

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir Elibrahimi – Bordj Bou Arreridj
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Sciences de la Matière

جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعريريج »
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم علوم المادة



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : Master

Filière : Physique
Option : Physique des Matériaux

THÈME :

ÉTUDE DES CARACTERISTIQUES COURANT TENSION
D'UNE CELLULE DE SILICIUM

Préparé par : SAOULI Sara

Soutenu le : 01/07/2018

Devant le jury :

Président : KAHOUL Abdelhalim

Professeur

Université de BBA

Rapporteur: DAOUDI Salim

MCA

Université de BBA

Examineur: MOULA Baghdadi

MCB

Université de BBA

Examineur : SAHNOUNE Yassine

MAA

Université de BBA

Année Universitaire 2017-2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
اللَّهُمَّ صَلِّ وَسَلِّمْ وَبَارِكْ عَلَى سَيِّدِنَا مُحَمَّدٍ
وَعَلَىٰ آلِهِ الطَّيِّبِينَ الطَّاهِرِينَ
وَأَجْعَلْهُ لِقَاءَ رَحْمَتِكَ يَا أَرْحَمَ الرَّاحِمِينَ

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour terminer ce travail.

Nous tenons à présenter nos sincères remerciements et notre Profonde reconnaissance à notre aimable encadreur Dr. Daoudi Salim pour son encadrement, pour sa contribution, sa patience et son aide tout au long de ce travail.

Je souhaite à adresser mes remerciements les plus sincères à mes très chers PARENTS qui ont apporté leurs aides au cours d'élaboration de ce mémoire.

Mes remerciements à Monsieur Ait Maamer Slimen, Ingénieur de laboratoire de SM à l'université de BBA.

Mes vifs remerciements à Monsieur Sahnoune Yassine mon enseignant à l'université de BBA pour ses conseils fructueux et ses encouragements. Nous adressons également nos remerciements aux enseignants qui nous ont fait l'honneur de participer, aux jurys de ce mémoire le Pr. Kahoul Abdelhalim et Dr. Moula Baghdadi.

Enfin, nous remercions toute personne ayant de près ou de loin contribué à l'élaboration de ce modeste travail et l'ensemble des enseignants qui ont assuré notre formation durant toutes ces années d'étude.





Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

✿ *Mon cher père << Ahmed >>, ma chère mère << Soltana >>, mes frères Saci, Mohamed islam Toufik et son fils A, Ishak A. Errahim, et mes sœurs Zahra, Amira, toute ma famille, à tous les étudiants de ma promotion de la physique, et les enseignants de département des sciences de la matière qui ont contribué à notre formation.*

Merci à tous.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Gisement solaire	Erreur ! Signet non défini.
I-1. Introduction :	Erreur ! Signet non défini.
I-2. Généralité sur le soleil	Erreur ! Signet non défini.
I-2-1. Définition du soleil :	Erreur ! Signet non défini.
I-2-2. La composition interne du soleil :	Erreur ! Signet non défini.
I-2-3. Les couches externes :	Erreur ! Signet non défini.
I-2-4. Le soleil (réacteur nucléaire naturel) :	Erreur ! Signet non défini.
I-2-5. Le rayonnement solaire hors atmosphère:	Erreur ! Signet non défini.
1) Définition du corps noir :	Erreur ! Signet non défini.
2) Rayonnement solaire dans l'espace :	Erreur ! Signet non défini.
I-2-6. La constante solaire :	Erreur ! Signet non défini.
I-3. L'atmosphère :	Erreur ! Signet non défini.
I-3-1. La structure de l'atmosphère :	Erreur ! Signet non défini.
I-3-2. La composition chimique de l'atmosphère :	Erreur ! Signet non défini.
I-4. La constante solaire au sol :	Erreur ! Signet non défini.
I-5. La masse d'air	13
I-6. Les trois composantes du rayonnement solaire :	Erreur ! Signet non défini.
I-7. Mouvement apparent du soleil :	Erreur ! Signet non défini.
I-7-1. Coordonnées du soleil :	Erreur ! Signet non défini.
1) Coordonnées équatoriales :	Erreur ! Signet non défini.
2) Coordonnées horizontales du soleil :	Erreur ! Signet non défini.
I-8. Mouvement de la terre :	Erreur ! Signet non défini.

Sommaire

I-8.1. Coordonnées terrestres :.....	Erreur ! Signet non défini.
I-9. Heurs et temps	Erreur ! Signet non défini.
I-9-1. Durée du jour :.....	Erreur ! Signet non défini.
I-9-2. Relation entre temps légale et temps solaire :	Erreur ! Signet non défini.
I-10. Durée et taux d'ensoleillement.....	Erreur ! Signet non défini.
I-10-1. Durée d'ensoleillement.....	Erreur ! Signet non défini.
I-9-1. Taux d'ensoleillement	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion.....	24
Chapitre II : Energie solaire	Erreur ! Signet non défini.
II-1. Introduction	Erreur ! Signet non défini.
II-2. Historique	Erreur ! Signet non défini.
II-3. Rayonnement solaire porteur d'énergie	Erreur ! Signet non défini.
II-4. L'effet photovoltaïque.....	Erreur ! Signet non défini.
II-5. Le silicium métallurgique (MG-Si).....	Erreur ! Signet non défini.
II-5-1. Pour quoi le Si ?	Erreur ! Signet non défini.
II-5-2. La production du silicium métallurgique	Erreur ! Signet non défini.
A. Méthode de Czochralski	Erreur ! Signet non défini.
B. La continuité de la procédure subit les étapes suivantes	Erreur ! Signet non défini.
II-6. Le dopage :	Erreur ! Signet non défini.
II-6-1. Qu'est-ce que le dopage?	Erreur ! Signet non défini.
II-6-2. Méthodes de dopage.....	Erreur ! Signet non défini.
II-6-3. Les différents types de dopage	Erreur ! Signet non défini.
II-6-4. L'utilisation de la jonction P-N comme capteur	Erreur ! Signet non défini.
II-7.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :	Erreur ! Signet non défini.
II-8. Les différents types des cellules photovoltaïques	Erreur ! Signet non défini.
1) Cellule monocristallin.....	Erreur ! Signet non défini.
2) Cellule poly cristallin.....	Erreur ! Signet non défini.

Sommaire

3) Cellule amorphe.....	Erreur ! Signet non défini.
II-9. Les avantages et les inconvénients.....	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion.....	39
Chapitre III : Caractérisation d'une cellule solaire.....	Erreur ! Signet non défini.
III-1. Introduction :.....	Erreur ! Signet non défini.
III-2. Assemblage des cellules	Erreur ! Signet non défini.
a) Mise en série des cellules photovoltaïque :	Erreur ! Signet non défini.
b) Mise en parallèle des cellules photovoltaïque	Erreur ! Signet non défini.
c) Groupement série parallèle et la protection des cellules..	Erreur ! Signet non défini.
III-3. Paramètres électriques d'une cellule PV.....	Erreur ! Signet non défini.
III-3-1.Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.....	Erreur ! Signet non défini.
III-3-2. Les grandeurs principales d'une cellule photovoltaïque ..	Erreur ! Signet non défini.
III-4. Modélisation de la cellule PV	Erreur ! Signet non défini.
III-4-1. Modèle idéal :	Erreur ! Signet non défini.
III-4-2. Modèle réel	Erreur ! Signet non défini.
III-5. Caractérisation expérimentale I-V d'une cellule de silicium en conditions réel	Erreur ! Signet non défini.
III-5-1. Appareilles et matérielles utilisées:	Erreur ! Signet non défini.
III-5.2. Photo du notre expérience :.....	Erreur ! Signet non défini.
III-5.3. Schéma électrique équivalent.....	Erreur ! Signet non défini.
III-5-4. Résultat obtenue dans l'expérience.....	Erreur ! Signet non défini.
III-5-5. Etude comparative	Erreur ! Signet non défini.
III-5-6. Zones de fonctionnement d'une cellule solaire	Erreur ! Signet non défini.
III-6. Influence de l'éclairement E	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion générale	Erreur ! Signet non défini.8

-Liste des figures-

Figure (1.1) : La structure interne du soleil.

Figure (1.2) : La composition interne du soleil.

Figure (1.3) : Transformation de l'hydrogène dans le soleil.

Figure (1.4) : La structure de l'atmosphère.

Figure (1.5) : La variation de la constante solaire en fonction de numéro de jour.

Figure (1.6) : La masse d'air.

Figure (1.7) : Les trois composantes du rayonnement solaire global.

Figure (1.8) : La variation de la déclinaison.

Figure (1.9) : Angle horaire ω du soleil.

Figure (1.10) : Mouvement apparent du soleil.

Figure (1.11) : schématisation de mouvement de la terre autour du soleil.

Figure (2.1) : Irradiance spectrales pour une atmosphère peu polluée de type méditerranée.

Figure (2.2) : Four à arc.

Figure (2.3) : Réacteur siemens.

Figure (2.4) : Schéma de la méthode de Czochralski...

Figure (2.5) : Schéma de principe de la découpe par une scie à fil.

Figure (2.6) : Wafer polycristallin à gauche, monocristallin à droite.

Figure (2.7) : Schéma de dopage de type N.

Figure (2.8) : Schéma de dopage de type P.

Figure (2.9) : Schéma de la jonction PN.

Figure (2.10) : Principe de la conversion photovoltaïque.

Figure (3.1) : Schéma d'un groupement en série de n_s cellule identique.

-Liste des figures-

Figure (3.2) : Schéma d'un groupement en parallèle de n_p cellule identique.

Figure (3.3) : Schéma d'un groupement série parallèle de n cellules PV.

Figure (3.4) : schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

Figure (3.5) : Modèle idéal d'une cellule PV.

Figure (3.6) : Modèle de la cellule PV réel à une diode.

Figure (3.7) : Modèle de la cellule PV réel à deux diodes.

Figure (3.8) : Photo de l'essai expérimentale.

Figure (3.9.a) : Schéma électrique de l'essai expérimentale.

Figure (3.9.b) : Circuit électrique de l'essai expérimentale.

Figure (3.10) : La variation de courant en fonction de tension.

Figure (3.11) : La variation de puissance en fonction de tension.

Figure (3.12) : Résultat expérimentale d'un autre essai.

Figure (3.13) : Résultats théoriques et expérimentales d'un autre essai.

Figure (3.14) : Les trois zones de fonctionnement d'une cellule PV.

Figure (3.15) : Caractéristique I-V pour différentes éclairément.

Figure (3.16) : Caractéristique P-V pour différente éclairément.

Liste des tableaux :

Tableau (1.1) : Valeurs de la constante solaire en fonction de nombre d'aire masse.

Tableau (2.1) : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.

Tableau (3.1) : Tableau des résultats de l'expérience.

Introduction générale

Introduction générale :

L'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel, ses sources, est la question que le futur va poser à l'homme. Cependant l'histoire réserve parfois des surprises, avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique sans cesse croissante, la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne, etc.) reviennent au premier plan de l'actualité; leur exploitation arrange beaucoup l'environnement.

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entraînera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croître et tend dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole.

D'autre part, ce type de consommation énergétique n'est pas neutre sur l'impact environnemental. Pour les hydrocarbures et le charbon par exemple, d'importantes émissions de gaz carbonique à effet de serre sont générées quotidiennement jouant un rôle prépondérant au niveau du dérèglement climatique et de l'augmentation de la pollution. Ce constat pousse à rechercher de plus en plus de solutions innovantes palliant le déficit énergétique et limitant l'impact négatif sur l'environnement. Ainsi, le développement des sources non polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité à la fois par les producteurs d'énergie et les pouvoirs publics. À ce jour, le photovoltaïque a trouvé son utilité dans des applications à petites échelles et pour des systèmes de transmissions isolés. L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie intéressante. Elle est renouvelable, inépuisable et non polluante. Pour qu'elle soit utilisée sur une large plage d'applications et pour satisfaire les contraintes du coût, le système devrait présenter une bonne exploitation des cellules photovoltaïques [1].

Introduction générale

Les besoins énergétiques ne cessent de croître dans le monde. Malgré son énorme potentiel, l'énergie solaire ne correspond qu'à une partie négligeable de la production et de la consommation d'énergie en Algérie. Pourtant, l'exploitation du rayonnement solaire est compétitive à plusieurs niveaux par rapport aux autres sources d'énergies renouvelables. Il s'agit de la source d'énergie la plus répandue et la plus accessible sur Terre. « Chaque jour, le soleil envoie vers la Terre 10 000 fois la quantité totale d'énergie consommée à l'échelle de la planète ». Aussi, la quantité d'énergie libérée par le soleil pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an [2].

Les diverses applications qui découlent de l'exploitation des rayons solaires sont innombrables. Les technologies solaires les plus répandues s'observent majoritairement dans le domaine de l'immobilier : solaire thermique, solaire thermodynamique, solaire photovoltaïque et éclairage naturel. Les avantages de l'exploitation à plus grande échelle de l'énergie solaire en Algérie sont nombreux : amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, diminution de la consommation en énergie fossile et électrique, création d'emplois à travers les régions de tout le pays, réduction des émissions des gaz à effet de serre et hausse des exportations d'électricité, etc.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Elle consiste à convertir directement le rayonnement solaire en électricité. Elle utilise pour ce faire des convertisseurs photovoltaïques ou cellules photovoltaïques ou encore cellules solaires qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque.

L'utilisation des cellules solaires comme convertisseurs d'énergie solaire a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser, et par conséquent développer l'exploitation de cette nouvelle source d'énergie renouvelable propre et qui n'émet pas de gaz à effet de serre, pour ces derniers raisons la branche solaire photovoltaïque mérite vraiment d'être mise à contribution.

L'objectif de ce travail est l'étude des caractéristiques courantes tensions d'une cellule de silicium amorphe expérimentalement.

Introduction générale

Dans le premier chapitre, nous aborderons ainsi en premier temps quelques notions indispensables sur le gisement solaire, à savoir les coordonnées équatoriale et terrestre. Nous décrirons ensuite, le rayonnement solaire et sa composition. Puis, l'estimation de l'irradiation solaire sur une surface horizontale et inclinée.

Dans le deuxième chapitre, nous avons rappelé quelque notion sur le rayonnement solaire porteur d'énergie, ensuite nous avons présenté les étapes principales pour l'obtention de silicium de qualité électronique, les méthodes et les différents types de dopage, ainsi une explication sur le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Dans le dernier chapitre, nous avons formulé les circuits équivalents d'une cellule photovoltaïque. Ainsi les caractéristiques principales d'une cellule, sa modélisation idéale, réel à une diode et à deux diodes. Ensuite, nous avons réalisé une expérience pour établir la caractéristique courant –tension d'une cellule PV au niveau des laboratoires de notre faculté.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et sa partie expérimentale.

I-1. Introduction :

Le gisement solaire est un ensemble des données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [3].

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous aborderons en premier lieu quelques notions sur la source d'énergie que représente le soleil, Nous pourrons ensuite caractériser le soleil en le considérant comme un corps noir à la température de sa surface. On en déduira la constante solaire hors atmosphère. Ainsi, le repérage du soleil.

I-2. Généralité sur le soleil :

I-2-1. Définition du soleil :

Le soleil est une étoile résultant de la condensation d'un nuage interstellaire sous l'effet de la gravité. Ce type de nuage est essentiellement composé d'hydrogène, d'hélium, cette étoile est une sphère gazeuse de 1 391 000 km de diamètre (100 fois celui de la terre) située à une distance moyenne de 149 598 000 km de la terre [3.4].

Le soleil est un réacteur nucléaire naturel. Il tire son énergie de réactions de fusion nucléaire se produisant dans son noyau, la région de l'étoile qui s'étend du centre jusqu'à environ 20% de son rayon. Dans le cœur de ce réacteur, la température approche les 15 millions de kelvins et la masse volumique est d'environ $1,5 \times 10^5 \text{ kg m}^{-3}$ (environ 150 fois celle de l'eau sur Terre). Une fraction de l'énergie de masse libérée par les réactions nucléaires est convertie énergie cinétique des produits de réaction, ce qui se traduit par une production de chaleur [5].

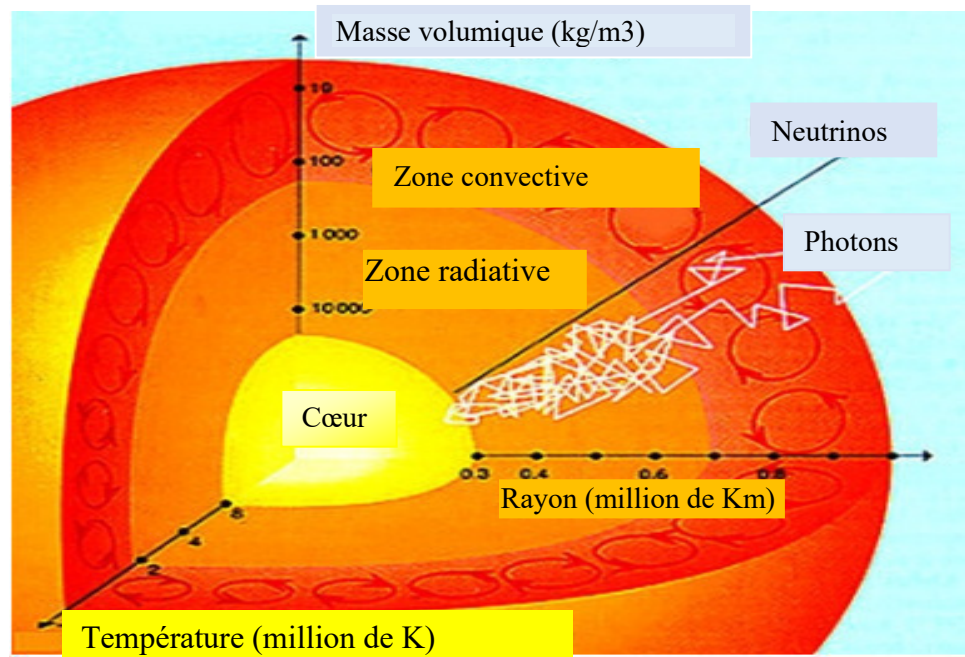


Figure (1.1) : la structure interne du soleil [5].

I-2-2. La composition interne du soleil :

Les différences de densité, pression et température entre le centre et la surface déterminent la structure de l'intérieur de notre étoile.

a) Le cœur du soleil :

De 0 à 210000 km. Il représente 50 % de la masse du Soleil. Cette région est le lieu des réactions de fusion nucléaire. La température est de 15 millions de degrés au centre, elle diminue quand on s'éloigne du centre. Lorsqu'elle atteint 7 millions de degrés, la chaleur devient insuffisante pour entretenir les réactions de fusion [6].

b) La zone radiative :

De 0 à 480000 km. C'est la partie interne de soleil, elle englobe le cœur, dans cette zone, l'énergie est transportée par radiation. La température de sa partie la plus externe est de 2 millions de degrés. Une zone dite radiative avec un cœur où les réactions nucléaires transforment les ions hydrogène en hélium ; cœur et zone radiative représentent 98% de la masse du Soleil [6].

c) La zone convective :

De 480000 à 690000 km. Cette zone représente 2% de la masse du Soleil. De turbulents mouvements de plasma assurent le transfert d'énergie vers l'extérieur. Le nom de ces zones est lié au mode de transport de l'énergie, produite dans la partie centrale et évacuée ensuite vers l'extérieur du Soleil. Le transport se fait soit par radiation (propagation sous forme d'ondes électromagnétiques) soit par convection (c'est le mouvement de la matière qui assure le transfert de la chaleur).

I-2-3. Les couches externes :

Les couches externes du Soleil constituent son « atmosphère ».

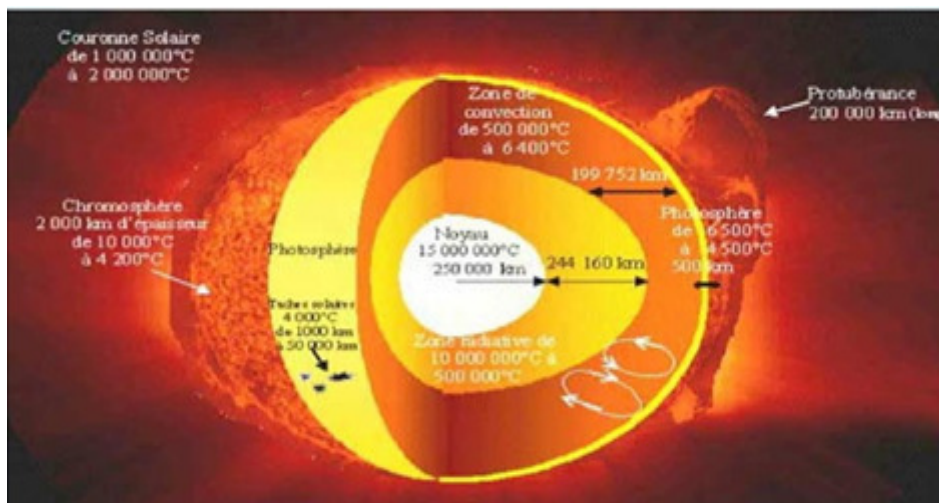


Figure (1.2) : la composition interne et externe du soleil [6].

a) La photosphère :

C'est la surface visible du Soleil, elle n'est pas une surface solide, mais le lieu où les propriétés du milieu changent radicalement. A ce niveau, la matière du Soleil, opaque à l'intérieur, devient transparente. Elle contribue pour 99% au rayonnement solaire. Cette surface de quelque centaine de kilomètres, sa température est d'environ 6000 °C [7].

b) La chromosphère :

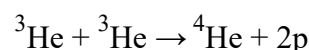
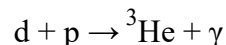
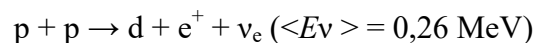
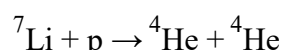
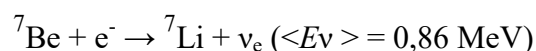
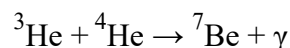
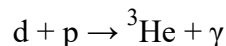
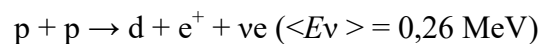
La chromosphère est la partie basse de l'atmosphère solaire, elle contribue très peu au rayonnement du Soleil. C'est une couche très hétérogène d'une épaisseur moyenne de 2000 à 3 000 km. Sa température est de plusieurs milliers de degrés et croît vers l'extérieur pour atteindre 20000 °C .Elle est visible de courts instants lors des éclipses totales [6].

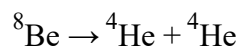
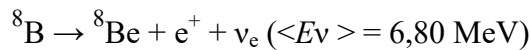
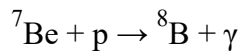
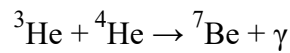
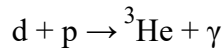
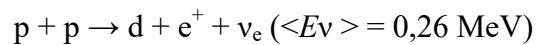
c) La couronne :

La couronne est la couche la plus externe de l'atmosphère du Soleil. Sa température est de l'ordre du million de degrés et sa densité est 100 millions de fois plus faible que celle de la Terre. Elle s'étend jusqu'à des distances égales à plusieurs rayons solaires et se fond dans le milieu interplanétaire. La photosphère est tellement brillante qu'elle empêche d'observer la couronne, sauf lors des éclipses totales du Soleil [6].

I-2-4. Le soleil (réacteur nucléaire naturel) :

Le Soleil est constitué en majorité d'hydrogène (75 % en masse) et d'hélium (25 % en masse). Les principales réactions nucléaires qui se produisent dans le cœur du Soleil sont celles des trois premières « chaînes proton-proton » [5]:

Chaîne proton-proton I (p-p I)*Chaîne proton-proton II (p-p II)*

Chaîne proton-proton III (pp III)

(p : proton ; d : noyau de deutérium (numéro atomique $Z = 1$, nombre de neutrons $N = 1$) ;
 ${}^3\text{He}$: noyau d'hélium 3 ($Z = 2$, $N = 1$) ; ${}^4\text{He}$: noyau d'hélium 4 ($Z = 2$, $N = 2$) ou particule
 Alpha ; ${}^7\text{Li}$: noyau de lithium 7 ($Z = 3$, $N = 4$) ; ${}^7\text{Be}$: noyau de béryllium 7 ($Z = 4$, $N = 3$) ;
 ${}^8\text{Be}$: noyau de béryllium 8 ($Z = 4$, $N = 4$) ; ${}^8\text{B}$: noyau de bore 8 ($Z = 5$, $N = 3$) ; e^+ : positon ;
 ν_e : neutrino électronique ; γ : photon gamma).

Photons : (particules fondamentales sans masse ni charge électrique)

Neutrinos : (particules de masse très faible et de charge nulle).

Les réactions nucléaires du cœur du Soleil peuvent grossièrement se résumer à :

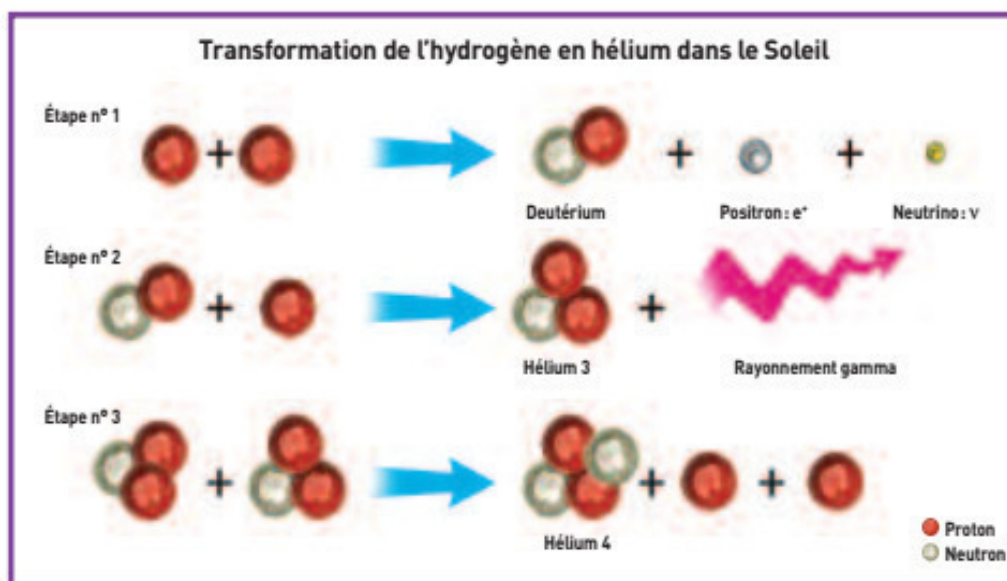


Figure (1.3) : Transformation de l'hydrogène dans le soleil [6].

Toute l'énergie du soleil provient de réaction thermonucléaire. Cette réaction transforme à chaque seconde 564.10^6 tonnes d'hydrogène en 560.10^6 tonnes d'hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie. Cette réaction de fusion dégage de l'énergie car la masse du noyau produit est inférieure à la somme des masses des noyaux initiaux, la différence de masse est transformée en énergie selon la célèbre formule d'Einstein [8]:

$$E = |\Delta m| \cdot C^2 \quad (\text{I.1})$$

Avec :

E : l'énergie exprimée en (eV ou en J, avec $1\text{eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$)

C : la vitesse de la lumière ($C = 3.10^8 \text{ m/s}$)

$|\Delta m|$: La valeur absolue de différence de masse entre le noyau produit et la somme des noyaux initiaux

$$\Delta m = m_{\text{produit}} - \sum m_{\text{initiaux}} \quad (\text{I.2})$$

I-2-5. Le rayonnement solaire hors atmosphère:

1) Définition du corps noir :

Un corps noir est par définition un corps idéal parfaitement absorbant pour la lumière et parfaitement émissif pour le rayonnement thermique [9].

2) Rayonnement solaire dans l'espace [10]:

Le soleil rayonne globalement comme un corps noir de température $T_s = 5800 \text{ K}$. Le flux d'énergie $d\varphi$ émis par une surface de soleil ds est donné par la loi de Stefan Boltzmann :

$$M_s = \frac{d\varphi}{ds} = \sigma T^4 \quad (\text{I.3})$$

$$\text{Où } \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15C^2 h^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

M_s ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) : Émittance énergétique.

T(K) : température absolue.

K : constante de Boltzmann ($k=1,38.10^{-23}$ J.K-1).

h : constante de Planck ($h=6,62.10^{-34}$ J. s).

La conservation de flux d'énergie $\Phi_S(w)$ émis par le soleil s'écrit :

$$\Phi_S = 4\pi R_S^2 M_S = 4\pi D_{TS} E_{SC} \quad (I.5)$$

Avec :

D_{TS} : distance moyenne entre la terre et le soleil ($D_{TS}=149,6.10^9$ m).

Φ_S : Flux solaire (w).

E_{SC} (w/m^2): flux d'énergie incident au niveau de la terre.

R_S : le rayon solaire ($R_S= 695500$ km).

I-2-6. La constante solaire:

La constante solaire est la puissance rayonnée reçue hors atmosphère par unité de surface placée perpendiculairement au rayonnement solaire [11]. E_{sc} ($w. m^{-2}$) est la constante solaire estimée à $1353 w. m^{-2}$ jusqu'au début des années 1970. Cette constante représente le flux d'énergie lumineuse issue du soleil, ou irradiance. La variation de cette valeur est particulièrement fonction de la distance Terre soleil provenant de l'excentricité de l'orbite de la Terre. Des mesures précises effectuées par les satellites ont permis de donner ces variations au cours de l'année avec des valeurs comprises entre $1322 w. m^{-2}$ en Juillet et $1412 w. m^{-2}$ en Janvier. L'organisation météorologique internationale a finalement retenue comme constante solaire standard $E_0 = 1367 w/m^2$ [10].

Avec cette valeur on obtient $T_S=5777$ k et $M_S=63,2 w/m^2$

I-3. L'atmosphère :

L'atmosphère constitue l'enveloppe de gaz et particules qui entourent notre planète sous l'action de la force de gravitation.

I-3-1. La structure de l'atmosphère [12.13]:

La figure (1.4) représente la structure de l'atmosphère :

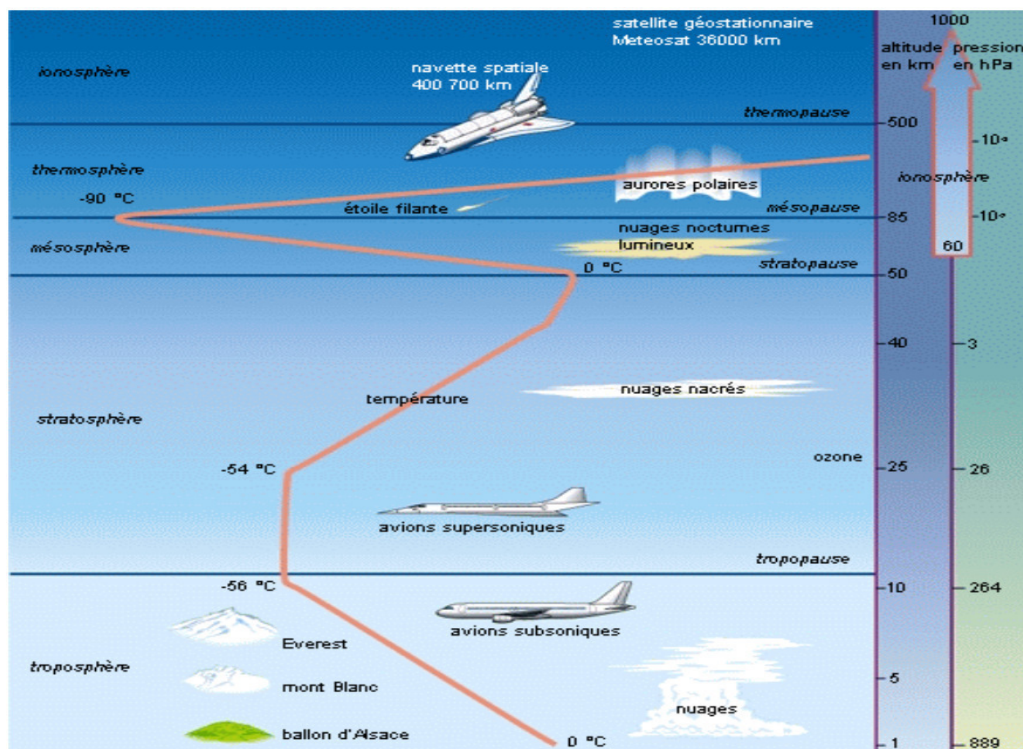


Figure (1.4) : la structure de l'atmosphère [12].

a) L'Exosphère :

L'exosphère au delà de 700 km qui s'ouvre sans frontière sur l'espace intersidéral. C'est la couche la plus élevée de l'atmosphère. Elle se dissipe peu à peu dans l'espace interplanétaire et l'air y devient extrêmement rare. Les ondes radio y sont réfléchies et beaucoup de satellites artificiels gravitent autour de la Terre dans cette zone.

b) L'ionosphère :

L'ionosphère de 80 à 200 km (Confondue avec la thermosphère), Représente la transition entre l'espace et l'atmosphère. Il y règne une température de 400 à 1500°C dans la Couche supérieure à (-90°C) au bas de cette couche.

c) La mésosphère :

La mésosphère de 50 à 85 km ou la température décroît de 0°C à environ -90°C, la pression de l'air devient très faible. C'est en entrant dans la Mésosphère que les poussières venues de l'espace chauffent et forment "les étoiles filantes".

d) La stratosphère :

La stratosphère de 12 à 55 km d'altitude. Dans cette couche la température croît de -56°C à 0°C. On y trouve la couche **d'ozone** à 25 km d'altitude ; cette dernière est très importante car elle protège la surface terrestre d'une trop forte irradiation en ultra-violet.

e) La troposphère :

Entre le sol et de 15 Km d'altitude c'est la couche «vivante» de l'atmosphère. Elle contient 90% de la masse totale de l'atmosphère terrestre. La température décroît de 6,5°C par km, pour atteindre -56°C à la base de la couche suivante. Elle est le siège de nombreux échanges entre la terre et la troposphère (cycle de l'eau, présence des nuages).

I-3-2. La composition chimique de l'atmosphère :

La composition de l'atmosphère est à peu près la même pour les trois premières couches: 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 0,9 % d'argon, 0,03 % de CO₂ et des traces d'autres gaz, avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une mince couche d'ozone dans la stratosphère dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus durs. L'essentiel des modifications subies par le rayonnement solaire se fait dans la troposphère par diffusion, diffraction, absorption, réfraction par des gaz de température et de densité croissante [12].

I-4. La constante solaire au sol :

La partie d'énergie reçue sur la surface de la Terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. En première approximation on peut calculer la valeur de E_{SC} en fonction de numéro de jour de l'année j par la relation suivante :

$$E_{SC} = E_0 [1 + 0,033 \times \cos(0,984(j - 2))] \quad (I.6)$$

J : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1^{er} janvier, c.-à-d. varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année.

La variation de la constante solaire au cours de l'année est représentée par la figure (1.5) :

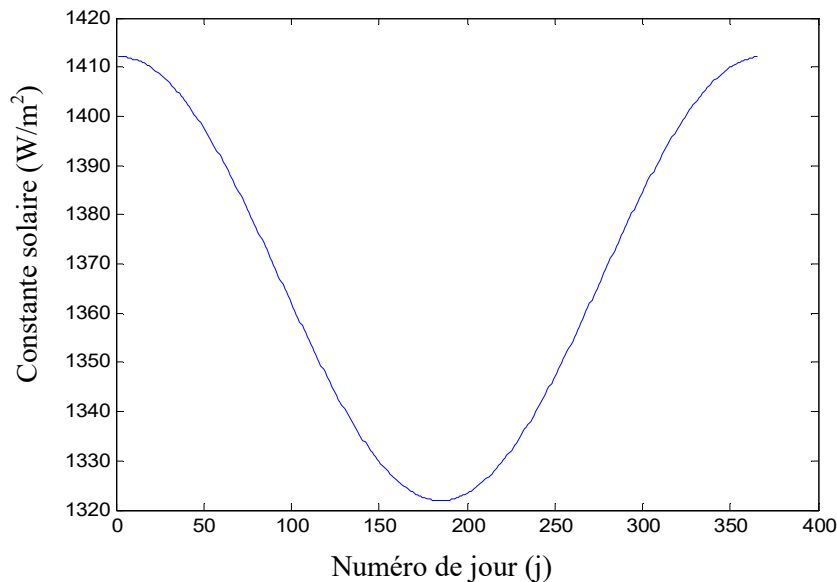


Figure (1.5) : La variation de la constante solaire en fonction de numéro de jour.

I-5. La masse d'air :

La masse gazeuse totale traversée est de 10 tonnes /m²; elle équivaut à 7.8 km d'atmosphère ramenée aux conditions de température et de pression dites normales: T=0°C; p=1013 mbar. Si ces gaz étaient tous ramenés aux conditions normales, on aurait 6.2 km d'azote, 1.7 km d'oxygène, 74 m d'argon, 30m de vapeur d'eau, 24 m de CO₂, 14 cm de Néon, 4 cm d'Hélium, quelques mm de Krypton, de méthane de NO et de NO₂ et seulement 5 mm d'ozone [12].

Prenant pour référence unité, l'épaisseur verticale de l'atmosphère moyenne réduite à 7.8 km (conditions dites normales), supposant cette couche plane et stratifiée horizontalement, la longueur du trajet rectiligne d'un rayon lumineux incliné d'un angle h par rapport à l'horizontale sera donnée par la formule:

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (I.7)$$

La figure (1.6) représente l'épaisseur verticale de l'atmosphère moyenne et la longueur du trajet rectiligne d'un rayon lumineux incliné d'un angle h .

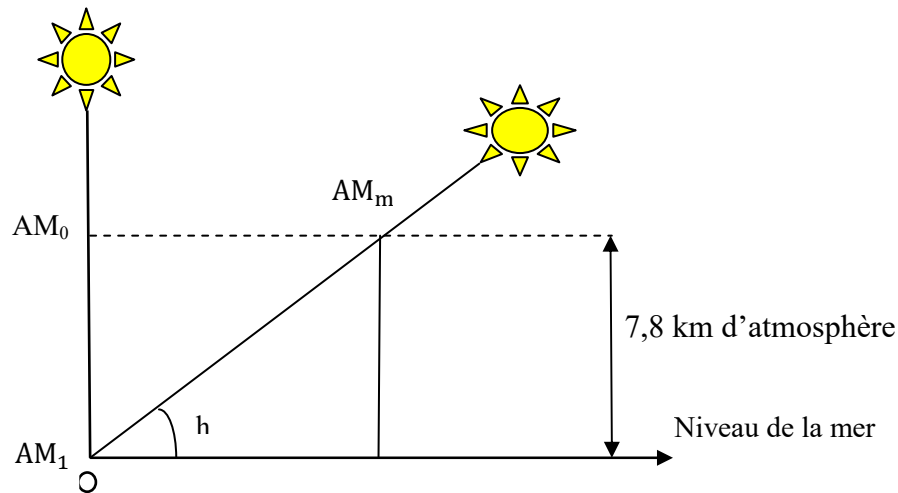


Figure (1.6) : La masse d'aire

La longueur du rayon qui a traversée l'atmosphère, Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée, on introduit le nombre d'air masse défini par :

$$m = \frac{p}{1013} \times \frac{1}{\sin h} \times \exp\left(-\frac{z}{7,8}\right) \quad (\text{I.8})$$

Avec :

p (hPa ou mbar) : pression,

h (degré) : élévation du soleil sur l'horizon (90° au zénith),

Z (Km) : altitude.

Dans les conditions normales et au niveau de la mer (où $z=0$ Km, $p=1013$ hPa ou mbar), l'expression (I.6) simplifiée suivante est utilisée :

$$m = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{I.9})$$

On cite d'autres conditions tel que :

- AM_0 : Hors atmosphère à haute altitude, on définit les Conditions AM_0 .
- AM_1 : lorsque le soleil est au zénith, on dit que l'on a les conditions AM_1 car les rayons lumineux traversent une épaisseur d'atmosphère unité (7.8 Km).
- $AM_{1,5}$: Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith.
- AM_2 : on obtient les conditions AM_2 lorsque le soleil est situé à 30° sur l'horizon.

Le groupe de Physique du Solide du CNRS a établi des modèles d'irradiance spectrale pour n'importe quelles conditions.

Le Tableau (1.1) indique les valeurs de la constante solaire en fonction du nombre d'air masse.

M	0	1	1,5	2	3	4	5
E (W/m^2)	1367	931	834	755	610	530	430

Tableau (1.1) : valeurs de La constante solaire en fonction du nombre d'air masse [12].

I-6. Les trois composantes du rayonnement solaire :

L'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayon solaire. Le rayonnement qui arrive au sol possède au moins deux composantes : une composante diffuse D et composante directe I.

a) Rayonnement directe I :

Le rayonnement direct est la lumière parvenant directement du soleil par ciel claire.

b) Rayonnement diffus D :

Le rayonnement diffus est la partie de rayonnement solaire émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions.

c) Rayonnement global G :

Au niveau du sol se définit donc comme la Somme du rayonnement direct et du rayonnement diffuse figure (1.7), l'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, de la pollution, de l'orientation de la surface.

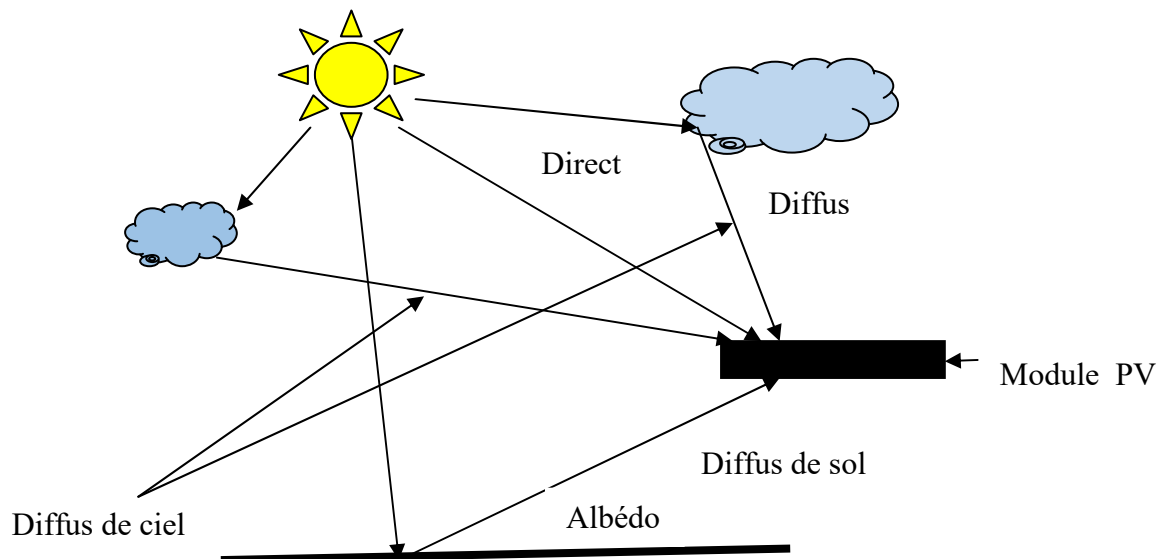


Figure (1.7) : Les trois composantes du rayonnement solaire global.

d) Albédo :

Nom masculin originaire du bas latin "albédo", blancheur; c'est la fraction d'un réservé au sol ou aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul.

$$L'albidoALB = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}}$$

I-7. Mouvement apparent du soleil :

Le mouvement apparent du soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude L au nord de l'équateur est représenté sur la figure (I.11).

I-7-1. Coordonnées du soleil :

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents [2].

1) Coordonnées équatoriales :

a) Déclinaison δ :

L'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $23,45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre) [8]. La valeur de la déclinaison calcule par la relation :

$$\delta = 23,45^\circ \sin[0,980^\circ(j + 284)] \quad (\text{I.10})$$

Ou j est le numéro du jour de l'année.

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la figure (1.8) :

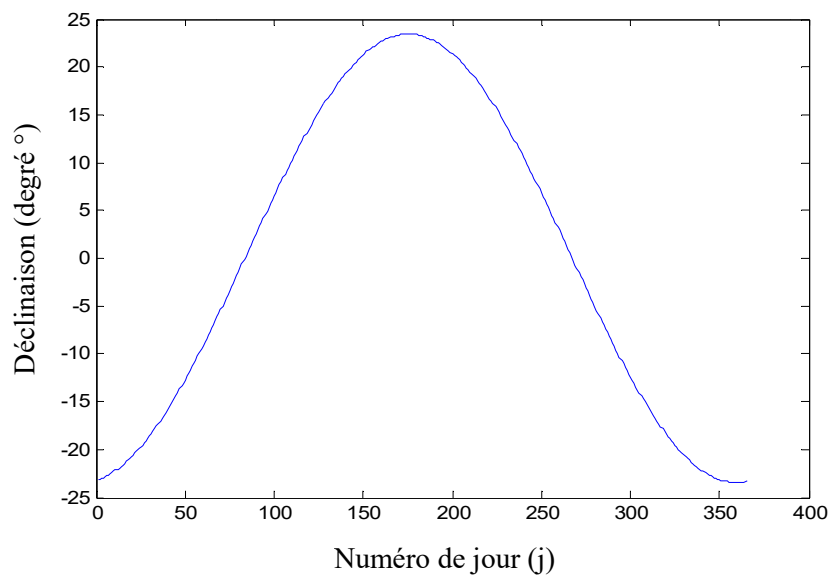


Figure (1.8) : La variation de la déclinaison en fonction de numéro de jour.

b) Angle horaire du soleil ω :

C'est l'angle compris entre la méridienne origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel voire la figure (1.9) :

On définit l'angle horaire

$$\omega = 15^\circ(TSV - 12) \quad (I.11)$$

Avec : TSV Le temps solaire vrai dans la journée

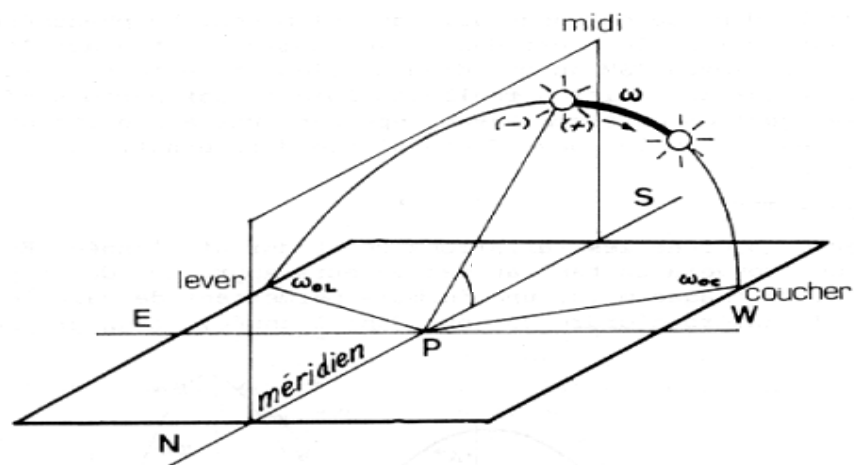


Figure (1.9) : Angle horaire ω du soleil [12].

2) Coordonnées horizontales du soleil :

a) L'azimut a :

C'est l'angle que fait la direction de la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud, cet angle étant orienté positivement vers l'ouest.

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (\text{I.12})$$

b) La hauteur h du soleil :

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal comme montre la figure (1.10).

La hauteur h du soleil peut se déduire de la relation suivante :

$$\sin(h) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (\text{I.13})$$

. L'angle que fait la direction du soleil avec le verticale est $(L - \delta)$.

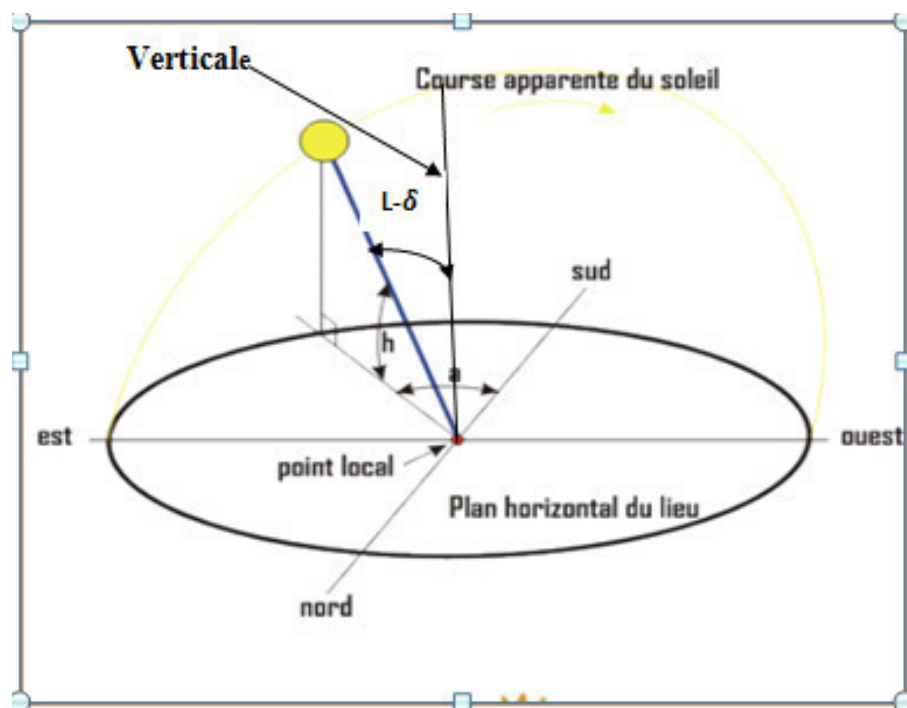


Figure (7) : Mouvement apparent du soleil [14].

I-8. Mouvement de la terre :

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. La révolution complète s'effectue en une période de 365 jours. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 million de km. Au 21 juin la distance terre soleil vaut 152 million de km, c'est le jour où la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 Mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxes d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux [15].

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur.

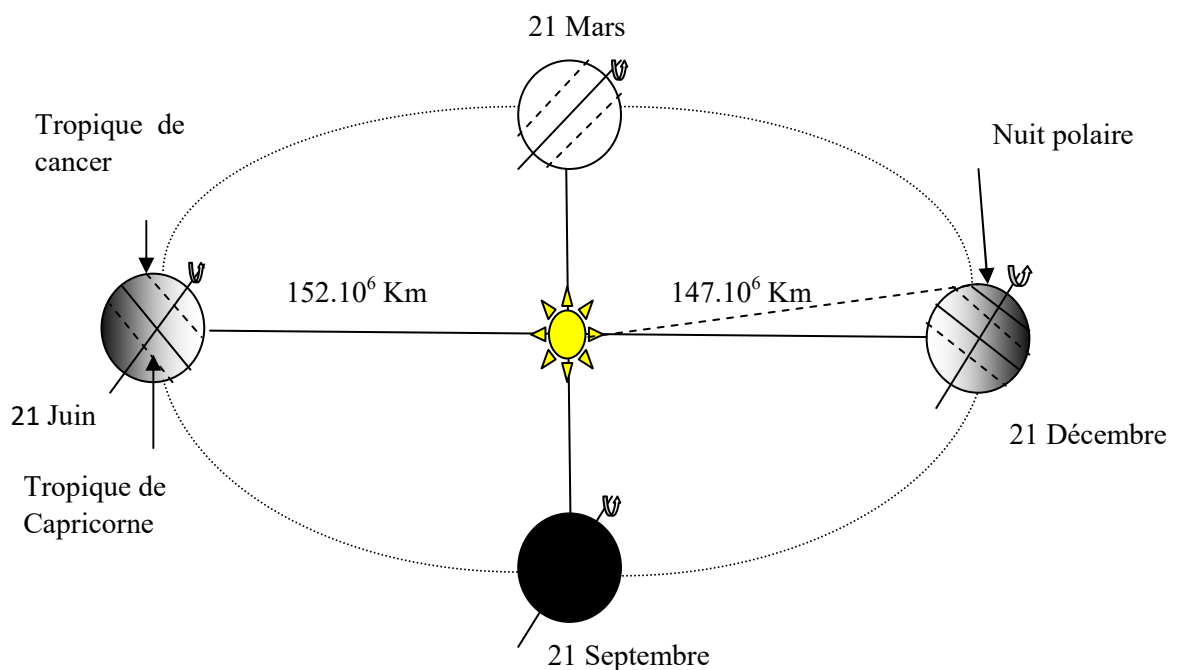


Figure (1.11) : schématisation le mouvement de la terre autour du soleil.

I-8.1. Coordonnées terrestres :**a) Longitude :**

La longitude (l) d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. Exemple longitude de BBA est $4,77^\circ$ Est.

La longitude d'un lieu peut être comprise entre -180 et 180° . A tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps [2].

On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'Est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'Ouest.

d) La latitude L:

Latitude permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle varie de 0° à l'équateur à 90° au pôle Nord et le pôle sud par la latitude -90° [12]. Exemple la latitude de BBA est de $36,07^\circ$ Nord [16].

c) L'altitude :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer) [2].

Par convention, le signe (-) est affecté à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude d'un lieu peut être comprise entre -90° et $+90^\circ$. Exemple l'altitude de BBA est de 928 m.

I-9. Heurs et temps**I-9-1. Durée du jour :**

Le module ω_l de l'angle horaire au lever du soleil s'obtient en écrivant $\sin(h) = 0$ dans la formule (I.13), ce qui conduit à :

$$\cos(\omega_l) = -\tan(L) \tan(\delta) \quad (\text{I.14})$$

L'heure solaire au lever du soleil a donc pour valeur :

$$(TS_l) = 12 - \frac{\omega_l}{15} \quad (\text{I.15})$$

L'angle horaire ω_c au coucher du soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc $\omega_c = -\omega_l$ et la durée du jour vaut :

$$d = 2 \frac{\omega_l}{15} \quad (\text{I.16})$$

I-9-2. Relation entre temps légale et temps solaire :

Temps universel et temps local :

Le temps universel (TU) est défini par l'heure de passage du soleil à la méridienne origine. En BBA (Latitude 36.07° N, longitude 4.77° Est, altitude 928m et TL-TU=1h [16]) entre le temps solaire local TSL (heure des montres) du lieu considéré et le temps universel (TU).

$$C = TL - TCF \quad (\text{I.17})$$

La mesure du temps était basée sur la rotation de la Terre et sa vitesse qui introduit un terme correctif appelé équation de temps et noté ET :

$$ET = \left[\begin{array}{l} 0,0002 - 0,4797 \cos(\omega_j) + 3,2265 \cos(2\omega_j) + 0,0903 \cos(3\omega_j) \\ + 7,3509 \sin(\omega_j) + 9,3912 \sin(2\omega_j) + 0,3361 \sin(3\omega_j) \end{array} \right] \quad (\text{I.18})$$

Avec : $\omega = 0,984$

ET : Equation de temps (terme correctif) en min.

I-10. Durée et taux d'ensoleillement :

I-10-1. Durée d'ensoleillement :

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent le soleil, totalement ou partiellement, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol. On dit que la nébulosité est plus ou moins importante selon qu'il ya beaucoup ou peu de nuages [8].

On appelle durée effective d'ensoleillement ou insolation SS le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré.

I-9-1. Taux d'ensoleillement :

Par ciel claire sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée de jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement SS_0 . On appelle taux d'ensoleillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement [8]:

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} \quad (I.19)$$

Avec :

SS : durée d'insolation mesurée

SS_0 : durée maximale d'insolation.

L'ensoleillement varie de façon importante en fonction du temps. Cela influe en proportion sur la production d'énergie photovoltaïque :

a) Variation jour- nuit : par une journée sans nuages, l'intensité de l'ensoleillement passe d'environ $1\ 000\ \text{W/m}^2$ au maximum vers midi à près de $0\ \text{W/m}^2$ aussitôt la nuit tombée [17].

b) Couverture nuageuse : la présence de nuages diminue l'ensoleillement, ce qui réduit en conséquence la production d'énergie. Une diminution de production peut durer de quelques secondes (journées partiellement ensoleillées) à plusieurs jours (couverture nuageuse durable). Variation de la production plus ou moins prévisible [17].

c) Variation quatre saisons : l'intensité de l'ensoleillement journalier varie beaucoup selon les saisons sur toute la planète. Dans le sud du Québec, l'ensoleillement moyen journalier grimpe de 50 % entre décembre et juin, et davantage encore à mesure qu'on augmente en latitude [17].

Conclusion :

L'énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lors qu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol.

- ❖ L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1367W/m^2 (AM_0) dans l'espace hors atmosphère terrestre.
- ❖ Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à cause des phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières.
- ❖ La couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé.
- ❖ Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000W/m^2 du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM_1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie.
- ❖ Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m^2 ($AM_{1,5}$).

Sommaire

I. Chapitre I	Erreur ! Signet non défini.
I-1. Introduction :.....	4
I-2. Généralité sur le soleil.....	4
I-2-1. Définition du soleil :	4
I-2-2. La composition interne du soleil :.....	5
I-2-3. Les couches externes :	6
I-2-4. Le soleil (réacteur nucléaire naturel) :.....	7
I-2-5. Le rayonnement solaire hors atmosphère:.....	9
1) Définition du corps noir :	9
2) Rayonnement solaire dans l'espace :.....	9
I-2-6. La constante solaire :	10
I-3. L'atmosphère :	11
I-3-1. La structure de l'atmosphère :.....	11
I-3-2. La composition chimique de l'atmosphère :.....	12
I-4. La constante solaire au sol :	12
La masse d'air.....	13
I-6. Les trois composantes du rayonnement solaire :	15
I-7. Mouvement apparent du soleil :.....	17
I-7-1. Coordonnées du soleil :.....	17

1) Coordonnées équatoriales :	17
2) Coordonnées horizontales du soleil :	19
I-8. Mouvement de la terre :	20
I-8.1. Coordonnées terrestres :	21
I-9. Heurs et temps	21
I-9-1. Durée du jour :	21
I-9-2. Relation entre temps légale et temps solaire :	22
I-10. Durée et taux d'ensoleillement.....	23
I-10-1. Durée d'ensoleillement.....	23
I-9-1. Taux d'ensoleillement.....	23

II-1. Introduction :

De tout temps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil. La plupart des utilisations, connues depuis des siècles, sont directes comme en agriculture à travers la photosynthèse ou dans les diverses applications de séchage et chauffage autant artisanales qu'industrielles.

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelque notion sur le rayonnement solaire porteur d'énergie. Nous avons ensuite expliqué le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, puis nous avons montré la technologie pour l'obtention de silicium de qualité électronique pour la fabrication des cellules PV utilisant comme des générateurs d'électricité.

II-2. Historique :

Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse. Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français E. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921) [18].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

II-3. Rayonnement solaire porteur d'énergie [10] :

Pour étudier les cellules photovoltaïques, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu au sol.

De point de vue énergétique, le rayonnement électromagnétique solaire est constitué de photon de longueur d'onde λ transportant une énergie donnée par la relation :

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$E(\text{J})$: énergie.

h : constante de Planck ($h=6,62.10^{-34}$ J.s).

λ (m) : longueur d'onde (souvent exprimée en μm).

ν (Hz) : fréquence.

En établit donc une relation directe entre l'énergie du photon (exprimée en électron-volte) et sa longueur d'onde par :

$$E_{(ev)} = \frac{1,2419}{\lambda_{\mu m}} \quad (\text{II.2})$$

Le flux du photon par seconde et par cm^2 $N_{(\lambda)}$ de longueur d'onde λ est donné par la relation :

$$N_{(\lambda)} = M_{\lambda} \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$N_{(\lambda)}$: $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ le flux de photon.

M_{λ} : Irradiance spectrale ($\text{w}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$).

$d\lambda$: Tranche de longueur d'onde de largeur spectrale normalisée (en général de $1\mu\text{m}$).

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre $0,2 \mu\text{m}$ (ultra-violet) et $4 \mu\text{m}$ (infrarouge) avec un maximum d'énergie pour $0,5 \mu\text{m}$. 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre $0,2 \mu\text{m}$ et $2,5 \mu\text{m}$. De $0,4 \mu\text{m}$ à $0,78 \mu\text{m}$, le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons [19]. Le tableau (II.1) donne les

valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

$\lambda(\mu m)$	$E_{ph}(eV)$	Zone
0.2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-verre
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Tableau (2.1) : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire [19].

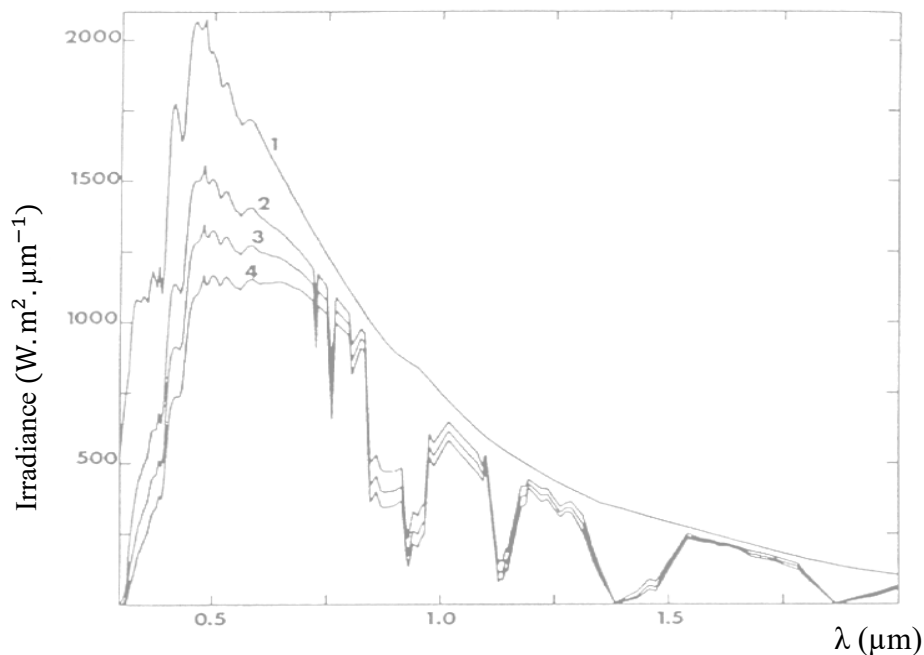


Figure (2.1) : Irradiance spectrale pour une atmosphère peu polluée de type méditerranéen [12].

Les courbes ci-dessus représentent le spectre solaire pour différentes valeurs de Air Mass, noté AM. Courbe 1: AM_0 , courbe 2: AM_1 , courbe 3: $AM_{1,5}$ et courbe 4: AM_2 . L'indice après AM représente le nombre d'atmosphère traversé, AM_0 est donc le spectre solaire hors atmosphère, AM_2 est le spectre solaire ayant traversé 2 épaisseurs d'atmosphère (hauteur de 30° du soleil au dessus de l'horizon).

II-4. L'effet photovoltaïque :

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photo voltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique. Ainsi le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes, lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu. La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (fém) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque.

II-5. Le silicium métallurgique (MG-Si)

II-5-1. Pour quoi le Si ?

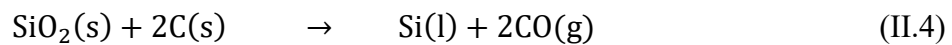
- Le Silicium est le deuxième élément le plus fréquent de la croûte terrestre : $O_2(46\%)$, $Si(28\%)$, $Al(8\%)$.
- Le silicium présent sous forme de silice (SiO_2) contenue dans le sable ou le quartz.
- Il possède un oxyde naturel SiO_2 présentant d'excellentes propriétés électroniques.
- Les technologies de production sont aujourd'hui matures et leur industrialisation ne pose pas de difficulté
- Le silicium a été choisi pour réaliser les cellules solaires photovoltaïques pour ses propriétés électroniques, il est caractérisé par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique.
- Dans le silicium solide, chaque atome est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons.
- Ce semi-conducteur de type IV se dope facilement avec du bore et du phosphore.
- Les cellules PV offrent un rendement de conversion élevé ;
- La durée de vie et le vieillissement des cellules PV sont maîtrisés.

- Le silicium est un matériau qui absorbe facilement la lumière que d'autres matériaux semi-conducteurs.
- A l'heure actuelle, le silicium (Si) cristallin (c-Si) représente environ 85% du marché PV. Bien que le matériau Si ne soit techniquement pas le mieux adapté à la conversion PV [20].

II-5-2. La production du silicium métallurgique :

1. Réduction de la silice :

Le silicium métallurgique (MG-Si) est obtenu par réduction carbothermique de la silice dans des fours à arc électrique illustré dans la figure(2.2). Les creusets des fours sont remplis avec du quartz et de matériaux carbonés (réducteurs) puis sont portés à très haute température (1700°C). La réaction principale de réduction s'écrit [21,22]:



Le silicium en fusion est alors déversé dans des poches puis séparé du laitier avant d'être coulé dans des lingotières. Le silicium ainsi obtenu présentera une pureté typique de 98.5%, il faut encore le purifier pour obtenir un matériau de qualité électronique [21,22].

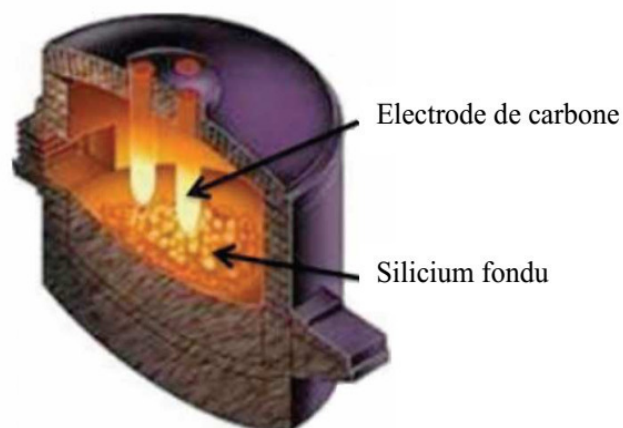
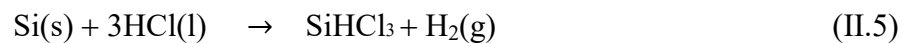


Figure (2.2) : Four à arc [23].

2. Purification du silicium métallurgique MG-Si :

Différents procédés chimiques existent pour la purification du Si, le procédé de purification le plus répandu pour obtenir de l'EG-Si est le procédé Siemens. Ce procédé permet d'obtenir, à partir du MG-Si, un silicium d'une pureté supérieure à 99.9999999% (notée 9N, N étant l'abréviation de neuf). Il repose sur l'affinité du silicium pour le chlore (Cl). Le MG-Si est attaqué par des composés chlorés (HCl) pour donner plusieurs gaz dérivés du Cl, les chlorosilanes. Le silicium à récupérer est contenu dans le trichlorosilane (SiHCl_3) gazeux, qui est récupéré par distillation. Ce dernier est ensuite décomposé thermiquement et le silicium se dépose sur des barres en silicium ultra-pur chauffées à 1000°C [24].



Les concentrations en bore et en phosphore sont alors réduites à quelques ppb at. Le trichlorosilane est ensuite vaporisé puis injecté avec de l'hydrogène (H_2) dans un réacteur *Siemens* (figure 2.3). Le trichlorosilane se décompose sur la surface de filaments chauffés à 1100°C suivant la réaction :

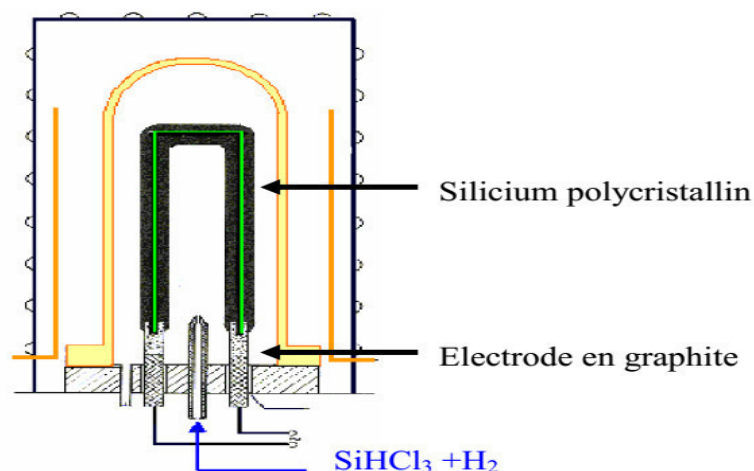


Figure (2.3) : Réacteur siemens [20].

Le procédé Siemens produit du silicium poly cristallin d'une très haute pureté mais il est cependant très énergivore. Le silicium électronique obtenu est ensuite cristallisé en lingots.

3. Lingots monocristallins :

Plusieurs techniques de cristallisation des lingots de silicium existent. Le choix de la technique de cristallisation sera motivé par le budget thermique et influera sur la qualité électrique des lingots réalisés.

A. Méthode de Czochralski :

Une des méthodes pour fabriquer du silicium monocristallin est la méthode dite de Czochralski. Le silicium est placé dans un creuset de quartz et maintenu liquide à l'aide d'éléments chauffants. Lorsque la surface est à la température limite de solidification, on y approche un germe monocristallin, lorsque le germe approché du centre de la surface du bain le liquide monte par capillarité. Le silicium se solidifie sur ce germe selon la même orientation cristallographique. On tire lentement le germe vers le haut, avec un mouvement de rotation de manière à homogénéiser le silicium fondu dans le bain et à contrôler la forme de l'interface solide-liquide, tout en contrôlant minutieusement la température et la vitesse (vitesse de l'ordre de mm/h).

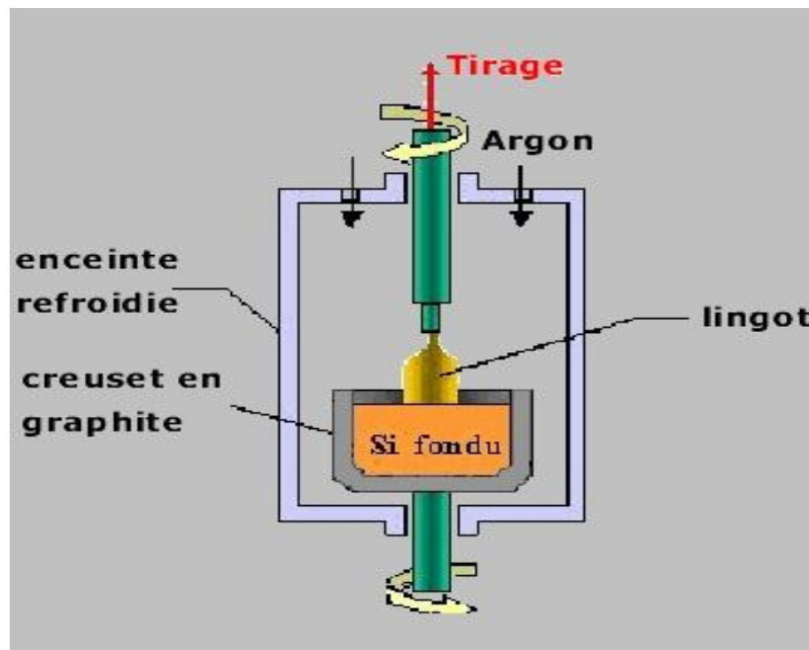


Figure (2.4) : Schéma de La méthode de Czochralski [25].

Le silicium obtenue se présent sous forme des lingots suivant le processus pour la cristallisation.

- Les lingots cylindriques (silicium monocristallin, silicium polycristallin) de silicium obtenus à l'issue de l'étape de solidification sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers » (en anglais, "wafer" signifie "galette").
- La coupe des lingots est effectuée par une scie à fil. Compte-tenu de la faible épaisseur des tranches à découpées (300 μm).

Le principal problème du sciage est la perte de découpe. Afin de minimiser ces pertes, la solution technique retenue est la scie à fil. En effet, la perte de découpe typique des scies à fil est de 200 μm à 240 μm , ce qui représente 55% de perte en moins par rapport aux scies à diamètre intérieur (perte de découpe de 310 μm à 350 μm) [26].

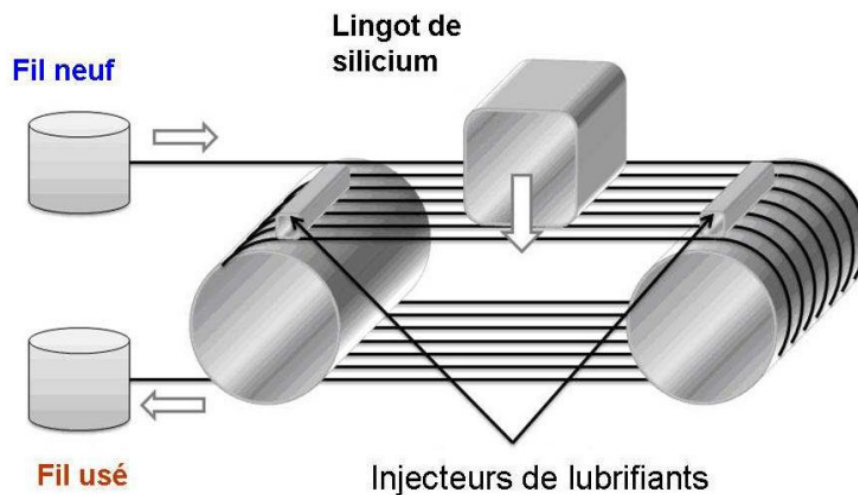


Figure (2.5) : Schéma de principe de la découpe par une scie à fil [26].

B. La continuité de la procédure subit les étapes suivantes :

- Le lingot est ensuite découpé en brique avec une scie à câble ou une scie diamantée refroidie à l'eau.
- Les briques sont découpées en fines tranche (les wafer) avec une scie à file et un mélange abrasif

- Les wafers : polycristallin à gauche, monocristallin à droite. Leur épaisseur est d'environ 200 à 300 μm .

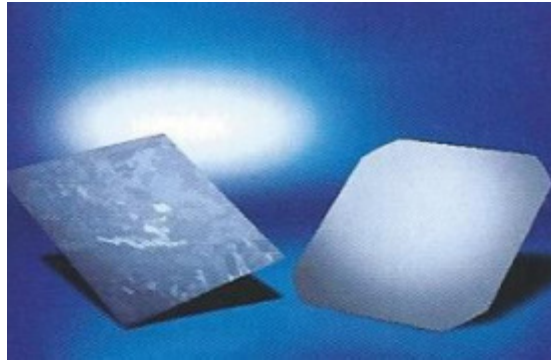


Figure (2.6) : Wafer polycristallin à gauche, monocristallin à droite.

- Les wafers sont soumis à l'opération de jonction PN (positive, négative) dans un four à diffusion chauffé à 800°C.
- Vient en suite la métallisation (pose des électrodes pour le captage du courant).
- On obtient des cellules solaires qui reçoivent un revêtement antireflet. Elles sont testées, puis assemblées ensemble en chaîne.
- Les chaînes assemblées sont placées entre divers éléments pour fabriquer les panneaux.

II-6. Le dopage :

Les wafers de silicium obtenus à l'issue de l'étape de sciage sont alors introduits dans un réacteur de croissance dans lequel vase dérouler l'étape de dopage.

II-6-1. Qu'est-ce que le dopage? :

Le dopage est une méthode permettant de réaliser la jonction P-N. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques. Le semi-conducteur dopé est alors appelé "semi-conducteur extrinsèque". Il existe deux types de dopage : le type N et le type P.

Le dopage de silicium permet de :

- ✓ Réduit la résistivité,
- ✓ Augmente la concentration des porteurs libres,
- ✓ Améliore la mobilité des porteurs (améliore la conductivité).

II-6-2. Méthodes de dopage [26] : il existe trois méthodes de dopages.**1) La diffusion :**

On utilise un four, dans lequel on injecte des gaz avec une solution dopante pour le silicium. Avec la chaleur, le dopant a une énergie suffisante pour entrer dans la plaquette de silicium. Cette méthode est assez ancienne et nécessite d'avoir une température uniforme dans le four.

2) La croissance Epitaxiale :

Cette méthode utilise toujours un four, mais cette fois-ci les atomes du dopant sont déposés sur le silicium qui se présente sous la forme d'une plaquette. On a ainsi un dépôt en surface et non pas une insertion comme pour la méthode de dopage par diffusion. La température du four doit avoisiner les 1 200 °C.

3) Le bombardement ionique :

Une source (appelé faisceau ionique énergétique) produit des ions, qui sont ensuite accélérés et par le biais d'un contrôle très précis, ceux-ci vont alors se positionner sur la plaquette. L'avantage de ce principe est que l'opération se déroule à température ambiante. Le défaut de cette technique est qu'elle peut provoquer des dommages au silicium induisant un réarrangement indésirable de sa structure cristalline, exigeant ainsi une recristallisation subséquente.

II-6-3. Les différents types de dopage :**1) Dopage de type N :**

Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium (figure 2.7). Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi un électron libre. Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative c.à.d. un excès des électrons.

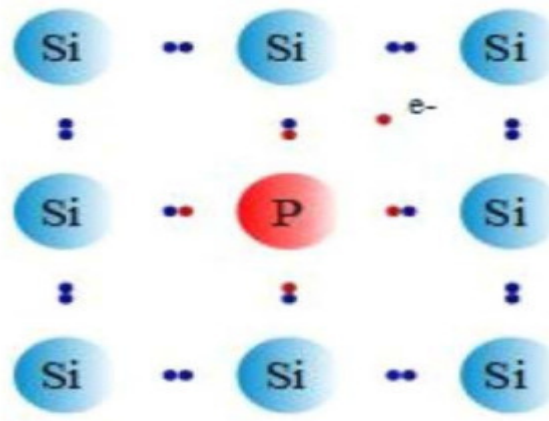


Figure (2.7) : Dopage de type N [26].

2) Dopage de type P :

Le dopage de type P consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium (figure 2.8). Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive c.à.d. un excès des trous (déficit des électrons).

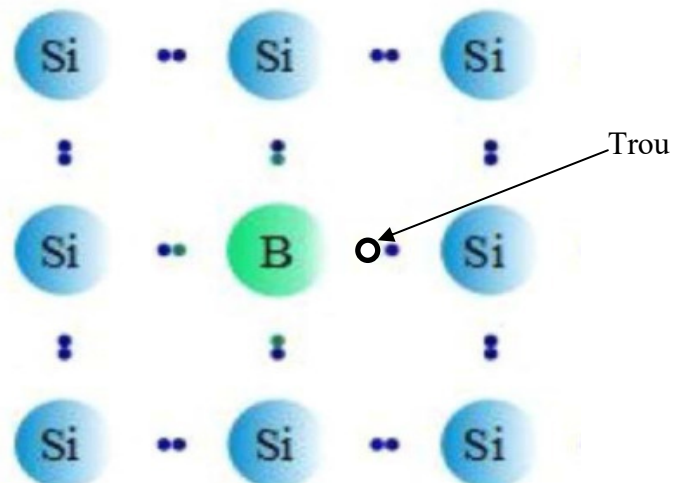


Figure (2.8) : Dopage de type P [26].

II-6-4. L'utilisation de la jonction P-N comme capteur:

La jonction P-N est un dispositif semi conducteur. Elle est formée quand les semi-conducteurs de type (N) et de type (P) sont placés en contact. Dans un tel dispositif, certains des électrons de conduction excessifs dans le matériau émigrent rapidement au matériau de type (P) pour combler les trous de valence. Ceci provoque un champ électrique fort et permanent à proximité de la jonction, comme il est montré ci-dessous [1]:

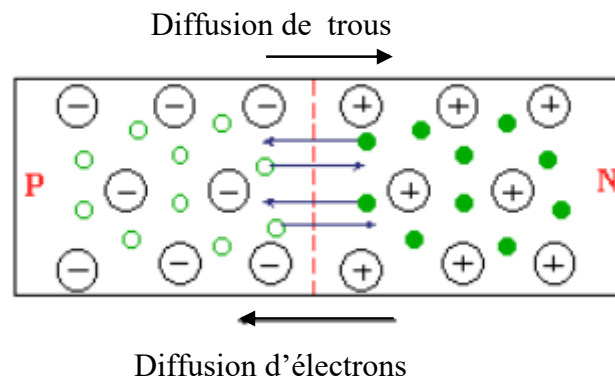


Figure (2.9) : Schéma de la jonction PN [26].

II-7.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Lorsque le matériau dopé N est mise en contact avec le matériau P, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone P. Une jonction (dite PN) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule (voir figure 2.10) [27].

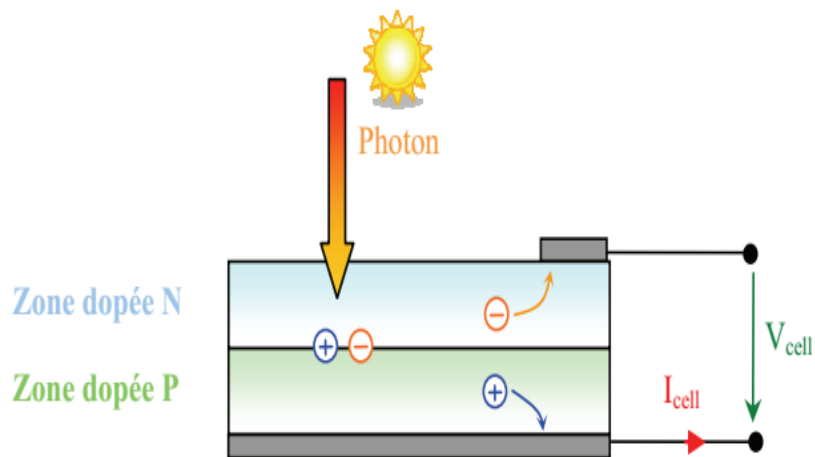


Figure (2.10) : Principe de la conversion photoélectrique [24].

II-8. Les différents types des cellules photovoltaïques :

1) Cellule monocristallin :

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal [28]

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Première génération de photopiles.
- Un taux de rendement excellent de 15% et jusqu'à 24% en labo.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très cher.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

2) Cellule poly cristallin :

Les cellules poly-cristallines sont composées de cristaux. Elles proviennent aussi du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes [28].

Les cellules poly-cristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Procédé moins gourmand en énergie.
- Rendement de 13% et jusqu'à 20 % en labo.

3) Cellule amorphe :

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible) [28].

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement 6 % seulement par module et de 14 % en labo.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement.

II-9. Les avantages et les inconvénients :

Tout système de production d'énergie a ses avantages et ses inconvénients :

Les avantages :

- ❖ Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- ❖ L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas des gaz à effet de serre.
- ❖ Génère l'énergie requise.
- ❖ Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- ❖ L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- ❖ La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- ❖ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant (électricité propre), silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [1].

Les inconvénients [st 06]:

- ❖ Fabrication des panneaux photovoltaïques relèvent de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- ❖ Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.

- ❖ Nécessite un système d'appoint (système de stockage) pour les installations à cause de l'intermittence de soleil (jour et nuit)
- ❖ Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

Conclusion :

Le rayonnement solaire porte continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace.

Le dopage est l'étape le très importante pour l'amélioration de la conductivité et sur les propriétés électriques de silicium

La cellule photovoltaïque basée sur la jonction PN une excitation lumineuse crée, aux alentours de la jonction, des paires électron-trou qui se déplacent sous l'influence du champ électrique de la jonction.

Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

Sommaire

I. Chapitre II	Erreur ! Signet non défini.
II-1. Introduction.....	25
II-2. Historique	25
II-3. Rayonnement solaire porteur d'énergie.....	26
II-4. L'effet photovoltaïque.....	28
II-5. Le silicium métallurgique (MG-Si)	28
II-5-1. Pour quoi le Si ?.....	28
II-5-2. La production du silicium métallurgique	29
3.1. Méthode de Czochralski	31
3.2 La continuité de la procédure subit les étapes suivantes	32
II-6. Le dopage :	33
II-6-1. Qu'est-ce que le dopage?	33
II-6-2. Méthodes de dopage	34
II-6-3. Les différents types de dopage	34
II-6-4. L'utilisation de la jonction P-N comme capteur.....	36
II-7.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :	36
II-8. Les différents types des cellules photovoltaïques	37
1) Cellule monocristallin	37
2) Cellule poly cristallin.....	37
3) Cellule amorphe	38
II-9. Les avantages et les inconvénients	38

La continuité de la procédure subit les étapes suivantes :

-
-
- amélioration par des vidéos
-

Dopage N P

Jonction PN

amélioration par des vidéos

Conclusion

Chap 3

Assemblage de cellules

Méthodes de Caractérisation des cellules PV $I=F(V)$

Schéma élec équivalent de cellules

La courbe i_v (expérience)

Validation

Si un semi-conducteur est éclairé avec des photons d'énergie supérieure à la largeur de la bande interdite, ces photons sont absorbés et il en résulte l'excitation d'un certain nombre d'électrons de BV vers BC. Il reste des trous p dans BV. Mais rien ne permet de séparer les paires électron-trou ainsi formées, leur recombinaison est très rapide. On ne peut pas recueillir d'énergie électrique de cette façon. Il faut donc trouver un moyen de séparer les charges initialement formées. Ceci est réalisé dans un dispositif appelé jonction pn.

III-1. Introduction :

L'électricité est aujourd'hui le vecteur énergétique le plus aisé à exploiter, mais avant le consommer il aura fallu le produire. La production d'électricité photovoltaïque a connu ces dernières années un accroissement d'intérêt par une production dépassant 1800 MW à travers le monde. Cet accroissement était accompagné par une valorisation des recherches visant l'optimisation de l'énergie fournie par les cellules solaires [29].

Dans ce chapitre, nous avons abordé l'association des cellules en série, en parallèle et l'assemblage série-parallèle. Ensuite décrit les convertisseurs photovoltaïques, Nous avons montre la modélisation d'une cellule photovoltaïque modèle idéale et le modèle réel avec une diode et deux diodes. Nous décrirons les caractéristiques I-V d'une cellule PV, leur circuit électrique équivalent et leurs principales caractéristiques, ainsi que l'étude de l'influence de l'éclairement sur leur caractéristique.

III-2. Assemblage des cellules

a) Mise en série des cellules photovoltaïque :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par adition des tensions à courant donné [30].

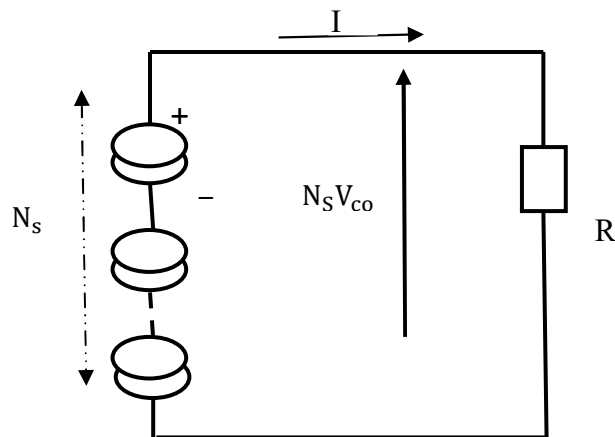


Figure (3.1) : Schéma d'un groupement en série de n_s cellules identiques.

Une association de n_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV).

$$I_{scc} = I_{cc} \quad (III.1)$$

Et
$$V_{sco} = n_s V_{co} \quad (III.2)$$

V_{co} , I_{cc} : Respectivement tension de circuit ouvert et courant de court-circuit de chaque cellule.

V_{sco} , I_{scc} : Respectivement tension de circuit ouvert et courant de court –circuit du groupement série.

b) Mise en parallèle des cellules photovoltaïque :

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [30].

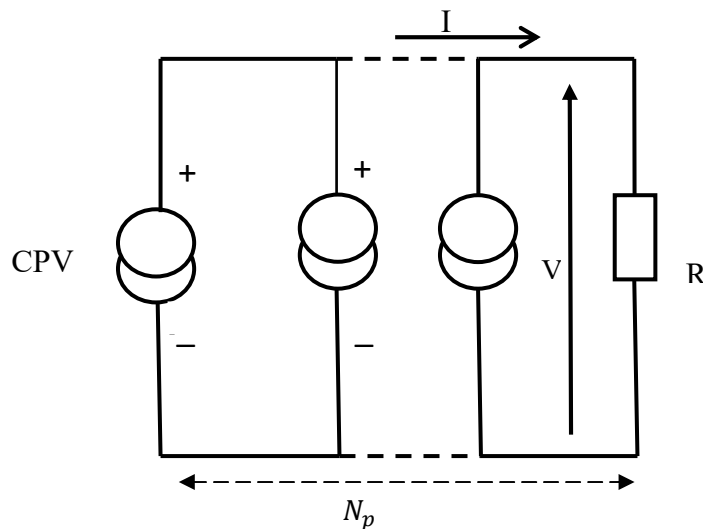


Figure (3.2) : Schéma d'un groupement en parallèle de n_p cellule identique.

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

$$I_{pcc} = n_p I_{cc} \quad (III.3)$$

Et
$$V_{pco} = V_{co} \quad (III.4)$$

V_{co} , I_{cc} : Déjà définis,

V_{pco} , I_{pcc} : respectivement tension de circuit ouvert et courant de court-circuit du groupement parallèle.

c) Groupement série parallèle et la protection des cellules :

Dans certaines conditions d'éclairement non uniforme et de fonctionnement proche du court-circuit, une cellule du groupement série peut même être soumise à la tension des (n_s) autres cellules appliquée en inverse et ainsi fonctionner en récepteur en dissipant une puissance importante qui peut la dégrader si la contrainte thermique est trop forte ou si la tension d'avalanche est dépassée. Pour éviter cela, il faut disposer une diode D_p connectée en parallèle, appelée « diode by-pass », aux bornes d'un groupement élémentaire de 30 à 40 cellules au silicium au maximum. L'amorçage spontané de cette diode parallèle, dès l'apparition d'une tension en inverse aux bornes du groupement limite cette dernière à la valeur V_D de la tension directe de conduction de la diode choisie et la puissance dissipée à $V_D \cdot I_S$. Des modules commercialisés incluent maintenant ces diodes parallèles de protection contre les tensions inverses. De façon duale.

Une autre protection consiste à protéger le module photovoltaïque contre les courants négatifs qui pourraient être générés lors de différentes connexions en parallèle de plusieurs panneaux (lorsque le panneau devient récepteur plutôt que générateur). Ainsi, une diode anti-retour est mise en série avec chaque branche d'un GPV. Le risque est que des chaînes de cellules fortement éclairées débitent dans des chaînes soumises à moins d'éclairement. Il est à souligner que la présence de cette diode anti-retour permet d'éviter tous les courants négatifs y compris provenant de la charge (comme une batterie par exemple fonctionnant tout le temps et pouvant débiter sur le GPV la nuit) [24].

La Figure (3.3) montre le câblage typique d'un réseau de cellules ou de modules PV munis de ces diodes protections.

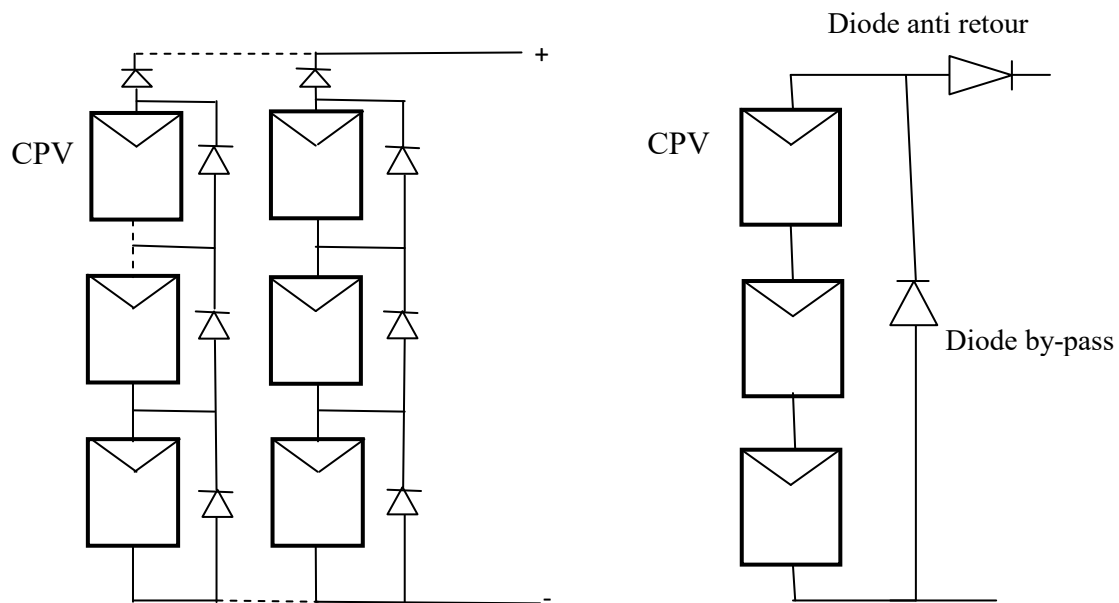


Figure (3.3) : Schéma d'un groupement série parallèle de n cellules.

Les caractéristiques électrique globale courant-tension d'un générateur PV se déduit théoriquement de n_s n_p cellules identique :

$$I_{cc} = n_p I_{cc} \quad (\text{III.5})$$

$$V_{oc} = n_s V_{oc} \quad (\text{III.6})$$

III-3. Paramètres électriques d'une cellule PV

III-3-1. Schéma électrique équivalent d'une cellule PV :

Le circuit équivalent d'une cellule électrique est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (Générateur de courant, résistance, diode, etc.).

Le schéma équivalent est constitué d'une diode (D) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) [31].

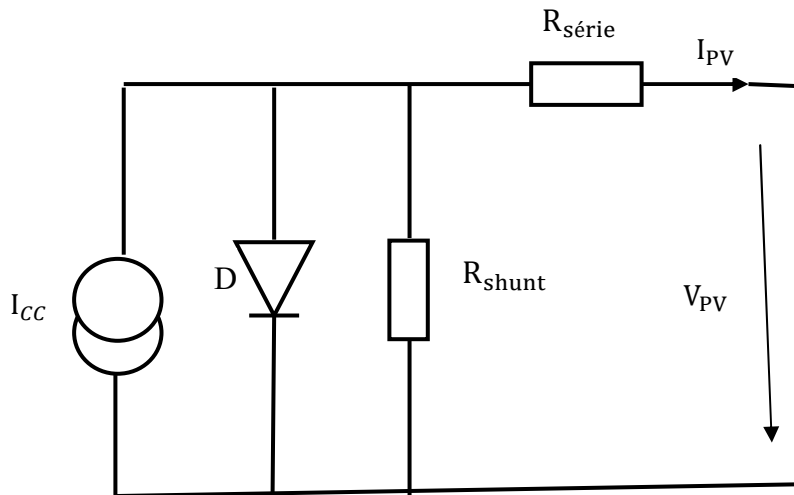


Figure (3.4) : schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

Le rôle de chaque composant électrique :

- Générateur de courant :** il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photo généré.
- La diode D:** modélise la jonction P-N.
- La résistance série (R_s) :** Les pertes ohmiques sont prises en compte par la résistance R_s placée en série. La résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules [32].

d) La résistance shunt (R_{sh}): La résistance R_{sh} reprend les pertes par recombinaison non-radiative et par courant de fuite. La résistance shunt représente les fuites autour de la jonction PN dues aux impuretés et sur les coins de cellule [32].

La présence de la résistance shunt est principalement due aux défauts de fabrication, il s'agit le plus souvent d'une conductance de fuite. La résistance shunt est en général très élevée.

III-3-2. Les grandeurs principales d'une cellule photovoltaïque :

a) Tension à circuit ouvert V_{co} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [33]

$$I = 0 \rightarrow V = V_{co}$$

b) Courant court circuit I_{cc} :

À l'inverse du point de circuit ouvert, lorsqu'on place la photo génératrice en court circuit, il débite son courant maximal, mais aucune charge c.à.d. la résistance de la charge est tant vers zéro.

$$R_{ch} \rightarrow 0 \text{ donc } I = \frac{V}{R} \rightarrow I_{cc} \quad (\text{III.7})$$

c) Point de puissance maximal P_m :

Il correspond au produit le plus élevé du courant par la tension. On parle alors du courant et de la tension de puissance maximum I_m et V_m respectivement.

$$P_m = I_m \times V_m \quad (\text{III.8})$$

d) Le rendement η :

Le rendement est le rapport entre la puissance maximale électrique et la puissance de rayonnement incident à la cellule solaire.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \quad (\text{III.9})$$

e) Facteur de forme :

Le facteur de forme peut être vu comme une mesure de la qualité de la cellule. Si l'on considère une cellule dont la R_S est nulle et la R_{Sh} est infinie, le point de puissance maximum correspond au produit de I_{CC} par la V_{CO} ; la cellule est alors idéale. Le FF correspond au rapport entre ce point de puissance maximum théorique $I_{CC} \times V_{CO}$ et le produit $I_{MP} \times V_{MP}$, point de puissance maximum réel [34]

$$FF = \frac{P_M}{V_{CO} \times I_{CC}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{CO} \times I_{CC}} \quad (III.10)$$

III-4. Modélisation de la cellule PV**III-4-1. Modèle idéal :**

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente [35]. Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (25), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [36].

$$I = I_{ph} - I_D \quad (III.11)$$

Avec :

I : Intensité aux bornes du générateur [A].

I_{ph} : Photo courant [A].

I_D : Courant circulant dans la diode.

Pour un générateur idéal, la tension aux bornes de la résistance égale à celle aux bornes de la diode : $V = V_D$, $R_S \rightarrow 0$, $R_{sh} \rightarrow \infty$

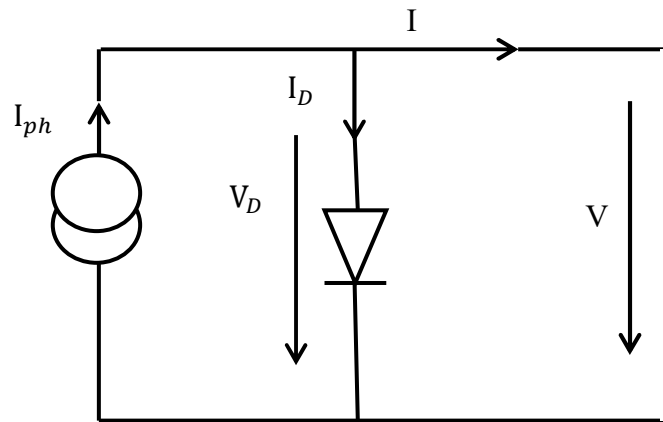


Figure (3.5) : Modèle idéal d'une cellule PV.

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

$$I_D = I_S \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_T} - 1\right) \right) \quad (\text{III.12})$$

Avec :

I_S : Courant de saturation inverse de la diode.

V_D : Tension aux bornes de la diode.

$V_T : \frac{KT}{q}$ Potentiel thermique.

K : Constant de Boltzmann, $K = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

Le courant débité équivaut à :

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_S \left(\exp\left(\frac{V_D}{V_T} - 1\right) \right) \quad (\text{III.13})$$

III-4-2. Modèle réel :

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. Cette perte de tension est modélisée donc par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_{sh} [36], ce modèle est appelé aussi modèle de cinq paramètres. Comme montre la figure (3.6)

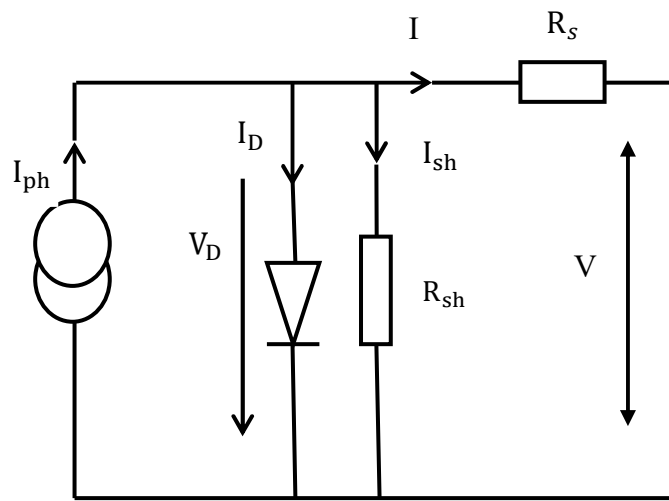


Figure (3.6) : Modèle de la cellule PV réel à une diode.

L'équation de la caractéristique est alors :

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{sh} \quad (\text{III.14})$$

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V + R_s I)}{n \cdot K \cdot T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{III.15})$$

Avec :

V: Tension aux bornes de capteur [V]

R_s : Résistance série [Ω]

R_{sh} : Résistance shunt [Ω] (en parallèle)

q: Charge de l'électron $q = 1.6 \times 10^{-19}$ coulomb

n : Facteur d'idéalité de la diode compris entre 1 et 2

T_j : Température de jonction

Ainsi pour une modélisation complète, il est nécessaire de différencier ces deux termes. Dans le régime des hauts niveaux de polarisation, le courant I_{D1} est dominant, et le facteur de diode n est généralement égal à 1. Lorsque I_{D2} domine, à plus bas niveaux de polarisation, n est égal à 2. On obtient donc un modèle dit « à deux diodes (2D) » [34] :

La figure (3.7) propose un modèle électrique de la cellule photovoltaïque prenant en compte les différents facteurs limitatifs. On y retrouve le générateur de courant I_{ph} , correspondant au courant photo généré ainsi que des résistances complémentaires, R_s et R_{sh} , et deux diodes D_1 et D_2 . R_c est la résistance de charge.

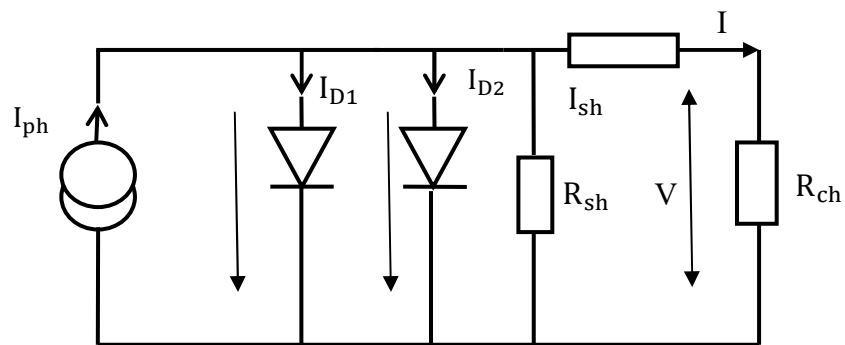


Figure (3.7) : Modèle de la cellule PV réel à deux diodes.

Le courant débité équivaut à :

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (\text{III.16})$$

$$I = I_{ph} - I_{D1} \left(\exp \left(\frac{qV}{nKT} - 1 \right) \right) - I_{D2} \left(\exp \left(\frac{qV}{nKT} - 1 \right) \right) - \frac{V_{sh}}{R_{sh}}$$

L'équation de la caractéristique est alors :

$$I = I_{ph} - I_{D1} \left(\exp \left(\frac{q(V+R_s I)}{KT} - 1 \right) \right) - I_{D2} \left(\exp \left(\frac{q(V+R_s I)}{2KT} - 1 \right) \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{III.17})$$

III-5. Caractérisation expérimentale I-V d'une cellule de silicium en conditions réel

La caractéristique courant-tension (I-V) d'un dispositif électronique est la relation $I=f(V)$ qui lie la tension appliquée à ce dispositif au courant qui le traverse. Pour une cellule PV, la caractéristique I-V est sa carte d'identité.

III-5-1. Appareils et matérielles utilisées :

Nous avons là réalisé une expérience dans laquelle la cellule photovoltaïque au silicium amorphe de $12 \times 5 = 60\text{cm}^2$ était exposée à une intensité lumineuse fixe de $1333 \times 10^2\text{Lux}$ (figure 3.8). Cette expérience a été réalisée au cours d'une journée très ensoleillée le 27 Mai 2018 à 10 h et 45 min. Université Mohamed el Bachir El Ibrahimy, BBA. De longitude $4,801377^\circ$ Est, et latitude de $36,047034^\circ$ N.

III-5.2. Photo du notre expérience :



Figure (3.8) : Photo de l'essai expérimentale.

La méthode la plus simple de tracer une caractéristique (I-V) d'une cellule PV est de connecter directement à :

- 1) **Résistance variable de 0 Ω à 330 Ω** : Pour permettre d'étudier l'évolution de la tension et le courant électrique.
- 2) **Ampèremètre** : connecté en série pour mesurer le courant électrique.
- 3) **Voltmètre** : connecté en parallèle pour mesurer la tension électrique aux bornes de la cellule PV.
- 4) **Luxmètre** : L'appareil de mesure de l'éclairement lumineux.
($1\text{Lux} = 1.5 \times 10^{-3} \text{W.m}^{-2}$).
- 5) **Cellule PV** : générateur d'électricité.

III-5.3. Schéma électrique équivalent :

Le schéma électrique de l'essai expérimental comme illustré sur la figure (3.9) :

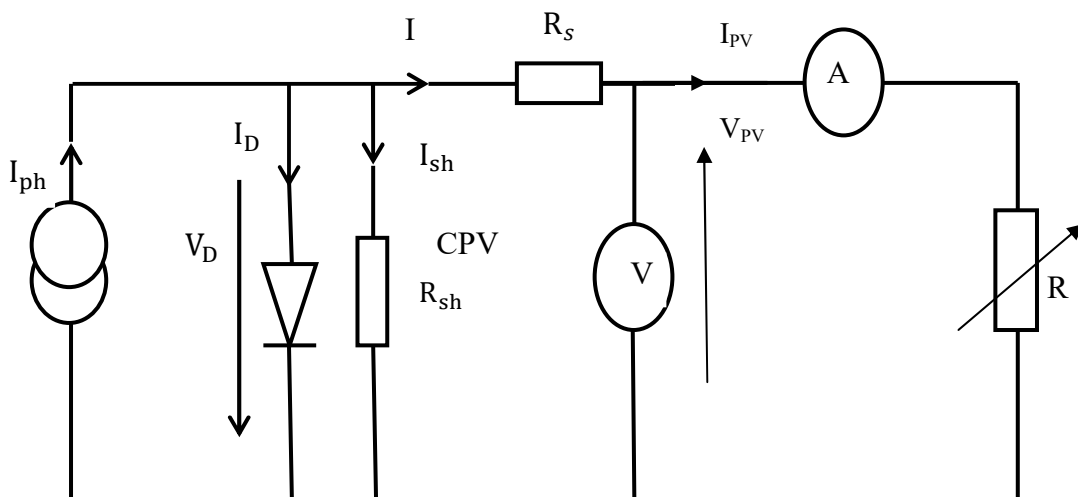


Figure (3.9.a): Schéma électrique de l'essai expérimental.

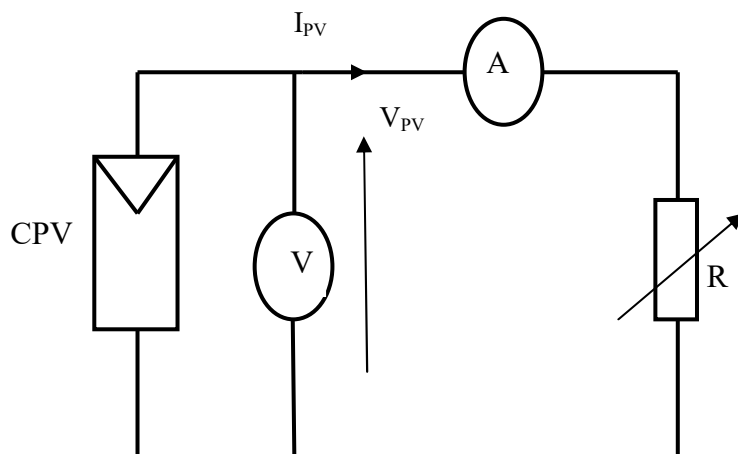


Figure (3.9.b): Circuit électrique de l'essai expérimental

III-5-4. Résultat obtenue dans l'expérience :

Nous obtenons les résultats suivants et en utilisant l'Origine pour tracé le graphe, nous arrivons à la représentation graphique de courant en fonction de la tension électrique $I=f(V)$.

Eclairement 200 W/m ²	Resistance (Ω)	Tension (V)	Courant (A)	Puissance (W)
	0	0.084	0.33	0.01584
	0.1	0.12	0.33	0.0396
	0.33	0.195	0.33	0.06435
	1	0.45	0.33	0.1485
	3.3	1.183	0.32	0.37856
	10	1.7	0.18	0.32562
	33	1.9	0.0537	0.10089
	100	1.964	0.02	0.03928
	330	2.004	0.006	0.01202
	450	2.04	0.0043	0.0087
	Circuit Ouvert	2.08	0	0

Tableau (3.1) : Les résultats de l'expérience.

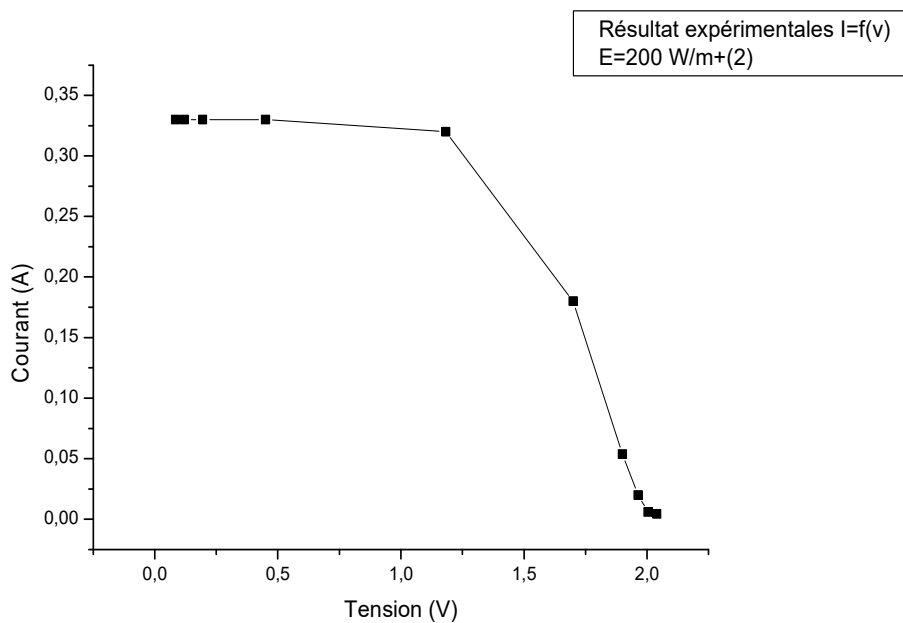


Figure (3.10) : la variation de courant en fonction de la tension électrique.

La puissance pour chaque point de mesure tableau (3.1). Cela leur permet ensuite de tracer la caractéristique puissance-tension $P = f(V)$ selon la formule (III.18) :

$$P = V \times I = R \times I^2 \quad (\text{III.18})$$

La puissance est le transfert d'énergie par unité de temps. La puissance électrique mesurée en Watt ($1\text{W}=1\text{J/s}$).

Avec :

I: Le courant électrique exprime en (A).

V: La tension électrique exprime en (V).

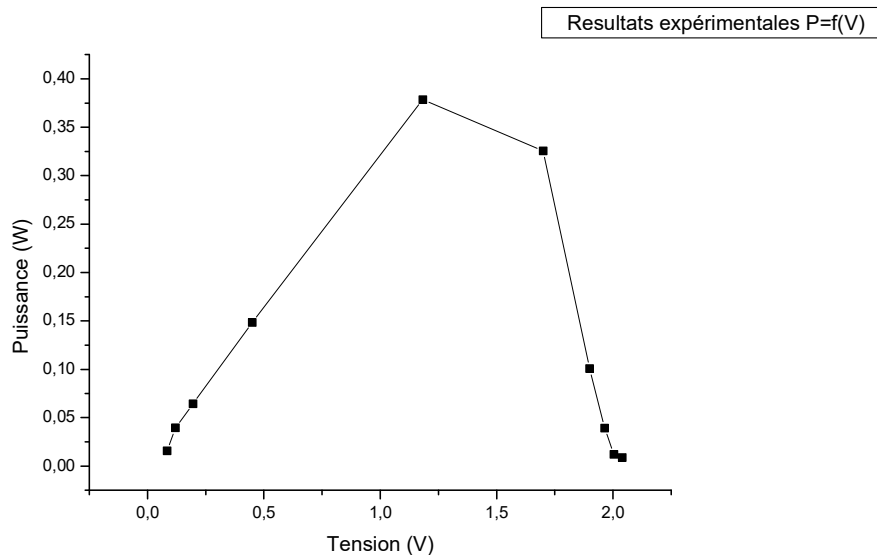


Figure (3.11) : la variation de puissance en fonction de la tension.

On voit que la puissance atteint une valeur maximale de 0.378 W pour une tension de 1.183 V et une résistance de 3.3 Ω . Cette valeur de la puissance est celle trouvée dans le tableau précédent par le produit $V \times I$ au niveau de I_{\max} (elle était de 0.37856 W).

Nous avons donc réussi à réunir tous les grandeurs nécessaires de la cellule utilisée dans l'expérience :

- ✍ La tension de circuit ouvert : $V_{CO} = 2.08 \text{ V}$
- ✍ Le courant de court circuit : $I_{CC} = 0.33 \text{ A}$
- ✍ La puissance maximale fournie par la cellule : $P_{\max} = 0.37856 \text{ W}$

Le courant maximale : $I_{\max} = 0.32 \text{ A}$

La tension maximale : $V_{\max} = 1.183 \text{ V}$

Le facteur de forme : $FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{CO} \times I_{CC}} = 0.55$

Le rendement de la cellule : $\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{0.37856}{200 \times 60 \times 10^{-4}} \times 100 = 3.15\%$

III-5-5. Etude comparative :

L'ensemble des résultats obtenus sont presque les mêmes avec les résultats théoriques et les autres essais, comme montre la figure (3.12) :

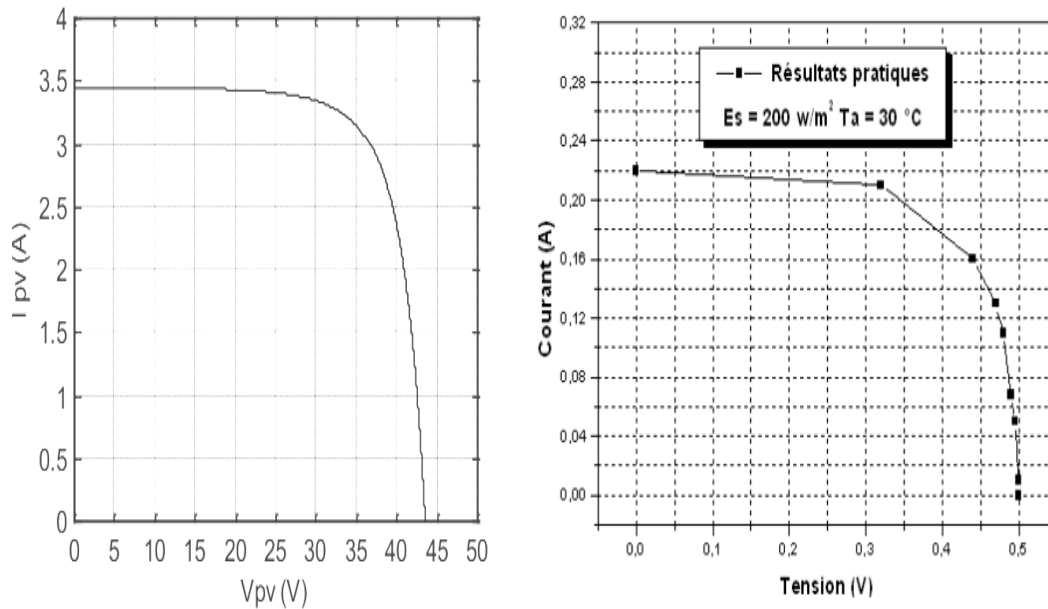


Figure (3.12) : Résultats théoriques et expérimentales d'un autre essai [27,37].

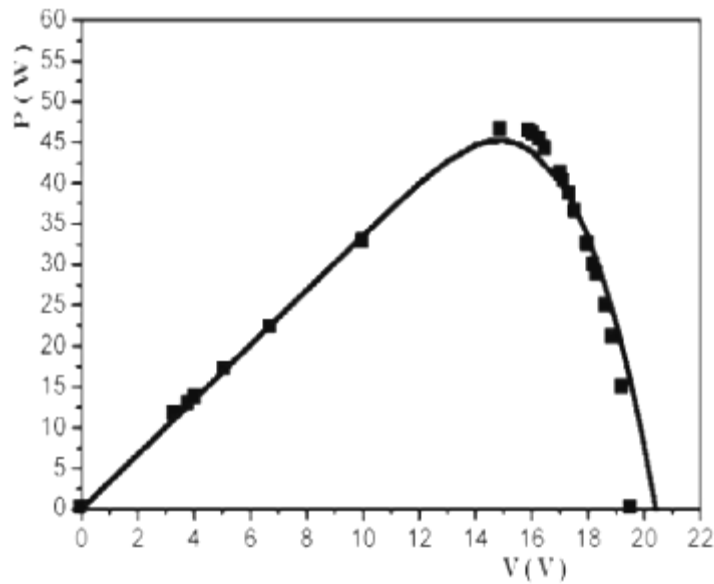


Figure (3.13) : Résultats théoriques et expérimentales d'un autre essai [38].

III-5-6. Zones de fonctionnement d'une cellule solaire :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement; seule la courbe $I(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (3.14) représente trois zones essentielles :

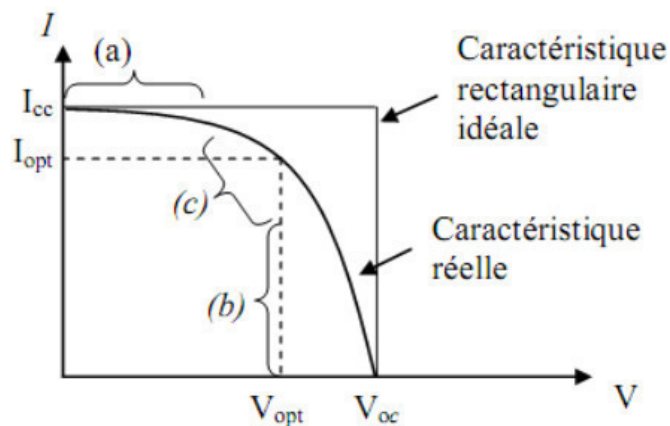


Figure (3.14) : Les trois zones de fonctionnement d'une cellule PV [39].

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

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

La zone (c) : 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.

III-6. Influence de l'éclairement E :

Les figures (3.15) et (3.16) représente la caractéristique courant-tension et puissance tension d'un module (PV) solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes.

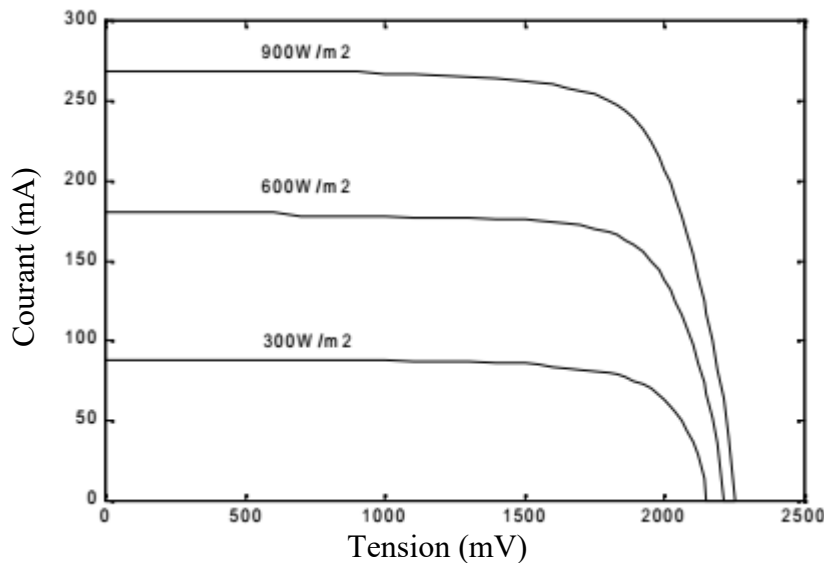


Figure (3.15) : Caractéristique I-V pour différentes éclairement [40].

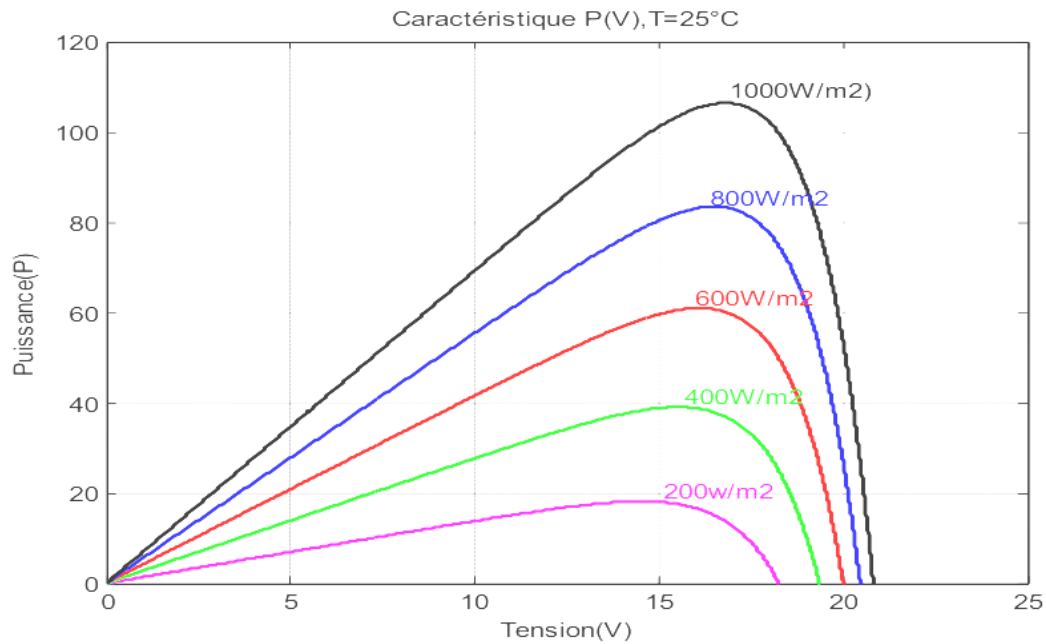


Figure (3.16) : Caractéristique P-V pour différents éclairements [34].

On remarque que la tension maximale V_m correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_m qui augmente fortement avec l'éclairement.

Conclusion :

La cellule solaire est le lieu où la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique se produit. Le modèle photovoltaïque idéal ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. Cette perte de tension est modélisée donc par une résistance en série R_S et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_{sh} .

Nous dirons que les résultats obtenus dans cette expérience ont mis en évidence les aspects qui ont impacté sur les besoins énergétiques. La puissance électrique résultante de cette conversion dépend de l'éclairement et de la répartition spectrale de rayonnement solaire.

Sommaire

I. Chapitre III : Caractérisation d'une cellule solaire.....	Erreur ! Signet non défini.
III-1. Introduction :	40
III-2. Assemblage des cellules.....	40
a) Mise en série des cellules photovoltaïque :.....	40
b) Mise en parallèle des cellules photovoltaïque.....	41
c) Groupement série parallèle et la protection des cellules	42
III-3. Paramètres électriques d'une cellule PV.....	44
III-3-1.Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.....	44
III-3-2. Les grandeurs principales d'une cellule photovoltaïque :	45
III-4. Modélisation de la cellule PV	46
III-4-1. Modèle idéal :	46
III-4-2. Modèle réel	48
III-5. Caractérisation expérimentale I-V d'une cellule de silicium en conditions réel.....	50
III-5-1. Appareilles et matérielles utilisées:	50
III-5.2. Photo du notre expérience :	50
III-5.3. Schéma électrique équivalent.....	51
III-5-4. Résultat obtenue dans l'expérience	52
III-5-5. Etude comparative.....	54
III-5-6. Zones de fonctionnement d'une cellule solaire.....	55
III-6. Influence de l'éclairement E.....	56
I.Conclusion	57

Conclusion générale

Conclusion générale

La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure ces dernières années. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire. L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le Soleil. Elle constitue donc une vraie alternative efficace aux énergies fossiles à plusieurs titres : elle est inépuisable, elle peut être produite localement et selon les besoins locaux, elle préserve l'environnement car elle n'émet pas de gaz carboniques à effet de serre, n'entraîne aucun risque majeur et aucune nuisance significative. Cette énergie est produite par un dispositif (cellule solaire photovoltaïque ou photopile) qui transforme l'énergie électromagnétique du rayonnement solaire en énergie électrique.

Nous avons rappelé, en premier lieu des généralités sur la source fondamentale de l'énergie photovoltaïque; le soleil, son pouvoir énergétique.

Au niveau du sol terrestre, l'éclairement incident sur le plan horizontal résulte de l'éclairement normal hors atmosphère minorée de l'effet de l'angle d'incidence solaire et des pertes liées aux phénomènes de diffusion, d'absorption et de réfraction rencontrés par le rayonnement solaire lors de sa parcours dans la couche atmosphérique.

La cellule photovoltaïque basée sur la jonction PN une excitation lumineuse crée, aux alentours de la jonction, des paires électron-trou qui se déplacent sous l'influence du champ électrique de la jonction.

Pour conclure, nous constatons que les résultats obtenus dans cette étude expérimentale ont mis en évidence les aspects qui ont impact sur les besoins énergétiques.

Référence :

- [1] : Aoun Nouar, thèse de magistère, étude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établit sur base de valeurs nominales, Université Mentouri Constantine, 2009/2010.
- [2] : Bouden Abdelmalk, Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque Université Mentouri Constantine, 2008.
- [3] : UPLOADE BY Arbi Bouziane, chapitre I le gisement solaire, I-1-Introduction L
- [4] : CARREAU.C, DUFOUR .M, GIBILISCO.M, les énergies renouvelables dans l'habitat, France 2001.
- [5] : Vincent Tatischeff (CSNSM, CNRS/Université paris sud) XXV^{ème} Festival d'astronomie de Fleurance, le 13 aout 2015.
- [6] : www.cea.fr Commissariat à l'énergie atomique, Direction de la communication bâtiment siège-91191GiF-sur Yvette cedex (SSN1637-5408). 2009.
- [7] : JP. Maratrey , le soleil, club D'ASTRONOMIE QUAZAR 95. Février 2006
- [8] : Yves JANNOT, Technique de l'ingénieur, THERMIQUE SOLAIRE, Mars 2011.
- [9] : A. Ricaude, photopiles solaires 1^{ère} édition, presses poly techniques et universitaire romandes, Lausanne, 1997.
- [10] : Stéphan ASTIER, DOSSIER TECHNIQUE DE L'ING2NIEUR, l'expertise technique et scientifique de référence d3935, 10/05/2008.
- [11] : www.inrp.fr Florence Trouillet, Jean-Marc Vallée, Mesure de la constante solaire INRP. <http://aces.inrp.fr> /aces/ressources/model/effet-de-serre/puissance solaire.
- [12] : Alain Ricaude, gisement solaire et transferts énergétique, université CERGY-POTOISE. Jan-2011.doc.
- [13] : ©Editions LOISIRS et pédagogie, Demain en main, physique-chimie-AKKP, 5-11-11,2013.

[14] : Cour du professeur Taib AJZOU, Département de physique (FS de Tétouan), chapitre I-Rappels sur le rayonnement solaire et l'effet photovoltaïque.

[15] : J. Mchaussériau, conversion thermique du rayonnement solaire ;Dunod, 1984.

[16] : Mohamed Redha YAICHE, Abdellah BOUHANIK, Atlas solaire Algérien, EISSN/ISSN 1112-3850, Dépôt légal 2062-2002.

[17] : Dépôt légal-4* trimestre 2014 Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN : 978-2550-72002-7, 2014G351-4,2014.

[18]. Le photovoltaïque-MODULE3-Fonctionnement et technologies, Novembre 2010-1/10

[19] : Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie, UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III, Décembre 2003.

[20] : Thomas SCHUTZ-KUCHLY thèse de doctorat, Université PAUK CEZANNE, le 18 octobre 2011.

[21] : www.cea.fr consulté le 16 mai 2011.

[22] : Total, Rapport environnement et société <transition énergétique la vision total à l'horizon 2020-2030 >,2008.

[23] : J. Schmidt and K. Bothe, Phys. Rev. B **69**, 024107 (2004).

[24] : M.PETBON Stéphane, thèse de doctorat de l'université de Toulouse III-Paul Sabatier, le 20 Janvier 2009.

[25] : NEKOUS Mohamed, thèse de Magistère, Université Mohamed Boudiaf Oran, le 23 mai 2013.

[26] : www.Halou.com la fabrication des cellules photovoltaïques.

[27] : Dr. BELAID LALOUNI Sofia, cour énergie solaire photovoltaïques, 2004/2015.

[28] : Borni Abdelhalim, étude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire, Constantine 2009.

[29] : M. Guenounou Abderrazak, Mise au point de nouveaux procédés de mesure des caractéristique directe et inverse des modules photovoltaïque et différents technologies, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2009.

[30] : Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur technique industrielle, Réalisation de technique MPPT numérique, par Alain Bilbao Learreta, Université Virgile, Septembre 2006.

[31] : A. Said, Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage PV, Université de Biskra mémoire de Magistère, 2000.

[32] : M. SLAMA Fateh, Modélisation d'un système multi générateurs PV inter connectés au réseau électrique, Université Ferhat Abbas-Sétif, le 01/04/2011.

[33] ; Missoum Mohamed, contribution de l'énergie PV dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie, le 11/12/2011.

[34] : Thomas Mambrini, Thèse de doctorat, caractérisation des panneaux solaire PV en condition réels d'implantation et en fonction des différentes technologies, Université Paris sud, le 16/12/2014.

[35] : Akassewa Tchapo SINGO, Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.

[36] : M. Z. F.Z. Zerhouni, "Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique," *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 11, no. N°1, p. 41–49, 2008.

[37] : Ben Djellouli Zakaria, Thèse de Magistère, Contribution a la modélisation d'une cellule solaire, Université Bechar, le 28/06/2009.

[38] : M. Mrabti, M. Elouarachi, B.Tidhaf, Ka. kassmi, E. Chadli, et K. Kassmi, modélisation des propriété électriques et caractérisation des panneau PV. *Revue des énergies renouvelables* vol 12 N°1 (2009)105-116.

[39] : Olivier GERGAUD, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Ecole normale supérieure Cachan, 2002.

[40] : Salah Eddine Bensalem, thèse de Magistère, Effet de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires le 06/01/2011.

Résumé :

Dans ce travail, nous avons étudié les caractéristiques courant tension d'une cellule solaire de silicium. On commence par le gisement et l'énergie solaire en première partie. Pour la deuxième partie, nous présentons la modélisation et les résultats de la caractérisation courant-tension (V-I) d'une cellule photovoltaïque. Pour cette étude nous avons réalisé une expérience sur un éclairage naturel constant, nous utilisons une résistance variable pour permettre d'étudier la variation du courant électrique en fonction de la tension. Ainsi que l'étude de l'influence de l'éclairage sur leur caractéristique. Nos résultats expérimentaux sont analysés et comparés avec les autres valeurs de la littérature, ils sont en général en accord avec les autres valeurs théoriques.

Mots clés : Caractérisation des cellules, Modélisation des Cellules, Cellule photovoltaïque.

Abstract:

In this work, we studied the characteristic of silicon solar cell, we start with deposit and solar energy in the first part. For the second part, we present the modeling and the results of the results of the current-voltage characterization of a photovoltaic cell and the fine of the electric characteristic current-voltage of the photovoltaic cell. For this study we carried out an experiment on a constant natural lighting, we use a variable resistance to allow to study the variation of the electric current according to the tension as well as the study of the influence of illumination on their characteristic. Our obtained results are analyzed and compared with available data of the literature; they are in general in agreement with other data of the literature.

Key words: Characterization of cell, Modeling of cell, Photovoltaic cell.

ملخص:

في هذا العمل قدّمنا دراسة حول خصائص التوتر والتيار الكهربائي لخلية شمسية من السيليسيوم ، بدأنا بمجال (نوع) الطاقة الشمسية في الجزء الأول، أما في الجزء الثاني قدّمنا نموذجاً ، نتائج وتمييز للتيار والتوتر الكهربائي لخلية الفولطوضونية . من أجل هذا حققنا نموذجاً تجريبي تحت إضاءة طبيعية ثابتة ، واستعملنا مقاومات متغيرة لمتابعة تغيرات التيار الكهربائي بدلالة التوتر ، كذلك تأثير الإضاءة على هاته الخصائص. حللنا وقارنا النتائج المحصل عليها، تحصلنا على نتائج نفقة إلى حد كبير مع النتائج النظرية و النتائج التجريبية الأخرى. كلمات مفتاحيه : خصائص خلية شمسية ، نموذج خلية شمسية ، خلية فولطوضونية .