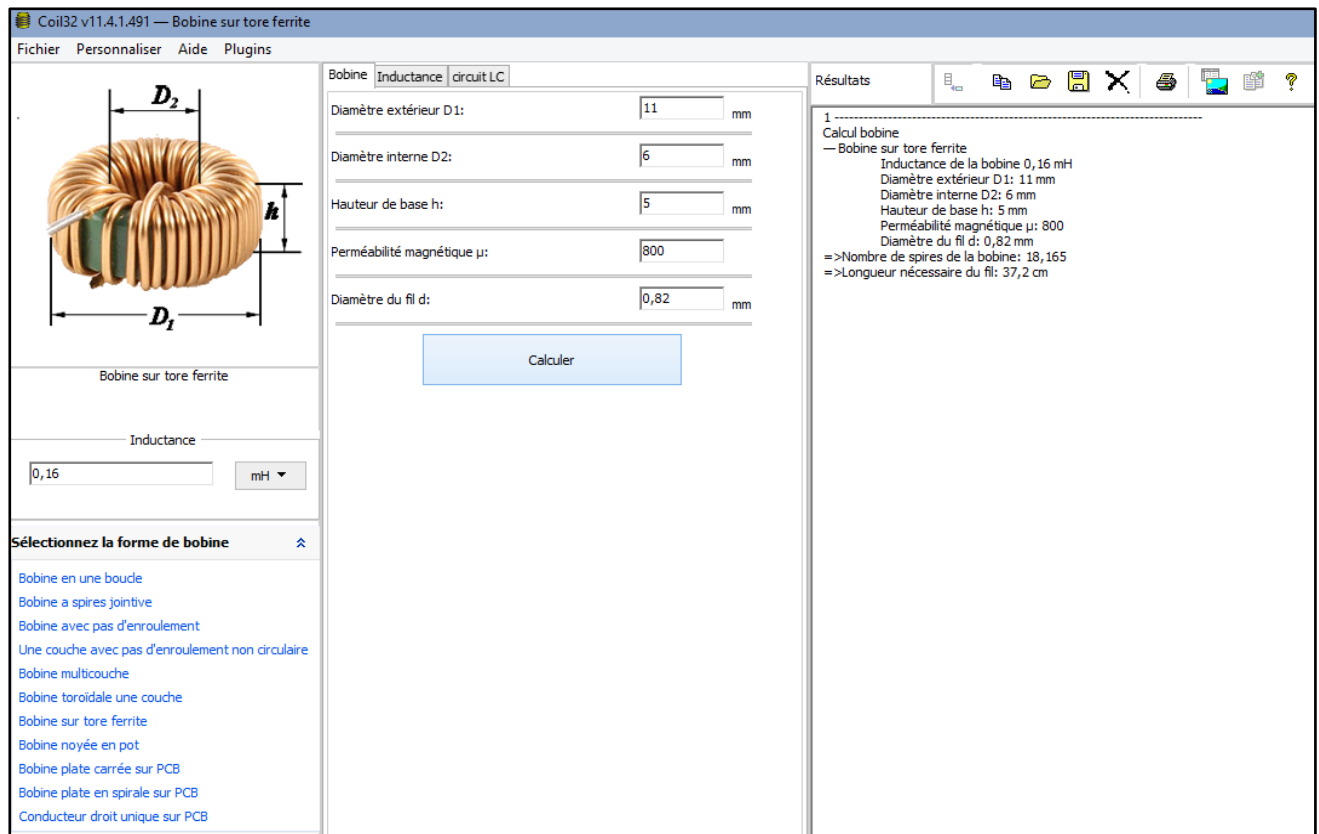


Figure III.13 : Logiciel utilisé pour le calcul du nombre de spires.

### III.4.2. Dimensionnement du condensateur de filtrage.

On impose la fréquence de découpage en haute fréquence et on vérifie si l’ondulation du courant est correcte.

#### III.4.2.1. Calcul de la capacité C

On dimensionne C ;

La charge fournie est donnée par [53] :

$$dQ = I_s \alpha T \dots \dots \dots (III. 21)$$

On admet une ondulation de tension :

$$dV_s = \frac{dQ}{C} \dots \dots \dots (III. 22)$$

Donc :

$$C = \frac{dQ}{dV_s} = I_s \alpha \frac{1}{dV_s f} \dots \dots \dots (III.23)$$

Un condensateur de sortie doit avoir une capacité suffisante pour obtenir une tension de sortie continue fixe et acceptable.

Il est nécessaire de placer un condensateur en entrée qui à le rôle de filtrer la tension a la sortie du générateur [51].

### III.4.3. Choix des composant électronique

#### III.4.3.1. Choix de la diode

La diode utilisée doit être extrêmement rapide. Des pertes par recouvrements inverses sont générées par ses diodes, en conséquence, plus elles seront rapides, moins il y aura des pertes.

#### III.4.3.2. Choix du transistor MOFET

Le choix de l'interrupteur de puissance se fait selon des différents facteurs comme la fréquence et la puissance. Nous nous basons sur la figure (III.14) pour la justification de ce choix. On constate que les IGBTs supportes des grandes valeurs de tension et de courant qui peuvent atteindre jusqu'à 1500A et 4500V sous une fréquence de 35 KHz, Contrairement au MOSFET qui atteint 50A et 500V. Du point de vue fréquence, le MOSFET a tendance à opérer dans des hautes fréquences (200 KHz) [52].

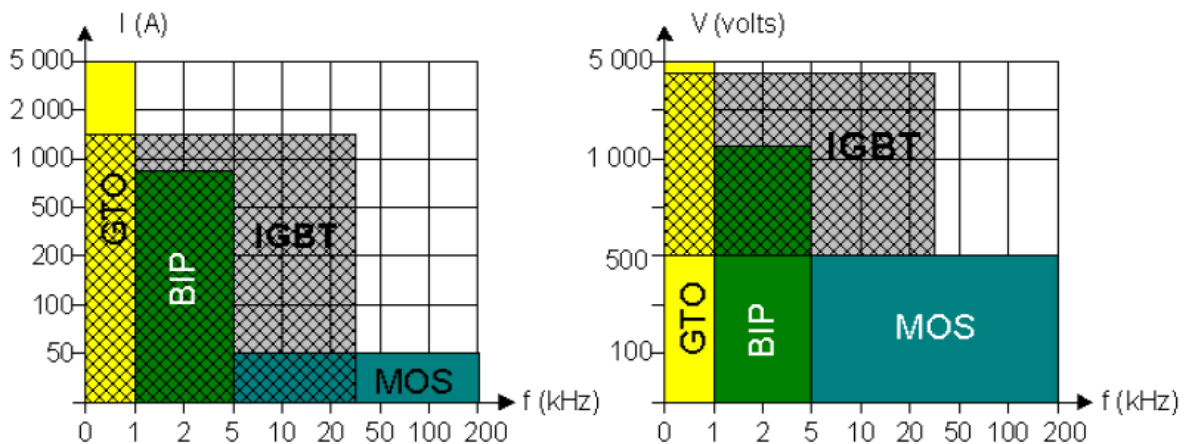


Figure III.14 : Caractéristique des interrupteurs de puissance [52].

### III.5. Evaluation des performances du hacheur survolteur (Boost)

Après rappeller des différentes équations du hacheur survolteur, nous allons simuler son comportement sur le logiciel *PSIM* dédié à la simulation des convertisseurs d'électronique de puissance. Le montage est représenté sur la figure (III.15), nous allons effectuer des tests pour voir l'évolution de ses signaux d'entrée et de sortie pour différents rapports cycliques  $\alpha$ .

#### III.5.1. Simulation avec le logiciel PSIM

Nous allons simuler le schéma bloc de la figure(III.15) avec variation du rapport cyclique on agissant sur G1, nous avons choisi trois rapports cyclique **0.3**, **0.5** et **0.8**.

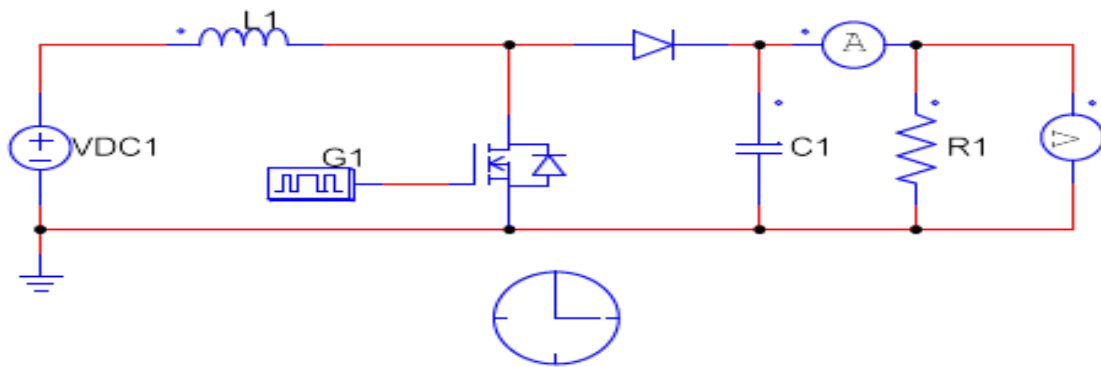


Figure III.15 : Bloc de simulation de hacheur Boost.

Les resultats de simulation sont données sur les figures suivants :

Les figures III.16 et III.17 illustres les allures de la tension et du courant pour  $\alpha = 0.3$

✚ Pour un rapport cyclique  $\alpha = 0.3$

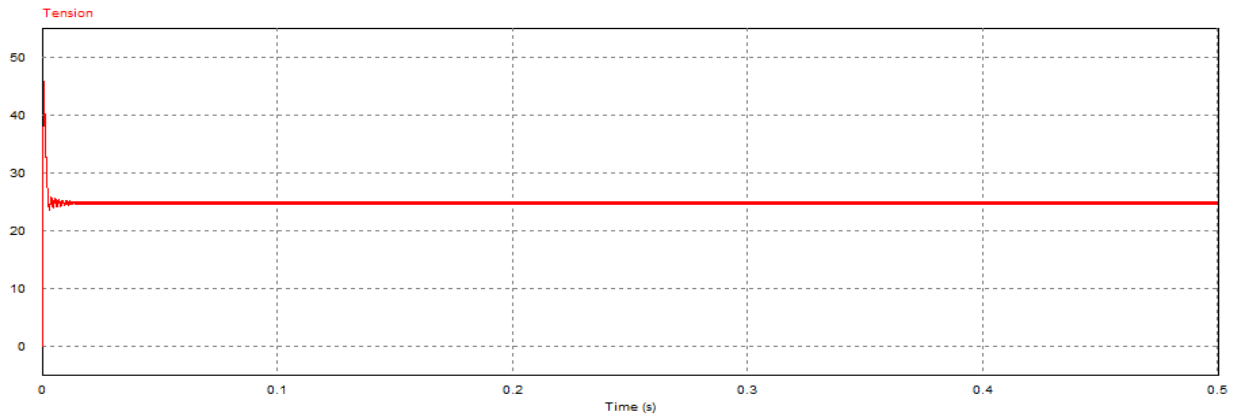


Figure III.16 : Allure de la Tension de sortie pour  $\alpha = 0.3$ .

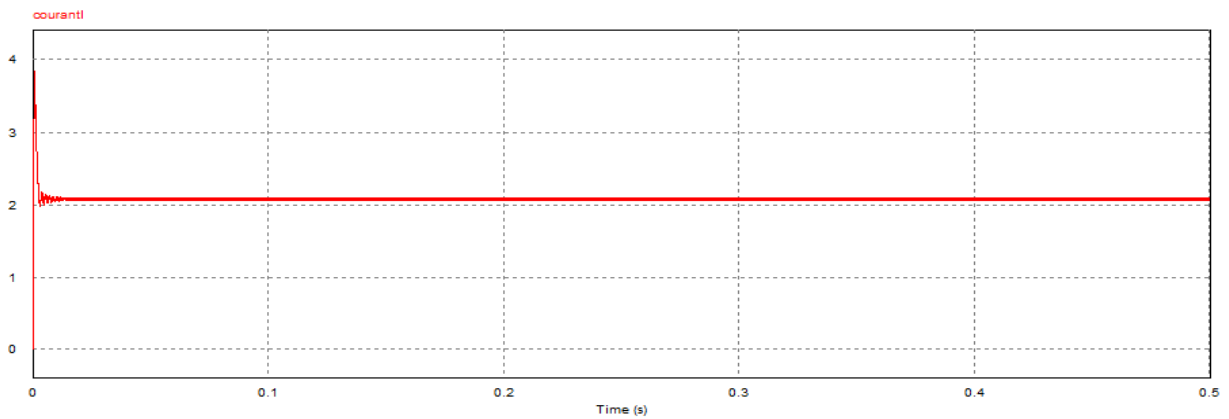


Figure III.17 : Allure du Courant de sortie  $\alpha = 0.3$ .

Les figures (III.18) et (III.19) représentent les allures de la tension et du courant pour un rapport cyclique  $\alpha = 0.5$ .

✚ Pour un rapport cyclique  $\alpha = 0.5$

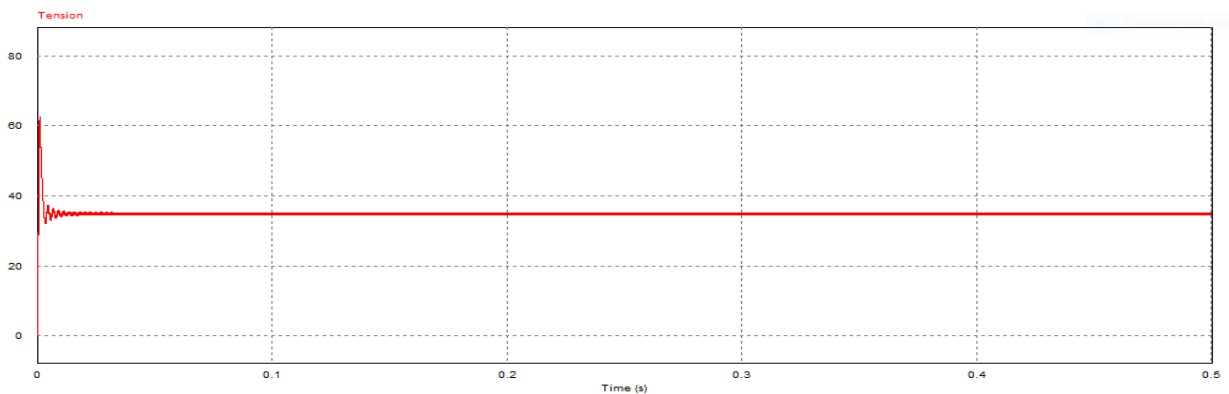


Figure III.18 : Allure de la Tension de sortie pour  $\alpha = 0.5$

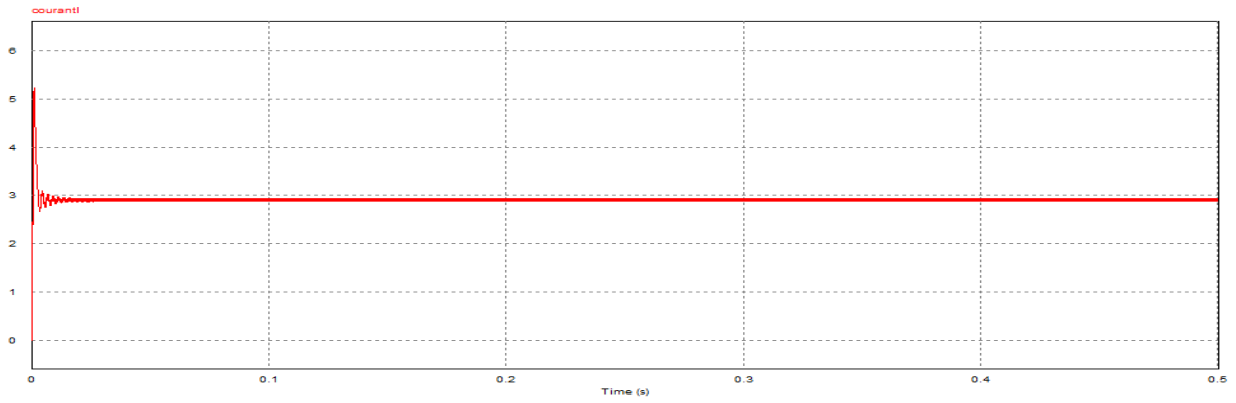


Figure III.19 : Allure du Courant de sortie  $\alpha = 0.5$ .

Les figures III.20 et III.21 représentent les allures de la tension et du courant de sortie de hacheur boost pour un rapport cyclique  $\alpha = 0.8$ .

**✚ Pour un rapport cyclique  $\alpha = 0.8$**

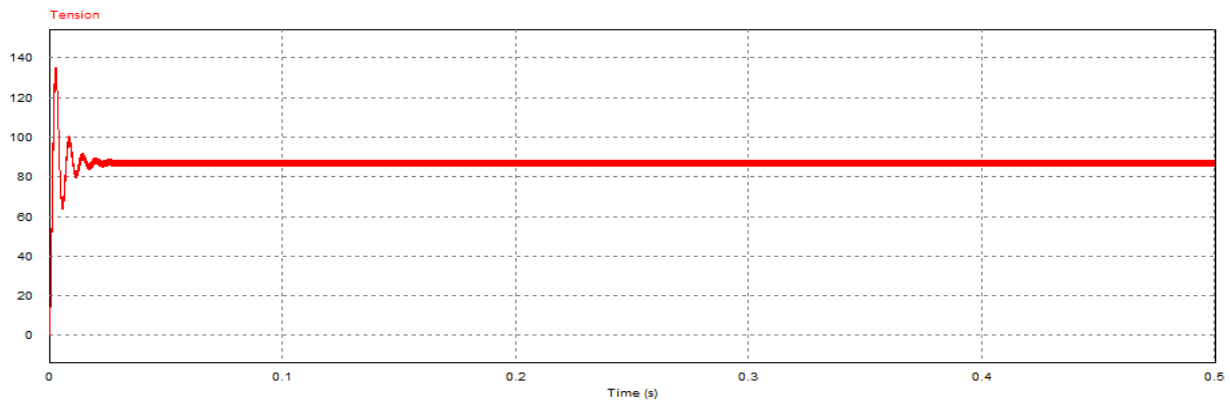


Figure III.20 : Allure de la Tension de sortie pour  $\alpha = 0.8$

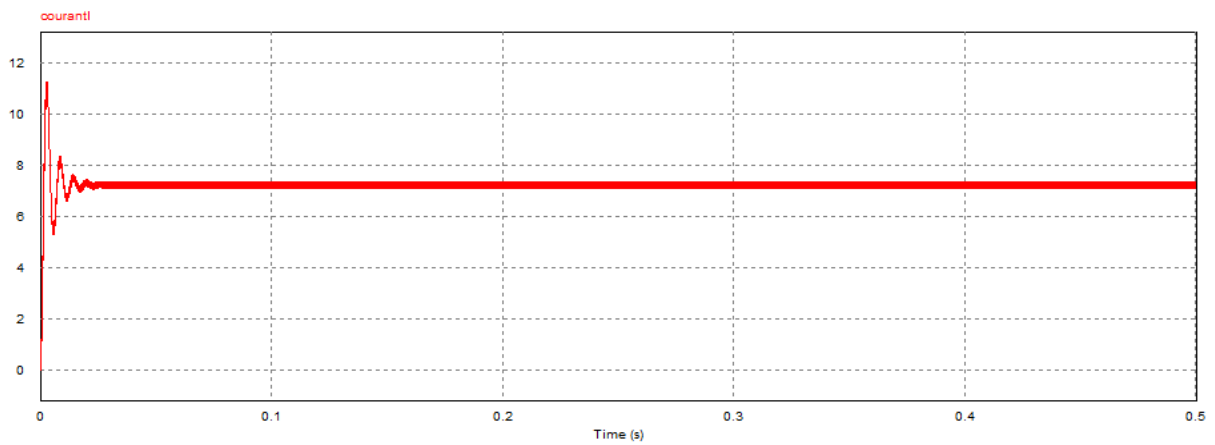


Figure III.21 : Allure de Courant de sortie pour  $\alpha = 0.8$ .

### III.5.2. Discussion des résultats

Les figures (III.16) et (III.17), illustrent la tension et le courant de sortie du hacheur Boost pour un rapport cyclique  $\alpha = 0.3$ .

On constate que la tension de sortie du hacheur boost est supérieure à la tension d'entrée, donc l'allure de la tension de sortie répond à l'équation de fonctionnement du hacheur boost  $V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e$ , le courant de sortie du hacheur boost diminue, d'après l'équation (III.11).

Les figures (III.18) et (III.19), illustrent la tension et le courant de sortie de hacheur boost pour un rapport cyclique  $\alpha = 0.5$ .

On constate que la tension de sortie est doublée, contrairement au courant de sortie du hacheur, l'amplitude de ce dernier est divisée par deux.

Les figures (III.20) et (III.21), représente la tension et le courant de sortie du hacheur boost pour un rapport cyclique  $\alpha = 0.8$ .

On remarque que la tension de sortie du hacheur boost a augmentée. En revanche, le courant de sortie de hacheur boost diminue, selon l'équation (III.11).

On constate que la tension de sortie du hacheur boost est proportionnelle au rapport cyclique  $\alpha$ , contrairement au courant de sortie du hacheur boost qui est inversement proportionnel au rapport cyclique  $\alpha$ .

### III.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude des convertisseurs statiques *DC/DC* (hacheur), les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Nous avons rappelé les différents convertisseurs tel que, les onduleurs et hacheurs (*Buck, Buck-Boost, Boost*), nous avons choisi le hacheur élévateur de tension, car il est très simple et permet d'augmenter les tensions des systèmes photovoltaïques. Afin de dimensionner et calculer les composants du hacheur élévateur, nous avons effectué la simulation de ce dernier.

Nous avons présenté les résultats de simulation avec différents rapports cyclique, à partir desquels, nous avons constaté que la tension de sortie du hacheur Boost et inversement proportionnelle au rapport cyclique  $\alpha$ .

Dans ce que suit, nous allons regrouper le système photovoltaïque étudié dans les chapitres précédent, afin d'effectuer quelques simulations et voir son comportement dans des conditions météorologiques constantes puis variables.

The page features several decorative elements: a large blue circle with a gradient in the top right, a smaller similar circle in the middle right, and another large blue circle with a gradient in the bottom right. Thin blue lines intersect at the top left and bottom right corners. A horizontal grey line is positioned below the word 'CHAPITRE'.

CHAPITRE

*Commande P.O d'un  
système PV*



## IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons simuler le comportement d'un système photovoltaïque avec la commande de maximisation de puissance perturber et observer (*P&O*), le système est composé d'un module photovoltaïque, un convertisseur élévateur de tension et une charge résistive.

L'étude du comportement du système proposé sera faite sous plusieurs conditions météorologiques à savoir conditions constantes et variables. Durant les conditions constantes, trois tests sous *MATLAB/Simulink* seront effectués sous un ensoleillement faible, moyen et fort. Sous conditions variables un profil d'ensoleillement et de température sera choisi afin d'étudier le comportement de la commande de maximisation de puissance. Les résultats de simulation seront présentés et discutés.

## IV.2. Description du système étudié

Dans ce travail, nous avons choisi d'étudier un système photovoltaïque avec commande de maximisation de puissance. Pour cela, un hacheur élévateur dimensionné dans le chapitre trois est utilisé pour assurer un bon transit de puissance entre la source et la charge.

Le système choisi est représenté sur la figure (*IV.1*), il est composé de :

- Un module photovoltaïque de type « *SUNTECH STP80S-12* » d'une puissance crête de **80W**.
- Un hacheur élévateur (boost) de tension dimensionné dans le chapitre trois.
- Une commande de maximisation de puissance de type *P&O*, pour avoir le maximum de puissance du générateur photovoltaïque.
- Une charge résistive.

La figure (*IV.1*) représente le schéma synoptique du système photovoltaïque étudié.

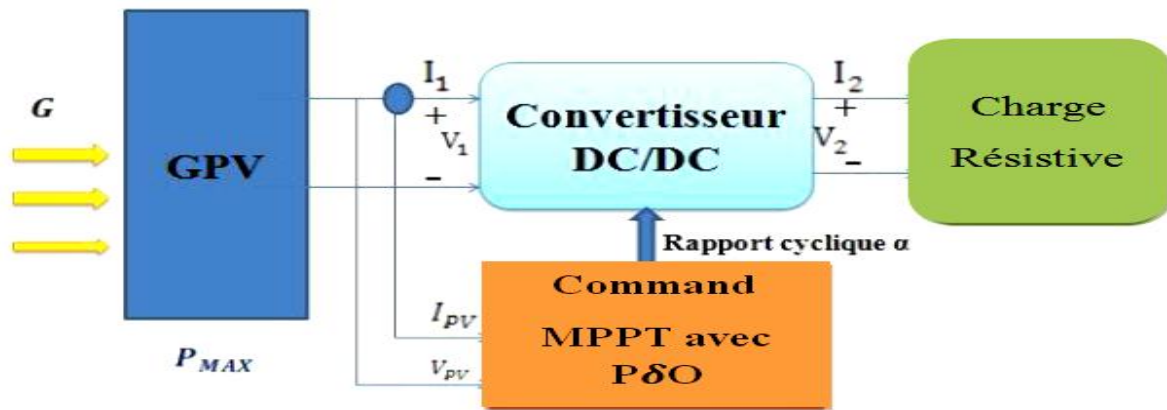


Figure IV.1 : Schéma synoptique du système photovoltaïque global.

### IV.2.1. Paramètres du système étudié

Le tableau (IV.1) représente les différents paramètres des composants du système photovoltaïque étudié.

<i>Le module photovoltaïque</i>		<i>Le convertisseur DC/DC</i>		<i>La charge</i>	
<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>
$P_{max}$	80 W	$V_e$	21.6 V	<b>R</b>	<b>12 Ω</b>
$I_{ppm}$	4.65 A	$V_s$	43.8 V		
$V_{ppm}$	17.5 V	$\alpha$	0.1 - 0.9		
$I_{cc}$	5 A	$P_e$	80 W		
$V_{co}$	21.6 V	$L$	0.16 mH		
		$C$	200 μF		

Tableau IV.1 : Paramètres du système étudié.

### IV.3. Simulation à paramètres constants

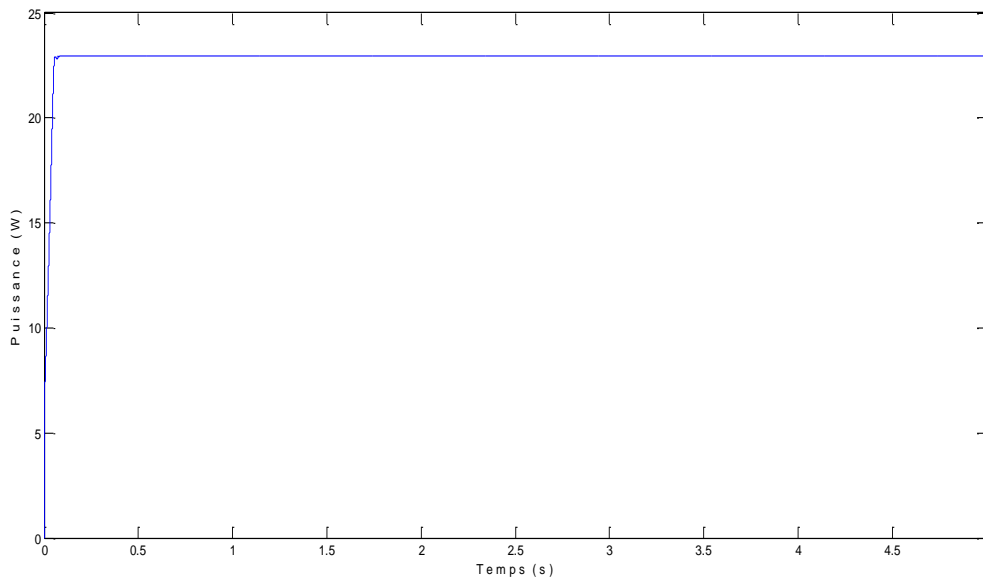
Dans cette partie, trois tests sous *MATLAB/Simulink* seront effectués, nous avons choisi d'étudier le comportement de ce système a faible, moyen et fort ensoleillement comme le montre le tableau suivant :

<i>Tests</i>	<i>Conditions météorologiques</i>	
	<i>Ensoleillement (W/m<sup>2</sup>)</i>	<i>Température (C°)</i>
<i>Test N°1</i>	300	25
<i>Test N°2</i>	500	27
<i>Test N°3</i>	900	30

**Tableau IV.2 :** Paramètres de simulation sous conditions constantes.

### IV.3.1. Test N°1 : Pour un faible ensoleillement

Afin de visualiser la réponse de la puissance et la caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour un **faible** ensoleillement, nous allons simuler le système photovoltaïque en faisant fixer l'ensoleillement à **300 W/m<sup>2</sup>** et la température à **25°C**. Les résultats de la simulation sont représentés sur les figures (IV.2) et (IV.3).



**Figure IV.2 :** Réponse de la puissance pour un faible ensoleillement.

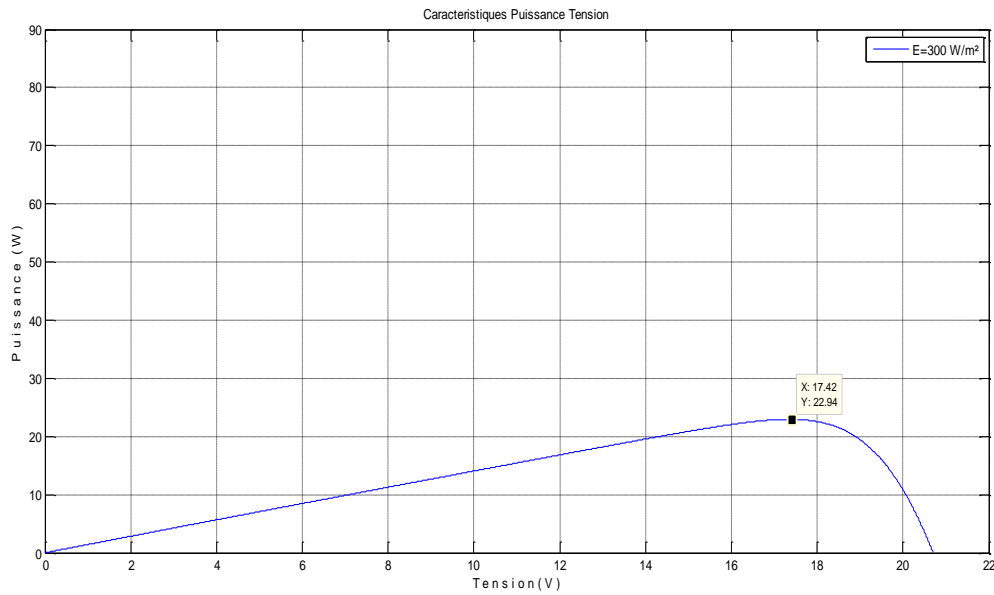


Figure IV.3 : Caractéristiques **puissance-tension** à faible ensoleillement.

On remarque que la réponse de la puissance obtenue à faible ensoleillement est stable et atteint le point de puissance maximal.

### IV.3.2. Test N°2 : Pour un moyen ensoleillement

Afin de visualiser la réponse de la puissance et la caractéristique  $P_{pv} = f(V_{pv})$  pour un **fort** ensoleillement, nous allons simuler le système photovoltaïque en faisant fixé l'ensoleillement à **500 W/m<sup>2</sup>** et la température à **27°C**. Les résultats de la simulation sont représentés sur les figures (IV.4) et (IV.5).

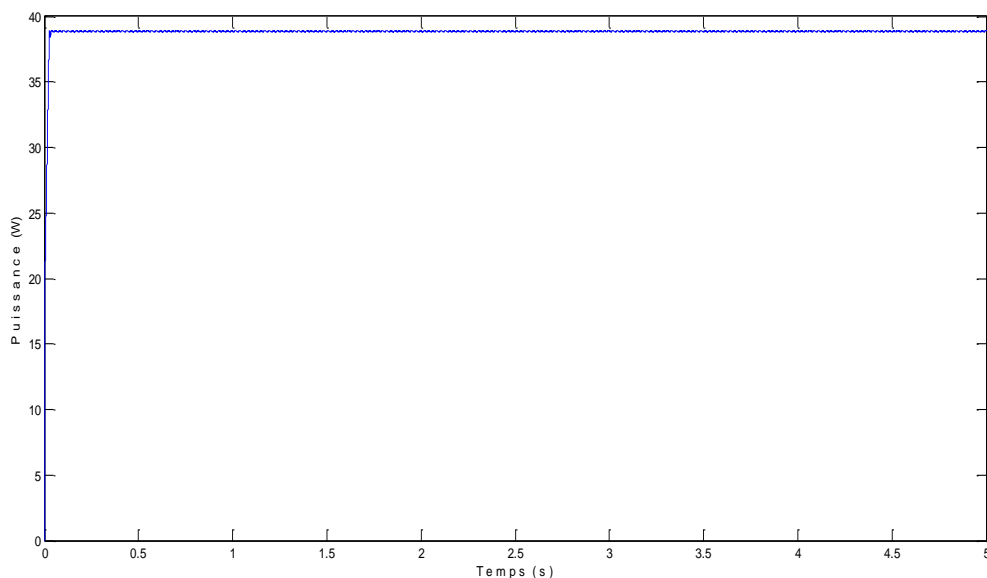
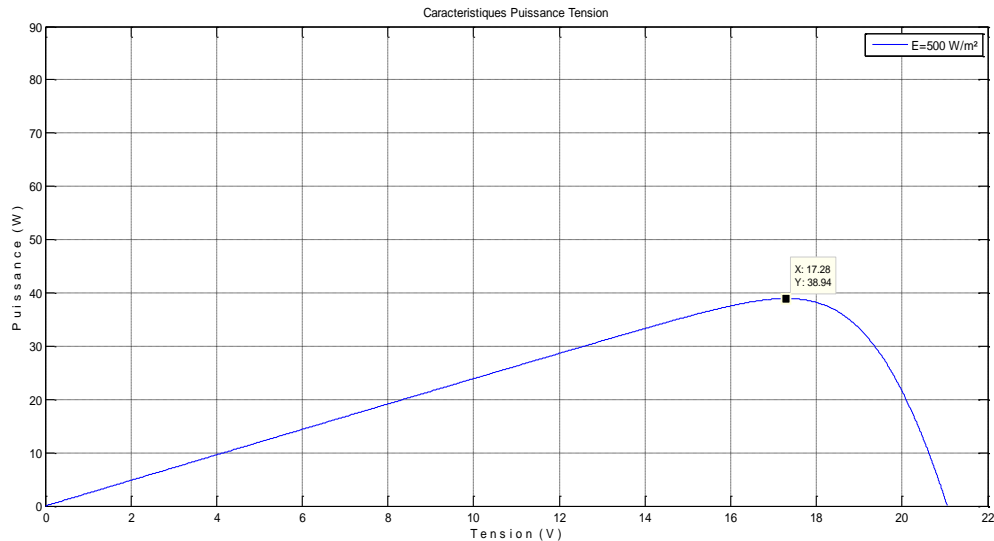


Figure IV.4 : Réponse de la puissance pour un moyen ensoleillement.

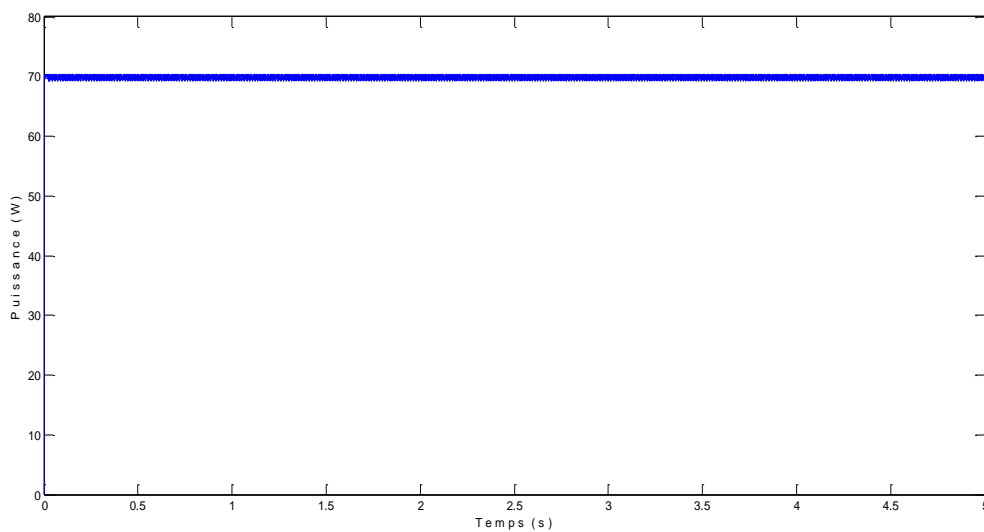


**Figure IV.5 :** Caractéristiques **puissance-tension** à un moyen ensoleillement.

On remarque que la réponse de la puissance obtenue à moyen ensoleillement est stable et atteint une puissance de **38 W** puis reste constante sur le point de puissance maximal.

### IV.3.3. Test N°3 : Pour un fort ensoleillement

Afin de visualiser la réponse de la puissance et la caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  pour un **fort** ensoleillement, nous allons simuler le système photovoltaïque en faisant fixé l'ensoleillement à **900 W/m<sup>2</sup>** et la température à **30°C**. Les résultats de la simulation sont représentés sur les figures (IV.6) et (IV.7).



**Figure IV.6 :** Réponse de la puissance pour un fort ensoleillement.

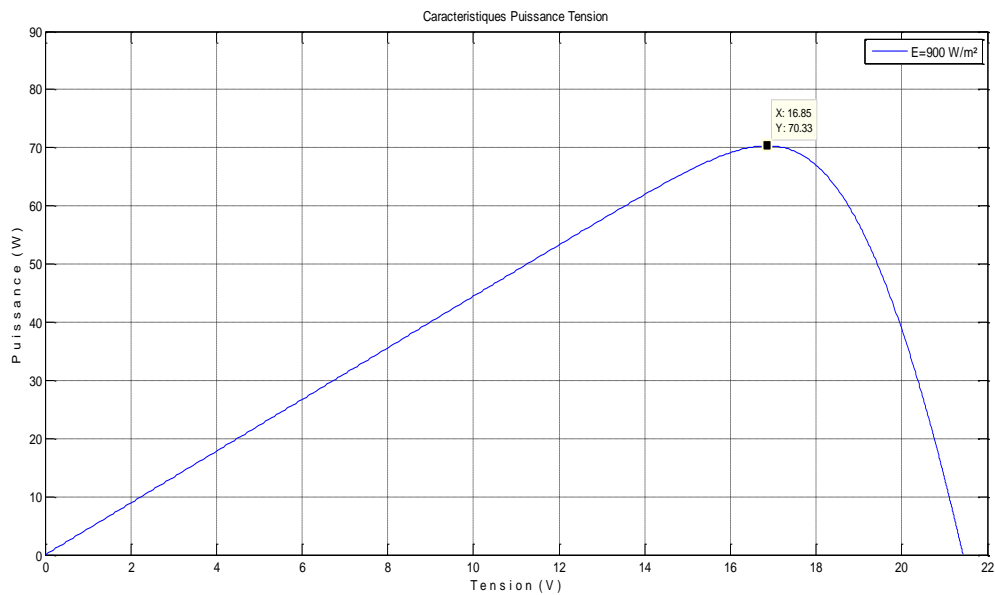


Figure IV.7 : Caractéristiques **puissance-tension** pour un fort ensoleillement.

On remarque que la réponse de la puissance obtenue à fort ensoleillement est stable et atteint une puissance de **70 W** puis reste constante sur le point de puissance maximal.

Le tableau (IV.3) récapitule toutes les valeurs de puissance obtenues lors de la simulation pour le système photovoltaïque étudié.

$E$ (W/m <sup>2</sup> ) $P$ (W)	<i>Faible ensoleillement</i>	<i>Moyen ensoleillement</i>	<i>Fort ensoleillement</i>
	<i>Test N°1</i>	<i>Test N°2</i>	<i>Test N°3</i>
$P$	Le système photovoltaïque se compose de modèle « <i>SUNTECH STP80S-12</i> »		
	<b>80 W</b>		
$P_{max}(caractéristiques)$	<b>22.940 W</b>	<b>38.940 W</b>	<b>70.330 W</b>
$P_{max}(MPPT)$	<b>21.8 W</b>	<b>37.5 W</b>	<b>69 W</b>
$\eta$ (%)	<b>95.46</b>	<b>96.30</b>	<b>98</b>

Tableau IV.3 : Les différentes valeurs obtenues lors de la simulation.

Dans le tableau (IV.3), nous avons relevé les différentes puissances obtenus pendant les trois tests effectués en simulation, puis calculé le rendement de la commande de maximisation de puissance (**P&O**).

Avec :

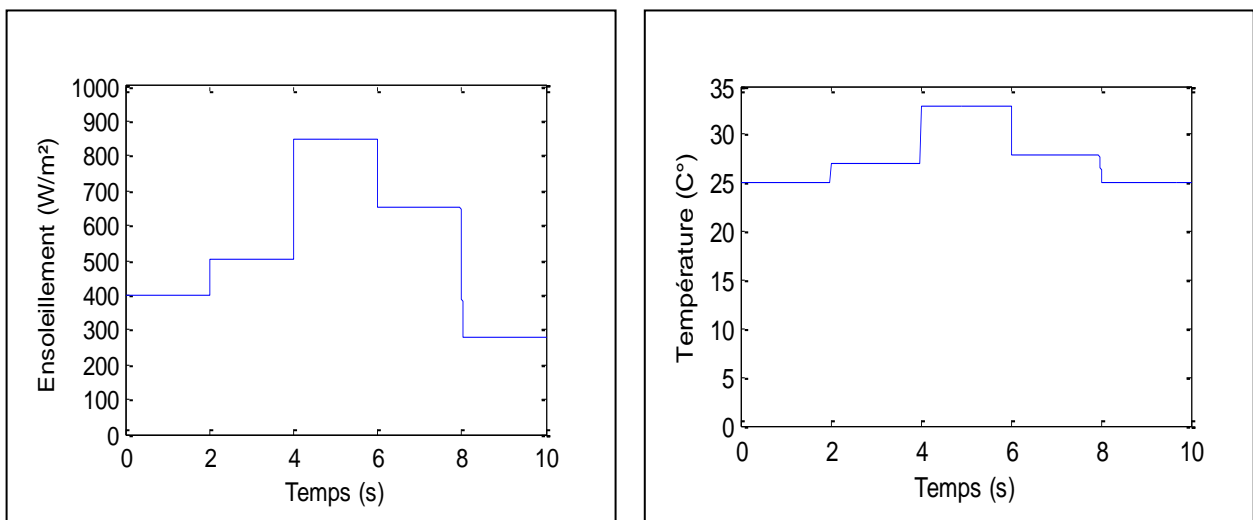
- $P_{max}$  (**caractéristiques**) : représente la puissance maximale obtenue sur les caractéristiques électrique  $P = f(V)$ .
- $P_{max}$  (**MPPT**) : représente la puissance maximale obtenue avec l'application de la commande **MPPT (P&O)**.
- $\eta$  (%) : représente le rendement de la commande **P&O** calculé avec la formule suivante :

$$\eta (\%) = \frac{P_{\max} (\text{MPPT})}{P_{\max} (\text{caractéristiques})} \dots \dots \dots (IV. 1)$$

On constate que la commande **MPPT (P&O)** a atteint la puissance maximale avec des rendements acceptables. On remarque aussi que la commande **MPPT (P&O)** répond avec un rendement intéressant sous des forts ensoleillements.

#### IV.4. Simulation à paramètres variables

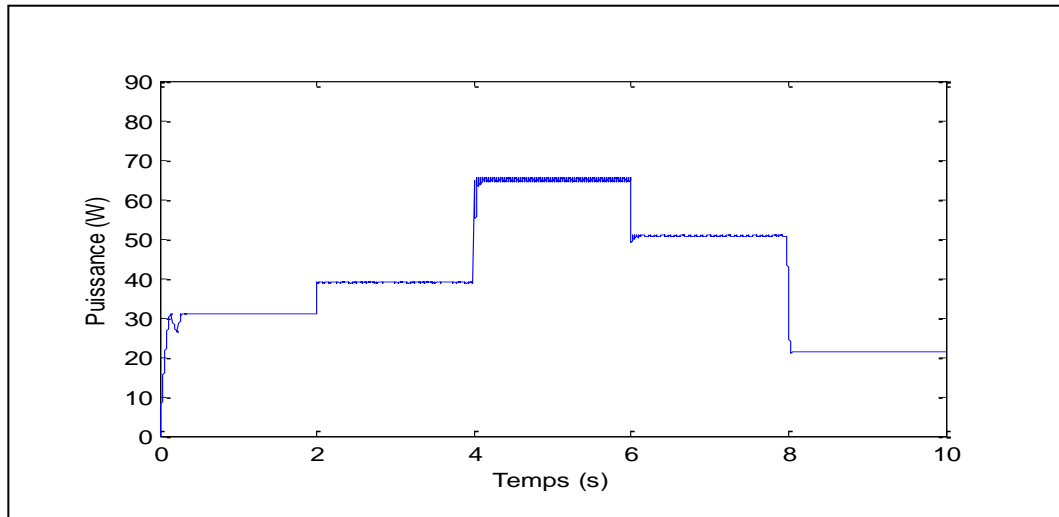
Les conditions variables de simulation ensoleillements et températures sont données par la figure (IV.8).



**Figure IV.8** : Profils ensoleillement et température en fonction du temps.

Afin de visualiser la réponse de la puissance pour un ensoleillement et température variables en fonction du temps, nous allons simuler le système photovoltaïque sous les profils variables d'ensoleillements et de températures présentés sur la figure (IV.8).

Les résultats de la simulation sont représentés sur la figure (IV.9), qui présente la variation de la puissance introduite par le système photovoltaïque à des conditions météorologique variables en fonction du temps.



**Figure IV.9 :** Réponse de la puissance pour un ensoleillement et température variables.

Sous un profil variable d'ensoleillement et de température, on constate que l'intervention de la commande *MPPT (P&O)* garde la puissance maximale. Donc à la sortie du système photovoltaïque on obtient un rendement maximal.

## IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé le système photovoltaïque global contrôlé par la commande de maximisation de puissance perturber et observer (*P&O*), avec des paramètres météorologiques constants puis variables. Ensuite, nous avons relevés les réponses des puissances de sortie du système pour différentes conditions météorologiques (faible, moyen et fort ensoleillement).

Les résultats de simulation nous ont permis de déduire que la puissance transmise d'un module photovoltaïque vers la charge à paramètres constants et/ou variables atteint sa valeur maximale, car l'intervention de la commande *MPPT* maintien la puissance toujours maximale, donc l'utilisation d'une technique *MPPT*, nous a permis d'avoir le maximum de puissance d'une installation photovoltaïque.



The background features a white page with three blue circular elements of varying sizes. Each circle is composed of three concentric rings: a dark blue inner circle, a medium blue middle ring, and a light blue outer ring. Two thin, light blue lines intersect at a point in the upper left, forming a V-shape that frames the top and right sides of the text. The text is centered within this V-shape.

*Conclusion  
générale*

### **Conclusion générale**

Dans le domaine des convertisseurs statiques, l'intérêt de l'industrie en matière d'électronique de puissance et les demandes correspondantes aux convertisseurs *DC/DC* ont eu une croissance exponentielle. L'utilisation des convertisseurs *DC/DC* pour des différentes applications devient de plus en plus importante. Les domaines sont principalement l'industrie automobile (avec l'apparition de véhicules hybrides et électriques), l'aéronautique (l'avion électrique), le domaine ferroviaire, les énergies renouvelables (panneaux solaires photovoltaïques, éoliennes).

L'objectif de ce mémoire est l'étude et le dimensionnement d'un convertisseur dédié aux systèmes photovoltaïques. Nous avons vu dans la première partie de cette présentation l'évolution ainsi que les voies de progrès qui subsistent encore dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque. Nous avons aussi présenté les matériaux constituant les cellules photovoltaïques et les différents couplages entre un générateur photovoltaïque et une charge électrique. En effet ce type de système souffre toujours du problème de transfert de puissance du générateur vers la charge qui est souvent très loin des possibilités du générateur. Dans ce manuscrit, nous avons abordé la chaîne de conversion photovoltaïque qui est constitué d'un étage d'adaptation optimisé avec une techniques de commandes qui offrent la possibilité d'opérer à des points de puissance maximale et de meilleurs rendements.

Nous avons commencé notre travail par des généralités sur les énergies renouvelables qui se présentent comme une solution idéal pour remédier au réchauffent climatique. Dans cette même partie nous avons vu que l'énergie solaire photovoltaïque se présente comme une énergie prometteuse pour l'avenir, car elle est disponible partout. Nous nous sommes aussi intéressés au mode de productions d'électricité à partir du soleil, en utilisant une cellule photovoltaïque qui est fabriquée à partir de matériaux semi-conducteur, le silicium. On a terminé ces généralités par les modes de connexions possibles entre la source photovoltaïque et la charge.

Dans la deuxième partie de ce travail, nous avons présenté la caractérisation du module photovoltaïque *SUNTECH-STP80S-12*. Nous avons commencé par la présentation des équations et des modèles mathématiques du plus simple au plus élaboré, ensuite, nous sommes passés à la simulation du modèle le plus proche de la réalité sous *MATLAB/Simulink*. À cet effet, nous avons pu montre que :

- Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque varient en fonction de l'ensoleillement et la température.

Dans la troisième partie de ce travail, nous avons présenté, les convertisseurs statiques les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques, ainsi que l'étude et dimensionnement du convertisseur élévateur de tension (hacheur Boost). Ensuite, la modélisation et la simulation du convertisseur avec variation du rapport cyclique. Les résultats obtenus ont permis de montrer :

- La tension de sortie du hacheur élévateur est proportionnelle au rapport cyclique  $\alpha$ , contrairement au courant de sortie du hacheur boost qui est inversement proportionnel au rapport cyclique  $\alpha$ .

La dernière partie présentée dans notre manuscrit s'intéresse à l'étude du système photovoltaïque dans des conditions météorologiques constantes puis variables avec commande de maximisation de puissance perturber et observer (*P&O*) qui délivre un rapport cyclique optimal, qui permet le fonctionnement du générateur photovoltaïque à sa puissance maximale. Dans ce contexte, quelques simulations ont été effectuées est ont permis de montrer que :

- L'utilisation d'une technique *MPPT*, nous permis d'avoir le maximum de puissance d'une installation photovoltaïque.
- L'utilité d'insérer un étage d'adaptation avec une technique de maximisation de puissance entre le générateur photovoltaïque et la charge.

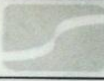



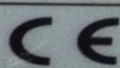
Ces premiers résultats très encourageants nous motivent encore plus à poursuivre des recherches sur le même axe.

Nous nous sommes fixés comme perspectives ; la réalisation du convertisseur étudié dans ce manuscrit, effectuer des tests expérimentaux des un système photovoltaïque réel.

The page features a decorative graphic consisting of three blue circles of varying sizes, each with a gradient from dark blue to light blue. These circles are arranged vertically, with the largest at the top and bottom, and a smaller one in the middle. Two thin, light blue lines intersect at a point to the left of the circles, forming a V-shape that frames them.

# *Annexes*

[Annexe A] : Paramètres du module photovoltaïque utilisé, (Plaque signalétique).

 <b>Suntech</b>	
Model Number	<b>STP080S-12/Bb</b>
Rated Maximum Power	( $P_{max}$ ) <b>80W</b>
Current at Pmax	( $I_{mp}$ ) <b>4.65A</b>
Voltage at Pmax	( $V_{mp}$ ) <b>17.2V</b>
Short -Circuit Current	( $I_{sc}$ ) <b>5A</b>
Open-Circuit Voltage	( $V_{oc}$ ) <b>21.6V</b>
Nominal Operating Cell Temp.	( $T_{NOCT}$ ) <b>50°C</b>
Weight	<b>8Kg</b>
Dimension	<b>1195×541×30(mm)</b>
Maximum System Voltage	<b>715V</b>
Maximum Series Fuse Rating	<b>8A</b>
Cell Technology	<b>Mono-Si</b>
All technical data at standard test condition AM=1.5    E=1000W/m <sup>2</sup> T <sub>c</sub> =25°C	
   	
Add:17-6 ChangJiang South Road New District Wuxi,China Tel:(+86)0510-5345000 Fax:(+86)0510-5343049 <span style="float: right;">Made in China</span>	

The background features a white page with three large, overlapping blue circles of varying sizes. Each circle is composed of concentric layers of different shades of blue, creating a 3D effect. Two thin, light blue lines intersect at the top left and extend diagonally across the page, framing the central text.

# *Bibliographie*

- [1] Y. BAKELLI, Contribution à l'optimisation du dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome, thèse de doctorat en génie électrique de l'université de Batna, 2012, Algérie.
- [2] A. GUETTAF, Optimisation floue- génétique d'un système de pompage éolien, thèse de doctorat en Electrotechnique de l'université de Biskra, 2013, Algérie.
- [3] S. PETIBON, Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, thèse de doctorat en génie électrique de l'université de Toulouse III, 2009, France.
- [4] M. AMAROUAYACHE, Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque, thèse de doctorat en Electrotechnique de l'université de Constantine, 2014, Algérie.
- [5] Docteur M. JARKAS, Les énergies renouvelables, Page 2, 19, 21-26.
- [6] Energie éolienne, Disponible sur [www.connaissancedesenergies.org](http://www.connaissancedesenergies.org), 01 avril 2016.
- [7] J.L. LAPOTRE - Professeur d'Electrotechnique et P. PLOUVIEZ - Professeur agrégé, Académie de Lille, Energies renouvelables : Le photovoltaïque et l'éolien, 2012, Page 68 - 69 / 18 / 99.
- [8] [www.sonelgaz.dz](http://www.sonelgaz.dz), Ferme éolienne d'Adrar, Publié le 19-02-2014.
- [9] [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com), maison écologique, dossiers, chauffage-chauffe-eau-solaire-bon-choix-coup-792, page 2, 2017.
- [10] K. HELALI, Ingénieur d'Etat, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative », Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Mouloud MAMMERRI Tizi ouzou, 2012, Page 25 / 27 / 31 - 32.
- [11] [www.ecosources.info](http://www.ecosources.info) / Energies renouvelables / Solaire / Solaire photovoltaïque / Les différents types de cellules photovoltaïques. Publié le 04/2008 / Modifié le 14/09/2016.
- [12] [www.groupe-capsud.com](http://www.groupe-capsud.com) / Energies renouvelables / Energie photovoltaïque / Les cellules photovoltaïques / 2017.
- [13] [www.isoenergie.fr](http://www.isoenergie.fr) / Panneaux-champ photovoltaïque / publié le 14 juin 2010.
- [14] [www.ladepeche.fr](http://www.ladepeche.fr) / Environnement - énergies renouvelables / La Métropole va cultiver un champ photovoltaïque / article publié le 27-09-2013.
- [15] B. Zakaria, Mémoire de Magister, « Contribution a la modalisation d'une cellule Solaire », Université de Bechar, 2008, page 25, 26.

- [16] D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », Juin 2007 disponible sur [www.scribd.com](http://www.scribd.com) B. Flèche
- [17] L. ABBASSEN, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale Photovoltaïque », Mémoire de magister, Université Mouloud MAMMERI Tizi ousou, 2011.
- [18] H. BENZAGHOU, « Etude a-b initio des propriétés structurales, électroniques des semi-conducteurs chalcopyrites  $CuGaX_2(X=S, Se)$  », Mémoire de Magister en Physique, Université ABOU BEKR Belkaid Tlemcen, 2012.
- [19] R. MERAHI, « Modélisation d'un dispositif MPPT pour L'études de l'augmentation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque ».
- [20] [www.photovoltaique.com](http://www.photovoltaique.com) / solargie
- [21] A. MOHAMMEDI, Thèse de doctorat en commende et conversion d'énergie, « Contrôle par MPPT des systèmes de pompage photovoltaïque », Université A. Mira de Bejaia, 2015.
- [22] S. AISSOU, « Caractérisation et optimisation de puissance des systèmes photovoltaïques, Thèse de doctorat », Université A. Mira Bejaïa, Mai 2016.
- [23] D. SALIM, « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone », Magister en électrotechnique, Université de Sétif, 2011.
- [24] H. CHAHRAZET - Ingénieur d'Etat en électrotechnique, « Dimensionnement et installation d'un système photovoltaïque », Université Mouloud MAMMERI Tizi ousou, 2009.
- [25] [www.sti2d.patgue.com](http://www.sti2d.patgue.com), La fabrication des cellules photovoltaïques / Site PV / Ressource PV / Cellule solaire / module solaire
- [26] [www.photovoltaique.guidenr.fr](http://www.photovoltaique.guidenr.fr), La fabrication des modules photovoltaïques.
- [27] Anne LABOURET, Pascal CUMUNEL, Jean-Paul BRAUN, Benjamin FARAGGI, Cellules solaires - Les bases de l'énergie Photovoltaïque, 5<sup>ème</sup> édition, 07-2010.
- [28] [www.energies-renouvelables.consoneo.com](http://www.energies-renouvelables.consoneo.com), maison écologique, les avantages et les inconvénients des panneaux solaires photovoltaïque, 724.
- [29] Z. LAMMOUCHI et S. GHENBAZI, Mémoire de master, « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque », Université ECHAHID HAMA Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [30] Alain Ricaud, Livre - Systèmes photovoltaïques, Ecole d'ingénieur, Polytech' Savoie, Octobre 2011.

- [31] Le photovoltaïque / Mansour Assani-Dahounenon / disponible sur [www.peracod.sn](http://www.peracod.sn) / Dakar, Avril 2011.
- [32] [PDF] / Introduction aux systèmes photovoltaïques - Habiter - Autrement / disponible sur [www.habiter-autrement.org](http://www.habiter-autrement.org) / énergies renouvelables / Introduction - aux-systèmes - photovoltaïques / 11 avril 2008.
- [33] S. LALOUNI, « Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque-éolien) de production d'énergie électrique », thèse de doctorat, Université A. Mira-Bejaïa, octobre 2009.
- [34] [www.energie-developpement.blogspot.com](http://www.energie-developpement.blogspot.com) / énergie et développement / fonctionnement - d'une - installation/ Énergie solaire / Électricité photovoltaïque / 09 / 2011.
- [35] N. AOUN, « Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales », mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [36] REKIOUA Djamilia, Laboratoire LT.I.I, University of Bejaia, Algeria, MATAGNE Ernest, University Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium, « Optimization of Photovoltaic Power Systems - Modelization - Simulation and Control », 2012, page 54.
- [37] S.AISOU, D.REKIOUA, N.MEZZAI, T.REKIOUA, S.BACHA, « modeling and control of hybrid photovoltaic wind power system with battery storage », Energy Conversion and Management 89 (2015) 615-625.
- [38] S. AISSOU, S. JACQUES, Z. MOKRANI, D. REKIOUA, T. REKIOUA, A. OUAHABI, « Relevance of the P&O MPPT Technique in an Original PV-powered Water Pumping Applied to the electric vehicle », in the case of FWD and 4WD, journal of hydrogen energy 39 (2014) 21259-21264.
- [39] S. ABADA, « Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic », Mémoire de magister en Sciences, Université LAVAL, 2011.
- [40] V. BOITIER, P. MAUSSION, C. CABAL « Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques », université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008.
- [41] F. ANSARI, A-K. JHA « Maximum power point tracking using perturbation and observation as well as incremental conductance algorithm » international journal of research in engineering & applied sciences, 2011.
- [42] M.ARROUF, « Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque », thèse doctorats, Université de Constantine, 2007.

- [43] ISSAADI, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire magister, Université de Bejaia, 2006.
- [44] O.BENSEDDIK, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », Université de Ouargla, 2012.
- [45] F. SLAMA, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Ferhat ABBAS - Sétif, 01/04/2011.
- [46] L.P.Lachauvinnière, fichier 'Convertisseur statique 'communication technique. 2012.
- [47] O. BELABBASSI, M. REZMA, « Contribution a l'étude et dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque / réseau SONALGAZ », mémoire d'ingénieur d'état, Université de Laghouat, 2011.
- [48] C.BERNARD, C. SEBRAO, O.Bernard LAVAL, C.VAUDOUER ' Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques' université de Sfax école nationale d'ingénieurs de Sfax, 2008-2009.
- [49] J. M. ENRIQUE, E. DURAN, M. SIDRACH-DE-CARDONA, J. M. ANDUJAR « theoretical assessment of the maximum power point tracking of photovoltaic facilities with different converter topologies », le site : [www.science-direct.com](http://www.science-direct.com), solar energy. 81, page 31-38, 2007.
- [50] M. Mohamed, « Synthèse des convertisseurs statique DC/DC/AC pour les systèmes photovoltaïques : Etudes et Simulation », Ingénieure d'état en électrotechnique, Université de science et de technologies d'Oran.
- [51] Souleymane NDOYE, Ibrahima LY, Fabé Idrissa BARRO, Oued Habi boulahi LEMRABOTT, Grégoire SISSOKO « Modélisation et Simulation sous MATLAB/Simulink de la chaine d'alimentation d'une station relais de électrique télécommunication en énergie solaire photovoltaïque dans une zone isolée du réseau », journal des sciences 2009.
- [52] Auteur : Kamel EL MELOUAN « Dimensionnement d'un hacheur survolteur » 'application note », Mr James, Laffont et Pasquier enseignants au département de GE de polytech Clermont-Ferrand, année 2009/2010.
- [53] A.TOULAIT « modélisation et simulation sous MATLAB/Simulink d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » Mémoire Master UMMTO 2014.
- [54] HANANOU. FATIHA « Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque » Mémoire de Master en Electrotechnique industrielle, Université de OUARGLA 2014.

