

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA

Faculté des sciences de l'ingénierie

Département :Electrotechnique



## Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme :

**LICENCE**

*Thème :*

### Etude et Simulation D'un Système Photovoltaïque

**Présenté par :**

ZENATA TAHER

AZZOUZ ABDALLAH ANES

**Encadré par :**

GHOUELBOURK SIHEM

**Le juré:**

MIHOUB MOHAMED LARBI

Année universitaire : 2020-2021

# *Remerciements*

*Avant tout, nous remercions ALLAH, le tout puissant, de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.*

*Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à notre encadreur Madame GHOUELBOURK SIHEM pour l'encadrement qu'elle nous a assuré et ses précieux et judicieux conseils qu'elle n'a cessé de nous prodiguer tout au long de ce projet.*

*Nous remercions également le juré monsieur MIHOUB MOHAMED LARBI d'avoir accepté d'évaluer notre travail.*

*Nous tenons également à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma chère mère.*

*Mes adorables sœurs : Selma et Samia.*

*Les petits : Razime et Tasnime.*

*Tous mes amis.*

*A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.*

**TAHER**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes parents*

*Tous les membres de ma famille*

*Mes amis pour leur aide pratique et soutien moral et encouragements*

*Les professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils  
ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et  
professionnelles.*

**ABDALLAH ANES**

## **Résumé**

De nos jours les énergies renouvelables prend de plus en plus de place dans le monde, notamment c'est grâce à ces énergies qu'une partie de l'électricité que nous consommons est propre, et comme on peut le constater le solaire photovoltaïque est le chef dans ce domaine, des milliers de centrale et installation photovoltaïque sont installer à travers le monde.

Ce travail a donc porté sur la modélisation et la simulation d'un système : photovoltaïque connecté au réseau électrique moyennant le logiciel MATLAB (Simulink).Le système photovoltaïque global raccordé au réseau a été simulé, on a utilisé un onduleur triphasé (convertisseur DC-AC) pour transformer le courant continu en courant alternatif, qui transférera ce courant au réseau central.

## **Abstract**

Nowadays, renewable energies take more and more place in the world, in particular, it is thanks to these energies that part of the electricity we consume is clean, and as we can see the solar photovoltaic is the leader in this field, thousands of power plants and photovoltaic installations are installed around the world.

This work therefore focused on the modeling and simulation of a system, photovoltaic connected to the electricity grid using MATLAB software (Simulink). The global photovoltaic system connected to the grid was simulated, a three-phase inverter (DC-AC converter) was used to transform direct current into alternating current, which will transfer this current to the central network.

# *Symboles et abréviations*

## **Symboles :**

**Sia** : Le silicium amorphe.

**CdTe** : Le Cadmium.

**Cs1** : pour une cellule de 100 cm<sup>2</sup>.

**PN** : Tension de jonction.

**N** : Couche supérieure.

**N<sub>s</sub>** : Nombre de cellules en série dans un module photovoltaïque.

**N<sub>p</sub>** : Nombre de cellules en série dans un module photovoltaïque.

**P** : Couche inférieure.

**B<sub>h</sub>** : largeur de la bande à hystérésis.

**E<sub>gap</sub>** : Energie de gap (Silicium cristallin) Silicium amorphe.

**I** : Courant électrique (A).

**I<sub>s1</sub> I<sub>s2</sub>** : Les courants de saturation.

**I<sub>ph</sub>** : Courant photo généré (A).

**I<sub>sref</sub>** : Courant de saturation inverse de la diode en condition référence.

**I<sub>sh</sub>** : Courant de la résistance shunt.

**I<sub>phref</sub>** : Courant photonique sous condition de référence [A].

**I<sub>d</sub>** : Courant de la diode [A].

**I<sub>pv</sub>** : Le courant délivré par le module photovoltaïque (A).

**I<sub>sc</sub>** : Courant de court-circuit (A).

**G<sub>ref</sub>** : L'éclairement à la condition de référence [W/m<sup>2</sup>].

**K<sub>I</sub>** : Coefficient de température pour l'intensité en court-circuit (A.K-1).

**K<sub>V</sub>** : Coefficient de température pour la tension en circuit ouvert (V.K-1).

**N<sub>S</sub>** : Nombre de cellules connectées en série.

**R** : Résistance de la ligne de transmission (Ω).

**R<sub>a</sub>** : Résistance d'accès (Ω).

**R<sub>p</sub>** : Résistance shunt ou parallèle ( $\Omega$ ).

**R<sub>s</sub>** : Résistance série.

**R<sub>sh</sub>** : Résistance de la charge ( $\Omega$ ).

**T** : Température de jonction (K).

**T<sub>c</sub>** : Température absolue.

**V** : Tension électrique (V)

**V<sub>pv</sub>** : Tension photovoltaïque (V).

**V<sub>oc</sub>** : Tension de circuit ouvert (V).

**V<sub>d</sub>** : La tension aux bornes de la diode (V).

**A<sub>tr</sub>** : Amplitude du signal triangulaire (Porteuse).

**K** : Constante de Boltzmann  $1.38.10^{-23}$  J/K.

**q** : Charge de l'électron.

**$\mu_{cc}$**  : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K].

**FF** : Facteur de forme  $\eta$  Rendement (%).

### **Abréviations :**

**PV**: Photovoltaïque.

**CIS** : Le diséléniure de cuivre.

**CIGs** : Le diséléniure de gallium.

**DC**: Courant Continu.

**AC**: Courant Alternatif.

**MLI**: Modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation).

**GPV**: Générateur photovoltaïque.

**PLL**: Boucle à verrouillage de phase (Phase locked loop).

**GTO** : Thyristor à extinction par la gachette (gate turn-off thyristor ).

**IGBT** : Transistor bipolaire à grille isolée.



# *Liste des figures*

## Liste des figures

### Chapitre I: Généralités des énergies renouvelables et photovoltaïques

<b>Fig I.1</b> : L'énergie hydraulique .....	2
<b>Fig I.2</b> : Fonctionnement de l'énergie hydraulique .....	2
<b>Fig I.3</b> : L'énergie biomasse .....	3
<b>Fig I.4</b> : Schéma de la géothermie à haute énergie .....	4
<b>Fig I.5</b> : Schéma de la géothermie à basse énergie .....	4
<b>Fig I.6</b> : Schéma de la géothermie de très basse énergie .....	5
<b>Fig I.7</b> : L'énergie éolienne .....	6
<b>Fig I.8</b> : Fonctionnement de l'énergie éolienne .....	6
<b>Fig I.9</b> : Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables.....	8
<b>Fig I.10</b> : La carte d'éclairement solaire de l'Algérie .....	8
<b>Fig I.11</b> : Deux exemples de modules à concentration thermodynamique.....	9
<b>Fig I.12</b> : Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique .....	10
<b>Fig I.13</b> : Composition d'un panneau solaire thermique .....	11
<b>Fig I.14</b> : solaire photovoltaïque .....	12
<b>Fig I.15</b> : fonctionnement de panneau solaire .....	12
<b>Fig I.16</b> : Représentation des différents composants d'une installation PV.....	13
<b>Fig I.17</b> : Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome .....	14
<b>Fig I.18</b> : Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau .....	15
<b>Fig I.19</b> : Schéma d'une installation du système hybride .....	15
<b>Fig I.20</b> : Schéma de principe de la batterie .....	17
<b>Fig I.21</b> : Schéma de principe des supercondensateurs.....	18
<b>Fig I.22</b> : Schéma de principe de la pile à combustible .....	18

### Chapitre II: Modélisation des cellules photovoltaïques

<b>Fig II.1</b> : Structure basique d'une cellule solaire.....	22
<b>Fig II.2</b> : cellule monocristalline.....	23
<b>Fig II.3</b> : cellule multicristalline .....	23
<b>Fig II.4</b> : Les couches minces (cellule au Silicium amorphe).....	24
<b>Fig II.5</b> : Cellule solaire tout organique sur substrat souple .....	25
<b>Fig II.6</b> : fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	26
<b>Fig II.7</b> : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.....	27

<b>Fig II.8</b> : Modèle de la cellule PV à une diode .....	28
<b>Fig II.9</b> : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P.....	29
<b>Fig II.10</b> : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L4P.....	30
<b>Fig II.11</b> : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P.....	31
<b>Fig II.12</b> : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P .....	32
<b>Fig II.13</b> : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P .....	33
<b>Fig II.14</b> : Différentes régimes selon la puissance d'éclairement .....	36
<b>Fig II.15</b> : Cellule, module et panneau photovoltaïque (protection par diode by-pass) .....	37
<b>Fig II.16</b> : Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série.....	37
<b>Fig II.17</b> : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle $n_p$ cellules identiques.....	38
<b>Fig II.18</b> : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques .....	39
<b>Fig II.19</b> : a)- Architecture classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protection. b)- Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass et mise en évidence du courant de circulation IPV .....	40

### **Chapitre III : Le système photovoltaïque**

<b>Fig III.1</b> : Schéma de structure d'un onduleur de tension triphasé connecté au réseau .....	41
<b>Fig III.2</b> : Contrôle du courant par hystérésis classique .....	42
<b>Fig III.3</b> : Contrôle des courants de l'onduleur par hystérésis modulée.....	43
<b>Fig III.4</b> : Représentation du bus continu .....	44
<b>Fig III.5</b> : Boucle de régulation de la tension du bus continu.....	45
<b>Fig III.6</b> : Schéma synoptique de la connexion de l'onduleur au réseau électrique .....	46
<b>Fig III.7</b> : Principe de la PLL .....	47
<b>Fig III.8</b> : Caractéristiques de courant et de tension pour différentes irradiances solaires, à 25 °C et 45 °C .....	48
<b>Fig III.9</b> : Allure des tensions et courants extraits du réseau.....	50
<b>Fig III.10</b> : Allure de tension et de courant injectés au réseau .....	50
<b>Fig III.11</b> : Schéma global du système PV raccordé au réseau .....	51
<b>Fig III.12</b> : Courbe A- Courbe B- Courbe C : allure de tensions et de courants.....	53

# *Liste des tableaux*

## **Liste des tableaux**

<b>Tableau.1</b> : Tableau représentant le rendement de chaque type de cellule.....	25
---	----

# *Table des matières*

# Table des matières

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables et photovoltaïque</b>	
Introduction .....	2
I.1. Les énergies renouvelables .....	2
I.1.1. L'énergie hydraulique .....	2
I.1.2. L'énergie de la biomasse .....	3
I.1.3. L'énergie géothermique .....	4
I.1.4. L'énergie éolienne .....	5
I.1.5. L'énergie solaire .....	6
I.2. Les énergies renouvelables en Algérie .....	6
I.2.1. Potentiel solaire en Algérie .....	8
I.2.2. Les différentes technologies solaires .....	9
I.2.2.1. Solaire à concentration thermodynamique .....	9
I.2.2.2. Solaire thermique .....	9
I.2.2.3. Solaire photovoltaïque .....	11
I.3. Les différents types des systèmes photovoltaïques .....	12
I.3.1. Alimentations électriques faibles puissances .....	13
I.3.2. Installations électriques photovoltaïques autonomes .....	13
I.3.3. Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau .....	14
I.3.4. Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride .....	15
I.4. Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque .....	16
I.4.1. Les batteries .....	16
I.4.2. Les super-condensateurs .....	17
I.4.3. Les piles à combustible .....	18
I.4.4. Les volants d'inertie .....	19
I.4.5. Stockage hybride .....	19
I.5. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	20
I.5.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque .....	20
I.5.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	20
Conclusion .....	20

## Chapitre II: Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Introduction .....	21
II.1. La cellule PV .....	21
II.2. Types des cellules photovoltaïques .....	22
II.2.1. Le silicium .....	22
II.2.1.1. Le silicium mono-cristallin .....	22
II.2.1.2. Le silicium multicristallin (Polycristallin) .....	23
II.2.1.3. Les couches minces .....	24
II.2.1.4. Cellules organiques et plastiques .....	25
II.3. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	26
II.4. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque .....	27
II.5. Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....	27
II.5.1. Modèle à une diode .....	28
II.5.1.1. Modèle à trois paramètres .....	28
II.5.1.2. Modèle à quatre paramètres (L4P).....	30
II.5.1.3. Modèle à cinq paramètres (L5P) .....	31
II.5.2. Modèle à deux diodes .....	31
II.5.2.1. Modèle à six paramètres (2M6P) .....	31
II.5.2.2. Modèle à sept paramètres (2M7P) .....	32
II.6. Paramètres d'une cellule photovoltaïque .....	34
II.6.1. Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) .....	34
II.6.2. Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ).....	35
II.7. Association des cellules photovoltaïques .....	36
II.7.1. Association en série .....	37
II.7.2. Association en parallèle .....	38
II.7.3. Association hybride (série-parallèle) .....	39
Conclusion .....	40

## Chapitre III : Le système photovoltaïque

Introduction .....	41
III.1. Contrôle de la liaison Onduleur-réseau électrique .....	41
III.1.1. Présentation de la structure du système côté Onduleur- réseau .....	41
III.1.2. Etude de la partie contrôle de la structure proposée .....	41
III.1.3. Onduleur de tension .....	41
III.1.3.1. Différentes commandes de l'onduleur .....	42



III.1.3.2. Contrôle des courants par hystérésis classique .....	42
III.1.3.3. Contrôle des courants par hystérésis modulée .....	43
III.2. Contrôle de la tension du bus continu $V_{dc}$ .....	44
III.3. Contrôle des puissances active et réactive (P et Q) .....	45
III.4. Etude de la synchronisation du convertisseur sur le réseau .....	47
III.4.1. PLL triphasée dans le domaine de Park .....	47
- Simulation et résultats .....	48
Conclusion.....	53
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>54</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>55</b>

# *Introduction générale*

Depuis la nuit des temps, l'être humain à utiliser sans cesse de l'énergie sous différents formes dans tous ces activités journalières, tel que se déplacer, se réchauffer, s'éclairer, ou se nourrir. Dans notre monde actuel industrialisées, la principale énergie utiliser pour alimenter nous foyer et faire marcher et évoluer les différente industries c'est belle et bien l'énergie électrique. Cette dernière est produite généralement à partir des combustible de défèrent natures, en parle ici des énergies fossiles, telle que le pétrole, le charbon, le gaz, et l'énergie nucléaire (uranium).

Mais au rythme de la consommation actuelle des ressources énergétiques, les gisements d'énergies fossiles et nucléaires, vont d'une manière igue à la raréfaction à cause de l'exploitation agressive de ces derniers, et leurs stocks qui sont très limité, sans oublier les dégâts causé par l'exploitation de ces énergies, tel que le réchauffement climatique, on note que la production électrique représente 40% des émissions mondiale de CO<sub>2</sub>, la situation est d'autant plus alarmante que la demande énergétique va en grandissant. Vu la situation actuelle, une alternative énergétique nouvelle, renouvelable et propre s'avère incontournable.

Le solaire photovoltaïque est vu aujourd'hui comme une alternative énergétique principale pour la production de l'électricité propre a de grande échelle, notamment des centrales photovoltaïques assure de plus en plus l'approvisionnement en électricité partout dans le monde. Malgré cette prouesse technologique, les panneaux photovoltaïque subis de nombreuses contraintes météorologique, climatique ou électrique au niveau des centrales photovoltaïques qui diminue leur rendement.

Ce mémoire est répartie sur trois chapitres :

- Dans le premier nous allons étaler les généralités sur les énergies renouvelables et photovoltaïques,
- Dans le deuxième chapitre nous parlerons de la modélisation des cellules photovoltaïques.
- Le troisième chapitre sera consacré la modélisation et la simulation d'un système : photovoltaïque connecté au réseau électrique moyennant le logiciel MATLAB (Simulink).

Le but de ce type de commande est d'imposer les valeurs de puissance active et réactive injectées au réseau avec une synchronisation des courants de références.

***Chapitre I:***  
***Généralités sur les énergies***  
***renouvelables***  
***et photovoltaïques***

## Introduction:

L'énergie est dite renouvelable quand il s'agit de sources reconstituées naturellement, plutôt que de l'énergie non renouvelable qui épuise ses stocks. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont fortement augmenté ces dernières années. Au cours des 20 prochaines années, tout système énergétique durable dépendra d'une utilisation rationnelle des sources traditionnelles et d'une utilisation accrue de l'énergie. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sécurité aux consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, les sources aléatoires imposent certaines règles en termes de dimensions et d'utilisation des systèmes de récupération d'énergie.

## I.1. Les énergies renouvelables:

### I.1.1. L'énergie hydraulique:

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique. La production d'électricité hydraulique exploite l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau. Le principe utilisé pour produire de l'électricité avec la force de l'eau est le même que pour les moulins à eau de l'Antiquité. Au lieu d'activer une roue, la force de l'eau active une turbine qui entraîne un alternateur et produit de l'électricité [1].

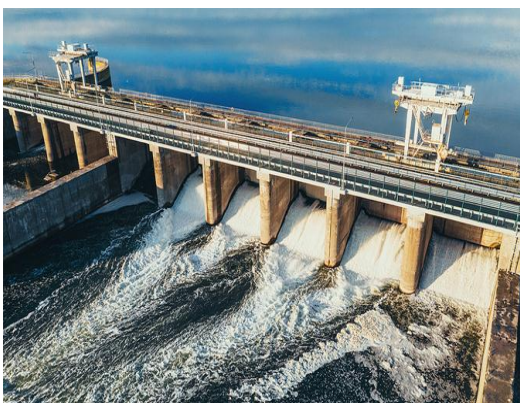


Fig I.1 : L'énergie hydraulique.

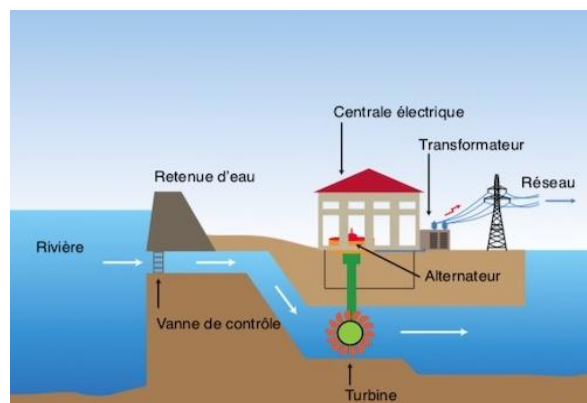


Fig I.2 : Fonctionnement de l'énergie hydraulique.

### I.1.2. L'énergie de la biomasse:

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets domestiques renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...).

La chaleur produite par la combustion va chauffer un réservoir d'eau qui va alors produire de la vapeur un peu à la manière d'une cocote minute. Cette vapeur d'eau va alors être dégagée à haute pression, ce qui va permettre de faire tourner une turbine relié à un alternateur. C'est cet alternateur qui va permettre de produire l'électricité. Ce qui est intéressant dans les centrales à biomasse, c'est surtout celles qui permettent de produire de l'électricité à partir des éléments dont nous n'avons plus besoin [2].

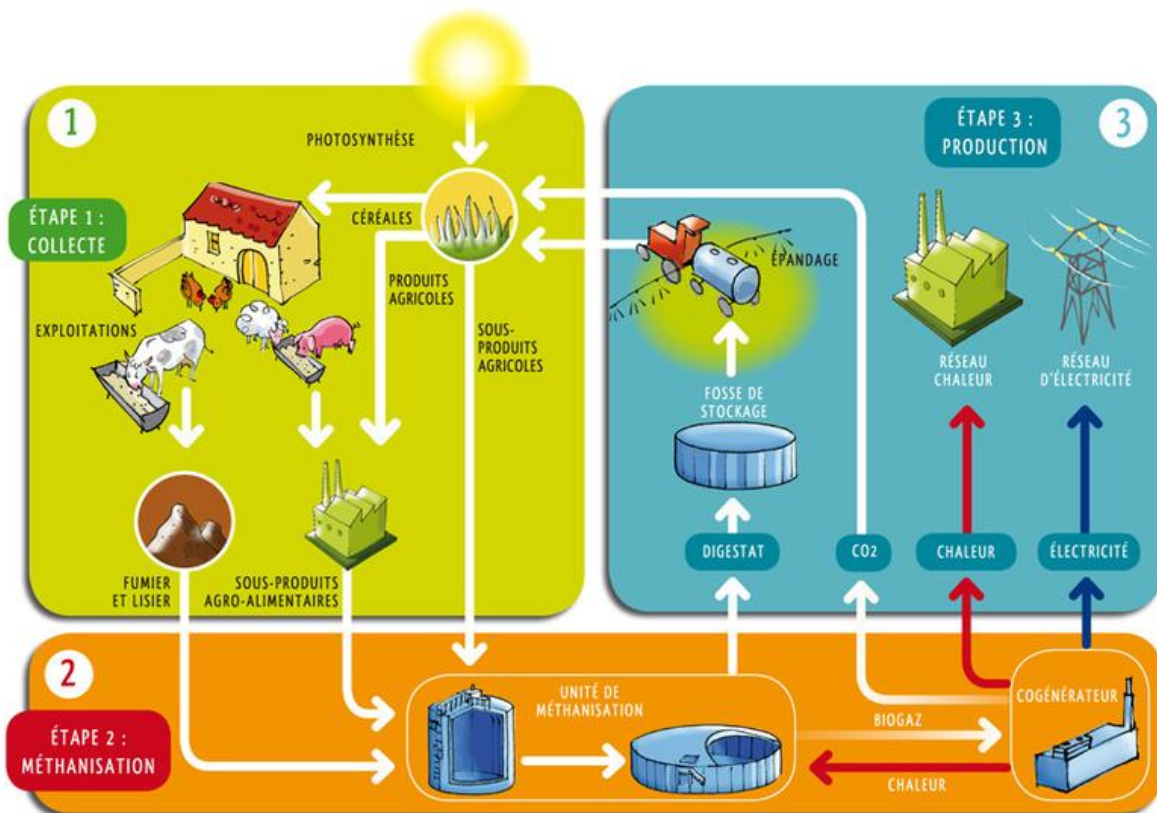


Fig I.3 : L'énergie biomasse.

### I.1.3. L'énergie géothermique:

La géothermie désigne l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- La géothermie à haute énergie.
- La géothermie de basse énergie.
- La géothermie de très basse énergie. Pour utiliser cette énergie souterraine, on envoie de l'eau froide sous la Terre. Cette eau froide se réchauffe. Elle est alors pompée et ramenée à la surface où elle est utilisée soit pour produire de l'électricité dans une centrale, soit directement en tant qu'eau chaude dans les logements (eau chaude pour la douche, les radiateurs...) [3,4].

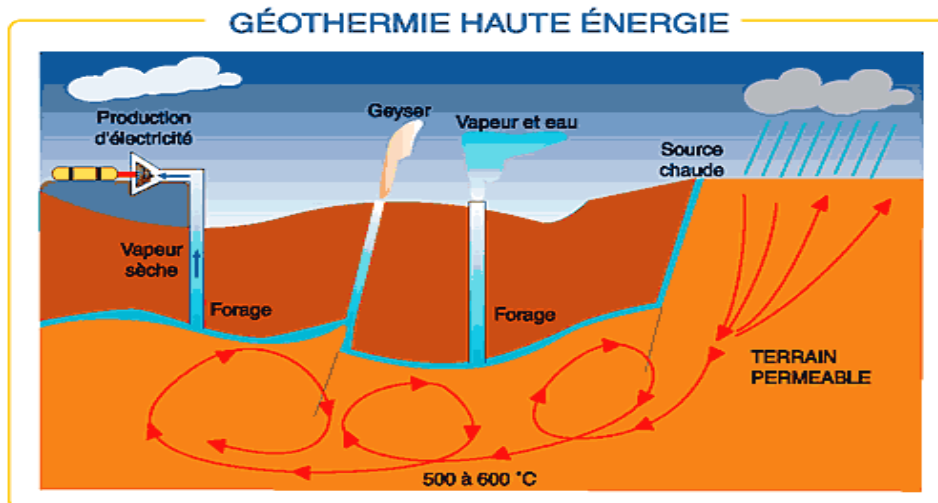


Fig I.4 : Schéma de la géothermie à haute énergie.

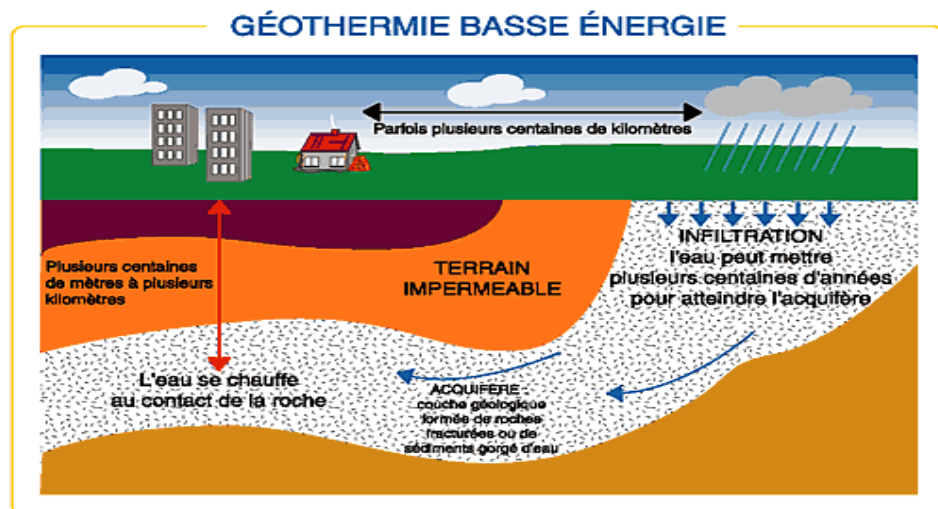
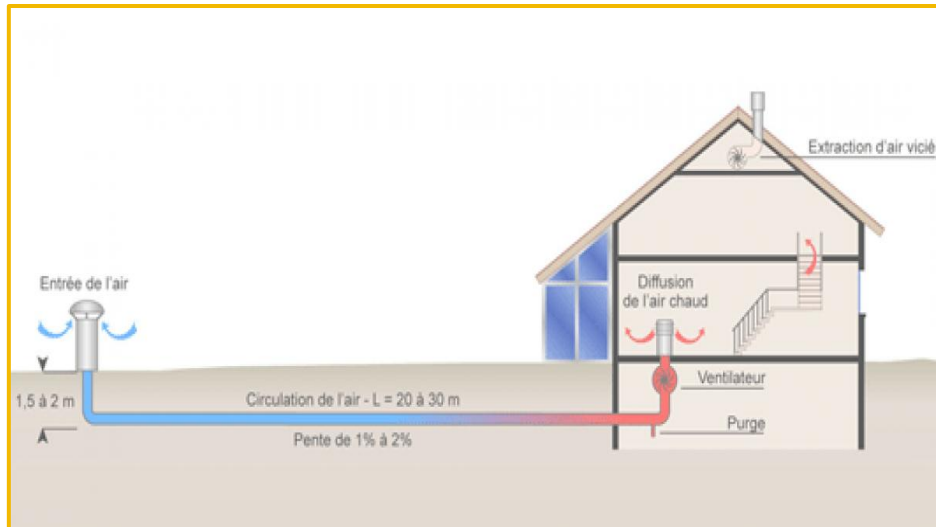


Fig I.5 : Schéma de la géothermie à basse énergie.



**Fig I.6 :** Schéma de la géothermie de très basse énergie.

#### I.1.4. L'énergie éolienne:

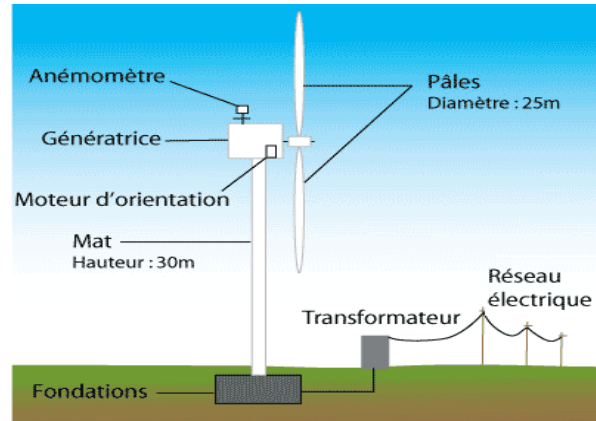
La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers.

À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. La machine se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales seront grandes, moins elles tourneront rapidement [5].





**Fig I.7 :** L'énergie éolienne



**Fig I.8 :** Fonctionnement de l'énergie éolienne

### I.1.5. L'énergie solaire:

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ( $\text{kWc/m}^2$ ) répartie sur tout le spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année.

La plupart des utilisations de l'énergie solaire sont directes, comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur  $1000 \text{ W/m}^2$  dans les zones tempérées et jusqu'à  $1400 \text{ W/m}^2$  lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau [6].

## I.2. Les énergies renouvelables en Algérie :

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie renouvelable devient de plus en plus une solution prometteuse avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés [7].

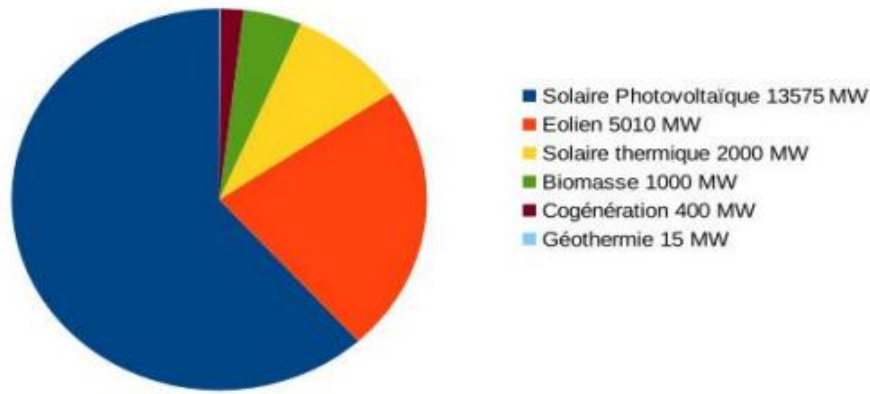
Dans ce propos l'Algérie l'un des pays de fort potentiel des énergies renouvelables, avec une capacité nationale d'électricité qui dépasse les 56.74 TWh avec 0.45 TWh crête seulement pour les énergies renouvelables (en 2012) [8],spécifiquement l'énergie solaire photovoltaïque, car l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara), et l'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> soit près de 3 KWh/m<sup>2</sup> au nord et dépasse 5,6 KWh/ m<sup>2</sup> au Grand Sud (TAMENRASSET) [8].

En effet, en dépit de la volonté exprimée dans les textes et l'ambitieuse stratégie tracée par les pouvoirs publics, les capacités réellement installées, entre 2010 et 2019, sont évaluées à environ 390 mégawatts (MW), soit à peine 1,8% des 22 000 MW constituant la capacité totale en énergies renouvelables à déployer à l'horizon 2030.

Une échéance qui se rapproche alors que le pays est très loin de concrétiser la création des 12 000 MW destinés à la consommation domestique – 7200 MW de solaire thermique, 2800 MW de solaire photovoltaïque et 2000 MW d'éolien – ainsi que 10 000 MW destinés à l'export.

L'Algérie s'engage donc avec une grande volonté sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions sérieuses et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile [9].

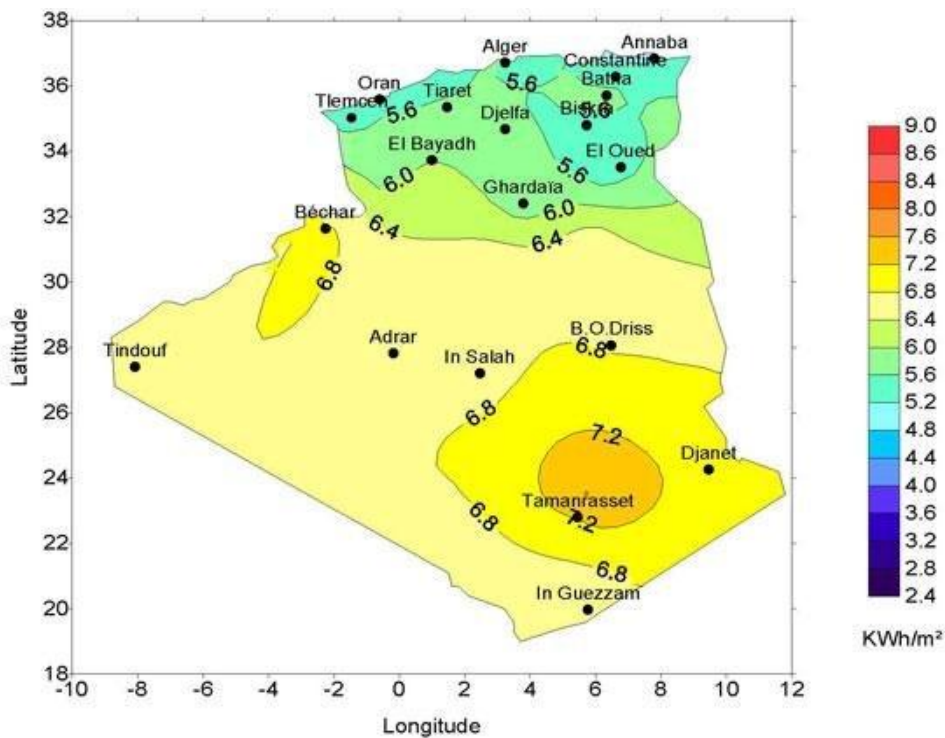
Ainsi, un programme très ambitieux est envisagé pour développer les énergies renouvelables durant la période 2015-2030, il consiste à installer une capacité totale de 22000 MW, et le solaire photovoltaïque sera la principale source de production d'énergie propre car il représenterait 62% de la capacité totale projetée à 2030 [9].



**Fig I.9 :** Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables.

**I.2.1. Potentiel solaire en Algérie:**

L'Algérie est l'un des pays qui dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen, où le rayonnement de la région près de la mer est influencé par les saisons. Les régions sahariennes reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une température de l'air plus élevée. En tenant compte de cette diversité, le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [10].



**Fig I.10 :** La carte d'éclairement solaire de l'Algérie.

### I.2.2. Les différentes technologies solaires:

Il existe trois façons d'utiliser directement l'énergie solaire :

La thermodynamique, la thermique et le photovoltaïque.

#### I.2.2.1. Solaire à concentration thermodynamique:

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit. Les miroirs qui collectent l'énergie solaire (placés à 3 ou 4 mètres du sol) forment une zone d'ombre sur le sol, cependant il arrive suffisamment de lumière pour éventuellement cultiver des fruits ou des légumes. Une partie de l'eau douce formée sur place par condensation en sortie de turbine, peut être utilisée pour l'arrosage (fig. I.11) [11].



Capteurs thermodynamique  
cylindro-paraboliques



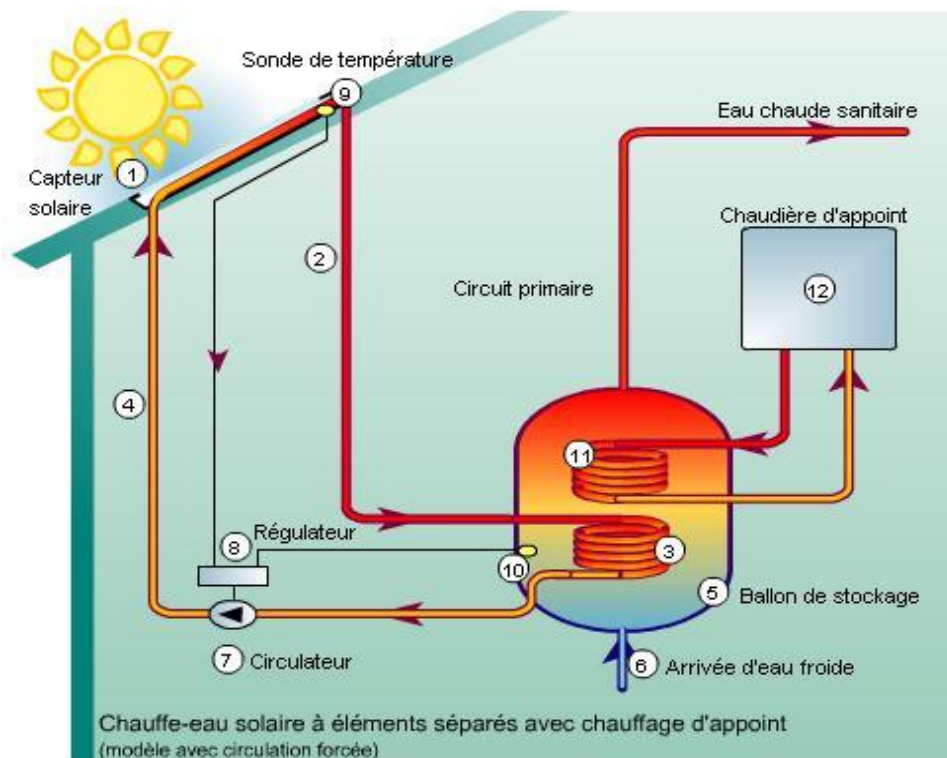
Capteurs thermodynamique paraboliques

**Fig I.11** : Deux exemples de modules à concentration thermodynamique.

#### I.2.2.2. Solaire thermique:

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil, (fig. I.12). Cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire.

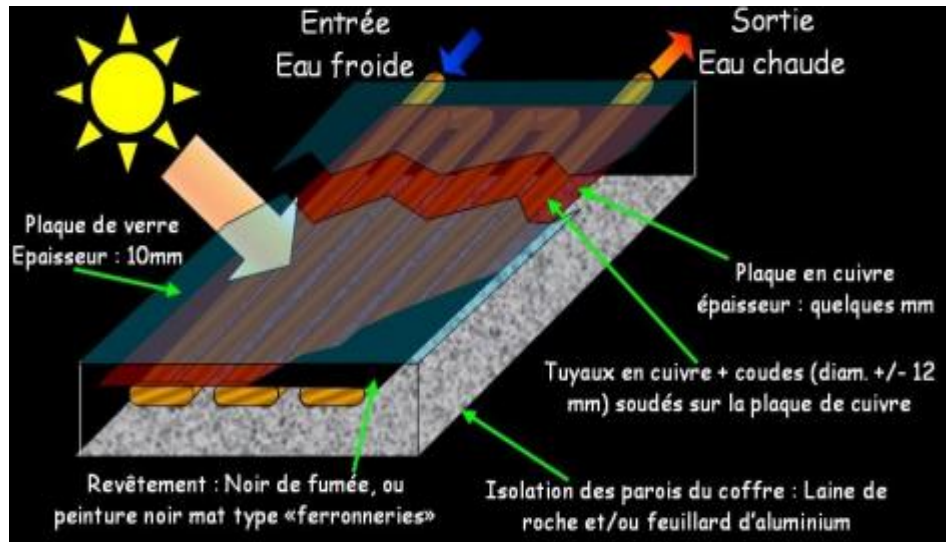
Par contre, si on veut générer de l'électricité, il faudra utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique générée en électricité (par exemple, moteurs à air chaud). L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou de l'eau sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétiques d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique [12].



**Fig I.12 :** Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.

La composition d'un panneau solaire thermique est montrée dans la figure I.13. Il est composé d'un corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant ; un système de refroidissement par le fluide caloporteur (transportant l'énergie) ; un isolant thermique situé sur les faces non exposées au rayonnement et une couverture transparente sur la face exposée, destinée à assurer l'effet de serre à l'intérieur du capteur.





**Fig I.13 :** Composition d'un panneau solaire thermique.

### I.2.2.3. Solaire photovoltaïque:

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité) [11,12].

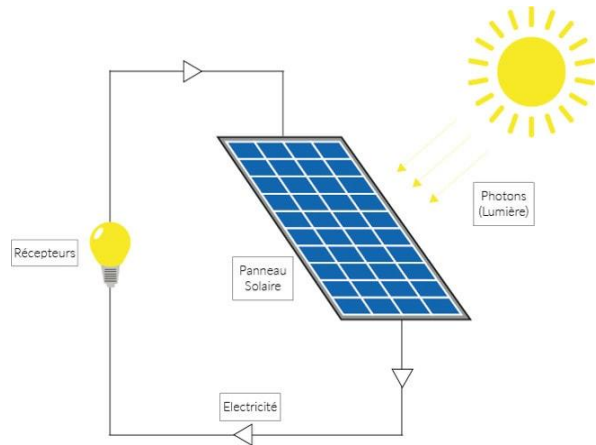
Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés": Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau.

L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [13].



**Fig I.14 :** Solaire photovoltaïque



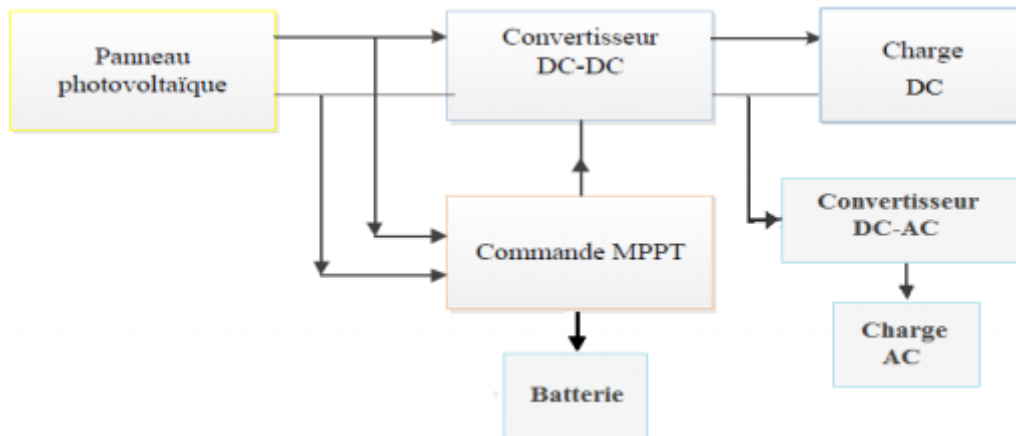
**Fig I.15 :** Fonctionnement de panneau solaire

### I.3. Les différents types des systèmes photovoltaïques:

Les systèmes photovoltaïques apparaissent comme une solution privilégiée pour la production d'électricité de faible ou moyenne puissance en site isolé et particulièrement pour les habitations. Ce système PV se compose de plusieurs éléments principalement les modules PV qui représentent le champ de captage des rayons solaires ; les batteries qui constituent le champ de stockage c'est là où nous stockons de l'énergie produite par les modules ; le régulateur qui protège la batterie contre la surcharge ainsi il règle la valeur de la tension nominale ; l'onduleur qui assure la conversion du courant continu en courant alternatif dont les utilisateurs ont besoin ; le câblage qui relie les différents composants du système entre eux [14].

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants :

- Un générateur photovoltaïque.
- Un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- Un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- Un système de régulation et de stockage.



**Fig I.16 :** Représentation des différents composants d'une installation PV.

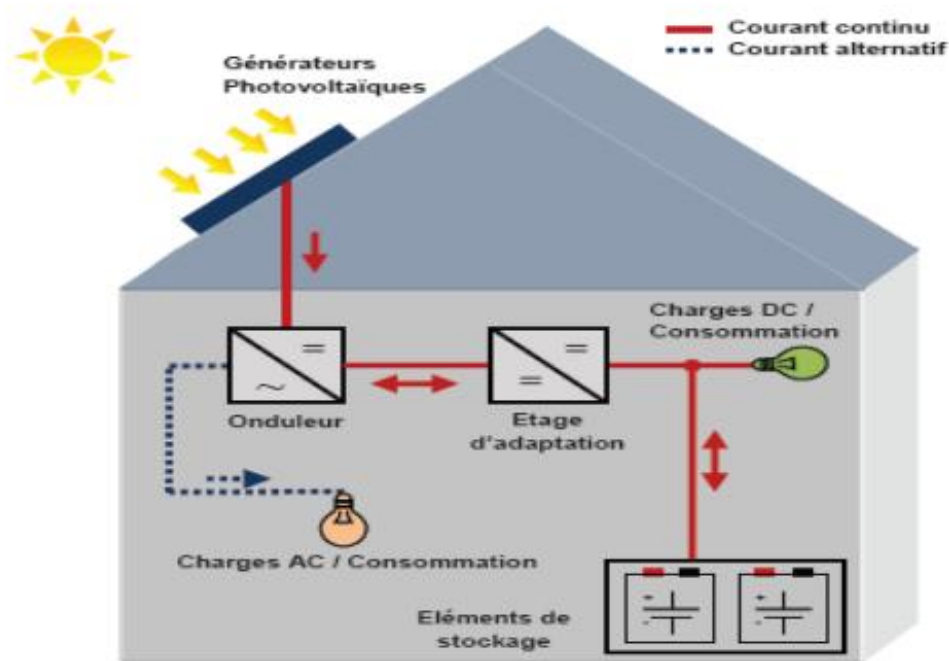
### **I.3.1. Alimentations électriques faibles puissances:**

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

### **I.3.2. Installations électriques photovoltaïques autonomes:**

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie, qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Comme l'indique la figure I.17 représentant un exemple de système PV autonome, la présence d'éléments de stockage est obligatoire pour assurer la fourniture à l'utilisateur continuellement et même en cas d'absence potentielle de la production d'électricité [15].





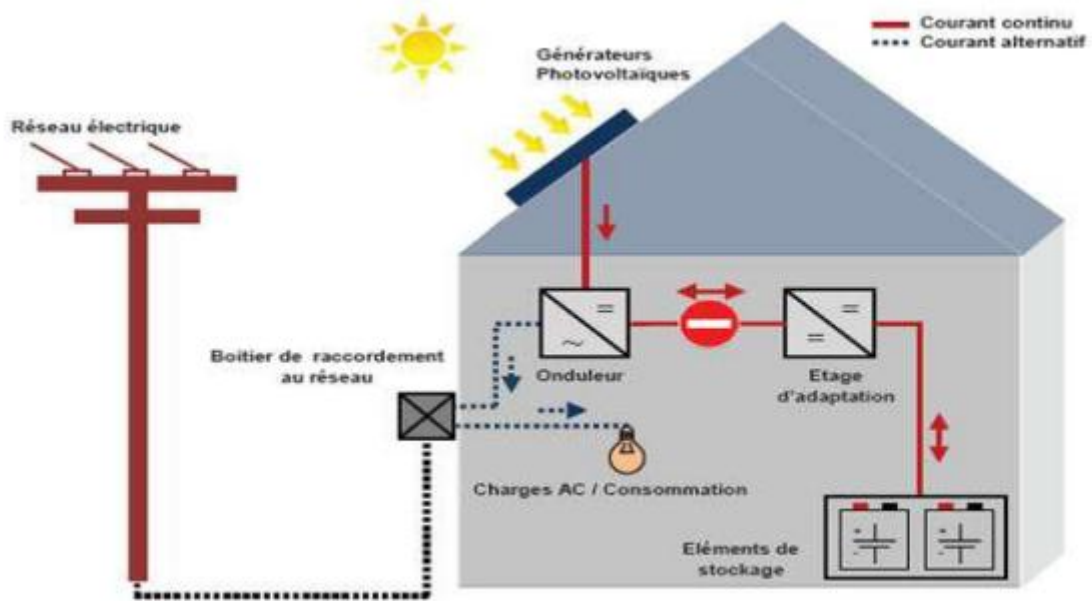
**Fig I.17 :** Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits.

### **I.3.3. Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau:**

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur continu/alternatif (DC/AC). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil [15].

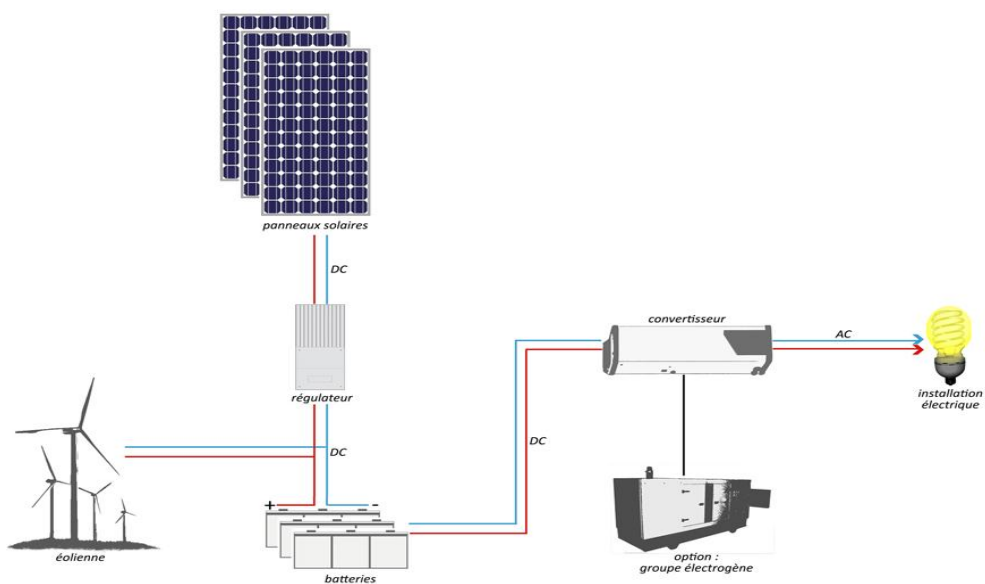
La figure I.18 représente un système PV connecté au réseau.



**Fig I.18 :** Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau.

**I.3.4. Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride:**

Il s'agit des systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes, telle une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération, en plus un générateur photovoltaïque. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise [16].



**Fig I.19 :** Schéma d'une installation du système hybride.

## **I.4. Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque :**

L'un des principaux inconvénients de l'énergie solaire est sa nature intermittente. Pour une utilisation permanente, il est nécessaire de stocker l'énergie produite. Pour ce faire, il existe de nombreuses méthodes de stockage : sous forme d'eau, d'hydrogène, dans le volant d'inertie, dans la batterie électrochimique (plomb, lithium) ou dans le super-condensateur [17].

Ces unités de stockage sont des éléments indispensables dans les systèmes en site isolé. Correctement dimensionnées, elles participent en effet à garantir l'autonomie du site, en constituant une réserve d'énergie lorsque les sources produisent en excédent, et en la restituant lorsqu'elles ne produisent momentanément plus assez [18].

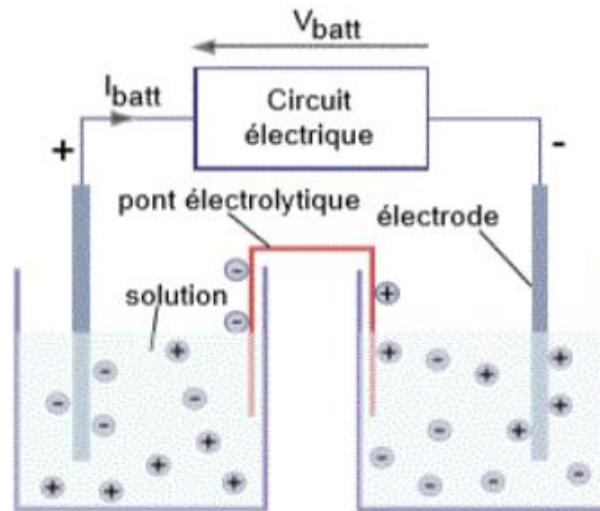
Le stockage contribue à stabiliser l'offre et la demande, à améliorer les conditions d'utilisation des réseaux de transport et de distribution, ainsi qu'à accroître le rendement de certaines unités de production à puissance nominale, tout en réduisant les émissions polluantes.

### **I.4.1 Les batteries:**

Les batteries sont la solution la plus utilisée pour le stockage électrochimique de petites dimensions. Offrant des technologies matures et abordables, elles effectuent des réactions d'oxydation selon le principe de la pile pour stocker de l'énergie électrique à la charge, qui peut être renvoyée à décharger avec un bon rendement, environ 85% selon les types d'accumulateurs. Elles consistent en deux électrodes, l'anode et la cathode, plongées chacune dans une solution ionique, comme représenté figure. Sous l'effet d'un courant de charge, une oxydation se produit au niveau des molécules de la cathode, qui perdent alors des électrons. Ceux-ci sont envoyés dans le circuit électrique, créant ainsi le courant en question.

À l'anode, les électrons arrivent ensuite pour générer une réduction sur les molécules qui la composent. Les ions qui résultent de ces deux demi-équations se retrouvent ainsi dans les solutions ioniques respectives des électrodes. Celles-ci sont séparées par un électrolyte, une solution ionique non réactive. Selon les besoins, ces ions positifs et négatifs migrent respectivement vers la solution de l'anode et de la cathode, permettant de rendre les deux solutions électriquement neutres.

À la décharge, les réactions d'oxydation et de réduction inverses se produisent sous l'effet du courant inverse qui fait cette fois migrer les électrons de l'anode à la cathode. Les concentrations d'ions diminuent dans les solutions au fur et à mesure que les électrodes se reconstruisent, et l'électrolyte se reconstitue en conséquence. Plusieurs technologies ont au cours du dernier siècle été développées selon ce principe : accumulateurs au plomb, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique et au lithium.



**Fig I.20 :** Schéma de principe de la batterie.

#### I.4.2. Les super-condensateurs :

Ils représentent des solutions alternatives ou complémentaires pour batteries depuis 20 ans. Les supercondensateurs sont des condensateurs de très grande capacité. Selon le même principe que les batteries, le supercondensateur consiste en un électrolyte qui sépare deux électrodes conçues dans un matériau poreux, tel que du charbon actif, pour doubler la surface spécifiée. Chacun est connecté à un collecteur électronique chargé de le faire passer de l'un à l'autre dans le circuit, en fonction du courant de charge ou de décharge.

Face au déficit d'électrons dans une des électrodes et de l'excédent dans l'autre, les ions respectivement négatifs et positifs de l'électrolyte viennent s'agglomérer contre l'électrode de charge complémentaire, formant ainsi une double couche en équilibre statique à chaque électrode, mais avec une différence de potentiel au sein de l'électrolyte. La charge est complète quand l'électrolyte a atteint son potentiel de dissociation ; la surface des électrodes doit donc être suffisamment vaste pour accueillir suffisamment d'ions pour atteindre cet état, et ainsi maximiser la capacité du composant. Ce principe est récapitulé dans la figure I.21.

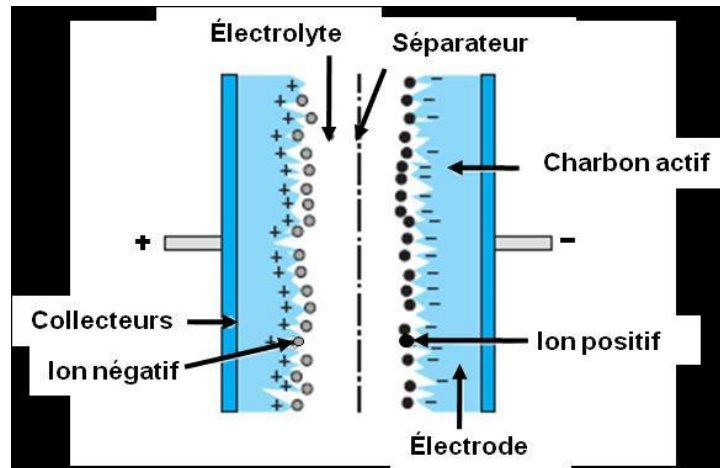


Fig I.21 : Schéma de principe des supercondensateurs.

#### I.4.3. Les piles à combustible:

La pile à combustible est annoncée comme étant une solution de stockage pour le futur. Elle permet de stocker un combustible, et de le faire réagir comme réducteur avec du dihydrogène dans une oxydoréduction, suivant le même mécanisme que la batterie. Notamment, le dihydrogène peut être utilisé comme réducteur, produisant en réaction avec le dioxygène de l'eau. Il peut être produit à partir du méthane, ou par électrolyse de l'eau en rejetant du dioxygène, ce qui en fait dans ce cas une source d'énergie parfaitement propre (fig.I.22). Une pile à combustible utilisant du dihydrogène contient des cathodes poreuses, souvent en graphite, imprégnés de platine, catalyseur nécessaire à l'oxydation de celui-ci. Utilisables dans des systèmes de petite et moyenne puissance, allant des alimentations en site isolé aux véhicules électriques, les piles à combustibles ont selon la technologie utilisée un rendement allant de 30 à 60%, et une énergie spécifique autour de 30 kWh/kg.

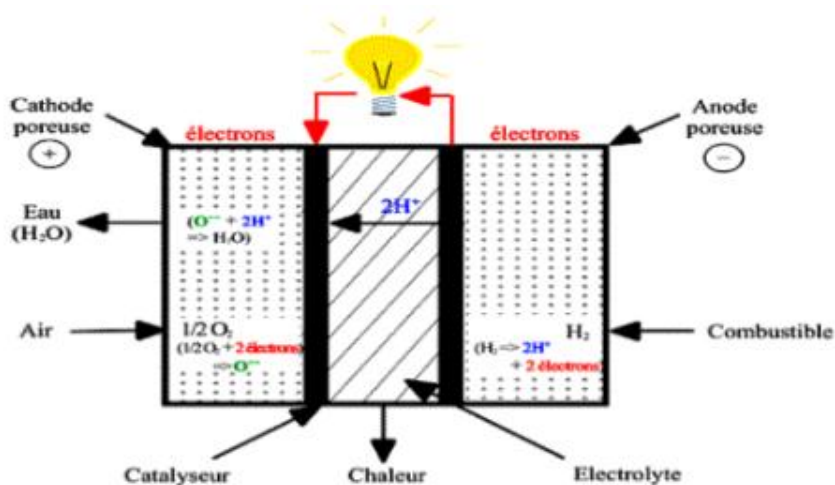


Fig I.22 : Schéma de principe de la pile à combustible.

**I.4.4. Les volants d'inertie:**

Le dernier type de stockage considéré est le volant d'inertie, dont le principe existe depuis plusieurs milliers d'années. Un volant d'inertie est un cylindre massif monté à l'extrémité d'une machine tournante. Lorsque de l'énergie provenant du circuit électrique doit être stockée, la machine en mode moteur fait tourner le volant, l'emmagasinant ainsi sous forme d'énergie cinétique. Si de l'énergie doit être restituée, la machine se met en mode génératrice pour produire un courant générateur en freinant le volant.

Ce dernier peut être de différents rayons et épaisseurs, selon l'inertie  $J_{vi}$ , et donc l'énergie et la puissance maximales souhaitées. Propre, d'une bonne puissance spécifique et d'un rendement de l'ordre de 80%, cette solution possède une énergie spécifique de seulement quelques dizaines de Wh/kg pour une puissance spécifique de plusieurs kW/kg, ce qui la rend adaptée aux mêmes usages que les supercondensateurs.

L'inconvénient de cette technologie réside dans la dangerosité d'un volant tournant à pleine vitesse. Bien que réclamant peu d'entretien, il nécessite une conception adaptée à la protection des personnes et est encombrant, ce qui n'est pas forcément viable dans le cas un système de puissance destiné à un particulier [18,19].

**I.4.5. Stockage hybride:**

L'hybridation implique la connexion de nombreuses sources d'énergie et unités de stockage au sein du même système pour améliorer la production et la gestion de l'énergie. La notion de stockage hybride a pris de l'ampleur avec l'arrivée des voitures électriques dans le secteur de l'automobile. En effet, les variations brutales d'énergie (puissances crêtes importantes par rapport à la puissance moyenne) conduisent à des pertes accrues et à des surdimensionnements coûteux des systèmes de conversion et au final à un mauvais bilan énergétique.

Un dispositif de stockage intermédiaire permet de mieux gérer l'énergie et de réduire les effets néfastes des pics de consommation ou de production.

## **I.5. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque:**

### **I.5.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque:**

- L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages:
- 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.

### **I.5.2. 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'atténuer, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [20].

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a présenté les bases indispensables à la compréhension des énergies renouvelables et photovoltaïques. On a rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, les différentes technologies solaires et les types de stockage utilisés dans ce domaine.

# *Chapitre II:*

## *Modélisation d'une cellule photovoltaïque*



## **Introduction :**

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque et s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs.

### **II.1. La cellule PV:**

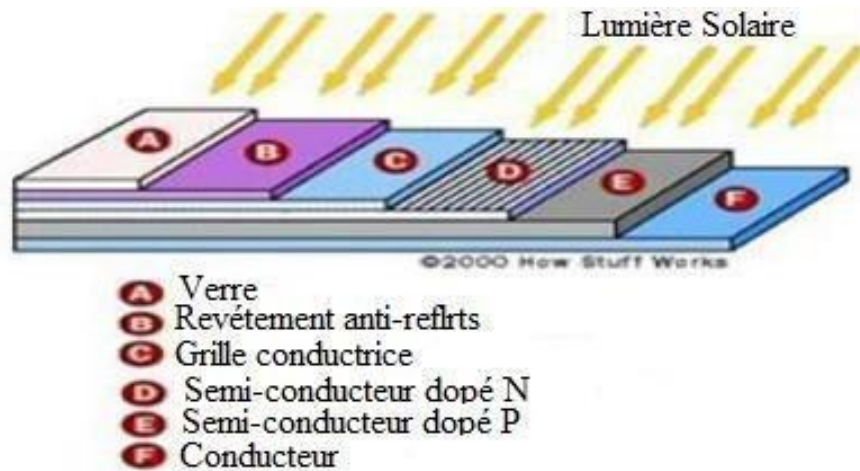
Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants : Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ; Conversion de l'énergie 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 créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N.

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 II.1 représente la structure basique d'une cellule solaire [21].



**Fig II.1** : Structure basique d'une cellule solaire.

## II.2. Types des cellules photovoltaïques:

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques:

### II.2.1. Le silicium:

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinguant d'une part la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Le silicium a deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multicristallin [22,23].

#### II.2.1.1. Le silicium mono-cristallin:

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme (fig II.2), intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque.

Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multicristallin.



**Fig II.2 :** Cellule monocristalline.

**Avantage :**

-Très bon rendement (12 à 20%).

**Inconvénients :**

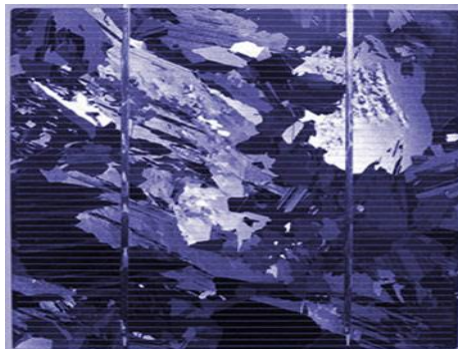
-Coût élevé.

-Rendement faible sous un faible éclaircissement.

**II.2.1.2. Le silicium multicristallin (Polycristallin):**

Le silicium multicristallin (Polycristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée (fig II.3). À elle seule elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène.

Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles.



**Fig II.3 :** Cellule multicristalline.

**Avantages :**

- Bon rendement (11 à 15%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin. -Moins cher que le monocristallin.

**Inconvénient :**

-Les mêmes que le monocristallin.

**II.2.1.3. Les couches minces:**

La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe ( $S_{ia}$ ) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est l'utilisation de substrats à bas coût.

Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples et ainsi de fabriquer des cellules souples.

Son prix est plus faible que les cellules cristallines ; en revanche, le rendement d'une cellule en  $S_{ia}$  est inférieur à celui des cellules cristallines, il est d'environ 7%. L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau.



**Figure II.4 :** Les couches minces (cellule au Silicium amorphe).

Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations du rayonnement direct. Ces cellules sont donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères. D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19%.

Malgré les potentialités de ces trois technologies, les problèmes de toxicité sur l'environnement et d'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent les cloisonneront au laboratoire ou à des applications très spécifiques [24].

Type de cellule	Rendement en Laboratoire	Rendement de Production
Silicium amorphe (a-si)	13%	5 – 6%
Silicium monocristallin (m-si)	24.7%	13 – 17%
Silicium poly cristallin (p- si)	19.8%	11 – 15%

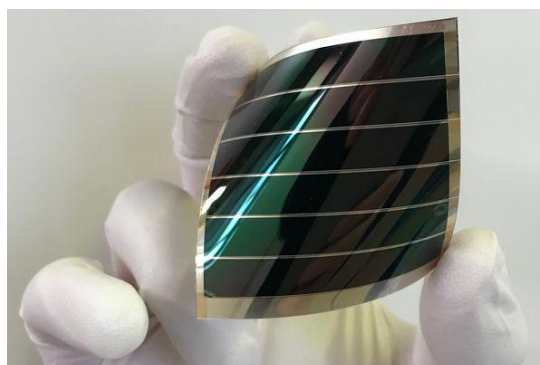
**Tableau.1** : Tableau représentant le rendement de chaque type de cellule.

#### II.2.1.4. Cellules organiques et plastiques:

Observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques, l'effet photovoltaïque a connu cette dernière décennie un grand essor. Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, conformément aux prédictions de Merritt en 1978, la cellule composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ».

Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures).

La figure II.5 présente une cellule solaire tout organique sur substrat souple:



**Fig II.5** : Cellule solaire tout organique sur substrat souple.

L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposées sur de grande surface, à grande vitesse, par des techniques d'impression classiques. Elles ouvrent également la voie aux applications légères, nomades et souples. Enfin, grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes.

### II.3. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque:

Lorsqu'une cellule photovoltaïque est soumise à une source de lumière, les photons vont bombarder les électrons de la zone N et cela pour libérer les électrons de leurs orbites, il y aura donc création des paires électron-trou. Cette opération va permettre à la zone N d'avoir une charge négative tandis que la zone P va se charger positivement donc il y'aura création d'une différence de potentielle. Lorsque'on branche une charge à la cellule, les électrons vont se diffuser de la zone N vers P en traversant ainsi la charge. L'effet de champ électrique interne de la zone de charge d'espace va permettre aux électrons de passer de la zone P vers N et cela pour maintenir la différence de potentielle de la cellule solaire (circulation d'électron dans la charge).

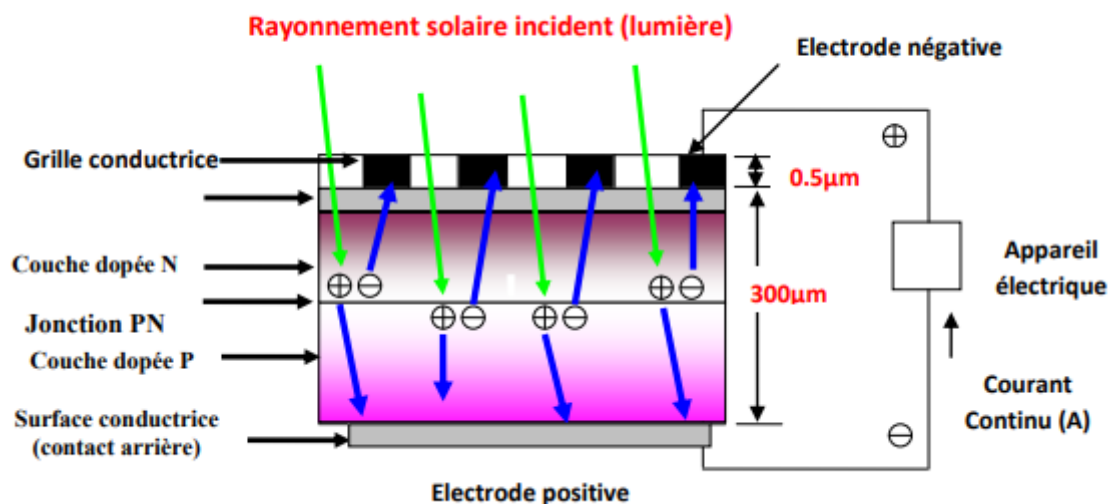
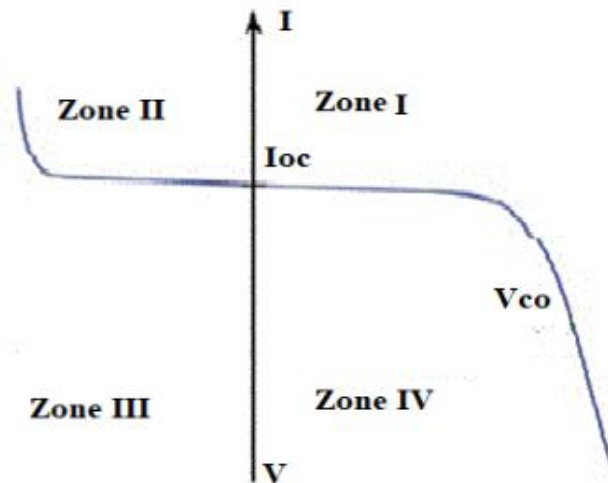


Fig II.6 : Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

## II.4. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque:

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique  $I(V)$  non linéaire (Fig II.7). La caractéristique d'une cellule photovoltaïque balaie 3 quadrants sur les 4 existants. 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.



**Fig II.7 :** Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.

## II.5. Modélisation d'une cellule photovoltaïque:

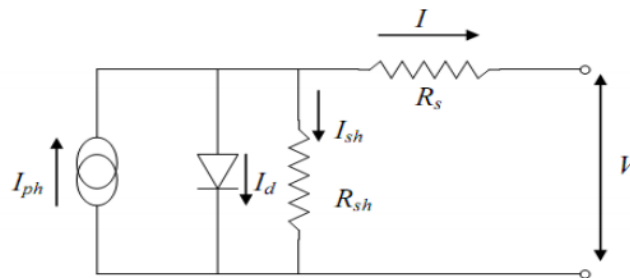
La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque.

### II.5.1. Modèle à une diode:

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode établi par Schottky pour une seule cellule PV. Il est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle.

Une description plus simple est obtenue à partir du modèle à une exponentielle. Ce modèle comporte une diode de moins par rapport au modèle à deux exponentielles, ce qui implique que ce modèle comporte dans l'équation de la caractéristique courant-tension une exponentielle de moins [25,26].



**Fig II.8 :** Modèle de la cellule PV à une diode.

L'équation de la caractéristique est alors :

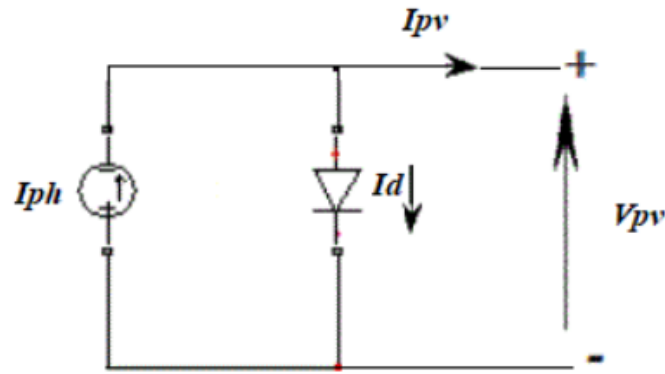
$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + R_s I)}{A.K.T_j} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.1})$$

#### II.5.1.1. Modèle à trois paramètres:

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  (équation II-2) proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV. Il est connu aussi sous le nom L3P (Lumped, 1 Mechanism model with 3Parameters). Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode [27,28].

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté figure II.9.





**Fig II.9 :** Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P.

Dans le cas de cellules solaires au silicium monocristallin, on considère l'hypothèse d'une cellule idéale. Le facteur d'idéalité est alors considéré comme égal à l'unité. L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.2})$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_s \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

Où :  $I_{ph}$  est le photo-courant,  $I_s$  est le courant de saturation inverse de la diode. Le courant débité est équivalent à :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t n}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.4})$$

Où:  $V_t = \frac{KT_c}{q}$  est la potentielle thermodynamique,  $T_c$  est la température absolue (K),  $q$  est la constante de charge d'électron(C),  $K$  est la constante de Boltzmann  $1.38 \cdot 10^{-23}$  (j/k),  $n$  est le facteur d'idéalité de la diode.

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression [29-30] :

$$I_s = I_{sref} \left( \frac{T_c}{T_{cref}} \right)^3 \exp\left( \left( \frac{\alpha}{n.K} \right) \left( \frac{1}{T_{cref}} \right) - \left( \frac{1}{T_c} \right) \right) \quad (\text{II.5})$$

Où:

$I_{sref}$  est le courant de saturation inverse de la diode en condition référence,  $T$ ,  $T_{ref}$  est la température de cellule, réelle et à la condition de référence.

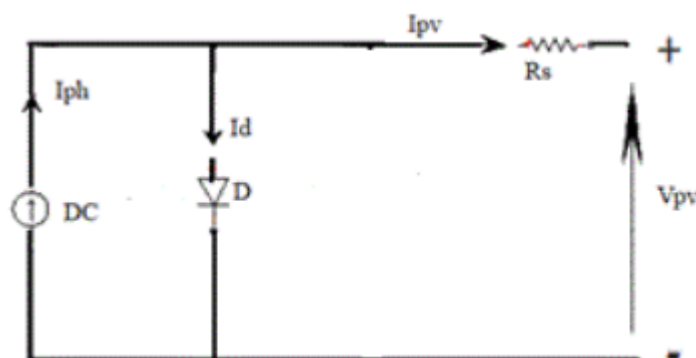
Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans les conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte des pertes de tension, courant de fuite...). Il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque [29].

### II.5.1.2. Modèle à quatre paramètres (L4P):

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé (Lumped, Mechanism, 4 Parameters); il a été étudié par Townsend [30]. Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendant de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série. Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique  $I(V)$  sont le courants photonique  $I_{ph}$ , la résistance série et deux caractéristiques de la diode  $I_d$  et  $n$ .

Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes d'équations  $I(V)$  pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants) [31].

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté sur la figure II.10.



**Fig II.10 :** Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L4P.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante:

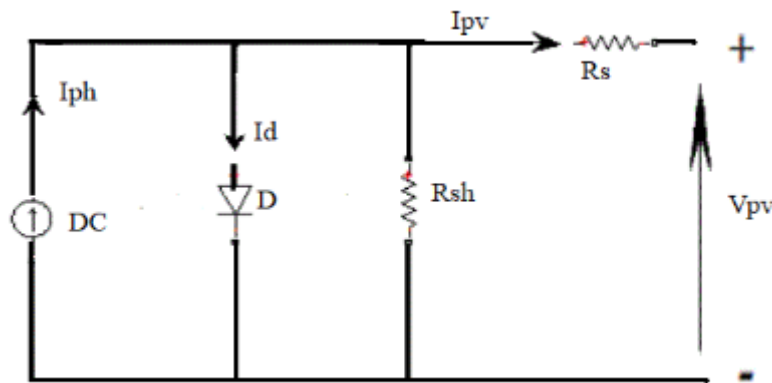
$$I_{PV} = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_{t,n}} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

### II.5.1.3. Modèle à cinq paramètres (L5P):

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la figure II.11 qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt  $R_{sh}$  et une résistance série  $R_s$ . Il est connu sous le nom L5P (Lumped, Mechanism, 5 Parameters) [32].

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.7})$$



**Fig II.11** : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

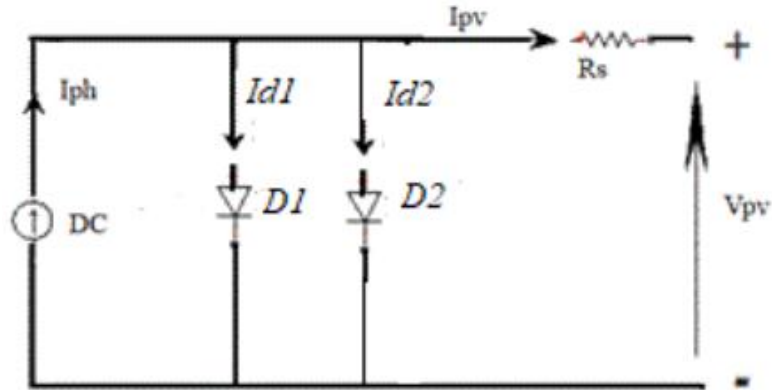
$$I_{PV} = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_{t,n}} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.8})$$

## II.5.2. Modèle à deux diodes:

### II.5.2.1. Modèle à six paramètres (2M6P):

Si la résistance shunt est considérée infinie ( $R_{sh} = \infty$ ), le nombre de paramètres à déterminer devient de 6 et le nom du modèle dans ce cas est 2M6P (Lumped, 2 Mechanism model with 6 Parameters).

Cette simplification est justifiée par le fait que la résistance shunt est d'habitude beaucoup plus grande que les autres résistances donc le courant qui la traverse est négligeable. La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la figure II.12.



**Fig II.12 :** Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (\text{II.9})$$

Où:

$I_{d2}$ : courant de diode 2

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{s1} \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.10})$$

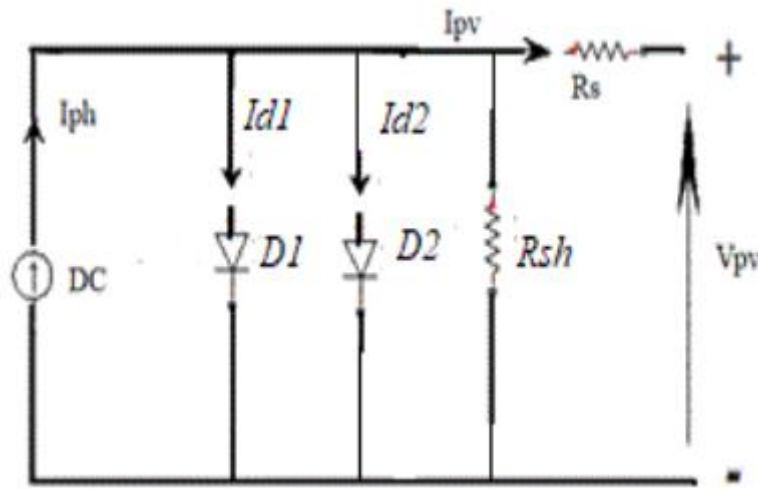
### II.5.2.2. Modèle à sept paramètres (2M7P):

Il est connu aussi par le nom 2M7P. Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous (fig II.13). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$  et les facteurs de diode  $n_1$ ,  $n_2$  et une source de courant produisant un photo-courant  $I_{ph}$ , qui dépend de l'éclairement solaire [33].

La résistance série  $R_s$  rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur-métal. Sa valeur est déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique  $I(V)$  pour une tension  $V$  égale à  $V_{co}$ . Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.

Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semi-conducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

La résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit  $R_{sh}$  traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible [34].



**Fig II.13 :** Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (\text{II.11})$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation [35]:

$$I_{d1} = I_{s1} \left( \exp\left(\frac{V_d}{n_1 v_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.12})$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left( \exp\left(\frac{V_d}{n_2 v_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.13})$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.14})$$

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{s1} \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n_2} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.15})$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left( I_{phref} - \mu_{cc} (T_c - T_{cref}) \right) \quad (\text{II.16})$$

Où:  $I_{phref}$  est le courant photonique sous condition de référence [A],  $\mu_{cc}$  est le coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K],  $G$ ,  $G_{ref}$  sont les éclairagements réel et à la condition de référence [W/m<sup>2</sup>]. Les courants de saturation  $I_{s1}$  et  $I_{s2}$  sont donnés par les relations suivantes:

$$I_{s1} = C_{s1} \cdot T_c^3 \cdot \exp \left( \frac{-E_{gap} \cdot q}{n_1 \cdot T \cdot K} \right) \quad (\text{II.17})$$

$$I_{s2} = C_{s2} \cdot T_c^{\frac{3}{2}} \cdot \exp \left( \frac{-E_{gap} \cdot q}{n_2 \cdot T \cdot K} \right) \quad (\text{II.18})$$

Les constantes  $C_{s1}$  et  $C_{s2}$  sont généralement comprises respectivement entre 150 –180 A.K<sup>-3</sup> et 1,3 -1,7 × 10<sup>-2</sup> A.K<sup>-5/2</sup> pour une cellule de 100 cm<sup>2</sup>.

$E_{gap}$ : énergie de gap (silicium cristallin = 1,12 eV; silicium amorphe = 1,7 eV; CIS = 1,03 eV; CdTe = 1,5 eV).

## II.6. 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 suivants:

### II.6.1. 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.

**II.6.2. 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.

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \text{Log} \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{II.19})$$

Où:  $T_c$  est la température absolue (K),  $\frac{KT_c}{q}$  le potentiel thermodynamique (K),  $q$  la constante de la charge d'électron  $1.602 \cdot 10^{-23}$  C,  $I_s$  le courant de saturation (A),  $I_{ph}$  est le courant photonique (A),  $k$  est la constante de Boltzmann  $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K.

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement (fig.II.14).

-Régime des faibles flux lumineux :

Dans ce cas,  $I_{ph} \ll I_s$ , ce qui permet d'écrire :

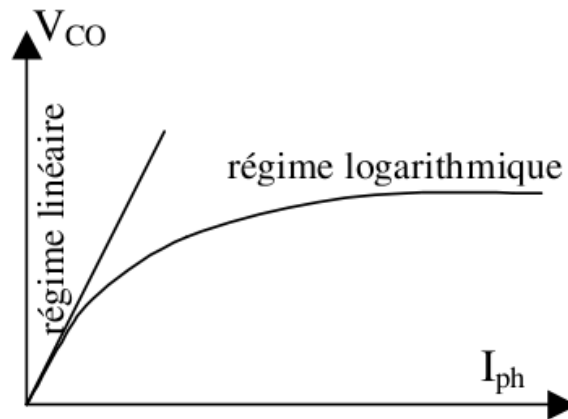
$$\text{Log} \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) = \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{II.20})$$

D'où :

$$V_{co} \approx \frac{KT_c}{q} \cdot \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{II.21})$$

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

C'est le domaine du comportement logarithmique.



**Fig II.14 :** Différents régimes selon la puissance d'éclairement.

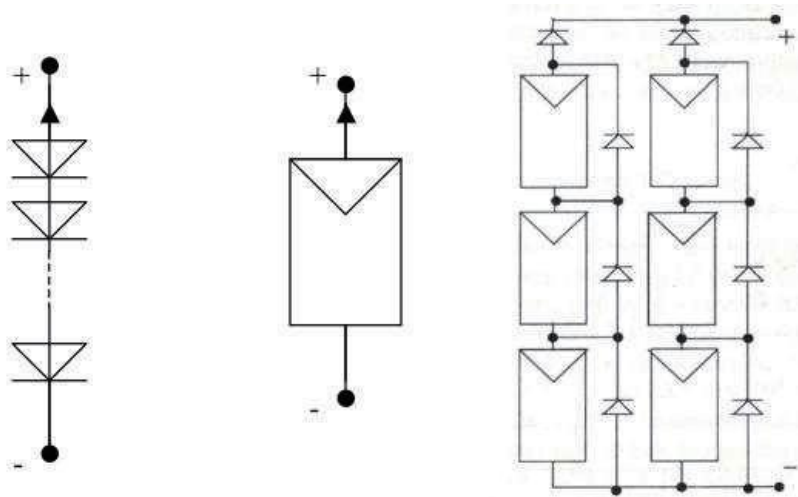
Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log de  $I_{ph}$ , donc avec le log de l'illumination.

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.

### II.7. Association des cellules photovoltaïques :

Dans les conditions d'ensoleillement standard (1000 W/m<sup>2</sup> ; 25°C ; AM 1,5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm<sup>2</sup> est d'environ 2,3 Wc sous une tension de 0,5 V. Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur photovoltaïque de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plus part des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et /ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires [36].



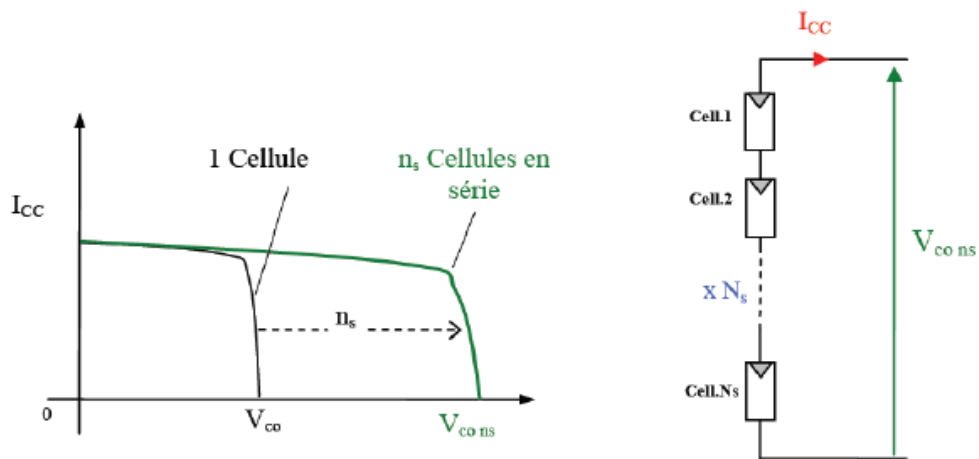


**Fig II.15 :** Cellule, module et panneau photovoltaïque (protection par diode by-pass).

**II.7.1. Association 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 résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure II.16. L'équation (II.22) résume les caractéristiques électriques d'une association série de  $n_s$  cellules.

$$V_{oc\ ns} = n_s * V_{co} \text{ et } I_{cc} = I_{cc\ ns} \text{ (II.22)}$$



**Fig II.16 :** Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $n_s$  cellules en série.

Les expressions de la tension ( $T_{\text{mod}}$ ) et du courant ( $I_{\text{mod}}$ ) du module sont :

$$V_{\text{mod}} = \sum V_{\text{cel}} \quad (\text{II.23})$$

$$I_{\text{mod}} = \sum I_{\text{cel}} \quad (\text{II.24})$$

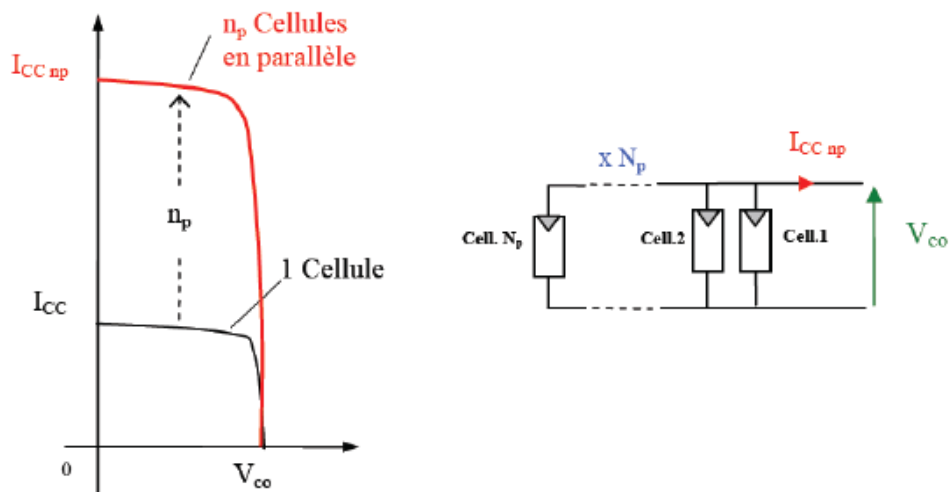
Où :  $V_{\text{cel}}$  et  $I_{\text{cel}}$  sont respectivement la tension et le courant d'une cellule PV.

### II.7.2. Association en parallèle :

Une association parallèle de  $n_p$  cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé.

Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants, figure (II.17). L'équation (II.25) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $n_p$  cellules.

$$\text{Avec : } I_{sc\ np} = n_p * I_{sc} \text{ et } V_{oc\ np} = V_{oc} \quad (\text{II.25})$$



**Fig II.17 :** Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle  $n_p$  cellules identiques [36].

### II.7.3. Association hybride (série-parallèle) :

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, voir figure (II.18), les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations (II.26) et (II.27) :

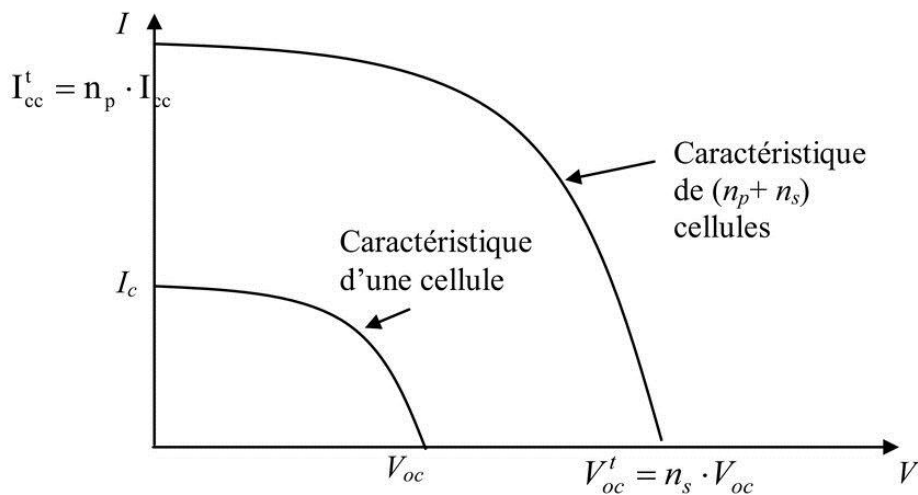
$$I_{cc}^t = n_p \times I_{cc} \quad (\text{II.26})$$

$$V_{oc}^t = n_s \times V_{oc} \quad (\text{II.27})$$

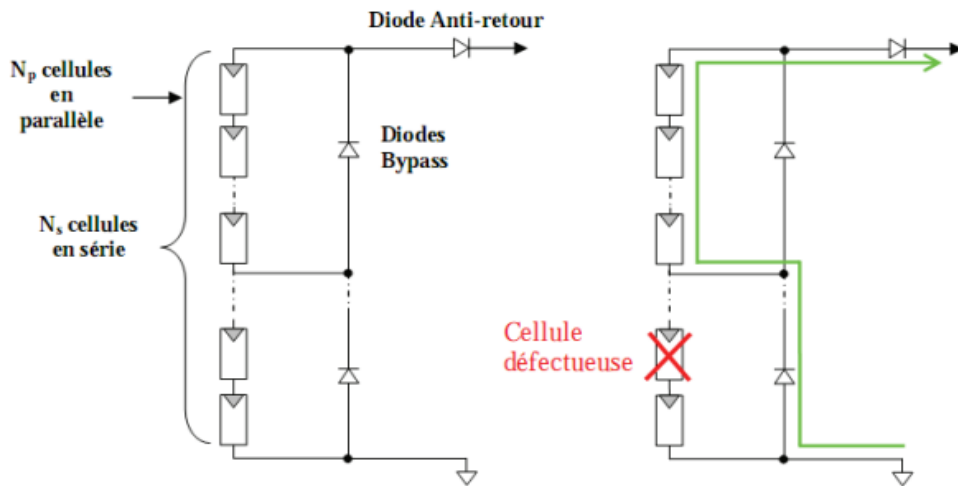
Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, en une série pour éviter les courants inverses et en parallèle, dit diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de protection associée.

La diode by-pass, lorsqu'elle se met à fonctionner, court-circuite alors une partie du panneau comme indique la figure (II.18), évitant ainsi la circulation de courants inverses au sein des cellules défectueuses. La dégradation d'une seule cellule condamne donc le groupe de cellules associées à la cellule défectueuse et protégée par la diode by-pass à ne pas produire de puissance.

Ce phénomène de perte partielle de puissance est à comparer à la perte totale d'un panneau entier en cas de problème sur une cellule avec un panneau fonctionnant sans protection [36].



**Fig II.18 :** Caractéristique résultante d'un groupement hybride de cellules identiques.



**Fig II.19** : a)- Architecture classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protection. b)- Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass et mise en évidence du courant de circulation IPV.

### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la cellule photovoltaïque. Ensuite les différents types de cellules photovoltaïques, ainsi que les différents modèles de cellule photovoltaïque. Enfin, nous avons présenté les paramètres d'une cellule photovoltaïque.

# ***Chapitre III :***

## ***Le système photovoltaïque***

## Introduction :

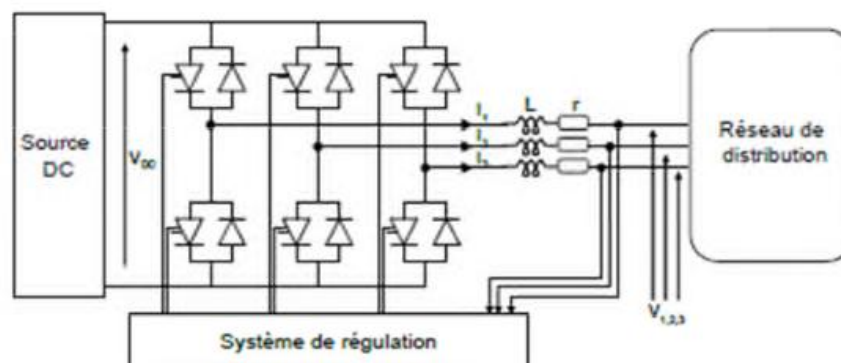
L'interface de la liaison au réseau est constituée d'un bus continu, d'un convertisseur triphasé et d'un filtre d'entrée de nature (RL). Cette interface permettra de fonctionner comme une source de courant liée au réseau électrique.

### III.1 Contrôle de la liaison Onduleur-réseau électrique :

L'objectif du convertisseur est d'assurer le bon fonctionnement des convertisseurs en régulant la tension du bus continu à une valeur suffisamment élevée. Le contrôle de cette tension se fait en jouant sur la puissance active transmise au réseau.

#### III.1.1 Présentation de la structure du système côté Onduleur- réseau :

La figure ci- dessous représente la structure de l'onduleur triphasé connecté au réseau électrique :



**Fig III.1 :** Schéma de structure d'un onduleur de tension triphasé connecté au réseau [37].

#### III.1.2 Etude de la partie contrôle de la structure proposée :

##### III.1.3 Onduleur de tension :

La figure (III.2) présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras d'interrupteurs de courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT). Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire [38] d'un condensateur  $C_{dc}$  de tension  $V_{dc}$ .

Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (R,L) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau.

En pratique, la commande des deux semi-conducteurs d'un même bras se fait de manière complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre.

Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Avec l'hypothèse de commutation instantanée. Par conséquent, le condensateur ne risque aucun court-circuit.

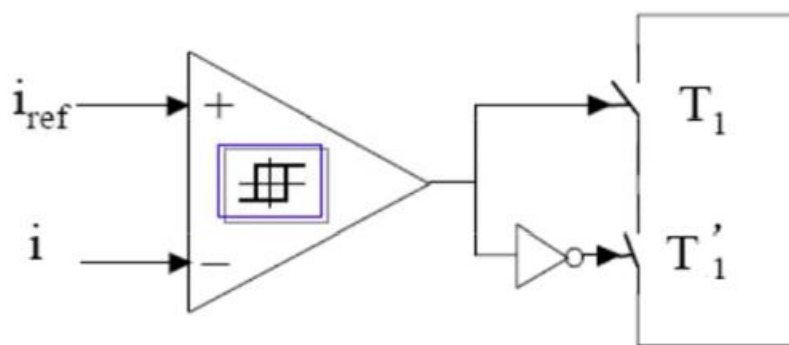
### III.1.3.1 Différentes commandes de l'onduleur:

Deux stratégies de commande de l'onduleur de tension sont principalement mises en œuvre : la commande par MLI et la commande par hystérésis [38]. La commande par hystérésis, elle peut être à bande fixe, à bande variable ou bien encore dite « modulée ».

### III.1.3.2 Contrôle des courants par hystérésis classique:

Le principe du contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence [37]. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation.

La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur. La figure ci-dessous présente le schéma de contrôle.

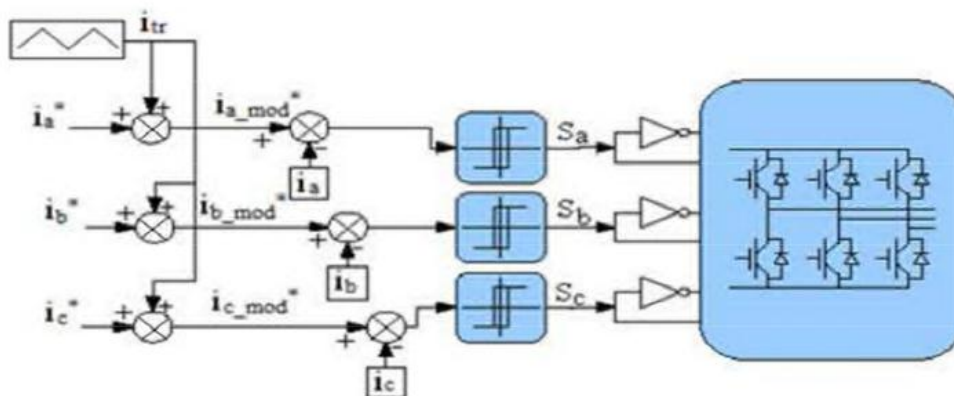


**FigIII.2** : contrôle du courant par hystérésis classique [37].

La simplicité de la mise en œuvre de cette stratégie est son avantage, tandis que la fréquence de commutation variable peut être son inconvénient. Celui-ci peut être remédié par une version de contrôle par hystérésis avec une fréquence de commutation fixe (hystérésis modulée).

### III.1.3.3 Contrôle des courants par hystérésis modulée:

La commande par hystérésis modulée a pour objectif de résoudre l'inconvénient majeur de la commande par hystérésis conventionnelle en fixant la fréquence de commutation des semi-conducteurs. Cette commande consiste à ajouter aux signaux ( $i_a^*$ ,  $i_b^*$ ,  $i_c^*$ ) un signal triangulaire  $I_{tr}$ , de fréquence  $F_{tr}$  et d'amplitude  $A_{tr}$ . La fréquence  $F_{tr}$  doit être choisie égale à la fréquence de commutation que l'on souhaite imposer aux composants de puissance. Le signal ainsi obtenu attaque alors l'entrée d'un régulateur à hystérésis de largeur de bande dont  $2B_h$  la sortie permet de commander les interrupteurs de puissance. Le schéma de cette commande est décrit à la figure suivante [8] :



**Fig III.3 :** Contrôle des courants de l'onduleur par hystérésis modulée [38].

Dans le cas du contrôle par hystérésis modulée, il est important de dimensionner correctement les valeurs des deux paramètres déterminants, à savoir  $A_{tr}$  du signal triangulaire et  $B_h$ . Si ces paramètres ne sont pas correctement déterminés, la fréquence de commutation des interrupteurs de puissance sera soit supérieure, soit inférieure, à la fréquence souhaitée. En effet, afin de fixer la fréquence de commutation en régime permanent, il ne doit exister que deux intersections entre le courant réel et la bande hystérésis pendant chaque période  $T$  :



La première avec la limite inférieure du contrôleur d'hystérésis et la deuxième avec sa limite supérieure. Si cette condition est respectée, on aura ainsi une fréquence de commutation des interrupteurs constante et égale à celle du signal triangulaire.

On peut calculer  $A_r$ ,  $B_h$  à partir des deux cas extrêmes de vitesses de changement du courant :

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} \text{ et } \left(\frac{di}{dt}\right)_{\min} \quad (\text{III.1})$$

Dans le cas où la vitesse de changement du courant est maximale et pour que la fréquence de commutation soit égale à celle du signal triangulaire, nous obtenons la condition suivante :

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} < \frac{2 \cdot (A_r + B_h)}{\frac{T}{2}} = \frac{4(A_r + B_h)}{T} \quad (\text{III.2})$$

Dans le cas où la vitesse de changement du courant est minimale, pour avoir toujours une commutation par période  $T$ , la condition suivante doit être satisfaite :

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\min} > \frac{2B_h}{T} \quad (\text{III.3})$$

Afin d'avoir au moins une intersection entre le courant réel et les limites supérieures ou inférieures de l'hystérésis dans chaque demi période, la condition suivante est nécessaire :

$$B_h < A_{th}.$$

### III.2 Contrôle de la tension du bus continu $V_{dc}$ :

Le contrôle du bus continu est une procédure indispensable. L'observation des fluctuations de la tension aux bornes des condensateurs donne des indications sur l'évolution des échanges d'énergie entre ces derniers et le réseau [39].

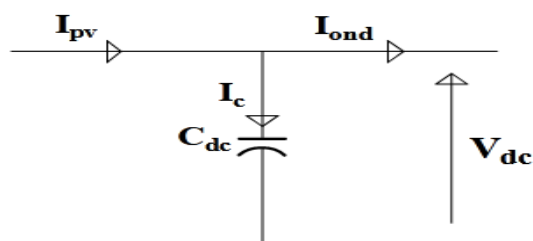


Fig III.4 : Représentation du bus continu.

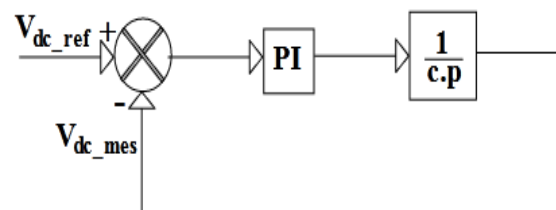
Chaque convertisseur exerce son influence sur ce circuit, par le courant qu'il donne ou qu'il prend au condensateur. L'évolution temporelle de la tension à ses bornes est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$I_c = I_{PV} - I_{Ond} \quad (\text{III.4})$$

Et :

$$V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int (I_{PV} - I_{ond}) . dt \quad (\text{III.5})$$

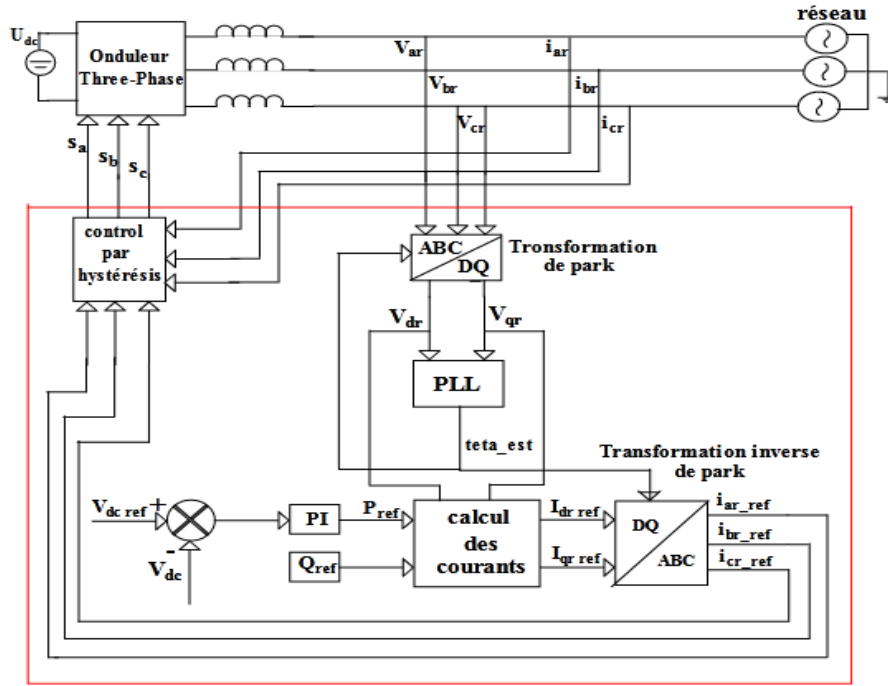
La régulation de la tension du bus continu est assurée par une gestion des échanges de puissances entre la sortie du convertisseur côté panneau photovoltaïque et l'entrée du convertisseur côté réseau. En ajustant la puissance transitée par ce dernier, il est possible de contrôler la puissance emmagasinée dans le condensateur et donc de régler la tension du bus continu. La boucle de régulation mise en œuvre est montrée sur la figure qui suit :



**Fig III.5 :** Boucle de régulation de la tension du bus continu.

### III.3 Contrôle des puissances active et réactive (P et Q):

Le but de ce type de commande est d'imposer les valeurs de puissance active et réactive injectées au réseau. Le circuit de contrôle en agissant sur la commande hystérésis des courants, doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Ce contrôle est représenté sur le schéma synoptique qui suit et son principe est présenté sur la figure suivante [40]:



**Fig III.6 :** Schéma synoptique de la connexion de l'onduleur au réseau électrique.

Les différentes simplifications réalisées après analyse du système nous ont permis de conclure que les courants de consignes en sortie du contrôle amont seront injectés au point de connexion de la production PV. Ces courants sont calculés grâce aux références de puissances et à la mesure de la tension au point de connexion ; ceux-ci vont être calculés dans le référentiel de Park selon les équations qui suivront :

$$P_{ref} = (V_{dr} \cdot I_{dr\_ref} + V_{qr} \cdot I_{qr\_ref}) \quad (III.6)$$

$$Q_{ref} = (V_{qr} \cdot I_{dr\_ref} - V_{dr} \cdot I_{qr\_ref}) \quad (III.7)$$

On déduit :

$$I_{dr\_ref} = \frac{(P_{ref} \cdot V_{dr} + Q_{ref} \cdot V_{qr})}{(V_{dr}^2 + V_{qr}^2)} \quad (III.8)$$

$$I_{qr\_ref} = \frac{(P_{ref} \cdot V_{qr} - Q_{ref} \cdot V_{dr})}{(V_{dr}^2 + V_{qr}^2)} \quad (III.9)$$

Où:

$P_{ref}$  et  $Q_{ref}$  : sont les puissances de référence de la production PV.

$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  : sont les composantes directes et quadratiques de la tension, mesurées au point de connexion de la production PV, dans le référentiel de Park.

$I_{dr\_ref}$  et  $I_{qr\_ref}$  : sont les composantes directes et quadratiques du courant produit de référence par la production PV sur le réseau auquel elle est connectée. Ces courants dépendent donc des puissances de références ainsi que de la tension mesurée au point de connexion de la production.

Cette tension mesurée est transformée dans le référentiel de Park avant le calcul des courants. Une boucle à verrouillage de phase ou PLL (Phase Locked Loop) est utilisée pour synchroniser la transformation de Park sur la pulsation de la tension mesurée sur le réseau.

### III.4 Etude de la synchronisation du convertisseur sur le réseau :

Afin de connecter des sources au réseau électrique, il faut synchroniser la tension du générateur de production avec celle du réseau, c'est pourquoi l'information de phase et de fréquence de la tension du réseau est nécessaire [37].

#### III.4.1 PLL triphasée dans le domaine de Park :

Le principe de base de la PLL triphasée consiste à appliquer une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. La composante d'axe q générée par cette transformation est asservie à zéro par action sur l'angle du repère de Park ( $\theta_{est}$ ).

En régime établi l'angle ( $\theta_{est}$ ) est égale à l'angle ( $\theta_r$ ) du réseau.

Le principe de la PLL dans le domaine de Park est donné sur la figure suivante :

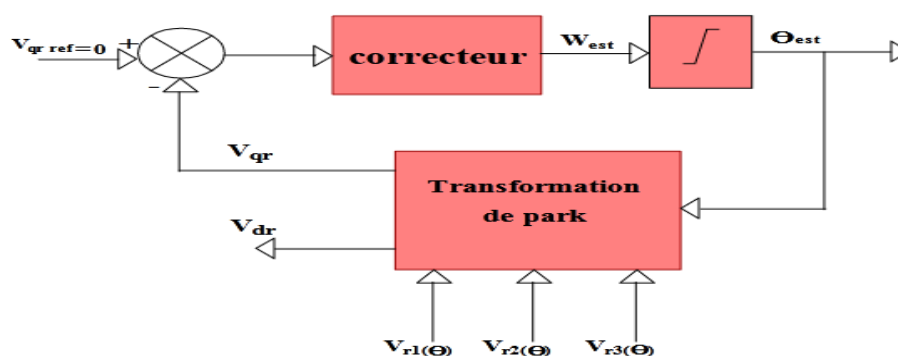


Fig III.7 : Principe de la PLL.

## Simulation et résultats

### Paramètres de PV

Cells per module (Ncell)	60
Short-circuit current I <sub>sc</sub> (A)	7.84
Current at maximum power point I <sub>mp</sub> (A)	7.35
Temperature coefficient of I <sub>sc</sub> (%/deg.C)	0.102

Block Parameters: PV Array

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module

Input 1 = Sun Irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings 2

Series-connected modules per string 28

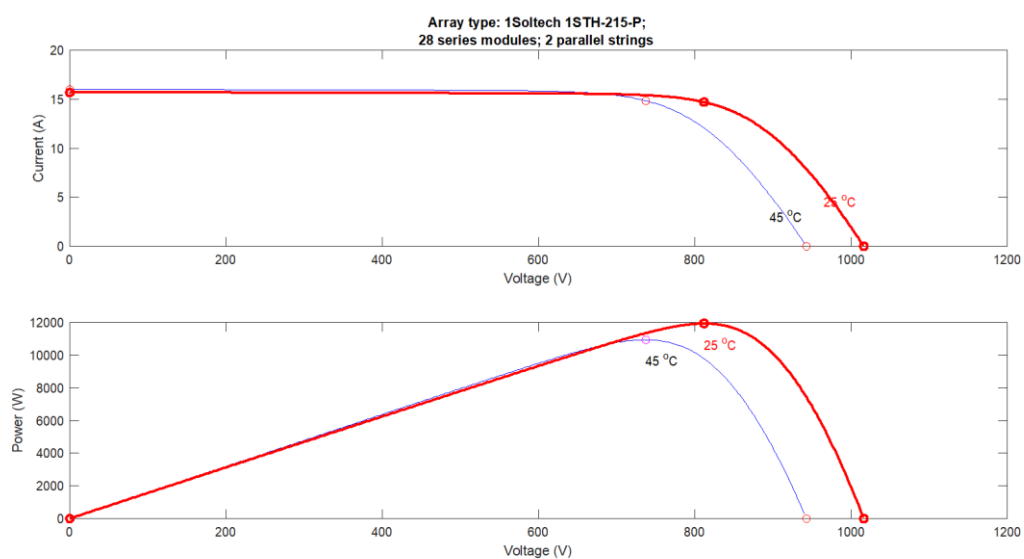
Module data

Module: 1Soltech 1STH-215-P

Maximum Power (W)	213.15	Cells per module (Ncell)	60
Open circuit voltage Voc (V)	36.3	Short-circuit current I <sub>sc</sub> (A)	7.84
Voltage at maximum power point V <sub>mp</sub> (V)	29	Current at maximum power point I <sub>mp</sub> (A)	7.35
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.36099	Temperature coefficient of I <sub>sc</sub> (%/deg.C)	0.102

OK Cancel Help Apply

### Caractères de PV



**Fig III.8 :** Caractéristiques de courant et de puissance pour différentes irradiances solaires, à 25 °C et 45 °C.



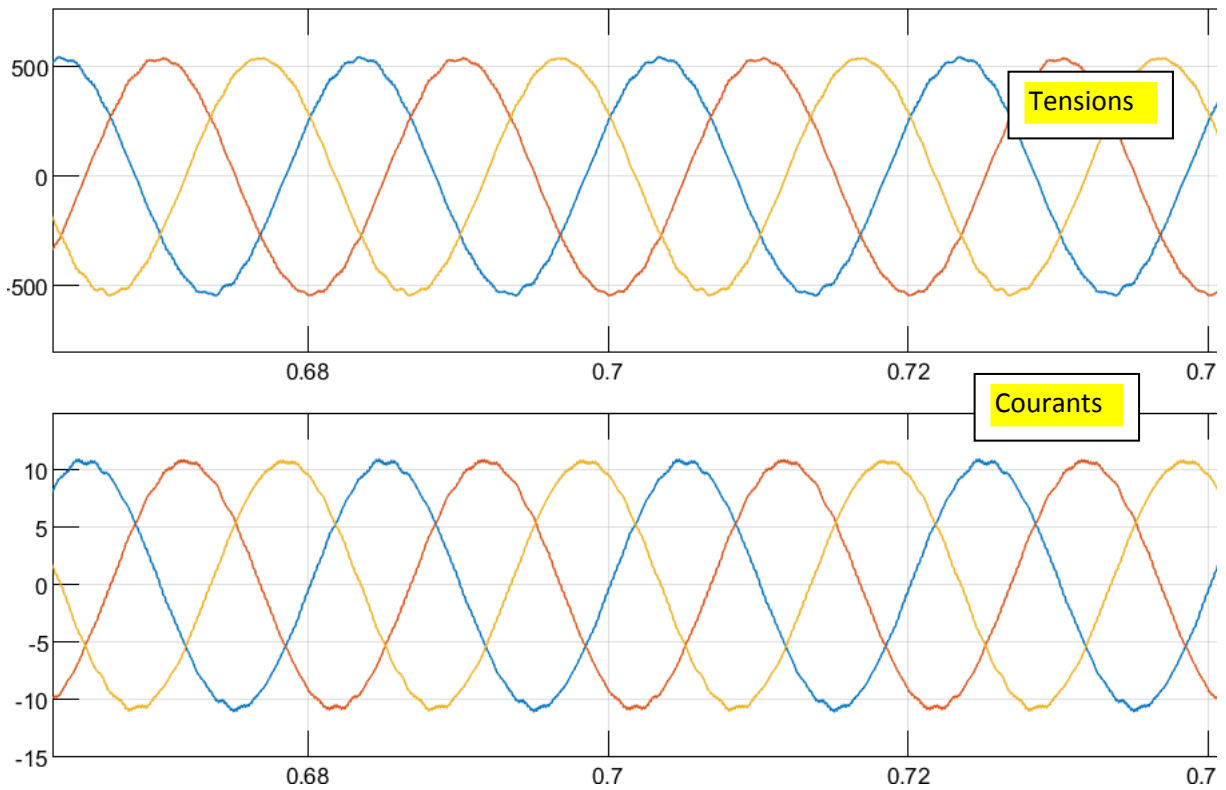


Fig III.9 : Allure des tensions et courants extraits du réseau.

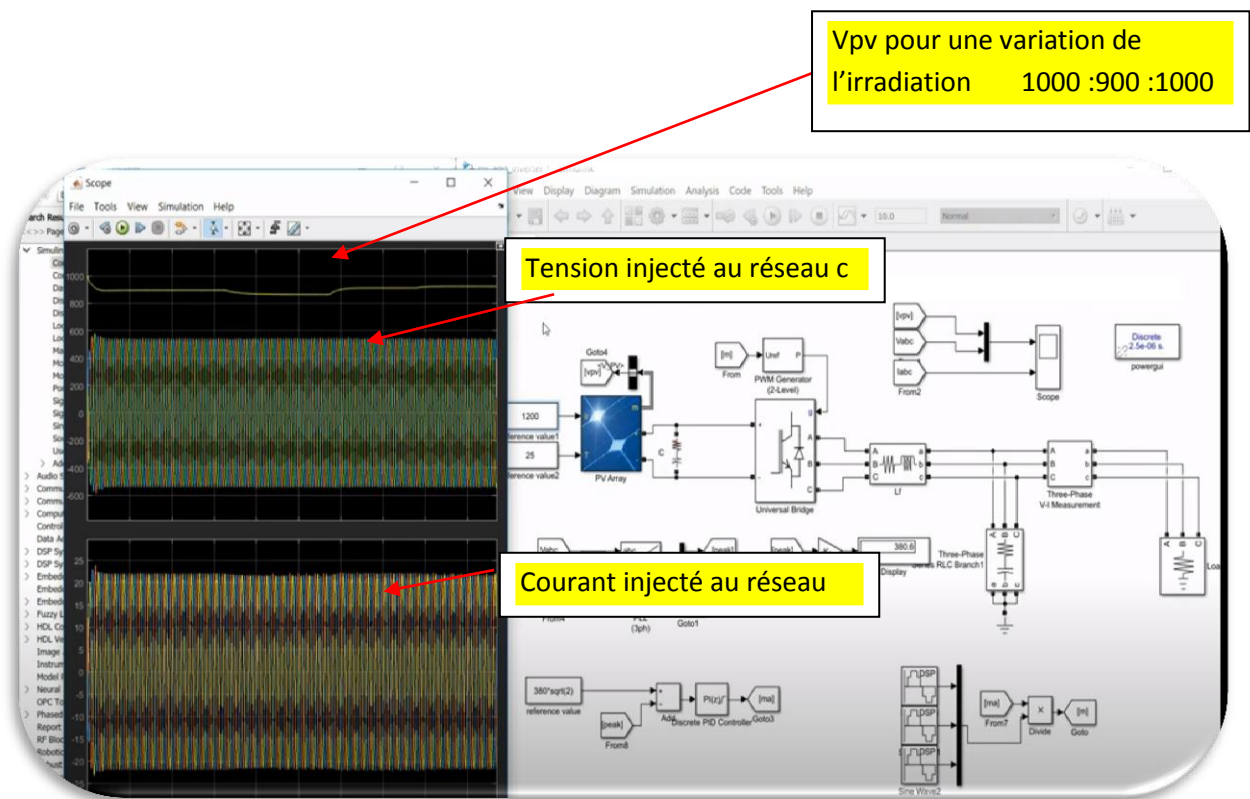


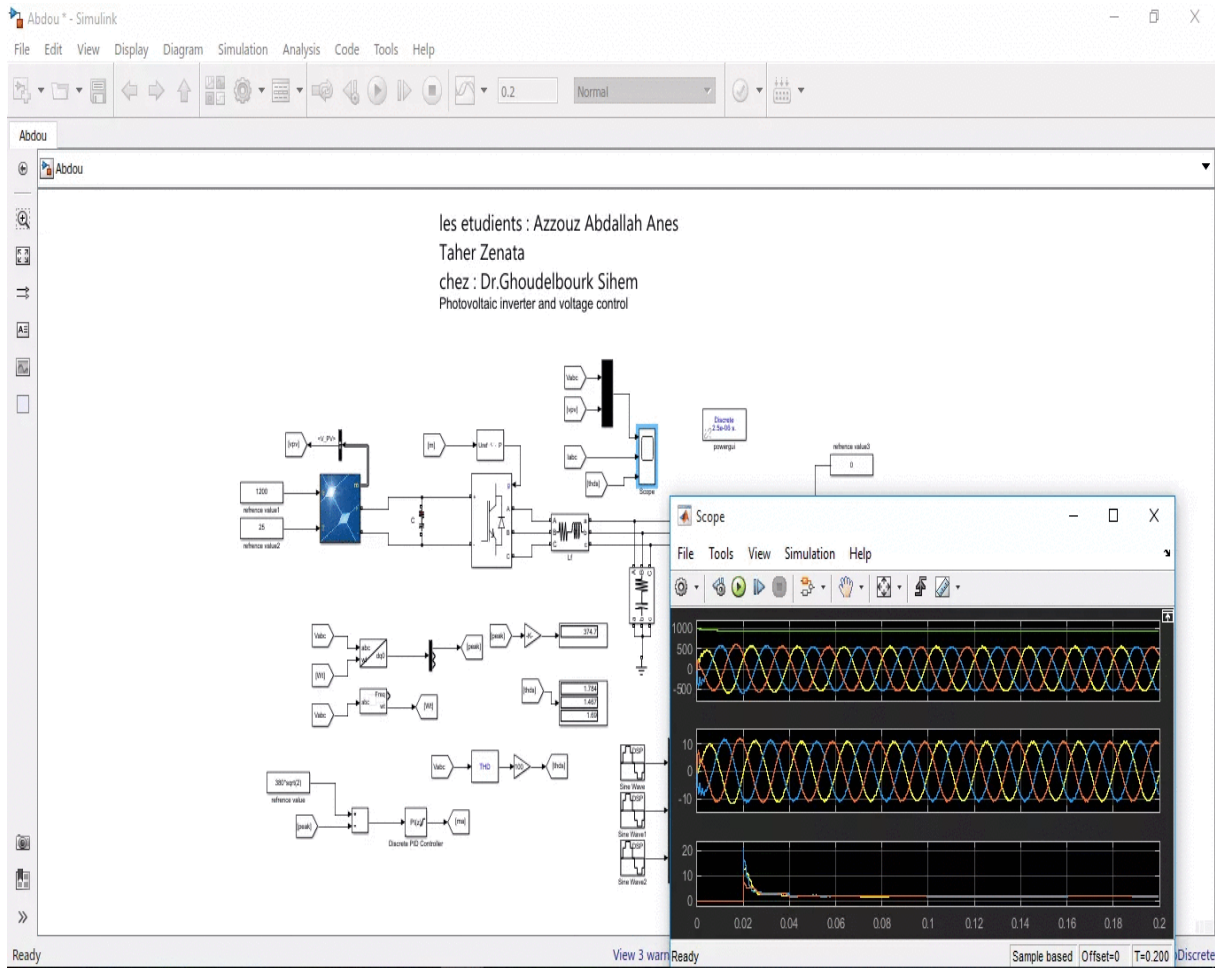
Fig III.10 : Allure de tension et de courant injectés au réseau.

On a appliqué :

**Référence valeur : 1 voltage**

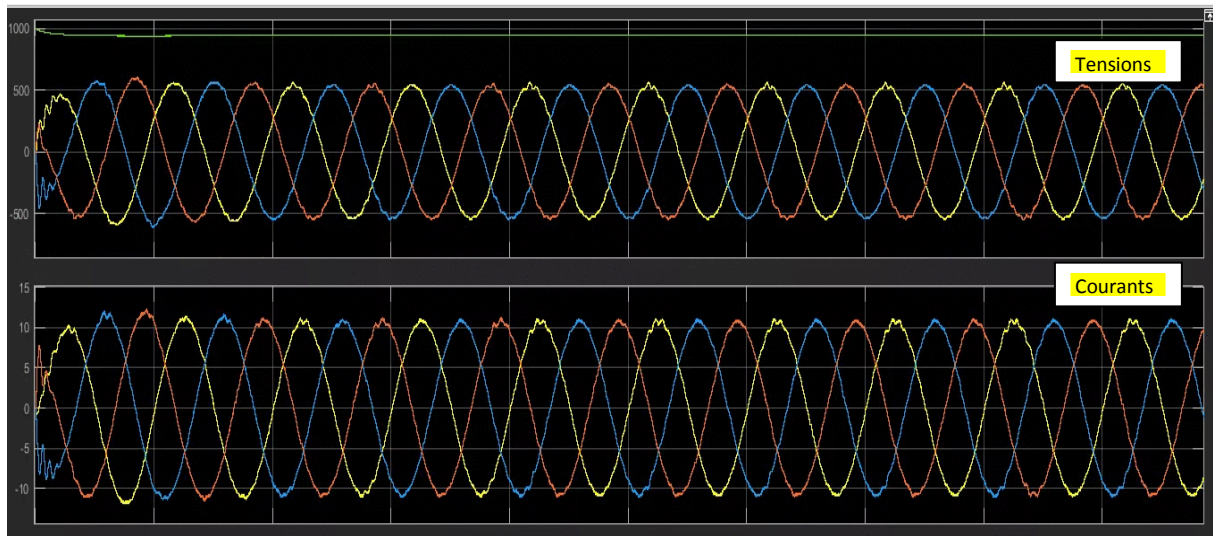
**Panneaux=1200**

**Référence valeur 3=0**

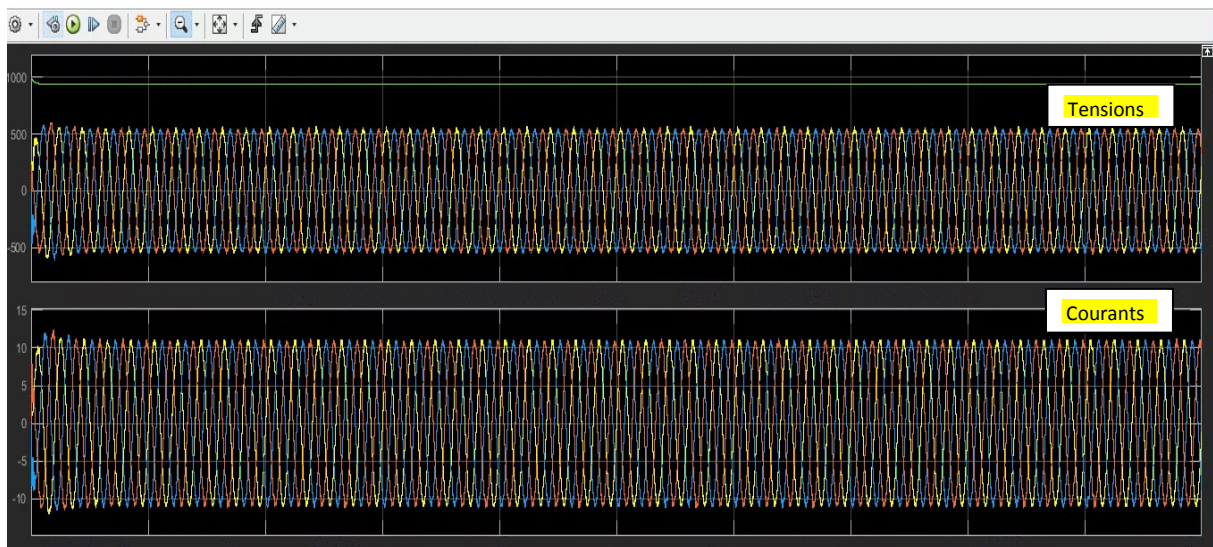


**Fig III.11 : Schéma global du système PV raccordé au réseau.**

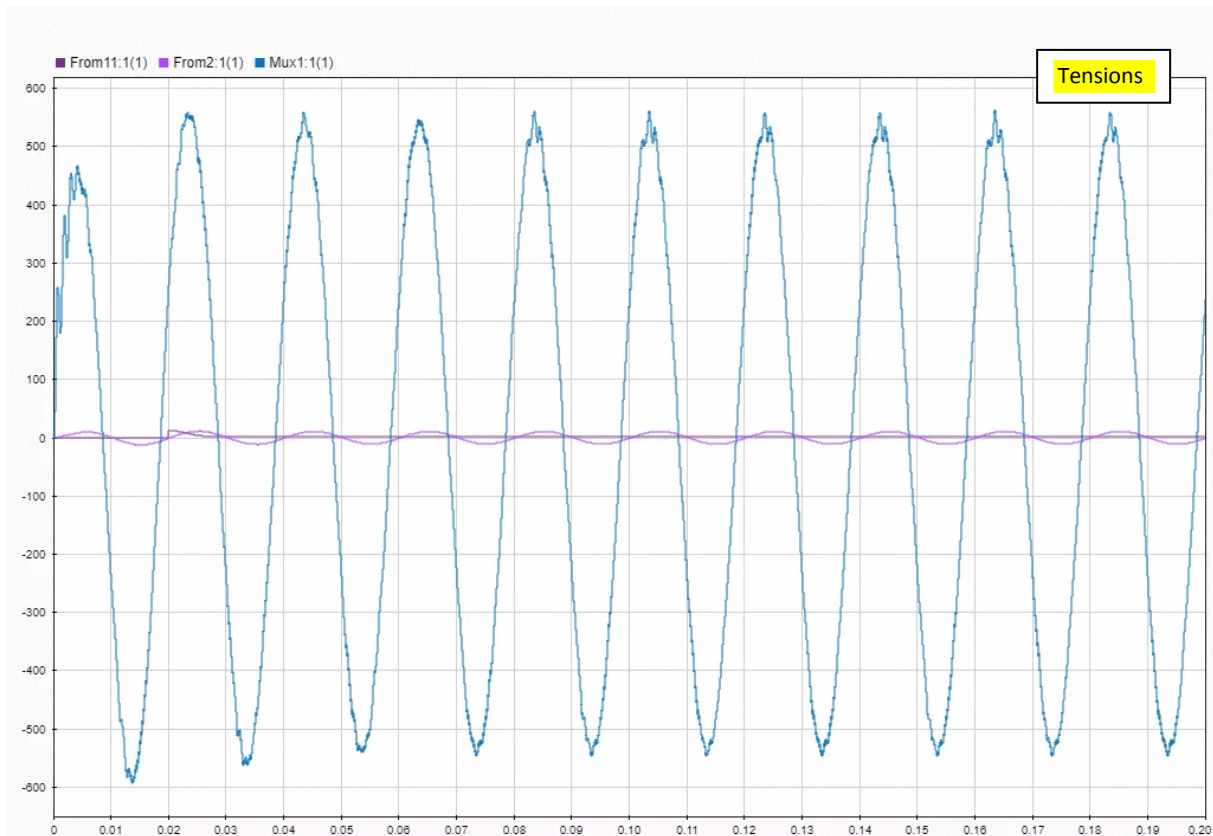




Courbe A



Courbe B

**Courbe C**

**Fig III.12 :** Courbe A- Courbe B- Courbe C : allure de tensions et de courants.

### **Conclusion :**

Le système photovoltaïque global raccordé au réseau a été simulé. Nous avons réalisé le contrôle de notre système PV connecté au réseau, ce qui nous permet ainsi d'avoir un bon contrôle de courant injectée au réseau malgré la variation de l'irradiation.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

---

Au terme de travail présenté dans ce mémoire, on peut dire que notre contribution a été axée sur plusieurs aspects : Tout d'abord nous avons passé en revue assez générale sur les énergies renouvelables en rappelant ses types, et nous avons détaillé l'énergie solaire photovoltaïque, les différentes technologies solaires, ainsi que les différents systèmes photovoltaïques.

Dans le second chapitre nous avons fourni une explication sur le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, les différents types des cellules solaires et les caractéristiques des cellules photovoltaïques. Ainsi, les paramètres limitant leur rendement et leur coût.

Un contrôle de puissances active et réactive a été effectué lors de notre travail. Le but de ce type de commande est d'imposer les valeurs de puissance active et réactive injectées au réseau. L'étude de la synchronisation des courants de références a permis de mettre en évidence l'importance du choix du système qui réalise cette fonction. Habituellement, la synchronisation est faite par l'intermédiaire de la PLL plus au moins évoluée, et nous avons utilisé celle-ci dans notre travail.

Le système photovoltaïque global raccordé au réseau a été simulé dans la deuxième partie du dernier chapitre, on a utilisé un onduleur triphasé (convertisseur DC-AC) pour transformer le courant continu en courant alternatif, qui transférera ce courant au réseau central. Nous avons démontrés tous le processus en utilisant Matlab/Simulink qui a englobé toute ces parties pour simuler un Panneau photovoltaïque connecté au réseau. Les résultats obtenus lors de la simulation ont démontrés que la commande est robuste malgré la variation de l'irradiation le courant injecté au réseau est alternative et la tension est alternative constante a fréquence 50HZ.

# *Bibliographie*

## Bibliographie

[1] <http://www.futura-sciences.com/>.

[2] <http://jeunes.edf.com/>.

[3] <http://fr.wikipedia.org/>.

[4] O. Gergaud, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 2002.

[5] L. Leclercq, Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes, thèse de doctorat de l'université de Lille, Laboratoire L2EP, Décembre 2004.

[6] Cabal Cédric, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.

[7] Dr. Sofia Belaid Lalouni, « Cours Energie Solaire Photovoltaïque », Université A.Mira de Bejaia, 2015.

[8] ASAL. (L'Atlas Solaire de l'Algérie par l'Agence Spatiale Algérienne). Energie nouvelle et renouvelable)

[9] Abdelkader Mekemeche, « Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n, Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes », Thèse de Doctorat, L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017.

[10] Cabal Cédric, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.

[11] José Miguel Navarro, Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible, Thèse de doctorat, Université Toulouse III -Paul Sabatier, 2008.

[12] L. de Schoulepnikoff et Gymnase Auguste Piccard, Quelle source d'énergie pour les vingt prochaines années? , Travail de maturité Alexandra Catana, 3M7, 2009.

- [13] José Miguel Navarro, Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible, Thèse de doctorat. Université Toulouse III -Paul Sabatier, 2008.
- [14] Souheyla Merad née Mamoun, « Dimensionnement d'une Installation Photovoltaïque d'un lieu peu fréquenté : Cas d'un Cabanon Situé à Marsat Ben M'Hidi (Tlemcen) », master LMD, L'université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2010.
- [15] Soltane Belakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », thèse doctorat, université de Constantine.
- [16] Antonio Luque and Steven Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [17] Akassewa tchapo singo, Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Thèse de doctorat université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [18] Lila Croci, gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batterie/supercapaciteurs, thèse de doctorat de l'université de Poitiers, 2013.
- [19] M. A. Tankari, "Système Multi-sources de Production d'Énergie Électrique", Thèse de doctorat de l'université du Havre, Décembre 2010.
- [20] R. Khezzer, Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque, revue des Energies Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379-388, 2010.
- [21] Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [22] Vighetti Stéphane, Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion, Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [23] Loïc Bailly, Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010.

[24] Helali Kamelia, Modélisation d'une cellule photovoltaïque .Etude comparative, Thèse de doctorat Université de Tizi Ouzou, Algeria, 2012.

[25] 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.

[26] W. DeSoto, S.A. Klein, W.A. Beckman, Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, Solar Energy 80, pp. 78-88, 2006.[25] Roshanak Radbeh , Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones, Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.

[27] G. Notton et al, Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 13 N°1, pp 49-62, 2010.

[28] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto Ruppert Filho « Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays ».10th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), 2009.

[29] Salima. Kebaili. Achour. Betka, Efficiency Model Of DC/DC PWM Converter Photovoltaic Applications, GCREEDER, Amman-Jordan, March 31st –April 2nd, pp1-5, 2009.

[30] Adel et Shahat , PV cell module modeling and simulation for smart grid applications , Journal of Theoretical and Applied Information Technology, JATIT All rights reserved, pp 9-20, 2010.

[31] J.A. Gow and C.D. Manning ,Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies ,IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 146, N°2, pp. 193 -200, 1999.

[32] Petibon Stéphane, Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

[33] M.S. Aït Cheikh et al ,Mise au point d'une régulation floue pour serre agricole à énergie solaire , Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3, pp 421-443 ,2010.



- [34] L.A. Hecktheuer, A. Krenzinger and C.W.M. Prieb , Methodology for Photovoltaic Modules C Society of Mechanical Sciences, Vol. 24, N°1, pp. 26-32, 2002.haracterization and Shading Effects Analysis , Journal of the Brazilian.
- [35] B Addellah, Développement de surface à base de dioxyde de titane par PVD pour une application aux cellules solaires , Thèse de doctorat, Université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2008.
- [36] M. PETIBON Stéphane, Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, Université de Toulouse, 2009.
- [37] M.MECHALIKH, C.HAMADA « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau». Mémoire de Master Académique Université Kasdi Marbah, 2013.
- [38] L.ABBASEEN « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou 2011.
- [39] Y.OUADFEL, L. LAMARA « Etude et optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2011.
- [40] A. MESKANI « Modélisation Et Simulation D'un Système PV Intégré à Un Réseau BT Par La Méthode Du Watt-Var découplé » Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI), Université ABDELMALEK ESSAËDI, (ENSA) Tanger, Maroc, 2012.