

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
Arredj Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences de la Matière

جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعرييج »
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

**L'effet de la température sur les caractéristiques
courant-tension d'une cellule solaire de silicium.**

Préparé par :
Ousfane chaima

Soutenu le : 11/07/2021

Devant le jury :

Président : KAHOUL A. halime
Rapporteur: DAOUDI Salim MCA université BBA
Examineur : SAHNOUNE yacine
Examineur :

Année Universitaire 2020-2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma chère mère

*En témoignage de mon éternelle
Reconnaissance, que Dieu vous protège et vous
Prête bonne santé et longue vie.*

A ma sœur et mon frère

*Qui ont toujours su me motiver même dans les
Moments de doute. Un grand merci pour leur
Encouragement et leur soutien moral.*

A tous les gens qui m'aiment

*En témoignage de mon amour et de ma
Profonde admiration.*

REMERCEMENTS

*Je remercie **Dieu** qui ma donné la volonté pour la Réalisation de ce
modeste mémoire*

A mon encadreur Mr. Salim Daoudi

J'ai eu l'honneur d'être parmi vos étudiants de bénéficier de votre

*Riche enseignement, Vos qualités pédagogiques et humaines sont
pour moi un modèle. Votre gentillesse, et votre disponibilité
permanente ont toujours suscité mon admiration. Veuillez bien
Monsieur recevoir mes remerciements pour le grand honneur que
vous m'avez fait d'accepter l'encadrement de ce travail.*

Aux membres du jury

*Messieurs les membres du jury, vous nous faites un grand honneur en
acceptant de juger ce travail, je dois un remerciement à toute l'équipe
d'enseignement de sciences de la matière pour leurs qualités
scientifiques et pédagogique, Je tiens à remercier chaleureusement.*

*Tous mes proches et tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont apporté
leurs sollicitudes pour accomplir ce travail.*

Sommaire

Introduction général.....	1
Chapitre I : Le Gisement Solaire	
I.1-Introduction.....	3
I.2-Généralité sur le soleil.....	3
I.3-Le rayonnement solaire hors atmosphère.....	5
I.3.1-Définition du corps noir.....	5
I.3.2-La constante solaire.....	7
I.4-L'atmosphère.....	8
I.4.1-Structure de l'atmosphère.....	8
I.4.2-La composition chimique de l'atmosphère.....	9
I.4.3-Masse d'Air (ou Air Masse).....	10
I.5-Le mouvement apparent du Soleil.....	12
I.6-Mouvements de la terre.....	15
I.6.1-Les coordonnées géographiques.....	16
- La longitude (L).....	16
- La latitude (Φ).....	16
- L'altitude (Z).....	17
I.6.2-Les temps solaires.....	17
I.6.2.1-Le Temps Solaire Vrai (T.S.V).....	17
I.6.2.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M).....	18

I.6.2.3-Le Temps Universel (T.U).....	18
I.6.2.4-Le Temps Légal (T.L).....	19
I.6.3-Les coordonnées horaires.....	19
I.6.3.1- La déclinaison (δ).....	19
I.6.3.2- L'angle horaire (ω).....	19
I.7-Durée et taux d'ensoleillement.....	19
I.8-Conclusion.....	20

Chapitre II : L'énergie solaire

II.1-Introduction.....	21
II.2-Historique.....	21
II.3-Le rayonnement solaire porteur d'énergie.....	22
II.4-la production du silicium métallurgique.....	25
II.4.1-La fabrication du silicium métallurgique.....	25
II.5- Le dopage des semi- conducteurs.....	26
II.5.1-Deux types de dopage sont possibles.....	26
➤Le dopage de type n (négatif).....	26
➤ Le dopage de type p (positif).....	27
II.5.2- La jonction P-N.....	28
II.6- Le principe de fonctionnement.....	29
II.7- L'effet photovoltaïque.....	30

II.8-Les différents types de cellules photovoltaïques.....	31
➤Cellules mono- cristallines.....	31
➤Cellules poly-cristallines.....	32
➤Cellules amorphes.....	32
II.9- Avantages et inconvénients d'une cellule solaire	33
a. Avantage.....	33
b. Inconvénients.....	34
II.10- Conclusion.....	35

Chapitre III : Caractéristique d'une cellule solaire I-V en fonction de T°C

III.1- Introduction.....	36
III.2- Association des cellules.....	36
III.2.1- Connexion en série.....	36
III.2.2- Connexion en parallèle.....	37
III.2.3- Connexion en mixte.....	38
III.3-Schéma électrique d'une cellule solaire.....	39
III.4-Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire.....	40
III.4.1-courant de court-circuit I_{cc}	41
III.4.2-tension de circuit ouvert V_{co}	41
III.4.3- La puissance maximale <i>P_m</i>	41
III.4.4- Facteur de forme FF.....	42
III.4.5- Le rendement.....	42

III.5-Modélisation de la cellule PV	43
III.5.1- Cellule photovoltaïque idéale.....	43
III.5.2- Cas d'une cellule solaire réelle.....	44
III.6-Characterisation expérimentale I-V d'une cellule de silicium en condition réel.....	46
III.6.1-Appareilles et matérielles utilisées.....	46
III.6.2- Photo du notre expérience.....	47
III.6.3-Schéma électrique équivalent.....	47
III.6.4-Résultat obtenue dans l'expérience.....	48
III.6.5-Zones de fonctionnement du module photovoltaïque.....	50
III.7-Conclusion.....	52
Conclusion générale.....	53

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : La structure du soleil.....	4
Figure. I.2 La divergence de l'énergie du soleil vers la terre.....	7
Figure I.3. : La structure de l'atmosphère.....	8
Figure I.4. : Le rayonnement solaire et le nombre d'air masse.....	11
Figure I.5. : Norme de mesure du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.....	12
Figure I.6. La Hauteur et Azimut du soleil.....	13
Figure I.6. Hauteur du soleil (h).....	14
Figure I.7 : Azimut du soleil (α).....	14
Figure I.8. Diagramme solaire cylindrique pour Uccle en temps universel.....	15
Figure I.9. Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil.....	16
Figure I.10. Longitudes et latitudes sur le globe.....	17

Chapitre II

Figure II.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	23
Figure II.2 : Composantes du rayonnement solaire au sol.....	24
Figure II.3 : Semi-conducteur de type N.....	27
Figure II.4 : Semi-conducteur de type P.....	28
Figure II.5 : Jonction PN à l'équilibre.....	28
Figure II.6 : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.....	31

Chapitre III

Figure (III.1) : caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identique.....	37
Figure (III.2) : caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identique.....	38
Figure III.3 : caractéristique résultante d'un groupement hybride de (n_p+n_s) cellule identique.....	39
Figure III.4 : Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque.....	40
Figure III.5 : Point maximal de puissance d'une cellule élémentaire.....	40
Figure III.6 : schéma équivalent de la cellule solaire idéale.....	43
Figure III.7 : Schéma équivalent de la cellule solaire réelle.....	44
Figure III.8 : photo de l'essai expérimentale.....	47
Figure III.9 : Schéma électrique de l'essai expérimental.....	47
Figure III.10 : Circuit électrique de l'essai expérimental.....	47
Figure III.11 : La variation de courant en fonction de la tension électrique.....	49
Figure III.12: La variation de courant en fonction de la tension électrique.....	50
Figure III.13 : les différentes zones de la caractéristique $I(V)$	51

Liste des tableaux

Chapitre III :

Tableau III.1: Les résultats de l'expérience.....	48
Tableau III.2: Les résultats de l'expérience.....	49

Introduction générale

Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie est fortement liée au développement de l'industrie et des moyens de transport. Actuellement ce sont les sources d'énergies fossiles qui sont les plus exploitées, entraînant plusieurs désavantages : pollutions, réchauffement de la planète, détérioration de la couche d'ozone et un risque d'épuisement de ces ressources dans quelques décennies d'année.

Pour résoudre ces problèmes, certains pays industrialisés comme les pays de l'union Européenne et l'USA tentent de promouvoir les énergies renouvelables dont fait parti le photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie, La première cellule solaire était fabriquée en 1954 aux Laboratoires BELL. Elle était à base de silicium.

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 conséquence 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.

On peut utiliser cette énergie pour l'alimentation des régions isolées ou désertes soit pour l'éclairage, pour le pompage d'eau, pour la charge d'une batterie ou pour la connexion sur le réseau public électrique. Notre intérêt porte sur cette dernière utilisation qui nécessite le recours d'un convertisseur pour transférer l'énergie électrique au réseau public. Toutefois, l'énergie solaire est

caractérisée par sa fluctuation selon la saison et les heures de la journée. L'énergie fournie par les panneaux solaires dépend fortement de plusieurs paramètres; internes (lié au dispositif lui-même; la technologie d'élaboration du dispositif photovoltaïque) et externes (lié à l'environnement du fonctionnement: éclairage, température, etc.). L'étude de l'influence de ces différents paramètres sur le fonctionnement des photopiles solaires est possible à travers la connaissance de l'influence de chaque paramètre sur la caractéristique de la cellule.

Dans ce mémoire, notre travail portera sur l'étude expérimentale des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque et l'influence de température sur la caractéristique courant – tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque.

Dans le premier chapitre, nous allons voir quelques notions de base sur le gisement solaires.

Dans le deuxième chapitre, on donne des rappels sur l'énergie solaire et les différents types des cellules photovoltaïques avec la connaissance du principe de fonctionnement de la cellule PV.

Le troisième chapitre sera consacré à l'analyse et l'étude expérimentale de l'influence de température sur les caractéristiques courant – tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque.

Nous achevons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre : 01

Le gisement solaire

I.1-Introduction

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique.

Au lieu de faire l'étude de la terre autour du soleil et de son axe ; il est plus important pour notre étude de s'intéresser au mouvement apparent du soleil. L'utilisation d'un modèle de l'atmosphère basé fondamentalement sur la connaissance du trouble atmosphérique pour la détermination des différentes composantes du rayonnement solaire d'un site donné notamment l'éclairement solaire direct est très indispensable dans la concentration solaire.

I.2-Généralité sur le soleil

Le soleil est une sphère avec une matière extrêmement chaude et gazeuse avec un diamètre de $1,39.10^9$ m et est à distance moyenne de $1,49.10^{11}$ m de la terre. Comme vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines, cependant il ne tourne pas comme un corps solide; une rotation est faite en 27 jours à l'équateur et en 30 aux régions polaires [1]. Le soleil est considéré comme un corps noir avec une température effective de 5777K. La température des régions intérieures centrales est de l'ordre de 8.10^6 à 40.10^6 K et la densité est estimée à 100 fois celle de l'eau. Le soleil est en effet, un réacteur de fusion continu avec ses constituants sous forme gazeuse retenue par des forces gravitationnelles, plusieurs réactions de fusion est déclenché pour intensifier l'énergie rayonnée par le soleil. Le processus le plus important est la transformation de l'hydrogène en hélium par une réaction thermonucléaire. Cependant, comme la masse du noyau de l'hélium est moins lourde que celle de quatre protons d'hydrogène, la masse perdue dans la réaction thermonucléaire est convertie en énergie [1].

L'énergie produite à l'intérieur de la sphère solaire à une température de l'ordre de plusieurs millions de degrés est transférée à la surface extérieure puis transférée par rayonnement dans l'espace. Les processus radiatif et convectif sont le résultat des états successifs d'émission, d'absorption et de radiation; la gamme de spectre de rayonnement dans le noyau du soleil est comprise entre la longueur d'onde des rayons X et celle des rayons gamma, avec une longueur d'onde de radiation qui augmente suivant la diminution de la température à de grandes distances.

Dans la structure schématique du soleil illustré dans la figure I.1, il est estimé que 90% de l'énergie est générée dans la région du disque solaire située entre 0 et 0,23R, ou R le rayon du soleil, qui représente 40% de la masse du soleil. A distance de 0,7R du centre, la température diminue d'environ 130 000 K et la densité de 70 kg/m^3 ; Là, le processus convectif du soleil devient important et la zone comprise entre 0,7 et 1,0R est appelée : zone convective. Dans cette zone, la température diminue d'environ 5000 K et la densité d'environ 10^{-5} kg/m^3 [1].

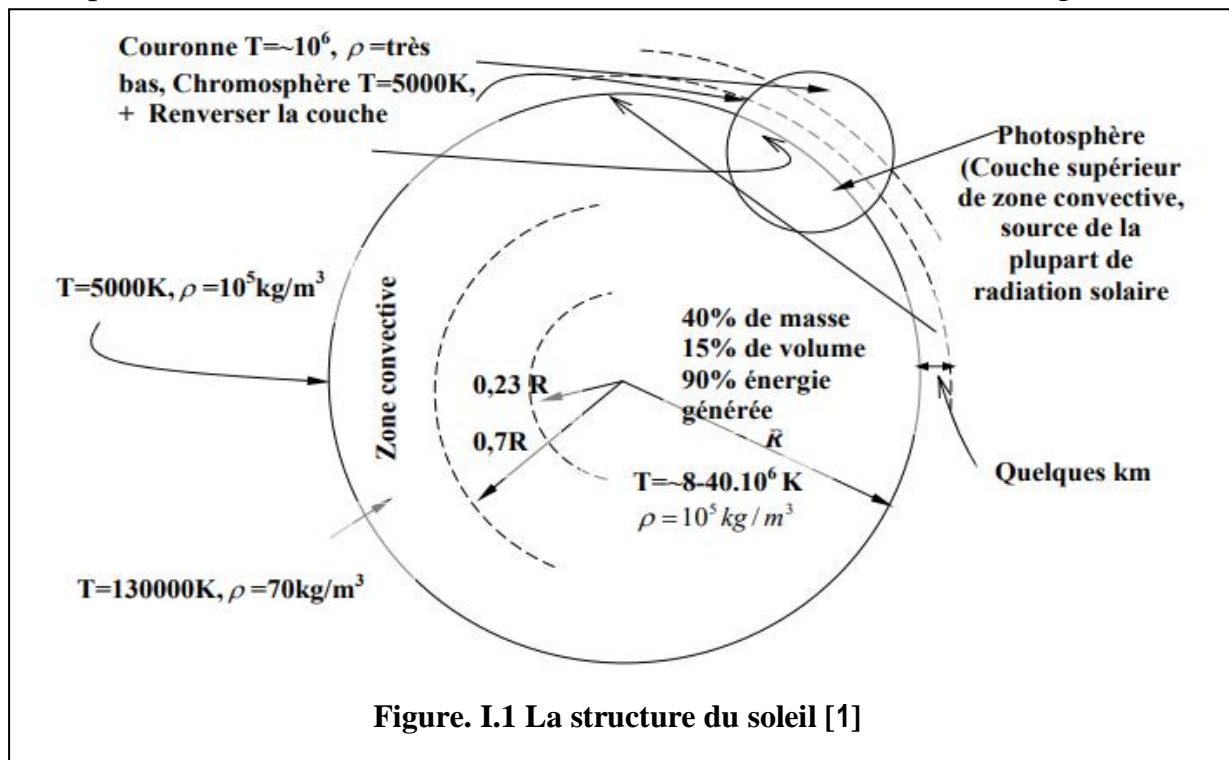
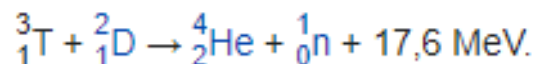


Figure. I.1 La structure du soleil [1]

La surface apparente du soleil est constituée de granules (cellules convectives irrégulières), avec des dimensions de l'ordre de 1000 à 3000 km et leur durée de vie est estimée à quelques minutes. Les autres formes à la surface du soleil sont de petites aires opaques qui s'appellent pores.

A des dimensions équivalentes à celles des cellules convectives, il existe d'autres aires opaques avec des dimensions variables qui s'appellent taches solaires. La couche extérieure de la zone convective s'appelle photosphère, sa densité est très faible (environ 10^{-4} celle de l'air au niveau de la mer). Cette couche est composée de gaz à forte ionisation qui peut absorber et émettre des radiations de spectre continue. La photosphère est la source de la plupart des radiations solaires.

Il est généralement admis que le rayonnement solaire est produit par un phénomène thermonucléaire contrôlé de transformation de l'hydrogène en hélium (de hélios = soleil) : les noyaux des atomes de deutérium et de tritium (isotopes de l'hydrogène) fusionnent en libérant de l'énergie.



I.3-Le rayonnement solaire hors atmosphère :

I.3.1-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. On dit que la radiation électromagnétique absorbée par les parois de l'enceinte est en équilibre thermique. Tous les photons sont absorbés en permanence quelle que soit leur longueur d'onde et les photons réémis ont une distribution spectrale qui ne dépend que de la température des parois du corps noir. Il obéit à la fois aux lois de Lambert, de Stefan et de Wien [2].

Comme un corps parfaitement absorbant pour toutes les longueurs d'onde, le corps noir a les propriétés suivantes :

- Le corps noir, parfaitement absorbant, est également un émetteur parfait.
- Son émission propre est uniquement fonction de la température absolue, et la formule de Stefan indique que :

$$E = \sigma T^4$$

E est un flux énergétique par unité de surface s'exprimant en W/m². Avec σ constante de Stefan exprimée en W/m². K⁴ :

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4.$$

On retiendra également une autre expression très commode de la constante de Stefan pour les calculs des températures d'équilibre:

$$E = (T/64.5)^4$$

- La loi de Lambert indique que sa luminance est indépendante de la direction [2].
- La répartition spectrale du rayonnement émis est définie par les lois de Wien et de Planck: la longueur d'onde λ_{\max} du maximum d'émission est liée à la température par la relation :

$$\lambda_{\max} = 2898/T$$

Avec λ en μm et T en K.

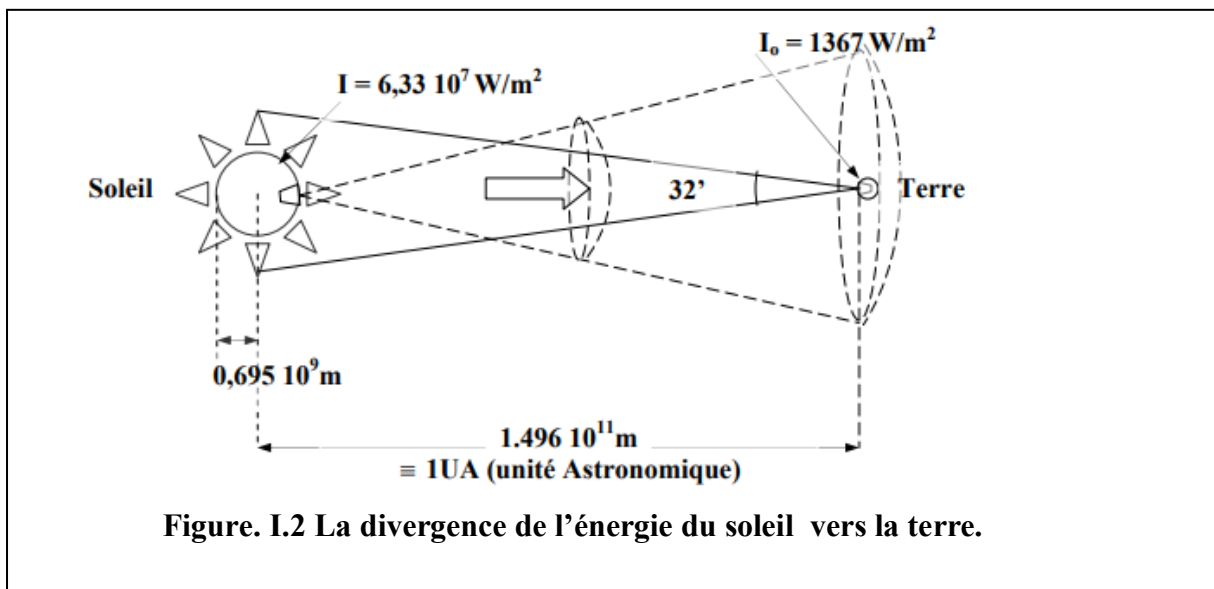
99% de la puissance émise par un corps noir l'est dans l'intervalle $0.5 \lambda_{\max} - 10 \lambda_{\max}$

Le rayonnement du Soleil correspond à l'émission d'un corps noir à 5 760 K : maximum d'émission vers 0,5 μm , domaine spectral entre 0,25 et 5 μm . Selon

l'origine du rayonnement solaire, provenant de couches plus ou moins profondes de la photosphère, la température d'émission varie légèrement pour les diverses longueurs d'onde émises par le Soleil [2].

I.3.2-La constante solaire

Le flux du rayonnement à la surface du soleil est d'environ $6,33 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$. Une surface plane, d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire, située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée en fonction de la distance Soleil-Terre ($149\,597\,870 \cdot 10^3 \text{ m}$ ou 1UA représente la distance moyenne Soleil-Terre). Cette distance a une faible variation au cours de l'année, compte tenu de la légère excentricité de l'orbite terrestre qui est d'environ 1,7% [1]. La constante solaire est une valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, sa valeur est estimée à 1367 W/m^2 [3]. La représentation schématique du système Soleil-Terre est indiquée dans la figure I.2 [4].



La taille angulaire apparente du disque solaire peut être calculée à partir du diamètre de la photosphère et la distance Soleil-Terre. A 1UA, il s'agit de

0,0093 rad (0,553 degrés ou 32'). Comme la distance Soleil-Terre varie au cours de l'année, la taille apparente du soleil varie de $\pm 1,7\%$ [1].

I.4-L'atmosphère

I.4.1-Structure de l'atmosphère

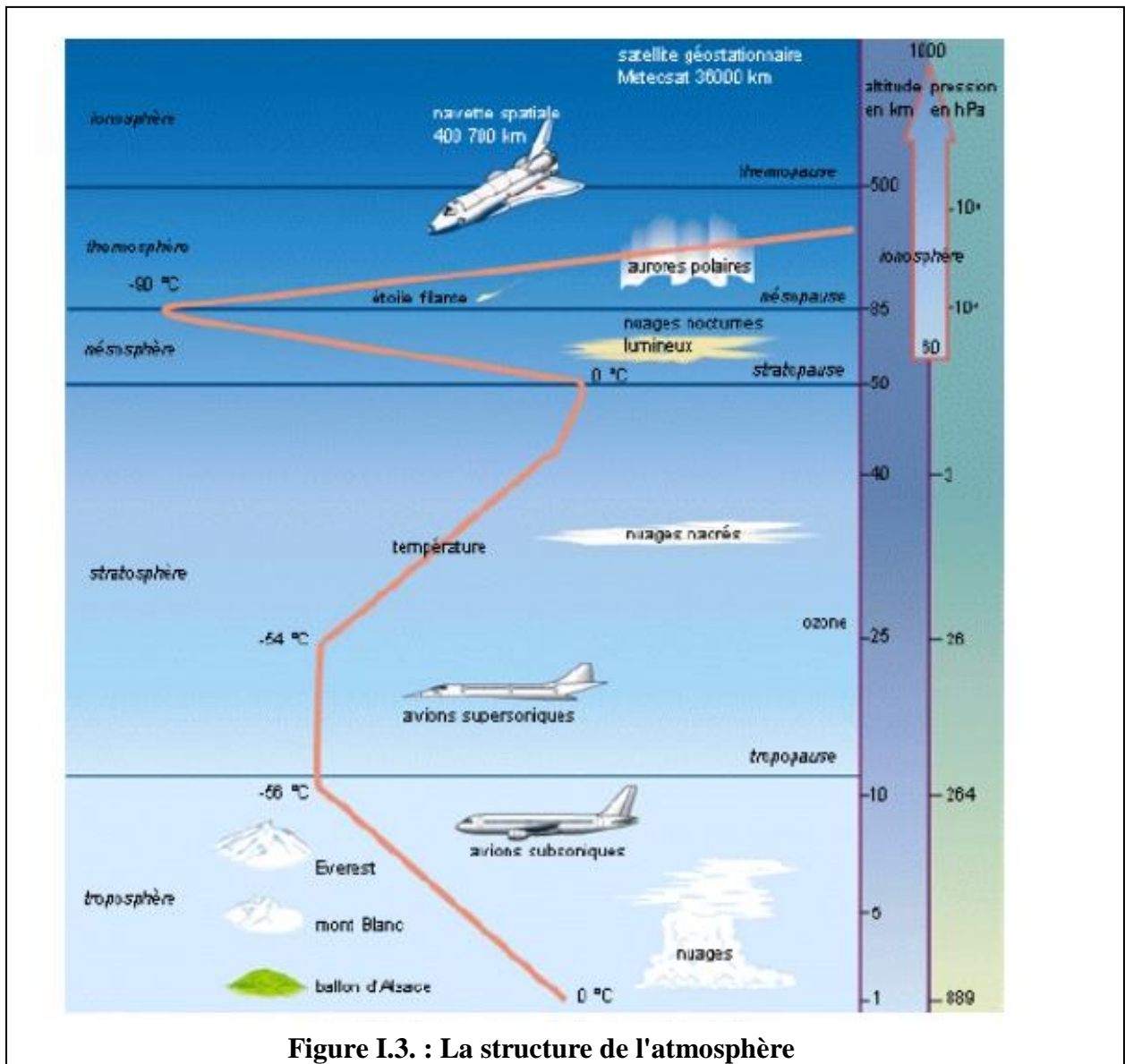


Figure I.3. : La structure de l'atmosphère

L'atmosphère se compose comme suit :

- La troposphère qui s'étend jusqu'à 10 à 12 km d'altitude et où la température décroît de 6.5°C par km, pour atteindre - 56 °C à la base de la couche suivante.

- La stratosphère de 12 à 55 km où la température croît de -56 °C à 0 °C jusqu'à la stratopause. C'est elle qui contient une mince couche d'ozone.
- La mésosphère de 50 à 85 km où la température décroît à nouveau de 0 °C à -90 °C .
- L'ionosphère (confondue avec la thermosphère) et où la température croît régulièrement pour atteindre 1500 °C . C'est elle qui contient les couches réfléchissantes pour les ondes radio (couches d'Heavyside); elle s'étend jusqu'à 700 km d'altitude.
- L'exosphère au delà de 700 km qui s'ouvre sans frontière sur l'espace intersidéral [2].

I.4.2-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 CO_2 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.

La masse gazeuse totale traversée est de 10 tonnes / m^2 ; elle équivaut à 7.8 km d'atmosphère ramenée aux conditions de température et de pression dites normales: $T=0\text{ °C}$; $p=1\ 013\text{ mbar}$. 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 CO_2 , 14 cm de Néon, 4 cm d'Hélium, quelques mm de Krypton, de méthane de NO et de NO_2 et seulement 5 mm d'ozone [2] .

I.4.3-Masse d'Air (ou Air Masse)

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus son rayonnement est modifié. On appelle « Masse d'Air », m , la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement directe pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer (voir figure (I.4)).

Cela dépend de la hauteur angulaire du soleil (h). à l'aide des points O, A et M, on écrit la longueur du trajet du soleil travers l'atmosphère :

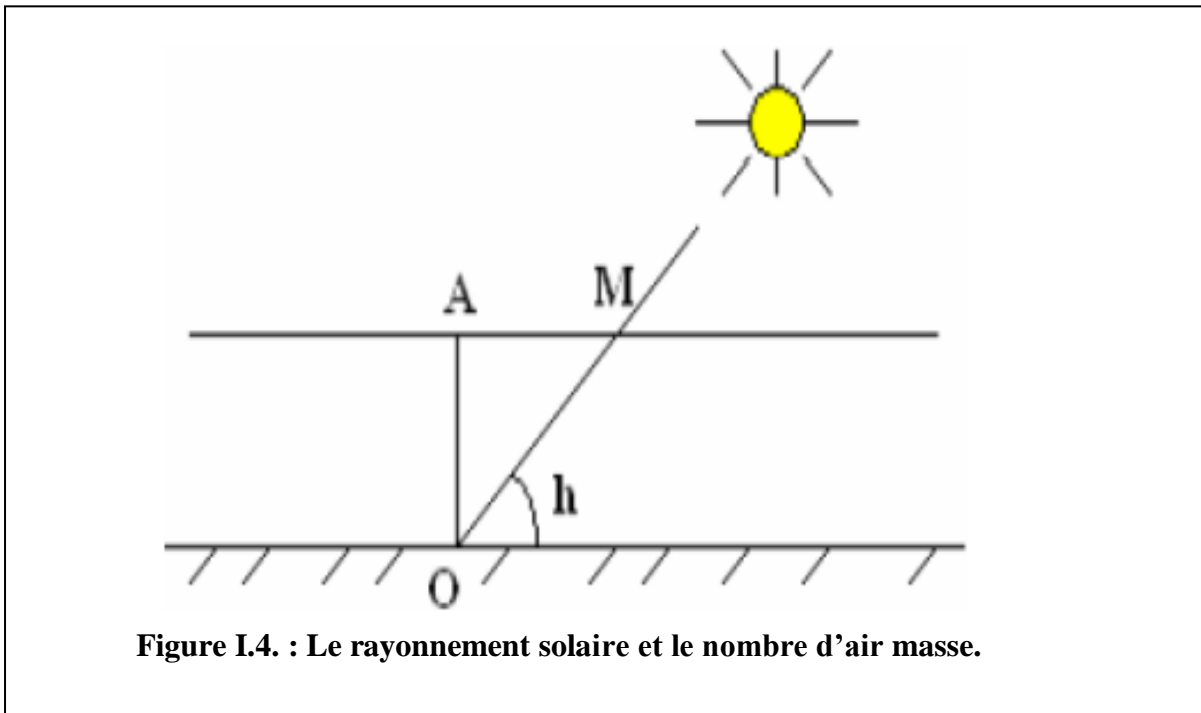
On prend pour référence unité d'épaisseur verticale de l'atmosphère moyenne (épaisseur réduite à 7,8 km)

$$OM = OA / \sin h$$

On appelle m le rapport OM / OA , soit $1/\sin h$.

A une pression P différente de 1013 mbar et à une altitude z (en km), on désignera par masse atmosphérique ou nombre d'air masse, le nombre [5] :

$$m = \frac{p}{1013} \frac{1}{\sin h} \exp\left(\frac{-Z}{7.8}\right)$$



Exemple [4]:

Rayonnement hors atmosphère : AM 0

Soleil au zénith, niveau de la mer : AM 1

Soleil à 42° sur l'horizon : AM 1.5

Soleil à 30° sur l'horizon : AM 2

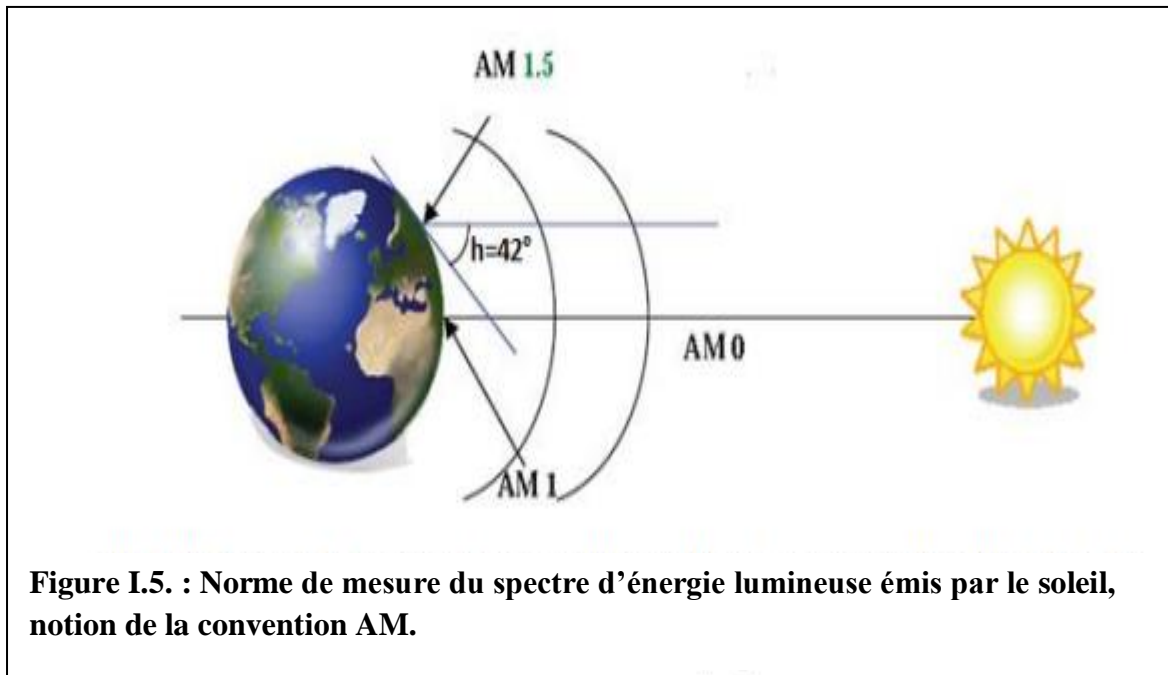


Figure I.5. : Norme de mesure du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.

I.5-Le mouvement apparent du Soleil

Pour bien comprendre et utiliser l'influence du Soleil dans le choix et le traitement d'un site, il faut bien sûr connaître à tout instant la position du Soleil dans le ciel. Cette information est indispensable pour le calcul des apports solaires, pour le choix de l'exposition d'un immeuble, l'implantation de systèmes actifs solaires (thermique ou photovoltaïque), l'aménagement des parties extérieures voisines, l'éclairage naturel des pièces intérieures, l'emplacement des fenêtres, des protections solaires et de la végétation, etc.

À un instant donné, la hauteur et l'azimut du Soleil déterminent la position du Soleil dans le ciel. Ainsi est connue la direction du rayonnement solaire et peuvent être calculées les surfaces ensoleillées du bâtiment. Ces calculs tiendront compte des effets d'ombrage dus au relief, au cadre bâti, à la végétation ou au bâtiment lui même.

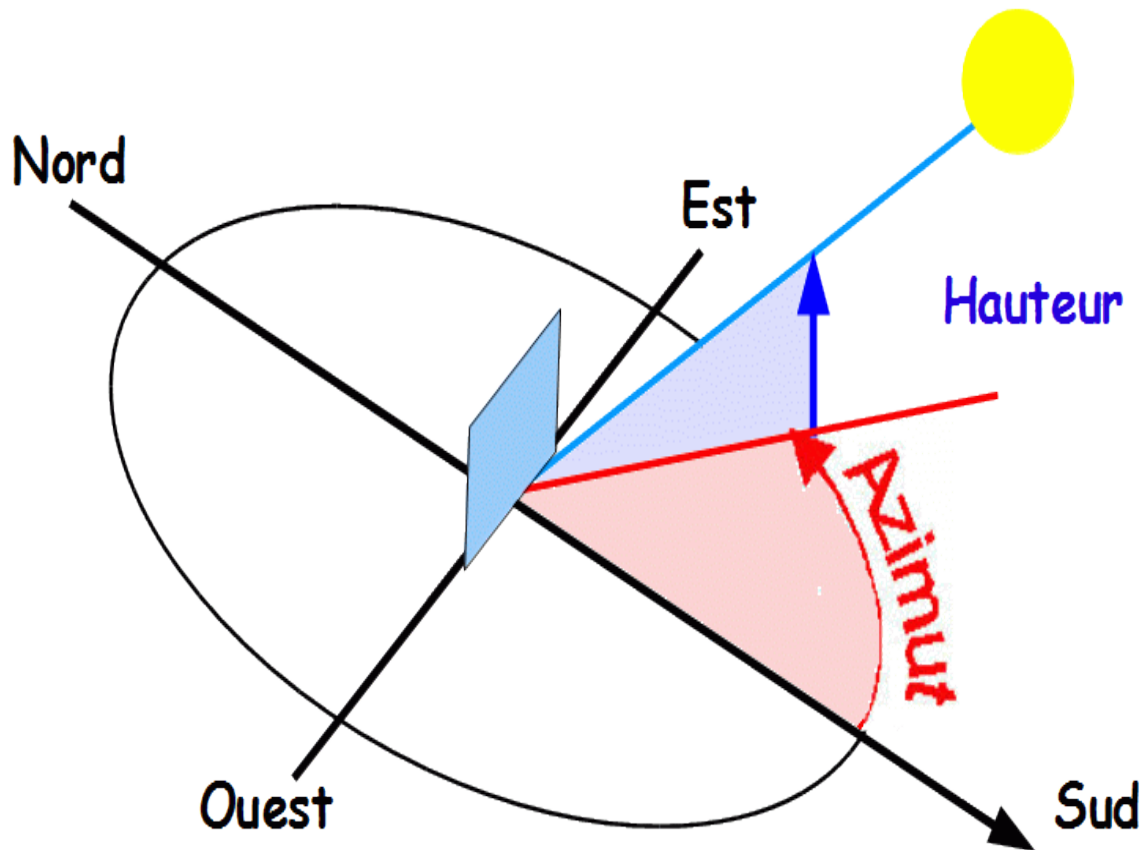


Figure I.6. La Hauteur et Azimut du soleil

En un lieu,

- La hauteur " h " du Soleil est l'angle que fait la direction du Soleil avec le plan horizontal. Elle se compte de 0° à 90° à partir de l'horizon

Vers la voûte céleste.

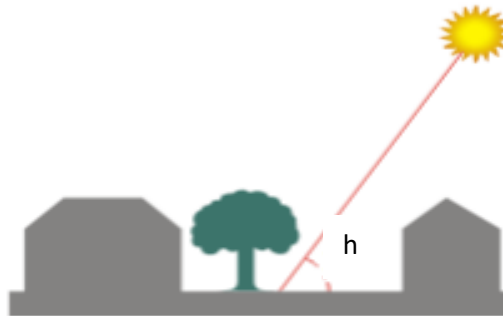


Figure I.6. Hauteur du soleil (h)

. L'azimut " α " du Soleil est l'angle créé entre le plan vertical passant à la fois par le Soleil et par le lieu considéré, et le plan vertical N-S. Cet angle vaut 0° au sud et est conventionnellement positif vers l'ouest et négatif

Vers l'est.

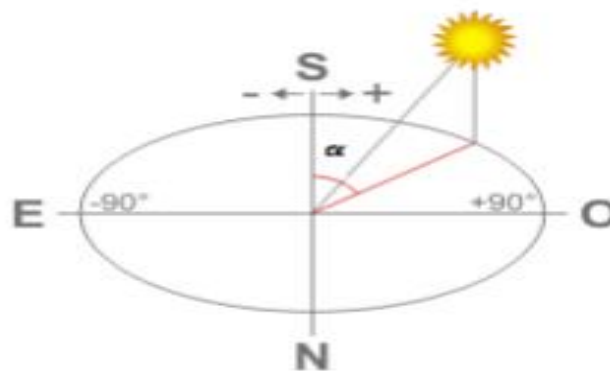


Figure I.7 : Azimut du soleil (α)

Pour plus de clarté, on représente généralement la course solaire par un diagramme en coordonnées rectangulaires.

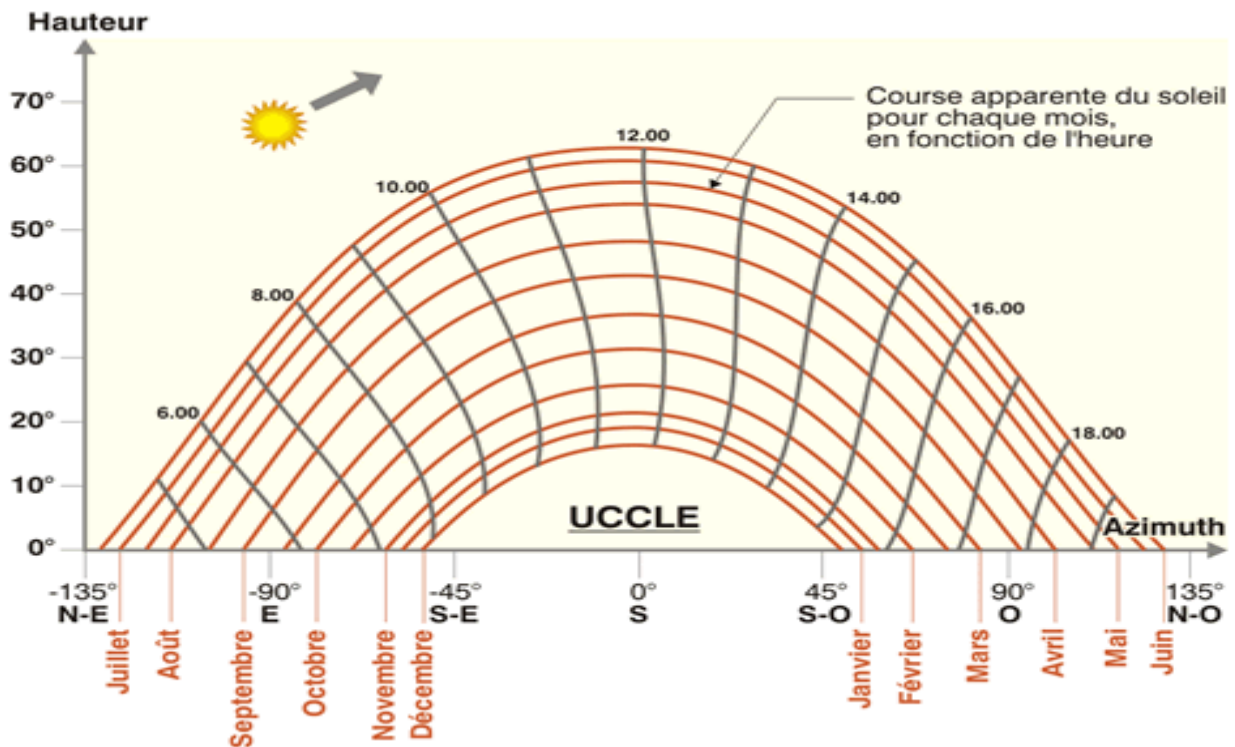


Figure I.8. Diagramme solaire cylindrique pour Uccle en temps universel.

Pour en savoir plus sur la construction d'un diagramme solaire : LIENS (dernier point). En regardant plus précisément, la valeur de l'azimut à différents moments de l'année, on constate que l'expression "le Soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest" n'est pas exacte. En effet, en décembre, il se lève au sud-est pour se coucher au sud-ouest, tandis qu'en juin, il se lève pratiquement au nord-est pour se coucher au nord-ouest. Ceci donne 7 heures d'ensoleillement maximum en décembre et plus de 16 heures en juin : ce sont les deux époques des solstices de l'année. Ce n'est qu'aux équinoxes de printemps et d'automne que la durée du jour est égale à celle de la nuit [7].

I.6-Mouvements 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** [8].

L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/ Soleil ne varie que de $\pm 1,7 \%$ par rapport à la distance moyenne qui est

de $149\,675\,10^6$ km [8].

La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à **l'écliptique** en fait l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé **inclinaison** de l'ordre de $23^{\circ}27'$ [9].

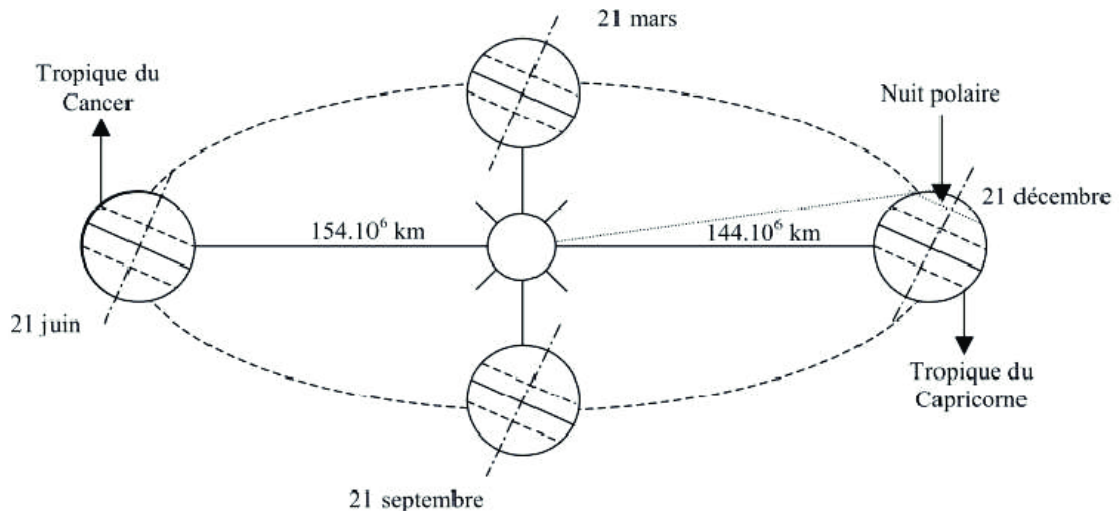


Figure I.9. Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil.

I.6.1-Les coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure I.8). [10]:

- La longitude (L) :

C'est l'éloignement par rapport au méridien de Greenwich, mesuré en degré. Elle est comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, à partir du méridien **Greenwich**.

- La latitude (Φ) :

C'est l'éloignement d'un point sur la surface de la terre par rapport à l'équateur, mesuré en degré (mesurée à partir du centre de la terre), permettent

de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère sud.

- L'altitude (Z) :

C'est l'altitude d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (le niveau de la mer = 0), elle est exprimée en mètre.

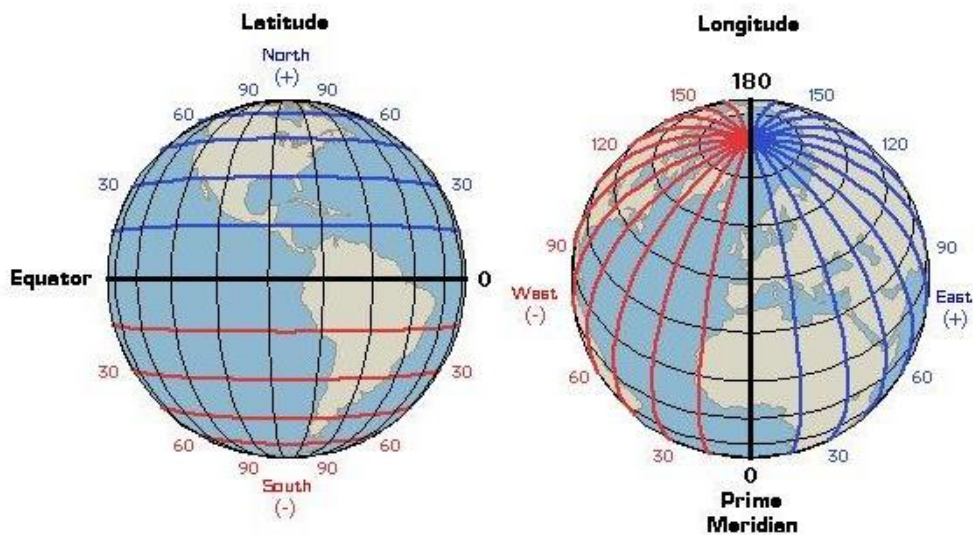


Figure I.10. Longitudes et latitudes sur le globe.

I.6.2-Les temps solaires

I.6.2.1-Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil w . Il est donné sous la forme suivante [11] :

$$\text{TSV} = 12 + \omega/15$$

ω : En degré.

Si $\omega = 0$, TSV=12h.00

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

I.6.2.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M) :

Il est appelé parfois temps locale (TSM), Il est donné par la relation [11] :

$$Et = TSV - TSM$$

Avec :

Et : l'équation du temps, qui corrige le T.S.V par rapport au T.S.M.

$$Et = 9.87 \sin (2N') - 7.53 \cos (N') - 1.5 \sin (N') \text{ [min]}$$

$$\text{Ou: } N' = (nj - 81) \cdot 360/365$$

Où : nj est le numéro du jour dans l'année.

I.6.2.3-Le Temps Universel (T.U) :

C'est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore GMT (Greenwich Mean Time) [11]:

$$TU = TSM - (L/15)$$

Où : L : est la longitude.

$L > 0$; pour les villes situées à l'Est de Greenwich.

$L < 0$; pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich.

$TU = TSM$; pour le méridien de Greenwich.

I.6.2.4-Le Temps Légal (T.L)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par [11] :

$$TL = TU + \Delta H$$

Où :

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

I.6.3-Les coordonnées horaires

I.6.3.1- La déclinaison (δ)

C'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante [8] :

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{284 + n_j}{365} \times 360 \right] [\text{Degré}]$$

Où :

n_j : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier.

I.6.3.2- L'angle horaire (ω)

Il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté Positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360° .

I.7-Durée et taux d'ensoleillement

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent totalement ou partiellement le soleil, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol. On dit

que la nébulosité est plus ou moins importante selon qu'il y a respectivement beaucoup ou peu de nuages.

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. On appelle rayonnement direct le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis son émission par le soleil [12].

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la **durée maximale d'ensoleillement SS₀**.

On appelle taux d'ensoleillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement [12]:

$$F = SS/SS_0$$

SS₀ peut être prise, pour un site dégagé, égale à Do calculée plus haut.

I.8-Conclusion

Le soleil à une température si élevée qu'il émet son rayonnement vers la terre.

La constante solaire est une valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. Ensuite on observe que la composition de l'atmosphère est à peu près la même pour les trois premières couches

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire comme les coordonnées terrestres et horaires, les temps de base et le mouvement de la terre autour de soleil.

Chapitre : 02

L'énergie solaire

II.1-Introduction

Bien que la terre reçoive environ 13 TW d'énergie de la part du soleil chaque année, la forme sous laquelle nous recevons cette énergie ne nous permet pas de l'utiliser de manière directe. Pour l'utiliser, nous devons la convertir en une forme d'énergie facile à domestiquer (énergie électrique ou thermique). Pour y parvenir, nous devons nous servir d'un dispositif qui convertit cette énergie lumineuse en électricité c'est-à-dire un système solaire photovoltaïque ou système solaire PV. Par contre, si nous voulons la transformer en chaleur, il nous faudra utiliser un système solaire thermique.

II.2-Historique

Le terme « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité), [13] appelé aussi module photovoltaïque ou PV il permet la transformation directe de la lumière solaire en électricité par un processus appelé « l'effet photovoltaïque » au moyen de cellules généralement à base de silicium.

Le développement des cellules photovoltaïque a commencé en 1839 lorsqu'Henri Becquerel a observé le comportement électrique d'électrodes immergées dans un liquide conducteur exposé à la lumière [14].

En 1883, Charles Fritts met au point la première cellule fonctionnelle. Elle est à base de sélénium et d'or, elle présente un rendement d'environ 1% [15].

En 1905, Albert Einstein explique l'effet photoélectrique. L'application directe de cette découverte majeure en physique n'a eu lieu qu'au milieu du 20ème siècle avec la mise au point de la première cellule solaire à base de silicium cristallin avec un rendement énergétique de 6% au laboratoire Bel

(Etats Unis d'Amérique) en 1954 [16]. Toutefois, la commercialisation des cellules photovoltaïques a échoué en raison de leurs coûts prohibitifs.

Quelques années plus tard commence la conquête de l'espace, ce qui permet aux cellules solaires à base de semi-conducteurs comme le silicium de voir le jour en tant qu'applications commerciales. En 1958 une cellule avec un rendement de conversion de 9% est mise au point et les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

Cependant, jusqu'au milieu des années 70, les photopiles étaient vraiment trop chères pour être économiquement utilisées sur terre ce qui a retardé cette nouvelle source d'énergie de s'imposer en dehors du domaine spatial.

Ce n'est qu'au début des années 80 que la technologie photovoltaïque a connu une période de plein essor partout dans le monde, de nombreuses possibilités d'exploitation sont alors étudiées en dépit des difficultés, les méthodes de fabrication se sont alors améliorées réduisant les coûts de production et permettant ainsi une augmentation des volumes de production.

Actuellement, la technologie du silicium domine le marché de la conversion photovoltaïque avec autour de 90% de la production des panneaux solaires [17]. La plupart des modules commerciaux actuellement ont un rendement crête compris entre 13 et 16%, alors que les rendements record dans les laboratoires sont compris entre 20 et 25% pour les différents types de matériaux cristallins [18]. Néanmoins la purification du silicium et l'utilisation de produits hautement toxiques constituent aujourd'hui un obstacle majeur au développement de l'énergie Photovoltaïque [19].

II.3-Le rayonnement solaire porteur d'énergie

Le rayonnement ou spectre solaire est comparable à celui d'un corps noir à une température de 5800 K, il est compris dans une bande de longueur

d'onde variant de 0,22 à 10 μm et se décompose approximativement sur 3 bandes :

- 9% dans la bande des Ultraviolets ($< 0,4 \mu\text{m}$)
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm)
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0,8 \mu\text{m}$)

L'énergie solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à

1367 W/m^2 cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne dépassant pas les 1000 W/m^2 à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier, ce chiffre variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu [20].

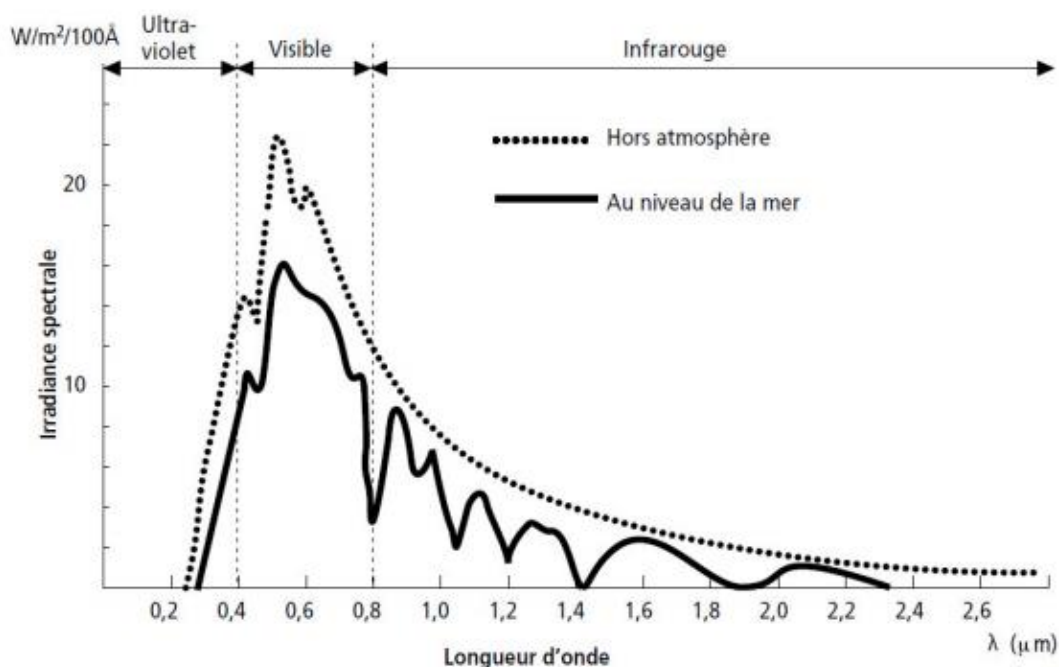


Figure II.1. Analyse spectrale du rayonnement solaire.

Etant absorbé et diffusé en traversant l'atmosphère seul une fraction modifiée du rayonnement solaire parvient à la surface de la terre se composant de 3 différents types de rayonnements :

- Le rayonnement direct : Rayonnement provenant du soleil en ligne droite du seul disque solaire, il est nul lorsque le soleil est complètement couvert par les nuages.

- Le rayonnement diffus : Radiation solaire arrivant sur la surface de la terre après déviation de la lumière par les nuages et les molécules diverses, elle est donc nulle que la nuit.

- Le rayonnement réfléchi (albédo) : Radiation solaire incidente réfléchie par une surface.

Le rayonnement global est donc la somme des 3 rayonnements directs, diffus, et réfléchi comme illustrer dans la figure si dessous :

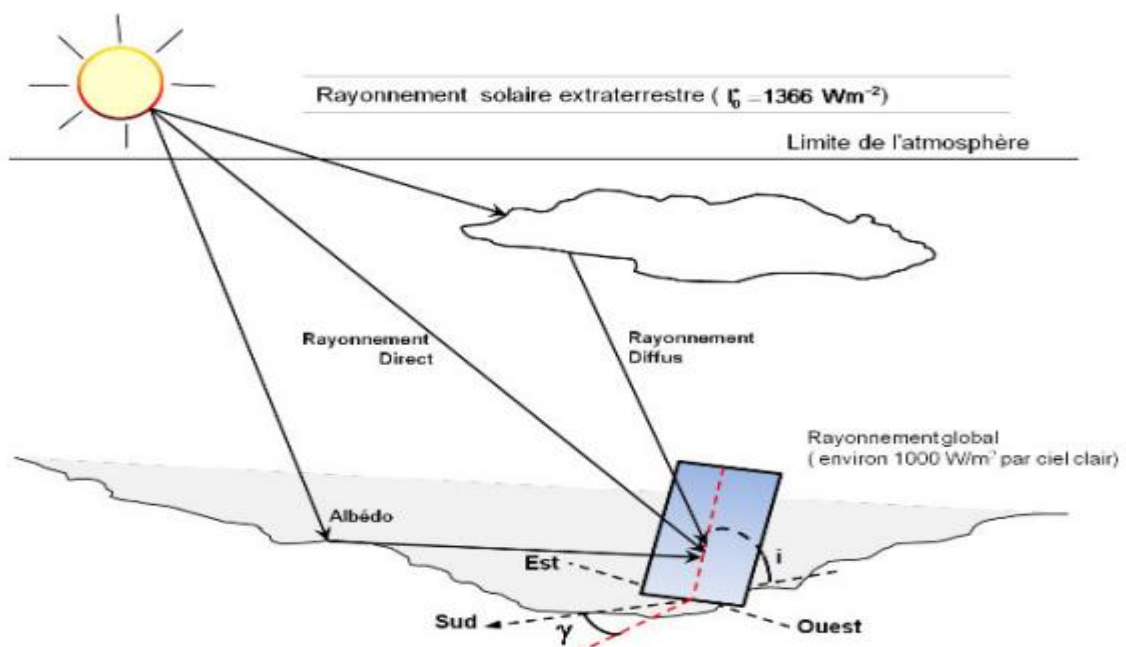


Figure II.2 : Composantes du rayonnement solaire au sol.

II.4-la production du silicium métallurgique

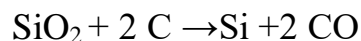
Le silicium est extrait de l'dioxyde de silice par des procédés métallurgique .selon l'utilisation industrielle du silicium, on poussera son niveau de pureté suivant trois niveaux :

- Silicium métallurgique (pureté à 99%) : MG –silicium (metallurgical grade) ?
Alliage d'aluminium, silicones
- Silicium solaire (pureté à 99,999 9%) : SoG-silicium (solar grade) ?
Cellules photovoltaïques
- Silicium électronique (pureté à 99,999 999 99%) : EG-silicium (électronic grade) ?puce électroniques

Il est intéressant de noter qu'une étude montre que les déchets engendrés par le processus de purification du silicium de qualité électronique (notamment la phase de sciage) peuvent être recyclés et servir à l'industrie photovoltaïque [21].

II.4.1-La fabrication du silicium métallurgique

La fabrication industrielle du silicium s'effectue par métallurgie, selon la réaction :



La silice est mélangée avec des réducteurs tels que le coke de pétrole, des charbons bitumineux, la houille et des copeaux de bois. En fonction des applications finales du silicium, la silice doit être relativement pure, en particulier, elle doit avoir un faible teneur en oxyde de fer ; de plus, les réducteurs doivent être soigneusement choisis.

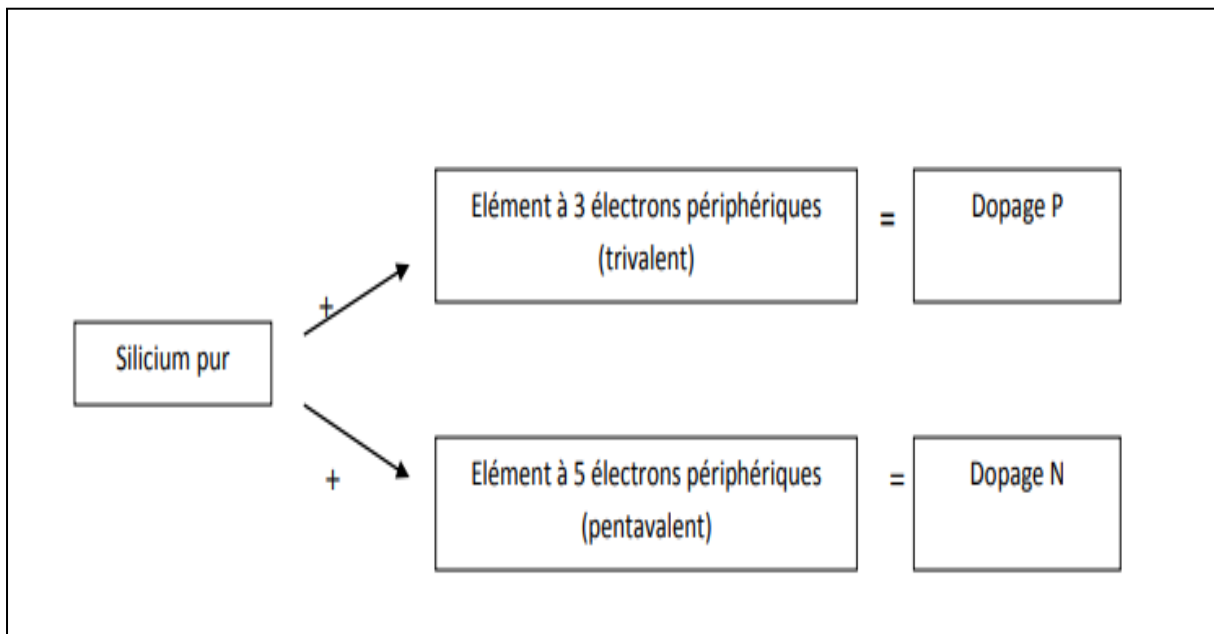
Ce mélange est versé dans un creuset de plusieurs mètres de diamètre équipé d'électrodes de carbone. La température est d'environ 1700°C mais peut atteindre 3000°C à la point des électrodes. Du silicium à l'état liquide est recueilli dans des « poches », grâce à des orifices pratiqués dans le creuset. Le volume de monoxyde de carbone (CO) formé est très important : plus de 5000m³

par tonne de silicium. De plus, la réduction est délicate car il faut éviter la formation de SiC. Pour produire une tonne de silicium [22].

Le silicium obtenu (qualité métallurgique) a une teneur 98 à 99% de Si. Dans le cas où le silicium est destiné à des applications en micro-électronique.

II.5- Le dopage des semi- conducteurs

Un matériau semi-conducteur est un matériau dont la conductibilité électrique peut varier en fonction des conditions dans lesquelles il se trouve. Afin d'améliorer la conduction de ce dernier, les fabricants injectent dans une plaquette semi-conductrice des matériaux étrangers (impuretés), qui possèdent un nombre d'électrons périphériques juste inférieur ou juste supérieur aux 4 électrons du semi-conducteur (silicium).



II.5.1-Deux types de dopage sont possibles :

➤ Le dopage de type n (négatif)

Le dopage N consiste à ajouter au semi-conducteur des atomes possédant 5 électrons périphériques (pentavalentes) tel que le Phosphore. Quatre de ces électrons vont participer à la structure cristalline, et un électron supplémentaire

va se retrouver libre et pouvoir se déplacer dans le cristal. Le semi-conducteur devient de type N, c'est-à-dire que les porteurs majoritairement présents dans la maille cristalline sont des électrons. Nous parlons de charges mobiles. Les ions $+$ sont fixes car ils font partie de la structure atomique cristalline de la plaquette de silicium.

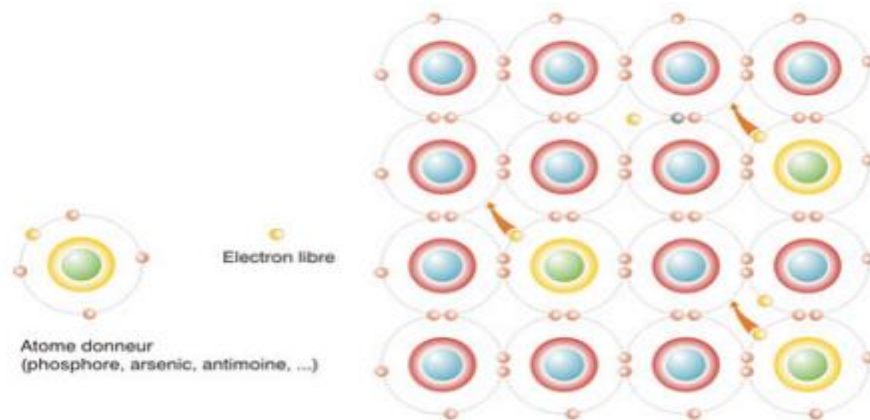


Figure II.3 : Semi-conducteur de type N.

➤ Le dopage de type p (positif)

Le dopage P consiste à ajouter au semi-conducteur des atomes possédant 3 électrons périphériques (trivalentes) tel que le Bore. Ces trois électrons participent à la structure cristalline, mais un "trou" est créé par chaque atome étranger puisqu'il lui manque un électron périphérique. C'est-à-dire que les charges mobiles majoritaires sont des trous (positifs) dans cette région du silicium.

Les “porteurs de charges électriques“ mobiles sont responsables de la conduction d’une plaquette de silicium dopée.

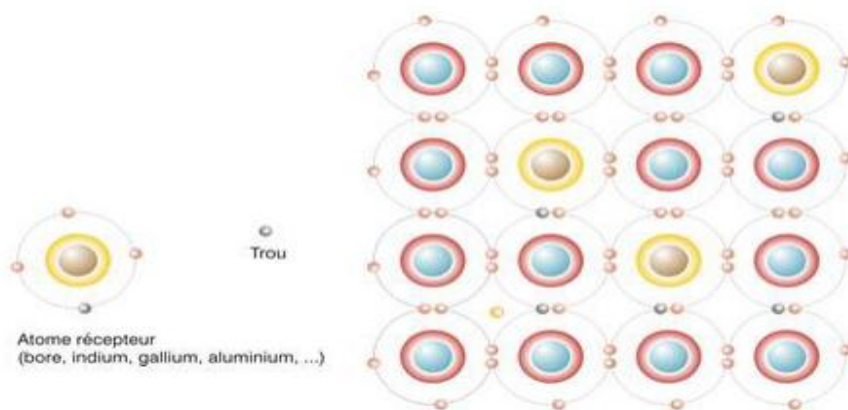


Figure II.4 : Semi-conducteur de type P.

II.5.2- La jonction P-N

Lorsque les deux zones sont mises en contact, certains électrons de semi-conducteur de type N passent vers le matériau de type P tandis que les trous du semi-conducteur de type P se déplacent au même moment dans la direction opposée. Le mouvement de ces charges majoritaires forment des paires électron-trou neutre, nous obtenons alors une région appelée jonction PN dans laquelle la conductibilité passe progressivement du type P au type N.

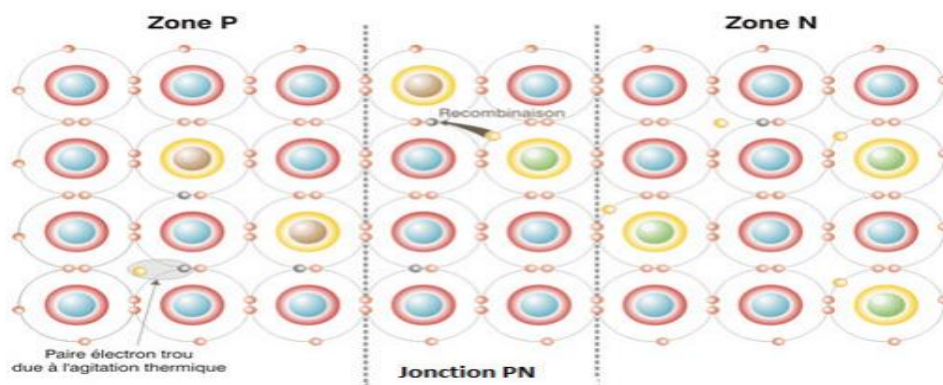


Figure II.5 : Jonction PN à l'équilibre.

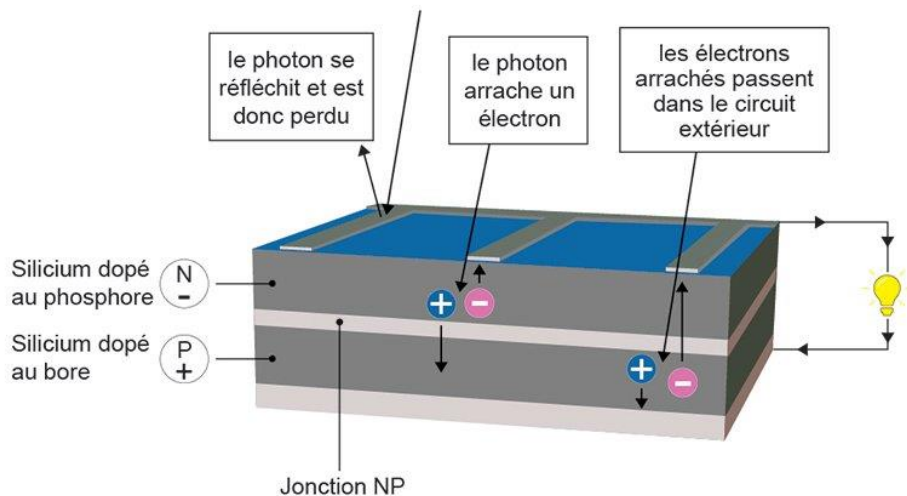
II.6- Le principe de fonctionnement

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons . Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium , ils arrachent des électrons à ses atomes . Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche anti-reflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface [23].

LE PRINCIPE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE



II.7- L'effet photovoltaïque

Nous pouvons retenir que l'effet photovoltaïque a été découvert par les physiciens français Antoine César Becquerel et son fils Alexandre Edmond Becquerel. Cet effet photovoltaïque est le procédé permettant de transformer l'énergie lumineuse issue du soleil en une énergie exploitable par l'homme en l'occurrence en électricité [24].

L'effet photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu CC (à ne pas confondre avec courant de court-circuit)). Son principe réside en une interaction des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\nu$), si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur ($E_g = E_C - E_V$), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou libres. Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose

uniquement au passage des porteurs majoritaires.

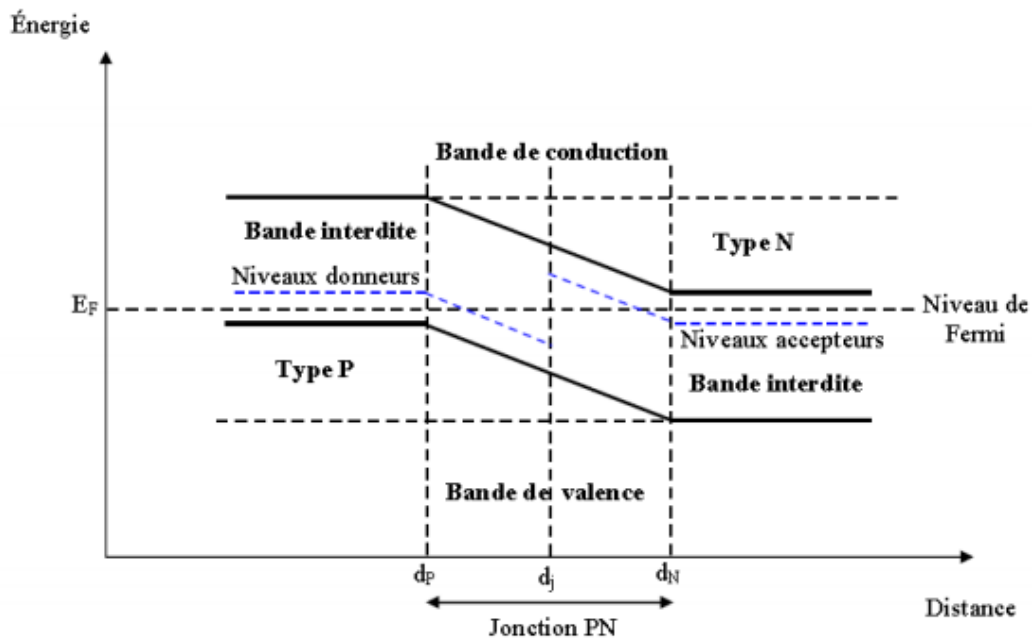


Figure II.6 : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction

Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de phonons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction. Si les photons ont une énergie inférieure E_g , ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent donc pas à la conversion photovoltaïque [25].

II.8-Les différents types de cellules photovoltaïques

Il existe trois types principaux de cellules :

➤Cellules mono- cristallines

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique: cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches de

dopages opposés [26]. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 25.0 ± 0.5 % (UNSW PERL) [27].

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients suivants:

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très onéreuse.
- Il faut fournir une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée élevée d'amortissement de l'investissement en énergie (jusqu'à 7 ans) [26].

➤Cellules poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes. Les cellules poly-cristallines sont caractérisées par :

- Un coût de production moins élevé. • Nécessite moins d'énergie [26].
- Un rendement de 20.4 ± 0.5 % (Fh-ISE) [27].

➤Cellules amorphes

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). Il est caractérisé par :

- Un coût de production bien plus bas.
- Un Rendement de seulement 10.1 ± 0.3 % (Oerlikon Solar Lab, Neuchatel) [27].
- Un fonctionnement sous très faible éclaircissement

Grâce à la technologie des nouveaux matériaux comme le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) ainsi que le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements de $27.6 \pm 0.8 \%$ [27].

II.9- Avantages et inconvénients :

a. Avantage :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Temps minimum de réalisation d'une centrale PV.
- Ils ont une longue durée de vie.
- On élimine les frais et les risques de transport associés aux énergies fossiles.
- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre aux besoins en matière d'électricité.

- Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales.
- 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.

b. Inconvénients :

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients...

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs DIESEL que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent en 220 à 230V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage ($< 30V$), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Le stockage de l'énergie électrique dans des accumulateurs qui sont les plus souvent des batteries au Plomb. Sachant que les batteries ne doivent pas se décharger à plus de 60% de leur capacité maximale. En outre, les batteries ont une faible durée de vie (3 à 5ans), ce qui entraîne un surcoût au fonctionnement.

- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

II.10- Conclusion

Dans ce chapitre, en conclure que, Le principe de fonctionnement est basé sur l'effet photovoltaïque. Ce dernier lié complètement par le rayonnement solaire. On constate le matériau de base des cellules PV est le silicium, ce matériau est extrait à partir de silice ensuite il subit des différents types de dopage, de coupage, d'assemblage...

Chapitre : 03

**Caractérisation d'une cellule
solaire I-V en fonction de T°**

III.1- Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des mesures effectuées sur le module PV au silicium amorphe installé au laboratoire de caractérisation PV avec les dispositifs, qui sera suivie d'une interprétation.

Les paramètres caractéristiques des cellules solaires, à savoir le courant de court circuit (I_{cc}), la tension en circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion PV (η) sont influencés par la température. La dépendance de ces paramètres avec la température est étudiée pour une cellule solaire au silicium amorphe dans la gamme (25.2 - 49°C) sous un éclairement constant.

III.2- Association des cellules

III.2.1- Connexion en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La figure (III.1) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques [28].

$$V_{sco} = N_s * V_{co}$$

$$I_{scc} = I_{cc}$$

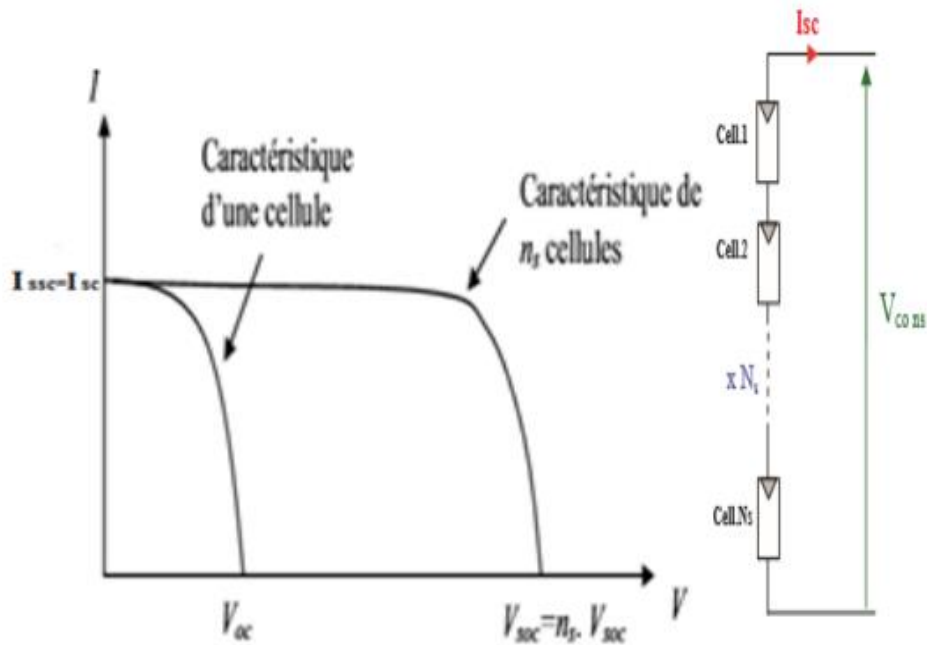


Figure (III.1) : caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identique.

III.2.2- Connexion en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, 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. La figure (III.2) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_p cellules identiques [28].

$$V_{p0c} = V_{c0}$$

$$I_{pcc} = N_p * I_{cc}$$

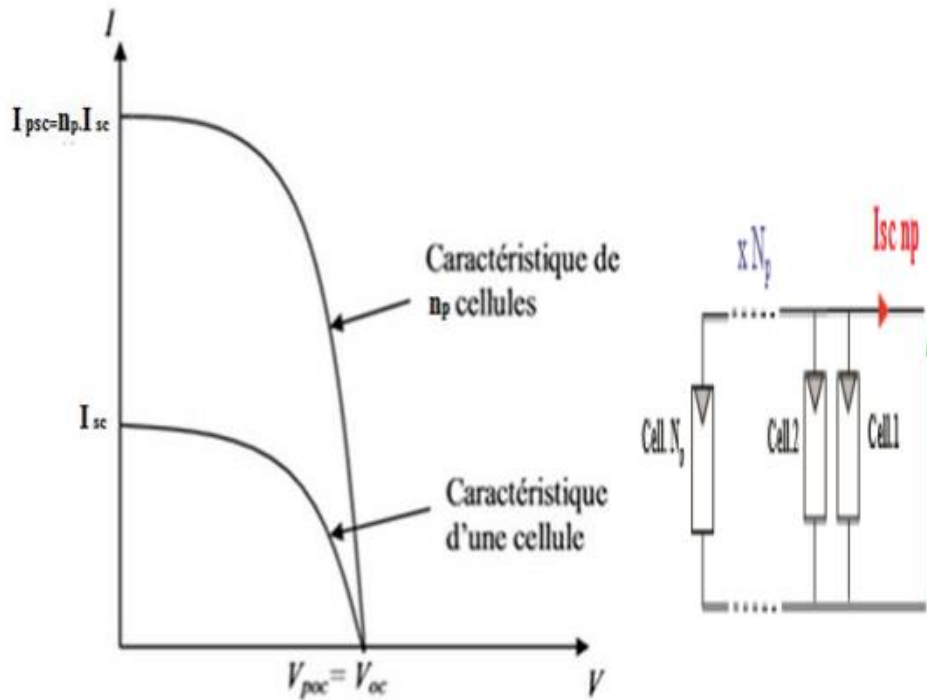


Figure (III.2) : caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identique.

Afin d'augmenter la puissance des générateurs photovoltaïque on est obligé à grouper les cellules photovoltaïque en série et en parallèle pour obtenir un générateur mixte équivalent.

III.2.3- Connexion en mixte

Si pour une application donnée il est nécessaire de faire augmenter le courant et la tension délivrée par les cellules solaires, on réalise un groupement mixte (série-parallèle) Un panneau solaire est par définition un ensemble de modules regroupés selon un montage mixte, le module étant à son tour composé d'un ensemble de cellules montés généralement en série. Il est possible d'utiliser un montage de N_C cellules identiques en série sur un module, N_{SP} nombre de branche et N_{MS} nombre de modules par branche [29].

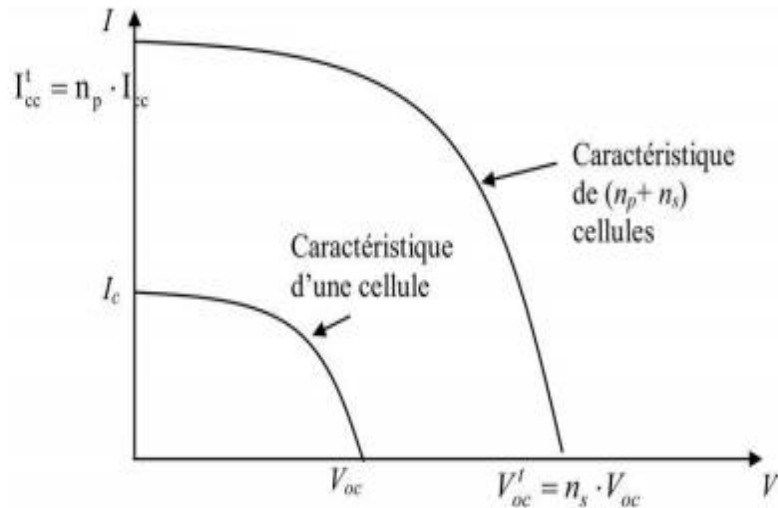


Figure (III.3) : caractéristique résultante d'un groupement hybride de (n_p+n_s) cellule identique.

III.3-Schéma électrique d'une cellule solaire

Le schéma électrique qui modélise la cellule solaire est représenté par la figure (III.4) ou le circuit électrique décrit le comportement de la cellule à l'aide des composants électroniques suivants :

- Source
- Diode (jonction P-N)
- La résistance série R_s correspond aux résistances entre les couche qui constituent la cellule photovoltaïque
- La résistance parallèle R_p (ou shunt R_{sh}) caractérise les pertes ou niveau de la cellule photovoltaïque

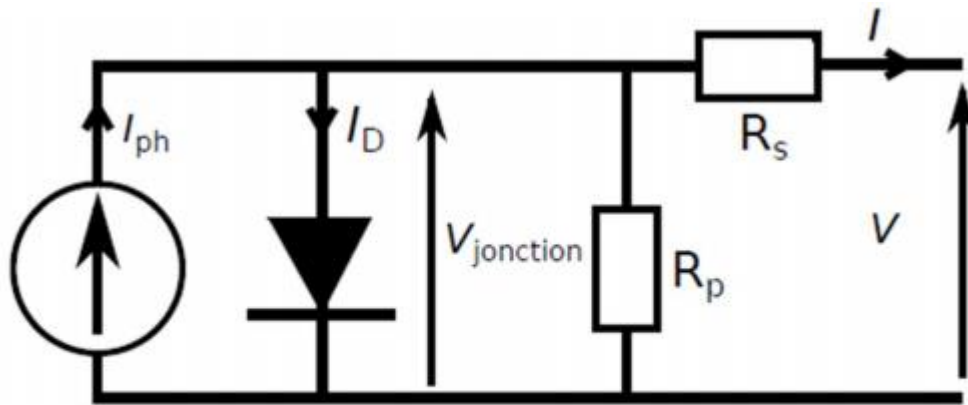
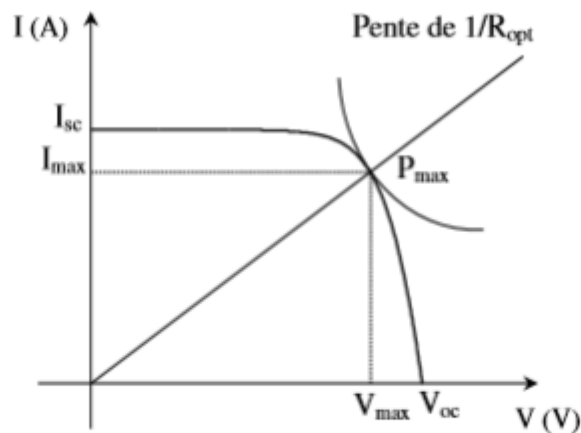


Figure III.4 : Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque

III.4-Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire

La caractéristique (V) (figure II.8) de la cellule solaire permet de déduire les paramètres photovoltaïques propres à la cellule :

- Le courant de court circuit (obtenu pour $V=0$).
- La tension du circuit- ouvert (obtenu pour $I=0$).
- Le facteur de forme FF .
- Le rendement de conversion.



III.4.1-courant de court-circuit I_{cc} :

Le courant de court-circuit est celui qui circule dans une cellule soumise à un flux de photons sans application de tension ($V=0$). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. On le mesure en branchant les bornes de la cellule directement à un ampèremètre.

III.4.2-tension de circuit ouvert V_{co} :

Si on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur on obtient à ses bornes une tension continue, dite tension circuit-ouvert (obtenu pour $I=0$).

Cette tension est généralement de l'ordre de 0.5 à 0.7 V pour les cellules élémentaires (elle dépend du matériau, de la technologie et de l'éclairement). Elle exprime le nombre de porteurs créés par chaque photon incident.

V_{co} est donnée par la relation :

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \log \left[\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right]$$

III.4.3- La puissance maximale P_m :

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance; elle est donnée par la relation :

$$P_m = I_m \times V_m$$

Elle traduit sur la caractéristique I-V le point du fonctionnement P_m (I_m) qui est situé au coude de la caractéristique I-V, il est dit point de puissance maximale

où les valeurs de tension V_m et du courant I_m appelées également tension et courant maximums respectivement.

III.4.4- Facteur de forme FF

Le facteur de forme est un paramètre qui caractérise la qualité de la cellule ; il est défini par le rapport de la puissance maximale générée à la puissance optimisée.

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}}$$

III.4.5- Le rendement

C'est le rendement énergétique externe de conversion de puissance. Il est défini par la relation suivante:

$$\eta = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{incidente}} = \frac{I_{cc} \cdot V_{co} \cdot FF}{P_{incidente}}$$

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

Le rendement de la cellule PV est donné par la relation :

$$\eta_{STC} = \frac{P_m}{E_{STC} \times S_{cellule}}$$

η_{STC} : Le rendement de la cellule photovoltaïque

P_m : La puissance produite par le générateur PV.

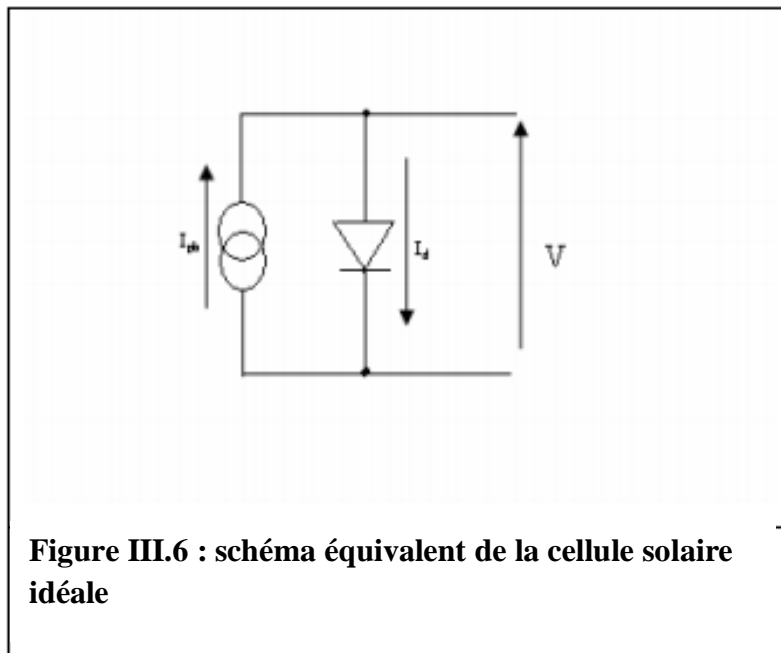
E_{stc} : L'éclairement absorbé par la cellule

$S_{cellule}$: La surface de la cellule [m²]

III.5-Modélisation de la cellule PV

III.5.1- Cellule photovoltaïque idéale

La cellule solaire est dite idéale si les résistances $R_s=0$ et $R_{sh}=\infty$; cellule sans perte. Nous obtenons le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale, présenté sur la figure suivante :



La cellule solaire sous éclairage peut-être schématisé par un générateur de courant I_{ph} (un courant inverse proportionnel à la lumière incidente) en parallèle avec une diode délivrant un courant.

$$I_d = I_s \left[e^{\left(\frac{qV}{nkT}\right)} - 1 \right]$$

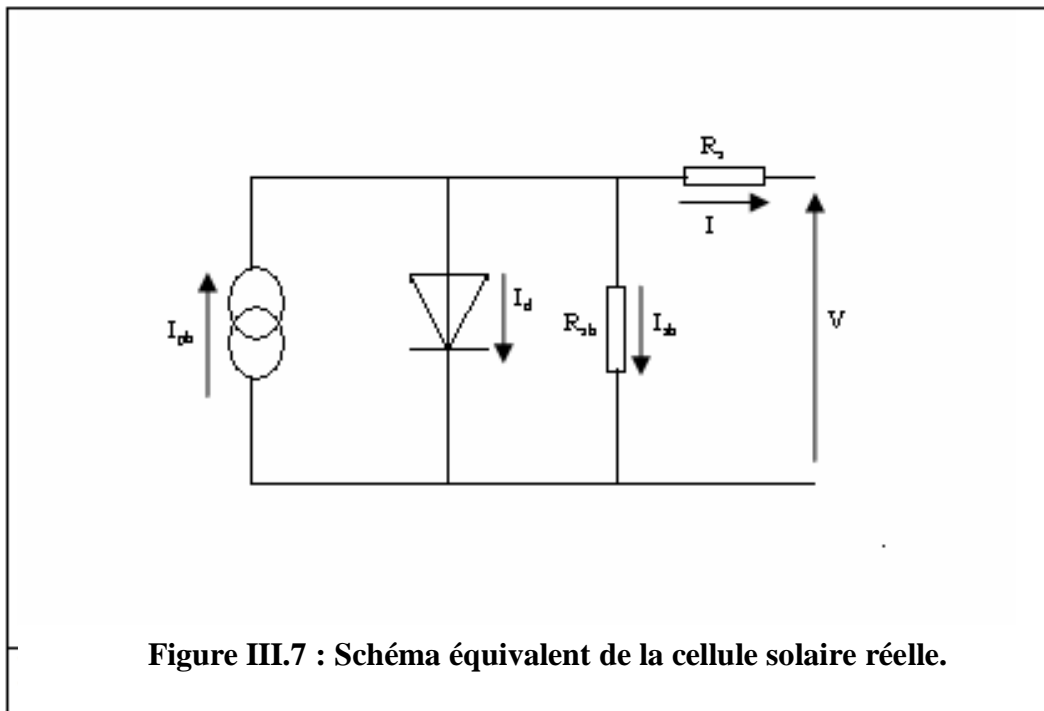
La relation courant-tension est donnée par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{qV}{nkT}\right)} - 1 \right]$$

III.5.2- Cas d'une cellule solaire réelle :

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte de deux résistances ; une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacts et de connexions, et une résistance R_{sh} (shunt) en parallèle avec le générateur de courant qui caractérise les divers courant de fuite dus à la diode.

Le schéma équivalent de la cellule solaire réelle est le modèle représenté à la figure suivante :



Chapitre : 03 Caractérisation d'une cellule solaire I-V en fonction de T

Si V est la tension aux bornes de la diode, l'équation caractéristique de la cellule réelle est alors donnée par :

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right]$$

$$I_{ph} = I + I_d + I_{sh}$$

$$I_{sh} = \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}}$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

$$\text{On pose: } R_{sh} = \frac{1}{G_p}$$

Donc l'équation devient :

$$I = I_{ph} - \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right] - G_p(V + IR_s)$$

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire présenté dans la figure(III.7) le courant peut être décrit en fonction de la tension par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nKT} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \right)$$

Avec

- I_{ph} : le courant photo-généré
- I_s : le courant de saturation de la diode
- n : le facteur da qualité de la diode
- k : la constante de Boltzmann ($1.38066 \times 10^{-23} \text{J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)
- T : la température absolue en Kelvin (K)

- q : la charge absolue d'un électron en coulomb ($1.60281 \times 10^{-19} \text{C}$)

III.6-Caractérisation expérimentale I-V d'une cellule de silicium en condition 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 le traverse.

Pour une cellule PV, la caractéristique I-V est sa carte d'identité.

III.6.1-Appareilles 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) .cette expérience a été réalisée le 01 juin 2021 à 13h :00. Université Mohamed el Bachir El Ibrahimi, BBA.

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

- . **Une lampe** : source de la lumière sous éclairage constant
- . **Ampèremètre** : connecté en série pour mesurer le courant électrique.
- . **Voltmètre** : connecté en parallèle pour mesurer la tension électrique aux bornes de la cellule PV.
- . **Résistance variable de 0 Ω à 330 Ω** : pour permettre d'étudier l'évolution de la tension et le courant électrique.
- . **Thermomètre infrarouge** : pour mesurer la température de chaque variante
- . **Cellule photovoltaïque** : générateur photovoltaïque.
- . **Dispositif d'échauffement** : pour augmenter la température.

III.6.2- Photo du notre expérience :

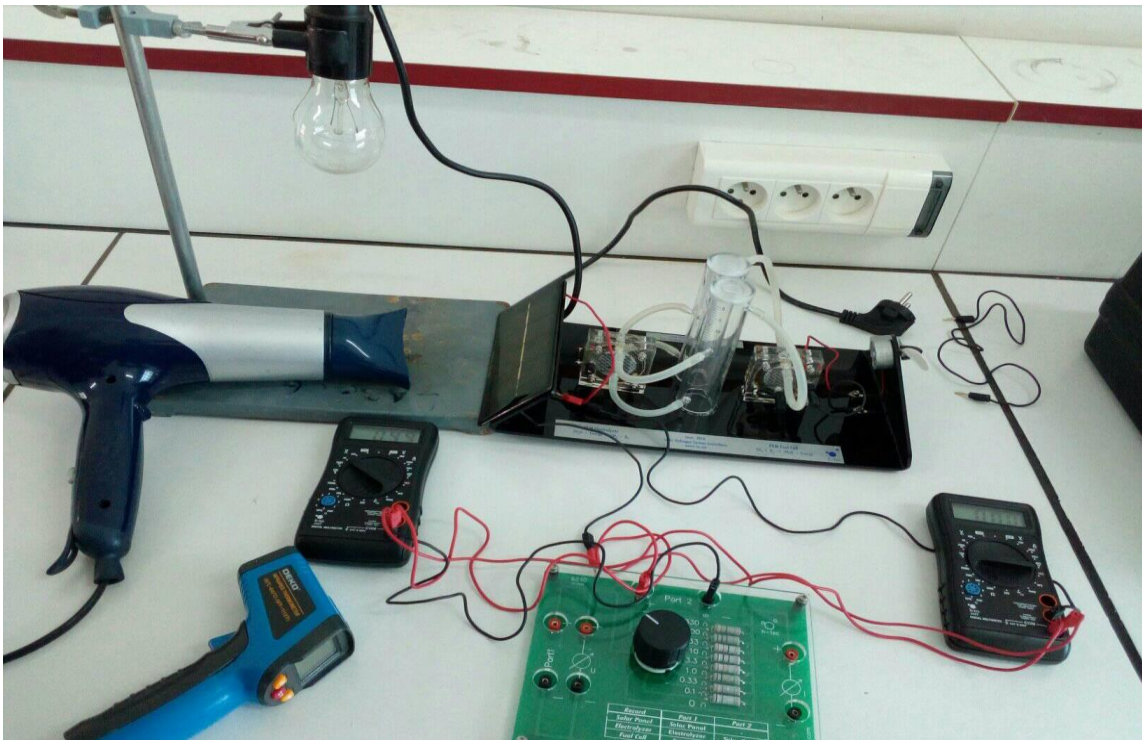


Figure III.8 : photo de l'essai expérimentale.

III.6.3-Schéma électrique équivalent :

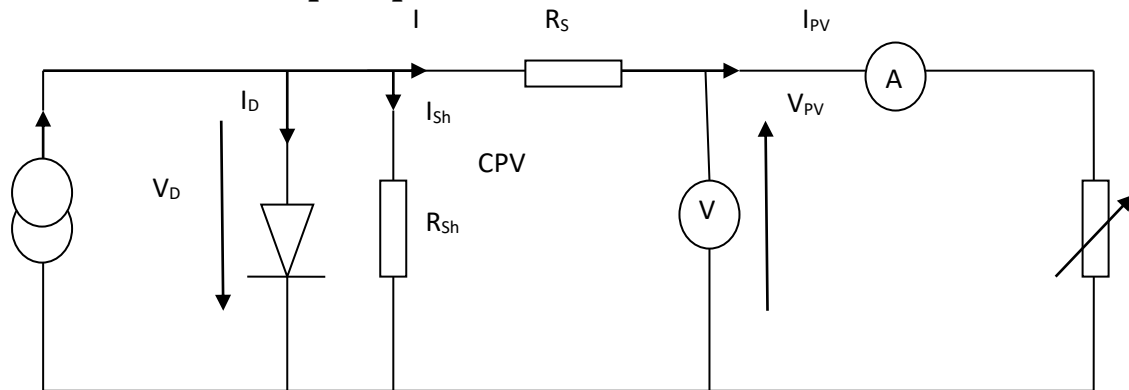


Figure III.9 : Schéma électrique de l'essai expérimental

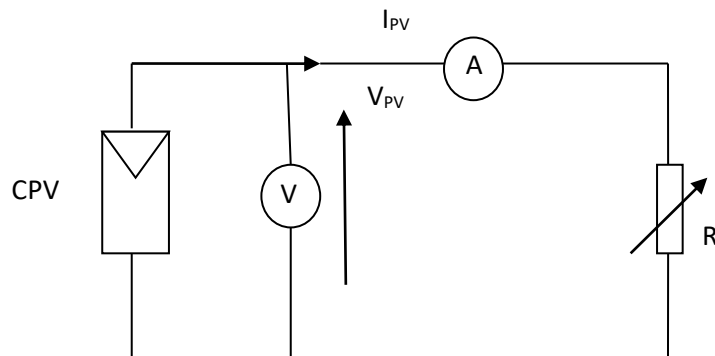


Figure III.10 : Circuit électrique de l'essai expérimental

III.6.4-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 $I = f(V)$.

	T=25 .2° C		T= 27.8° C		T= 29.9° C		T= 33° C		T=35.6° C	
R(Ω)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)
CC	0.023	0.17	0.023	0.12	0.023	0.32	0.023	0.24	0.023	0.34
0.1	0.023	0.16	0.023	0.16	0.023	0.41	0.023	0.23	0.023	0.55
0.33	0.023	0.15	0.023	0.19	0.023	0.49	0.023	0.24	0.023	0.38
1	0.023	0.14	0.023	0.19	0.023	0.28	0.023	0.28	0.023	0.6
3.3	0.023	0.19	0.023	0.45	0.023	0.29	0.023	0.34	0.023	0.7
10	0.023	0.37	0.022	0.89	0.023	0.50	0.022	0.49	0.022	0.77
33	0.022	0.84	0.013	1.44	0.021	0.94	0.021	0.94	0.017	1.26
100	0.012	1.47	0.004	1.66	0.013	1.44	0.013	1.42	0.010	1.5
330	0.004	1.67	0.003	1.67	0.004	1.65	0.004	1.63	0.004	1.62
CO	0	1.75	0	1.75	0	1.73	0	1.71	0	1.79

Tableau (III .1) : Les résultats de l'expérience

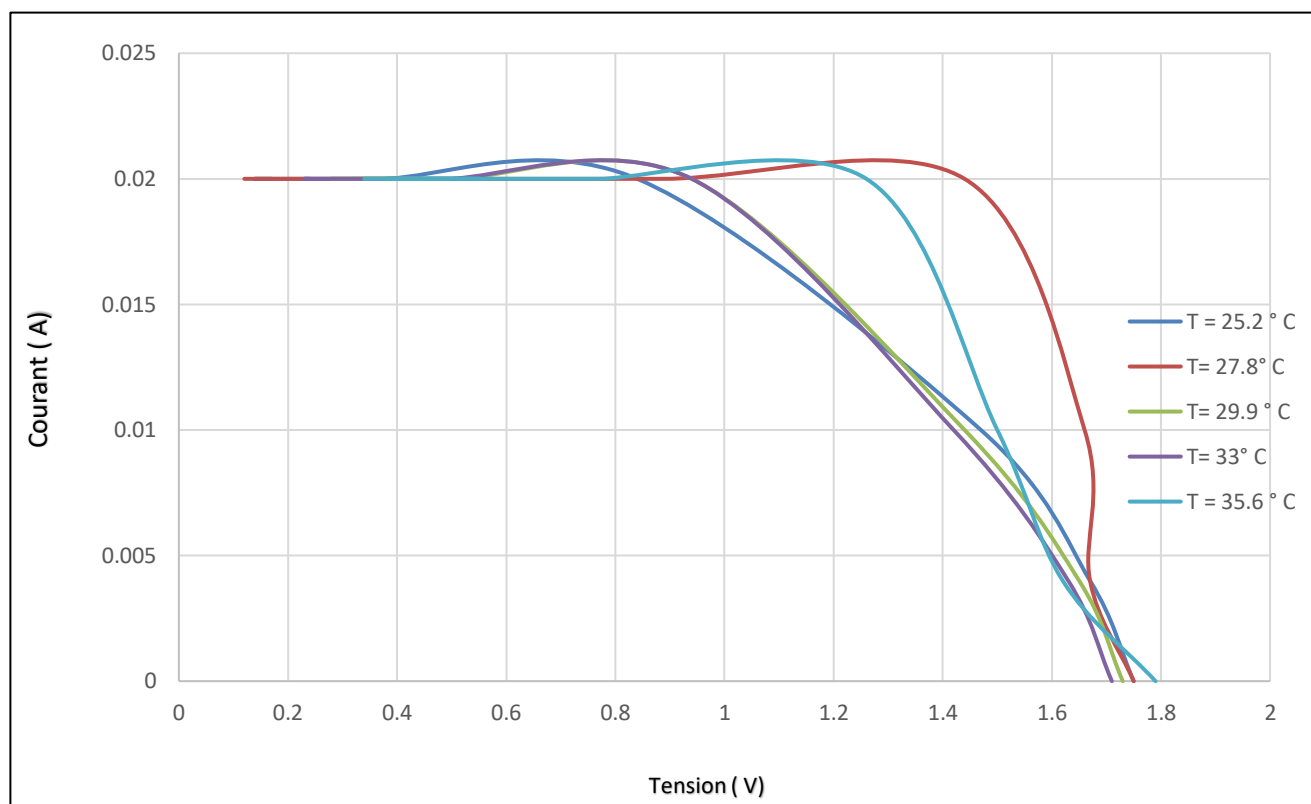


Figure III.11 : La variation de courant en fonction de la tension électrique.

	T=38 ° C		T=39.5° C		T=42 ° C		T=45 ° C		T=49° C	
R(Ω)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)
CC	0.024	0.3	0.024	0.29	0.024	0.03	0.024	0.05	0.024	0.04
0.1	0.024	0.22	0.023	0.31	0.024	0.04	0.024	0.04	0.024	0.05
0.33	0.023	0.29	0.023	0.34	0.024	0.04	0.024	0.06	0.024	0.04
1	0.023	0.33	0.023	0.42	0.024	0.06	0.024	0.07	0.024	0.06
3.3	0.023	0.46	0.023	0.45	0.024	0.11	0.024	0.12	0.024	0.11
10	0.023	0.65	0.023	0.62	0.024	0.27	0.024	0.28	0.024	0.20
33	0.020	1.06	0.020	1.05	0.023	0.77	0.022	0.8	0.023	0.77
100	0.011	1.43	0.012	1.42	0.013	1.36	0.013	0.35	0.013	1.33
330	0.004	1.6	0.004	1.6	0.004	1.6	0.004	1.55	0.004	1.53
CO	0	1.68	0	1.68	0	1.66	0	1.63	0	1.60

Tableau III.2: Les résultats de l'expérience

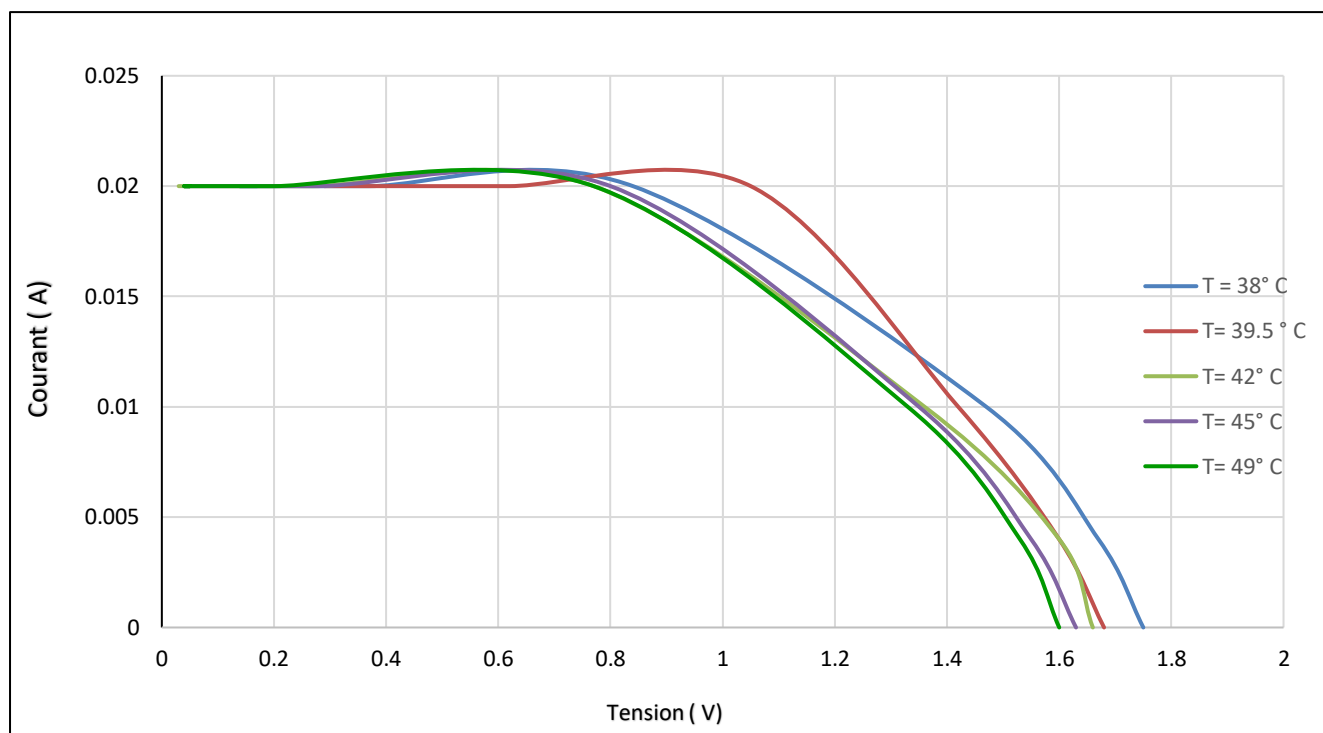


Figure III.12: La variation de courant en fonction de la tension électrique.

III.6.5-Zones de fonctionnement du module photovoltaïque

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Nous rappelons brièvement dans ce paragraphe le comportement du générateur soumis à diverses contraintes. Ces notions sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer des optimisations de

fonctionnement.

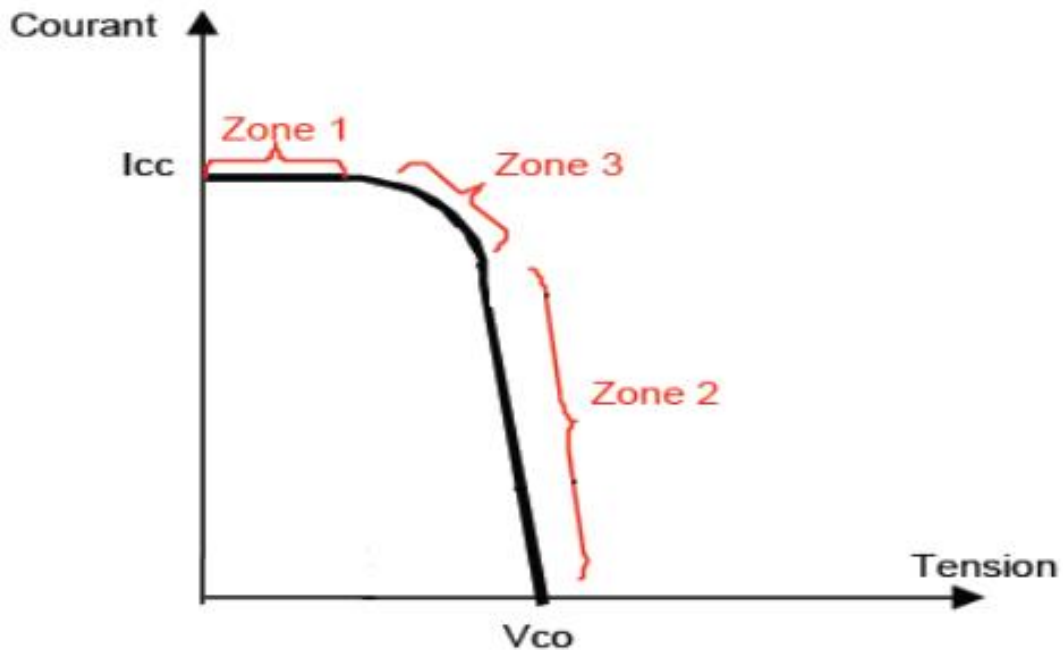


Figure III.13 : les différentes zones de la caractéristique I(V).

La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (température uniformes).

Nous pouvons décomposer la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque en 3 zones :

- La zone (1): où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- La zone (2): 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 (3) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée

pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

III.7-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 avons vu que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire. Nous avons présenté l'influence de la température sur les caractéristiques courant-tension $I(V)$ d'une cellule solaire. Cette étude nous a permis d'obtenir des informations sur le comportement de la cellule PV, dans les conditions réelles d'utilisation, en fonction de la température.

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.

Le travail développé dans ce mémoire concerne l'étude de l'effet de la température sur la caractéristique courant – tension (I-V) d'une cellule de silicium amorphe dans les conditions réelles.

La température est un paramètre très marquant dans le comportement des cellules solaires; car les performances électriques d'une cellule solaire sont très sensibles à celle-ci. Il est important d'étudier l'effet de cette dernière sur les caractéristiques électriques des cellules solaires puisque, dans les applications terrestres, les cellules solaires sont généralement exposées à des températures dans la gamme 15°C (288 °K) à 50°C (323 °K) et même à des températures encore plus élevées comme dans les régions extrêmement chaudes.

On a rappelé, en premier lieu des généralités sur la source fondamentale de l'énergie photovoltaïque; le soleil, son pouvoir énergétique et les propriétés de son rayonnement puis en suite, on a décrit la cellule photovoltaïque, ses caractéristiques (I-V), son circuit électrique équivalent et ses principaux grandeurs caractéristiques ainsi que l'étude de l'influence des paramètres (la température) sur la caractéristique courant – tension (I-V) puis on a abordé l'association des cellules en série, en parallèle et en série-parallèle.

Dans le traitement des effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires, on a commencé par illustration de l'effet de

la température sur la caractéristique courant – tension (I-V) aux différentes températures et sous éclairage constant.

On note vers la fin, que les résultats de ce travail sont obtenus pour un cas particulier; les cellules solaires au silicium amorphe sous un éclairage constant. En effet, le développement d'autres travaux dans le même contexte est envisagé, concernant l'étude d'autres types de cellule solaire.

Références bibliographique

- [1] **J.A. Duffie**, and **J.W.Beckman**, Solar Engineering of Thermal Processes, 2ed, Inc, 1991.
- [2] **Alain RICAUD**, « Gisement solaire », Sept-2009, éditeur : Alain Ricaud, publiés par CYTHELIA sarl.
- [3] **M. Iqbal**, An Introduction to solar Radiation, Academic Press, Toronto (1983).
- [4] **M.Geyer**, and , **W.B.Stine**, Power From the Sun (Powerfromthesun.net). J.T. Lyle Center, 2001.
- [5] **Abdelmalek BOUDEN**, « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque », mémoire de Magister, Université de CONSTANTINE, 2008.
- [6] **PETIBON Stéphane**, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Janvier 2009.
- [7] <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16759#>
- [8] **Yves Jannot**. Thermique solaire. Paris (2007).
- [9] **C, Fröhlich**. 1978: World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation, report WMO 490, p 108-112.
- [10] **Michel Daguenet**: les séchoirs solaires : théorie et pratique, Unisco, paris ; 1985.
- [11] **Pierre Henri Communay**: Héliothermiques; Le gisement solaire Méthodes et calculs. Grop de Recherche et d'Edition-2002.
- [12] **Yves JANNOT**, « **Solaire thermique** », **Octobre 2003**.
- [13] **Serge Poignant** : «L'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE», Rapport D'information, 2009, Assemblée Nationale Constitution du 4 Octobre 1958 Treizième Législature.
- [14] **A. Labouret**, **M. Viloz** : « Energie solaire photovoltaïque ». Edition le Moniteur, Dunod, 2ème Edition, 2005.
- [15] **Fritts**. On a new form of selenium photocell. American Journal of Science, 97, 1883.
- [16] **G, Gomard**. Cristaux photoniques pour le contrôle de l'absorption dans les cellules solaires photovoltaïques silicium ultramince. Thèse de Doctorat. Université de Lyon. 2012.

- [17] **M, Urien.** Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux 1.2008
- [18] **M.A. Green, K. Emery, D.L. King, S. Igari and W. Warta,** Progress in Photovoltaics, 13, 1 (2005) 49.
- [19] **P. Destruel, I. Seguy,** Techniques de l'Ingénieur 2004, RE25.
- [20] Le pompage photovoltaïque par Jimmy **Royer, Thomas Djako, Eric Schiller, Bocar Sadasy,** IEPF/ université d'Ottawa/ EIER/ CREPA.
- [21] Recovery of Silicon from Kerf Loss Slurry Waste for Photovoltaic Applications, T.Y. Wang et al, Progress in photovoltaics, 2009, vol. 17, no3, pp. 155-163
- [22] Société Française de Chimie – – site accédé en octobre 2010.
- [23] <https://www.planete-energies.com>
- [24] <http://depot-e.uqtr.ca> MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES PAR LAURENT ADONIS BEKALE MAI 2012
- [25] **MERAD Faiza** Conception d'un programme de calcul du rayonnement solaire, cas particulier de la région de Mostaganem le 03 /07 /2013.
- [26] **Rachid MAOUEDJ,** « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de TLEMCEN et BOUZAREAH », mémoire Magister, Université de TLEMCEN, 2005.
- [27] **Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa and Wilhelm Warta,** « Solar cell efficiency tables (version 37) », 2010.
<http://www.eecs.berkeley.edu/news/SCefficiencytablesV37.pdf>. (Consulté le 05/04/2013 à 22 :00).
- [28] **M. BOULKOUANE.MOURAD et M. DJABELLAH.NASSIM,** « Influence des générateurs photovoltaïques Sur la stabilité des réseaux électriques » Mémoire de Master Université de béjaia (2016).
- [29] **N. houcine,** « Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique » Thèse de Doctorat Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (2016)

المخلص :

تعتبر الطاقات الأحفورية مصدرًا مهمًا للطاقة لإنتاج الكهرباء ، إلا أنها تولد تلوثًا للغلاف الجوي بسبب انبعاثات غازات الاحتباس الحراري ، ولهذا السبب تستغل بعض الدول الطاقات المتجددة مثل استخدام الطاقة الكهروضوئية. من الواضح أن المشكلات المناخية تؤثر على أداء الوحدة الكهروضوئية.

يتمثل عملنا في هذه المذكرة في دراسة تأثير درجة الحرارة والإضاءة (الثابت) على التيار الكهربائي - الجهد (I-V) الذي يميز الخلية الكهروضوئية في حالة داخلية (بناءً على مصباح).

لوحظ أن الزيادة في درجة الحرارة تؤدي إلى انخفاض ملحوظ في جهد الدائرة المفتوحة (V_{co}).

الكلمات المفتاحية: الأحافير ، جهد الدائرة المفتوحة ، الفولتية الضوئية.

Résumé :

Les énergies fossiles considèrent comme une source d'énergie important pour la production d'électricité, cependant elle engendre la pollution de l'atmosphère à cause d'émissions des gaz à effet de serre, c'est pourquoi certains pays exploitent les énergies renouvelables telles que l'utilisation d'énergie photovoltaïque. Il est évident que les problèmes climatiques influent sur les performances d'un module photovoltaïque.

Notre travail dans ce mémoire est l'étude de l'influence de la température et l'éclairement (constante) sur la caractéristique électrique courant - tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque Dans une condition interne (à base une lampe)

On observe que l'augmentation de la température provoque une diminution nette de la tension en circuit ouvert (V_{co}).

Les mots clé : fossiles, tension en circuit ouvert, photovoltaïque.

Abstract:

Fossil energies consider as an important source of energy for the production of electricity, however it generates pollution of the atmosphere due to greenhouse gas emissions, which is why some countries exploit renewable energies such as than the use of photovoltaic energy. It is obvious that climatic problems affect the performance of a photovoltaic module.

Our work in this dissertation is the study of the influence of temperature and luminance (constant) on the electrical current - voltage (I-V) characteristic of a photovoltaic cell In an internal condition (based on a lamp)

It is observed that the increase in temperature causes a marked decrease in the open circuit voltage (V_{co}).

The key words: fossils, open circuit voltage, photovoltaic.