

**Faculté :** Science technologie

**Département :** électrotechnique

**Spécialité :** Commande électrique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

**Thème :**

**étude et modélisation d'un système photovoltaïque avec  
stockage d'énergie pour un site isolé**

**Préparé par :** ATTIA AIMEN et HARRAT SOUFIANE

**Encadrant :** Pr OMEIRI AMAR *Professeur Université Badji Mokhtar-Annaba*

### Jury de Soutenance :

BOUCHIKHA HOCINE	MCB	Université Badji Mokhtar Annaba	Président
OMEIRI AMAR	Pr	Université Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
KELAIAIA SAMIA	MCB	Université Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

# Dédicaces

*Nous dédions ce modeste travail  
Particulièrement à ceux qui nous ont Appris le sens  
de la vie ; nous ont encouragés, nous ont Soutenu  
durant notre cursus universitaire ;*

***A nos chers parents***

***A mes frères.***

***A toute la famille **Attia** et  
**Harrat*****

***Et mes sincères salutations à  
une personne chère qui me  
donne la force et de travailler  
dur***

***Je tiens à remercier tous (tes)  
Nos amis(es) qui m'on aidés de loin Ou  
De Près dans la réalisation de ce  
travail.***

***Mr. A. Attia***

***Mr. S. Harrat***

## *Liste des figures*

<b>Figure 1.1</b> : Energie Biomasse .....	13
<b>Figure 1.2</b> : Energie géothermique.....	14
<b>Figure 1.3</b> :L'énergie solaire thermique.....	15
<b>Figure 1.4</b> :L'énergie éolienne.....	16
<b>Figure 1.5</b> :L'énergie hydraulique.....	18
<b>Figure 1.6</b> : Conversion de l'énergie solaire on électricité.....	19
<b>Figure 1.7</b> : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.....	21
<b>Figure 1.8</b> : Module photovoltaïque.....	22
<b>Figure 1.9</b> : Structure d'un système PV autonome .....	22
<b>Figure 1.10</b> : Structure d'un système hybride.....	23
<b>Figure 1.11</b> Structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique.....	24
<b>Figure 1.12</b> : Potentiel solaire en Algérie .....	24
<b>Figure. 2.1</b> : Système photovoltaïque autonome [11]. .....	28
<b>Figure 2.2</b> : le spectre du rayonnement solaire [14].....	30
<b>Figure. 2.3</b> : composants du rayonnement solaire: extraterrestre, globale=direct+diffus +albédo .....	31
<b>Figure 2.4</b> : l'orientation et l'inclinaison (Alsace-Lorraine) [17].....	32
<b>Figure 2.5</b> : Exemple de la structure d'un système PV .....	33
<b>Figure 2.6</b> : dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si)[21]. .....	<b>35</b>
<b>Figure 2.7</b> : les différentes technologies [24]. .....	36
<b>Figure 2.8</b> : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire [26].....	37
<b>Figure 2.9</b> : Cellule en silicium monocristallin [27] . .....	38
<b>Figure 2.10</b> :Cellule en silicium polycristallin [28] .....	38
<b>Figure 2.11</b> :Cellule silicium amorphe[28] .....	39
<b>Figure 2.12</b> :Courbe I(V) à T=25 et un éclairement de 1000W/m <sup>2</sup> .....	40
<b>Figure 2.13</b> : Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque .....	41
<b>Figure 2.14</b> : Un module photovoltaïque [31].....	42
<b>Figure 2.15</b> : Association des modules photovoltaïques .....	44
<b>Figure 2.16</b> :Composants d'un champ de modules PV.....	45
<b>Figure 3.1</b> :Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	51
<b>Figure 3.2</b> : les différentes zones de la Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle.....	51
<b>Figure 3.3</b> : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéal.....	53
<b>Figure 4. 1</b> :les différents types de convertisseurs statiques .....	59
<b>Figure 4. 2</b> :Système de conversion photovoltaïque.....	59
<b>Figure 4. 3</b> :Schéma de principe de la conversion Continu - continu (DC – DC).....	60
<b>Figure 4. 4</b> :Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck.....	61
<b>Figure 4. 5</b> :Périodes fermeture et ouverture d'un interrupteur .....	62
<b>Figure 4. 6</b> : Schémas équivalents du hacheur dévolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert .....	62
<b>Figure 4. 7</b> :Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost .....	64
<b>Figure 4. 8</b> :Schémas équivalents du hacheur survolteur : K fermé, (b) : K ouvert .....	64
<b>Figure 4. 9</b> :Convertisseur dévolteur-survolteur .....	65
<b>Figure 4. 10</b> :Schémas équivalents du hacheur dévolteur –survolteur (a) : K ouvert ; (b):K fermé.....	66
<b>Figure 4. 11</b> : montage hacheur à thyristors par PSIM 9 .....	67
<b>Figure 4. 12</b> :courbe de tension U <sub>ch</sub> et de courant I <sub>ch</sub> d'entrée du hacheur a thyristors .....	68
<b>Figure 4. 13</b> :la forme des courants I <sub>th1</sub> -I <sub>c</sub> -I <sub>ch</sub> .....	68
<b>Figure 4. 14</b> :la formes des courants I <sub>ch</sub> I <sub>tr1</sub> et I <sub>d2</sub> .....	69
<b>Figure 4. 15</b> : la formes des courants I <sub>tr2</sub> et I <sub>d1</sub> .....	69
<b>Figure 4. 16</b> : la forme de U <sub>c</sub> et I <sub>c</sub> du hacheur à thyristor .....	70
<b>Figure 4. 17</b> :Zoom d'U <sub>c</sub> et I <sub>c</sub> du hacheur à thyristor.....	70
<b>Figure 4. 18</b> :montage hacheur à IGBT.....	71

<b>Figure 4 . 19</b> :la forme d'Uch et Ich du hacheur à IGBT75.....	71
<b>Figure 4 . 20</b> :schéma d'un onduleur monophasé .....	75
<b>Figure 4 . 21</b> :Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Demi-pont .....	75
<b>Figure 4 . 22</b> :Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont H .....	76
<b>Figure 4 . 23</b> :Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont .....	76
<b>Figure 4 . 24</b> :Montage d'un onduleur triphasé sur PSIM 97.....	76
<b>Figure 4 . 25</b> :Montage d'un onduleur triphasé sur PSIM 97.....	77
<b>Figure 4 . 26</b> :la forme d'Uam .....	78
<b>Figure 4 . 27</b> : la forme d'Ubn .....	78
<b>Figure 4 . 28</b> :la forme d'Uan-Ubn.....	79
<b>Figure 4 . 29</b> : la forme d'Umn .....	82
<b>Figure 4 . 30</b> :Spectre d'harmonique ; commande 180 .....	80
<b>Figure 4 . 31</b> :la forme d'Uan .....	81
<b>Figure 4 . 32</b> :la forme d'Uam .....	81
<b>Figure 4 . 33</b> : la forme d'Uan-Ubn .....	82
<b>Figure 4 . 34</b> :la forme d'Umn .....	82
<b>Figure5.1</b> Circuit équivalent simple de la batterie .....	86
<b>Figure5.2</b> Schéma équivalent à deux branches d'un supercondensateur [95].....	87
<b>Figure5.3</b> Modèle multibranche d'un supercondensateur.....	88
<b>Figure5.4</b> Modèle PV autonome avec stockage batterie.....	89
<b>Figure 5.5</b> Etat de charge de la batterie.....	89
<b>Figure5.6</b> Tension et courant de la batterie.....	90
<b>Figure 5. 7</b> Modèle PV autonome avec stockage des supercondensateurs.....	91
<b>Figure5.8</b> Évolution de la tension et le courant du supercondensateur pour différents cycles de charge/décharge .....	91
<b>Figure 6.1</b> Structure basique d'une cellule solaire.....	94
<b>Figure6.2</b> Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.....	94
<b>Figure6.3</b> Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.....	96
<b>Figure 6. 4</b> différents régimes selon la puissance d'éclairement.....	98
<b>Figure 6.5</b> Caractéristiques résultantes d'un groupement de $N_s$ cellules en série .....	99
<b>Figure 6.6</b> Caractéristiques résultant d'un groupement de $N_p$ cellules en parallèle.....	99
<b>Figure 6.7</b> Evolution de la caractéristique I(V) (a) et P(V) (b) en fonction de l'éclairement.....	101
<b>Figure 6.8</b> Evolution de la caractéristique I(V) (a) et P(V) (b) pour différentes températures .....	101
<b>Figure 6.9</b> : $P=f(V)$ et l'influence de l'éclairement .....	102
<b>Figure 6.10</b> Evolution de la caractéristique I(V) (a) et P(V) (b) pour différentes températures.....	103

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau 1 .1</b> : Les puissances des centrales PV installée en Algérie [7].....	25
<b>Tableau.5.1</b> Caractéristiques du modèle.....	89
<b>Tableau 5.2</b> Caractéristiques du supercondensateur.....	90

# Table des matières

Mémoire .....	1
Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master .....	1
<b>Remerciements .....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Dédicaces .....</b>	<b>2</b>
Introduction.....	10
1. Introduction .....	13
2. Les différents types d'énergie renouvelables.....	13
2.1. L'énergie Biomasse.....	13
2.2. L'énergie géothermique .....	14
2.3. L'énergie solaire thermique .....	15
2.4. L'énergie éolienne.....	17
2.5. L'énergie hydraulique.....	18
2.6. L'énergie photovoltaïque.....	19
3. Structure d'une cellule photovoltaïque .....	21
4. Le module photovoltaïque .....	22
5. Les différents types des systèmes photovoltaïques .....	23
5.1. Systèmes autonomes .....	23
5.2. Les systèmes hybrides .....	24
5.3. Les systèmes raccordés au réseau .....	24
6. Potentiel solaire en Algérie .....	25
7. Conclusion .....	27
Chapitre 2.....	28
1. Introduction :.....	29
2. Généralité sur le soleil:.....	30
2.1. Rayonnement solaire:.....	30
2.2. Spectre durayonnement:.....	30

3.	Différents types de rayonnement:.....	31
4.	Orientation et inclinaison: .....	32
5.	Les systèmes photovoltaïques:.....	34
5.1.	L'isolé :.....	34
5.2.	Le connecté au réseau :.....	34
6.	Générateur photovoltaïque (PV) : .....	35
6.1.	Semi-conducteur : .....	35
6.2.	La jonction N-P :.....	35
7.	Les cellules photovoltaïques:.....	36
7.1.	Principe de fonctionnement: .....	37
7.2.	Les différents types des cellules photovoltaïques: .....	38
7.3.	Paramètre des cellules photovoltaïques : .....	40
7.4.	Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque :.....	42
8.	Le module photovoltaïque: .....	43
8.1.	Association des modules photovoltaïques : .....	44
8.2.	Le panneau solaire: .....	46
9.	Système de conversion :.....	46
9.1.	le convertisseur continu-continu : .....	47
9.2.	Le convertisseur continu- alternatif : .....	47
10.	Avantages et inconvénients d'une installation PV [38] : .....	47
11.	Conclusion :.....	49
Chapitre 3.....		50
1.	Introduction :.....	51
2.	Modélisation d'une cellule photovoltaïque :.....	51
2.1.	modèle mathématique :.....	51
3.	Modélisation d'un panneau photovoltaïque :.....	54
3.1.	Caractéristique d'un panneau photovoltaïque : .....	54
4.	Evaluation de facteur de qualité :.....	57

5.	Résolution de l'équation $I=f(V)$ :	57
6.	Modélisation d'un générateur :	58
7.	Conclusion :	58
Chapitre 4.....		59
1.	Introduction .....	60
2.	Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	61
3.	Type des convertisseurs DC-DC :.....	61
3.1.	Hacheur dévolteur (Buck - Converter):.....	62
3.2.	Hacheur survolteur (Boost-Converter) : .....	64
3.3.	Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) :.....	66
3.4.	Simulation Hacheur : .....	68
3.4.1.	Simulation Hacheur a thyristors :.....	68
3.4.2.	Simulation Hacheur réversible a IGBT : .....	72
4.	Les Convertisseurs DC-AC (Les onduleurs) .....	73
4.1.	Classification : .....	73
4.2.	Principe de fonctionnement d'un onduleur: .....	74
4.3.	Les type des onduleurs : .....	75
4.3.1.	Onduleur Monophasé:.....	75
4.3.2.	Onduleur triphasé :.....	77
4.4.	Simulation de l'onduleur triphasé : .....	78
4.4.1.	La commande 180 degrés de l'onduleur : .....	79
4.4.2.	La commande MLI d'un onduleur triphasé : .....	82
5.	Conclusion .....	84
Chapitre 5.....		85
1.	Introduction : .....	86
2.	Dispositifs de stockage : .....	86
3.	Modélisation des dispositifs de stockage.....	87
3.1.	Batterie lithium-ion: .....	87

3.2. Modélisation des supercondensateurs :	88
4. Simulation :	89
4.1. Simulation du stockage d'énergie photovoltaïque :	89
5. Conclusion	92
Chapitre 6.....	93
1. Introduction :	94
2. La cellule PV :	94
2.2. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :	95
2.3. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :	96
2.3.1. Facteur de forme FF :	97
2.3.2. Le rendement $\eta$	97
3. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :	96
3.1. Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) :	96
3.2. Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) :	96
3.3. Facteur de forme FF :	97
3.4. Le rendement $\eta$	98
4.....	98
4.1. Mise en série :	98
4.2. Mise en parallèle :	99
4.3. Influence de la température et de l'éclairement :	99
5. Résultats de la simulation sous l'environnement Matlab /Simulink.....	102
5.1. Caractéristique caractéristiques théoriques (I-V) et (P-V).....	102
6. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	104
6.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque :	104
6.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	104
7. Conclusion :	104

## Introduction

---

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable, Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il fallut inventer et construire Des usines (centrales électriques) capables de produire de l'électricité en grande quantité. Une fois le courant produit, il doit être amené jusqu'au consommateur. Dans un pays, le Transport et la Distribution Publique assurent le transit de l'énergie Électrique entre les points de production et les points de consommation. La turbine et l'alternateur sont les deux pièces maîtresses de ces générateurs d'électricité.

Dans le cas des usines thermiques, la turbine est entraînée par la vapeur produite dans les chaudières où l'on brûle les combustibles, alors que dans le cas des usines hydroélectriques, la turbine est animée par la force de l'eau. La turbine est couplée à un alternateur, un grand aimant cerclé d'une bobine, qui va produire un courant alternatif en tournant. Une fois le courant produit, il doit être amené jusqu'au consommateur.

On distingue que la production de l'énergie électrique possède des usines et un matériel très grand (turbine, four..., etc.) sans oublier la grande influence sur la nature c'est la terre en générale.

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre.

Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de 2 milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. Ces atouts, alliés à des technologies de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables mais de manière encore très inégale selon le type de ressources considérées.

La consommation d'énergie ne cessant d'augmenter, il semble néanmoins peu probable que les énergies renouvelables remplacent les autres ressources énergétiques dans un avenir proche. Aussi est-il important que chacun de nous surveille au plus près sa propre consommation d'énergie.

Les systèmes photovoltaïques, sont donc particulièrement simples, puisque, à l'inverse des centrales électriques thermiques conventionnelles ou solaires, ils ne comportent ni fluides à haute température ou sous pression, ni pièces tournantes, ni la nécessité de la présence d'une « source froide » consommant de l'eau.

Dans le cas de photovoltaïque, l'énergie primaire est le rayonnement solaire. Elle se trouve dans le milieu ambiant, il se fait d'exposer les modules ou les panneaux devant la lumière pour obtenir une puissance électrique, cette énergie est gratuite et disponible pendant toute la journée.

Les systèmes photovoltaïques sont particulièrement bien adaptés à la production décentralisée d'électricité et les sites isolés : électrification rurale (pour les besoins domestiques et les besoins

communautaires : centres de santé, écoles, etc.), pompage de l'eau, réfrigération, télécommunications, etc. Ils constituent donc une solution de choix pour les populations rurales qui ne pourront pas être reliées aux réseaux électriques conventionnels, même pour les villes on peut économiser la consommation d'énergie par l'utilisation des panneaux sur le toit ou sur les façades des bâtiments.[0]

Dans notre étude on a présenté :

- Au premier chapitre nous allons présenter des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque : Les différents types d'énergie renouvelables, structure DC cellule photovoltaïque, Le module photovoltaïque, Les différents types des systèmes photovoltaïques, et le potentiel solaire on Algérie.
- Dans le second chapitre , nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire
- Le troisième chapitre à été consacré à la modélisation des panneaux PV. Nous avons d'abord caractérisé la cellule PV à partir de celui d'une jonction PN éclairée, puis nous avons décrit le modèle mathématique associé à un panneau PV
- Le quatrième chapitre est très important, car il présente les convertisseurs de puissance avec le système photovoltaïque et la simulation de ces derniers par PSIM9.
- Le cinquième chapitre nous avons présenter le stockage des batteries
- le Sixième chapitre modélise et simule un système photovoltaïque avec stockage d'énergie électrique avec le logiciel Matlab – Simulink. Une présentation de l'architecture du système photovoltaïque.
- Et Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre Étude dans sa partie théorique et simulation des résultats

# **Chapitre 1**

---

## **État de L'art sur les Energies Renouvelables**

# 1. Introduction

---

Les énergies fossiles sont considérées comme épuisables à l'échelle humaine, ces ressources sont limitées, par contre qu'une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelé assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. La conversion de la lumière émise par le soleil en électricité, est appelée effet photovoltaïque. L'énergie solaire est captée par des cellules photovoltaïques, dont le rôle est de produire de l'électricité lorsqu'elle est exposée à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être connectées entre elle pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque.

## 2. Les différents types d'énergie 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). Aujourd'hui, on assimile souvent par abus de langage les énergies renouvelables aux énergies propres, permis ces énergies :

### 2.1. L'énergie Biomasse

---

La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale. Les principales formes de l'énergie de biomasse sont: les biocarburants pour le transport (produits essentiellement à partir de céréales, de sucre, d'oléagineux et d'huiles usagées) ; le chauffage domestique (alimenté au bois) ; et la combustion de bois et de déchets dans des centrales produisant de l'électricité, de la chaleur ou les deux [1] (voir la figure1.1).



**Figure 1.1 : Energie Biomasse**

- **Les avantages**

C'est une énergie qui émet peu de gaz à effet de serre et qui peut être stockée. Concernant particulièrement le bois-énergie, il y a une large disponibilité de la ressource et le prix du bois de chauffage ne suit pas le cours du pétrole.

- **Les Inconvénients**

Elle ne peut avoir qu'un apport limité car le recours intensif à la biomasse entraînerait des impacts négatifs sur l'environnement tels que des phénomènes de déforestations (en cas d'exploitation intensive du bois-énergie), d'érosions des sols, de pollution des sols et des eaux (en cas de production intensive de biocarburant).

## **2.2. L'énergie géothermique**

---

Désigne l'énergie provenant de la chaleur contenue dans la croûte terrestre et dans les couches superficielles de la terre.

On distingue habituellement deux formes d'énergie géothermique avec la géothermie de surface et la géothermie profonde. La géothermie de surface consiste en la récupération de la chaleur pendant la période de l'hiver et de la fraîcheur pendant l'été à partir de la couche superficielle du sol. La géothermie profonde consiste quant à elle à capter la chaleur contenue par la croûte terrestre en vue de produire du chauffage lorsque la température est inférieure à 90°, ou même de l'électricité dès lors que la température est comprise entre 90 et 150° [2].

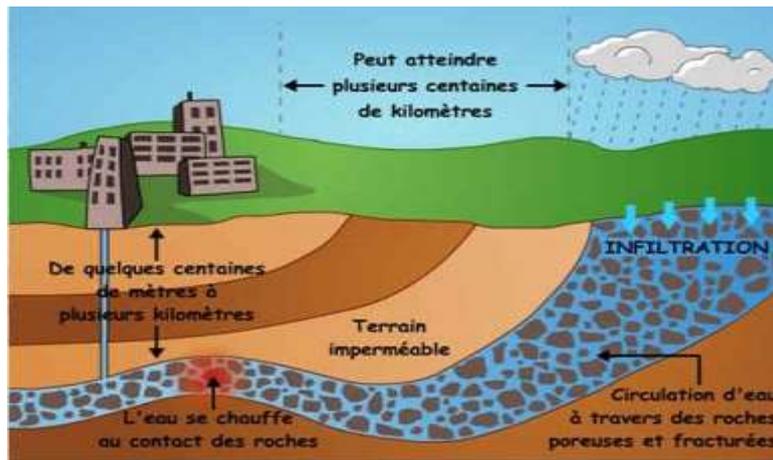


Figure 1.2 : Energie géothermique

- **Les Avantages**

Par rapport à d'autres énergie renouvelables, la géothermique présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de biomasse ; c'est donc une énergie stable dans le temps.

- **Les inconvénients**

Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable ce sens qu'un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Selon la nature du sol, les coûts de forage peuvent être très élevés. Mais la mise en placée d'une installation géothermique correspond à un investissement important, le coût d'exploitation est quasiment nul.

L'épuisement de la ressource est possible sur certains stocks trop petits lors de leur exploitation .L'expansion de la géothermie se heurte également à l'absence de réelle volonté politique, exprimée notamment dans la lourdeur des taxes. Les seuls risques de pollution existants sont rejetés à la surface du sol l'eau extraite si celle-ci contient des métaux lourds. Ce risque est évité lorsqu'elle est réinjectée ensous-sol.

## 2.3. L'énergie solaire thermique

---

L'utilisation de [l'énergie thermique](#) du [rayonnement solaire](#). Elle peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de [vapeur d'eau](#) pour entraîner des [alternateurs](#) et ainsi obtenir une [énergie électrique](#)). En

utilisant la chaleur transmise par rayonnement plutôt que le rayonnement lui-même, ces modes de transformation d'énergie se distinguent des autres formes d'[énergie solaire](#) comme les [cellules photovoltaïques](#)[3].

Deux principes fondamentaux sont appliqués et éventuellement parfois combinés :

- Capturer l'énergie du rayonnement solaire grâce à un corps noir.
- Concentrer le rayonnement solaire en un point (four solaire).



**Figure 1.3** :L'énergie solaire thermique

- **Les Avantages**

L'énergie solaire est inépuisable et non polluante. L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre l'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage l'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles

- **Les inconvénients**

Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé. L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint. La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes les panneaux solaires contiennent des

déchets toxiques (cuivre et chrome).

## 2.4. L'énergie éolienne

---

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (voir la figure 1.4) [4].



Figure 1.4 :L'énergie éolienne

- **Les avantages**

Chaque éolienne est garante d'une peu moins de gaz carbonique dans l'atmosphère ou d'un peu moins de déchets nucléaires à gérer par les générations à venir.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable idéale :

- Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment et propre.
- Elle ne nécessite aucun carburant.
- Elle ne crée pas de gaz à effet de serre (sauf si l'on considère que ce type d'énergie est intermittent et nécessite l'utilisation de centrales thermique constamment au ralenti ce qui pollue afin de réguler les variations imprévisibles de la production éolienne).
- Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radio actifs.
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- Les propriétaires fonciers reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qu'augmente leur revenu ainsi que la valeur terrain.

- La propriété des aérogénérateurs par des particuliers et la communauté permet aux gens de participer directement à la conservation de notre environnement.
- Chaque mégawatt par heure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO<sub>2</sub> produites chaque année par la production d'électricité avec le charbon ou le diesel.

- **Les inconvénients**

- Les riverains craignent généralement une dégradation de l'aspect visuel des sites concernés, ainsi qu'un importes les cinq secondes en haut des mats éoliens à la demande de l'aviation civile. Ces flashes perturbent la quiétude nocturne de la campagne et sont une pollution lumineuse supplémentaire la nuit.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci plus le parc éolien est dense plus ce risque grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger, mais peut conduire à da la pollution lumineuse pour les riverains.
- Un aspect qui commence à être réalisé est celui de l'interférence avec les radars et en particulier avec les radars météorologiques. En effet, les éoliennes peuvent constituer un obstacle à la propagation de l'onde. Selon la proximité et la densité du parc d'éoliennes, ceci peut constituer un blocage majeur à basse altitude donnant une zone d'ombre dans les données. De plus différentiable d'une cible en mouvement comme la pluie. Habituellement, on filtre les échos indésirables de sol par leur vitesse doppler qui est nulle mais on ne peut pas dans ce cas. Pour empirer la situation, si da la vraie précipitation passe ce secteur.

## 2.5. L'énergie hydraulique

---

L'énergie hydraulique est l'[énergie](#) fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chute, cours d'eau, courant marin, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé

directement, par exemple avec un [moulin à eau](#), ou plus couramment être converti, par exemple en [énergie électrique](#) dans une [centrale hydroélectrique](#) (voir la figure 1.5) [5].



Figure 1.5 :L'énergie hydraulique

- **Les Avantages**

- L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable.
- Sa production n'entraîne pas d'émission de CO<sub>2</sub> et ne génère pas des déchets toxiques.
- On peut rapidement augmenter la puissance produite en cas de panne d'électricité.
- Plus de régularité pour produit de l'énergie (par apport au vent par exemple) Les moulins à eau on permet de développer de grande voie de communication et du développement de grandes villes.

- **Les Inconvénients**

- Outre que les sites potentiels se situent généralement en montage entraînant des surcoûts importants de construction, le nombre de ces sites est limité.
- De plus ce système implique parfois de noyer des vallées entières de terre cultivable, où les hommes vivent bien souvent depuis des générations.
- On ne peut jamais garantir le risque 0 de rupture des barrages, en particulier lors de conditions météo rologiques exceptionnelles.

## 2.6. L'énergie photovoltaïque

---

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est

ainsi directement utilisable. Les panneaux solaires actuels sont relativement onéreux à la fabrication malgré la première peu coûteuse et abondante (Silice) car une énergie significative est nécessaire à la production des cellules. Cependant, de nets progrès ont été faits à ce sujet

On considère aujourd'hui qu'il suffit de 3 à 5 ans pour qu'un panneau produise l'énergie que sa construction a nécessité. Un autre inconvénient est celui de la pollution à la production qui est due à la technologie utilisée[6].

Des progrès technologique sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïque peut être augmenté par les Solutions utilisation les techniques de recherche du point de puissance maximale. Cette dernière caractéristique est assez commune avec la production d'énergie éolienne.

Les panneaux solaires sont très pratiques d'utilisation. L'intégration dans le bâtiment est facile et devient même esthétique. Pour les sites isolés et dispersés qui demandent peu d'énergie, c'est une solution idéale (télécommunication, balises, etc..).

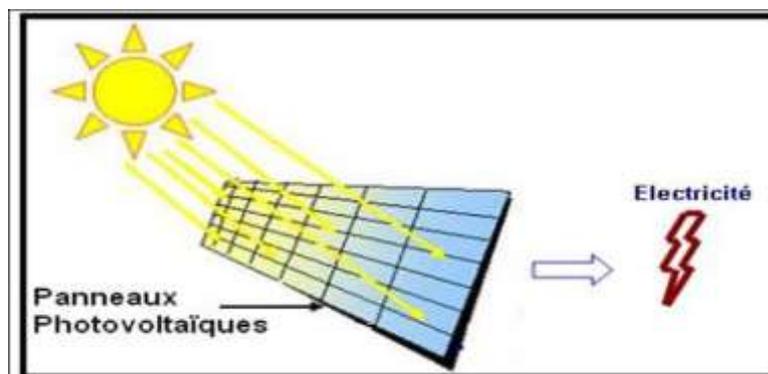


Figure 1.6 : Conversion de l'énergie solaire on électricité.

- **Les avantages**

D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être

dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

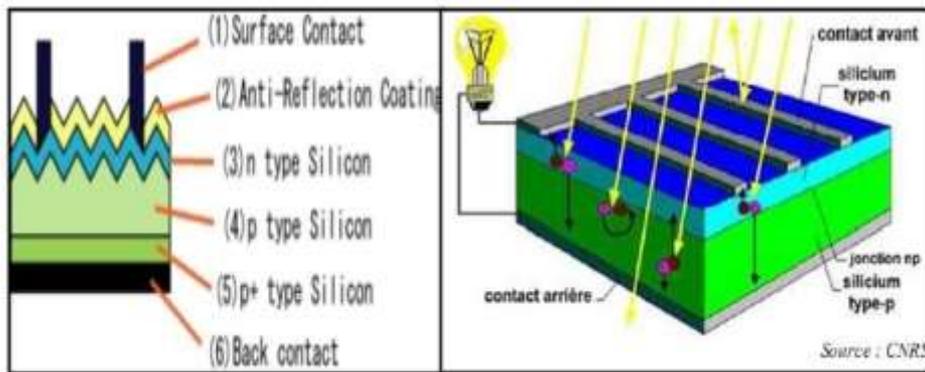
- **Les inconvénients**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé. Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée. Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (Batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

### 3. Structure d'une cellule photovoltaïque

---

La photovoltaïque se produit sans bruit, sans parties mécaniques et sans que des produits toxiques soient libérés dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant au passage un <<trou>>. Normalement, l'électron trouve rapidement un trou pour se replacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner simplement en son sein : ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme une pile [7]. Pour cela, on s'arrange pour créer un champ électrique permanent au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N (voir la figure 1.7).



**Figure 1.7** : Principe de fonctionnement d'une cellule PV

D'un point de vue électrique, une cellule photovoltaïque est l'équivalent d'un générateur de courant auquel on a adjoint une diode. Il faut ajouter des contacts électriques (qui laissent passer la lumière en face éclairée : en pratique, on utilise un contact par une grille), une couche antireflet pour assurer une bonne transmission des photons vers l'absorbeur. Pour que la cellule fonctionne, et produise le maximum de courant, on ajuste le gap du semi-conducteur au niveau d'énergie des photons. On peut éventuellement empiler les jonctions, de façon à exploiter au mieux le spectre d'énergie des photons, ce qui donne les cellules multi-jonctions.

## 4. Le module photovoltaïque

---

Rappelons tout d'abord qu'un module photovoltaïque est un convertisseur d'énergie lumineuse en électricité. Le module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles en série, afin d'élever la tension d'utilisation, et en parallèle, dans le but d'augmenter l'intensité d'utilisation. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers l'environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique [8].

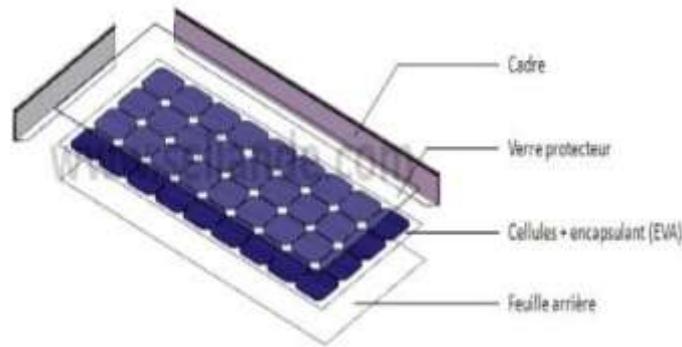


Figure 1.8 : Module photovoltaïque

## 5. Les différents types des systèmes photovoltaïques

Selon la manière dont l'énergie est utilisée, il existe trois différents types de systèmes

PV :

- ❖ Systèmes autonomes.
- ❖ Systèmes hybrides.
- ❖ Systèmes raccordés au réseau.

### 5.1. Systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes qui traduisent les différentes possibilités offertes : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique (voir la figure. I.9)[9].

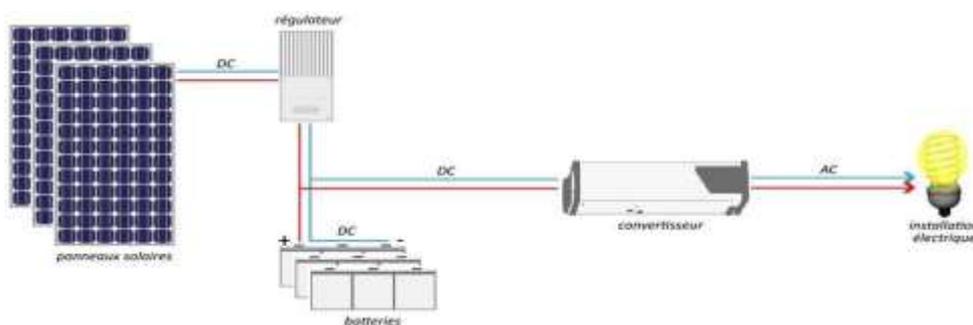


Figure 1.9 : Structure d'un système PV autonome.

## 5.2. Les systèmes hybrides

Systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolien, groupe électrogène, système hydroélectrique et même parfois le réseau public d'électricité (voir la figure I.10).

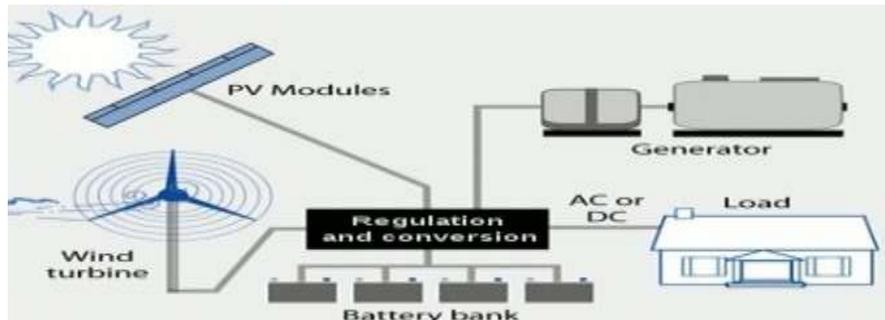


Figure 1.10 : Structure d'un système hybride.

## 5.3. Les systèmes raccordés au réseau

Un système photovoltaïque connecté au réseau, est un système raccordé directement au réseau électrique à l'aide de convertisseurs. Ce type de système offre beaucoup de facilités pour le (producteur/consommateur) puisque c'est le réseau qui se charge du maintien de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. La figure(1.11) représente un système PV connecté au réseau électrique.

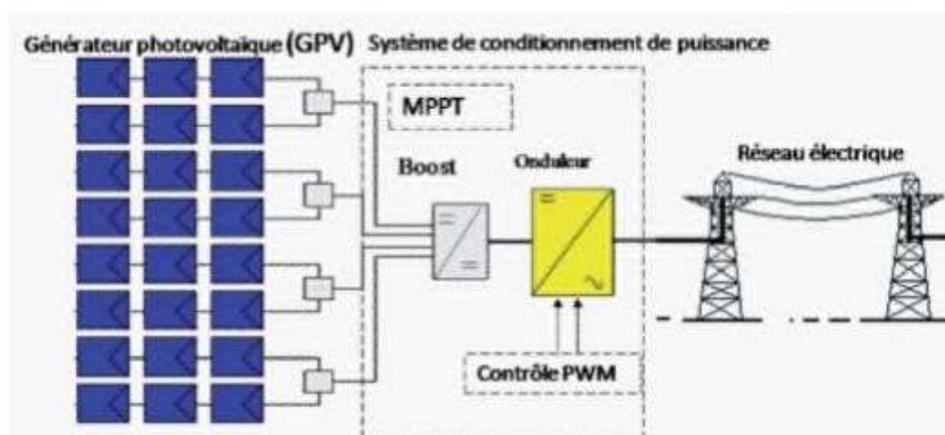


Figure 1.11 : Structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

Dans notre travail nous nous sommes intéressées aux systèmes raccordés au réseau

électrique pour les avantages suivants :

- C'est le réseau qui s'occupe du maintien de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.
- Absence de batteries, on ne stocke plus l'énergie on l'injecte directement dans le réseau local ou national.
- Toute l'énergie est récupérée.

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau l'un des objectifs que doit réaliser l'onduleur connecté au réseau, est le contrôle du courant issu du champ des modules photovoltaïques et de la puissance injectée au réseau suivant les normes en vigueur. De ce fait, les spécifications standards servant à la conception d'un onduleur connecté, concerneront la puissance nominale, la tension nominale du réseau, la tension maximale du DC-bus, le contrôle de l'onduleur etc.

## 6. Potentiel solaire en Algérie

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays. Le tableau suivant résume le potentiel solaire en Algérie [7].

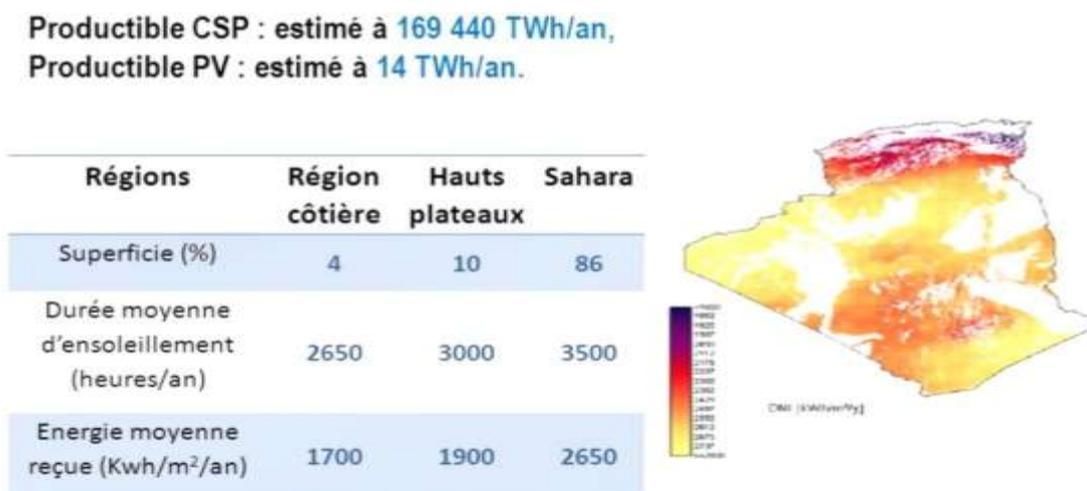
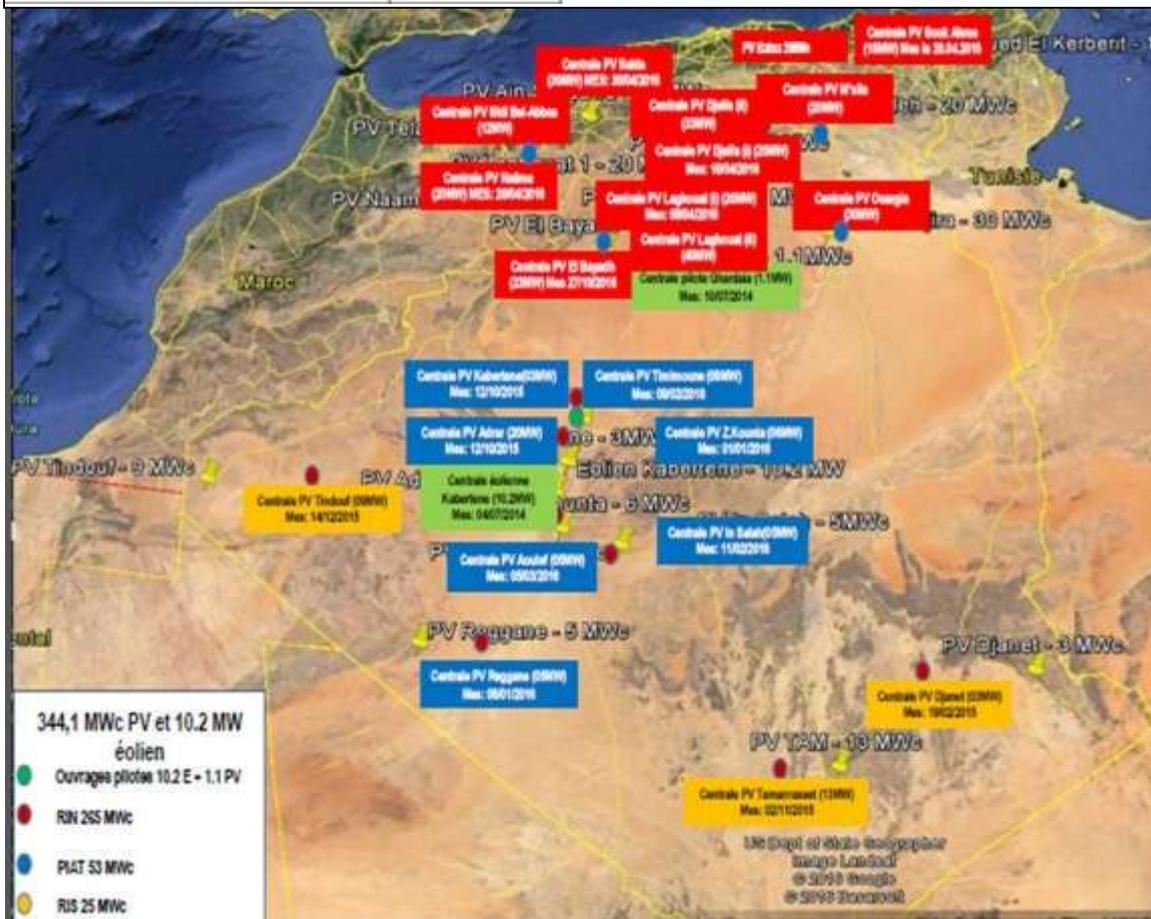


Figure 1.12 : Potentiel solaire en Algérie [7].

- Nombre des centrales installée : 21 Centrales (21 Cle PV et 01 Cle Eolien).
- Puissance Installée : 354,3 MW (344,1 MWc PV et 10,2 MWEolien).

**Tableau 1 .1** : Les puissances des centrales PV installée en Algérie [7].

Centrales	P. Installée (MWc)	Centrales	P. Installée (MWc)
<b>1- Réseau PIAT</b>		<b>3- Réseau RIN</b>	
Eolienne Kabertène	10,2	Oued Nechou PV (Ghardaia)	1,1
Adrar	20	Sedret Leghzel (Naâma)	20
Kabertène	03	Oued El kebrit (Souk Ahras)	15
In Salah	05	Ain Skhoua (Saida)	30
Timimoune	09	Ain El Bel (Djelfa) 1 et 2	53
Regguen	05	Lekhneg (Laghouat) 1 et 2	60
Zaouiat Kounta	06	Telagh (Sidi-Bel-Abbes)	12
Aoulef	05	Labiodh Sidi Chikh (El-Bayadh)	23
<b>2- Réseau RIS</b>		El Hdjira (Ouargla)	30
Tamanrasset	13	Ain-El-Melh (M'Sila)	20
Djanet	03	Oued El Ma (Batna)	02
Tindouf	09	<b>Total SKTM (EnR)</b>	<b>354,3</b>



**Figure 1.13** : Les centrales PV installée en Algérie

## 7. Conclusion

---

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas des combustibles fossiles. Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles car, elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets. Vu sa situation géographique, l'Algérie est un pays qui dispose d'un potentiel solaire de plus important, au monde. Un renforcement des programmes en matière de réalisation d'installation photovoltaïque doivent être engagés dans notre pays et les efforts de recherche doivent être doublés de la part de tous les acteurs de l'énergie (politiques, universités, centres).

# **Chapitre 2**

**Étude et présentation d'un  
système photovoltaïque**

# 1. Introduction :

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera.

L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. [10]

Dans ce chapitre nous décrivons la conception d'un système photovoltaïque « stand-alone »

et le principe de fonctionnement de chaque élément le constituant.

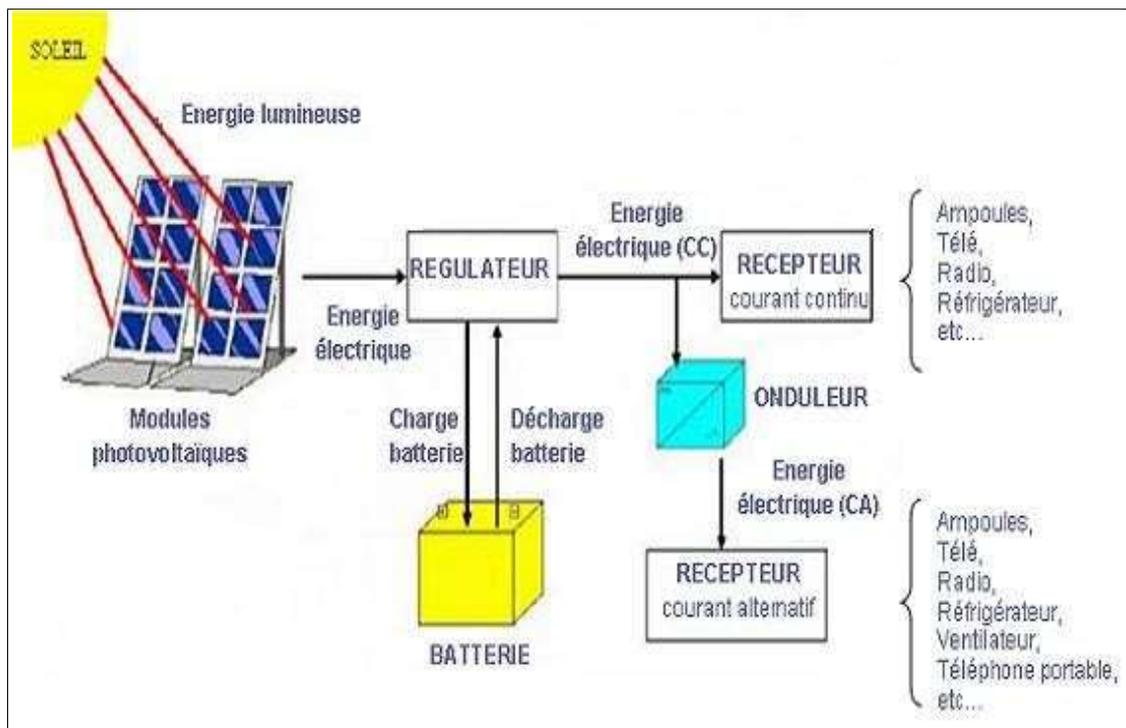


Fig. (2 -1) : Système photovoltaïque autonome [11].

## 2. Généralité sur le soleil:

---

### 2.1. Rayonnement solaire:

---

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène – hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

Sa lumière, à une vitesse de **300000km/s**, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5µm, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [12]  
:

- Diamètre de soleil **Ds =1.39\*m**
- Diamètre de la terre **Dt =1.27\*m**
- Distance moyenne soleil- terre **Lts =1.5\* 10<sup>8</sup> m**

### 2.2. Spectre du rayonnement:

---

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde.

L'énergie de chaque photon est donnée par la formule suivante:

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (2.1)$$

**h = 6,62 \* 10<sup>-34</sup> JS<sup>-1</sup>** est la constante de Planck.

---

$C = 3 \text{ mS}^{-1}$  étant la vitesse de propagation.

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à  $5800^\circ \text{ K}$ . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en :[13].

**2.2.1. Ultraviolet UV  $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$  6.4%**

**2.2.2. Visible  $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$  48.0%**

**2.2.3. Infrarouge IR  $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$  45.6%**

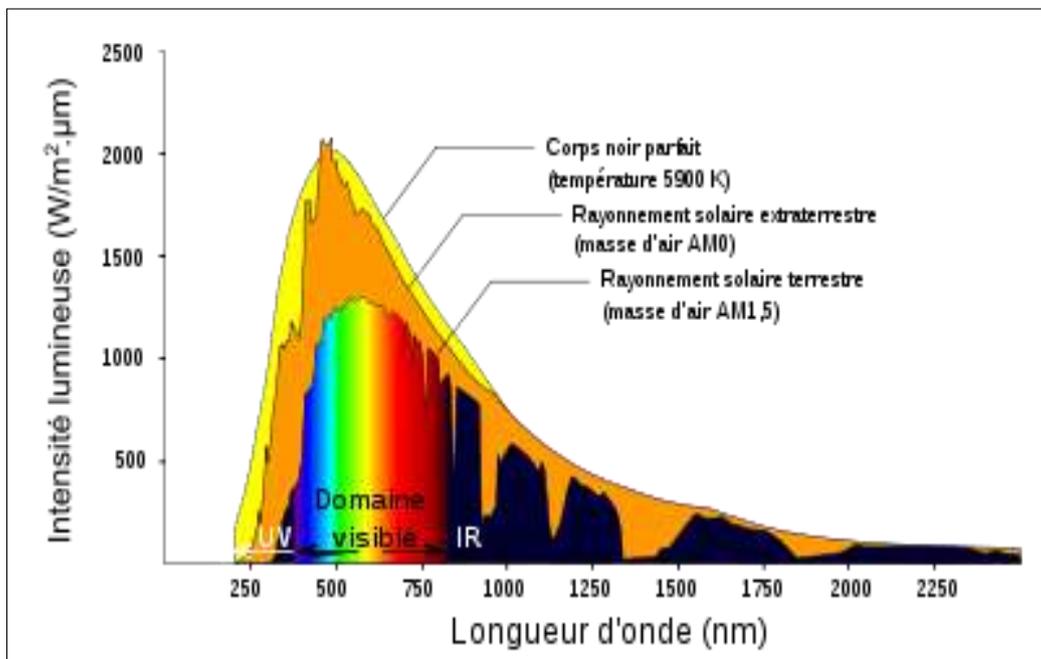


Fig. (2 -2) : le spectre du rayonnement solaire [14].

### 3. Différents types de rayonnement:

---

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

- Le rayonnement direct :

est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

- Le rayonnement diffus :

est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée circumpolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bandehorizon.

- L'albédo :

est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

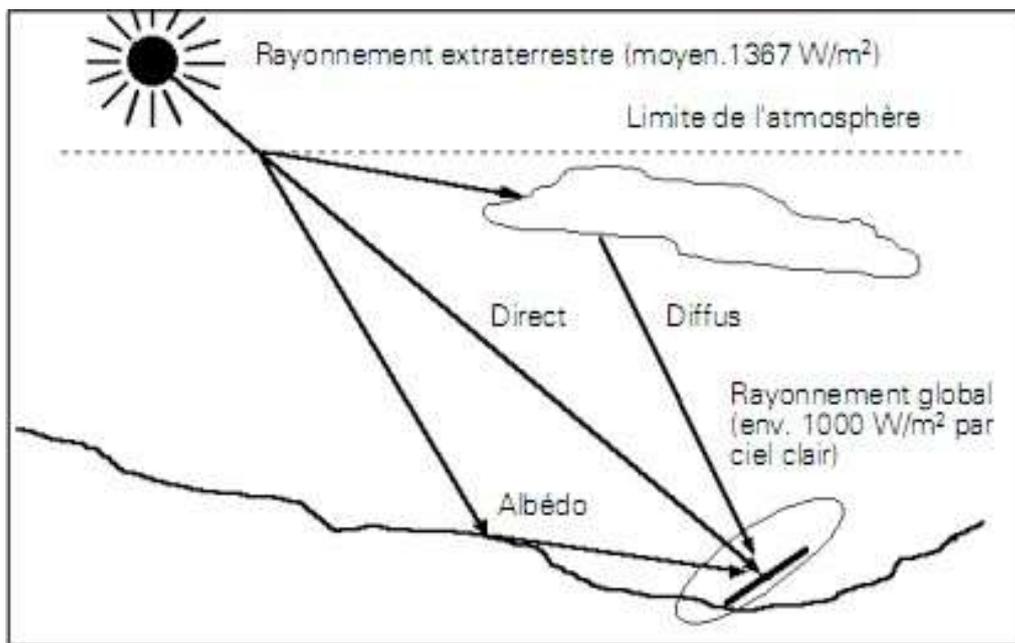


Fig. (2 -3) : composants du rayonnement solaire : extraterrestre, globale=direct+diffus +albédo [15].

## 4. Orientation et inclinaison:

---

La question qui vient immédiatement à l'esprit est: comment placer les panneaux solaires pour récupérer un maximum de rayonnement solaire et comment savoir quelle énergie on va récupérer?

Pour installer un panneau solaire on doit se préoccuper à la fois de l'orientation et de l'inclinaison. L'orientation indique tout simplement vers quel point cardinal un panneau est exposé : il peut faire face au Sud, au Nord, à l'Est, à l'Ouest... tout comme la façade d'une maison. L'inclinaison, quant à elle, est l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal.

Etant donné que la position du soleil dans le ciel varie constamment, il faudrait idéalement que le panneau suive le soleil. Il existe de tels dispositifs «suiveurs», mais ils consomment une part de l'énergie et sont souvent assez onéreux (pour supporter tous les climats) et demandent de l'entretien. Ils sont surtout justifiés pour de gros systèmes avec concentration et pour des rayonnements directs uniquement.

En pratique, l'inclinaison optimale pour une utilisation annuelle, est déterminée par la règle suivante:

***Inclinaison optimale pour une utilisation annuelle = Latitude du lieu + 10°***

Cet emplacement idéal se justifie, encore une fois, surtout pour les rayonnements directs et les panneaux qui convertissent le mieux ce rayonnement, en l'occurrence les panneaux au silicium cristallin. Les panneaux au silicium amorphe, quant à eux, convertissent très bien le rayonnement diffus, et pourront être placés par exemple à l'horizontale sans perdre trop d'énergie solaire dans les climats où il y a beaucoup de rayonnement diffus[16].

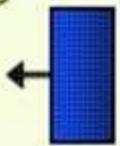
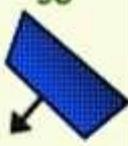
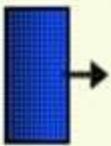
		ORIENTATION				
		O	SO	S	SE	E
INCLINAISON	0° —					
	30° /	93%	93%	100%	96%	90%
	45° /	84%	92%	96%	92%	84%
	60° /	78%	88%	91%	88%	78%
	90°	55%	66%	68%	66%	55%

Fig. (2 -4): l'orientation et l'inclinaison (Alsace-Lorraine) [17].

## 5. Les systèmes photovoltaïques:

---

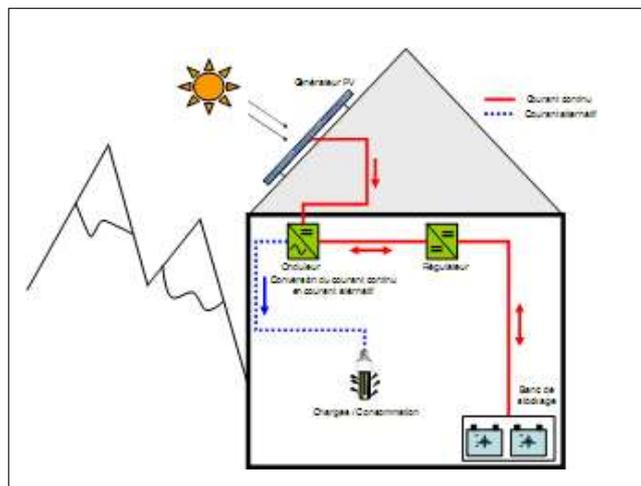
Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée:

- Systèmes isolés et autonomes.
- Systèmes raccordés au réseau.

### 5.1. L'isolé :

---

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs qui se situent dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure (I.4) qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production.



**Fig. (2 -5): Exemple de la structure d'un système PV autonome.**

### 5.2. Le connecté au réseau :

---

La Figure (2.5) représente un système PV connecté au réseau électrique, dont le rôle principal est de contribuer à la production d'électricité d'origine renouvelable sur le réseau. D'un point de vue de la physique, l'énergie produite par les modules est directement consommée par les Charges locales de l'habitat. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation Instantanée est injecté sur le réseau. Le réseau est utilisé en appoint à la production PV.

## 6. Générateur photovoltaïque (PV) :

---

### 6.1. Semi-conducteur :

---

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées.

A la température de **0 K (-273°C)** chaque atome de la grille cristalline est attaché à quatre atomes voisins par la mise en commun de leurs électrons périphériques (liaisons covalentes), assurant la cohésion du cristal, les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium, aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique n'existe. La conductivité du silicium est alors très faible.

Cependant l'élévation de la température permet la libération dans la structure, de certains électrons périphériques, par apport d'énergie. De plus, la libération d'un électron provoque l'apparition d'un trou dans la structure cristalline, soit la création d'une paire électron-trou.

Par exemple, à la température de **300 K (27°C)**, il y a **1.45\*** paires électron-trou dans un centimètre cube de silicium. Ce phénomène est à l'origine de l'augmentation de la conductivité du semi-conducteur[19].

### 6.2. La jonction N-P :

---

La jonction **N-P** 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.

Examinons le fonctionnement d'un tel dispositif. Imaginons que l'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 porteurs minoritaires. Si l'on polarise la jonction en sens inverse.

Les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-), ils s'éloignent de la jonction, laissant au voisinage de celle-ci des charges dues aux impuretés ionisées. Mais ces impuretés sont des atomes rigidement liés au réseau cristallin, qui ne peuvent se déplacer. Si l'on met les deux parties en contact, on a au voisinage une région isolante, et la résistance du dispositif en polarisation inverse sera donc très élevée. La jonction **N-P** joue donc le rôle d'un redresseur laissant passer le courant électrique en polarisation directe et présentant une très forte résistance en polarisation inverse. Si la polarisation est directe, il y a injection de porteurs minoritaires, par exemple des électrons dans la région **P** ; ces électrons ont tendance à se recombiner avec les trous présents en grand nombre dans cette région **P** ; ils le font au bout d'un temps  $t$  appelé durée de vie des porteurs minoritaires[20].

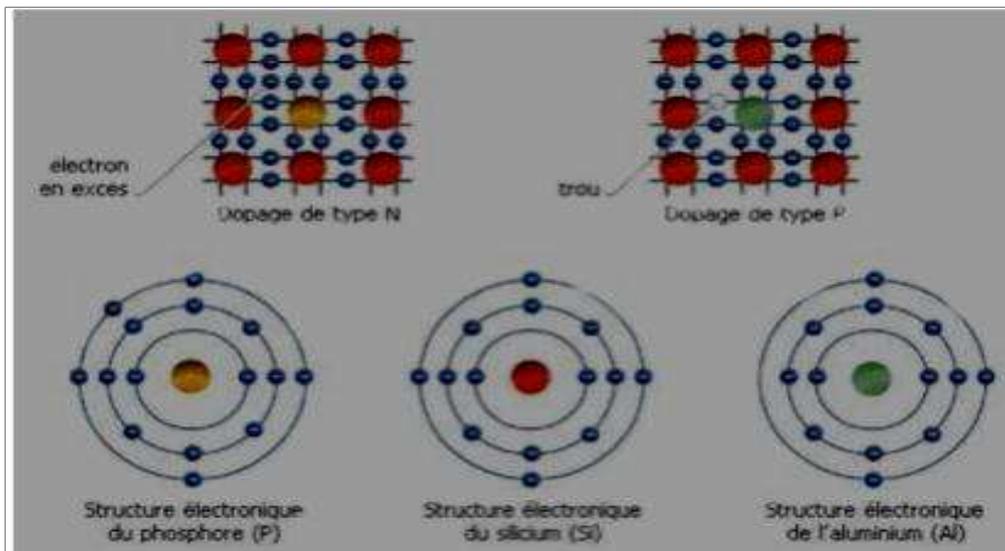


Fig. (2 -6):dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si)[21].

## 7. Les cellules photovoltaïques:

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », ont été découvertes par **E. Becquerel en 1839** [22]. Elles sont réalisées à

l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants [23].

Les matériaux les plus connus sont:

- le silicium (Si)
- le sulfure de cadmium (CdS)
- l'arséniure de gallium (GaAs)
- le tellure de cadmium (CdTe)
- le germanium (Ge)
- le phosphore d'indium (InP)

La figure suivante représente les différentes technologies des cellules PV :

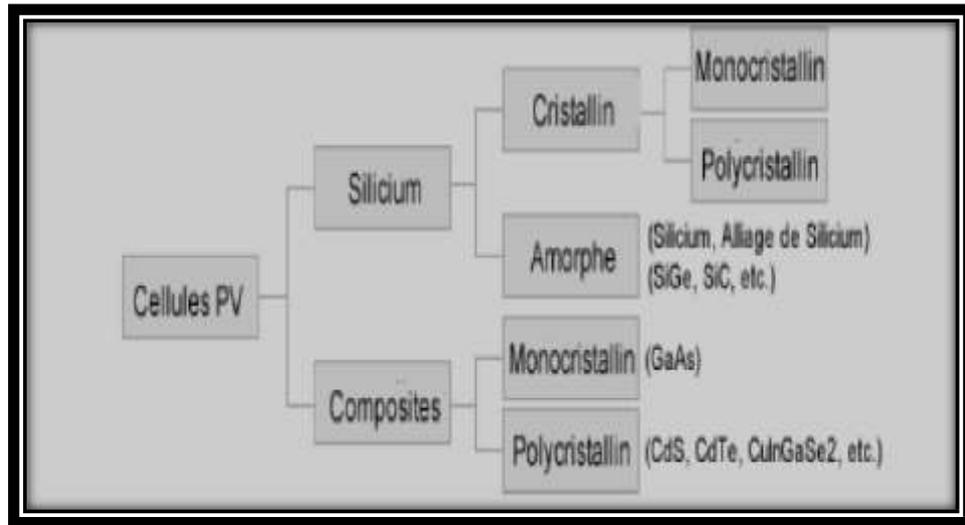


Fig. (2 -7):les différentes technologies [24]. :

## 7.1. Principe de fonctionnement:

---

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales.

La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de

l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable.

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit:

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ( $E_{ph} = h\nu$ ) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires «électron-trou». Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel .

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique qui circule. Figure (2 -8)[25].

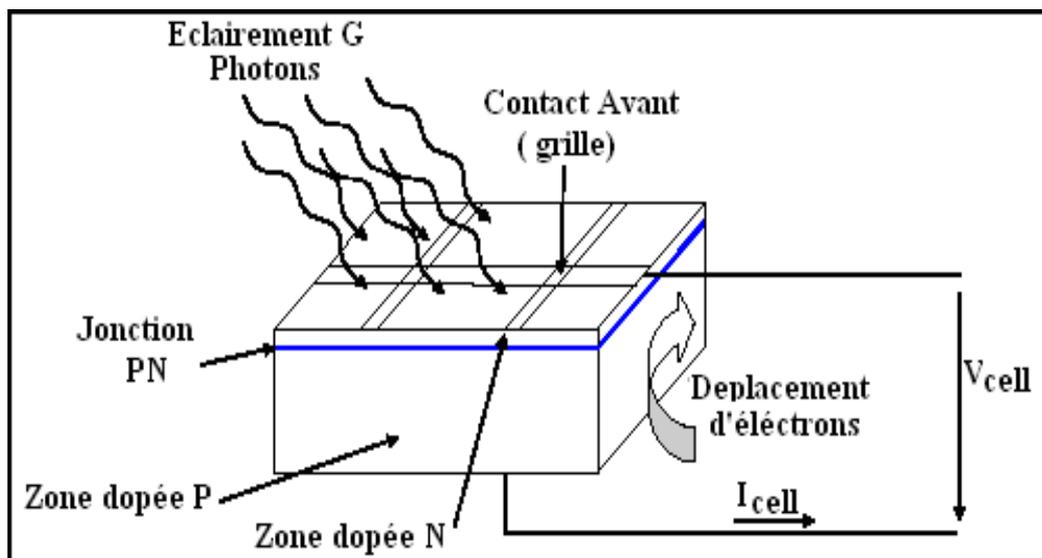


Fig. (2 -8): Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire [26].

Les cellules les plus répandues actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de **0.6 V**) [18].

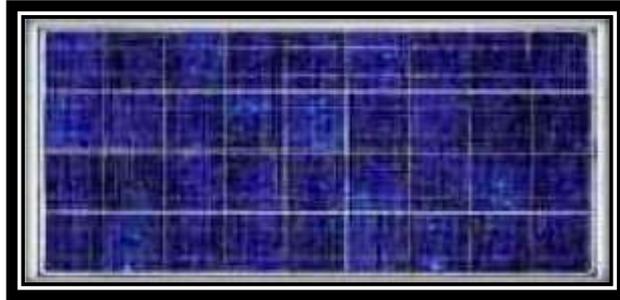
## 7.2. Les différents types des cellules photovoltaïques:

Il existe trois types principaux des cellules :

### a) Silicium monocristallin:

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

Fig. (2 -9) : Cellule en silicium monocristallin [27] .



#### Avantages :

- Rendement électrique des panneaux : 15 %STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150Wc
- Gamme d'éclairage : 100 à 1000W/m<sup>2</sup>.
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais ,habitat...).

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Première génération de photopiles.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

### b) Silicium poly (ou multi-) cristallin :

Cousin germain du précédent (composés de multi cristaux), il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairages modérés, et également moins onéreux.



Fig. (2 -10):Cellule en silicium polycristallin [28]

#### Avantages :

- Rendement électrique des panneaux : 12-14 %STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150Wc.
- Gamme d'éclairage : 200 à 1000W/m<sup>2</sup>.
- Usage identique à celui du siliciumcristallin.

## Inconvénients:

- Rendement faible sous un faible éclairement.

### c) Silicium amorphe:

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairagements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe.

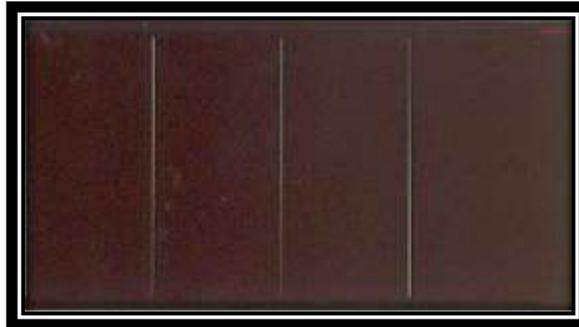


Fig. (2 -11):Cellule silicium amorphe[28] .

- Rendement électrique des panneaux : 5-7 % STC (jusqu'à 9 % pour les « multi jonctions »).
- Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1Wc.
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 60Wc.
- Gamme d'éclairement : 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m<sup>2</sup> (en extérieur).
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes...), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi transparentes.

## 7.3. Paramètre des cellules photovoltaïques :

Les paramètres des cellules photovoltaïques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $P_{max}$ ,  $A$ ,  $ff$  et  $\eta$ ), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

### a) Courant de court-circuit $I_{cc}$ :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ( $V = 0$ ). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

On peut écrire :  $I_{cc} (V = 0) = I_{ph}$

### b) Tension à circuit ouvert $V_{co}$ :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul.

Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse :

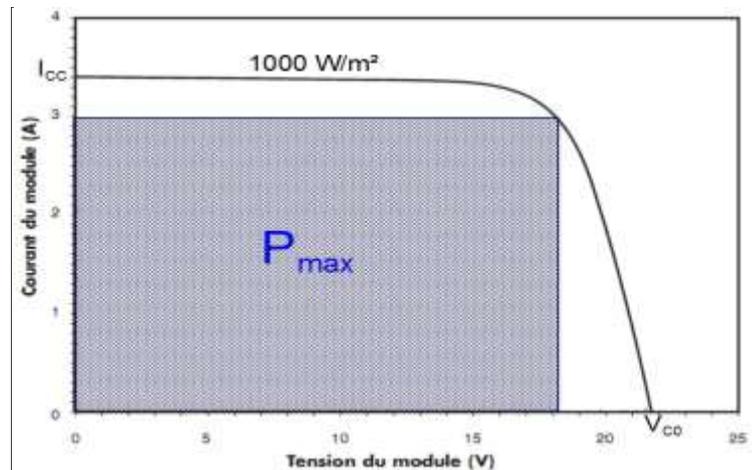


Fig. (2 -12): Courbe I(V) à  $T=25$  et un éclairement de  $1000\text{W/m}^2$ .

### c) Puissance maximale:

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée  $P_{max}$ ) pour un point de fonctionnement  $P_{max}(I_{max}, V_{max})$  de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et  $I_{cc}$  et tension comprise entre 0 et  $V_{co}$ ).

### d) Rendement d'une cellule:

On définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximum et la puissance incidente

### e) Le facteur de remplissage:

Le facteur de remplissage ou facteur de forme, encore souvent appelé par sa dénomination anglaise (Fill Factor) correspond à la puissance maximum délivrée par la cellule, divisée par le produit  $V_{co} \cdot I_{cc}$ , correspondant à la puissance maximal idéale.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est dans le cas général assez faible, de l'ordre de 10 à 20%. Des rendements plus importants ont été obtenus à l'aide de nouveaux matériaux (en laboratoire, l'arséniure de gallium  $AsGa$  donne des rendements supérieurs à 25%) ou de techniques expérimentales (technologies multicouches), souvent difficiles et coûteuses à mettre en œuvre. Cependant, le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le silicium, qui représente

une solution économique. Pour de telles cellules, le rendement énergétique ne dépasse pas les 15%. D'après les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, on peut déduire d'autres paramètres :

- Le courant de court circuit **I<sub>cc</sub>**, soit le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. En pratique ce courant est très proche du photo courant **I<sub>ph</sub>**.
- La tension de circuit ouvert **V<sub>co</sub>**, soit la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.
- Entre ces deux extrêmes, il existe un optimum donnant la plus grande puissance **P<sub>max</sub>** ou **MPP**(Maximum Power Point).

## 7.4. Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque :

---

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairage et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe **I = f(V)** est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (2.4.3) représente trois zones essentielles:

a) **La zone (1)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

b) **La zone (2)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

c) **La zone (3)**: qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

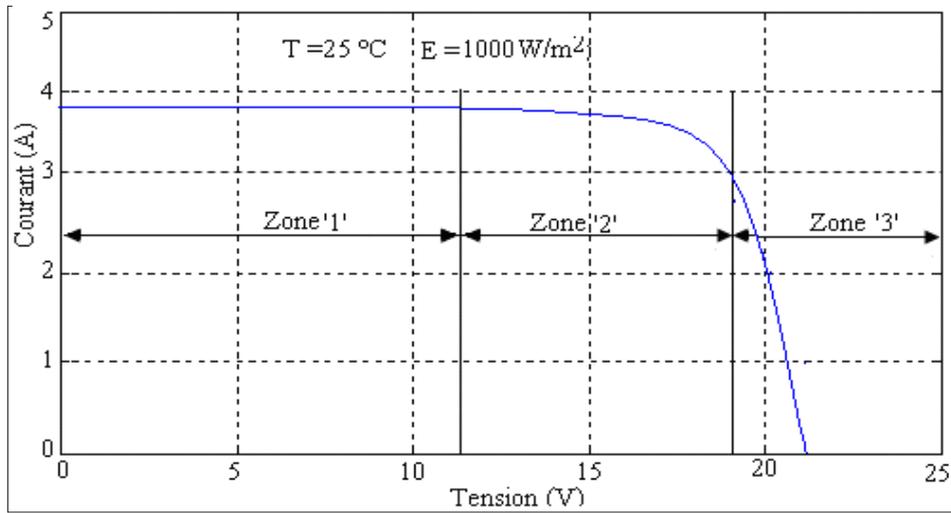


Fig. (2 -13): Les différentes zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque[29].

## 8. Le module photovoltaïque:

Rappelons tout d'abord que les modules photovoltaïques sont des convertisseurs d'énergie lumineuse en électricité, à ne pas confondre avec les capteurs solaires thermiques ou capteurs plans, qui eux produisent de la chaleur à partir des rayons solaires.

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. en effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension entre : 0,5 et 1,5 selon les technologies .Il faut presque toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable [30].

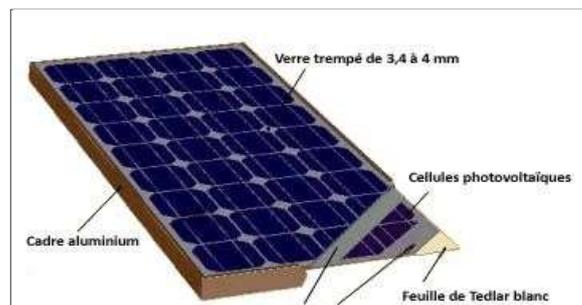


Fig. (2 -14): Un module photovoltaïque [31].

Les modules en silicium mono cristallin (64% du marché avec une efficacité de Conversion (énergie électrique produite / énergie solaire incidente) de l'ordre de 15 à 18%), poly cristallin (28% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 13 à 15 %) ou silicium amorphe (13% du marché avec une efficacité de conversion de l'ordre de 5 à 12 %) délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48V) et des puissances comprises entre

10 et 100 Wc (Watt- crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal)[32].

**b.1)** Caractéristiques d'un module :

Voici la description des paramètres d'un module:

- **La puissance crête  $P_c$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standard (25°C et un éclairement de (1000 W/m<sup>2</sup>).

**La caractéristique  $I(V)$** : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

- **Tension à vide  $V_{co}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil".
- **Courant de court-circuit  $I_{cc}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour éclairement " plein soleil".
- **Point de fonctionnement optimum ( $U_m, I_m$ )** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = U_m \cdot I_m$
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} \cdot I_{cc}$  [33].

## 8.1. Association des modules photovoltaïques :

---

Un module des cellules connecté en parallèle est suffisant pour augmenter le courant du générateur on associe "Np" modules en parallèle comme montré dans les figures (2.15-b) et (2.15-a). Pour obtenir une augmentation de la tension du générateur on associe "Ns" modules en série comme le montrent les figures précédentes.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque Figure (2.15-c). [34].

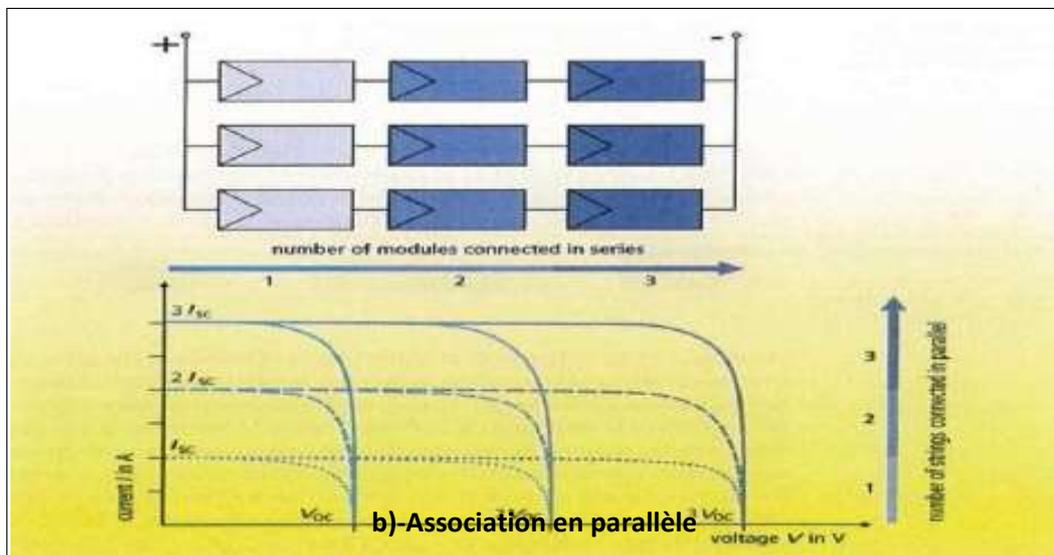
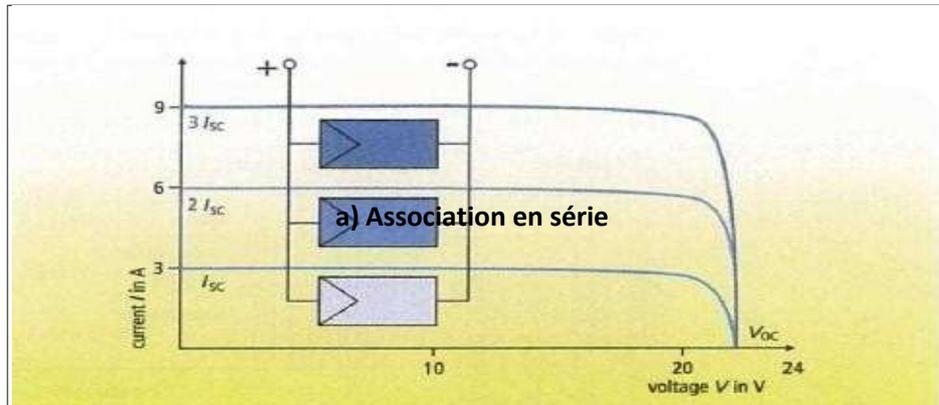
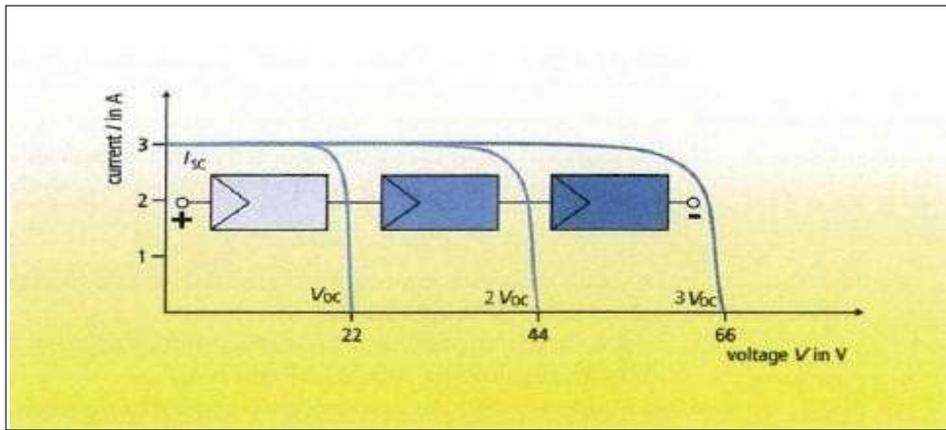


Fig. (2 -15): Association des modules photovoltaïques .

## 8.2. Le panneau solaire:

---

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. [35].

Le composant le plus crucial de toute installation PV est le module PV, qui se compose de piles solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des panneaux et des ensembles (champs) de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie, comme le montre la figure[36].

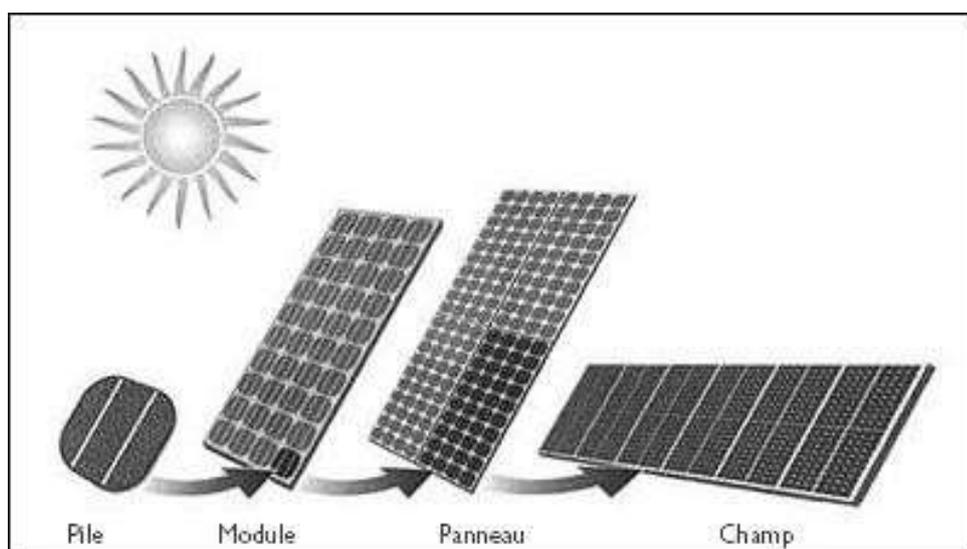


Fig. (2 -16): Composants d'un champ de modules PV

## 9. Système de conversion :

---

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de Convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif).

A l'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans

soleil.

## 9.1. Le convertisseur continu-continu :

---

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95%.

Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.

## 9.2. Le convertisseur continu- alternatif :

---

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

- **Rotatif** : c'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW. Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité. Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).
- **Statique** : on le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. Avec ce système, on obtient:
  - Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
  - De faibles pertes à vide[37].

## 10. Avantages et inconvénients d'une installation PV [38] :

---

*a) Avantages:*

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

*b) Inconvénients:*

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km<sup>2</sup> par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. · Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé

## 11. Conclusion :

---

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, leurs différents types et leur application dans le domaine photovoltaïque, nous avons ensuite expliqué le fonctionnement de cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût. Et une synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement. Nous avons rappelé aussi les modules photovoltaïques et leurs associations.

# Chapitre 3

**Modélisation d'un panneau**

**PV**

## 1. Introduction :

---

Lorsque la jonction PN est éclairée, elle peut fonctionner en générateur. Dans ce chapitre nous allons établir le modèle mathématique d'un panneau photovoltaïque, qui nous permette de tracer la caractéristique courant-tension de sortie.

## 2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

---

### 2.1. modèle mathématique :

---

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant  $I_{PV}$  proportionnel à la quantité de photons reçus par la cellule, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes. Le courant  $I$  issu de la cellule s'écrit alors.

$$3.1 \quad I = I_{pv\text{cette}} - I_{sat\text{cette}} \left( \exp \left( \frac{q \cdot V}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p}$$

Ou :

$$I_{pv\text{cette}} = a_1 \cdot w \cdot \text{photo courant (A)}.$$

Avec :

$$a_1 = 2.5 \cdot 10^{-7} T + 2 \cdot 10^4 \text{ [en A/ (w/m}^2\text{)]}$$

$$I_D = I_{sat\text{cette}} \left( \exp \left( \frac{q \cdot v}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) \quad 3.2$$

Avec :

$$I = I_{pv\text{cette}} - I_D$$

$V_T = kT / q$  : la potentielle thermodynamique à une température donnée.

$I_D$  : le courant d'une jonction PN (A).

$I_{sat}$  : le courant de saturation(A).

$R_s$  : résistance série ( $\Omega$ ).

$R_p$  : résistance parallèle (shunt)( $\Omega$ ).

$K$  : la constante de Boltzmann ( $k=1.38 \cdot 10^{-3}(\text{j} / ^\circ\text{k})$ ).

$q$  : la charge de l'électron ( $q=1.6 \cdot 10^{-19}(\text{c})$ ).

$T$  : la température de la cellule ( $^\circ\text{k}$ ).

$a$  : le facteur d'idéalité ( $1 \leq a \leq 2$ ,  $a=2$  pour une diode en silicium).

On peut déduire de ces expressions, un schéma équivalent comme le montre la figure.3.1

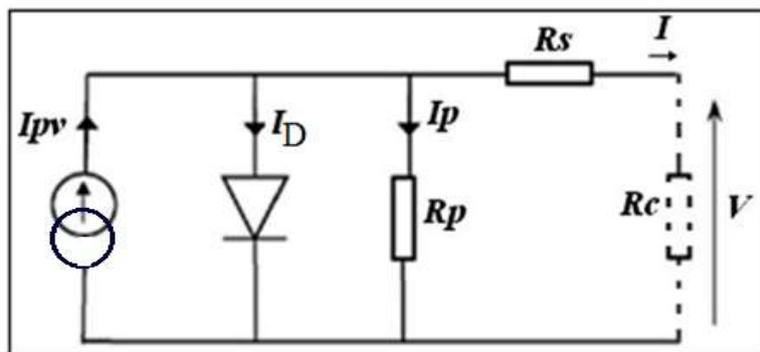


Fig.3.1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Les valeurs respectives de ces éléments déterminent les performances de la cellule réelle en particulier les caractéristiques courant-tension  $I = f(V)$  comme le montre la figure 3.2

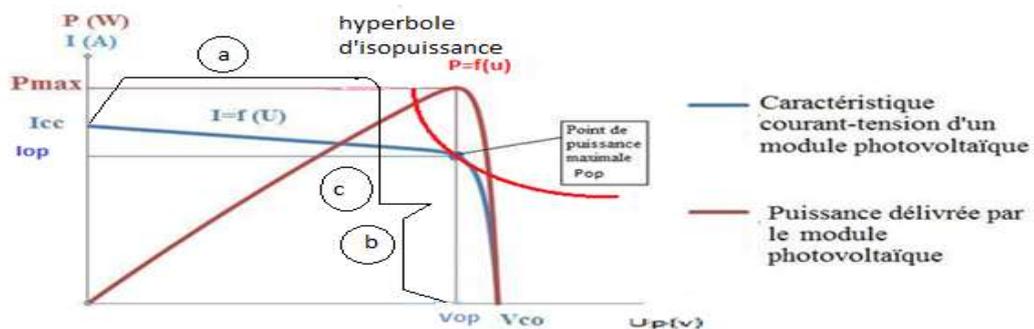


Fig.3.2 les différentes zones de la Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle.

- ❖ Quatre données essentielles permettent de déterminer la caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque :
- le courant de court-circuit noté  $I_{cc}$ .
- la tension à vide noté  $V_{co}$ .
- le courant de puissance maximale noté  $I_{op}$ .
- la tension de puissance maximale noté  $V_{op}$ .

-Le courant de puissance maximale et la tension de puissance maximale sont définis tels que le produit  $I_{op} * V_{op}$  est maximale.

-La valeur des 4 paramètres ci-dessous sont dépendants de l'éclairement et de la température de module.

La figure 3.1. montre que la caractéristique  $I=f(u)$  se divise en 3 parties.

**1- La zone (a):** où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

**2- La zone (b):** correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

**3- La zone (c):** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant  $I_{pv}$

Enfin les deux résistances modélisent les pertes internes :

$R_s$  (résistance série) : modélise les pertes ohmiques du matériau.

$R_p$  (résistance parallèle) : modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

Généralement, on peut négliger le terme  $R_s$ .  $I$  devant  $V$ , puis travailler avec un modèle simplifié :

$$I = I_{pv\text{cell}} - I_{sat\text{cell}} \left( \exp \left( \frac{q \cdot V}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) - \frac{V}{R_p} \quad 3.3$$

Comme la résistance parallèle est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut encore négliger le courant dévié dans  $R_p$ , on obtient :

$$I = I_{pv\text{cell}} - I_{sat\text{cell}} \left( \exp \left( \frac{qV}{akT} \right) - 1 \right) \quad 3.4$$

Le schém:  
idéale :

espondant à celui d'une cellule

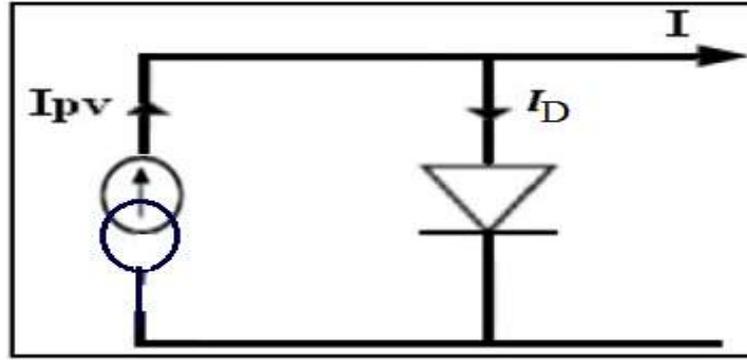


Fig.3.3 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéal

### 3. Modélisation d'un panneau photovoltaïque :

#### 3.1. Caractéristique d'un panneau photovoltaïque :

Une fois que l'on a caractérisé la cellule photovoltaïque, on modélise le module comme une association de  $N_S$  cellules en série,  $N_P$  cellule en parallèles en supposant qu'elles sont identiques. Le courant de court-circuit du module est multiple par  $N_P$ , tandis que la tension à circuit ouvert du module se multiplie par  $N_S$ .

La caractéristique d'un module qui comporte  $N_S$  cellules connectées en série et en  $N_P$  cellules connectées en parallèle est donnée par :

$$I = I_{pv} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{V + R_s I}{a V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad 3.5$$

Avec :  $I_{pv} = I_{pv\text{cell}} * N_P$  et  $I_{sat} = I_{sat\text{cell}} * N_P$

Et  $V_T = N_S k T / q$  : le potentiel thermodynamique d'un panneau photovoltaïque.

Les équations du modèle sont présentées en détails et le modèle

Est validé avec les données expérimentales

Le courant généré par le panneau photovoltaïque dépend linéairement de l'irradiation solaire et est également influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{pv} = (I_{pvn} + K_I \Delta T) W / W_n \quad 3.6$$

Avec :  $I_{pvn} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{ccn}$

$I_{pv, n}$  : est le courant généré par la lumière à la valeur nominale .(Généralement de 25°C et 1000w /m<sup>2</sup>),

$\Delta T = T - T_n$  : (T et T<sub>n</sub> étant la température réelle et nominale [K]),

W [w/m<sup>2</sup>] : est l'irradiation sur la surface du dispositif,

W<sub>n</sub> : est l'irradiation nominale

L'hypothèse  $I_{cc} \approx I_{pv}$  est généralement utilisée dans les modèles photovoltaïques, car dans les dispositifs pratiques la série la résistance est faible et la résistance parallèle est élevée

$$I_{cc} = (I_{ccn} + k_I \Delta T) W / W_n$$

$I_{cc}$  : courant de court circuit

Le courant de saturation  $I_{sat}$  de diode et de sa dépendance sur la température peut être exprimée

$$A \quad I_{sat} = I_{satn} \left( \frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left( \frac{qE_g}{ak} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad 3.7$$

$$I_{satn} = \frac{I_{ccn}}{\exp \left( \frac{V_{ccn}}{aVT_n} \right) - 1}$$

E<sub>g</sub> : l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur (E<sub>g</sub> ≈ 1,12eV pour le silicium à 25°C)

$I_{sat, n}$  : le courant de saturation nominale

V<sub>T, n</sub> : la tension thermique à la température nominale

Le modèle photovoltaïque décrit dans la section précédente peut être améliorée si l'équation (III.7) est remplacé par :

$$I_{Sat} = \frac{I_{ccn} + K_i \Delta T}{\exp \left( \frac{V_{CCn} + K_v \Delta T}{aVT} \right) - 1} \quad 3.9$$

L'équation (III.10) peut être introduite dans le modèle :

$$I_{PVn} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{ccn} \quad 3.10$$

### III.3 Calcul de $R_s$ et $R_p$ :

La relation entre  $R_s$  et  $R_p$ , les seules inconnues de l'équation (3.5), peut être trouvée en faisant :

$P_{max,m} = P_{max,e}$  et la résolution de l'équation résultante pour  $R_s$ , comme le Montre les équations (III.11) et (III.12) :

$$P_{max,m} = P_{max,e} = V_{op} * I_{op}$$

Où  $P_{max,m}$  : la puissance maximale mesurée

$P_{max,e}$  : la puissance maximale expérimentale

$$P_{max,m} = V_{mp} \left( I_{PV} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{q}{kT} \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{a N_s} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_p} \right) = P_{max,e} \quad 3.11$$

$$R_p = \frac{V_{mp}(V_{mp} + I_{mp})}{V_{mp} I_{PV} - V_{mp} I_{sat} \exp \left( \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{a N_s} \frac{q}{kT} \right) + V_{mp} I_{sat} - P_{max,e}} \quad 3.12$$

Les valeurs initiale de  $R_p$  et  $R_s$  peuvent être proposées par :

$$R_{pmin} = \frac{V_{mp}}{I_{ccn} - I_{mp}} - \frac{(V_{ccn} - V_{mp})}{I_{mp}} \quad 3.13$$

Et :

$$R_{smax} = \frac{(V_{ccn} - V_{mp})}{I_{mp}}$$

La résistance série ( $R_s$ ) du module PV a un grand impact sur la pente de la courbe I-V, par conséquent la valeur de  $R_s$  est calculée en évaluant la pente  $dI / dV$  de la courbe I-V au point  $V_{cc}$ .

D'après l'équation (II8), la valeur de  $R_s$  est évaluée de la façon suivante :

$$dI = 0 - I_{sat} * q \left[ \frac{dV + R_s * dI}{aKT} \right] * \exp \left[ q \left( \frac{V + IR_s}{aKT} \right) \right] \quad 3.14$$

$$R_s = - \frac{dV}{dI} - \frac{aKT/q}{I_{sat} * \exp \left( q \left( \frac{V + IR_s}{akt} \right) \right)} \quad 3.15$$

Alors, d'après l'équation (III.15), la valeur de  $R_s$  est estimée en fonction de  $V_{CC} = V$ .

$$R_s = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{CC}} = \frac{akt/q}{I_{sat} \cdot \exp\left(\frac{qV_{CC}}{akt}\right)} \quad 3.16$$

#### 4. Evaluation de facteur de qualité :

---

Le facteur de qualité de diode ( $a$ ) est inconnu et doit être estimé, généralement il prend une valeur entre 1 et 2. On prend la valeur de  $a=2$  (pour la diode idéale en silicium).

#### 5. Résolution de l'équation $I=f(V)$ :

---

Finalement après la détermination des différents paramètres du circuit équivalent, il est possible de résoudre l'équation de la caractéristique  $I(V)$ , donc on peut résoudre numériquement pour un éclairage donné et une température de module, l'ensemble des paramètres inconnus qui sont ( $I_L$ ,  $I_0$ ,  $n$ ,  $R_s$ ), puis les autres variables inconnues dans l'équation  $I(V)$  originale sont  $I$  et  $V$  du module .

Bien qu'il puisse être possible de trouver la réponse par des itérations simples, la méthode du newton est choisie pour la convergence rapide de la réponse .

La méthode de newton est décrite par la formule suivante :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)},$$

Où :  $f'(x_n)$  est le dérivé de la fonction  $f(x)$ .

$x_n$  : la valeur de l'itération  $n$ .

$x_{n+1}$  : la valeur de l'itération  $n+1$ .

Par conséquent, l'équation (III.4) devient :

$$f(I) = I_{PV} - I - I_{SAT} \left( \exp \left( q \left( \frac{V + IR_s}{aKT} \right) \right) \right) \quad 3.17$$

La substitution de cette équation dans la formule (3.2) donne l'équation (3.4) et le courant de sortie I est calculé itérativement :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{pv} - I_n - I_{SAT} \left( \exp \left( q \frac{V + I_n R_s}{aKT} \right) - 1 \right)}{-1 - I_{SAT} \frac{qR_s}{aKT} \exp \left( q \frac{V + I_n R_s}{aKT} \right)} \quad 3.18$$

## 6. Modélisation d'un générateur :

L'équation de la caractéristique relative à un champ de modules formé par la mise en série de  $M_s$  modules et de  $M_p$  modules en parallèle est extrapolée de celle d'un module.

$$I_G = M_p I_{PV} \cdot M_p \left( \exp \left( M_s V + \frac{M_s R_s I}{a M_p V_T} \right) - 1 \right) - \left( \frac{M_s \cdot V + \frac{M_s R_s I}{M_p}}{\frac{R_p M_s}{M_p}} \right) \quad 3.19$$

Cette relation n'est valable que si tous les modules, constituant le générateur

PV, Sont identiques et reçoivent la même irradiation

## 7. Conclusion :

Ce chapitre à été consacré à la modélisation des panneaux PV. Nous avons d'abord caractérisé la cellule PV à partir de celui d'une jonction PN éclairée, puis nous avons décrit le modèle mathématique associé à un panneau PV, qui nous permet de tracer la caractéristique courant-tension à la sortie du module.

# Chapitre 4

**Convertisseur DC-DC et DC-AC**

# 1. Introduction

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (Éolienne, Photovoltaïque, pile à combustible...). Et dans notre travail on va baser sur les convertisseurs dans le système photovoltaïque. [1]

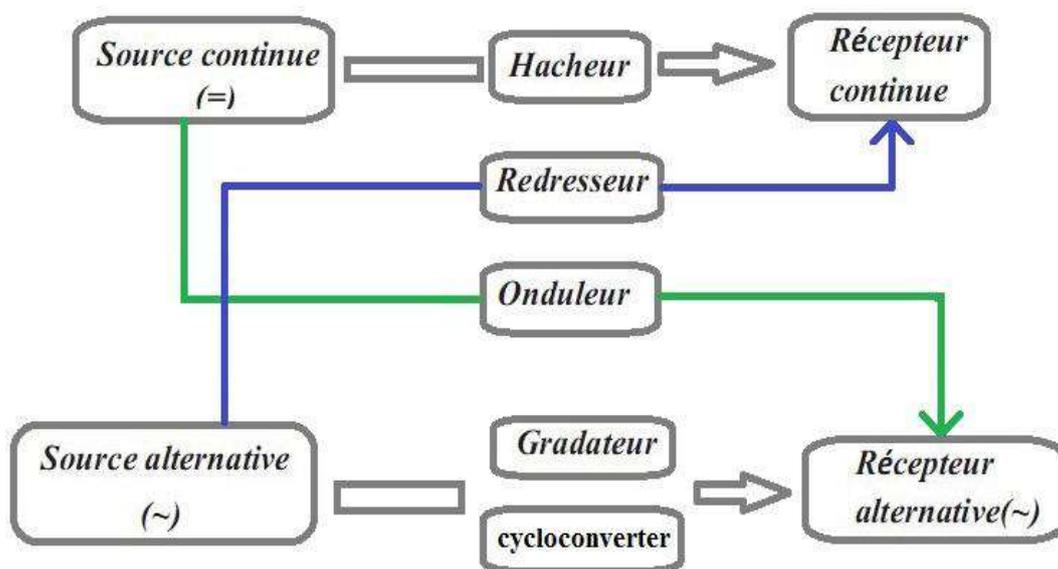


Figure 4. 35 :les différents types de convertisseurs statiques

Le système de conversion photovoltaïque est basé sur des blocs modulaires, commereprésenté dans la figure (4.2) :

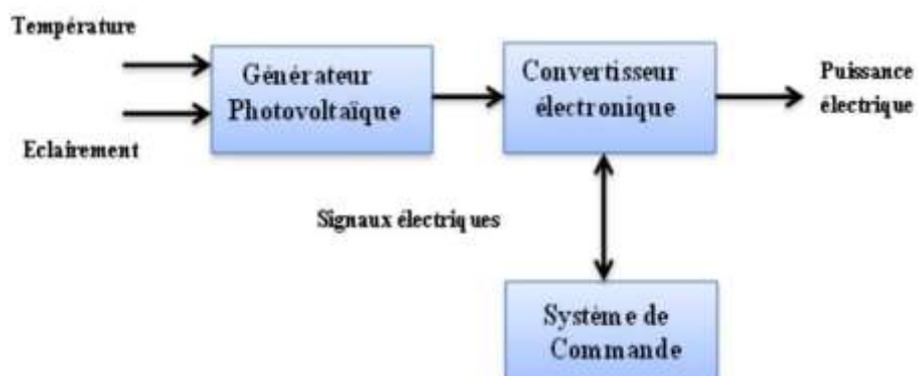


Figure 4. 36 :Système de conversion photovoltaïque

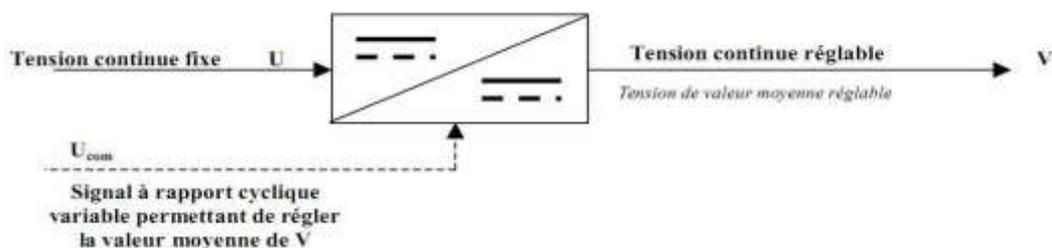
Dans ce chapitre nous présenterons quelques types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on décrit la commande des onduleurs. [12]

## 2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

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.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation.



**Figure 4 . 37** :Schéma de principe de la conversion Continu - continu (DC – DC)

## 3. Type des convertisseurs DC-DC :

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications

sont le Fly back, en demi-point et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté.

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

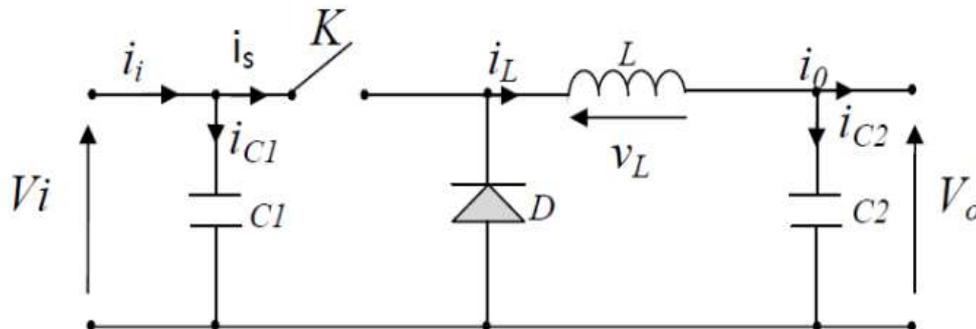
- ✓ Abaisseurs (Buck) ;
- ✓ Élévateurs (Boost) ;
- ✓ Élévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

### 3.1. Hacheur dévolteur (Buck - Converter):

---

Un convertisseur Buck ou hacheur série, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. [13]

La **Figure (4.4)** présente son circuit idéal.



**Figure 4. 38** :Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique. Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (4.2) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur K fermé pendant  $dT_{set}$  ouvert pendant  $(1-d) T_{S}$ .

Où :

- $T_{set}$  est la période de commutation.
- $d$  le rapport cyclique du commutateur ( $d \in [0, 1]$ ).

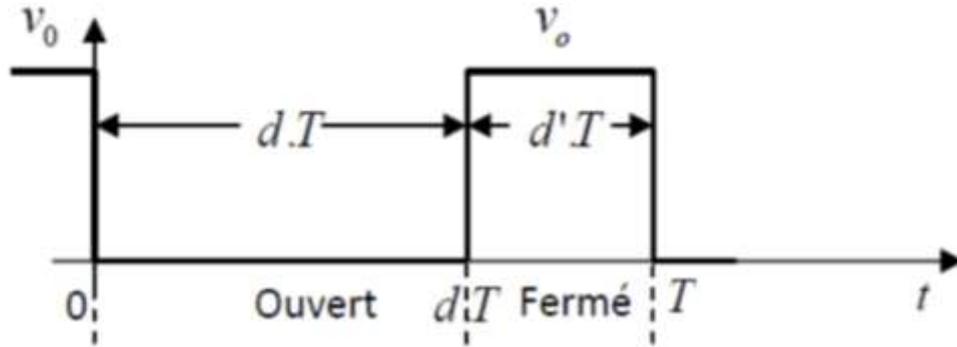


Figure 4. 39 :Périodes fermeture et ouverture d'un interrupteur

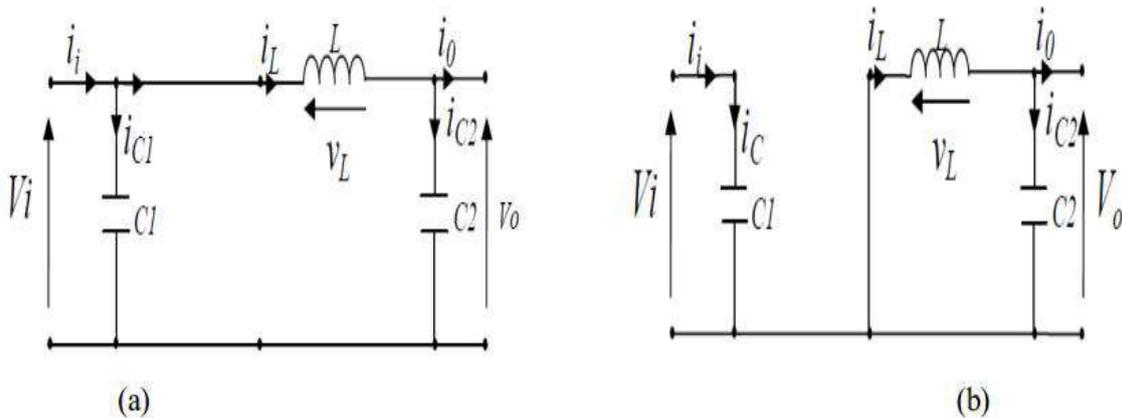


Figure 4. 40 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert

Le rapport de conversion d'un hacheur est le rapport entre la tension d'entrée  $V_i$  et la tension de sortie  $V_o$ . Pour un hacheur dévolteur, il est donné sous la forme suivante :

$$V(D) = v_o/v_i = D$$

Donc le convertisseur Buck est un abaisseur de tension. En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur- survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

Pour la première période  $dT$ s :

$$\begin{aligned} i_{c1} &= c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2} &= c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L - i_o(t) \\ v_1 &= l \frac{di_L}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{aligned} \quad (4.1)$$

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

$$\begin{aligned}
i_{c1} &= c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} - i_l(t) \\
i_{c2} &= c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\
v_l(t) &= l \frac{di_l}{dt} - v_o(t)
\end{aligned} \tag{4.2}$$

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

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt}_{DT_s} + \frac{dx}{dt}_{(1-D)T_s} (1-d) T_s \tag{4.3}$$

En appliquant la relation (4.3) sur les systèmes d'équations (4.1) et (4.2), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{aligned}
c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} T_s &= d T_s (i_i - i_l) + (1-d) T_s i_i \\
c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} T_s &= d T_s (i_l - i_o) + (1-d) T_s (i_l - i_o) \\
l \frac{di_l}{dt} &= d T_s (v_i - v_o) + (1-d) T_s (-v_o)
\end{aligned} \tag{4.4}$$

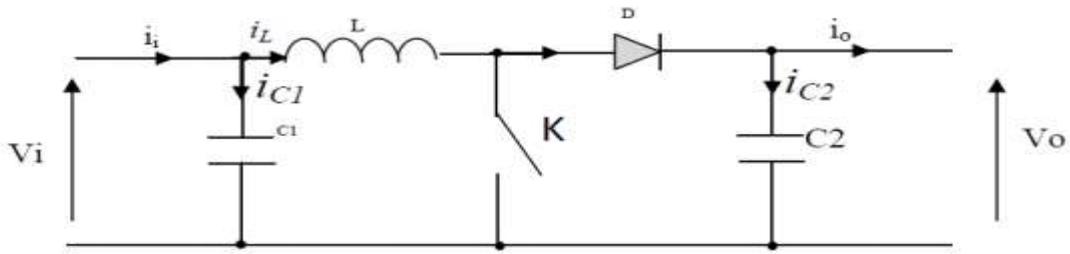
Après arrangement, on obtient :

$$\begin{aligned}
i_o(t) - i_l(t) - c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} - i_i(t) \\
i_l(t) - \frac{1}{d} (i_i(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt}) \\
v_l(t) = \frac{1}{d} (l \frac{di_l}{dt} + v_o(t))
\end{aligned} \tag{4.5}$$

## 3.2. Hacheur survolteur (Boost-Converter) :

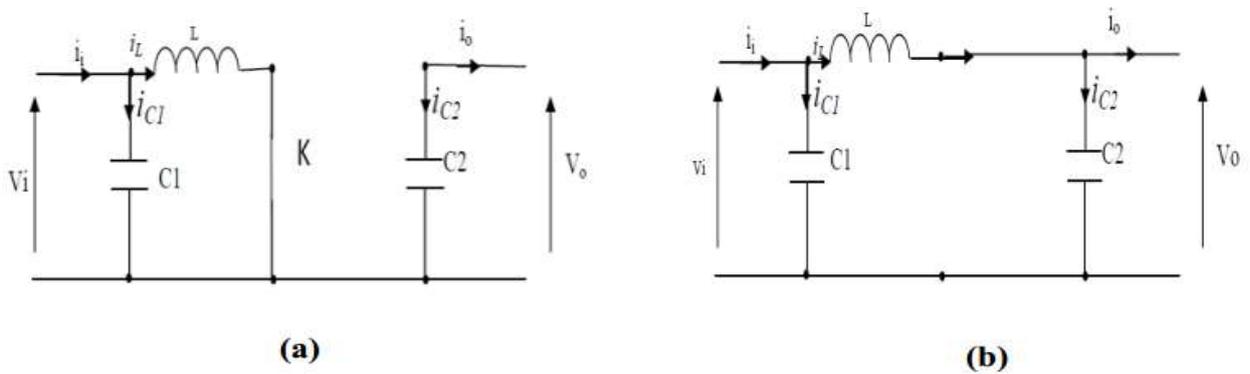
---

Le convertisseur boost ou hacheur parallèle est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur, connu par le nom (Élévateur de tension) peut être représenté par le circuit de la **Figure (4.7)**. [13]



**Figure 4 . 41 :**Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost

LaFigure (4.8) explique le fonctionnement du convertisseur Boost Durant une période de commutation  $T_s$ . Pendant le temps de fermeture ( $t \in [0, D.T_s ]$  ).



**Figure 4 . 42 :**Schémas équivalents du hacheur survolteur : (a) : K fermé, (b) : K ouvert

Le rapport de conversion d'un hacheur Boost est donné sous la forme suivante :

$$(D) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1-D}$$

Donc le convertisseur Boost est un élévateur de tension Pour la première période  $dT_s$  :

$$i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t)$$

$$i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t)$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -v_i(t) \quad (4.6)$$

Pour la deuxième période  $(1-d) T_s$

$$i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t)$$

$$i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t)$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \quad (4.7)$$

En appliquant la relation (4.3) sur les systèmes d'équations (4.6) et (4.7), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur.

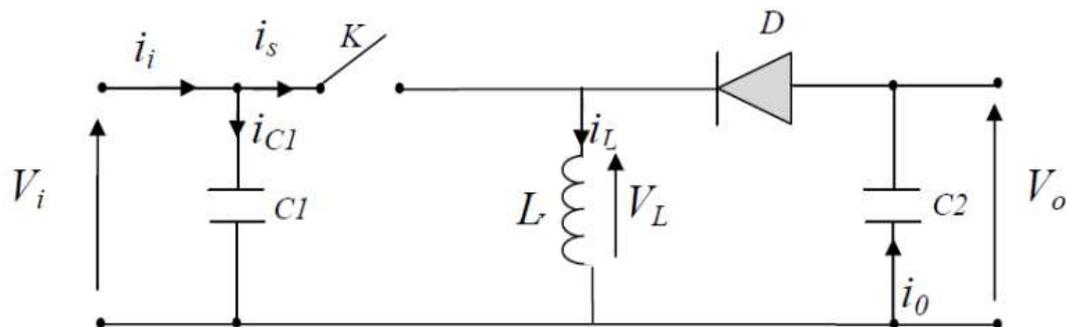
$$\begin{aligned}
 i_l &= i_i - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\
 i_o &= (1-d)i_l - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\
 v_i(t) &= L \frac{di_l}{dt} + (1-d)v_o
 \end{aligned} \quad (4.8)$$

### 3.3. Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) :

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la **Figure (4.8)**.

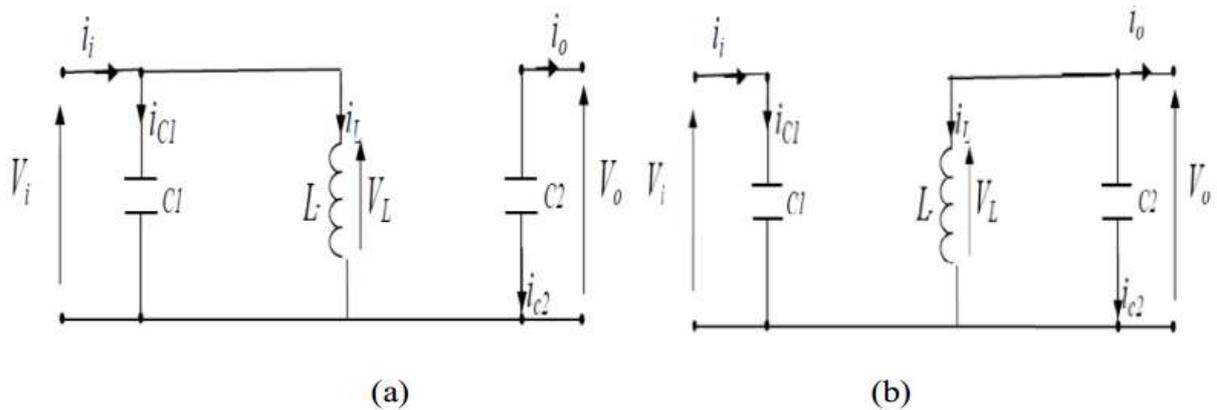
Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off).

La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. [13]



**Figure 4. 43 :** Convertisseur dévolteur-survolteur

La **Figure (4.10)** montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur sur volteur pour les deux cycles de fonctionnement.



**Figure 4.44** : Schémas équivalents du hacheur dévolteur –survolteur (a) : K ouvert ; (b):K fermé

Le rapport de conversion d'un hacheur Buck-Boost est une relation non linéaire, il est donné par l'expression suivante :

$$V(D) = \frac{V_o}{V_i} = \left( \frac{D}{1-D} \right)$$

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

Pour la première période  $dT_s$  :

$$i_{c1} = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t)$$

$$i_{c2} = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t)$$

$$v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = -v_i(t) \quad (4.9)$$

Pour la deuxième période  $(1-d)$ :

$$i_{c1} = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t)$$

$$i_{c2} = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t)$$

$$v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_o(t) \quad (4.10)$$

En appliquant la relation (4.3) sur les systèmes d'équations (4.9) et (4.10), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur –survolteur

$$i_l(t) = \frac{1}{d} (i_i(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt})$$

$$i_o(t) = - (1-d) i_l - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt}$$

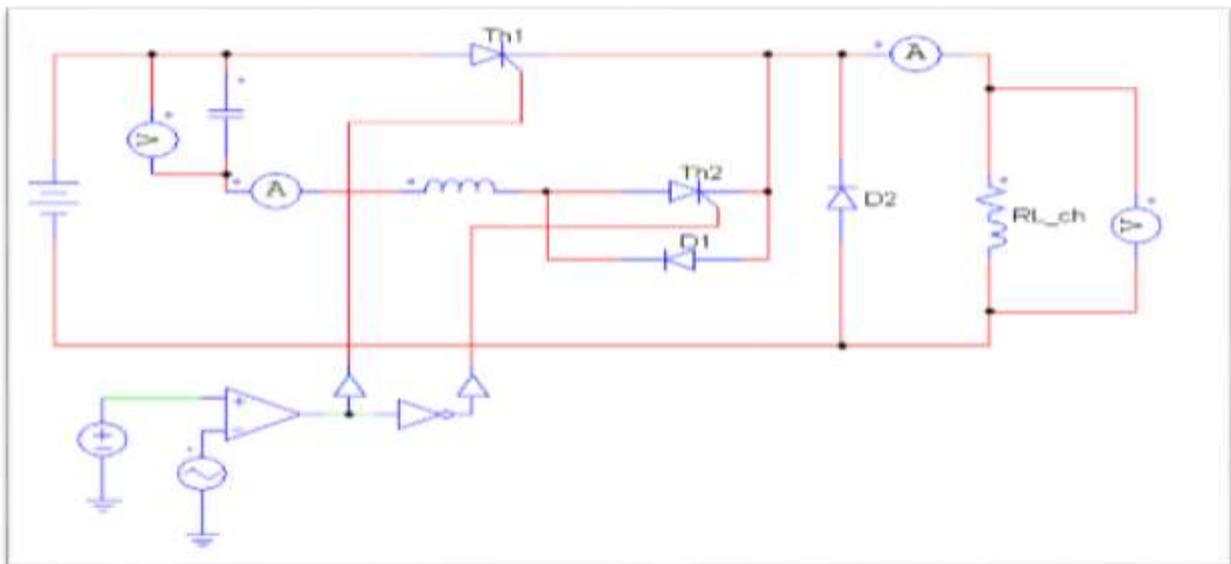
$$v_i(t) = \frac{1}{d} (-1(1-d)v_o + l \frac{di_l}{dt}) \quad (4.11)$$

### 3.4. Simulation Hacheur :

On va voir la simulation du hacheur à l'aide du PSIM 9

#### 3.4.1. Simulation Hacheur a thyristors :

Cette simulation est représentée par la figure suivante :



**Figure 4 . 45 :** montage hacheur à thyristors par PSIM 9

Et les résultats de cette simulation sont donnés par les figures suivantes :

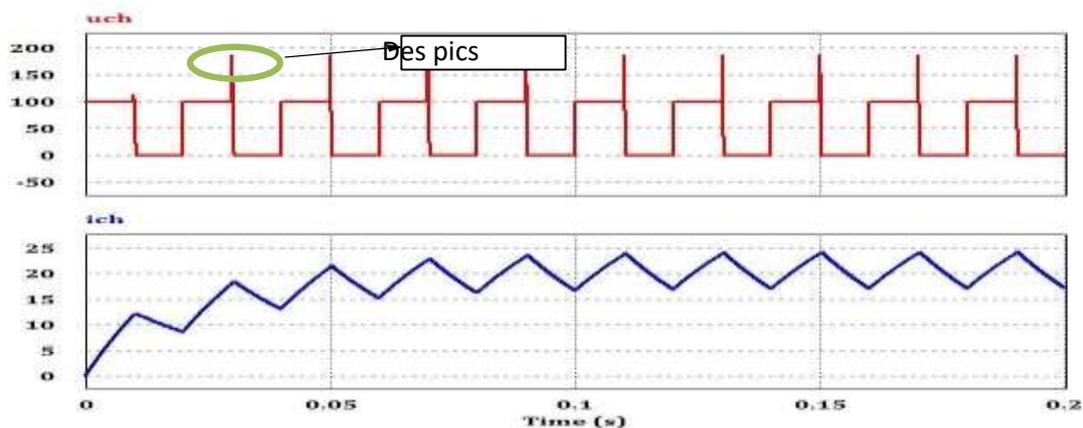


Figure 4 . 46 :courbe de tension Uch et de courant Ich d'entrée du hacheur a thyristors

### Interprétation :

- Pour la tension Uch elle commence de 100 v et c'est la tension d'entrée et elle augmente jusqu'au 180 v mais on voit qu'il y a des pics entourés avec le vert dans la courbe sont causés de condensateur C qui est dans le montage car il est chargé dans le début + la tension d'entrée on remarque ces pic
- Pour le courant Ich il augmente de 0 à 25 avec le temps et ça forme est déformé.

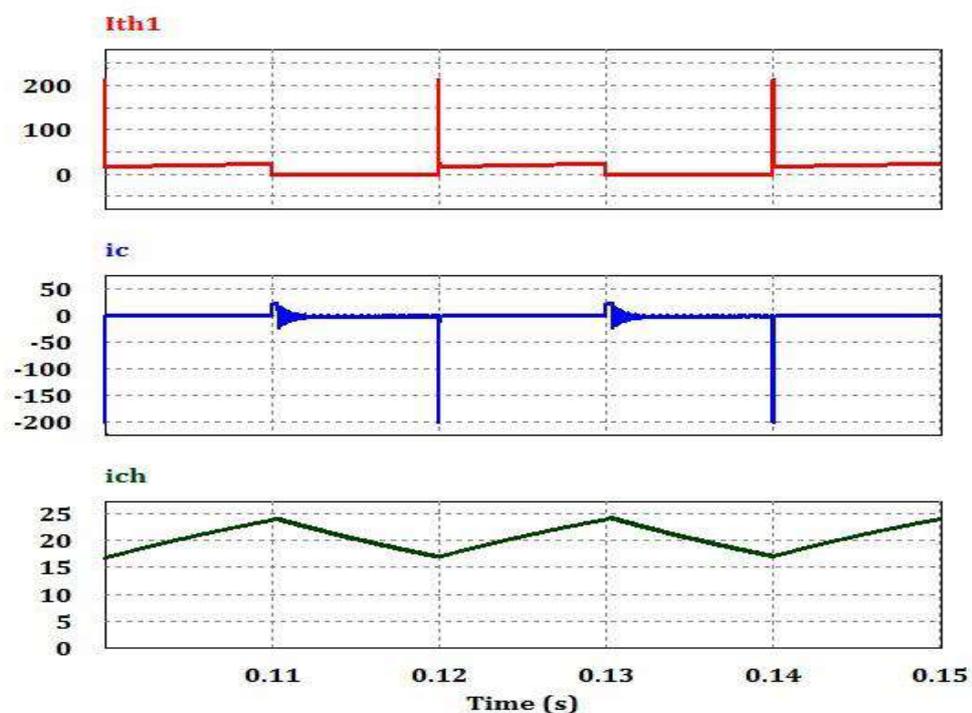


Figure 4 . 47 :la forme des courants Ith1-Ic-Ich

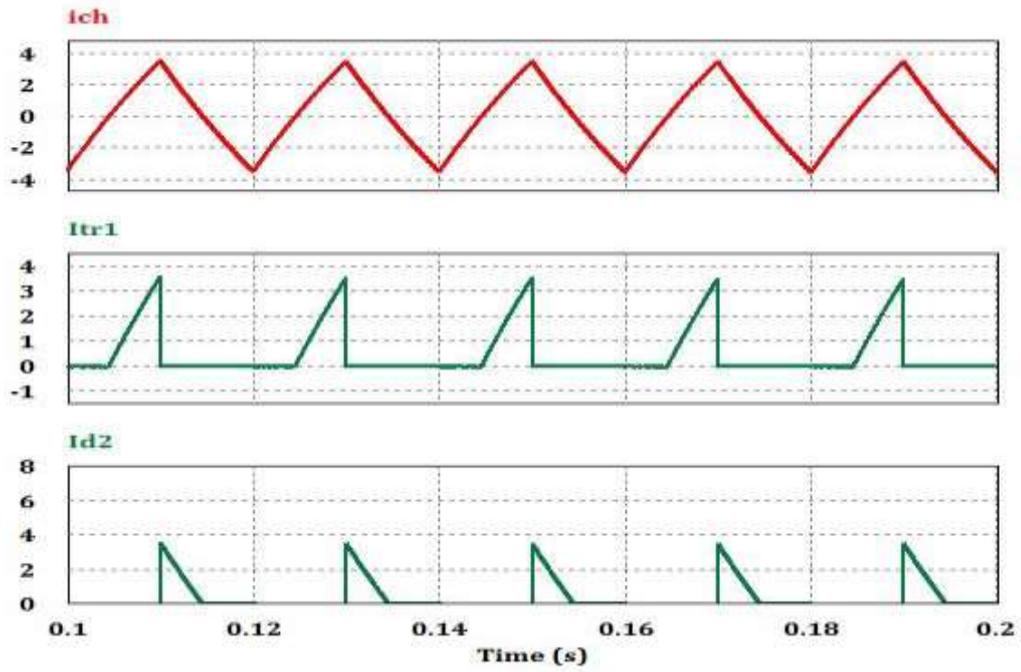


Figure 4 . 48 :la formes des courants Ich Itr1 et Id2

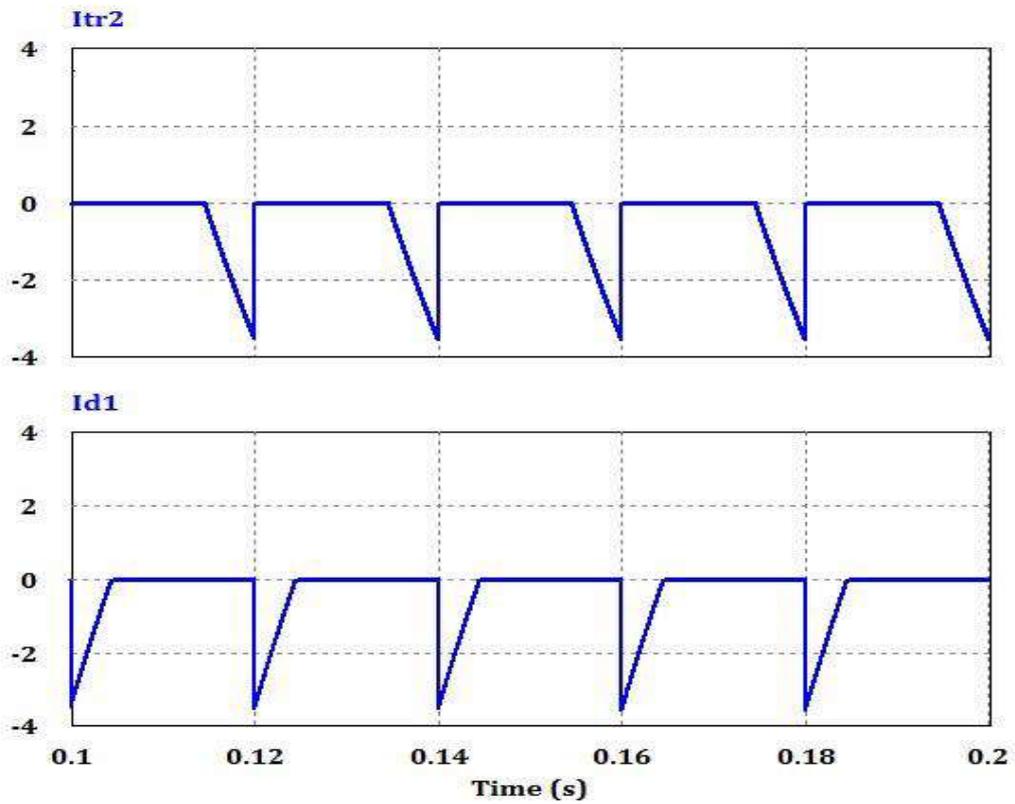
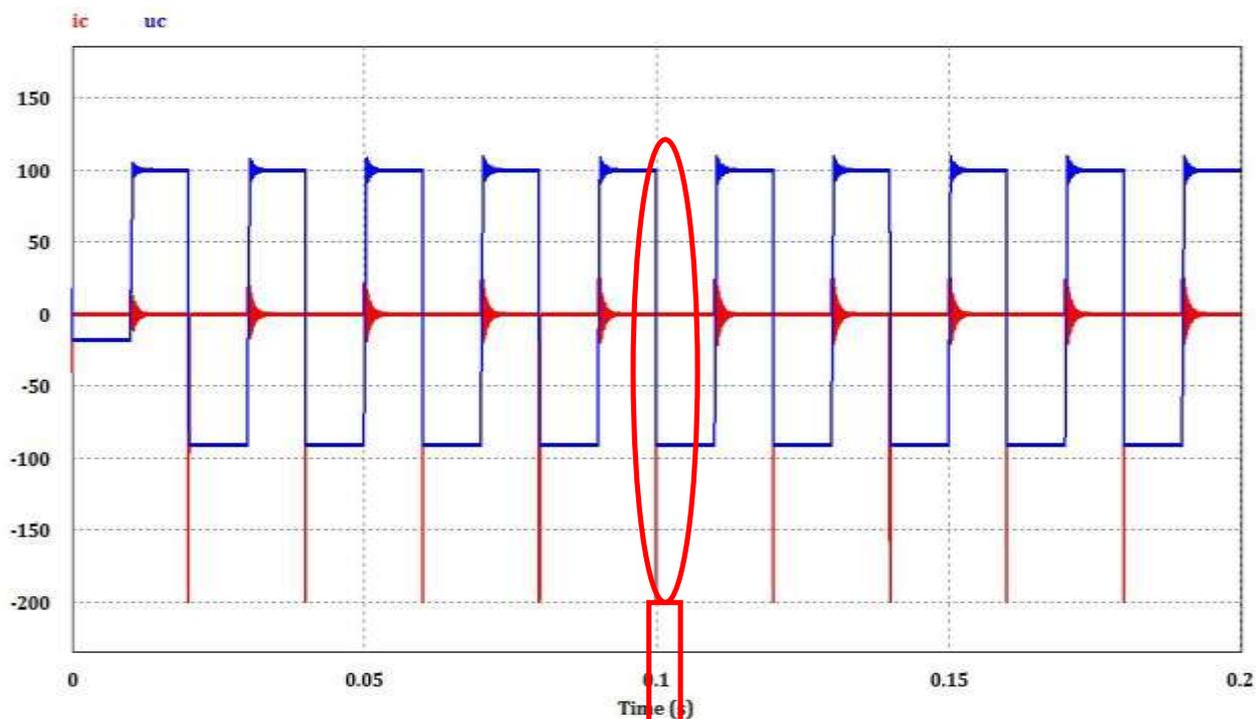


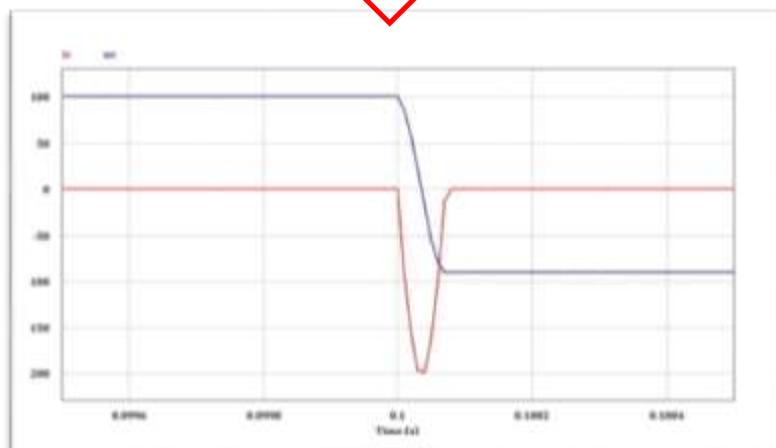
Figure 4 . 49: la formes des courants Itr2 et Id1

Interprétation :

On voit que les thyristors s'ouvrent quand les diodes sont fermées et la réciproque est vraie. Et l'amplitude des courants des diodes est plus petite que celle des courants qui traversent les thyristors.



*Figure 4.50 : la forme de  $U_c$  et  $I_c$  du hacheur à thyristor*



**Figure 4.51** : Zoom d' $U_c$  et  $I_c$  du hacheur à thyristor

### 3.4.2. Simulation Hacheur réversible a IGBT :

Dans ce cas en a remplacé les thyristors et les diodes par un IGBT :

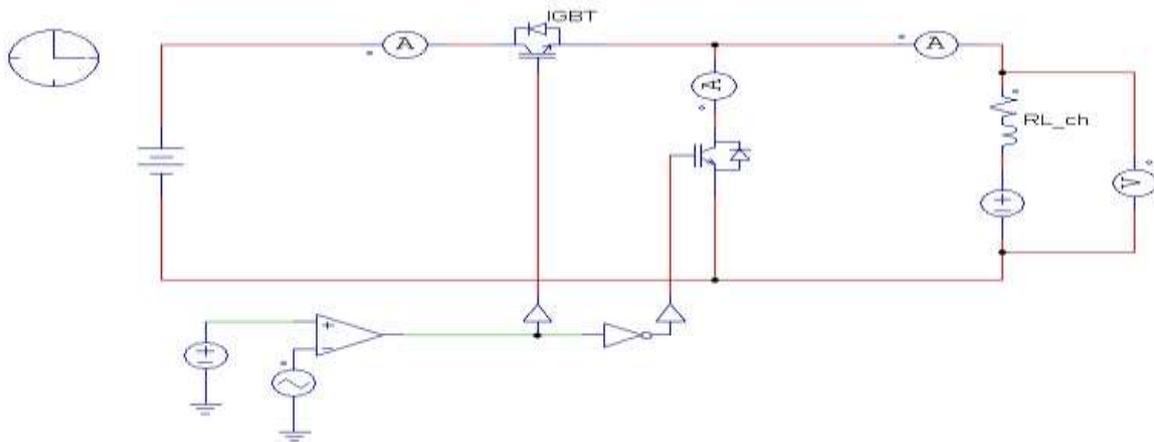


Figure 4. 52 :montage hacheur à IGBT

Les résultats de cette simulation sont représentés par la figure suivante :

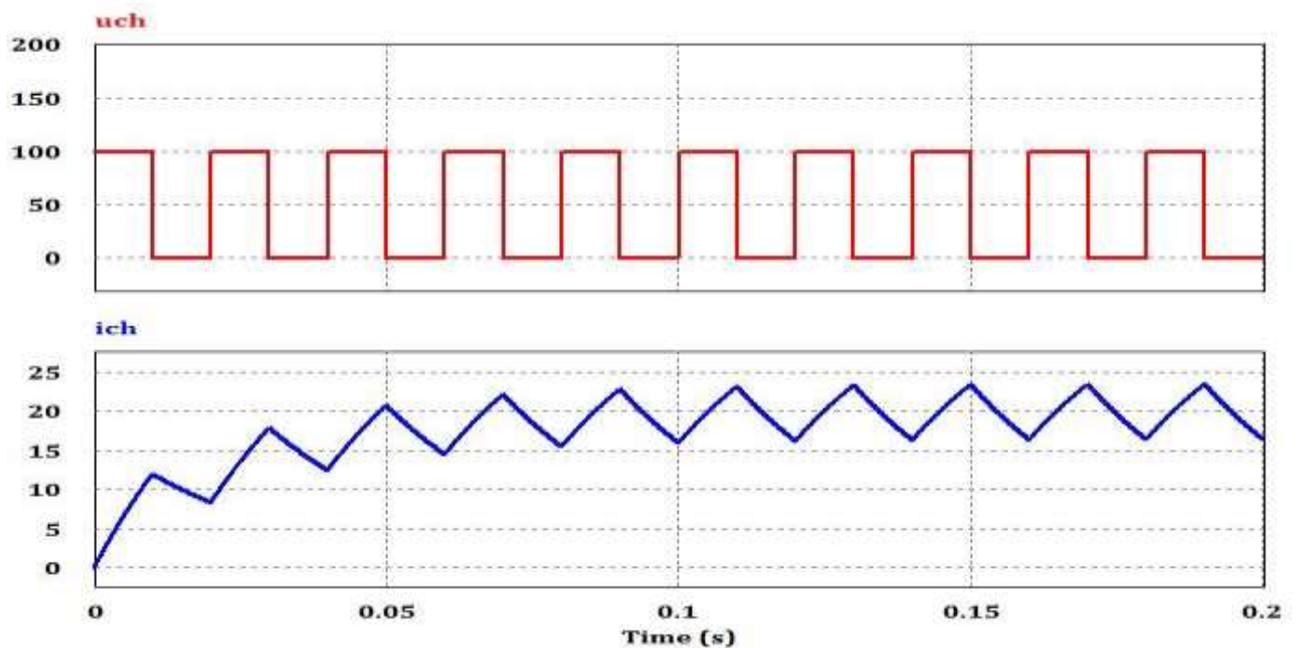


Figure 4. 53 :la forme d'Uch et Ich du hacheur à IGBT

#### Interprétation :

On voit dans la figure précédente que la tension d'entrée ne contient plus les pics car on a travaillé avec IGBT qui ne contient pas de condensateurs

La forme de courant Ich reste la même que celle du hacheur à thyristors.

## 4. Les Convertisseurs DC-AC (Les onduleurs)

---

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 soit un aérogénérateur ou des panneaux solaires.

La commande de l'onduleur est basée sur la prédiction de la tension de sortie d'un pas en avant que nous appellerons « Dead beat control » par cette commande, la tension de sortie de l'onduleur est forcée de suivre une référence sinusoïdale échantillonnée pour la production à la sortie du filtre une onde proche d'une sinusoïde avec un taux de distorsion harmonique très réduit. [15]

### 4.1. Classification :

---

Les montages onduleurs sont très nombreux en fonction de leurs applications, de leurs structures et de leurs commandes. [16]

Nous pouvons classer les onduleurs suivants :

- **le nombre de phases de la charge** : nous distinguerons
  - ❖ les onduleurs monophasés.
  - ❖ les onduleurs triphasés.
  
- **la nature de la source** :
  - ❖ **l'onduleur de tension** : alimenté par un générateur de tension continu, il impose par sa commande la tension  $u(t)$ ; la charge impose alors l'intensité  $i(t)$ .
  - ❖ **l'onduleur de courant** : alimenté par un générateur de courant continu, il impose par sa commande le courant  $i(t)$ ; la charge impose la tension  $u(t)$ .
  
- **la structure du convertisseur** : on trouve des structures en demi-pont, en pont, avec transformateur
  
- la nature des interrupteurs** : interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture (transistor bipolaire, MOS ou IGBT, GTO), interrupteurs commandés à la fermeture (thyristors) avec blocage naturel ou forcé, interrupteurs commandés à l'ouverture (thyristor dual).

- **le mode de commande** : la forme de la grandeur imposée  $y(t) = u(t)$  ou  $i(t)$  peut être à deux niveaux  $+ou-Y_0$ , à trois niveaux  $+ Y_0, 0, - Y_0$ , en marche d'escalier (plusieurs niveaux par alternance), à modulation de largeur d'impulsion (en abrégé MLI ou PWM pour Pulse Width Modulation)

## 4.2. Principe de fonctionnement d'un onduleur:

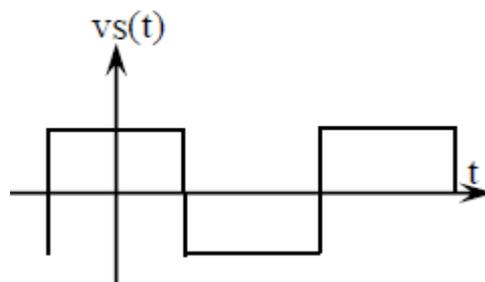
---

En pratique, l'onduleur est composé d'un ensemble de composants actifs (interrupteurs électroniques) et de composants passifs (transformateur).

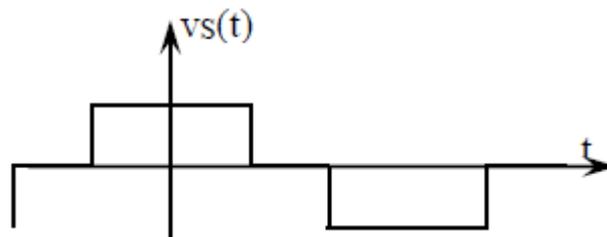
Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde. [17]

La forme d'onde alternative de la tension de sortie est déterminée par le système (par différence avec les onduleurs autonomes). Selon la forme de cette tension de sortie, on classe les onduleurs en plusieurs catégories :

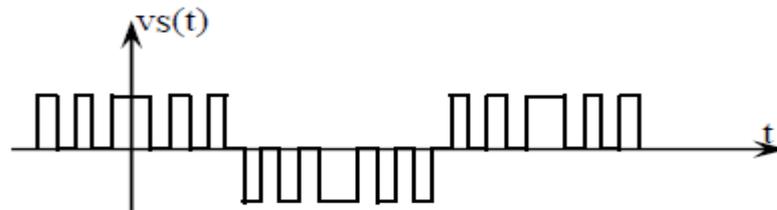
- Onduleur 2 états (tension en créneaux  $+U, -U$ ) : la valeur efficace de la tension de sortie n'est pas réglable et dépend de la tension continue d'entrée.



- Onduleurs 3 états ( $+U, 0, -U$ ) : la valeur efficace de la tension de sortie est réglable en agissant sur la durée du créneau.

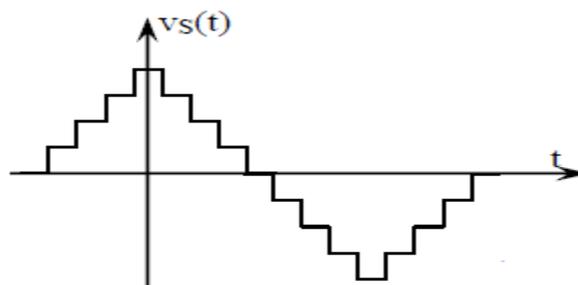


- Onduleurs à modulation de largeur d'impulsions :MLI (Pulse Width Modulation PWM) : L'onde de sortie est avec train d'impulsions de largeur et d'espacement variables. Ceci permet de réduire le taux des harmoniques. On peut même obtenir une onde de sortie voisine de l'onde sinusoïdale.



- Onduleurs à tension de sortie en marche d'escalier : l'onde de sortie est constituée par la somme ou la différence de créneaux de largeur variable et sa forme générale se rapproche au mieux de la sinusoïde.

L'un des problèmes de ce système est le nombre important d'éléments.



### 4.3. Les type des onduleurs :

---

On va présenter les deux types d'onduleur et on va voir leur schéma électrique. [18]

#### 4.3.1. 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 distinguer, suivant leur topologie.

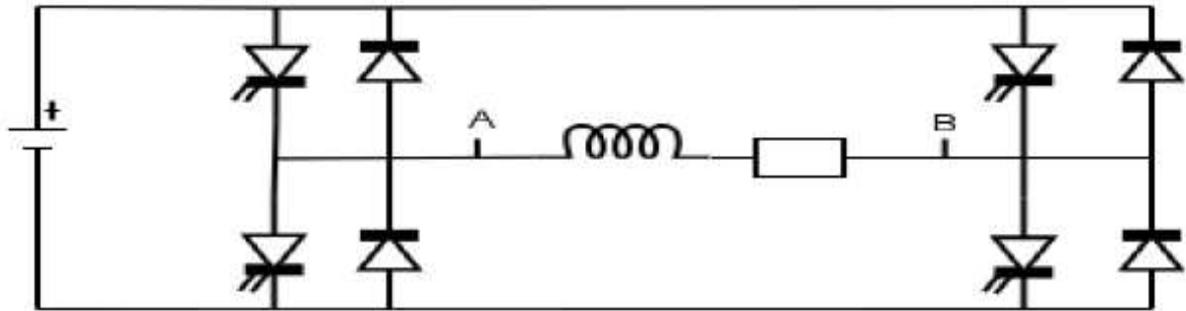


Figure 4.54 :schéma d'un onduleur monophasé

**a.** Onduleur monophasé en demi-pont :

Le schéma de principe d'un tel onduleur monté en demi-pont est montré sur la figure suivante :

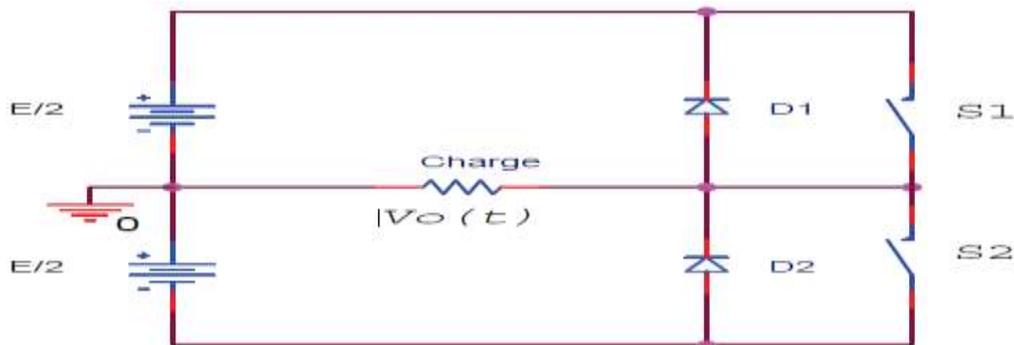


Figure 4.55 :Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Demi-pont.

Il est constitué principalement de deux interrupteurs de puissance notés S1 et S2 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 S1, la tension aux bornes de la charge serait donc de  $+ E/2$ , et prend la valeur  $-E/2$  quand le second interrupteur, S2 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 (temps de montée  $t_r$ , temps de descente  $t_f$  et temps de stockage  $t_s$ ). Les diodes D1, 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. [19]

**b. Onduleur monophasé en pont (Pont H) :**

L'onduleur en pont est représenté en figure il comporte quatre interrupteurs de puissance désignée par S1, S2, S3 et S4 quand les interrupteurs S1 et S2, 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 S3 et S4.

Deux interrupteurs du même bras ne peuvent pas conduire simultanément, à cause d'un court-circuit de la source de tension continue. [20]

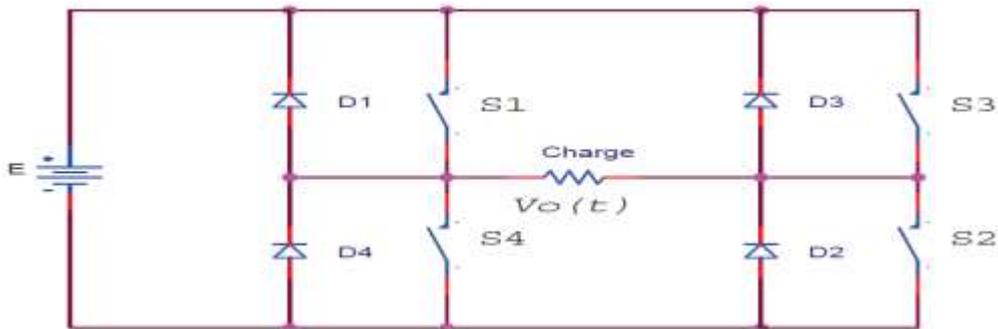


Figure 4 . 56 :Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé En Pont H

### 4.3.2. Onduleur triphasé :

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  $120^\circ$  degrés, l'une par rapport à l'autre. [21]

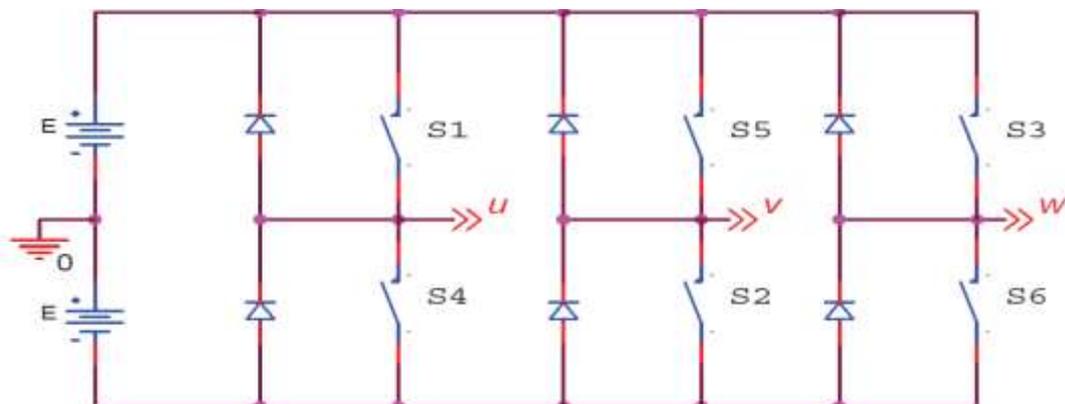
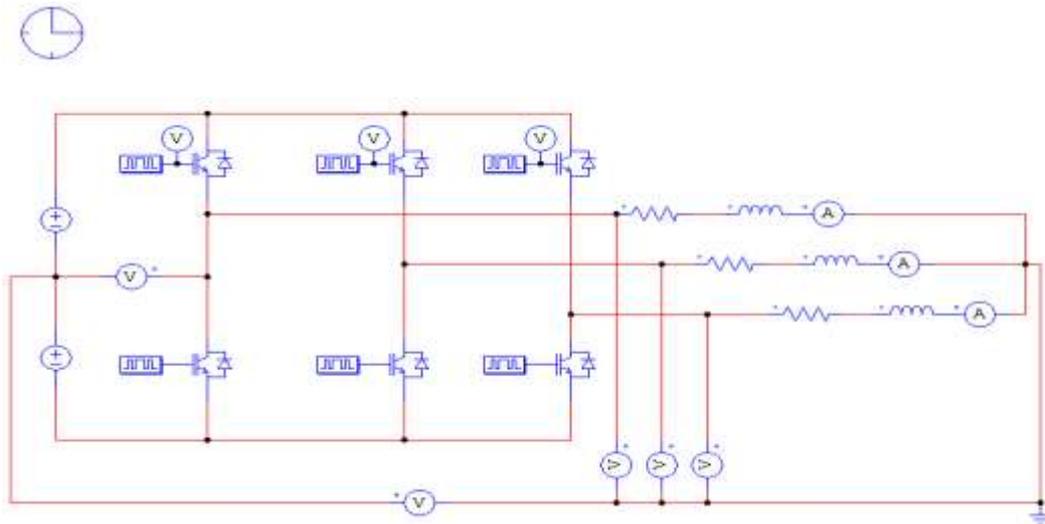


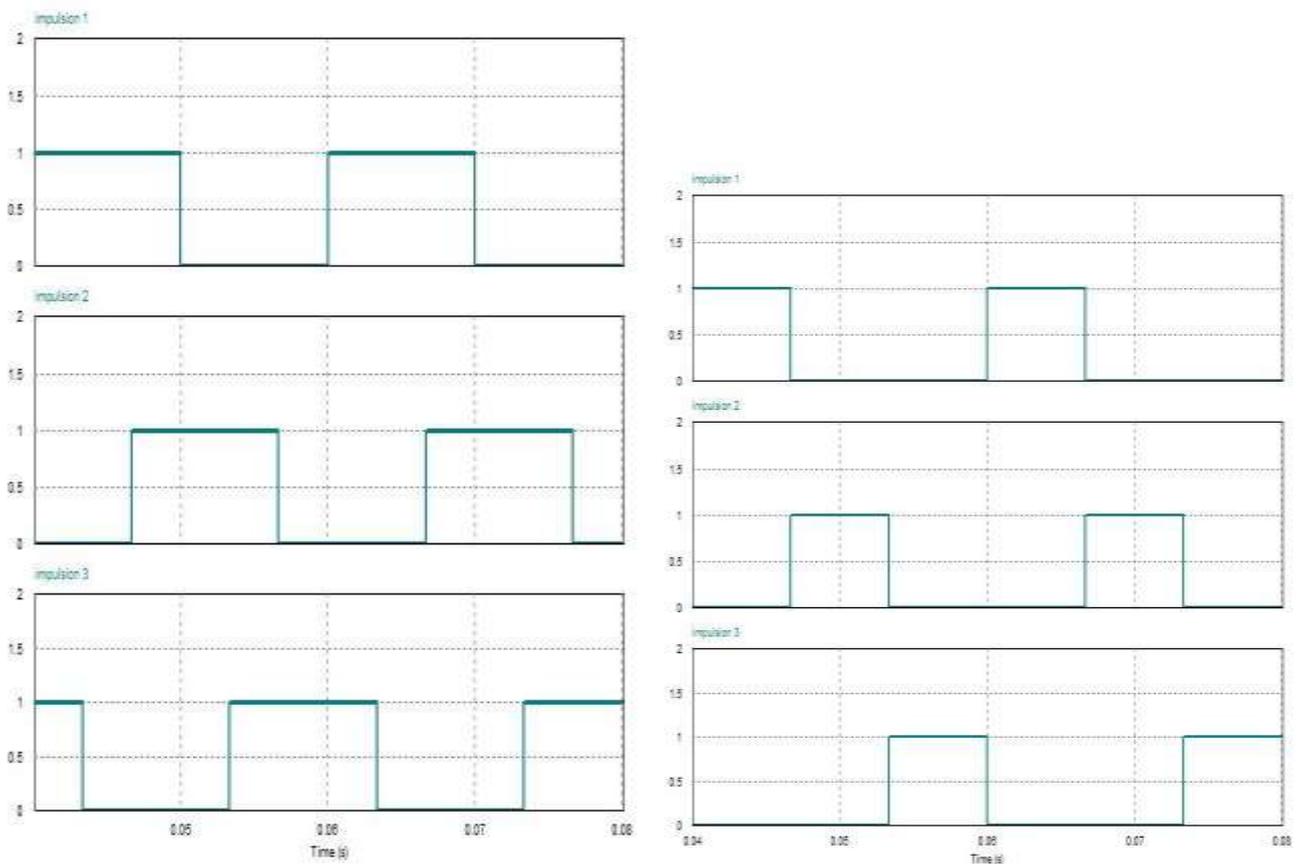
Figure 4 . 57 :Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont

## 4.4. Simulation de l'onduleur triphasé :



**Figure 4. 58 :**Montage d'un onduleur triphasé sur PSIM 9

Après avoir simulé l'onduleur triphasé on va voir la forme des impulsions de ce dernier et ils sont capturés dans les figures suivantes :



**Figure 4. 59 :**Montage d'un onduleur triphasé sur PSIM 9

#### 4.4.1. La commande 180 degrés de l'onduleur :

---

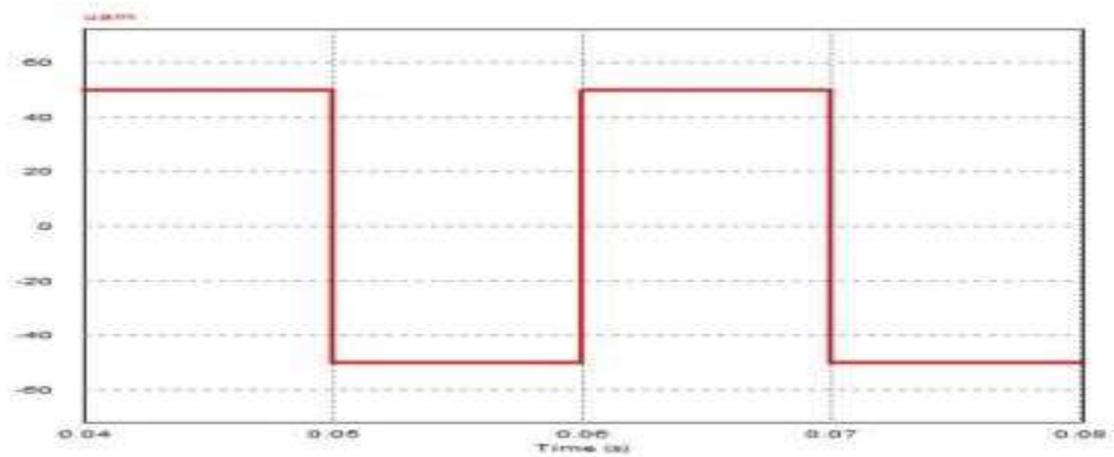


Figure 4. 60 : la forme d' $U_{am}$

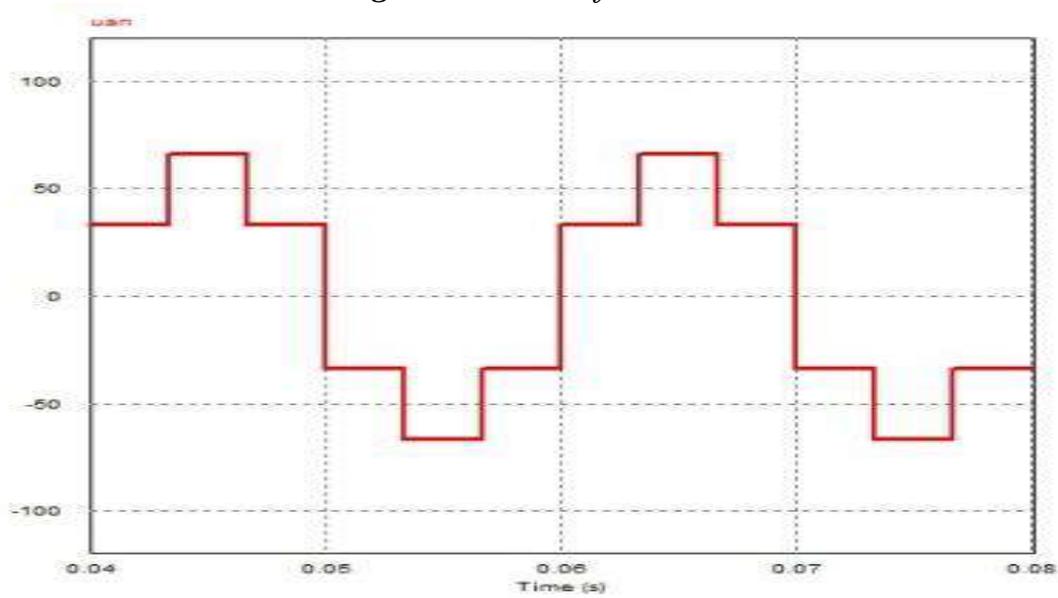
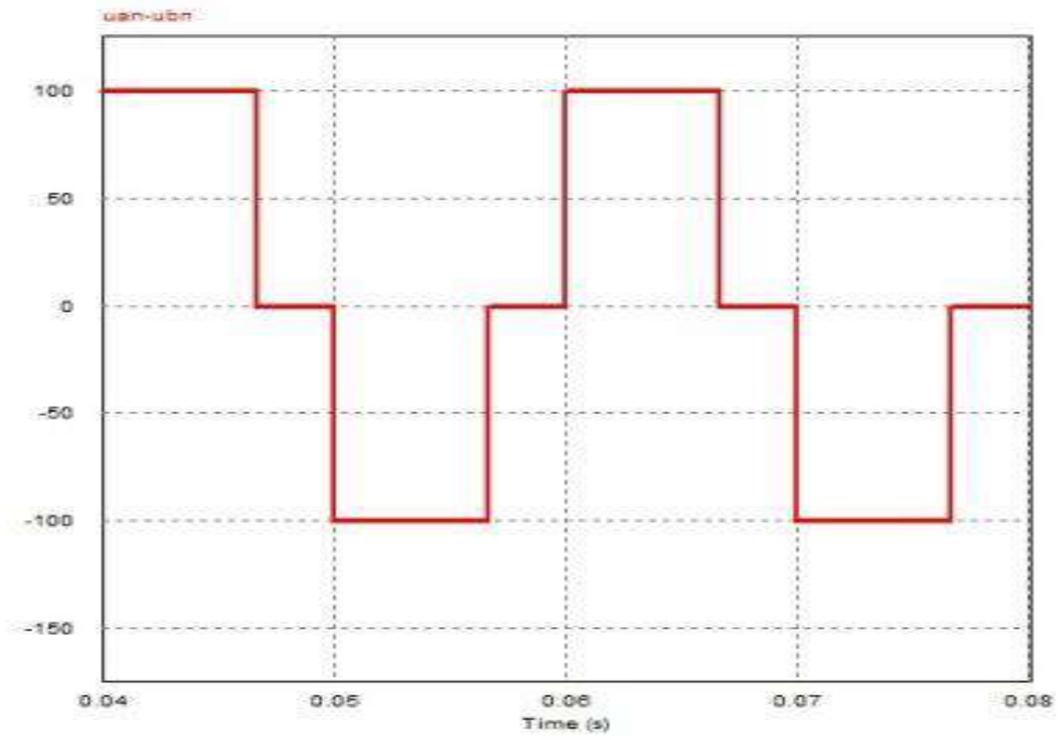
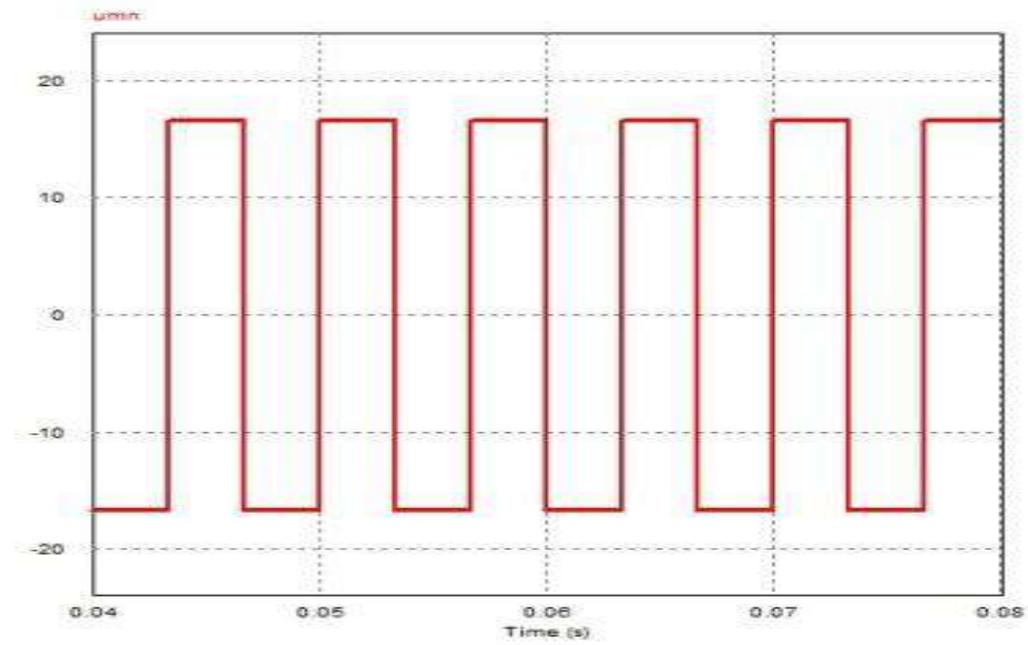


Figure 4. 61 : la forme d' $U_{bn}$



*Figure 4 . 62 : la forme d'Uan-Ubn*



*Figure 4 . 63 : la forme d'Umn*

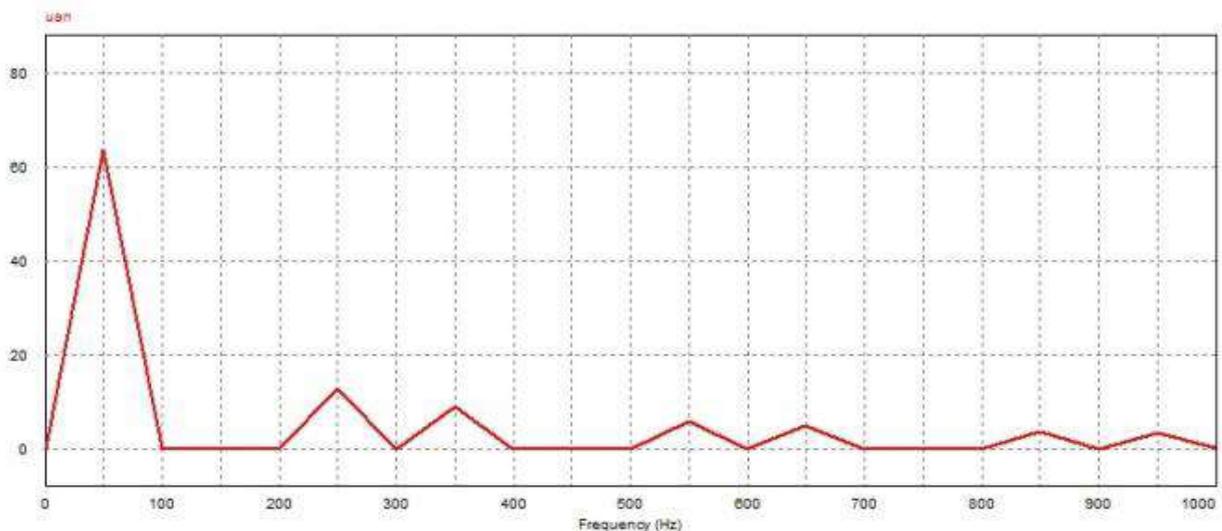
## Interprétation :

Cette commande est conçue de façon à ce que les interrupteurs soient commandés pendant une durée correspondant à une demi période, mais leurs conceptions déphasées, d'où :

À tout instant trois interrupteurs sont en état de conduire et les trois autres sont bloqués ;

deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandé de façon complémentaire afin de ne pas court-circuiter la source de tension.

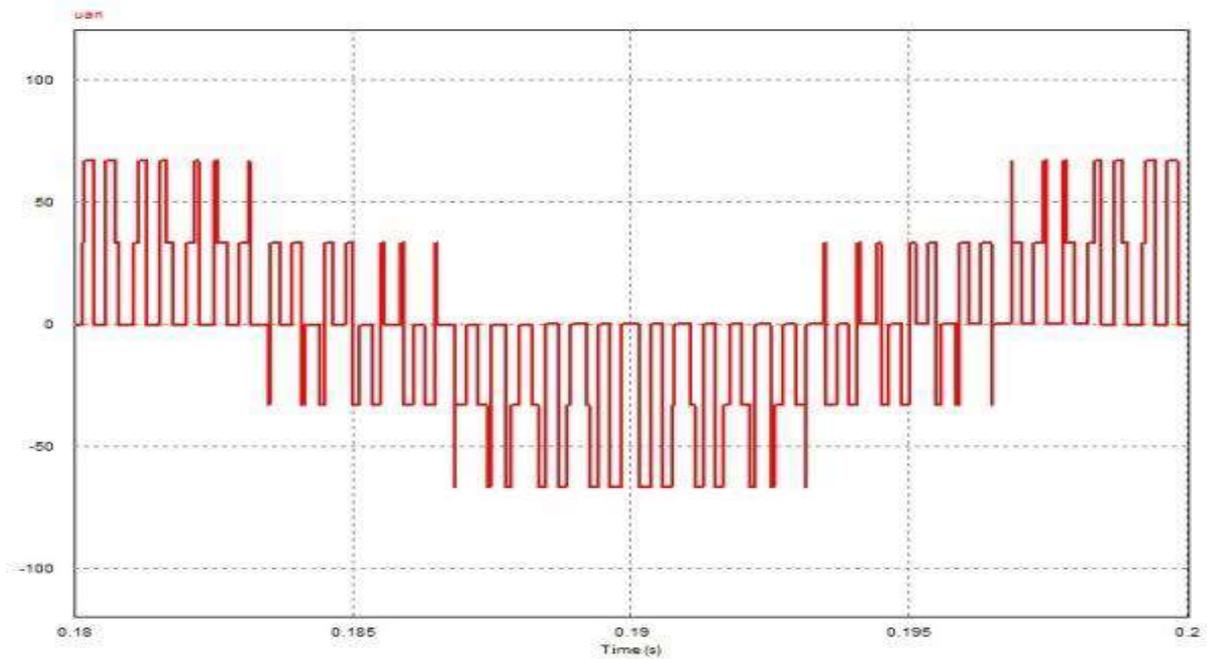
La **figure 4.25** montre les six séquences de conduction obtenues par période, ce qui permet de construire, les allures des tensions composées, et tensions simples. Les **figures 4.(26.27.28.29)** montrent le détail de cette construction. Sur ces chronogrammes on voit que les trois tensions simples ont une forme en marches d'escalier, et qu'elles forment, elles aussi, un système de tensions triphasées, d'amplitude  $2/3.E$ , de période  $T$  égale à celles des tensions composées.



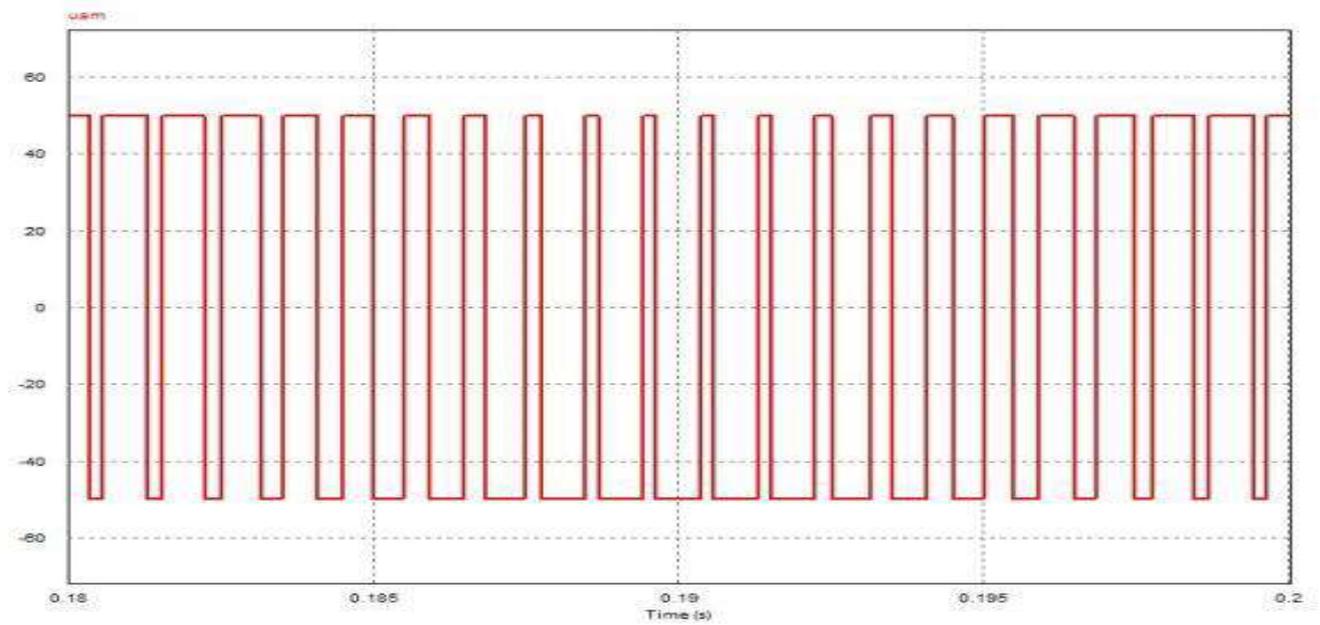
*Figure 4 . 64 : Spectre d'harmonique ; commande 180°*

#### 4.4.2. La commande MLI d'un onduleur triphasé :

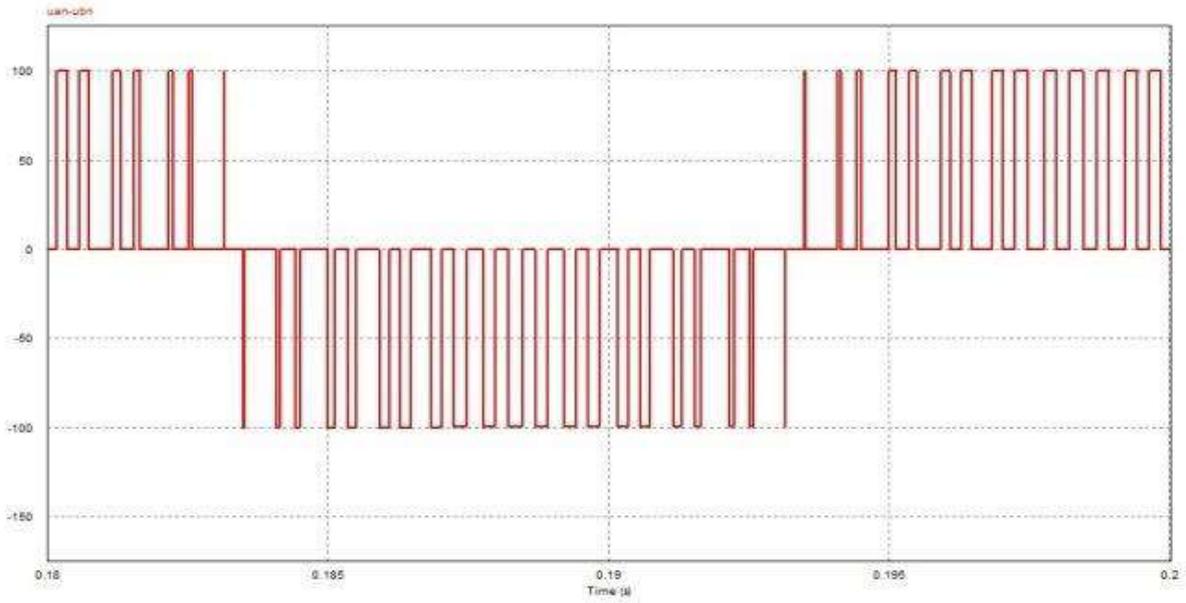
---



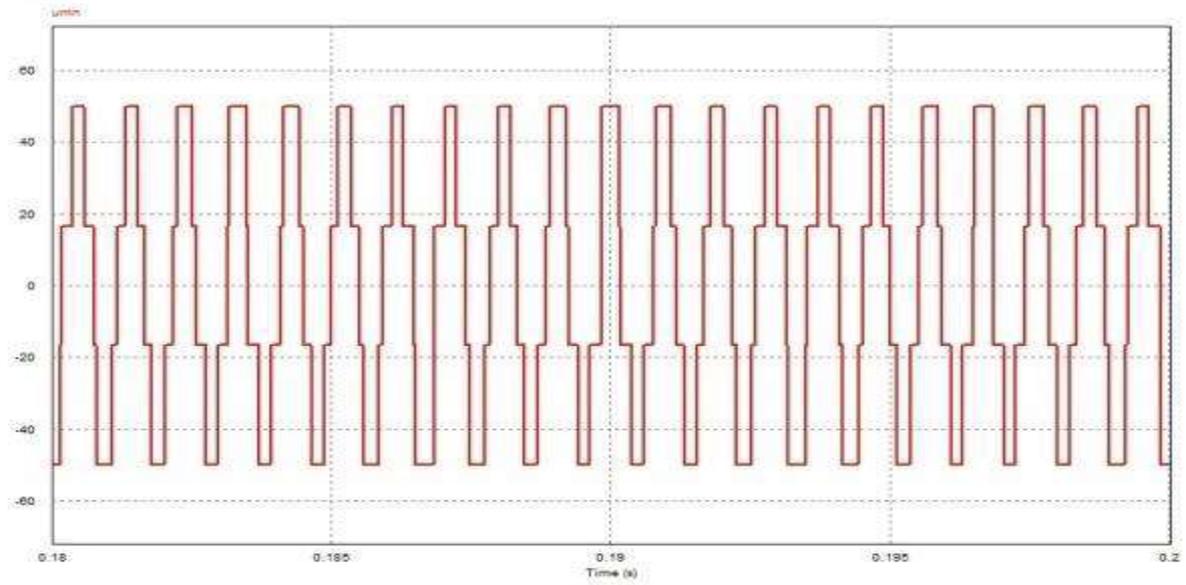
*Figure 4 . 65 :la forme d'Uan*



*Figure 4 . 66 :la forme d'Uam*



*Figure 4. 67 : la forme d'Uan-Ubn*



*Figure 4. 68 : la forme d'Umn*

## Interprétation :

Un onduleur triphasé peut être considéré comme étant trois onduleurs monophasés déphasés de  $120^\circ$ .

Ainsi, les techniques que ces derniers utilisent, sont applicables aux onduleurs triphasés.

Par exemple, la génération des signaux de commande avec une MLI sinusoïdale est montrée sur les **figures4. (31.32.33.34)** On remarque que les trois ondes de référence sinusoïdales sont déphasées de  $120^\circ$  entre elles.

Une onde porteuse est comparée avec le signal de référence de la phase correspondante pour générer le signal de commande de cette phase.

La tension de sortie est générée en éliminant la condition que deux dispositifs de commutation de la même branche ne peuvent conduire en même temps.

## 5. Conclusion

---

Dans ce chapitre on a présenté les convertisseurs utilisés dans notre système photovoltaïque qui sont le hacheur (Buck et Boost) et l'onduleur (monophasé et le triphasé) et leur simulation qui est représentée avec PSIM 9.

# Chapitre 5

## **Stockage de l'énergie**

## 1. Introduction :

---

L'énergie solaire se prête particulièrement bien à la production d'électricité en sites isolés, ou en micro-réseaux. Elle est alors souvent associée à des batteries, qui permettent d'assurer le stockage de l'énergie en cas de production excédentaire, ou de compenser le manque momentané de puissance lors des pics de consommation.

Dans ce chapitre, nous nous proposons de modéliser et simuler un système photovoltaïque avec stockage de l'énergie électrique en utilisant le logiciel Matlab – Simulink. Dans la première partie, nous présentons brièvement l'architecture de notre système photovoltaïque. Après, nous montrerons le modèle complet et discuterons de ses performances.

## 2. Dispositifs de stockage :

---

Les batteries sont la solution idéale pour assurer l'autonomie énergétique sur plusieurs jours, car les piles à combustible sont trop chères et les volants d'inertie trop dangereux dans ce contexte. Cependant, elles présentent une faible puissance spécifique.

Lors de la mise sous tension d'un appareil électrique, il apparaît des pics de puissance durant la phase transitoire (des variations d'ensoleillement lors du passage d'un nuage ou de vitesse de vent lors d'une rafale). L'amplitude de ces pics peut atteindre 4 à 5 fois la valeur nominale de fonctionnement des appareils. Si les pics sont dans une gamme de fréquence suffisamment basse, ils peuvent être absorbés par la batterie augmentant ainsi sa contrainte de fonctionnement et engendrant une charge ou une décharge à fort courant. Cependant, sa durée de vie sera limitée à long terme.

Si la gamme de fréquences couvertes par les pics est trop grande pour être "visible" par la batterie, alors les capacités internes au système de puissance les absorberont, engendrant saturations et pertes dans le circuit. D'autre part, les super condensateurs ont une grande puissance donc ils seraient aptes à absorber tous ces pics sans dommage. Ils possèdent de plus une durée de vie de l'ordre de 100 000 cycles de charge/décharge. Mais, ils n'ont pas l'énergie spécifique suffisante pour assurer son autonomie sur plusieurs jours. Ils ne peuvent donc être utilisés comme unités de stockage principales, mais ils correspondent à une solution viable pour absorber ou fournir les pics de puissance néfastes aux batteries. Donc, la solution est d'associer les deux technologies pour profiter des avantages de chacune [29].

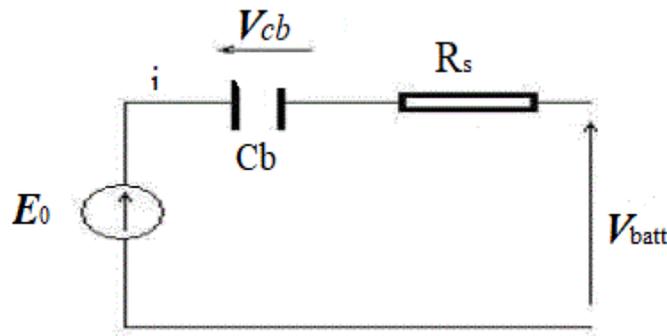
### 3. Modélisation des dispositifs de stockage

#### 3.1. Batterie lithium-ion:

Typiquement, un accumulateur lithium-ion se compose d'une anode de carbone, d'une cathode d'oxyde métallique, d'un électrolyte et du séparateur. Les matériaux actifs de l'anode et de la cathode forment une couche mince à la surface de feuillets métalliques qui agissent comme collecteurs de courant dans la cellule. Le séparateur empêche le contact entre les électrodes, tout en demeurant perméable aux échanges ioniques. Dans le cas d'une anode formée d'oxyde de Cobalt (LiCoO<sub>2</sub>), les réactions seront les suivantes [30]:



La figure 5.2 représente le schéma équivalent d'une batterie :



**Fig.5.1** Circuit équivalent simple de la batterie.

où :

$C_{bat}$  est la capacité nominale de la batterie,  $Q_d$  est la quantité de charge manquante par rapport à  $C_{bat}$ ,  $E_0$  est la source de tension et  $R_s$  est la résistance en série.

Nous avons donc :

$$V_{batt} = E_0 - R_s * i - V_{cbatt}$$

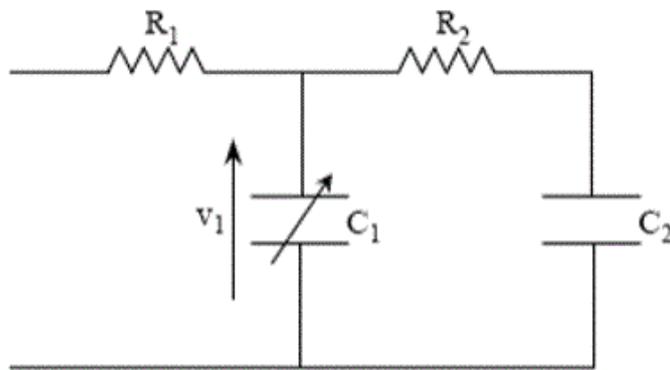
On définit également l'état de charge (SOC) de la batterie par :

$$soc = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}}$$

## 3.2. Modélisation des super condensateurs :

Le principe de base des super condensateurs repose sur les propriétés capacitives de l'interface entre conducteur électronique solide et conducteur ionique liquide. Le stockage d'énergie s'effectue par distribution des ions de l'électrolyte au voisinage de la surface de chaque électrode sous l'influence de la tension électrostatique appliquée. Il se crée ainsi aux interfaces une zone de charge d'espace appelée couche double électrique, d'épaisseur limitée à quelques nanomètres. La fonction diélectrique est assurée quant à elle par les molécules du solvant de l'électrolyte [95].

La figure 5.2 représente le schéma équivalent d'un supercondensateur :



**Fig.5.2** Schéma équivalent à deux branches d'un supercondensateur [40].

Ce modèle repose sur la partition de l'énergie électrostatique des supercondensateurs en deux :

- une énergie rapidement stockée ou disponible
- une énergie lentement stockée ou disponible

Elle comporte par conséquent 2 cellules :

- la première (R1-C1) rend compte de l'évolution de l'énergie durant les événements de charge ou de décharge,
- la deuxième dite lente (R2-C2), intervient lors du phénomène de redistribution des charges internes en fin de charge ou de décharge.

Les équations électriques du modèle sont :

$$V_{ucap} = R_1 \cdot i_1 + V_1$$

$$i_1 = C_1 \frac{dV_1}{dt} + C_2 \frac{dV_2}{dt}$$

$$V_1 = R_2 i_2 + V_2$$

$$i_2 = C_2 \frac{dV_2}{dt}$$

où :

$V_{\text{ucap}}$  est la tension de la supercapacité,  $i_1$  le courant traversant la résistance  $R_1$ ,  $i_2$  le courant traversant la résistance  $R_2$  et  $V_2$  la tension aux bornes de la capacité  $C_2$ .

Un modèle multibranche permet de rendre compte de la majorité des phénomènes internes qui se produisent pendant les phases de charge et décharge. Ces phénomènes incluent les résistances électriques présentées par électrodes et collecteurs métalliques. Le modèle doit également prendre en compte les non-linéarités du stockage des charges, le comportement électrique du type de ligne de transmission et redistribution interne de la charge stockée [41]. Il comprend une ligne de transmission non-linéaire de résistance totale  $R$  et de capacité totale  $C$ . La ligne de transmission est constituée de  $n$  branches en parallèle contenant chacune une résistance et un condensateur en série. Ces branches permettent de modéliser les phénomènes ayant des temps courts. La ligne de transmission est complétée par deux autres branches RC dites « complémentaires » qui servent à tenir compte de la redistribution des charges aux temps longs (figure 5.3).

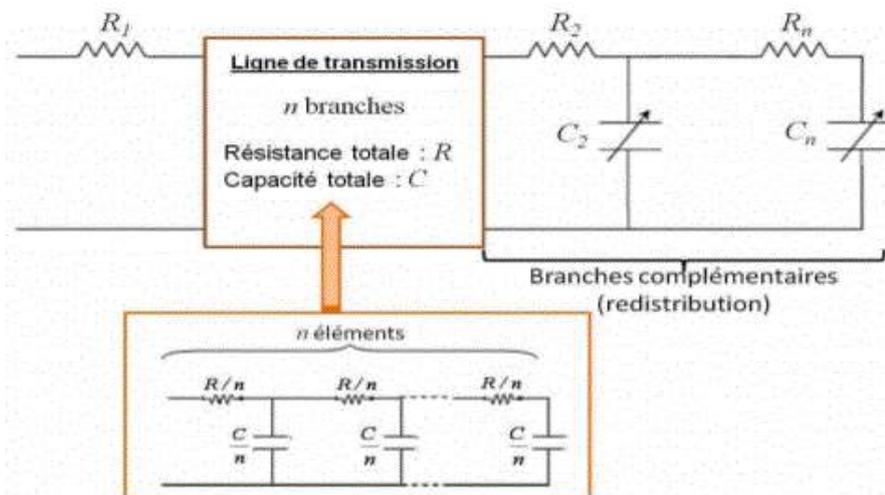


Fig .5.3 Modèle multibranche d'un supercondensateur.

## 4. Simulation :

---

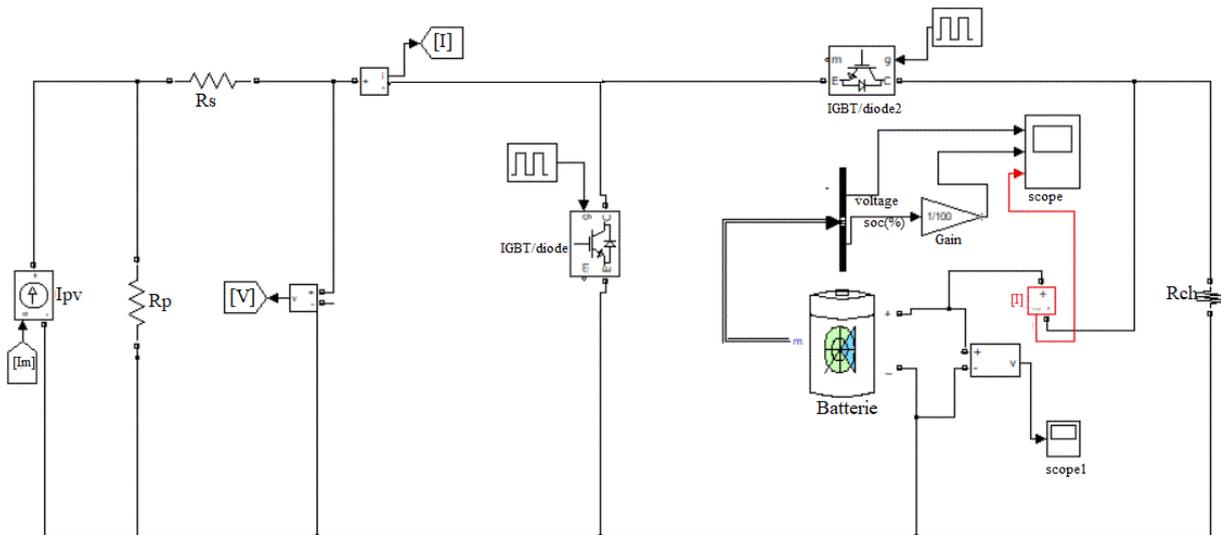
### 4.1. Simulation du stockage d'énergie photovoltaïque :

---

La figure V.5 représente un modèle sous Matlab/Sumilink. Le modèle est composée d'un générateur photovoltaïque KC200GT (ces paramètres sont déjà décrit dans le chapitre VI), un convertisseur back boost, une batterie lithuim-ion (tableau V.1).

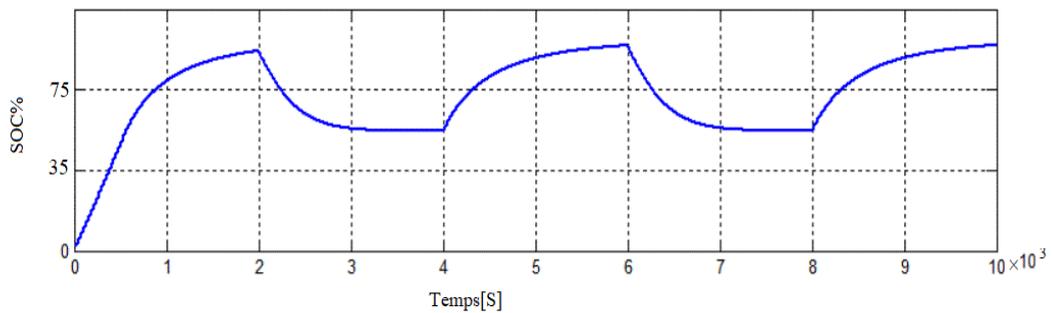
Convertisseur	Composant /caractéristiques	Valeurs
	Resistance interne	$10^3$ ohm
	Resistance d'amortisseur	inf
Capacité d'amortisseur	0 F	
Batterie	Composant/caractéristiques	Valeurs
	Capacité nominale	6.5 (Ah)
	Resistance interne	0.15385 ohm
Courant de décharge nominale	1.3 A	

**Tab.5.1** Caractéristiques du modèle

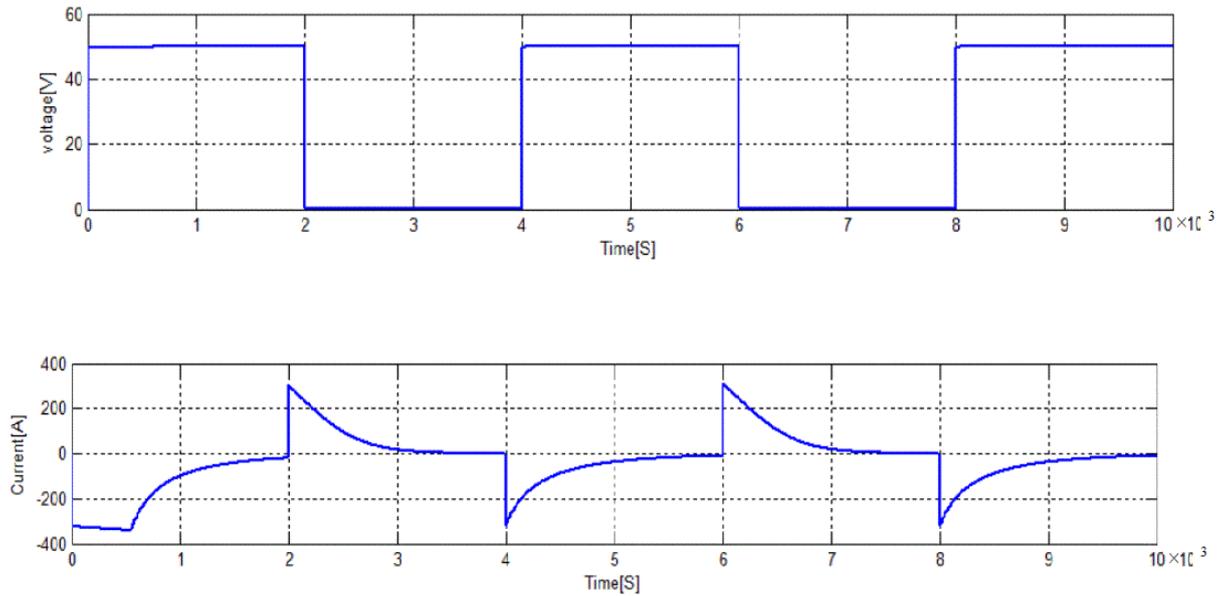


**Fig.5.4** Modèle PV autonome avec stockage batterie.

On trouve les résultats de la simulation dans les figures 5.5 et 5.6 :



**Fig.5.5** Etat de charge de la batterie.



**Fig.5.6** Tension et courant de la batterie.

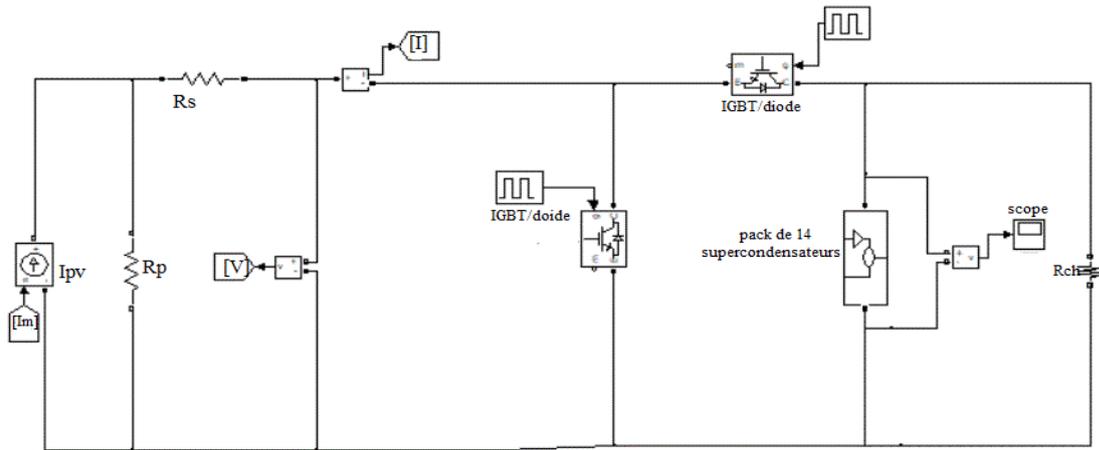
La charge de la batterie se passe généralement en deux phases, une première phase à courant limité de l'ordre de  $C/2$  à  $1 C$  ( $C$  étant la capacité de l'accumulateur). Cette phase permet une charge rapide jusqu'à environ 80%, puis une deuxième phase à tension constante et courant décroissant pour se rapprocher des 100 % de charge en environ deux heures de plus. La charge est terminée lorsque le courant de charge chute en dessous d'une valeur appelée courant de fin de charge.

La décharge doit être limitée à une tension de 3 V par élément, une tension de décharge inférieure à 2,5 V peut conduire à une destruction de l'élément.

La figure 5.7 représente un système de stockage d'énergie par supercondensateurs sous Matlab/Sumilink, le modèle est constitué d'un générateur photovoltaïque, convertisseur back-boost et un pack de 14 supercondensateurs Maxwell PC7223 (tableau 5.2). La tension nominale d'un supercondensateur est de 2,5 V. Les 14 supercondensateurs sont mis en série.

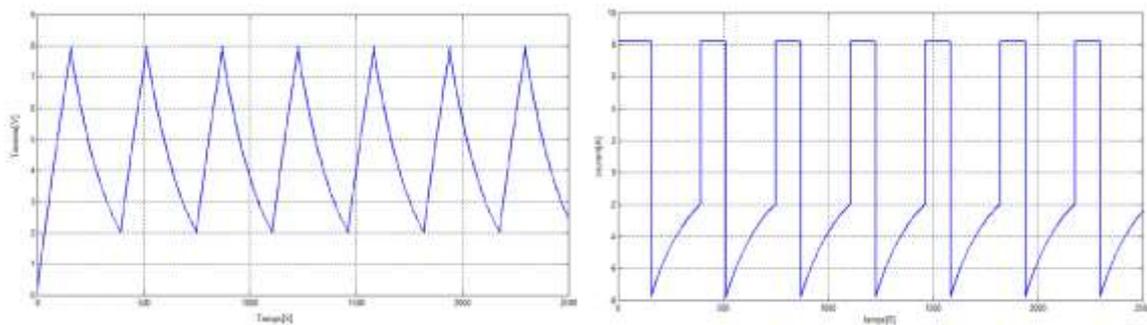
Supercondensateur Maxwell PC7223	Composant /caractéristiques	Valeurs
	Résistance d'accès ( $\Omega$ )	$R_a = 0,5 \text{ m}\Omega$
	Resistance de la ligne de transmission	$R = 1,1 \text{ m}\Omega$
	Capacité de la ligne de transmission (F)	$C(V) = -196,4 \text{ V}^2 + 925,4 \text{ V} + 1976,8$
	Résistance de la première branche complémentaire ( $\Omega$ )	$R_1 = 100 \text{ m}\Omega$
	Capacité de la première branche complémentaire (F)	$C_2(V) = -8,9286 \text{ V}^2 + 40,2643 \text{ V} + 88,9643$
	Résistance de la seconde branche complémentaire ( $\Omega$ )	$R_3 = 1 \Omega$
	Capacité de la seconde branche complémentaire (F)	$C_3(V) = -1,8571 \text{ V}^2 + 12,4714 \text{ V} + 31$

**Tab.5.2** Caractéristiques du supercondensateur



**Fig 5. 7** Modèle PV autonome avec stockage des supercondensateurs.

La figure 5.8 montre le courant et la tension de pack de supercondensateurs :



**Fig.5.8** Évolution de la tension et le courant du supercondensateur pour différents cycles de charge/décharge

## 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre un système photovoltaïque autonome avec stockage, dans la première partie. Nous avons vu que les batteries étaient susceptibles de subir des cycles de charge et de décharge intempestifs avec des pics de courant de nature à écourter leur durée de vie. Ensuite, nous avons montré que les supercapacités contribuent à améliorer le fonctionnement des batteries et ainsi à accroître leur durée de vie, et donc à réduire les coûts d'investissement.

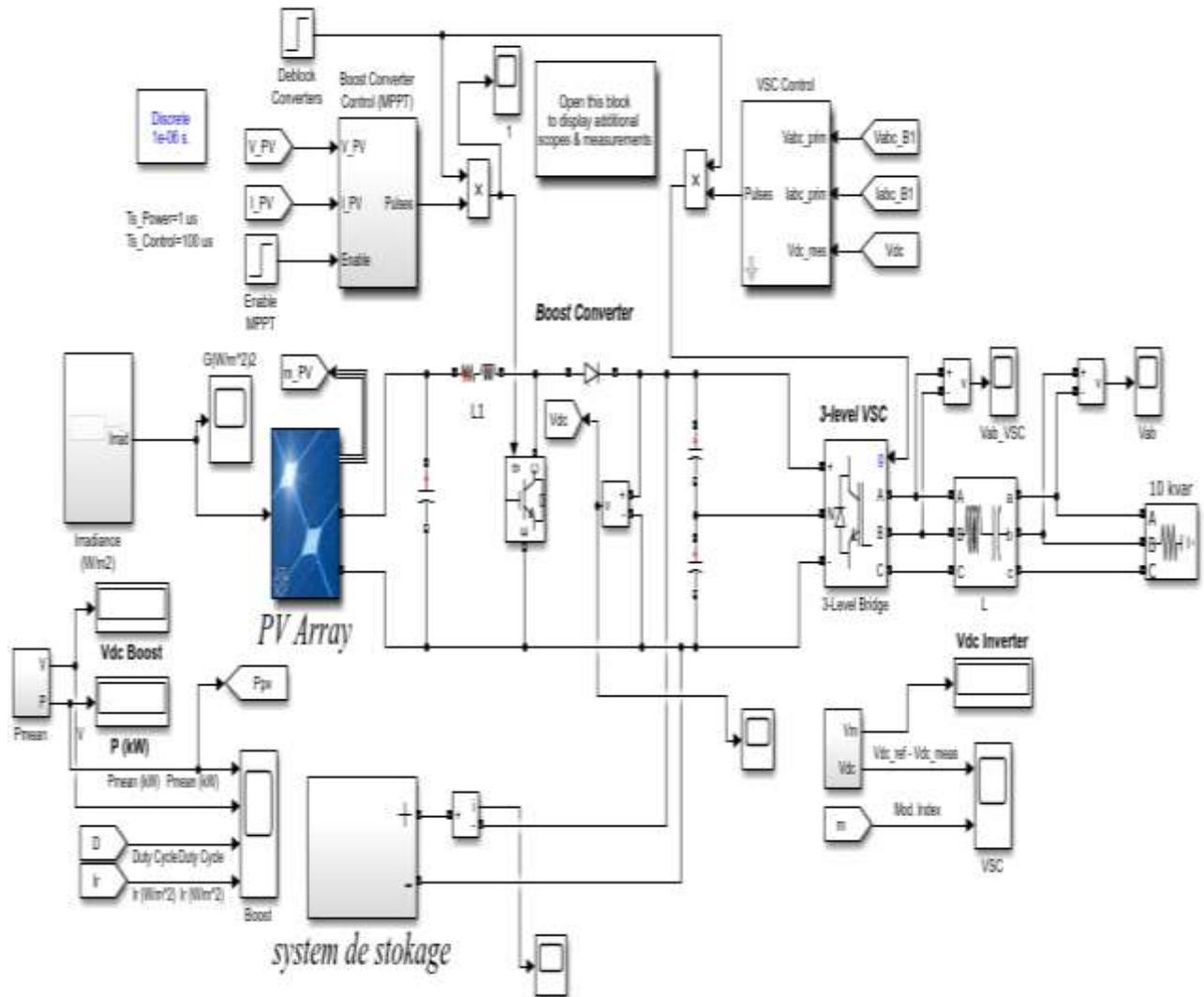
# Chapitre 6

## **Modélisation de système**

## 1. Introduction :

Après avoir présenté les différents types des énergies renouvelables dans le chapitre précédent, et présenter aussi le potentiel solaire en Algérie, nous allons dans ce chapitre modéliser le panneau photovoltaïque.

Dans la première partie, nous allons présenter brièvement quelques notions de base sur la cellule photovoltaïque, dans la deuxième partie nous allons modéliser la cellule photovoltaïque et finalement nous allons citer les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.



## 2. La cellule PV :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants : Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ; Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau

semi-conducteur ; Collecte des particules générées dans le dispositif. Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant: d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N [13].

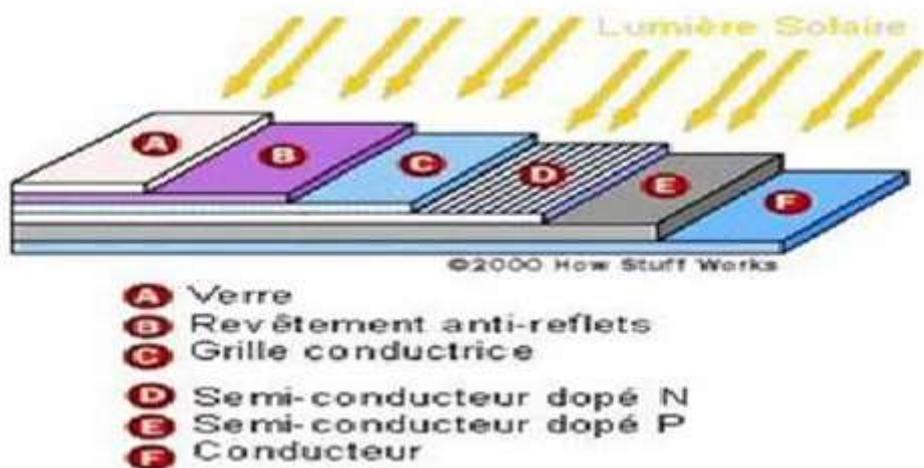
Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule.

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.

D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.

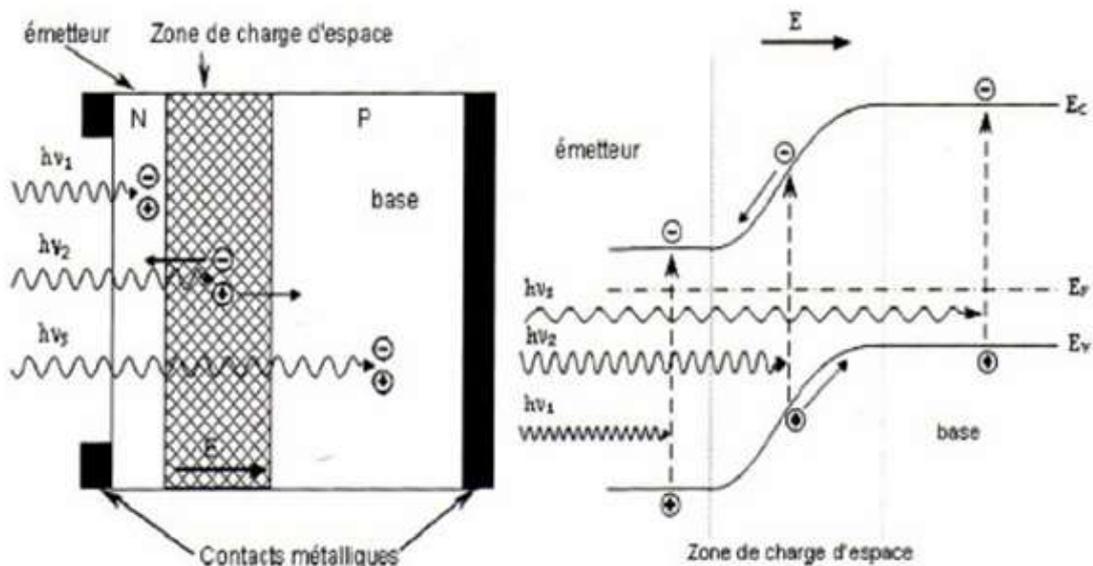
D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode, les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement. La figure 6.1 représente la structure basique d'une cellule solaire [18] :



**Fig 6.1** Structure basique d'une cellule solaire.

## 2.2. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure 6.2.



**Fig6.2** Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura une photo courant de diffusion dans la zone de charge d'espace, les paires électrons/ trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un photo courant de génération [22].

### 2.3. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique  $I(V)$  non linéaire (Figure 6.3). La caractéristique d'une cellule photovoltaïque balaie 3 quadrants sur les 4 existants [23].

Une cellule PV est un récepteur dans le quadrant 2 et dans le quadrant 4. Le fonctionnement dans ces deux quadrants est à proscrire car un risque de destruction par phénomène d'échauffement local (hot spot) est possible. Le fonctionnement dans le quadrant 1 est le fonctionnement normal, en effet dans ce cas la cellule est un générateur, elle produit donc de l'énergie. L'objectif est donc de faire travailler la cellule dans ce quadrant.

### 2.3.1. Facteur de forme FF :

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fillfactor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{\max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \cdot V_{oc}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [19]. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (6.23)$$

### 2.3.2. Le rendement $\eta$

Le rendement  $\eta$ , des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente,  $P_{in}$ .

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (6.24)$$

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

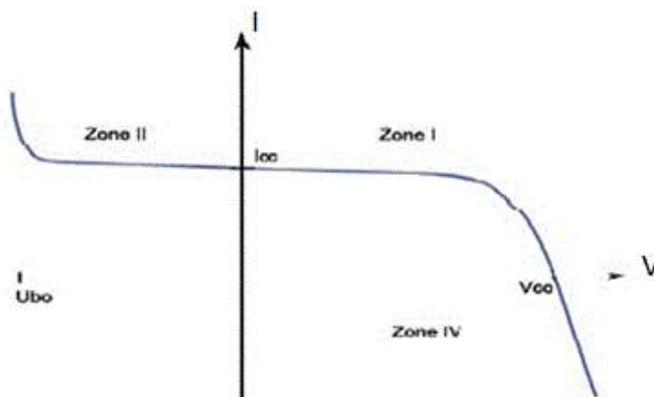


Fig6.3 Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque

### 3. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

---

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique I(V). Les plus usuels sont les suivantes:

#### 3.1. Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) :

---

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue [28].

#### 3.2. Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) :

---

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [28].

$$v_{co} = \frac{kT_c}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (6.19)$$

Avec :

$KT_c$ : est la température absolue.

$\frac{kT_c}{q}$  : le potentiel thermodynamique.

$q$  : la constante de la charge d'électron  $1.602 \cdot 10^{-23}$  c.

$I_s$  : le courant de saturation.

$I_{ph}$  : le courant photonique.

$K$  : la constante de Boltzmann  $1.38 \cdot 10^{-23}$  j/k.

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement figure 6.4.

- Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas,  $I_{ph} \ll I_s$ , ce qui permet d'écrire :

$$\log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) = \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (6.20)$$

D'où :

$$v_{co} \approx \frac{kT_c}{q} \cdot \left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (6.21)$$

- Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que  $I_{ph} \gg I_s$ , soit :

$$\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \gg 1$$

D'où :

$$V_{co} = \frac{kT_c}{q} \cdot \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (6.22)$$

C'est le domaine du comportement logarithmique.

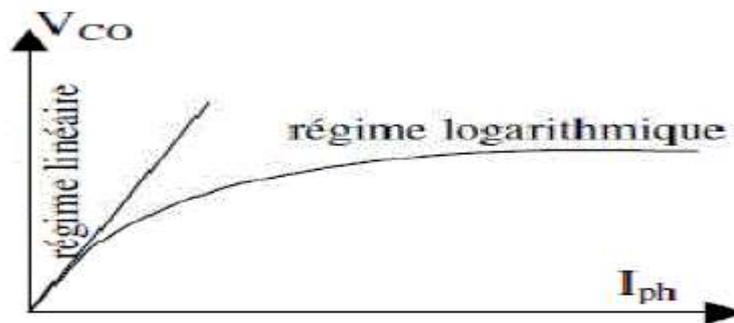


Fig 6. 4 différents régimes selon la puissance d'éclairément.

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log de  $I_{ph}$ , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme  $\frac{kT_c}{q}$ . En effet, le courant

de saturation,  $I_s$  dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction: il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme  $\frac{kT_c}{q}$ . Donc la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  baisse avec la température, ce qui est important dans

le dimensionnement des systèmes [43].

### 3.3. Facteur de forme FF :

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fillfactor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \cdot V_{oc}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [19]. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (6.23)$$

### 3.4. Le rendement $\eta$

---

Le rendement  $\eta$ , des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente,  $P_{in}$ .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (6.24)$$

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

## 4.

---

### 4.1. Mise en série :

---

Une association de  $N_s$  cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation (II.26) résume les caractéristiques électriques d'une association série de  $n_s$  cellules.

$$V_{co} = N_s \cdot V_{co} \quad (6.26)$$

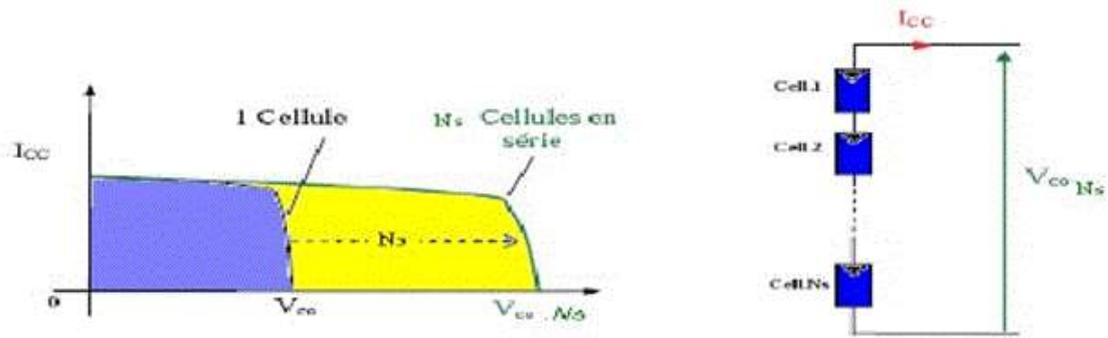
Avec :

$V_{co}$  : la tension du circuit ouvert

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ( $V_{cons}=0.6V*36=21.6V$ ) afin d'obtenir une tension optimale du panneau  $V_{op}$  proche de celle d'une tension de batterie de 12V [19].

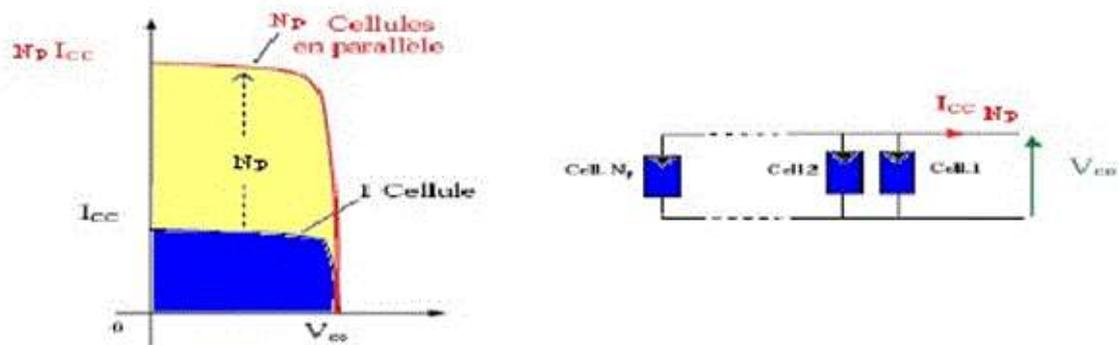
La figure 6.5 représente la mise en série des cellules photovoltaïque :



**Fig 6.5** Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $N_s$  cellules en série.

## 4.2. Mise en parallèle :

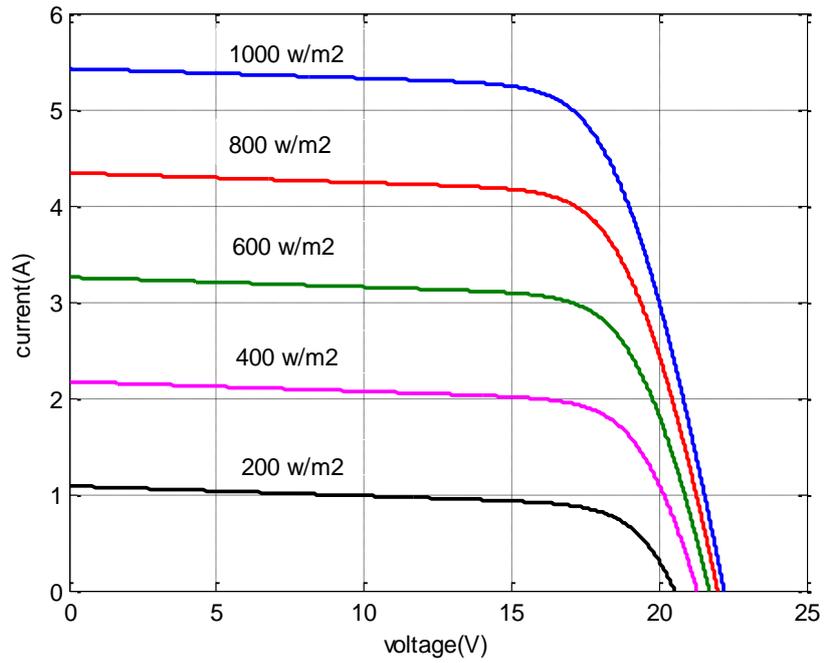
Une association parallèle de  $N_p$  cellules permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, (Figure 6.6). L'équation 6.28 résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $N_p$  cellules.



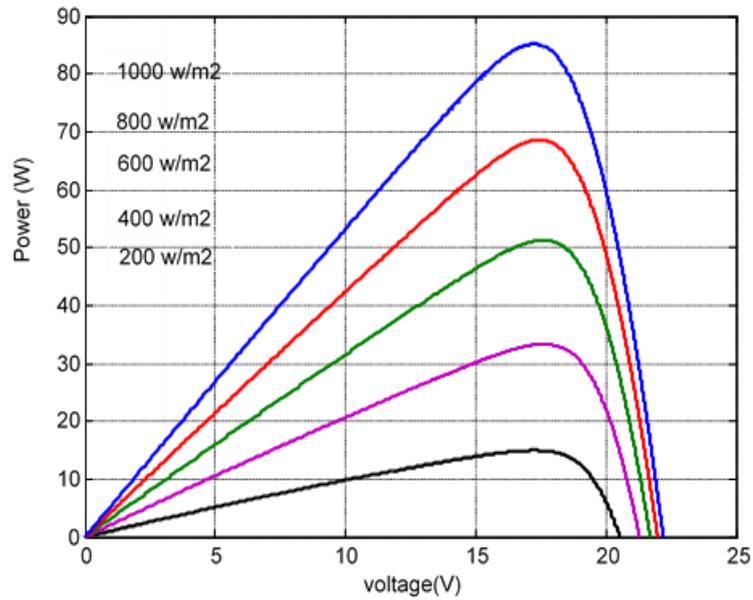
**Figure 6.6** Caractéristiques résultant d'un groupement de  $N_p$  cellules en parallèle.

## 4.3. Influence de la température et de l'éclairement :

La caractéristique d'une cellule est directement dépendante de l'éclairement et de la température. Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température constante  $25^\circ\text{C}$ , figure 6.7, montrent clairement que l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit  $I_{cc}$  varie proportionnellement à l'irradiation. Au même temps, la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  (à vide) varie très peu.



(a)

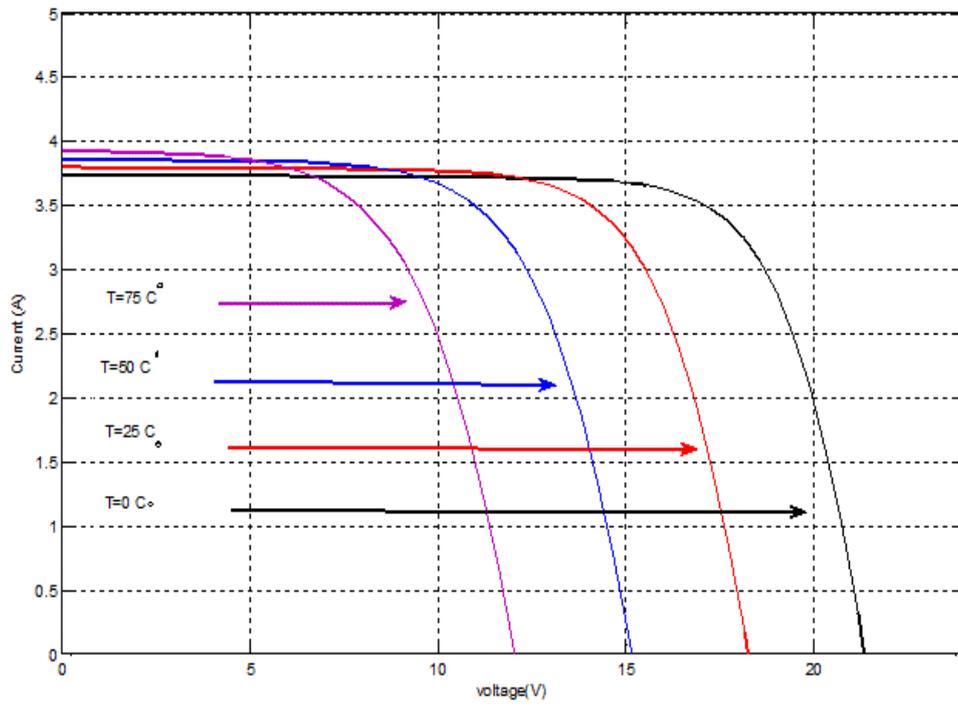


(b)

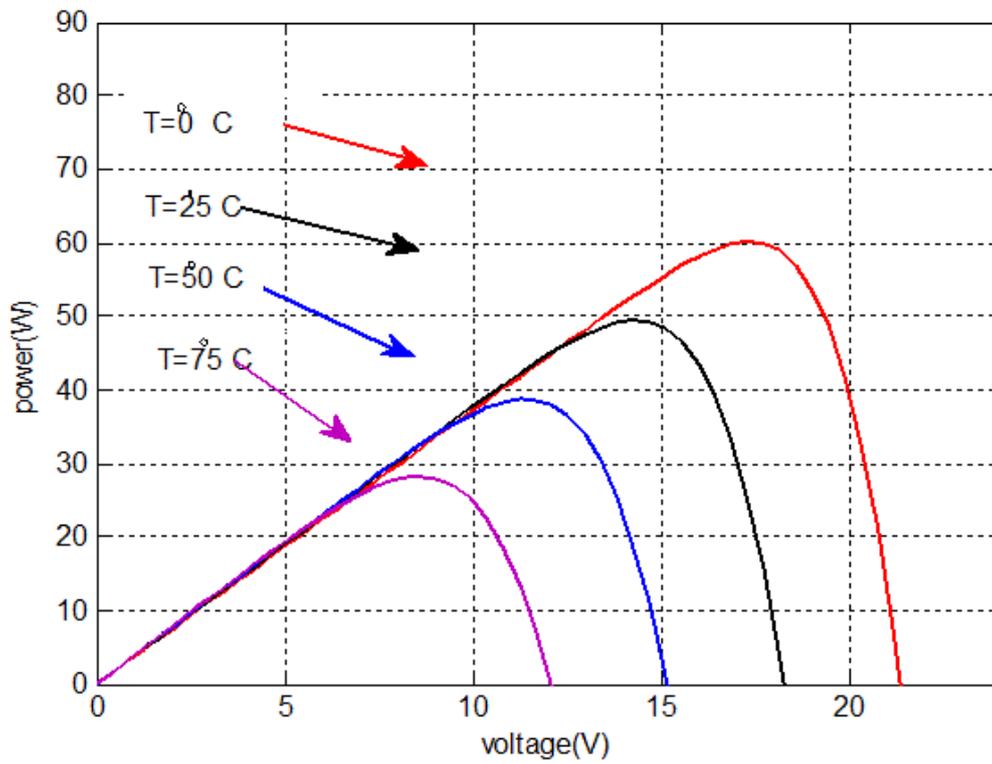
**Fig 6.7** Evolution de la caractéristique I(V) (a) et P(V) (b) en fonction de l'éclairement.

La température a également une influence sur la caractéristique .figure 6.8 présente la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction de la température à un éclairement donné. L'éclairement

est ici fixé à  $1000\text{W.m}^{-2}$ .



(a)



(b)

**Fig 6.8** Evolution de la caractéristique I(V) (a) et P(V) (b) pour différentes températures.

Si la température croît à irradiation constante, la tension à vide  $V_{co}$  décroît avec la température. Plus la température est élevée plus  $V_{co}$  est faible et le courant de court-circuit  $I_{cc}$  augmente avec la température. L'influence de la température sur  $I_{cc}$  peut être négligée dans la majorité des cas.

La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'un générateur PV. Ces deux paramètres devront donc être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation PV.

## 5. Résultats de la simulation sous l'environnement Matlab /Simulink

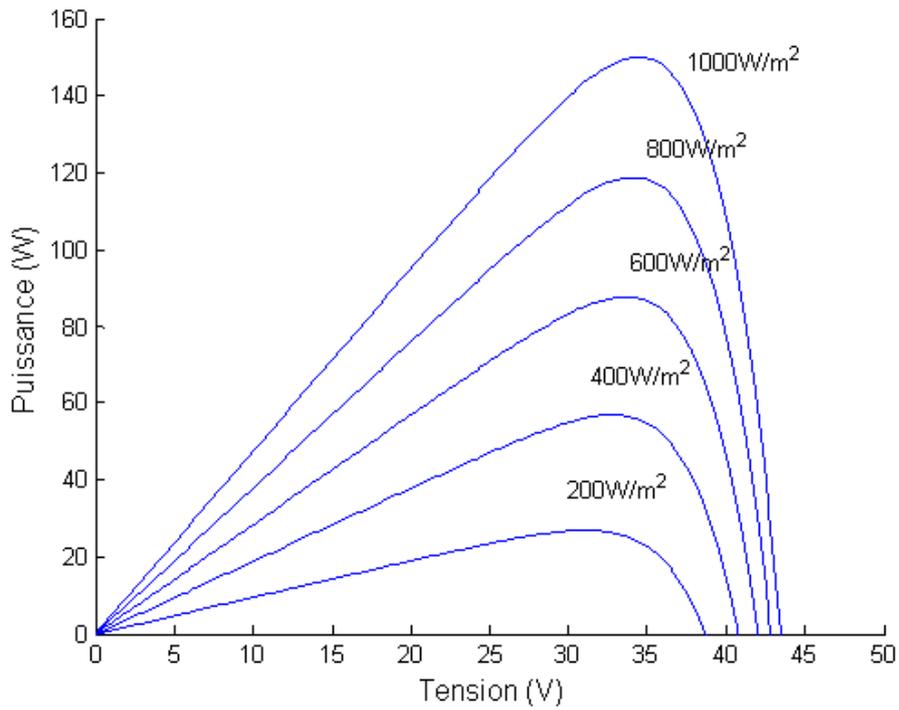
---

### 5.1. Caractéristique caractéristiques théoriques (I-V) et (P-V)

---

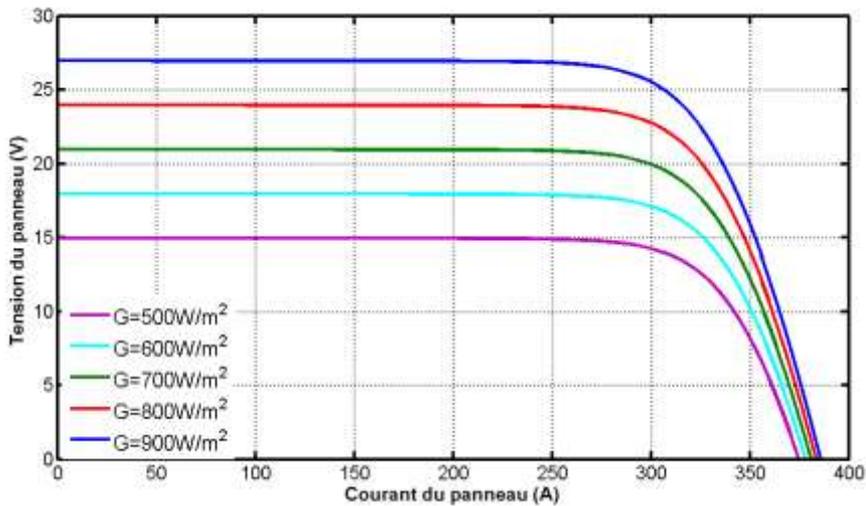
Le programme que nous avons développé est utilisé pour générer les caractéristiques théoriques (I-V) et (P-V), il peut être facilement adapté pour le calcul d'autres influence sur la performance des dispositifs photovoltaïques comme la température, éclairement...etc., .

Nos premiers résultats sont présentés sur les figures (6.11). Elles donnent, sous l'environnement (Matlab & simulink ) les caractéristiques  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  avec un module photovoltaïque MSX60 (voir Annexe A1) sous les conditions de la température et de l'éclairement constants  $=1000\text{w/m}^2$  ;  $T=25\text{C}^\circ$ . La figure (6.11).a présente la caractéristique courant / tension d'une cellule. Sur cette courbe, on repère le point de fonctionnement à vide :  $V_{co}$  pour  $I = 0\text{A}$  et le point de fonctionnement en court-circuit :  $I_{cc}$  pour  $U = 0\text{V}$



**Figure 6.9 :**  $P=f(V)$  et l'influence de l'éclairement

L'éclairement est un facteur influant sur le courant et la tension aussi et tant que  $P=V \cdot I$ . On remarque une influence très apparente sur la courbe  $P(V)$ . La valeur de  $P_{max}$  diminue lorsque  $G$  diminue



**Fig 6.10** Evolution de la caractéristique  $I(V)$  (a) et  $P(V)$  (b) pour différentes températures.

## **6. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :**

---

### **6.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque :**

---

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages [27] :

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

Les systèmes photovoltaïques sont fiables.

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

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

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

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

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

### **6.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :**

---

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

Le coût très élevé.

Faible rendement de conversion.

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

Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'attendrir, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [27].

## **7. Conclusion :**

---

Dans ce chapitre, nous avons présenté les Systèmes actuel photovoltaïque, le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque (L'effet photovoltaïque). La cellule PV présente une caractéristique  $I(V)$  non linéaire, Nous avons vu l'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique et présenté les différentes technologies des cellules actuellement sur le marché et ou cours de développement, en fin nous avons cité les avantages et les inconvénients

**Conclusion**

**Générale**

## CONCLUSION GENERALE

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande du monde jusqu'à maintenant, est l'énergie solaire, qui est libre et abondante dans la plupart des régions du monde, et est avéré une source économique.

L'utilisation d'énergie solaire comme source alternative d'énergie, souffre du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de puissance intermittent selon la fluctuation des conditions atmosphériques. Par conséquent, n'importe quelle conception de système d'application d'énergie solaire, devrait prendre en compte ces inconvénients.

Le stockage dans un système photovoltaïque contribue pour une part non négligeable au coût total d'exploitation par ses remplacements successifs durant la durée de vie d'un système. En effet, suivant la technologie et l'utilisation des batteries au plomb, leur durée de vie peut varier entre deux et douze ans. En outre, le coût total du stockage ne suit pas la même baisse que celle obtenue sur les autres composants d'un système photovoltaïque.

Dans la première partie, nous avons exposé les fondements nécessaires à la Compréhension du sujet. Nous avons rappelé des notions sur le rayonnement solaire, les multiples types et leur application dans le champ photovoltaïque. Puis nous avons expliqué le fonctionnement de cellules photovoltaïques, leurs particularités essentielles ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur coût. En plus d'une synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement. Nous n'avons pas omis aussi de signaler les modules photovoltaïques et leurs associations

En ce qui concerne la deuxième partie, le caractère intermittent de l'énergie solaire étant un des ses principaux inconvénients pour son utilisation permanente ainsi il s'avère indispensable d'emmagasiner une partie de l'énergie produite.

De ce fait, nous avons tenté de mettre en exergue, de manière critique un ensemble de caractéristiques techniques et économiques qui permettraient d'améliorer les estimations de coût

qui conditionnent l'acceptabilité du stockage. Pour réaliser cela, on dénombre plusieurs méthodes de stockage : sous forme d'eau, d'hydrogène, dans un volant d'inertie, dans une batterie électrochimique (plomb, lithium) ou un super condensateur.

Dans la troisième partie, l'élaboration de chaque composant du système photovoltaïque Complet a été élaboré à partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, le MPPT, le stockage batteries).

Cette modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les Paramètres constitutants. Dans un système énergétique photovoltaïque, on espère toujours

Travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP, afin de minimiser au maximum les Pertes en énergie produite.

Dans la dernière partie, nous avons exposé les résultats de simulations obtenus par la modélisation de la cellule, du module pv, du hacheur et de la batterie

# Références

- [0] BOUCHAKER Amir Abderaouf et BENBRINIS Mouad « Structure et Commande d'une installation photovoltaïque en site isolé » MEMOIRE de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA
- [1] H.S.Raus chenbach. Solar cell array desing hand book. Van Nostrand, 1980.
- [2] P.W.Carlin, A.S.Laxon, E.B.of Muljadi, " The history and state of Art of variable-speed Wind Turbine Technology. ", NRLE /TP-500-28607, Février 2001.
- [3] Ksouentini Fatima Zohar, Bouhaddada Ahmed. "L'énergie éolienne "Mémoire de master d'électrotechnique, Université Badji Mokhtar, Annaba 2012.
- [4] J.Martin "Energier éoliennes", Technique de l'ingénieur, traité de Génie énergétique, pp.B 8 585 1 – B8 585 21.
- [5] <http://www.lei.ucl.ac.be/multimedial/eLEE/realisations/energieRenouveleble> Filière Solaire/Solaire.htm.
- [6] M. Benhaddadi, G. Olivier, "Dilemmes Energétiques", Presses de l'Université du Québec PUQ, 2008.
- [7] Bouzeria Hamza, Zouiten Issam "Etude des hacheurs et leurs application dans l'optimisation des générateurs photovoltaïque "Mémoire de master d'électrotechnique, Université Badji Mokhtar, Annaba.2011.
- [8] B. Flèche –D.Delagnes "Energie solaire photovoltaïque. doc "juin 07.
- [9] T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement », manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, (AFME), 1982
- [10] P.W.Carlin, A.S.Laxon, E.B.Muljadi, " The history and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology " , NRLE/TP-500-28607, Février 2001
- [11] J.Martin, "Energies éoliennes " , Technique de l'Ingénieur , traité de Génie énergétique , pp.B 8 585 1 – B8 585 21.
- [12] Site Internet de l'association danoise de l'Industrie Eolienne, "<http://www.windpower.org/fr/core.htm>".
- [13] Frédéric POITERS , " Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne , machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, Le 19 décembre 2003
- [14] Ksouentini Fatima Zohra, Bouhaddada Ahmed. "L'ENERGIE EOLIENNE" Mémoire de master d'électrotechnique, Université badji mokhtar ,annaba .2012.
- [15] P.Leconte, M.Rapin, E.Széchenyi, <<Eoliennes>>, techniques de l'ingénieur, traité de Génie mécanique, pp.BM 4 640 21.
- [16] MENY IVAN, <<Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance >> laboratoire d'électronique de Montpellier (LEM), soutenue le 14/12/2004
- [17] KAOURI IMED , KHANFOUSSI RIMA . " Contribution à l'étude des hacheurs à MOSFET et leur application dans l'optimisation des générateurs photovoltaïque" Mémoire d'ingénieur d'électrotechnique, Université badji mokhtar ,annaba .2009.
- [18] Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region , Final Report , Study Commissioned by Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety , Germany
- [19] Guide des Energie Renouvelables, Edition 2007, Ministère de l'Energie et des Mines
- [20] Programme indicatif des besoins en moyens de production d'électricité 2008-2017, commission de la régulation de l'électricité et du gaz
- [21] B . Flèche – D. Delagnes "Energie solaire photovoltaïque .doc "juin 07
- [22] Technique d'ingénieur ( énergie solaire)
- [23] BOUZERIA HAMZA , ZOUITEN ISSAM "étude des hacheurs et leurs application dans l'optimisation des générateurs photovoltaïque" Mémoire de master d'électrotechnique, Université badji mokhtar ,annaba .2011.

- [24] M.Dietschy , Professeur accompagnateur , Classe préparation CPE Institution des Chartreux Année 2004.
- [25] Alain RICAUD , "Modules photovoltaïque , Filières technologiques", Technique de l'ingénieur, D3940
- [26] L'électricité photovoltaïque, Yver JAUTARD et Thierry BOUDOL (Solarte)-25/05/2000
- [27] MERAHI REDA , "Modélisation d'un dispositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateur photovoltaïque" mémoire de magister d'électrotechnique, Université badji mokhtar ,annaba 2010 .
- [28] Extrait d'un cours magistral de Stéphan ASTIER Professeur Des Universités – INPT – ENSEEIHT
- [29] H.S.Raus chenbach.Solar cell array desing hand book . Van Nostrand, 1980
- [30] Lila Croci, gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batterie/supercapaciteurs, these de doctorat de l'université de Poitiers, 2013.
- [31] Loïc Bailly, Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.
- [32] Helali Kamelia, Modélisation d'une cellule photovoltaïque .Etude comparative, These de doctorat Université de Tizi Ouzou, Algeria, 2012.
- [33] Soltane Belakehal, Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables, Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010
- [34] E. Karatepe, M. Boztepe and M. Colak , Neural Network Based Solar-Cell Model , Energy Conversion and Management, Vol. 47, N°9-10, pp. 1159-1178, 2006.
- [35] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto Ruppert Filho « Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays ». 10th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), 2009.
- [36] Salima. Kebaili. Achour. Betka , Efficiency Model Of DC/DC PWM Converter Photovoltaic Applications , GCREEDER, Amman-Jordan, March 31st – April 2nd, pp1-5, 2009.
- [37] Philippe Barrade, électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire, press polytechnique et universitaires, 1ère édition 2006
- [38] Jordan, D.C., Kurtz, S.R., Photovoltaic Degradation Rates-an Analytical Review. Progress in Photovoltaics: Research and applications. 21, 12-29. 2011.
- [39] MY. Ayad, Mise en œuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues , thèse de l'INPL
- [40] Jordan, D.C., Kurtz, S.R., Photovoltaic Degradation Rates-an Analytical Review. Progress in Photovoltaics: Research and applications. 21, 12-29. 2011.
- [41] MY. Ayad, Mise en œuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues , thèse de l'INPL soutenu

**Résumé** : la production d'énergie par les systèmes photovoltaïques est très fluctuante et dépend énormément des conditions météorologiques. C'est pourquoi il faut penser à stocker cette énergie pour la restituer pendant la nuit et les jours « sans soleil » et pour mieux adapter le système pv en fixant la tension de système. Dans ce mémoire, une étude théorique sur l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi que le système de stockage électrochimique à l'aide de batterie d'accumulateur sera présenté. La deuxième partie est une modélisation des différents éléments qui constituent le système. Une stratégie de commande avancée est adaptée pour contrôler le système. Une simulation sous environnement du Logiciel MATLAB /simulink de la structure proposée.

**Abstract:** The energy production by the photovoltaic systems is very fluctuating and depends enormously on the weather conditions. This is why it will be necessary to think of storing this energy to restore it during the night and the days "without sun" and for better adapting generator statement by fixing the tension system says.

In this work a theoretical study on photovoltaic solar energy, as well as the system storage of the latter to knowing electrochemical storage using accumulators will be presented.

The second part is modeling the various components of the system. An advanced strategy is adapted to control the system. A simulation environment in MATLAB/simulink for the proposed structure.

**Key Words:** solar energy, energy storage, boost, accumulator battery.

**Mots Clés :** énergie solaire, stockage de l'énergie, hacheur, batterie d'accumulateur.