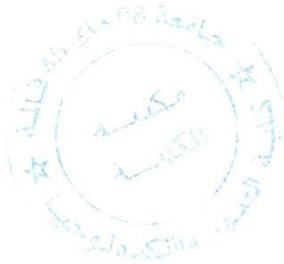


7/621.314

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



**Domaine :** Sciences et Technologie  
**Filière :** Automatique et Informatique Industrielle  
**Spécialité :** Commande et Diagnostic des Systèmes Industriels

**Mémoire de fin d'études**

**Pour l'obtention du diplôme en Master Académique**

---

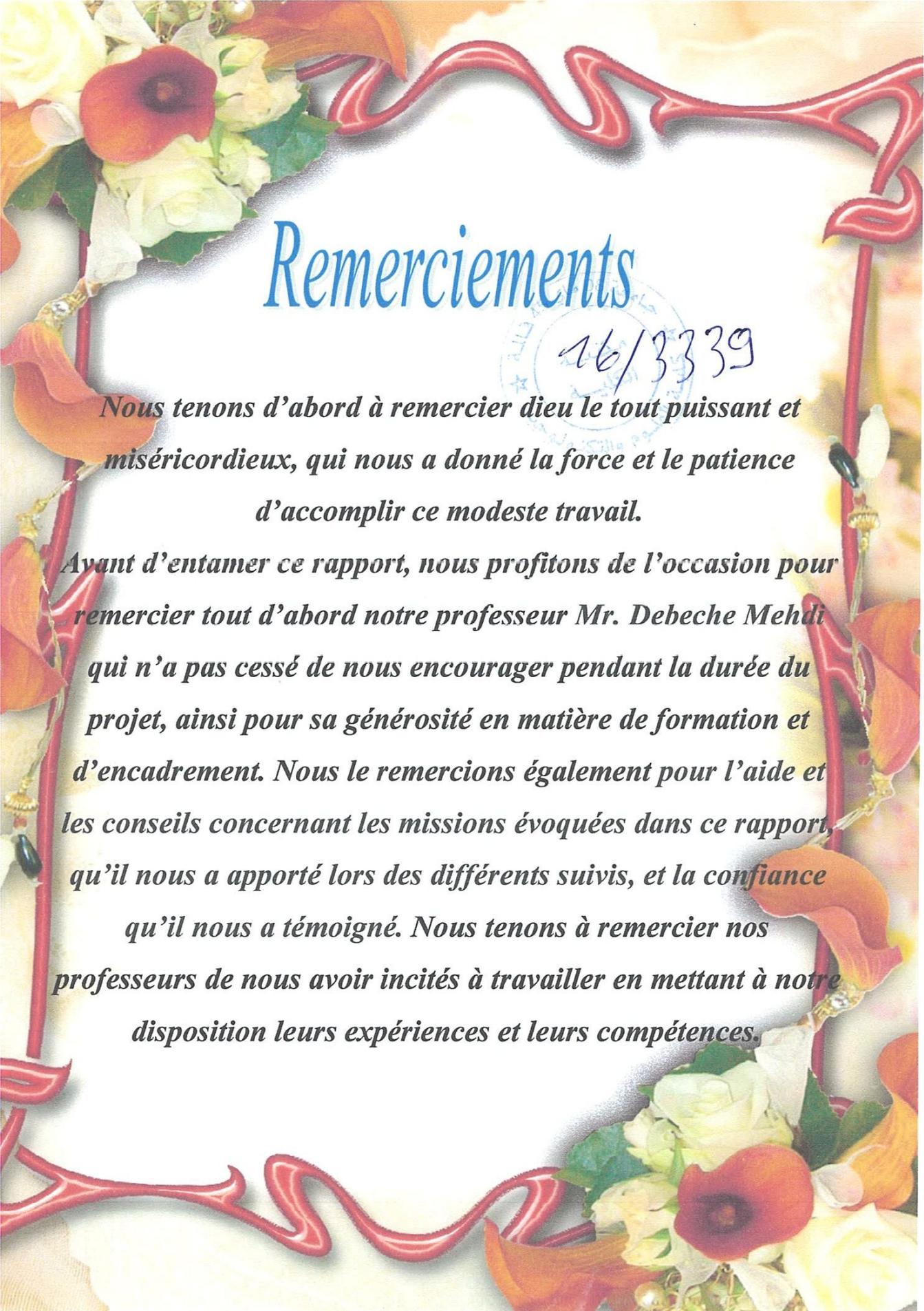
**Modélisation d'un panneau solaire**

---

Présenté par :  
**Chorfi Abderrezzaq**  
**Cehida Hemza**

Sous la direction de :  
**Mr. Debeche Mehdi**

JUIN 2016



# Remerciements

16/3339

*Nous tenons d'abord à remercier dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*Avant d'entamer ce rapport, nous profitons de l'occasion pour remercier tout d'abord notre professeur Mr. Debeche Mehdi qui n'a pas cessé de nous encourager pendant la durée du projet, ainsi pour sa générosité en matière de formation et d'encadrement. Nous le remercions également pour l'aide et les conseils concernant les missions évoquées dans ce rapport, qu'il nous a apporté lors des différents suivis, et la confiance qu'il nous a témoigné. Nous tenons à remercier nos professeurs de nous avoir incités à travailler en mettant à notre disposition leurs expériences et leurs compétences.*

# SOMMAIRE

## Sommaire :

Introduction générale.....	(1)
I-1 Introduction.....	(2)
I-2 Historique .....	(3)
I-2-1 Au XVIII <sup>ème</sup> siècle .....	(3)
I-2-2 Au XIX <sup>ème</sup> siècle .....	(4)
I-2-3 A partir de XX <sup>ème</sup> siècle .....	(5)
I-3 L'exploitation de l'énergie solaire .....	(7)
I-3-1 Exploitation active de l'énergie solaire.....	(7)
I-3-2 Exploitation passive de l'énergie solaire.....	(8)
I-4 Type de conversion .....	(9)
I-4-1 L'énergie solaire thermique .....	(9)
I-4-2 L'énergie solaire thermodynamique .....	(11)
I-4-3 L'énergie solaire photovoltaïque .....	(12)
I-5 Conclusion .....	(14)
II-1 Introduction.....	(15)
II-2-Historique de l'énergie photovoltaïque .....	(15)
II-3 Composition des cellules photovoltaïques.....	(16)
II-4 Principe de la conversion photovoltaïque .....	(17)
II-5 Les caractéristiques d'un module PV.....	(18)
II-5-1 La tension en circuit ouvert.....	(18)
II-5-2 Le courant de court-circuit.....	(18)
II-5-3 La puissance maximale.....	(19)
II-5-4 Le rendement.....	(19)
II-5-5 Le facteur de forme.....	(19)
II-6 Les critères influant sur le rendement de module PV.....	(19)

II-6-1 L'éclairage.....	(20)
II-6-2 La température de fonctionnement.....	(20)
II-7 Technologies des cellules photovoltaïques .....	(20)
II-7-1 Les cellules monocristallines .....	(20)
II-7-2 Les cellules poly cristallines .....	(21)
II-7-3 Les cellules amorphes .....	(22)
II-8 Module solaire ou photovoltaïque .....	(24)
II-8-1 Association des cellules en série .....	(24)
II-8-2 Association des cellules en parallèle .....	(25)
II-9 systèmes photovoltaïques avec batterie.....	(26)
II-10 systèmes photovoltaïques sans batterie.....	(26)
II-11 Les différentes installations photovoltaïques .....	(26)
II- 11-1 panneaux photovoltaïques .....	(27)
II-11-2 L'onduleur .....	(27)
II-11-3 Les compteurs .....	(27)
II-11-4 Les câbles (conducteurs) .....	(27)
II-12 Les avantages d'un panneau photovoltaïque.....	(27)
II-13 Les inconvénients d'un panneau photovoltaïque .....	(28)
II-14 Conclusion .....	(28)
III-1 Introduction.....	(29)
III-2 Modélisations des cellules PV .....	(30)
III-3 Les types des modèles.....	(31)
III-3-1 Modèle à 2 paramètres .....	(32)
III-3-2 Modèle 3 paramètres.....	(33)
III-3-4 Modèle à 4 paramètres.....	(34)
III-3-5 Modèle à 5 paramètres.....	(35)

III-3-6	Modèle a doublé diode.....	(36)
III-4	modélisation d'un modèle a 4 paramètres .....	(36)
III-4-1	Essai en court-circuit.....	(36)
III-4-2	Essai en circuit ouvert.....	(37)
III-4-3	Le point de la puissance max.....	(37)
III-4-4	Calcul des paramètres .....	(37)
III-4-4-1	Calcul du courant de la saturation de la diode.....	(37)
III-4-4-2	Le courant photonique.....	(37)
III-4-4-3	calcul de la résistance série.....	(38)
III-4-4-4	le facteur de qualité de la diode n.....	(38)
III-4-4-5	calcul de la résistance shunte.....	(38)
III-5	L'influence des 2 critères sur la modélisation d'un panneau PV.....	(39)
III-5-1	module PV a éclairement et température constante.....	(39)
III-5-1-1	Caractéristique courant-tension I(V).....	(39)
III-5-2	modules PV a éclairement et température variable .....	(42)
III-5-2-1	éclairagements.....	(42)
III-5-2-1-1	l'influence de l'éclairement sur la caractéristique (I-V).....	(42)
III-5-2-1-2	l'influence de l'éclairement sur la caractéristique (P-V) .....	(44)
III-5-2-1-3	l'influence de la température sur la caractéristique (I-V).....	(45)
III-5-2-1-4	l'influence de la température sur la caractéristique (P-V) ...	(47)
III-6	Liaison des cellules photovoltaïque .....	(48)
III-6-1	Groupement en série .....	(48)
III-6-2	Groupement en parallèle.....	(49)
III-6-2	Groupement mixte (série-parallèle).....	(50)
III-7	simulation de module PV par Matlab-Simulink.....	(51)
III-8	Conclusion .....	(52)

Conclusion générale.....(53)

## Liste des figures :

Figure I-1 : un miroir ardent.....	(3)
Figure I-2 : le concentrateur a lentille de Lavoisier.....	(4)
Figure I-3 : coupe transversale d'une « boîte chaude » avec thermomètre.....	(4)
Figure I-4 : le four de Mont-Louis.....	(6)
Figure I-5 : maison exploite de l'énergie solaire active.....	(8)
Figure I-6 : maison exploite de l'énergie solaire passive.....	(8)
Figure I-7 : types d'exploitation de l'énergie solaire.....	(9)
Figure I-8 : l'exploitation de l'énergie solaire par les tubes thermiques.....	(10)
Figure I-9: les tubes thermiques sur un toit de maison.....	(10)
Figure I-10: un capteur parabolique (Dish-Stirling).....	(11)
Figure I-11 : une centrale des panneaux cylindro-paraboliques.....	(12)
Figure I-12: panneau solaire photovoltaïque.....	(13)
Figure I-13: installation multiple des panneaux photovoltaïques.....	(13)
Figure II-1 : composition d'une cellule photovoltaïque.....	(16)
Figure II-2 : la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.....	(17)
Figure II-3: principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique .....	(17)
Figure II-4 : cellule PV monocristalline.....	(21)
Figure II-5: cellule PV poly cristalline.....	(21)
Figure II-6 : cellule PV amorphe.....	(22)
Figure II-7 : Association des modules en série.....	(24)
Figure II-8: l'une des cellules en série se trouve à l'ombre.....	(24)
Figure II-9 : l'installation des diodes sur chaque module.....	(25)
Figure II-10 : Association des cellules en parallèle .....	(25)
Figure II-11: l'installation d'un panneau photovoltaïque.....	(26)
Figure III-1 : modèle à deux paramètres.....	(32)

Figure III-2 : modèle à 4 paramètres.....	(34)
Figure III-3 : modèle à 5 paramètres.....	(35)
Figure III-4 : modèle à double diode.....	(36)
Figure III-5 : Caractéristique I(V) d'une cellule, T=25°C .....	(39)
Figure III-6 : Caractéristique I(V) d'une cellule, G=1000 w/m <sup>2</sup> .....	(40)
Figure III-7 : Caractéristique I(V) d'un module, T=25°C.....	(40)
Figure III-8 : Caractéristique I(V) d'un module, G=1000 w/m <sup>2</sup> .....	(41)
Figure III-9 : Les différentes zones de la caractéristiques I-V.....	(41)
Figure III-10 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique (I-V) d'une cellule .....	(43)
Figure III-11 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique (I-V) d'un module .....	(43)
Figure III-12 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique (P-V) d'une cellule.....	(44)
Figure III-13 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique (I'-V) d'un module.....	(45)
Figure III-14 : l'influence de la température sur la caractéristique (I-V) d'une cellule.....	(46)
Figure III-15 : L'influence de la température sur la caractéristique (I-V) d'un module.....	(46)
Figure III-16: L'influence de la température sur la caractéristique (P-V) d'une cellule.....	(47)
Figure III-17 : L'influence de la température sur la caractéristique (P-V) d'un module.....	(47)
Figure III-18 : Association des modules en série.....	(48)
Figure III-19 : Caractéristique résultante d'un groupement en série .....	(48)
Figure III-20 : Association des modules en parallèle.....	(49)
Figure III-21 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle.....	(49)
Figure III-22 : Association mixte des modules.....	(50)
Figure III-23 : Caractéristique résultante d'un groupement mixte.....	(50)
Figure III-24 : Schéma bloc d'un module PV en Matlab-Simulink.....	(51)
Tableau II-1 : les différentes caractéristiques des modules photovoltaïques.....	(23)
III-1 Tableau : caractéristique du module Kyocera KC200GT.....	(30)

INTRODUCTION

GENERALE

## *Introduction générale*

De nos jours, l'homme a à sa disposition sur la Terre de nombreuses sources d'énergie. Les plus utilisées sont les énergies dites fossiles (charbon, pétrole, gaz) car non renouvelables et issues d'un long processus de transformation de la matière organique, parce qu'elles sont faciles à exploiter, et rentables. Cependant, pour différentes raisons, il s'avère que ces énergies ne peuvent plus être utilisées. Tout d'abord, les réserves d'énergie fossiles commencent à s'amoinrir. Ensuite, en raison de la très forte demande en provenance des pays en voie de développement comme la Chine et l'Inde pour ne pas les citer, les prix de ces énergies ne cessent d'augmenter, les rendant inabordables pour certaines personnes. Et puis, lors de leur utilisation, ces énergies émettent une grande quantité de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, notamment) qui participent fortement au réchauffement planétaire, qui devient un problème grandissant pour la Terre et les êtres vivants. De nombreuses énergies non polluantes, renouvelables et abondantes partout à la surface du globe pourraient pourtant être utilisées par l'homme. Entre autres, on distingue l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire. Mais l'énergie éolienne n'est pas assez rentable, au sens qu'elle ne permet pas de produire beaucoup d'énergie par unité de surface. L'énergie nucléaire, même si elle a un fort rendement, produit des déchets très polluants et peu dégradables. De plus elle fait peur en raison des graves accidents qui peuvent se produire (catastrophe de Tchernobyl), et en raison du risque de prolifération nucléaire. L'énergie hydroélectrique a un bon rendement mais, un fort impact écologique et humain, n'est pas disponible partout, et la plupart des espaces qui lui sont propices sont déjà saturés de barrages. L'énergie solaire, elle est disponible partout à la surface du globe, en quantité égale dans l'année, et a un bon rendement grâce à la technologie actuelle. Elle est de plus facile à exploiter. Elle semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir. C'est pour cela que nous avons décidé de l'étudier plus en détail afin d'exploiter au mieux cette énergie.

# CHAPITRE I

### ***I-1 Introduction :***

L'énergie solaire est l'énergie diffusée par le rayonnement du Soleil. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire. L'énergie solaire est issue des réactions de fusion nucléaire qui animent le Soleil.

L'énergie solaire est à l'origine de toutes les formes de production énergétique aujourd'hui utilisées sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie chimique (les aliments que notre corps utilise), énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou biomasse.

Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de la source énergétique primaire qu'est le rayonnement solaire.

Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

- le solaire photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement en électricité
- le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur
- Le solaire dit « thermodynamique » est une variante du solaire thermique. Cette technique se différencie en cela qu'elle utilise l'énergie thermique du soleil afin de la transformer dans un second temps en électricité.

Il est relativement complexe de récupérer l'énergie solaire afin de la transformer en électricité ou en chaleur, et encore plus de la stocker. L'exploitation de cette source énergétique est récente et se développe rapidement dans les régions bien exposées au soleil. Elle reste néanmoins encore coûteuse. De nombreux programmes de recherche sont en cours afin d'améliorer les rendements des nouvelles technologies d'exploitation de l'énergie solaire.

## I-2 Historique :

### I-2-1 Au XVIII<sup>ème</sup> siècle :

Le Siècle des Lumières voit renaître l'intérêt pour le Soleil et les premières études et expériences sur son énergie.[1]

**En 1747**, le botaniste Buffon met au point une machine capable d'enflammer des planches en bois à 48 mètres. Cet engin est composé de 168 petits miroirs plans de 16 centimètres de largeur sur 22 de hauteur qui réfléchissent les rayons du soleil en un point unique permettant une élévation de la température. Ainsi, il parvient à enflammer du bois à une distance de 65 mètres, et de faire fondre de l'étain à 49 mètres, du plomb à 42 mètres, et de l'argent à 20 mètres.

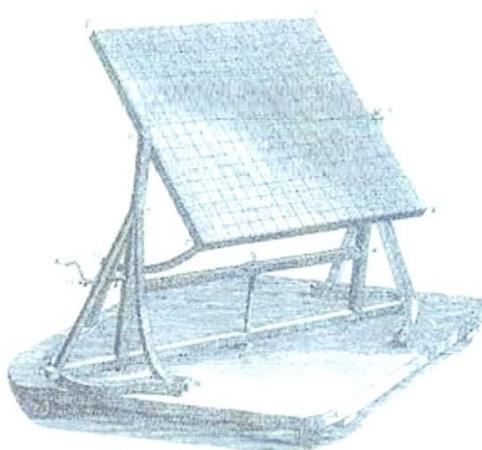


Figure I-1 : un miroir ardent

Le célèbre chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) invente.

**en 1774** : un très puissant four solaire dans le but de faire fondre des métaux sans que ceux-ci soient pollués par les produits des combustibles. Pour cela il utilise deux lentilles convergentes montées comme un télescope et dont les foyers sont alignés sur une droite parallèle aux rayons du Soleil, et qui lui permettent d'obtenir une température d'environ 1755°C.



Figure I-2 : le concentrateur a lentille de Lavoisier

Le suisse Horace Bénédicte de Saussure (1740-1799) invente *en 1767* le tout premier four solaire qu'il appelle "boîte chaude" qui lui permet de démontrer l'effet de serre. Il obtient une température de 160°C.



Figure I-3 : coupe transversale d'une « boîte chaude » avec thermomètre

### I-2-2 Au XIX<sup>ème</sup> siècle :

Le XIX<sup>ème</sup> est marqué par la découverte de l'effet photovoltaïque et le perfectionnement des techniques d'exploitation du solaire thermique.[2]

*En 1839* : le physicien Alexandre Edmond Becquerel découvre par hasard l'effet photovoltaïque. Une nouvelle voie de l'exploitation de l'énergie solaire s'ouvre alors. Il faudra attendre 1900 pour qu'Einstein explique cet effet et 1910 pour qu'il soit mis en évidence par Robert Andrew Millikan.

*En 1872* : l'ingénieur suédois Charles Wilson construit un distillateur solaire au Chili dans le but d'alimenter en eau douce une mine. Sur une surface de 4700 m<sup>2</sup>, ce distillateur produisit pendant 40 ans 23000 litres d'eau par jour à un prix minime.

*En 1875* : l'industriel allemand Werner Von Siemens décrit le principe d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le principe photovoltaïque devant l'Académie des Sciences de Berlin.

Le professeur français Augustin Mouchot inventa le principe de poursuite du Soleil avec un capteur à concentration. *En 1873*, grâce à une subvention du conseil général de Tours il construit une machine de 4m<sup>2</sup>qu'il présente en 1875 à l'Académie des Sciences. *En 1877*, c'est une subvention du conseil général d'Alger qui lui permet de construire un nouveau capteur de 20m<sup>2</sup> couplé à une machine à vapeur qu'il expose lors de l'Exposition Universelle de Paris de 1878. L'engin, d'une puissance d'un demi cheval (368 W), permet d'imprimer le journal de l'Exposition Le Soleil à raison de 500 exemplaires/heures. La machine eut un grand succès et fut primée. Augustin Mouchot avait déjà deviné que les énergies fossiles que les occidentales commençaient à utiliser n'étaient pas inépuisables. C'est pour cela qu'il préconisait et étudiait l'énergie solaire qui selon lui était déjà l'énergie du futur. C'est ce qu'il écrivait dans le livre qu'il publiait *en 1869*, La Chaleur Solaire et ses Applications Industrielles.

### *I-2-3 A partir de XX<sup>ème</sup> siècle :*

*Après 1900*, toutes les technologies découvertes au siècle précédant sont améliorées. De nouvelles découvertes sont faites et dès 1970 le solaire connaît un vif regain d'intérêt. Les premières centrales solaires sont construites, et les premières applications individuelles apparaissent. Le physicien anglais Charles Vernon Boys (1855; 1944) est l'inventeur du capteur cylindro-parabolique. Son invention servit pour la première fois en Egypte, à Meadi, où on construisit *en 1912* une centrale thermique qui fonctionnait sur le principe de Boys, permettant d'irriguer une grande surface de cultures. Cette centrale était composée de 5 réflecteurs de 60 mètres de long pour une ouverture de 4 mètres qui couplés à une pompe permirent de pomper plus de 2000 litres d'eau par minute à partir de 1913, irriguant 200 hectares de champs de coton. Des installations similaires à celle-ci furent prévues dans le Soudan anglais et dans les colonies africaines de l'empire Allemand, mais ces centrales restèrent à l'état de projet à cause du début de la seconde guerre mondiale.

A partir de *1920*, aux Etats-Unis, des particuliers installent chez eux des chauffe-eau solaires, et des « Crystal House », maisons chauffées uniquement grâce à l'apport énergétique du Soleil, sont construites. [3]

en 1944 : lors de leur fuite, les allemands abandonnent un projecteur de DCA. Ces projecteurs très puissants qui permettaient de repérer les avions ennemis dans le ciel nocturne sont des miroirs paraboliques

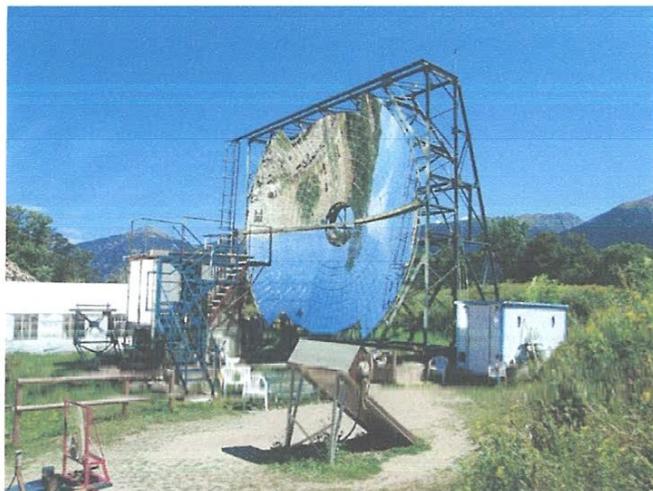


Figure I-4 : le four de Mont-Louis

Orientables au foyer auquel on plaçait une puissante ampoule ce qui donnait un faisceau de lumière parallèle. Trombe décide d'utiliser de réutiliser le projecteur abandonné à l'envers et de jour. Le projecteur est placé de telle manière que les rayons du soleil sont concentrés au foyer du miroir. Quand on place une bûche de bois au niveau du foyer celle-ci s'enflamme instantanément.

Il est le directeur de la construction d'un prototype de four solaire d'une puissance de 50 kW à Mont-Louis dans les pyrénées-Orientales. Puis il dirige celle du four solaire d'Odeillo d'une puissance de 1000 kW. C'est le plus puissant four solaire du monde. Il est utilisé par l'industrie.

Il faut attendre **1954** pour voir la création de la toute première cellule photovoltaïque au silicium. Elle est mise au point par les américains Gerald Pearson, Daryl Chapin et Calvin Fuller, des laboratoires de la Bell Telephone. Mais la technologie mise au point est hors de prix: non seulement elle à un faible rendement mais en plus elle nécessite l'utilisation du silicium très cher à l'époque. Il faut attendre **1958** et l'invention d'une cellule d'un rendement de 8% pour son premier emploi par l'industrie aérospatiale. Le premier satellite équipé de cellules photovoltaïques, Vanguard 1, est donc lancé en **1958**.

### ***I-3 L'exploitation de l'énergie solaire :***

Cette énergie est renouvelable tant que le soleil brillera, soit encore 4,5 milliards d'années, Et, autre avantage, leur utilisation ne rejette pas de gaz à effet de serre.

L'énergie apportée par le solaire apporte théoriquement dans les déserts plus de 10.000 fois l'énergie consommée au monde mais il faut la transformer en énergie utilisable là où elle est demandée. En tenant compte d'une utilisation du sol de 10 %, d'un rendement de 10 % pendant des périodes bien ensoleillées limitées à 30 % du temps, on peut utiliser 0,3 % de cette énergie, ce qui, malgré les pertes en réseau et en stockage, est suffisant. Malheureusement cette énergie est intermittente et loin des zones d'utilisation.

Les objectifs de la construction solaire sont atteints par la mise en place de divers composants et mesures. On fait la distinction entre l'exploitation directe ou active, et l'exploitation indirecte ou passive de l'énergie solaire.[4]

#### ***I-3-1 Exploitation active de l'énergie solaire***

L'exploitation active de l'énergie solaire consiste à se servir de la technologie solaire pour produire directement de l'électricité ou de la chaleur.

Les modules solaires photovoltaïques permettent de produire de l'électricité, tandis que les capteurs solaires thermiques assurent la préparation d'eau chaude sanitaire ou le chauffage d'appoint.

La pose des deux technologies implique l'emploi de composants qui peuvent servir notamment de protection contre les intempéries, d'ombrage, de protection antichute ou de mur antibruit tout en constituant des éléments architecturaux. Un aspect décisif de la construction solaire est l'application des composants techniques solaires au titre d'éléments fonctionnels supplémentaires.[5]



Figure I-5 : maison exploite de l'énergie solaire active

### *I-3-2 Exploitation passive de l'énergie solaire*

Appelée aussi indirecte, l'exploitation passive de l'énergie solaire vise à utiliser le rayonnement naturel du soleil sous forme d'énergie calorifique ou lumineuse par des mesures constructives optimisées. Impliquant la pose de fenêtres et de vitrages spéciaux, cette exploitation est centrée sur l'orientation optimale des bâtiments et des plans du point de vue énergétique, tenant compte du parcours du soleil et de l'ombrage, y compris des variations saisonnières.



Figure I-6 : maison exploite de l'énergie solaire passive

### *I-4-2 L'énergie solaire thermodynamique :*

L'énergie thermique du Soleil permet également de produire de l'électricité par voie thermodynamique. Le principe est identique à celui d'une centrale électrique classique : la production de vapeur ou de gaz à haute pression est turbinée pour être ensuite transformée en électricité. Ce processus nécessite des températures importantes (de 250°C à plus de 1 000°C) que l'on atteint en concentrant la lumière solaire avec des miroirs vers un fluide caloporteur.

Parmi les technologies de concentration majeures peuvent être citées :

- les centrales solaires cylindro-paraboliques avec concentration linéaire, équipées d'auges paraboliques ;
- les centrales solaires à miroirs de Fresnel avec concentration linéaire, équipées de lames de miroirs légèrement incurvées ;
- les centrales solaires à tour avec héliostats renvoyant le rayonnement sur le concentrateur ;
- les paraboles solaires Dish-Stirling avec une concentration ponctuelle, équipées d'un moteur Stirling (moteur à air chaud).

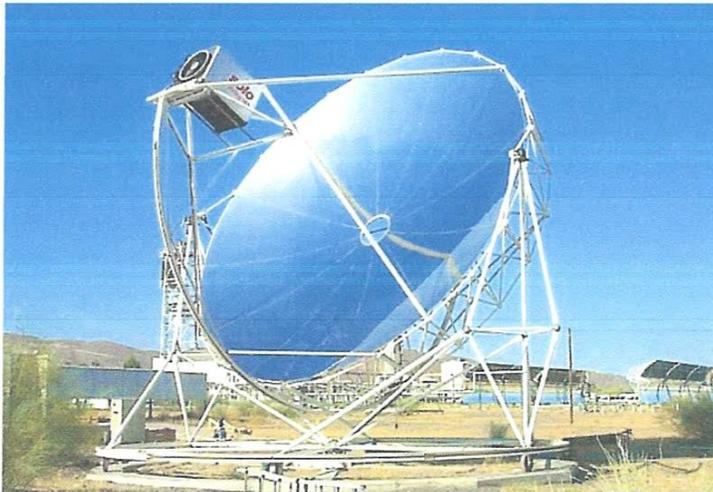


Figure I-10: un capteur parabolique (Dish-Stirling)

### I-4 Type de conversion :

Trois familles de procédés de transformation de l'énergie solaire se distinguent aujourd'hui :

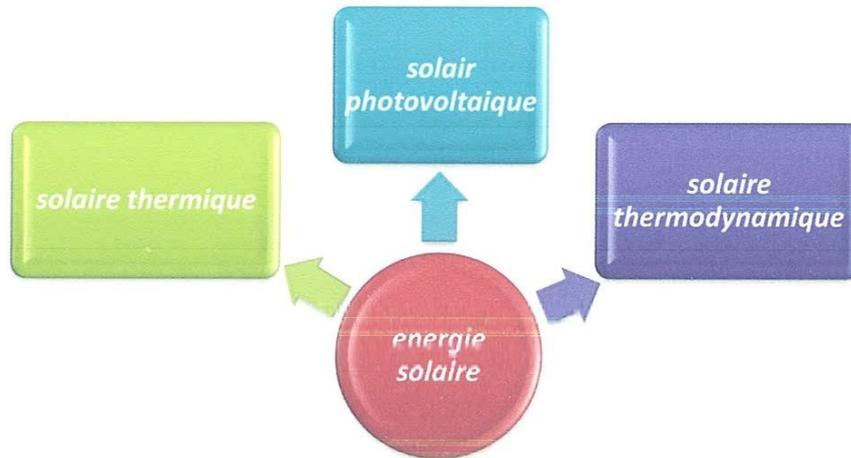


Figure I-7 : types d'exploitation de l'énergie solaire

#### I-4-1 L'énergie solaire thermique :

L'usage du solaire dans des serres est connu depuis longtemps et déjà utilisé en agriculture et dans des parties de maison. Il faut occulter ces vérandas quand le problème est de refroidir plutôt que de chauffer. Des chauffe-eau solaire sur le toit ont besoin d'accumulateurs d'eau avec une bonne isolation calorifique pour garder l'eau chaude jusqu'au lendemain, ou quand on en a besoin.

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire :

- en usage direct de la chaleur : chauffe-eau et chauffages solaires, cuisinières et sécheuses solaires ;
- en usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage : rafraîchissement solaire,
- dessalement, etc.



Figure I-8 : l'exploitation de l'énergie solaire par les tubes thermiques

De fait, elle est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau ou des locaux. On utilise pour cela des capteurs thermiques. Il en existe plusieurs catégories, mais le principe est toujours le même : le capteur thermique absorbe les photons solaires et les transforme en chaleur. Celle-ci est ensuite transmise à un liquide ou à un gaz qui la transporte (le gaz est alors dit « caloporteur ») vers un réservoir de stockage de chaleur.



Figure I-9: les tubes thermiques sur un toit de maison

Elles permettent le stockage d'une partie de l'énergie sous forme de chaleur. Ce stockage permet de diminuer les conséquences de l'intermittence de la ressource solaire en permettant, par exemple, de continuer à produire de l'électricité après le coucher du soleil.

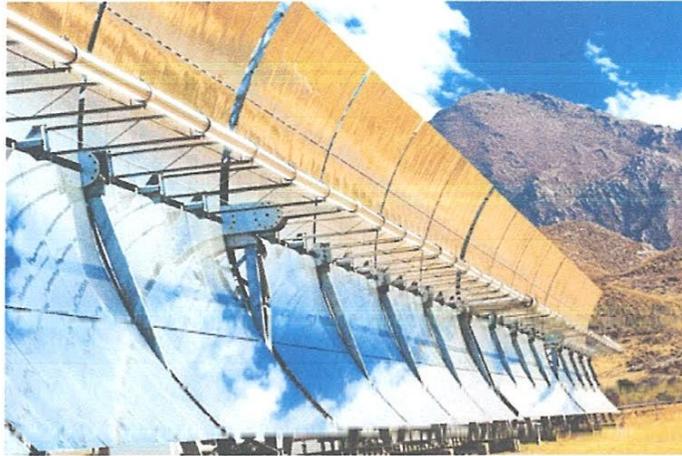


Figure I-11 : une centrale des panneaux cylindro-paraboliques

#### ***I-4-3 L'énergie solaire photovoltaïque :***

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839), ou la technique associée. L'intérêt de cette technique est de convertir l'énergie du Soleil directement en électricité.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire dans une cellule photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, produits à partir d'une matière première de très grande pureté.

Cette forme d'énergie reste aujourd'hui quantitativement limitée ; on lui prédit néanmoins un grand avenir grâce aux progrès attendus, à la baisse des coûts, à sa simplicité et à sa polyvalence. Sans entretien et durable, pouvant fonctionner avec ou sans raccordement à un réseau, elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison (capteurs sur le toit) ou d'une industrie.



Figure I-12: panneau solaire photovoltaïque

La première application est apparue dans le domaine spatial pour les satellites. D'autres secteurs ont ensuite utilisé la technologie photovoltaïque, notamment les télécommunications, le balisage maritime et aérien, l'éclairage domestique et le pompage de l'eau. Mais comme le Soleil n'est pas visible en un point de la Terre 24 heures sur 24, cette application nécessite l'utilisation de batteries ou autres systèmes qui assurent le stockage de l'énergie en vue d'une consommation hors période d'ensoleillement. [6]



Figure I-13: installation multiple des panneaux photovoltaïques

***I-5 Conclusion :***

L'énergie solaire est souvent considérée comme l'énergie de l'avenir : elle est potentiellement inépuisable à échelle humaine, renouvelable et propre. L'enjeu économique est de taille dans un contexte où les prix du charbon, du gaz naturel et du pétrole sont amenés à augmenter avec la diminution irrémédiable à long terme de ces ressources. Ce fort potentiel couplé à la nécessité de réduire les gaz à effet de serre font de l'énergie solaire un axe de développement privilégié aujourd'hui.

# CHAPITRE II

### ***II-1 Introduction :***

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

En effet le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de "voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité »

### ***II-2-Historique de l'énergie photovoltaïque :***

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque [7]

**1839 :** Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

**1875 :** Werner Von Siemens expose devant l'academie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

**1954 :** Trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque.

**1958 :** Une cellule avec un rendement de 9 % ; les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

**1973 :** La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

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

### II-3 Composition des cellules photovoltaïques

De nombreuses cellules photovoltaïques ont vu le jour pour exploiter au mieux la lumière du soleil à travers des panneaux solaires, afin de produire de l'électricité, le silicium, les verres rares, ou le plastique sont employés, mais chaque technologie a des atouts et des faiblesses dans ce domaine prometteur.

Elles sont composées de matériaux semi-conducteurs à base de silicium, de sulfure de cadmium et de tellure de cadmium.

Il y a en effet deux plaques fines (couche inférieure et couche supérieure) pour un contact étroit. La couche supérieure est constituée de silicium et d'autres éléments possédant plus d'électrons qu'une couche de silicium pure. C'est un semi-conducteur de type N. La couche inférieure est constituée de silicium et d'autres éléments possédant moins d'électrons qu'une couche de silicium pure. C'est un semi-conducteur de type P. Pour qu'il y ait une conduction, il faut une jonction des couches P et N qui se fait lors des expositions au soleil et crée donc un courant électrique. [8]

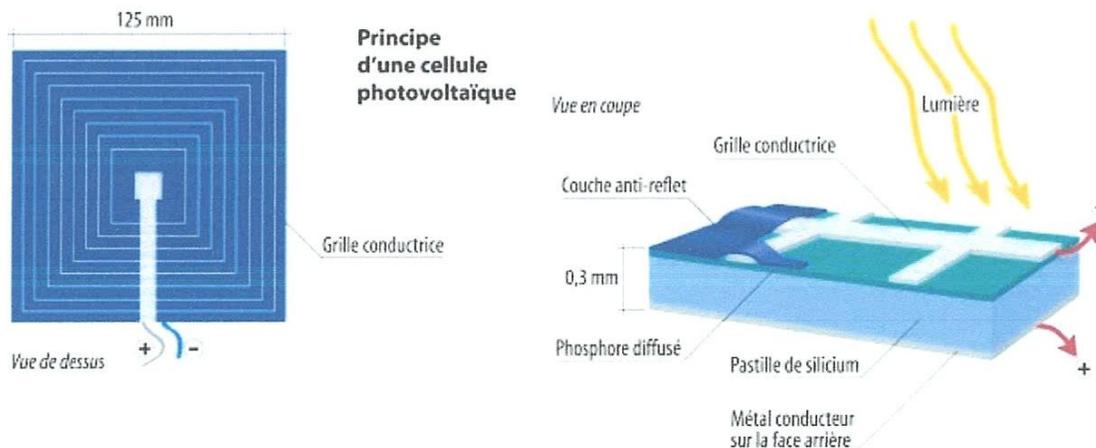


Figure II-1 : composition d'une cellule photovoltaïque

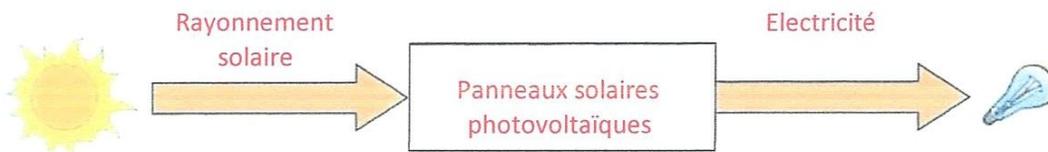
**II-4 Principe de la conversion photovoltaïque :**

Figure II-2 : la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique

Principe de l'énergie solaire photovoltaïque : transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque.

Plusieurs cellules solaires reliées électriquement entre elles et montées sur une structure ou un cadre de support constituent ce que l'on appelle un module photovoltaïque

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 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule. [9]

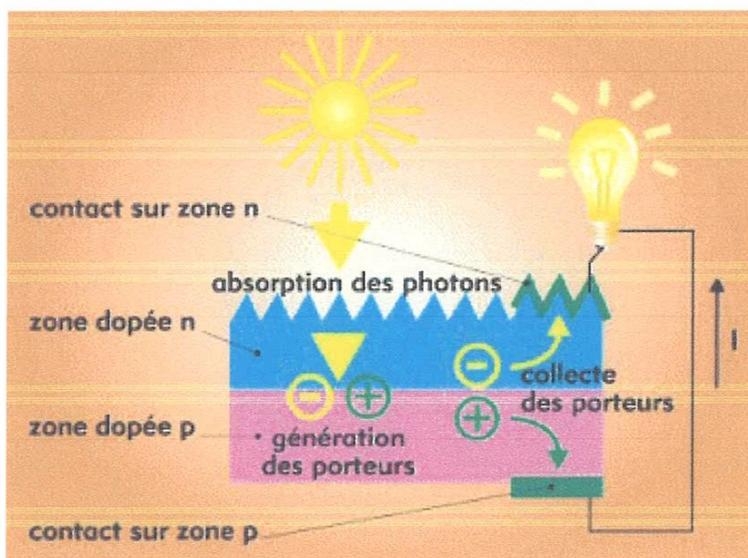


Figure II-3: principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-Conducteur) :

- une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette

Zone est donc dopée positivement (zone P),

- une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium,

Cette zone est donc dopée négativement (zone N). Créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium Et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors Dans la zone P et les électrons chargés négativement dans la zone N. Une différence de Potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle L'effet photovoltaïque à la surface le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit Les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu Foncé.

## ***II-5 Les caractéristiques d'un module PV***

### ***II-5-1 La tension en circuit ouvert***

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucune charge à son borne, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert  $U_{CO}$  ou à vide (elle varie légèrement avec la température et l'éclairement) [10].

### ***II-5-2 Le courant de court-circuit***

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une photopile en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit  $I_{CC}$  . De plus, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, le photo-courant fourni par la cellule est proportionnel à l'intensité lumineuse et à la surface du panneau mis en oeuvre, Ainsi, plus ces deux paramètres seront élevés, plus l'intensité produite sera grande [10].

### ***II-5-3 La puissance maximale***

L'objectif principal de l'utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible, c'est la puissance électrique maximum que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale  $U_m$  et à une intensité maximale  $I_m$ . Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC standard (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête (Wc) [10].

### ***II-5-4 Le rendement***

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit  $S$  la surface du module et  $G$  l'éclairement en W/m<sup>2</sup>. [11]

$$\eta = P_{max}/S * G \quad (II.2)$$

### ***II-5-5 Le facteur de forme***

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule  $P_{max} = I_{mp} * V_{mp}$  et le produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  par la tension de circuit-ouvert  $V_{CO}$  (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_S$  et  $R_{SH}$ . [11]

## ***II-6 Les critères influant sur le rendement de module PV***

Pour que le module photovoltaïque garde toujours un rendement élevé, plusieurs paramètres entrent en jeu et perturbent son fiabilité ou l'inverse, on peut classer ces critères en deux :

### ***II-6-1 L'éclairement***

D'après la formule (I.2), on constate que le rendement dépend de l'éclairement, ce facteur est variable le long de la journée et ne peut agir pour l'augmenter, la meilleure solution est de choisir un endroit de forte ensoleillement pour exposer les modules.

### ***II-6-2 La température de fonctionnement***

L'augmentation de la température influe directement sur le comportement de la photopile, elle engendre la diminution de la tension de l'ordre de 2 mV par degré, cette augmentation se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible, donc, sur le rendement de la cellule.

### ***II-7 Technologies des cellules photovoltaïques :***

Les panneaux photovoltaïques ne sont pas tous constitués et fabriqués de la même manière. Les facteurs variables sont la qualité et la composition des différents matériaux, le rendement et le prix d'achat. [12]

#### ***II-7-1 Les cellules monocristallines :***

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération. Leur méthode de fabrication tient à partir d'un bloc de silicium cristallisé que l'on cristallise en un seul bloc. Vu de près, les cellules ont une couleur assez sombre et uniforme, une forme ronde ou carrée selon les modèles.

Pour produire une cellule en silicium monocristallin il faut un matériau semi conducteur absolument pur. Les barreaux monocristallin sont extraits du silicium fondu, puis scies en fines plaques, ce processus de production garantie un niveau d'efficacité relativement élevé.

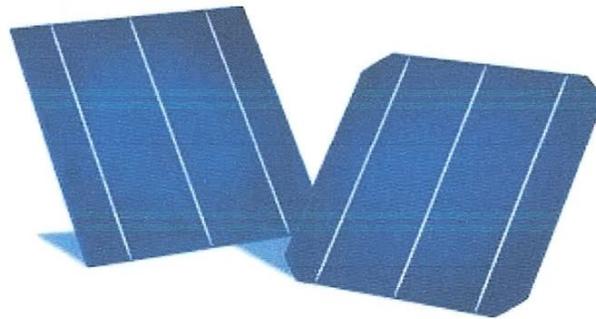


Figure II-4 : cellule PV monocristalline

### II-7-2 Les cellules poly cristallines :

Les cellules poly cristallines sont formées à partir du refroidissement du silicium dans une lingotière, le bloc de silicium cristallisé forme des petits cristaux multiples et de différentes formes. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté mais pas uniforme car on peut distinguer différentes orientations de cristaux et des tonalités de couleur elles aussi diverses.

La production de cellules poly cristallines est plus rentable, au cours de ce processus, du silicium liquide est versé dans des blocs qui sont ensuite sciés en plaques. Durant la solidification du matériau, des structures en cristal de différentes tailles sont se forment, en bordure desquelles des défauts apparaissent, la cellule solaire est rendue moins efficace par ces défauts dans le cristal

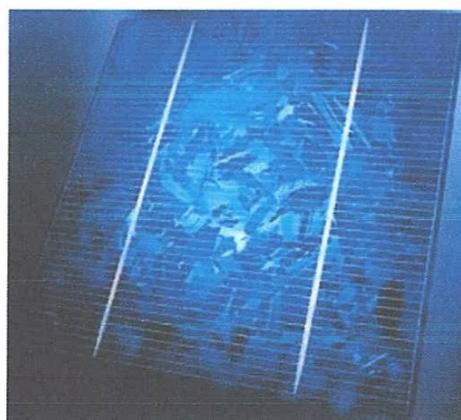


Figure II-5: cellule PV poly cristalline

### II-7-3 Les cellules amorphes :

Les cellules amorphes sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique. Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz qui est projeté en fine couche sur ces support (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). La cellule est d'aspect uniforme et gris/marron très foncée.

Si une couche de silicium est déposée sur du verre ou un autre matériau de substrat, on obtient ce que l'on appelle une cellule amorphe ou a couche mince, donc les couts de la production sont moins élevés en raison du faible cout des matériaux, toute fois les cellules amorphes sont moins efficaces que les deux autres types de cellules. C'est la raison pour laquelle elles ont principalement été utilisé pour les équipements de faible puissance (montre, calculatrice de poche) ou en élément de façade mais désormais elles sont également utilisé dans les fermes de classe mégawatt.

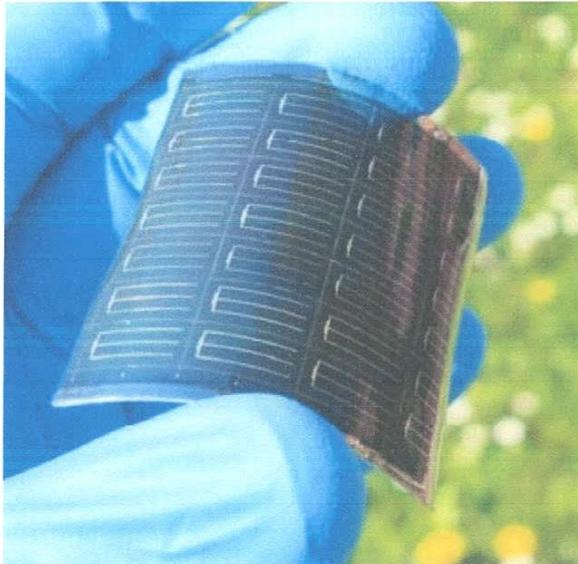


Figure II-6 : cellule PV amorphe

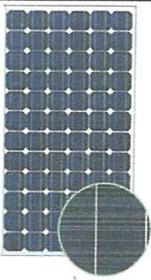
Technologie	Monocristallin	Polychristallin	Amorphe
Cellule et module			
	<p>-Très bon rendement : 14 à 20 %.</p> <p>-Durée de vie : importante (30 ans)</p> <p>-Coût de fabrication : élevé.</p> <p>-Puissance : 100 à 150 Wc/m<sup>2</sup>. 7 m<sup>2</sup>/kWc.</p> <p>-Rendement faible sous un faible éclairement.</p> <p>-perte de rendement avec l'élévation de la température.</p> <p>-Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal</p> <p>-Couleur bleue uniforme.</p>	<p>-Bon rendement : 11 à 15 %.</p> <p>-Durée de vie : importante (30 ans)</p> <p>-Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins</p> <p>-Puissance : 100 Wc/m<sup>2</sup>. 8 m<sup>2</sup>/kWc.</p> <p>-Rendement faible sous un faible éclairement.</p> <p>-perte de rendement avec l'élévation de la température.</p> <p>-Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux.</p> <p>-Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux.</p>	<p>-Rendement faible : 5 à 9 %.</p> <p>-Durée de vie : Assez importante (20 ans)</p> <p>-Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies</p> <p>-Puissance : 50 Wc/m<sup>2</sup>. 16 m<sup>2</sup>/kWc.</p> <p>-Fonctionnement correct avec un éclairement faible.</p> <p>-Peu sensible aux températures élevées.</p> <p>-Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.</p> <p>-Utilisables en panneaux souples.</p> <p>-Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium</p> <p>Rendement faible en plein soleil.</p> <p>-Performances diminuant avec le temps</p>
Part de marché	43 %	47 %	10

Tableau II-1 : les différentes caractéristiques des modules photovoltaïques

## II-8 Module solaire ou photovoltaïque :

### II-8-1 Association des cellules en série :

Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont généralement insuffisantes pour alimenter les équipements électriques. Il faut associer les cellules en série pour obtenir une tension plus importante : le module solaire ou panneau photovoltaïque.[13]

Un panneau photovoltaïque est un assemblage en série de cellules permettant d'obtenir une tension de 12 volts.

La puissance d'un panneau solaire est fonction de sa surface, c'est à dire du nombre de cellules photovoltaïques.

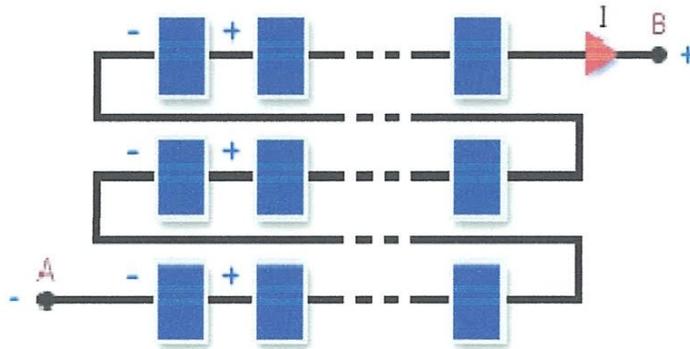


Figure II-7 : Association des cellules en série

La mise en série des cellules peut être dangereuse lorsque l'une d'entre elles se retrouve à l'ombre. Elle va s'échauffer et risque de se détruire.

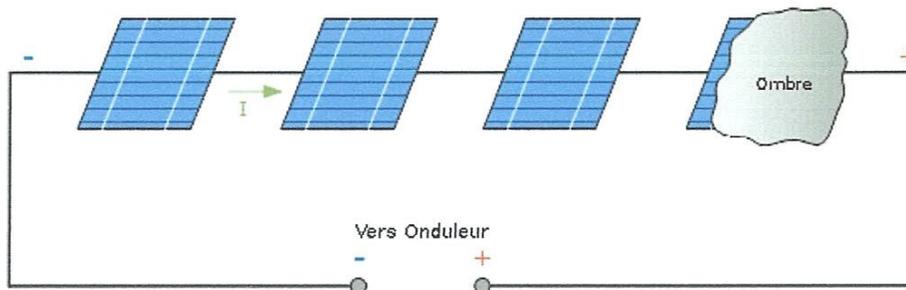


Figure II-8: l'une des cellules en série se trouve à l'ombre

Comme solution une diode dite bypass est mise en parallèle avec chaque cellule afin que le courant circule même si une ou plusieurs cellules sont endommagés.

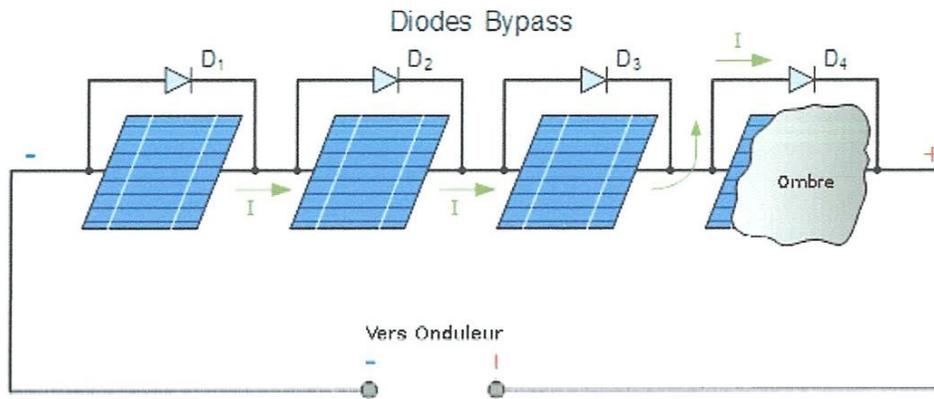


Figure II-9 : l'installation des diodes sur chaque cellule

### II-8-2 Association des cellules en parallèle :

Les chaînes sont ensuite associées en parallèle et forment un champ photovoltaïque (champ PV)

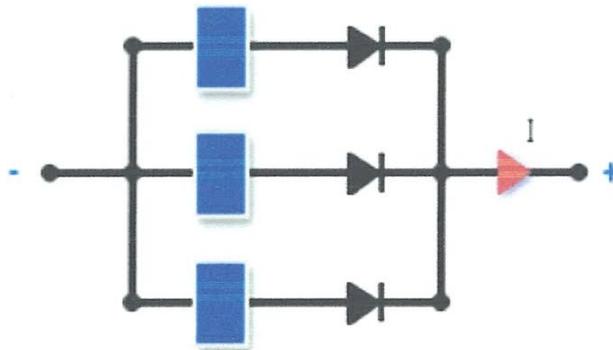


Figure II-10 : Association des cellules en parallèle

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

### II-9 systèmes photovoltaïques avec batterie

Un système photovoltaïque avec batterie peut être comparé à une charge alimentée par une batterie qui est chargée par un générateur photovoltaïque.

Il comprend généralement les composants de base suivant :

- Le champ de module PV charge la batterie en période d'ensoleillement
- La batterie alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique
- La diode anti retour évite la décharge de la batterie à travers les modules PV et inclut habituellement une protection contre les décharges profondes de la batterie.

### II-10 systèmes photovoltaïques sans batterie

Les systèmes photovoltaïques sans batterie servent habituellement à alimenter une charge unique, comme une pompe ou un ventilateur, à laquelle convient mieux une autre forme de stockage d'énergie que l'électricité (par exemple : réservoir d'eau surélevé) ou encore qui a besoin d'énergie pendant le jour seulement (par exemple : ventilateur)

### II-11 Les différentes installations photovoltaïques :

Le Panneaux photovoltaïque composée de 4 éléments principaux qui peuvent être installés en plein air, en toiture ou en façade de bâtiment. [15]

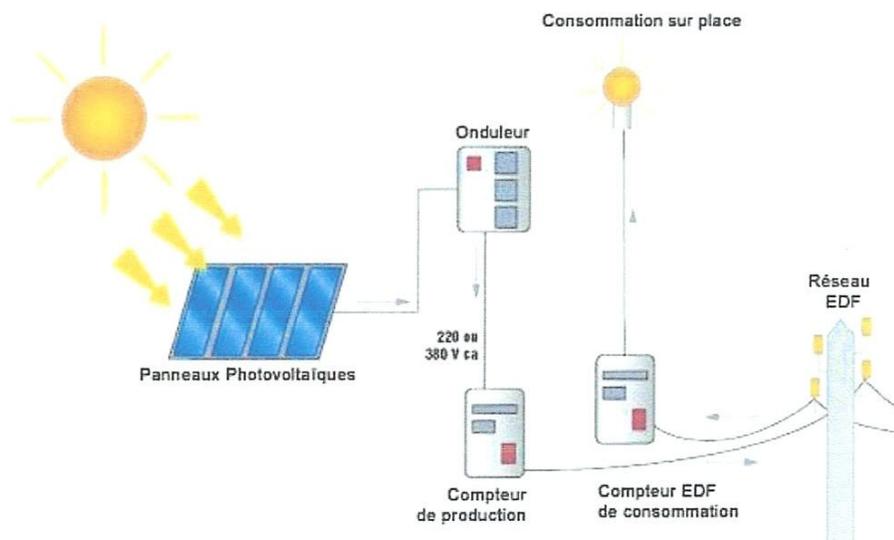


Figure II-11: l'installation d'un panneau photovoltaïque

### ***II-11-1 panneaux photovoltaïques :***

Leur particularité est qu'ils produisent constamment de l'électricité quand ils sont soumis à la lumière. Seule une occultation permet d'éviter cette production en plein jour.

### ***II-11-2 L'onduleur :***

Il transforme le courant continu en courant alternatif. C'est sur cet appareil que l'on retrouve un interrupteur-sectionneur général et un disjoncteur en sortie onduleur permettant de couper l'alimentation après l'onduleur.

### ***II-11-3 Les compteurs :***

Ils sont au nombre de 2 pour les installations raccordées au réseau, l'un mesure l'électricité vendue au réseau, l'autre l'électricité consommée par le réseau.

L'électricité produite est dans la grande majorité des cas intégralement revendue au réseau. Elle peut également être intégralement consommée ou stockée sur batterie (cas des bâtiments isolés en montagne par exemple), ou partiellement consommée. le surplus étant revendu au réseau.

### ***II-11-4 Les câbles (conducteurs) :***

Ils font le lien entre les panneaux, les onduleurs et les compteurs.

### ***II-12 Les avantages d'un panneau photovoltaïque :***

- L'énergie photovoltaïque peut être installée partout, même en ville.
- L'énergie photovoltaïque est renouvelable et gratuite.
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voire de générer des revenus.
- Le contrat d'achat est conclu pour une durée de 20 ans.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.

L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de son propriétaire. [16]

Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

### ***II-13 Les inconvénients d'un panneau photovoltaïque :***

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé
  - Le rendement réel de conversion d'un module est faible
  - Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système augmente
  - Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante
  - Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans).
- [16].

### ***II-14 Conclusion :***

L'énergie électrique photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens d'un panneau solaire. Un panneau solaire est constitué de plusieurs cellules montées en série, en parallèle, ou mixte, ces cellules sont soit de types mono soit de type poly-cristalline ou amorphe. Généralement la cellule est une diode à jonction PN qui a pour caractéristique (rendement, facteur de forme, courant, tension, puissance, etc...). L'éclairement et la température sont des paramètres influant sur le rendement d'un panneau solaire.

Les panneaux solaires sont une solution pour les endroits isolés, non raccordés au réseau électrique et pour rendre des installations autonomes. L'énergie solaire peut également s'avérer très avantageuse dans le cas d'installations chez des particuliers. Cependant, les panneaux solaires ne sont actuellement pas rentables pour une production à grande échelle, à cause de nombreuses limites et des autres sources d'énergie plus avantageuses telles que le nucléaire. Les panneaux solaires sont donc parfaits pour compléter les besoins énergétiques.

L'énergie solaire est toutefois une solution d'avenir qui vaut le coup d'être exploitée au maximum, d'autant plus que de nombreuses améliorations sont encore possibles.

# CHAPITRE III

### **III-1 Introduction :**

Dans ce chapitre, nous allons définir un modèle simple et applicable aux cellules photovoltaïques. L'objectif est de trouver un modèle simple et adaptable avec différents modules de constructeurs.

Ce modèle doit être modélisé de telle façon que tous les paramètres soit facilement calculés, et en évitant le plus possible des équations complexes.

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. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques dans la littérature ont été développés, dont le but est l'obtention d'une caractéristique  $I(V)$  la plus performante possible.

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension. Ces paramètres ne sont pas généralement de quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication.

En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations V-I a divers point de fonctionnement donnés par le constructeur ou issues de la mesure directe sur le module.

La modélisation de ces dernières s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs. Leur différences se situent principalement dans le nombre de diode, la résistance shunt finie ou infinie, le facteur d'idéalité constant ou non, ainsi que les méthodes numérique utilisées pour la détermination des différents paramètres inconnus

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles dont les précisions restent tributaires de la modélisation mathématiques des différents phénomènes physiques intrinsèques intervenant dans le processus de production d'électricité. Dans la plupart des travaux de la littérature, on trouve principalement le modèle équivalent à quatre paramètres basé sur la modélisation mathématique de la courbe tension-courant.

### III-2 Modélisations des cellules PV :

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 leur réalisation. 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.

On représentera deux modèles à savoir [17] :

- Modèle à une diode (ou exponentielle simple)
- Modèle à deux diodes (ou double exponentielle)

Tous les deux sont basés sur l'équation de diode bien connue de Shockley.

Nous avons étudié un module *Kyocera KC200GT* présenté sur le tableau III-1.

Grandeurs	valeur
Puissance nominale	200 W
Tension MPP ( $V_{mp}$ )	26.3 V
Courant au MPP ( $I_{mp}$ )	7.61 A
Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	8.21 A
Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )	32.9 V
Coefficient du rendement $\varepsilon$ de la température	0,0049 %
Facteur de forme ( $FF$ )	1.8736
Nombre de cellules en série ( $N_s$ )	54
Nombre de cellules en parallèle ( $N_p$ )	1
Coefficient de sensibilité de la tension à la température $\mu_{c0}$ ( $ki$ )	-123 mV/K
Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température $\mu_{cc}$ ( $kv$ )	+3.18 mA/K

III-1 Tableau : caractéristique du module *Kyocera KC200GT*

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque seront décrites comme suit :

- Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) fournit par chaque cellule est :

$$I_{cc}(cellule) = I_{cc}/N_p$$

- La tension du circuit ouvert ( $V_{co}$ ) de chaque cellule est :

$$V_{co}(cellule) = V_{co}/N_s$$

- Le courant maximal de chaque cellule est :

$$I_{mp}(cellule) = I_{mp}/N_p$$

- La tension maximale de chaque cellule est :

$$V_{mp}(cellule) = V_{mp}/N_s$$

- La puissance maximale de chaque cellule est :

$$P_{max}(cellule) = I_{mp}(cellule) \cdot V_{mp}(cellule)$$

- La résistance série de chaque cellule est :

$$R_s(cellule) = N_p/N_s \cdot R_s(module)$$

- La résistance shunt de chaque cellule est :

$$R_{sh}(cellule) = N_p/N_s \cdot R_{sh}(module)$$

### III-3 Les types des modèles :

Selon plusieurs paramètres données par le constructeur ou le fabricant d'un module solaire on peut créer un modèle théorique d'une cellule PV, qui dépend aussi de l'usage que l'on veut en faire. Et pour choisir le modèle adéquat il faut comparer les différents modèles théoriques à l'aide de logiciels et programme de simulation.

La validité du modèle influe directement sur le choix du modèle (la différence entre les résultats du modèle théorique et les résultats expérimentaux du module).

**III-3-1 Modèle à 2 paramètres :**

Le modèle le plus simple d'une cellule PV est montré comme un circuit équivalent figure (III-1), constitué d'une source de courant idéale en parallèle avec une diode idéale. La source de courant représente le courant produit par les photons (souvent désignés par  $I_{ph}$  ou  $I_L$ ), et sa production est stable sous température et irradiation incidente constante [19].

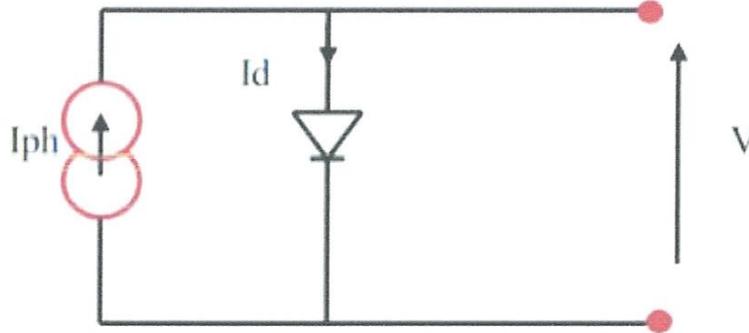


Figure III-1 : modèle à deux paramètres

Les critères les plus connus d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit  $I_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , leur valeurs étant posées comme des données dans les fiches techniques des fabricants.

De la figure III-1 lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff on obtient

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{III-1})$$

Ou

$I$  : Courant fourni par la cellule [A]

$I_{ph}$  : Le courant photonique qui est estimé par  $I_{cc}$

$I_d$  : Le courant parallèle par la diode

La valeur du courant de la diode est donnée par l'équation de shockley suivant :

$$I_d = I_{sat} \left( e^{\frac{qV_d}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{III-2})$$

Ou

V : la tension de sortie (Tension à la borne de la cellule) [volts]

$I_0$ : le courant inverse de saturation [ampères]

q : la constante de charge d'électron,  $1.602 \cdot 10^{-19}$  C

K : la constante de Boltzmann,  $1,381 \cdot 10^{-23}$  J/K

n : le facteur de qualité de la diode

T: La température de la jonction PN (K) .

Si on pose que la diode est idéale alors  $n = 1$  la relation (III-2) devient .

$$I_d = I_{sat} \left( e^{\frac{qV_d}{KT}} - 1 \right) \quad (\text{III-3})$$

De l'équation (III-1), (III-3) et par identification on trouve

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{\frac{qV_d}{KT}} - 1 \right) \quad (\text{III-4})$$

Les deux paramètres de ce modèle sont  $I_{ph}$  et  $I_{sat}$

### III-3-2 Modèle 3 paramètres :

Il est presque identique au premier, à la seule différence que le facteur de qualité de la diode n, sera différent de 1 ( $n \neq 1$ ).

L'équation (III-4) sera :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{\frac{qV_d}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{III-5})$$

Est les 3 paramètres de ce modèle sont n,  $I_{ph}$ .et  $I_{sat}$ .

### III-3-4 Modèle à 4 paramètres :

La figure ci-dessous représente un modèle à 4 paramètres :

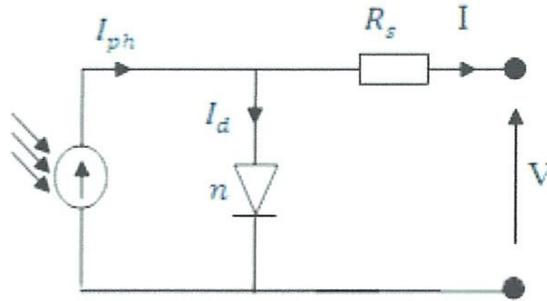


Figure III-2 : modèle à 4 paramètres

Dans ce modèle on ajoute la résistance série  $R_s$  comme 4eme paramètre. [20-21]

$R_s$  : représente la résistance des connexions et  $V_d$  sera :

$$V_d = V + IR_s$$

Alors

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{q \frac{V + IR_s}{nkT}} - 1 \right) \quad (\text{III-6})$$

Dans les conditions normales d'éclairement ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) et de température ( $25^\circ\text{C}$ ).

$$\frac{KT}{q} = 26 \text{ mv}$$

$$K = 1.38 * 10^{-23} \text{ j /}^\circ\text{k}$$

$$T = 25 + 273 = 298 \text{ k}$$

$$e = 1.16 * 10^{-19} \text{ C}$$

Alors la relation (III-4) va être défini comme suite :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{\frac{V + IR_s}{n * 0.026}} - 1 \right) \quad (\text{III-7})$$

**III-3-5 Modèle à 5 paramètres :**

C'est le modèle le plus cité dans la littérature, le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent (figure III-3) qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt  $R_{sh}$  est une conséquence de l'état de surface de la cellule, une résistance série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contacte et de connexions, une diode en parallèle qui modélise la jonction PN [22].

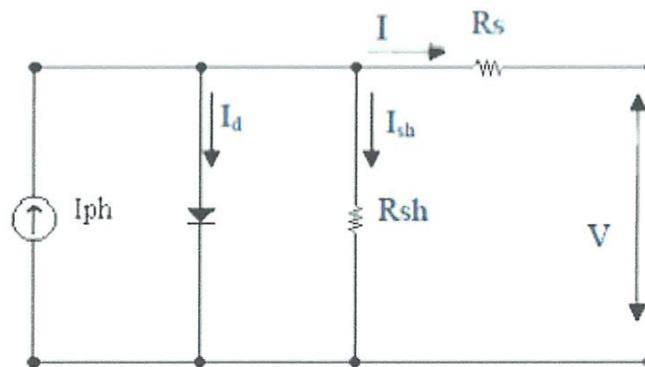


Figure III-3 : modèle à 5 paramètres

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{III-8})$$

De l'équation (III-2) et (III-8) on obtient :

$$I = I_{ph} - I_{sh} - I_{sat} \left( e^{\frac{qV_d}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{III-9})$$

**III-3-6 Modèle à double diode :**

Le module photovoltaïque est représenté par son schéma électrique équivalent (Figure. III-4) qui se compose d'une source de courant modélisent le flux lumineux, les pertes sont modélisé par deux résistances, une résistance shunt  $R_{sh}$ , une résistance série  $R_s$  et deux diodes pour la polarisation de la cellule et le phénomène de la recombinaison des porteurs minoritaires. [23]

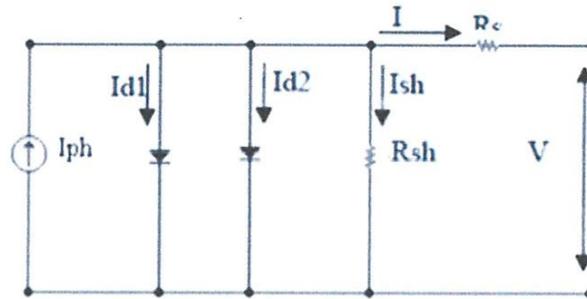


Figure III-4 : modèle à double diode

$$I = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \tag{III-10}$$

$I_{d1}$  Et  $I_{d2}$  sont les courants des diodes.

$$I = I_{ph} - I_{sh} - (I_{d1} + I_{d2}) \tag{III-11}$$

$$\begin{cases} I_{d1} = I_{sat1} \left( e^{\frac{qV}{n_1KT}} - 1 \right) \\ I_{d2} = I_{sat2} \left( e^{\frac{qV}{n_2KT}} - 1 \right) \end{cases} \tag{III-12}$$

$$I = I_{ph} - \frac{V - R_s I}{R_{sh}} - I_{sat1} \left( e^{\frac{q(V - R_s I)}{n_1KT}} - 1 \right) - I_{sat2} \left( e^{\frac{q(V - R_s I)}{n_2KT}} - 1 \right) \tag{III-13}$$

**III-4 modélisation d'un modèle à 4 paramètres :**

**III-4-1 Essai en court-circuit :**

Si on court-circuite une cellule photovoltaïque on obtient une tension de sortie nulle est une valeur de : [22]

$$I_{cc} = I_{ph}$$

Si on remplace ces valeurs dans l'équation (III-6) on obtient :

$$I = I_{cc} - I_{sat} \left( e^{q \frac{I_{cc} R_s}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{III-14})$$

#### III-4-2 Essai en circuit ouvert :

L'essai en circuit ouvert nous donne un courant nul est une tension de circuit ouvert  $V_{c0}$

Si on remplace ces valeurs dans l'équation (III-6) on obtient :

$$I = I_{cc} - I_{sat} \left( e^{q \frac{V_{c0}}{nKT}} - 1 \right) = 0 \quad (\text{III-15})$$

#### III-4-3 Le point de la puissance max :

Pour une puissance max donnée par la cellule photovoltaïque on a les valeurs de  $I_{mp}$  et  $V_{mp}$

Tel que :

$$P_{max} = I_{mp} \cdot V_{mp}$$

On remplace les valeurs correspondent à la puissance max dans l'équation (III-6) on obtient :

$$I_{mp} = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{q \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{III-16})$$

#### III-4-4 Calcul des paramètres :

##### III-4-4-1 Calcul du courant de la saturation de la diode :

Dans l'essai en circuit-ouverte  $I = 0$  se qui conduit à un courant de saturation de la diode

égal à :

$$I_{sat} = \frac{I_{cc}}{\left( e^{q \frac{V_{c0}}{nKT}} - 1 \right)} \quad (\text{III-17})$$

##### III-4-4-2 Le courant photonique :

Il définit la quantité des paires électron-trou créé par G, qui traverse la jonction sans recombinaison. [22]

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left( I_{ph_{ref}} - \mu_{cc} \left( T_c - T_{c_{ref}} \right) \right) \quad (\text{III-18})$$

**III-4-4-3 calcul de la résistance série :**

Dans une cellule PV réelle, il y a une résistance série dans le chemin du courant qui traverse le matériau semi-conducteur, la grille du métal et les différents contacts. Ces pertes sont réunies comme une résistance série  $R_s$ , son effet devient très remarquable dans un module PV qui se compose de plusieurs cellules connectées en série, et la valeur de la résistance est multipliée par le nombre des cellules [23].

La résistance série peut être calculée par la relation suivante [109] :

$$R_s = - \left. \frac{dv}{dI} \right|_{V_{co}} - \frac{nkT/q}{I_{sat} e^{\frac{qV_{co}}{nkT}}} \quad (\text{III-19})$$

Après dérivation et résolution au point  $V_{co}$  de l'équation (III-6) on obtient l'équation (III-19).

**III-4-4-4 le facteur de qualité de la diode n :**

Le facteur de qualité de la diode ( $n$ ) est inconnu et doit être estimé par l'équation suivante :

$$n = \frac{v_{co} * q}{K * T * N_s * \log\left(\frac{I_{cc}}{I_{sat} T_r} + 1\right)} \quad (\text{III-20})$$

Généralement il prend une valeur entre 1 et 2, la valeur de  $n=1$  (pour la diode idéale) [24].

**III-4-4-5 calcul de la résistance shunte :**

Celle-ci s'appelle également la résistance shunt. L'existence de fissures et de défauts de structure complexe devient le siège de phénomène physique assimilable à une résistance  $R_p$ , qui apparaît en parallèle sur le schéma électrique.

Cette résistance parallèle est liée directement aux processus de fabrication, son effet est beaucoup moins remarquable dans un module PV comparé à la résistance série, il deviendra seulement apparent quand un certain nombre de modules PV sont reliés en parallèle pour un grand système [24].

### III-5 L'influence des 2 critères sur la modélisation d'un panneau PV

#### III-5-1 module PV a éclairement et température constante

##### III-5-1-1 Caractéristique courant-tension (I-V) :

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire type *Kyocera KC200GT* Polycristallin d'un nombre de cellule ( $N_s=54$ ) définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante figure (III-5) et (III-6). [25]

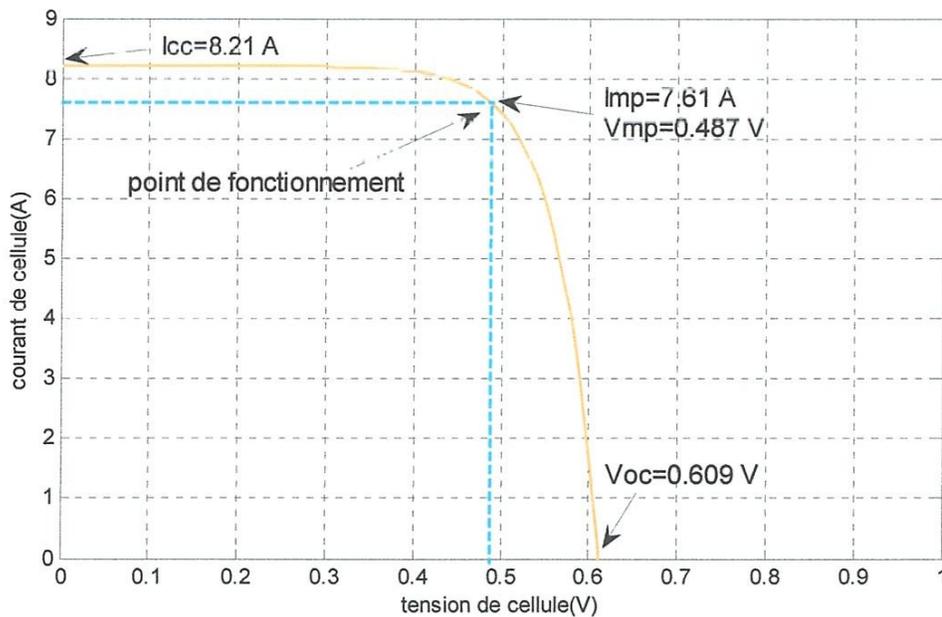


Figure III-5 : Caractéristique I(V) d'une cellule,  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

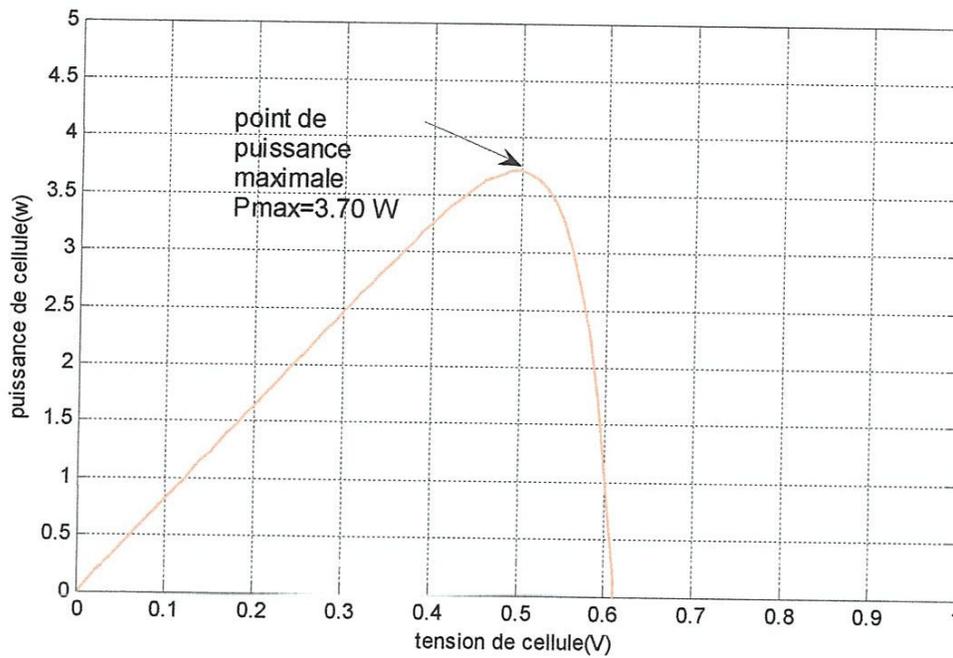


Figure III-6 : Caractéristique  $P(V)$  d'une cellule,  $G=1000 \text{ w/m}^2$

La figure (III-7), (III-8) représente la caractéristique courant tension  $I(V)$  et puissance-tension  $p(V)$  d'un module solaire pour les mêmes conditions

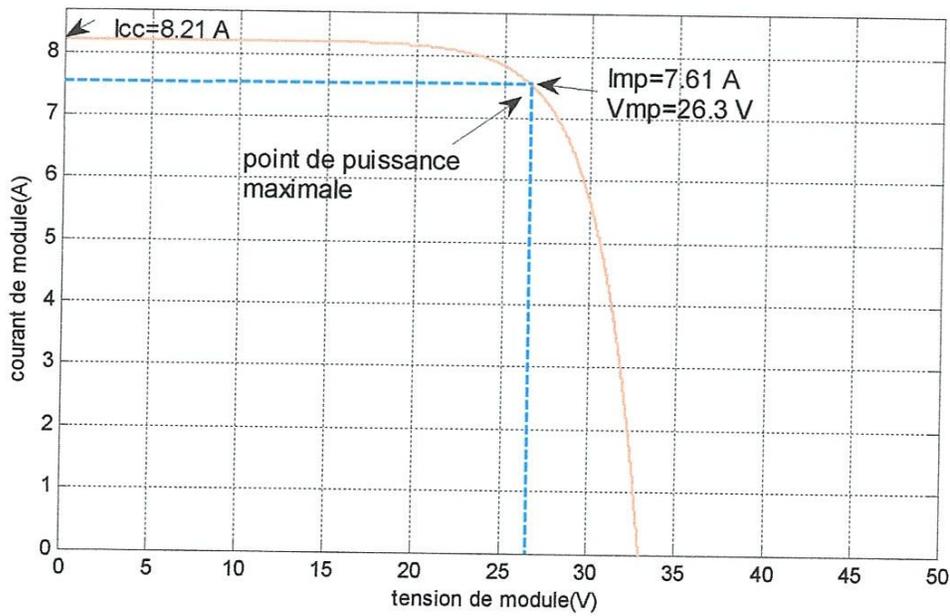


Figure III-7 : Caractéristique  $I(V)$  d'un module,  $T=25^\circ\text{C}$ .

- **Les commentaires :**

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

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

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

### ***III-5-2 modules PV à éclairement et température variable :***

Afin de constater l'influence des conditions externes, de l'éclairement et la température sur la caractéristique (I-V) et (P-V) nous avons adopté la méthode suivante :

- Pour visualiser l'effet de l'éclairement, on fixe la température ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) et on fait varier l'éclairement.
- Pour un éclairement constant ( $G=1000 \text{ w/m}^2$ ), nous ferons varier la température

#### ***III-5-2-1 éclairements :***

##### ***III-5-2-1-1 l'influence de l'éclairement sur la caractéristique (I-V) :***

En faisant varier l'éclairement entre 200 et 1000 avec un pas de 200, la caractéristique (I-V) est donnée par la figure (III-10) et (III-11)

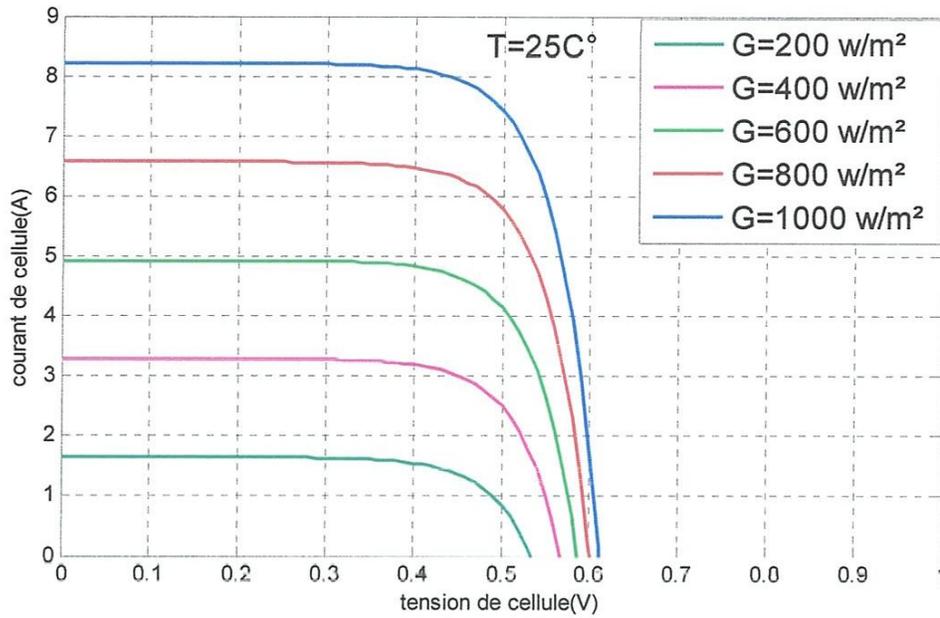


Figure III-10 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique (I-V) d'une cellule

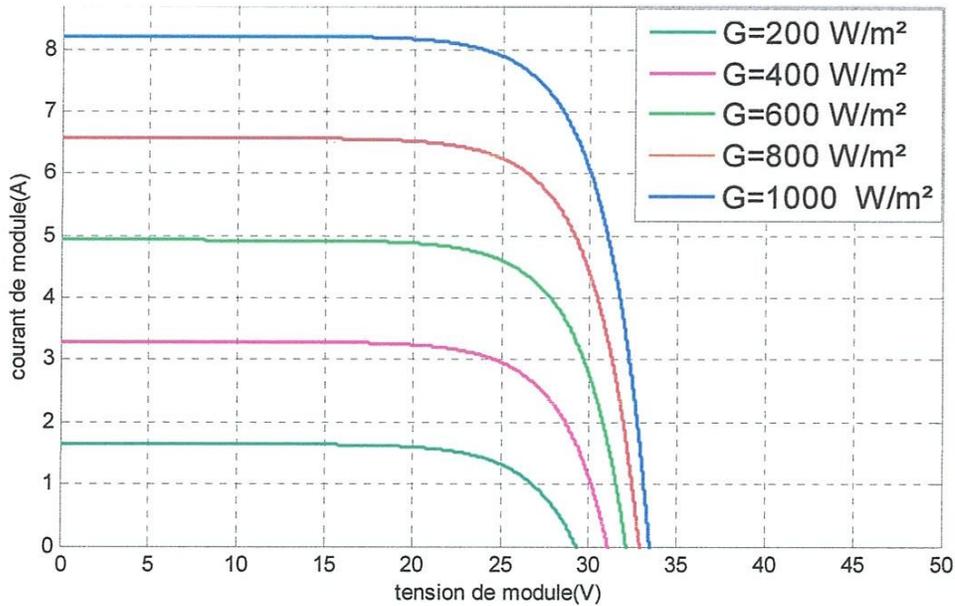


Figure III-11 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique (I-V) d'un module

- **Les commentaires :**

-On remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement et une faible diminution de la tension de circuit ouvert.

-Le photo-courant est proportionnel à l'éclairement aux flux lumineux

-Ainsi la puissance optimale est proportionnelle à l'éclairement

### III-5-2-1-2 l'influence de l'éclairement sur la caractéristique (P-V) :

En faisant varier l'éclairement entre 200 et 1000 avec un pas de 200, la caractéristique (P-V) est donnée par la figure (III-12) et (III-13)

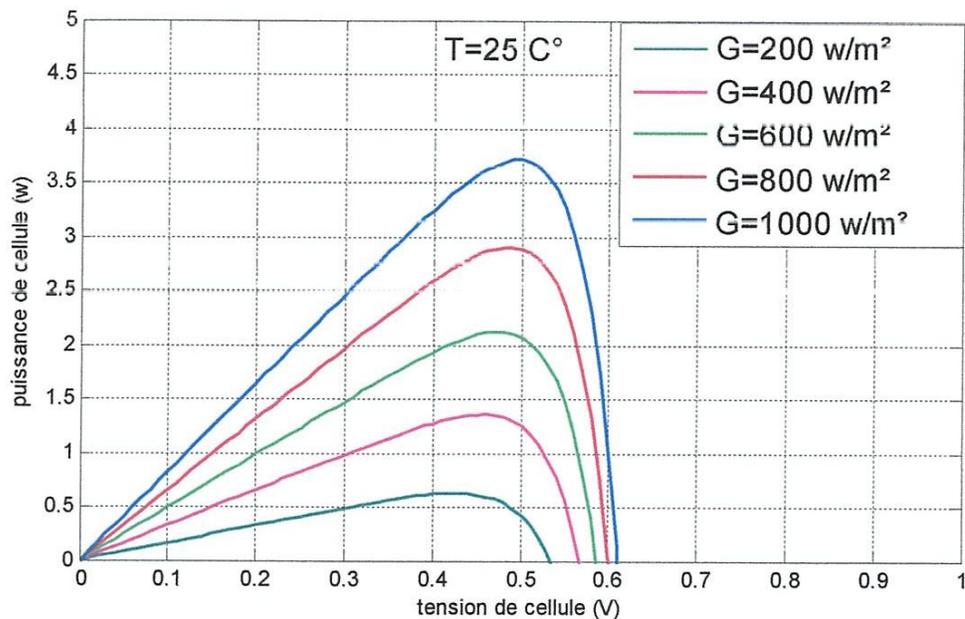


Figure III-12 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique (P-V) d'une cellule

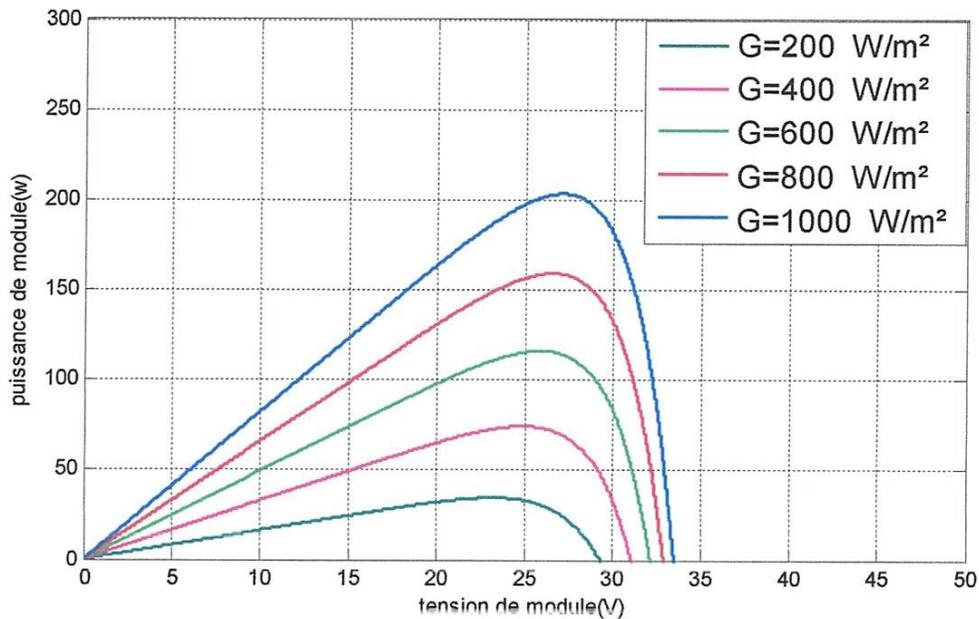


Figure III-13 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique (P-V) d'un module

- **Les commentaires :**

-On remarque que l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension de circuit ouvert.

-L'éclairement est un facteur influant sur le courant et la tension, aussi puisque  $P = V * I$  on remarque une influence très apparente sur la courbe P (V) La valeur de  $P_{max}$  diminue lorsque G diminue.

### III-5-2-1-3 l'influence de la température sur la caractéristique (I-V) :

En faisant varier la température, la caractéristique (I-V) est donnée par la figure (III-14) et (III-15)

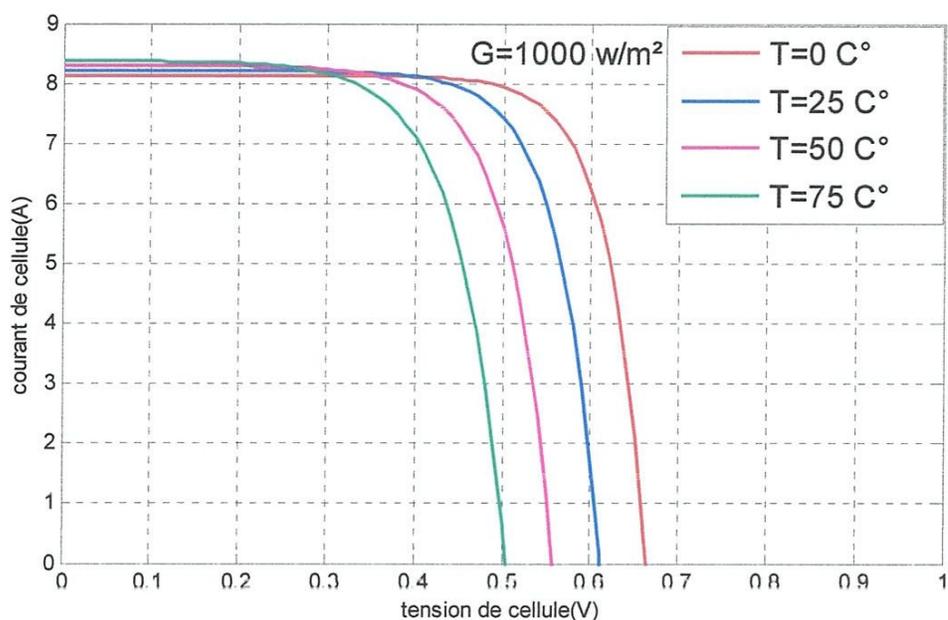


Figure III-14 : l'influence de la température sur la caractéristique (I-V) d'une cellule

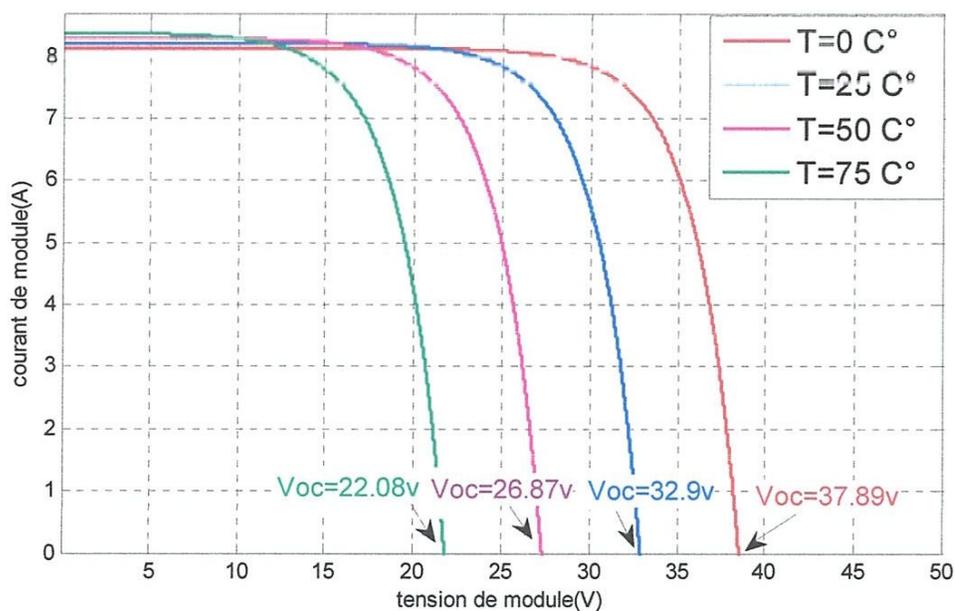


Figure III-15 : L'influence de la température sur la caractéristique (I-V) d'un module

- **Les commentaires :**

- On a vu que l'éclairement influe sur la caractéristique I-V mais il n'est pas le seul facteur influant puisque la température influe aussi sur la caractéristique I-V.

-la tension du circuit ouvert diminue contrairement au courant de court-circuit qui reste presque constant.

#### III-5-2-1-4 l'influence de la température sur la caractéristique (P-V) :

En faisant varier la température, la caractéristique (P-V) est donnée par la figure (III-16) et (III-17)

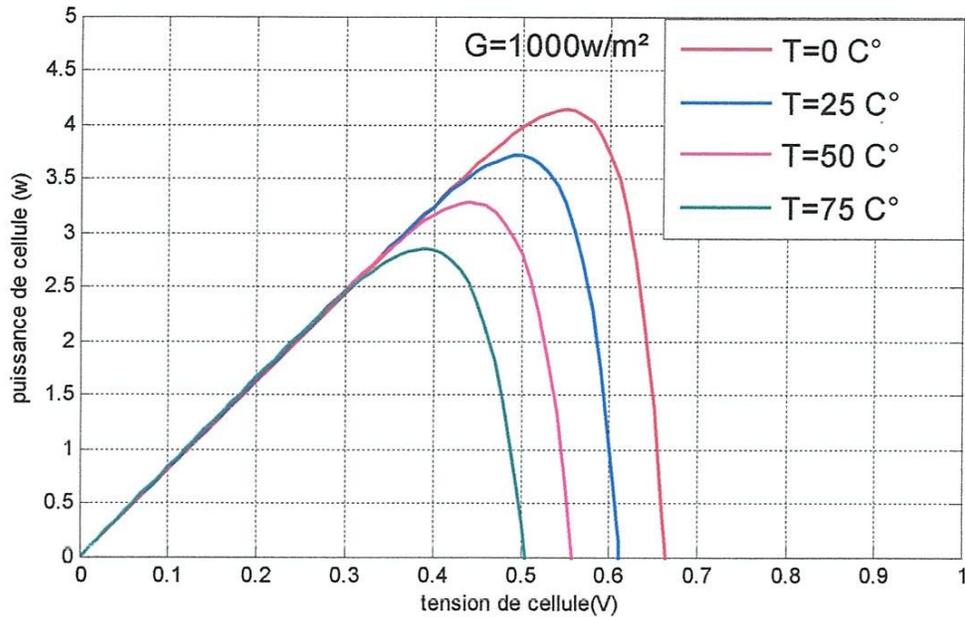


Figure III-16: L'influence de la température sur la caractéristique (P-V) d'une cellule

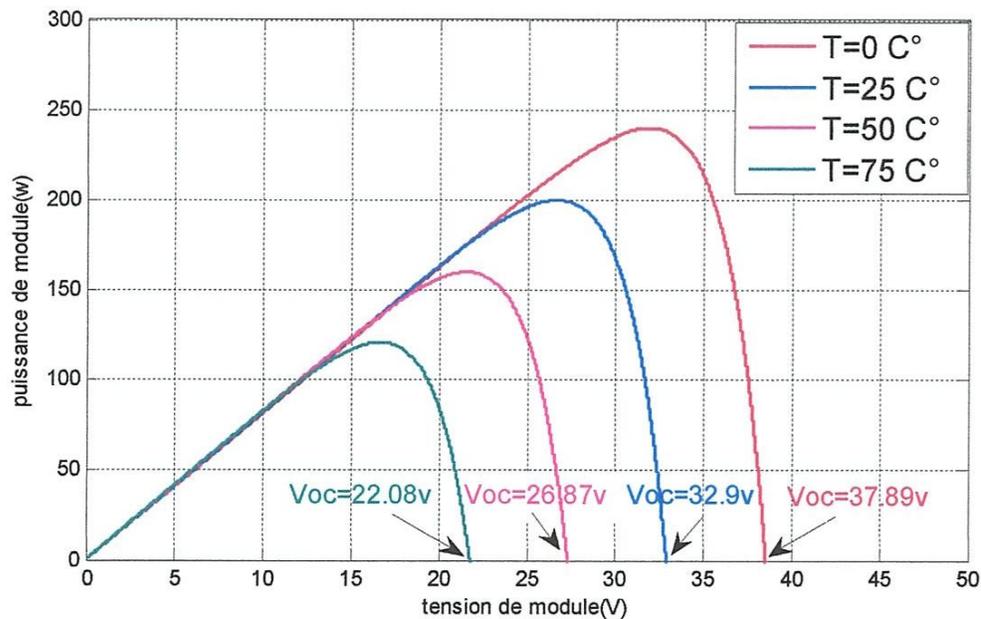


Figure III-17 : L'influence de la température sur la caractéristique (P-V) d'un module

- **Les commentaires :**

-L'effet de la variation de la température sur la caractéristique (P-V) fait diminuer légèrement la puissance et la tension de circuit ouvert.

### III-6 Liaison des cellules photovoltaïque :

#### III-6-1 Groupement en série :

Dans un groupement en série figure (III-18), les cellules sont traversées par un même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné. La figure (III-19) montre la caractéristique résultante ( $I_s, V_s$ ) obtenue par l'associant en série (indice s) de ns cellules identiques ( $I_{cc}, V_{co}$ ). Avec :

$I_{sc} = I_{cc}$ : Le courant de court-circuit.

$V_{sco} = ns \cdot V_{co}$ : La tension de circuit ouvert.

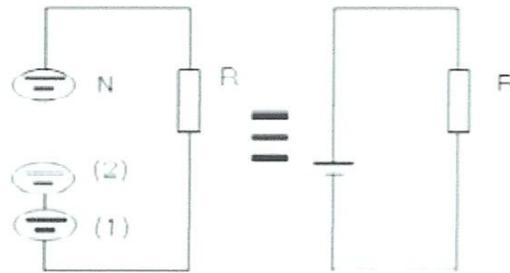


Figure III-18 : Association des modules en série

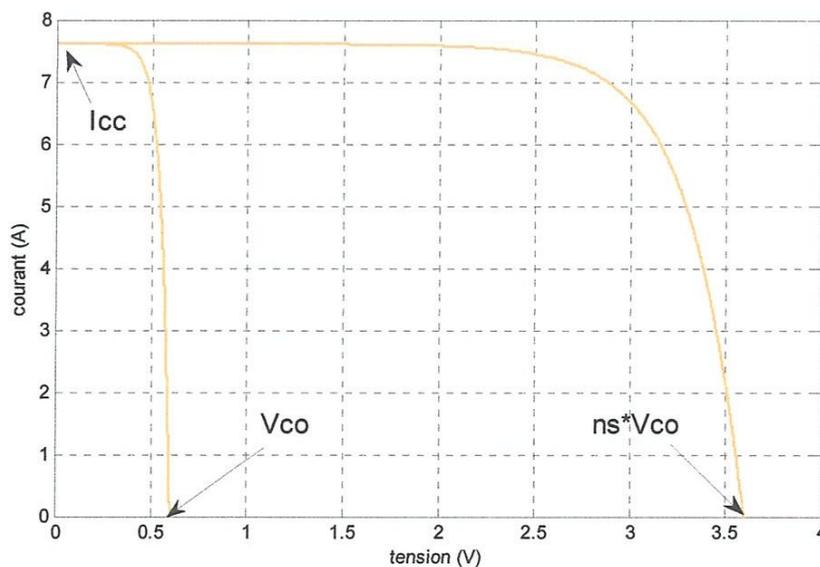


Figure III-19 : Caractéristique résultante d'un groupement en série

**III-6-2 Groupement en parallèle :**

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle figure (III-20), les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. La figure (III-21) montre la caractéristique résultante ( $I_{pcc}, V_{pco}$ ) obtenue en associant en parallèle (indice p) np cellules identiques ( $I_{cc}, V_{co}$ ).

$I_{pcc} = np \cdot I_{cc}$ : Le courant de court-circuit.

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

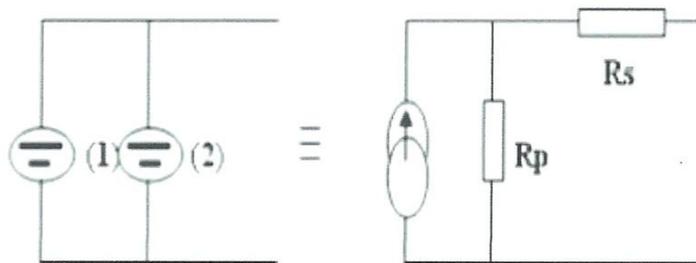


Figure III-20 : Association des modules en parallèle

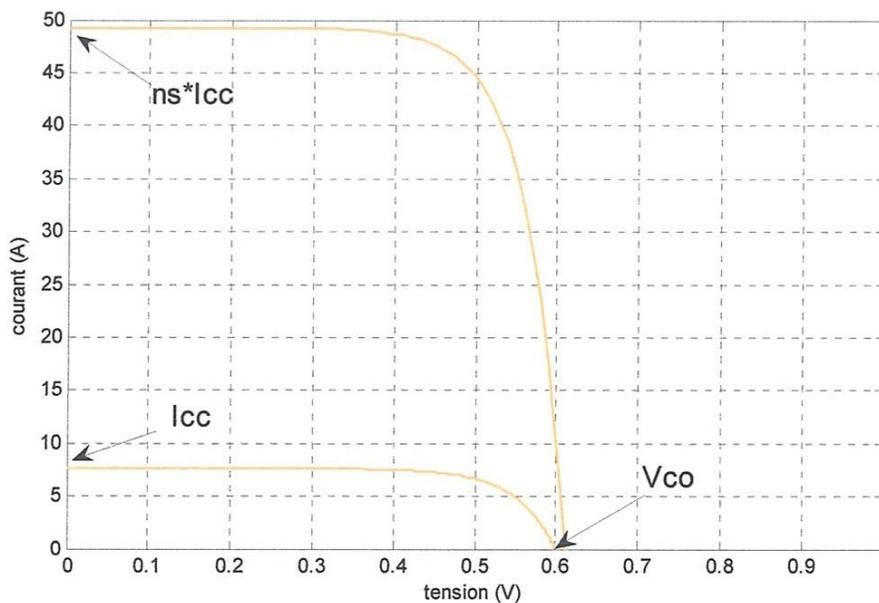


Figure III-21 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle

### III-6-3 Groupement mixte (série-parallèle) :

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés en panneaux photovoltaïques figure (III-22). La caractéristique électrique globale courant-tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques de cellules élémentaires supposées identiques, ainsi que l'illustre la figure (III-23),  $n_s$  et  $n_p$  étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et modules en parallèle.

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

$V_{gco} = n_s \cdot V_{co}$ : Tension du circuit ouvert du module résultant

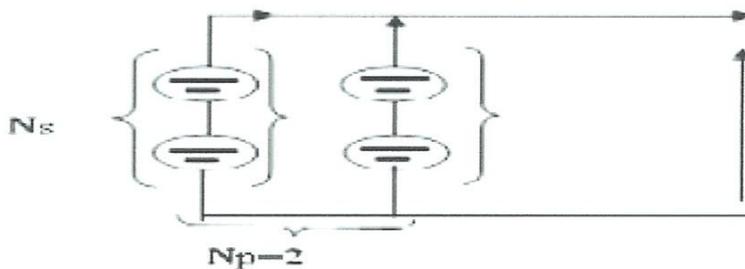


Figure III-22 : Association mixte des modules

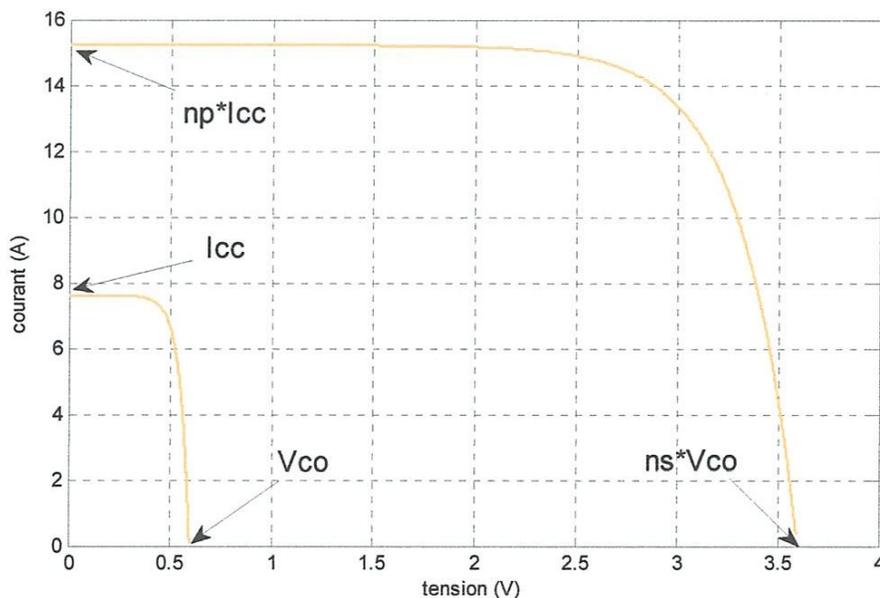


Figure III-23 : Caractéristique résultante d'un groupement mixte

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (Groupement en série) ou augmenter le courant (Groupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants).

### III-7 simulation du module PV par Matlab-Simulink :

Nous avons réalisé le schéma bloc sous Matlab-Simulink pour l'étude du module PV comme nous l'avons déjà fait avec le modèle théorique du module PV programmés sous matlab

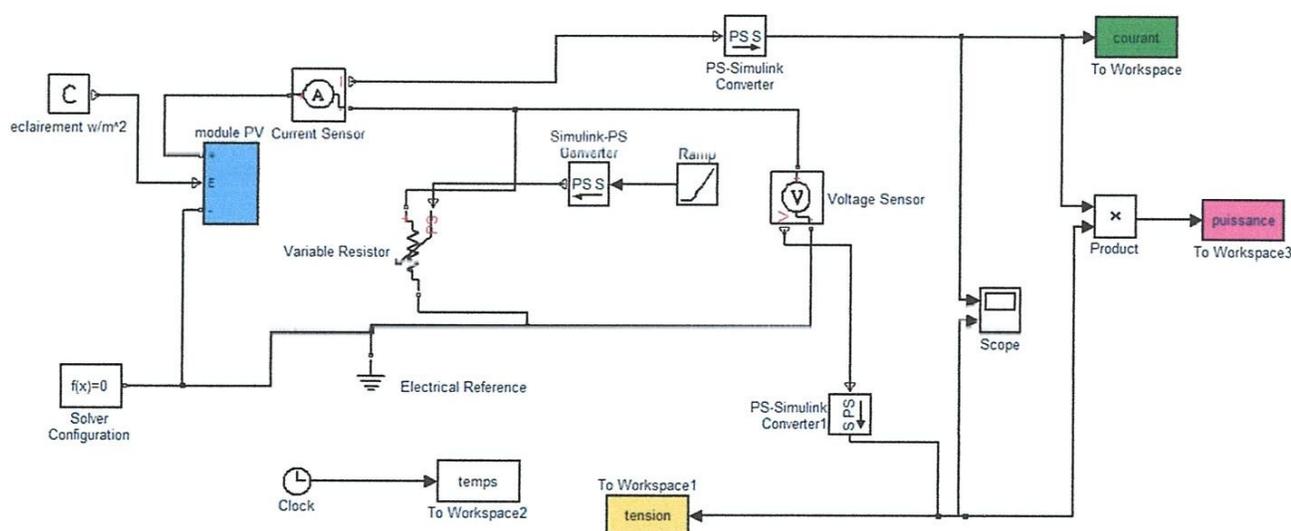


Figure III-24 : Schéma bloc d'un module PV en Matlab-Simulink

Le modèle est assez simple. La cellule solaire qui est le composant principal du module a été réglée avec les paramètres dérivés du tableau (III-1). Le nombre de cellules en série est de 54 (obtenu à partir de la feuille de données du fabricant). Ce qui nous a permis de reproduire les mêmes courbes I-V, P-V obtenu par notre programme Matlab

Pour vérifier que le modèle fonctionne correctement soit avec le *Matlab-Simulink* soit avec le programme Matlab, nous avons pris diverses valeurs d'éclairement et de températures (identiques à celles prises par le fabricant) pour permettre des comparaisons directes. Ce qui nous a permis de reproduire les mêmes caractéristiques I-V, P-V données par le fabricant dans sa fiche technique pour les 2 cas de modélisation

### *III-8 Conclusion :*

D'après les résultats de simulation on conclue que la température comme l'éclairement sont des facteurs influant sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque tel que : le courant produit, la puissance générée, et la tension de sortie.

D'après ses résultats on constate que l'augmentation de la température se traduit par la dégradation de la caractéristique  $I(V)$  et par conséquent la dégradation de la caractéristique

$P(V)$ , par contre l'augmentation de l'éclairement se traduit par l'amélioration de la caractéristique  $I(V)$  puisque c'est la source générale de création du courant dans une cellule PV et par conséquent l'amélioration de la caractéristique  $P(V)$ .

Le calcul des paramètres du modèle est simple et ce fait par la résolution d'un système d'équation sous MATLAB

Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données du constructeur.

# CONCLUSION GENERALE

## *Conclusion générale :*

Le travail présenté dans ce mémoire tourne au tour de l'énergie électrique photovoltaïque en terme d'énergie abondante, inépuisable et renouvelable qui résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens d'un panneaux solaire.

Un panneau solaire est constitué de plusieurs cellules montées en série, en parallèle, ou mixte ces cellules sont soit de types mono soit de type poly-cristalline ou amorphe

Généralement la cellule est une diode à jonction PN qui a pour caractéristique (rendement, facteur de forme, courant, tension, etc...)

Nous nous sommes intéressés en particulier à la partie modélisation d'un panneau solaire ou générateur photovoltaïque (GPV)

- La modélisation d'un module ou générateur PV est une manière d'étude très importante pour l'analyse du fonctionnement d'un GPV, et voir l'influence de différents facteurs sur le module, et en particulier l'effet de la variation de l'éclairement et de la température.
- Le principal intérêt de la modélisation réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur.
- Premièrement nous avons opté pour un modèle à 4 paramètres à fin de simuler le fonctionnement d'un module PV lors de l'exposition à certaines conditions de température et d'éclairement.
- Deuxièmement nous avons montré que la température et l'éclairement sont des facteurs influant sur le rendement d'un module PV.
- Finalement, nous avons montré que le modèle à 4 paramètres que nous avons choisi d'utiliser fonctionne correctement et donne des résultats identiques aux caractéristiques réelles données par le fabricant.

## Annexe 1:

symbole	définition	Unité	valeur
$R_s$	Résistance série	Ohm ( )	-
$R_{sh}$	Résistance de shunt	Ohm ( )	-
$I$	Courant fourni par la cellule	Ampère (A)	-
$I_d$	Le courant parallèle par la diode	Ampère (A)	-
$I_{mp}$	Courant au MPP	Ampère (A)	-
$I_{ph}$	Courant photonique	Ampère (A)	-
$I_{sat}/I_0$	Courant d'obscurité ou saturation de diode	Ampère (A)	-
$I_{CC}$	Courant de court-circuit	Ampère (A)	-
$V_{C0}$	Tension de circuit ouvert	Volt (V)	-
$V_{mp}$	Tension au MPP	Volt (V)	-
$n$	Coefficient d'idéalité de la diode	Sans dimension	$1 < n < 2$
$T_C$	Température absolue de la cellule	Kelvin (K)	-
$T_a$	Température ambiante	Kelvin (K)	-
$q$	Charge de l'électron	Coulomb (C)	$1,6 * 10^{-12}$

<b>K</b>	Constante de Boltzmann	J / K	1,381*10-23
<b>G</b>	Flux solaire incident ou éclairement	W / m <sup>2</sup>	-
<b>Pmax</b>	Puissance maximale	watt	
<b>Ns</b>	Nombre de cellules en série	-	-
<b>Np</b>	Nombre de cellules en parallèle	-	-
<b>μco Ki</b>	Coefficient de sensibilité de la tension a la température	mV/K	
<b>μcc Kv</b>	Coefficient de sensibilité de l'intensité a la température	mA/K	

## Annexe 2 :

THE NEW VALUE FRONTIER



# KC200GT

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL  
PHOTOVOLTAIC MODULE



LISTED

### HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities produce a highly efficient multicrystal photovoltaic module.

The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 16%.

These cells are encapsulated between a tempered glass cover and a pottant with back sheet to provide efficient protection from the severest environmental conditions.

The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation. Equipped with plug-in connectors.



### APPLICATIONS

KC200GT is ideal for grid tie system applications

- Residential roof top systems
- Large commercial grid tie systems
- Water pumping systems
- High Voltage stand alone systems
- etc.

### QUALIFICATIONS

● **MODULE** : UL1703 certified

● **FACTORY** : ISO9001 and ISO 14001

### QUALITY ASSURANCE

Kyocera multicrystal photovoltaic modules have passed the following tests.

- Thermal cycling test
- Thermal shock test
- Thermal / Freezing and high humidity cycling test
- Electrical isolation test
- Hail impact test
- Mechanical, wind and twist loading test
- Salt mist test
- Light and water-exposure test
- Field exposure test

### LIMITED WARRANTY

⊕ 1 year limited warranty on material and workmanship

⊕ 20 years limited warranty on power output. For detail, please refer to "category IV" in Warranty issued by Kyocera

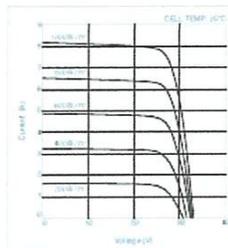
(Long term output warranty shall warrant if PV Module(s) exhibits power output of less than 90% of the original minimum rated power specified at the time of sale within 10 years and less than 80% within 20 years after the date of sale to the Customer. The power output values shall be those measured under Kyocera's standard measurement conditions. Regarding the warranty conditions in detail, please refer to Warranty issued by Kyocera.)

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic  
Module KC200GT at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic  
Module KC200GT at various irradiance levels



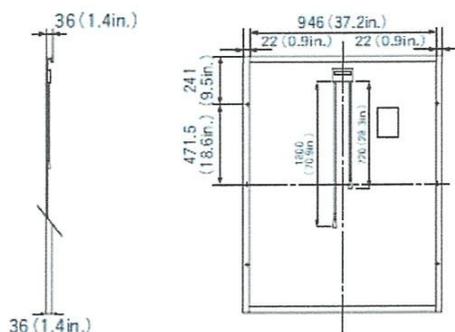
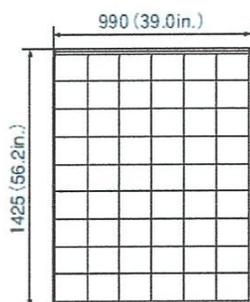
MODEL  
KC200GT

## SPECIFICATIONS

KC200GT

### Physical Specifications

Unit : mm (in.)



### Specifications

Electrical Performance under Standard Test Conditions ("STC")	
Maximum Power (P <sub>max</sub> )	200W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (V <sub>mppt</sub> )	26.3V
Maximum Power Current (I <sub>mppt</sub> )	7.61A
Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	32.9V
Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	8.21A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of Voc	−1.23 × 10 <sup>−3</sup> V/°C
Temperature Coefficient of Isc	3.18 × 10 <sup>−3</sup> A/°C

"STC" irradiance: 1000W/m<sup>2</sup> AM 1.5 spectrum, module temperature 25°C

#### Electrical Performance at 800W/m<sup>2</sup>, NOCT, AM1.5

Maximum Power (P <sub>max</sub> )	142W
Maximum Power Voltage (V <sub>mppt</sub> )	23.2V
Maximum Power Current (I <sub>mppt</sub> )	6.10A
Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	29.9V
Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	6.62A

NOCT irradiance: 800W/m<sup>2</sup> AM 1.5 spectrum, module temperature 45°C

Cells	
Number per Module	54

Module Characteristics	
Length × Width × Depth	1425 (56.1) × 990 (39.0) × 36 (1.4)
Weight	18.5kg (40.7lbs.)
Cable	1 × 72mm (2.8in.) × 1800mm (70.9in.)

Junction Box Characteristics	
Length × Width × Depth	115mm (4.5in.) × 75mm (2.9in.) × 36mm (1.4in.)
IP Code	IP65

Reduction of Efficiency under Low Irradiance	
Reduction	7.8%

Reduction of efficiency from an irradiance of 1000W/m<sup>2</sup> to 200W/m<sup>2</sup> (module temperature 25°C)

Please contact our office for further information.



## KYOCERA Corporation

### KYOCERA Corporation Headquarters

CORPORATE SOLAR ENERGY DIVISION  
6 Takasashi, Toba-shi, Mie-ken  
Fushimi-ku, Kyoto  
612-8501, Japan  
TEL: (81)75-604-3476 FAX: (81)75-604-3475  
http://www.kyocera.com

### KYOCERA Solar, Inc.

7812 East Acorn Drive  
Scottsdale, AZ 85260, USA  
TEL: (1)480-948-8003 or (800)223-9580 FAX: (1)480-483-6431  
http://www.kyocerasonar.com

### KYOCERA Solar do Brasil Ltda.

Av. Guignard 661, Loja A  
22790-250, Rua Manoel dos Saldorimendes, Rio de Janeiro, Brazil  
TEL: (55)21-2437-8525 FAX: (55)21-2437-2338  
http://www.kyocerasonar.com.br

### KYOCERA Solar Pty Ltd.

Level 3, 6-10 Talavera Road, North Hyde  
N.S.W. 2113, Australia  
TEL: (61)2-9870-3948 FAX: (61)2-9888-9588  
http://www.kyocerasonar.com.au/

### KYOCERA Fineceramics GmbH

Prinz-Müller-Strasse 107, D-73730 Eppingen, Germany  
TEL: (49)714-93934-917 FAX: (49)714-93934-950  
http://www.kyocerasonar.de/

### KYOCERA Asia Pacific Pte. Ltd.

298 Tiong Bahru Road, #13-03/05  
Central Plaza, Singapore 168730  
TEL: (65)6271-0500 FAX: (65)6271-0600

### KYOCERA Asia Pacific Ltd.

Room 801-802, Tower 1 South Seas Centre, 75 Mody Road,  
Tsimshatsui East, Kowloon, Hong Kong  
TEL: (852)2-7237183 FAX: (852)2-7244501

### KYOCERA Asia Pacific Ltd. Taipei Office

10 Fl., No.66, Nanking West Road, Taipei, Taiwan  
TEL: (886)2-2555-3650 FAX: (886)2-2559-4131

### KYOCERA (Tianjin) Sales & Trading Corporation

10F, Tower C, HeDiao Building SA Guanghua Rd.,  
Chao Wang District, Beijing 100026, China  
TEL: (86)10-6583-2270 FAX: (86)10-6583-2250

Kyocera reserves the right to modify these specifications without notice.

LE109M0703-SAC/KM

## Bibliographie :

- [1] José Miguel Navarro « cellules PV organiques transparentes dans le visible » thèse de doctorat, université Toulouse III, 2008
- [2] Petibon Stéphan « nouvelles architecture distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les application photovoltaïques » thèse de doctorat, université Toulouse, 2009
- [3] Dang Minh Trung « élaboration des cellules solaires PV a base de polymère conjugués étude de système reticulables » thèse de doctorat, université de bordeaux 1, 2009
- [4] BOUKHERS Djamil « Option : Modélisation Et Commande Des Machines Electriques » MAGISTER EN ÉLECTROTECHNIQUE Université Mentouri de Constantine 2007
- [5] Julien LABBÉ, « l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés », thèse de doctorat de l'école des mines de paris , Spécialité "Énergétique" le 21 décembre 2006
- [6] [www.swissolar.ch](http://www.swissolar.ch)
- [7] Magister en électronique "optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage", Université de Mentouri Constantine 2007.
- [8] R. Chenni , "Etude Techno-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire, Thèse de doctorat, Avril 2006.
- [9] corinn ALONSO, "contribution a l'optimisation, la gestion et le traitement de l'energie".Université Paul Sabatier-Toulouse.2003.
- [10] "conception et réalisation de modules photovoltaïque électronique ", thèse doctorat M. Angel Cid Pastor 2006 laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS-CNRS).
- [11] these de magister "modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque", université de Annaba 2010.
- [12] rapport de stage projet fin d'étude ingénieur technique industrielle, septembre 2006, réalisation de technique MPPT numérique, par alain bilbao leareta, université virgil.
- [13] "recherche du maximum de puissance sur les generateurs photovoltaïques", V Boittier, P Maussion, Université de toulouse , INPT, UPS, CNRS.

[14] M.Mansour Niang, Souleymane Diop, Institut Supérieur de Technologie-DIT Electromécanique-Froid et Climatisation 2008.

[15] O.Gergaud, B Multon, H.Ben Ahmed "analysis and experimental validation of various photovoltaïque systeme models" 7<sup>th</sup> international ELECTRIMACS congress, Montréal, Aout 2002.

[16] these doctorat Akihiro Oi September 2005 "Design and simulation of photovoltaïque water pumping system"

[17] "Design and simulation of photovoltaïque super system using simulink" Tyson Denherder 2006 california polytechnic state university san Louis Obispo.

[18] Thèse doctorat université de Limoges 2008 , Roshanak Radbed "Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques a couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones".

[19] R. Khezzar et al. "Composition entre les différentes modèles électrique et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque". Revue des énergies renouvelables vol.13 N° 3, pp 379-388,2010.

[20] Cabal Cédric "optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié a la conversion photovoltaïque".Thèse de doctorat université de Toulouse 2008

[21] Thèse de doctorat, Amina Benhamou "optimisation d'un nouveau système de séchage solaire modulaire pour plantes aromatiques et médicinales",Université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen 2009.

[22] "production d'énergie électrique : Energie solaire photovoltaïque", B.Fleche-D.Delagnes /juin 2007 Approche générale.

[23] étude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin".W.C.Benmoussa, S.Amara et A.Zerga Revue des Energie Renouvelables ICRES-07 Tlemcen 2007 (301-306).

[24] these doctorat Akihiro Oi September 2005 "Design and simulation of photovoltaïque water pumping system"

[25] "dossier photovoltaïque" de la revue physique Bernard Equer 2007 dossier de la société Française de physique. [www.sfpnet.fr](http://www.sfpnet.fr).