

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 des 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

**Etude de l'influence de la température sur la
puissance de la cellule photovoltaïque.**

Préparé par :
Ali ZAHIA

Devant le jury :

Président : KahoulAbdelhalim
Rapporteur : Doudisalim
Examineur : Sahnoune Yassine

Année Universitaire 2020-2021

Remerciements

*Je tiens avant tout à adresser notre reconnaissance à notre Dieu de
m'avoir donné la force et la volonté d'arriver là.*

*J'exprime ensuite toute mon gratitude et mes remerciements les plus
sincères :*

*Mon encadreur salim daoudi pour m'avoir guidé grâce à ses précieux
conseils et ses encouragements lors de la réalisation de ce mémoire.*

*Aux membres de jury qui ont accepté de juger mon
Travail.*

Dédicace

En premier lieu je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents (mon père Ali Taher et ma mère djaafri Nasira), qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans mes études, que Dieu vous donne longue vie.

Mon mari : Ahmed Yahyaoui Yahai .

Mon cher fils : jawad .

ET TOUT LA FAMILLE.

Tous ceux qui me sont chères et proches.

Ali Zahia

Sommaire :

Chapitre I: Gisement solaire	
Introduction générale.....	1
I-1 Introduction.....	3
I-2 Généralité sur le soleil.....	3
I-2-1 Définition du soleil.....	3
I-2-2 La composition interne du soleil.....	4
I-2-3 Les couches externes.....	5
I-2-4 Le soleil (réacteur nucléaire naturel).....	6
3 Le rayonnement solaire hors atmosphère.....	8
1) Définition du corps noir.....	8
2) Rayonnement solaire dans l'espace.....	8
3) La constante solaire.....	9
I-4 L'atmosphère.....	9
I-4-1 La structure de l'atmosphère.....	10
I-4-2 La composition chimique de l'atmosphère.....	11
I-5 La constante solaire au sol.....	11
I-6 La masse d'air.....	12
I-7 Les composantes du rayonnement solaire.....	13
I-8. Mouvement apparent du soleil.....	14
I-8-1 Coordonnées du soleil.....	15
1) les Coordonnées équatoriales.....	15
2) Coordonnées horizontales.....	17
I-9 Mouvement de la terre.....	18
I-10 Coordonnées terrestres.....	19
I-11 Heurs et temps.....	20
Durée du jour.....	20
Relation entre temps légale et temps solaire.....	20
I-12 Durée et taux d'ensoleillement.....	21
I-12-1 Durée d'ensoleillement.....	21
I-12-2 Taux d'ensoleillement.....	21
Conclusion.....	22

Chapitre II : Energie solaire	
II -1 Introduction.....	23
II-2Historique	23
II-3Rayonnement solaire porteur d'énergie.....	24
II-4.Effet photovoltaïque.....	26
II -5 La production du silicium métallurgique.....	27
II -5-1 Pour quoi le si ?.....	27
II -5-2Réduction de la silice.....	28
II -5-3Purification du silicium métallurgique MG-Si.....	28
Méthode de Czochralski.....	29
de la procédure subit les étapes suivantes.....	30
II -6Le dopage des semi-conducteurs.....	30
II -6-1.Méthodes de dopage.....	30
1) La diffusion.....	30
2) La croissance Epitaxiale	31
3) Le bombardement ionique	31
II -6-2. Les différents types de dopage.....	31
II-6-3L'utilisation de la jonction P-N comme capteur.....	32
II -7.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	33
II -8 Différentes technologies de cellules photovoltaïques.....	34
II -9 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS.....	36
Conclusion	37
Chapitre III :Caractérisation d 'un cellulesolaire	
III-1. Introduction	38
III-2.Assemblage des cellules	38
a)Mise en Série des cellules photovoltaïque	38
b) Mise enparallèle des cellules photovoltaïque.....	39
c) GroupementSérie parallèle et la protection des cellules.....	39
III-3.Paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque	41
III-3-1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	41

III-3-2 Les grandeurs principales d'une cellule photovoltaïque	42
III-4 les Modélisation d'une cellule photovoltaïque	43
III-4-1Modèle idéal	43
III-4-1Modèle réelle.....	44
III-5 Caractérisation expérimentale P-V d'une cellule de silicium en conditions réel.	45
III-5-1. Appareilles et matérielles utilisées.....	45
III-5-3 schéma électrique équivalent.....	48
III-5-4Résultat obtenons dans l'expérience.....	48
Conclusion.....	52
Conclusion générale	53
Résumé.....	

Listes des figures :

Figure (I-1) : la structure interne du soleil.....	4
Figure (1.2) : la composition interne et externe du soleil.....	5
Figure (1.3) : Transformation de l'hydrogène dans le soleil.....	7
Figure 1-4 : La structure de l'atmosphère.....	10
Figure (1.5) : La variation de la constante solaire en fonction de numéro de jour.....	12
Figure (1.6) : La masse d'aire.....	12
Figure (1.7) : Les trois composantes du rayonnement solaire global	14
Figure (1.8) : La variation de la déclinaison en fonction de numéro de jour.....	16
Figure (1.9) : Angle horaire ω du soleil.....	16
Figure I-10: Mouvement apparent du soleil.....	18
Figure I-11 : La course de la Terre autour du Soleil	19
Figure II-1 : Irradiance spectrale pour une atmosphère peu polluée de type méditerranéen... ($n= 1.3$, $\beta = 0.04$, $\tau = 2$ cm) (1) AM0, (2) AM1, (3) AM1.5, (4) AM2.....	26
Figure II -2 : Excitation des électrons de valence par les photons et la jonction (P-N).....	27
Figure II -3 : La méthode de Czochralski.....	29
Figure II.4 : Semi-conducteur de type N.....	31
Figure II.4 : Semi-conducteur de type p.....	32
Figure II.3 : Jonction PN à l'équilibre.....	33
Figure II -7 : Principe de la conversion photoélectrique.....	33
Figure II -8 : Cellule monocristalline poly cristalline.....	35
Figure III-1 : Schéma d'un groupement en série de n_s cellules identiques.....	38
Figure III-2 : Schéma d'un groupement enparallèle de n_p cellules identiques.....	39
Figure III-3 : Schéma d'un groupement enparallèle de n_p cellules identiques.....	40
Figure III-4: caractéristique résultante d'un groupement.	40
Figure (III-5) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	41
Figure III-6 : Modèle de cellule photovoltaïque idéale.....	43
Figure III-7: Modèle de la cellule photovoltaïque réelle.....	44
Figure III-8 : Appareilles et matérielles de expérience.....	45
Figure III-9 : Résistance variable.....	46
Figure III-10: Ampèremètre.....	46
Figure III-11 : Voltmètre.....	46
Figure III-12 : THERMOMETER INFRAROUGE.....	47
Figure III-13 : Source lumière.....	47
Figure III-14 : appareil de chauffage.....	47
Figure III-15 : Le schéma électrique de l'essai expérimental.....	48
Figure III-16 : circuit électrique de l'essai expérimental.....	48
Figure III-17 : la <u>variation de puissance en fonction de la tension électrique de T_1</u>	50

Figure III-18 : la <u>variation de puissance en fonction de la</u> tension électrique de T_2	50
FigureIII-19 : la <u>variation de puissance en fonction de la</u> tension électrique de T_3	50
FigureIII-20 : la <u>variation de puissance en fonction de la</u> tension électrique de T_4	51
FigureIII-21 : la <u>variation de puissance en fonction de la</u> tension électrique de T_5	52

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Caractéristiques principales du soleil	3
Tableau II.1 : Valeurs énergétiques des photos issues spectre solaire	25
Tableau II.2 : Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques..	35
Tableau III-1 : les résultats de l'expérience.	49
Tableau III-2 : les résultats de l'expérience.	49
Tableau III-3 : les résultats de l'expérience.	51

Introduction générale

Introduction :

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables comme la plupart des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins.

L'exploitation de l'énergie solaire au moyen de capteurs relève de deux technologies bien distinctes l'une produit ces calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre, l'énergie solaire photovoltaïque qui produit de l'électricité et qui fera l'objet d'étude de ce mémoire [20].

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables la plus prometteuse. Elle consiste à convertir directement le rayonnement solaire en électricité. Elle utilise pour ce faire des convertisseurs photovoltaïques ou cellules solaires qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque [23].

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les années 50 pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie. Les images satellites reçues par votre téléviseur ne vous parviennent que grâce à l'énergie photovoltaïque.

Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. La croissance de l'industrie fut spectaculaire [24].

La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V. La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi conducteur) [26].

L'objectif de ce travail est l'étude des caractéristiques puissance –Tension silicium amorphe expérimentalement.

Introduction :

Dans le premier chapitre, nous présentons ainsi en premier temps quelques notions indispensables sur le gisement solaire, à savoir Généralité sur le soleil et Les composantes du rayonnement solaire et Coordonnées du soleil (équatoriales, horizontales) et les Coordonnées terrestres.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons Historiques sur L'énergie solaire, et Rayonnement solaire porteur d'énergie, ensuite nous avons présenté les étapes principales pour l'obtention de silicium qualité électronique, Les Méthodes est les différents types de dopage, ainsi une explication sur le Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, et les Différentes technologies de cellules photovoltaïques.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté caractéristiques principales dans cellule, et les formulé les circuits équivalents d'une cellule photovoltaïque. Ainsi les grandeurs principales et les Modélisation d'une cellule PV. Ensuite, nous avons réalisé une expérience pour établir La caractéristique puissance -Tension (P-V) d'une cellule PV.

Finalement, Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale qui résume la partie théorique et partie expérimental.

Chapitre I: Gisementsolaire

I-1.INTREDUCTION :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évaluation 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.

Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances. L'existence d'une solide et faible base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire [1].

I-2 Généralité sur le soleil :

I-2-1. Définition du soleil :

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1391000km. Il est situé à une distance moyenne de 149598000 km de la terre. Le soleil est composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium [3].

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 [2].

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau I.1 :

Diamètre (km)	1391000
Masse (kg)	2.10^{30}
Surface (km ²)	$6.09.10^{12}$
Volume (km ³)	$1.41.10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2.5.10^{47}$

Tableau I.1. Caractéristiques principales du soleil [20].

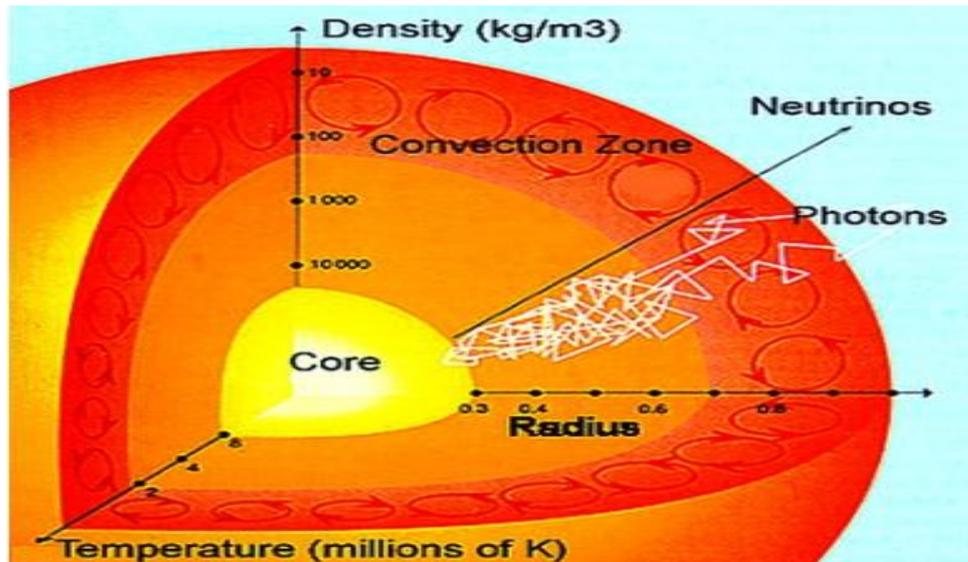


Figure (I-1) : la structure interne du soleil [8].

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, insuffisante la chaleur devient pour entretenir les réactions de fusion [4].

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. Cette région est le siège de nombreuses interactions entre les photons et les différents éléments présents. Ces collisions avec la matière se traduisent pour les photons par des phénomènes d'absorption-réémission (plusieurs millions de fois) que les ralentissent et dégradent leur énergie. Le temps de diffusion des photons est très long, de l'ordre du million d'années, alors que lumière émise depuis la surface ne met que 8 minutes pour atteindre la terre. 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 [4]

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. Des bulles de matière chaude montent, se refroidissent et redescendent. C'est un transport convectif analogue à celui observé dans une casserole d'eau chaude. Ces mouvements sont à l'origine de la granulation observée sur photosphère. 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) [4].

I-2-3. Les couches externes

Les couches externes du Soleil constituent son « atmosphère ».

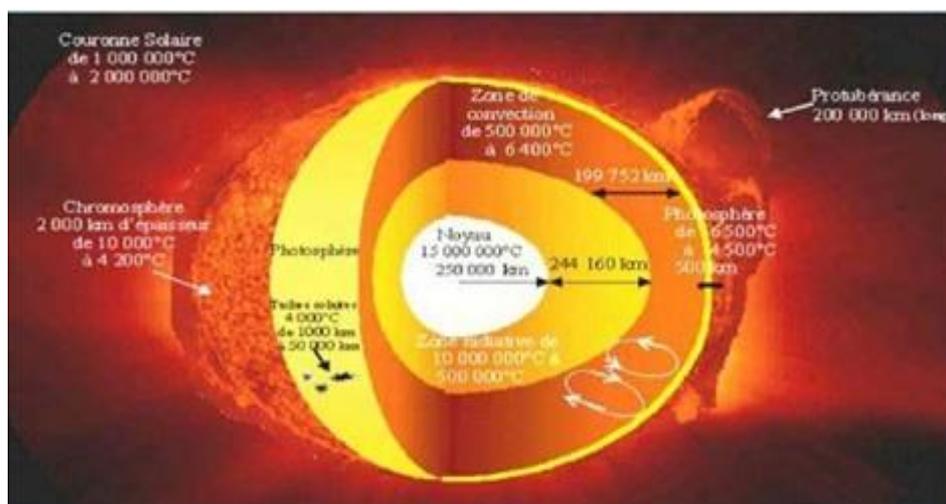


Figure (1.2) : la composition interne et externe du soleil[8].

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. À ce niveau, la matière du Soleil, opaque à l'intérieur, devient transparente. Elle contribue pour 99% au rayonnement solaire. Cette surface de quelques centaines de kilomètres est une frontière virtuelle entre l'intérieur du soleil (zone radiative avec son cœur et zone convective) et son atmosphère (chromosphère et couronne). Sa température est d'environ 6000 °C [4].

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. Théâtre d'une intense activité, C'est là que naissent les éruptions solaires, phénomènes violents pouvant se répandre en quelques minutes à des centaines de milliers de kilomètres [4].

c) Lacouronne :

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. En dehors de ces périodes, on utilise des coronographes, dispositifs occultant la lumière du disque de la photosphère [4].

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].

La chaîne proton – proton :(p-p-1)

$1\text{H} + 1\text{H} \rightarrow 2\text{H} + e^+ + \nu_e + 0,16 \text{ MeV}$ (le neutrino emporte avec lui $\langle E\nu \rangle = 0,26 \text{ MeV}$)

$e^+ + e^- \rightarrow 3\text{He} + \gamma + 5,49 \text{ MeV}$

$3\text{He} + 3\text{He} \rightarrow 4\text{He} + 2\text{H} + 12,86 \text{ MeV}$ total $2(0,16+1,02+5,49)+12,86 = 26,2$

La chaîne proton – proton :(p-p-2)

$1\text{H} + 1\text{H} \rightarrow 2\text{H} + e^+ + \nu_e + 0,16 \text{ MeV}$ (le neutrino emporte avec lui $\langle E\nu \rangle = 0,26 \text{ MeV}$)

$e^+ + e^- \rightarrow 3\text{He} + \gamma + 5,49 \text{ MeV}$

$3\text{He} + 4\text{He} \rightarrow 7\text{Be} + \gamma + 1,59 \text{ MeV}$

$7\text{Be} + e^- \rightarrow 7\text{Li} + \nu_e + 0,06 \text{ MeV}$ (le neutrino emporte avec lui 0,80 MeV)

$7\text{Li} + 1\text{H} \rightarrow 4\text{He} + 4\text{He} + 17,35 \text{ MeV}$

La chaîne proton – proton :(p-p-3)

$1\text{H} + 1\text{H} \rightarrow 2\text{H} + e^+ + \nu_e + 0,16 \text{ MeV}$ (le neutrino emporte avec lui $\langle E\nu \rangle = 0,26 \text{ MeV}$)

$e^+ + e^- \rightarrow 3\text{He} + \gamma + 5,49 \text{ MeV}$

$3\text{He} + 4\text{He} \rightarrow 7\text{Be} + \gamma + 1,59 \text{ MeV}$

$7\text{Be} + 1\text{H} \rightarrow 8\text{B} + \gamma + 0,13 \text{ MeV}$

$8\text{B} \rightarrow 8\text{Be} + e^+ + \nu_e + 10,78 \text{ MeV}$ (le neutrino emporte avec lui $\langle E\nu \rangle = 7,2 \text{ MeV}$)

$8\text{Be} \rightarrow 4\text{He} + 4\text{He} + 0,095 \text{ MeV}$

(p : proton ; d : noyau de deutérium (numéro atomique $Z = 1$, nombre de neutrons $N = 1$) ; ^3He : noyau d'hélium 3 ($Z = 2$, $N = 1$) ; ^4He : noyau d'hélium 4 ($Z = 2$, $N = 2$) ou particule Alpha ; ^7Li : noyau de lithium 7 ($Z = 3$, $N = 4$) ; ^7Be : noyau de béryllium 7 ($Z = 4$, $N = 3$) ; ^8Be : noyau de béryllium 8 ($Z = 4$, $N = 4$) ; ^8B : 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) [13].

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

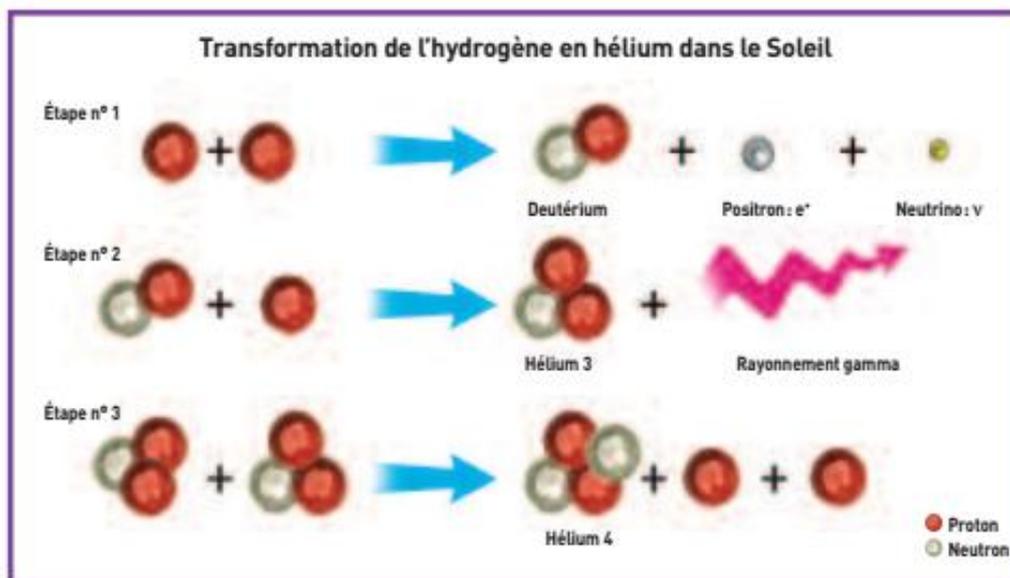
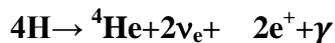


Figure (I.3) : Transformation de l'hydrogène dans le soleil [4].

Toute l'énergie du soleil provient de réaction thermonucléaire. Cette réaction transforme à chaque seconde $564 \cdot 10^6$ tonnes d'hydrogène en $560 \cdot 10^6$ 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 [6]:

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

Avec :

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

C : la vitesse de la lumière ($C = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)

$|\Delta m|$: 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-3. 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. 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 [7].

2) Rayonnement solaire dans l'espace :

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 [8] :

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

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

Avec :

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

T(K) : température absolue.

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

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

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 ($D_{TS}=149,6.10^9 \text{ m}$).

Φ_S : Flux solaire (w).

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

R_S : le rayon solaire ($R_S= 695500 \text{ km}$).

3) La constante solaire:

La constante solaire est la puissance rayonnée reçue hors atmosphère par unité de surface placée perpendiculairement au rayonnement solaire. $E_{sc} (w.m^{-2})$ 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 $E_0 = 1367 w/m^2$ [8].

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

I-4.L'atmosphère :

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

I-4-1 La structure de l'atmosphère [7], [8]:

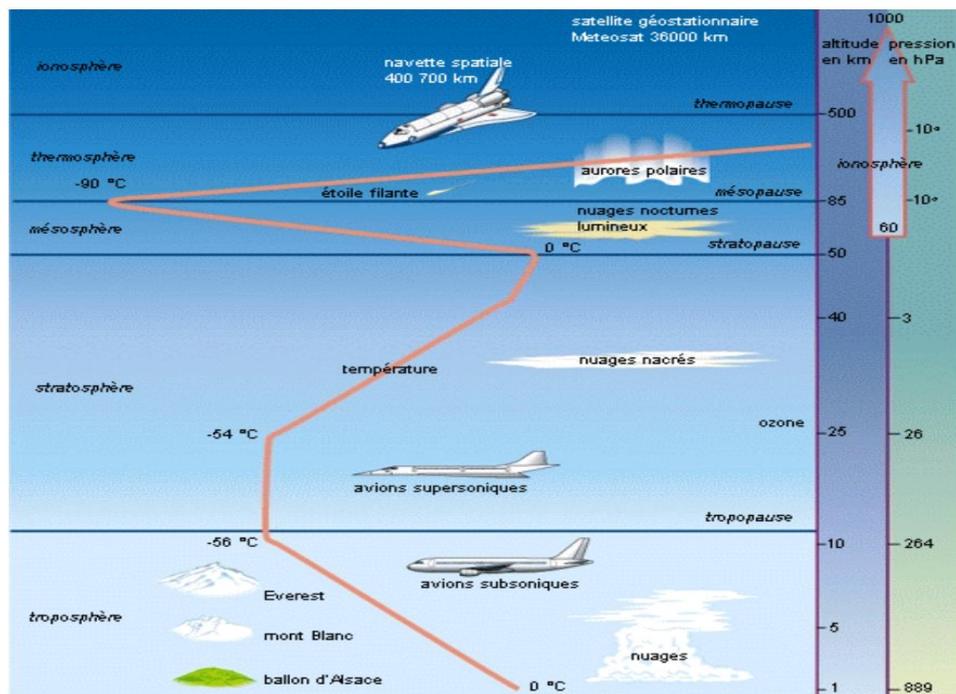


Figure I-4 : La structure de l'atmosphère [7].

a) la troposphère :

Qui s'étend jusqu'à 10 à 12 km d'altitude c'est la couche «vivante» de l'atmosphère et où 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).

b) stratosphère :

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 à 25 km d'altitude.

c) la mésosphère:

La mésosphère de 50 à 85 km où la température décroît à nouveau de 0°C à -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) L'ionosphère:

L'ionosphère de 80 à 200 km (confondue avec la thermosphère) .Il y règne une température de 400 à 1500°C dans la. Couche supérieure à (-90°C) au bas de cette couche.

E) l'exosphère :

L'exosphère au-delà de 700 km qui s'ouvre sans frontière sur l'espace intersidéral. Elle se dissipe peu à peu dans l'espace inter planétaire 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.

I-4-2 La composition chimique de l'atmosphère [7] :

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.

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=1 013 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.

I-5 La constante solaire au sol :

La valeur du rayonnement solaire " E_{CS} ", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " E_0 " appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m⁻². En première approximation, on peut calculer la valeur de " E_{CS} " en fonction du numéro du jour de l'année " j " par la relation suivante [10].

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

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.

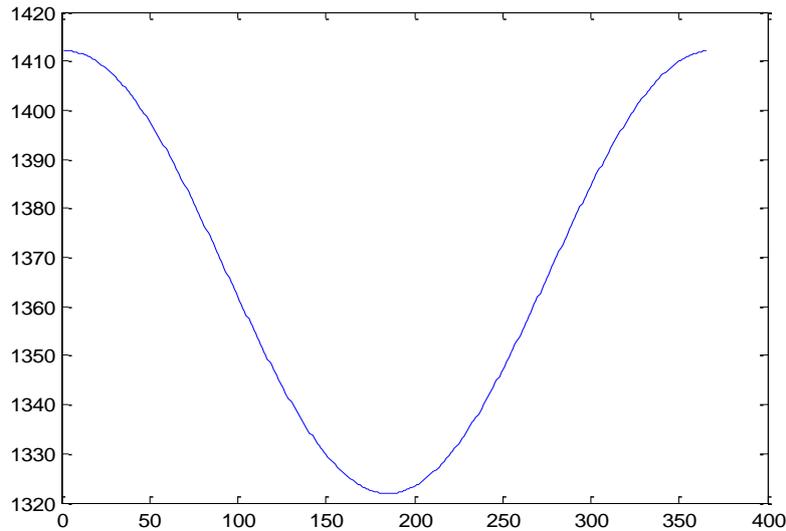


Figure (I.5) : La variation de la constante solaire en fonction de numéro de jour [8].

I-6 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 [7].

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:

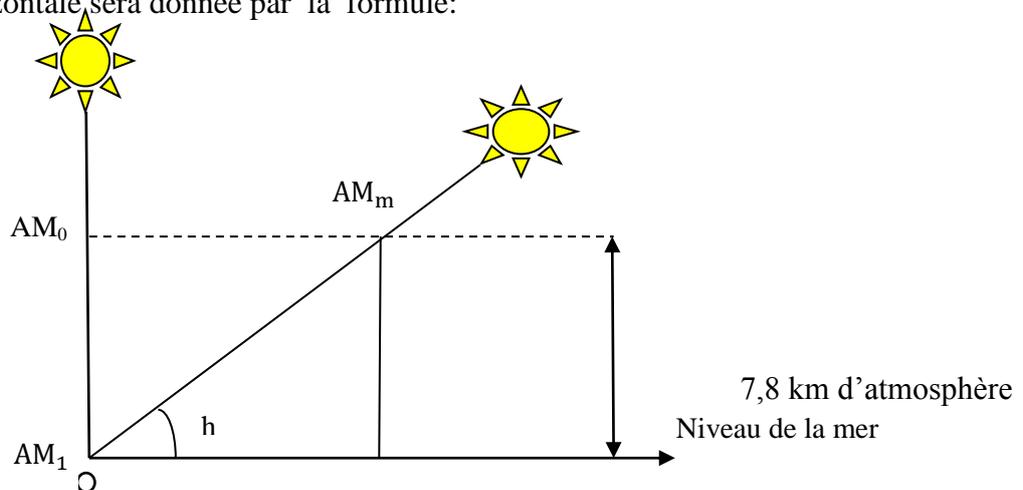


Figure (1.6) : La masse d'aire [18].

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

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

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

Où p_m est la pression atmosphérique au niveau de la mer. La pression atmosphérique au niveau de la mer peut varier autour de sa valeur de référence égale à 1 013 hPa Avec :

p (hPa ou mbar) : pression,

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

Z (Km) : altitude a (mbar) entre 950 hPa (dépression) et 1 050 hPa (anticyclone). Donc, l'Air Mass dans les conditions normales ($z=0$ Km, $p=1013$ hPa ou mbar), l'expression simplifiée suivante est utilisée :

$$m = \frac{OA}{OM} = \frac{1}{\sin h} \quad (I-9)$$

On cite d'autres conditions telles que [8] :

AM0: Hors atmosphère à haute altitude, on est dans les conditions AM0.

AM1: représente le spectre arrivant à la surface de la terre quand 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).

AM1.5: 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 (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith).

AM2 : est le spectre solaire ayant traversé 2 épaisseurs d'atmosphère (hauteur de 30° du soleil au dessus de l'horizon).

I-7 Les composantes du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire arrivant au sol a au moins deux composantes: une composante directe I et une composante diffuse D , le tout formant le r

a) Rayonnement directe I [11] :

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire incident sur un plan donné et provenant d'un angle solide centré sur le disque solaire.

b) Le Rayonnement diffus [11] :

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

La conversion photovoltaïque utilisant les modules utilise aussi bien le rayonnement direct que le rayonnement diffus.

c) Rayonnement global G [8]:

La somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement diffus constitue le rayonnement solaire global figure (I-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.

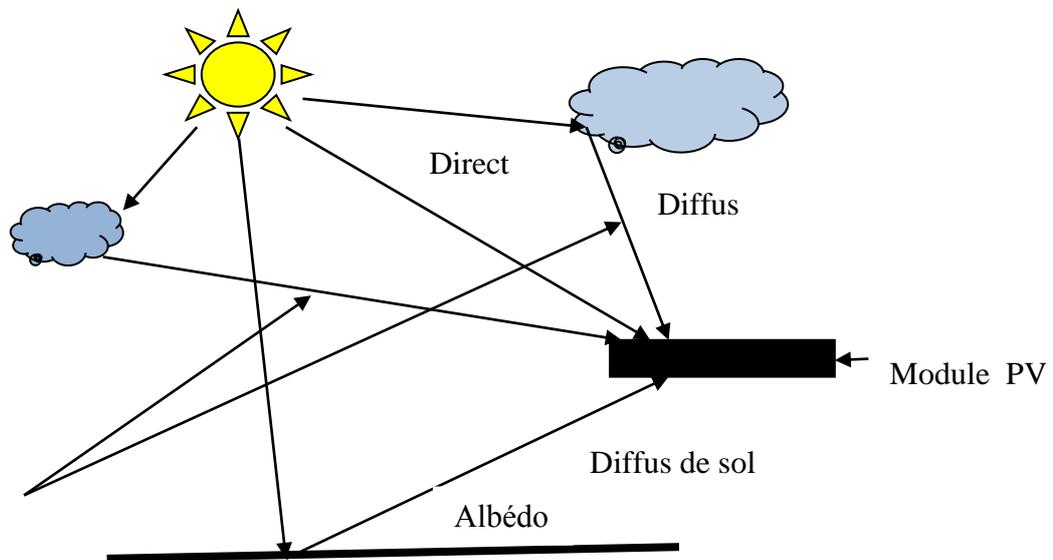


Figure (1.7) : Les trois composantes du rayonnement solaire global [18].

d) Albédo :

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possible. Par définition, le corps noir possède un albédo nul [11].

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

I-8 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 [14].

I-8-1 Coordonnées du soleil [15] :

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.

Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).

Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontale).

1) les Coordonnées équatoriales :

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles [15].

a) Déclinaison δ :

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année : elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ses deux valeurs extrêmes au solstice d'hiver ($-23^{\circ},27'$) et au solstice d'été ($+23^{\circ},27'$). Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Cooper [16].

$$\delta = 23.45^{\circ} \sin[0.980^{\circ}(j + 284)] \quad (\text{I-10})$$

Où 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

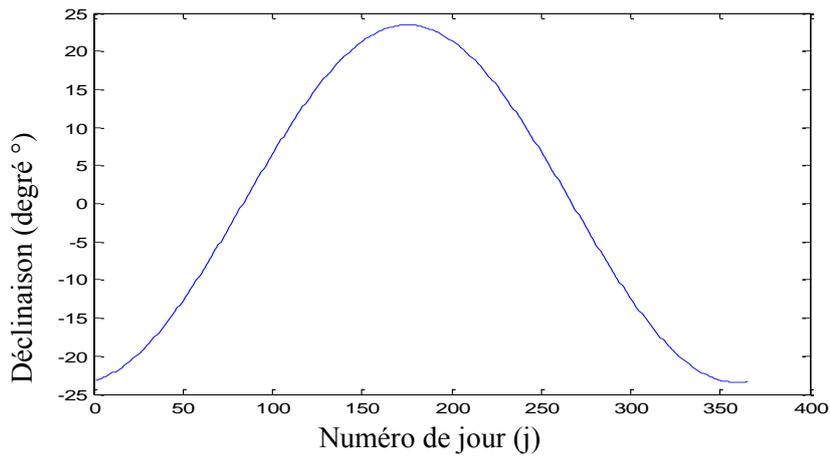


Figure (1.8) : La variation de la déclinaison en fonction de numéro de jour [8].

b) Angle horaire du soleil ω [16]:

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi vrai. L'angle horaire est donné par la relation suivante :

$$W = 15^\circ(TSV - 12) \text{ (I-11)}$$

Avec : TSV Le temps solaire vrai dans la journée

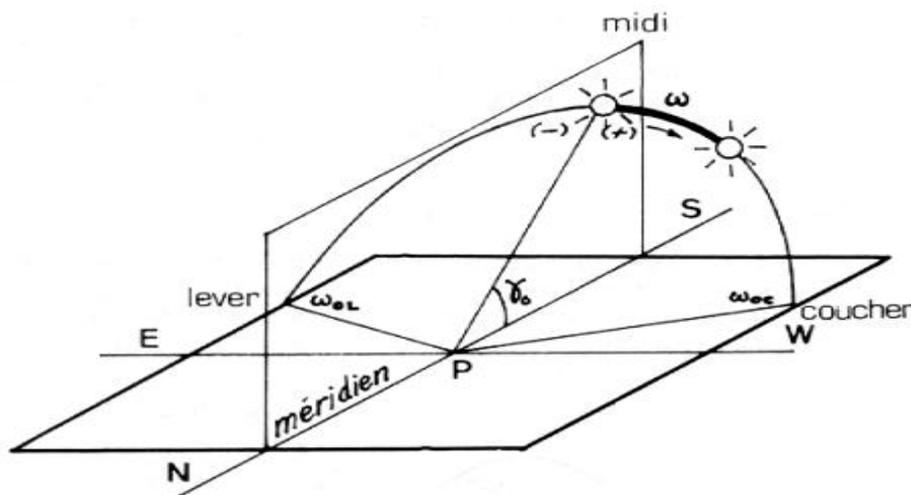


Figure (1.9) : Angle horaire ω du soleil [18].

2) Coordonnées horizontales du soleil [11] Les coordonnées horizontales dont le repère est donné par la verticale du lieu (zénith) et le plan de l'horizon. Le méridien du lieu est encore utilisé comme origine. Chaque point de l'espace est repéré par sa hauteur γ et son azimut ψ .

a) Azimut (a) :

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction du Sud. L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation [15] :

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

a: varie entre -180° et 180° .

On prend :

$a > 0$: vers l'ouest.

$a < 0$: vers l'est.

$a = 0$: direction du sud.

b) La hauteur h du soleil [15] :

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan d'horizontal. comme montre la figure

La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante :

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

La hauteur du soleil varie entre -90° et $+90^\circ$.

- $h = 0$ aux lever et coucher,

- $h > 0$ le jour ;

- $h < 0$ la nuit.

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

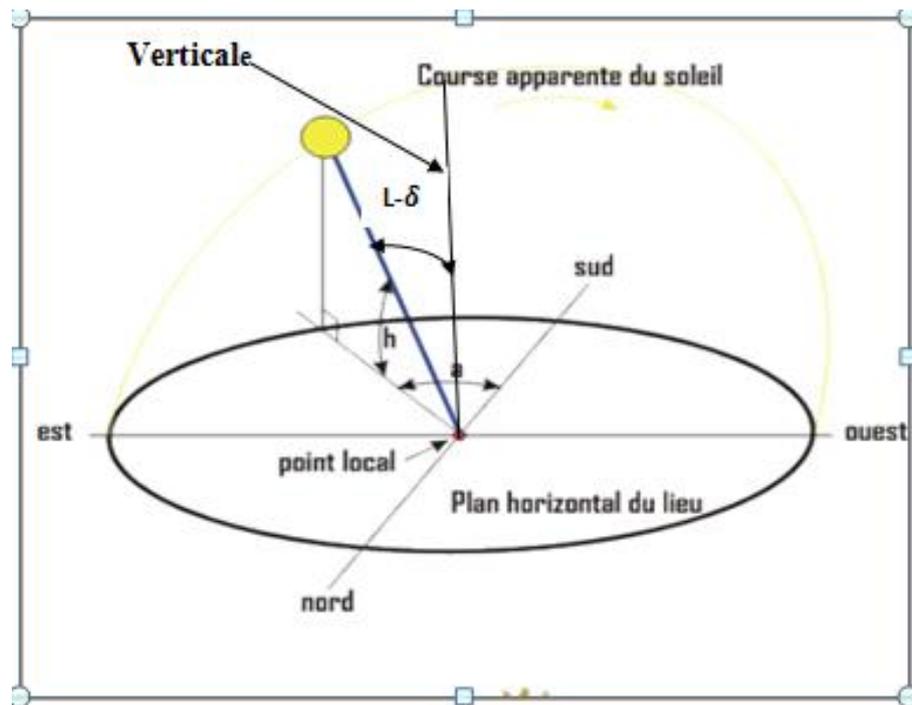


Figure I-10: Mouvement apparent du soleil [18].

I-9 Mouvement de la terre [8]:

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 22 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.

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.

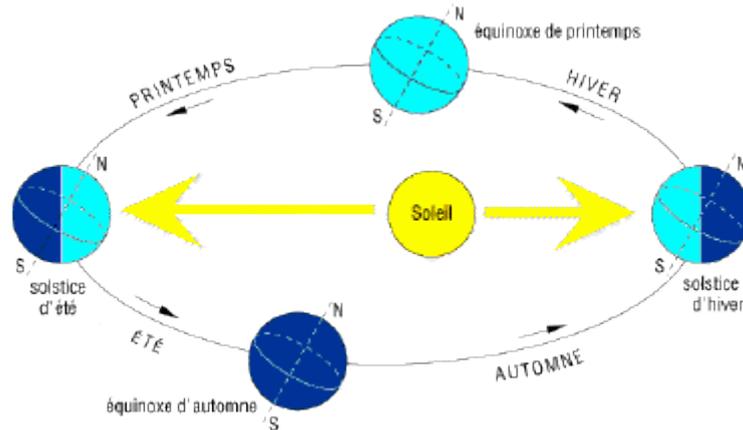


Figure I-11 :La course de la Terre autour du Soleil

I-10 Coordonnées terrestres :

Tout point sur la surface terrestre peut être repéré par ses coordonnées géographiques qui sont : la longitude, la latitude, ainsi que par son altitude [15].

a)Longitude [8] :

La longitude (λ) 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.

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.

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

b) L'altitude(Z) [8] :

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).

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 $+90^\circ$.

C) La latitude L [17]:

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.

I-11 Heurs et temps [12],[8] :**a. Durée du jour :**

On peut déduire les heures de lever et de coucher du soleil à partir de la hauteur angulaire du soleil en posant $\sin h = 0$ (soleil à l'horizon) dans l'équation :

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

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 :

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

b. Relation entre temps légale et temps solaire :

Les relations se rapportant au mouvement du Soleil utilisent le temps solaire TS qui diffère généralement du temps légal TL (heure des montres) du lieu considéré. Cette différence est liée à : - La différence (fixée par chaque pays) entre l'heure légale TL et l'heure civile TCF correspondant au fuseau horaire adopté par le pays :

$$C = TL - TCF \quad (\text{I.16})$$

L'heure civile TCF du fuseau horaire est égale au temps universel TU (temps solaire méridien De Greenwich) augmenté de la valeur du décalage horaire fixé.

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 :

$$ET = \begin{bmatrix} 0,0002 - 0,4797 \cos(\omega_j) + 3,2265 \cos(2\omega_j) + 0,0903 \cos(3\omega_j) \\ + 7,3509 \sin(\omega_j) + 9,3912 \sin(2\omega_j) + 0,3361 \sin(3\omega_j) \end{bmatrix} \quad (I.17)$$

Avec : $\omega=0,984$

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

I-12 Durée et taux d'ensoleillement [1] :

I-12-1 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.

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 déviations depuis son émission par le soleil.

I-12-2 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 :

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} \quad (I.18)$$

La durée maximale d'ensoleillement SS_0 pour un site dégagé peut être prise égale à la durée du jour calculée par la formule.

Avec :

SS : durée d'insolation mesurée.

SS_0 : durée maximale d'insolation.

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 [8].

- ✓ l'énergie totale transportée rayonnement solaire sur une distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne "E0" appelée constante solaire est de l'ordre de 1367 w.m^{-2} .
- ✓ Le rayonnement solaire qui arrivant au sol possède au moins deux composantes: une composante directe I et une composante diffuse D , La somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement diffus constitue le rayonnement solaire global.
- ✓ Les caractéristiques principales du soleil (le diamètre atteint 1391000 km, la distance moyenne de 149598000 km de la terre) et les deux systèmes de coordonnées de soleil (Équatorial et horizontal).
- ✓ les conditions de La masse d'air ($AM_0, AM_1, AM_{1.5}, AM_2$).

Chapitre II :

Energie Solaire

II -1.INTREDUCTION:

C'est l'énergie fournie par les rayons du soleil, plusieurs technologies transforment cette énergie en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. C'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique, ainsi que des collecteurs solaires qui permettent de chauffer l'eau des maisons par exemple, et les concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et générer une chaleur intense, transformant l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce à certaines machines[18].

II.2-Historique [8],[19]:

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.

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par le physicien français *Alexandre Edmond Becquerel* et présentée première observation d'un photo-courant, dès 1839, avec une électrode en platine et l'autre en cuivre oxydé, plongées dans une solution conductrice acide. Et en 1877 les propriétés semi-conductrices furent mises en évidence, par WG Adams et RE Day, sur le sélénium. Mais il a fallu attendre le vingtième siècle pour avoir des résultats importants, grâce à l'interprétation théorique de l'effet photo-électrique par Einstein en 1905, mais les véritables applications pratiques n'ont été réalisées que vers le milieu du siècle en 1941, par la mise au point de la première jonction p-n dans le silicium, puis l'obtention d'une

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 bande interdite de la cellule à bon rendement (construite par les chercheurs de la Bell Téléphone Laboratoires en 1955) ainsi que les fameux transistors.

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque :

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

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

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

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

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

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

II-3.Rayonnement solaire porteur d'énergie[8]:

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 ($h=6,62.10^{-34}\text{J.s}$).

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 :

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

Le flux du photon par seconde et par $\text{cm}^2 N_{(\lambda)}$ 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.

$$M_{(\lambda)} = A\lambda^{-5} \left(\exp \frac{B}{\lambda T} - 1 \right) \quad (\text{II.4})$$

$$A = 3.74 \cdot 10^{-10} \text{ W.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$$

$$B = 14.39 \cdot 10^{-3} \text{ m.k.}$$

T (k) : Température absolue

$d\lambda$: 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 $0.4\mu\text{m}$ (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. Le tableau (II -1) donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photos pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

$\lambda(\mu\text{m})$	$E_{ph}(eV)^\circ\text{C}$	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 II .1: Valeurs énergétiques des photos issues spectre solaire [8].

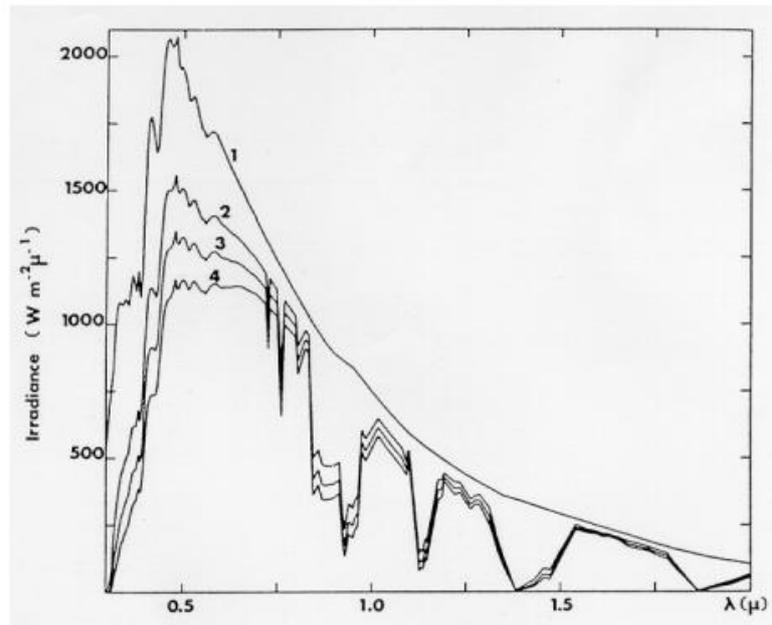


Figure II-1: Irradiance spectrale pour une atmosphère peu polluée de type méditerranéen ($n=1.3$, $\beta = 0.04$, $\tau = 2$ cm) (1) AM0, (2) AM1, (3) AM1.5, (4) AM2.

II-4.Effet photovoltaïque [21] :

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie ($h\nu$) à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure, ainsi se crée un courant électrique.

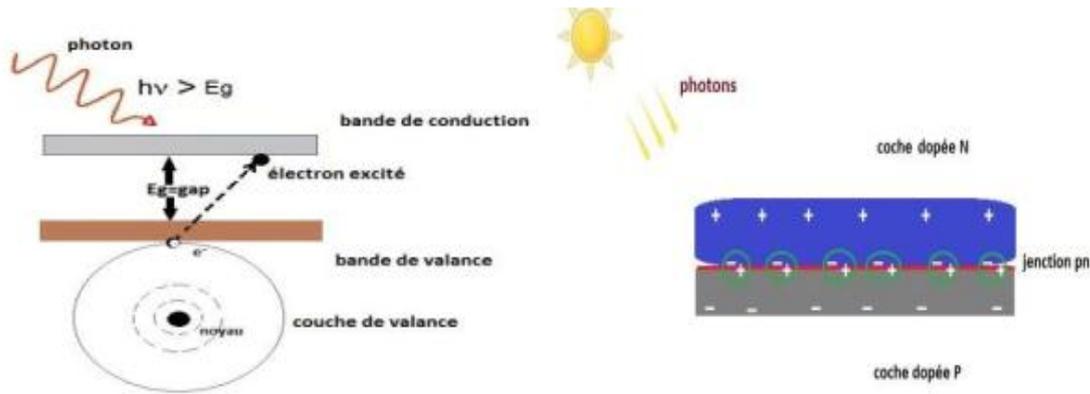


Figure II-2 :Excitation des électrons de valence par les photons et la jonction (P-N)

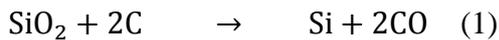
II -5 La production du silicium métallurgique [8]:

II-5-1 Pour quoi le si ?

- Le silicium est le deuxième élément le plus fréquent de la croûte terrestre : O₂ (46%), Si(28%), Al(18%).
- Le silicium présent sous forme de silice (SiO₂) contenue dans le sable ou le quartz.
- Il possède un oxyde naturel SiO₂ 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-conducteur.
- 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.

II-5-2 Réduction de la silice [8]:

Le silicium présent sous forme de silice (SiO₂) contenue dans le sable ou le quartz, il est le deuxième élément le plus fréquent de la croûte terrestre : O₂(46%), Si (28%), Al (8%). Le silicium métallurgique (MG-Si) est obtenu par réduction carbothermique de la silice dans des fours à arc électrique portés à très haute température (1700°C). La réaction principale de réduction s'écrit:



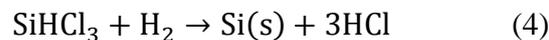
Le silicium en fusion est alors déversé dans des poches puis séparé avant d'être coulé dans des lingotières. Le silicium ainsi obtenu présentera une pureté typique de 98.5% (soit un taux d'impuretés d'environ 15000 ppm, il faut encore le purifier pour obtenir matériau de qualité électronique.

II -5-3 Purification du silicium métallurgique MG-Si [8]:

Différents procédés chimiques existent pour la purification du Si, le procédé de purification le plus répandu pour obtenir le Si en qualité électronique 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 (SiHCl₃) 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.



Le trichlorosilane est ensuite vaporisé puis injecté avec de l'hydrogène (H₂) dans un réacteur *Siemen*. Le trichlorosilane se décompose sur la surface de filaments chauffés à 1100 °C suivant la réaction



Le procédé Siemens produit du silicium poly cristallin d'une très haute pureté mais il est cependant très énergivore. Après la distillation, la teneur en impureté est inférieure 1ppm, donc le Si obtenu est de qualité électronique (Si intrinsèque).

Le Si pur doit subir un double traitement à la fois d'enrichissement aux matériaux dopants afin d'en faire des Si extrinsèques de type P ou N.

Le Si obtenu par la réaction (4) était poly cristallin, on doit le transformer en monocristallin pour améliorer sa conductivité, cette opération est réaliser dans un four à tirage selon la procédure de Czochralski.

A) Méthode de Czochralski [18] :

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).

Le silicium obtenue se présente 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 à 300 μm d'épaisseur qui sont appelées « wafers ».

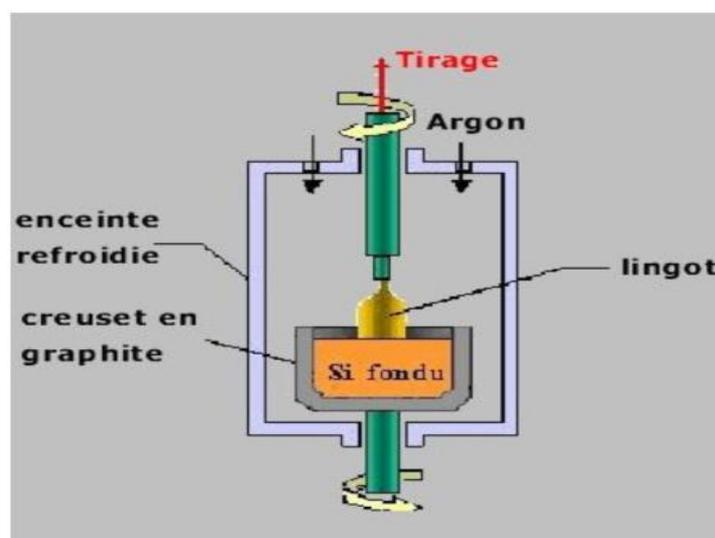


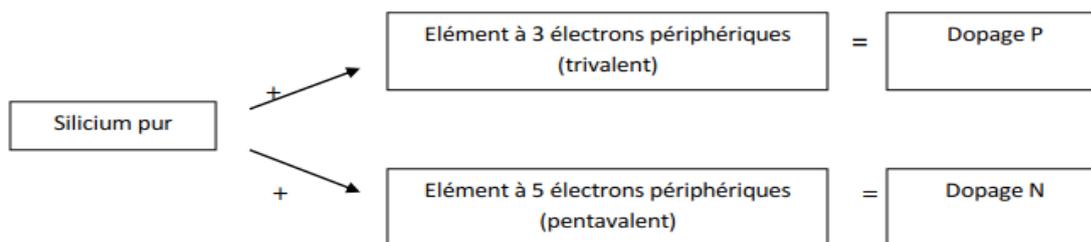
Figure II-3 : La méthode de Czochralski

B) La continuité de la procédure subit les étapes suivantes [18] :

- 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 ont épaisseur est d'environ 200 à 300 μm .
- 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-6Le dopage des semi-conducteurs [20] :

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 -6-1.Méthodes de dopage:**il existe trois méthodes de dopages.**1) La diffusion [18]:**

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 [18] :

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 [18] :

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-6-2. Les différents types de dopage:

➤Dopage N [20]

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.

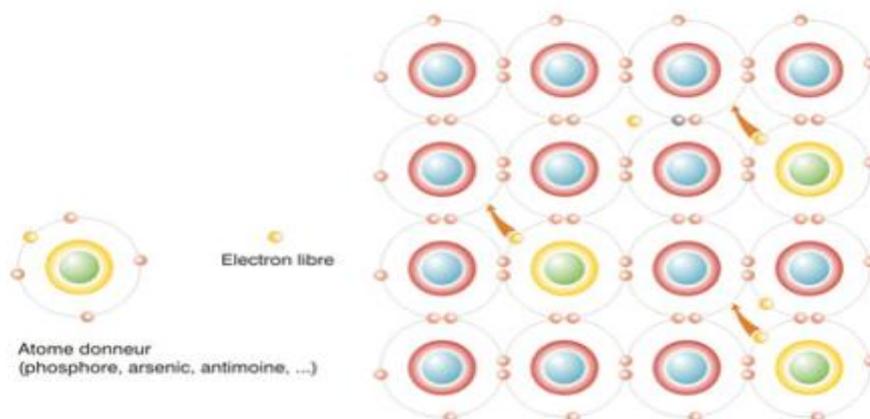


Figure II.4 : Semi-conducteur de type N.

> Dopage P [20]

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

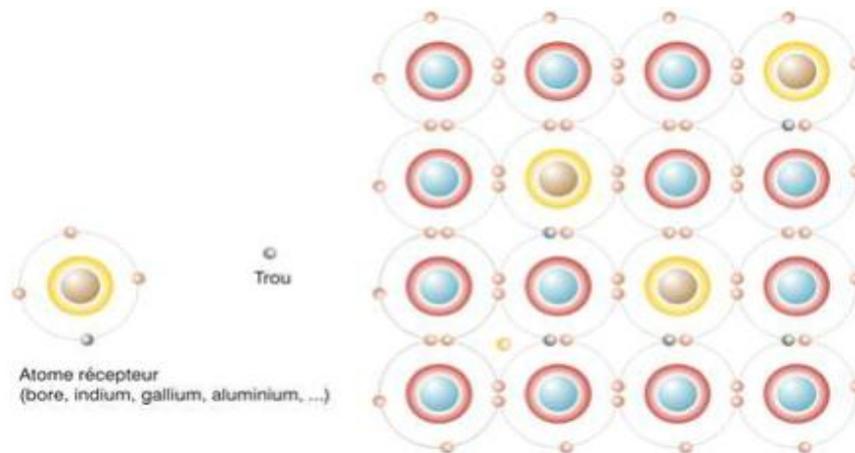


Figure II.5 : Semi-conducteur de type p.

II-6-3.L’utilisation de la jonction P-N comme capteur[20] :

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 forme des paires électron-trou neutres, nous obtenons alors une région appelée jonction PN dans laquelle la conductibilité passe progressivement du type P au type N.

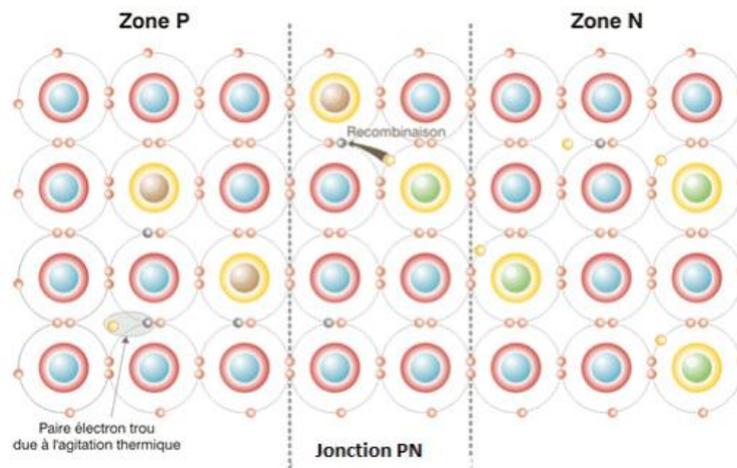


Figure II.6 : Jonction PN à l'équilibre.

II-7.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [8] :

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.

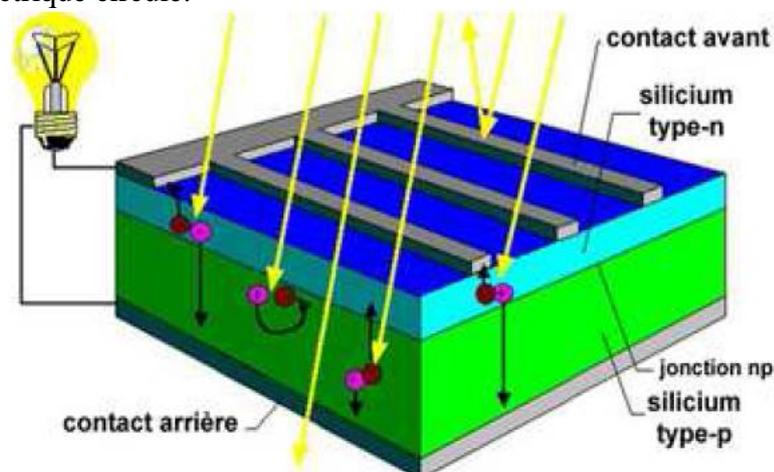


Figure II -7 :Principe de la conversion photoélectrique.

II-8 Différentes technologies de cellules photovoltaïques.

Une grande variété de cellules photovoltaïques existe et peut être partagée en trois grandes familles selon les technologies utilisées. La première génération existe depuis plusieurs dizaines d'années, elle offre de loin le meilleur rendement pour un rapport qualité/ prix assez satisfaisant. La deuxième génération, récemment apparue regroupe les technologies dites « couches minces », leurs rendement est encore inférieur à celui des cellules cristallines mais tend à s'améliorer pour un coût inférieur. La dernière et troisième génération, celle des cellules organiques est en cours de développement et vise de hauts rendements avec des coûts de productions de plus en plus bas [20].

Technologies de la première génération à base de silicium cristallin :

Considérée comme la technologie photovoltaïque la plus efficace et la plus dominante la première génération comprend le monocristallin et le poly cristallin. Le silicium monocristallin reste encore plus cher que le silicium poly cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 19.8% contre 24.7% de rendement en laboratoire [20].

➤ Cellule monocristalline :

La cellule monocristalline est celle qui s'approche le plus du modèle théorique. Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Cependant pour arriver à ce résultat la fabrication est complexe et coûteuse en énergie, les rendements de conversion obtenue varient entre **14** et **16%**[20] .

➤ Cellule poly cristalline :

Contrairement à la cellule monocristalline, la cellule poly cristalline n'a pas besoin d'un silicium aussi pur et ordonné. Pour fabriquer ce matériau, on refond tous les déchets provenant du tirage des monocristaux, on obtient des lingots qu'il faut ensuite scier en plaquettes. Les rendements de conversion industrielle qui étaient de l'ordre de **8** à **10%** avant **1980** sont actuellement de **16** à **17%**[19]. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin[20].

➤ Les cellules amorphes:

Les cellules amorphes sont à base d'un matériau composé de silicium hydrogéné (état non cristallin) déposé sur un substrat de verre, elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, et sont souvent utilisées dans de petits produits de consommation tel que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ces derniers est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment). Leurs rendement est assez faible de 5% à 8% voir jusqu'à 13% en laboratoire, mais ne nécessite que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevés [20].

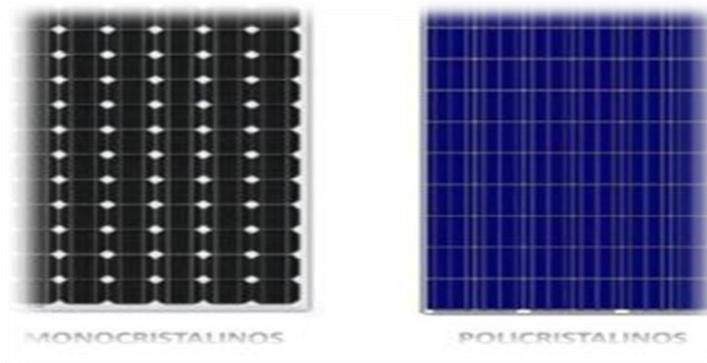


Figure II-8 : Cellule monocristalline poly cristalline

	Technologies	Rendement	Avantages	Inconvénients	Durée de vie
1 ère Génération	Silicium monocristallin	14-17%	Bon rendement pour une cellule	Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication	35 ans
	Silicium poly cristallin	12-15%	Bon rendement pour un module	Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication	35 ans
	Silicium Amorphe	6-10%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	+10 ans
	Cdte	8-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	Non évaluée

2ème Génération	CIS/CIGS	10-12%	Energie de gap ajustable 99% des photons absorbés	Manque de matière première	5 ans
3ème Génération	Cellules organiques	10%	Faible coût de fabrication, Flexible	Rendement encore trop bas	Faible actuellement

Tableau II.2 : Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques [2].

II-9 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS [22]:

Les systèmes photovoltaïques présentent un grands nombres d' avantages et d'inconvénients qui sont :

a) Avantage :

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages: - ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.

- ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.

- ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie où à un approvisionnement en carburant.

- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.

- ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.

- ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.

- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d' où son utilisation sur les engins spatiaux.

- le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ils ont une longue durée de vie.
- les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

b) Inconvénients :

- la fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %, - ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (< à 30 V) donc elle doit être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur
- *beaucoup* d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.

Conclusion :

L'énergie solaire s'effectue à l'aide des générateurs PV ces derniers sont à base de silicium qu'il est la matière la plus disponible, elle se trouve dans la nature sous une forme de dioxyde de silice SiO₂ [24].

- ✓ **Les Méthodes** sont les différents types de dopage.
- ✓ l'étape très importante pour l'amélioration de la conductivité et sur les propriétés électriques de silicium.
- ✓ les Différentes technologies de cellules photovoltaïques il existe trois grandes familles (Monocristalline, poly cristalline, amorphes).

Chapitre III :

Caractérisation d'une cellule solaire.

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 [8].

III-2. Assemblage des cellules :

a) Mise en Série des cellules photovoltaïque :

Pour augmenter la tension du générateur PV, on dispose d'un nombre (N_s) de cellules en série. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation suivante résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules [15].

- $V_{cos} = N_s \cdot V_{co}$ (I-1)

- $I_{ccs} = I_{cc}$ (I-2)

V_{cos} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{ccs} : courant de court-circuit de N_s cellules en série.

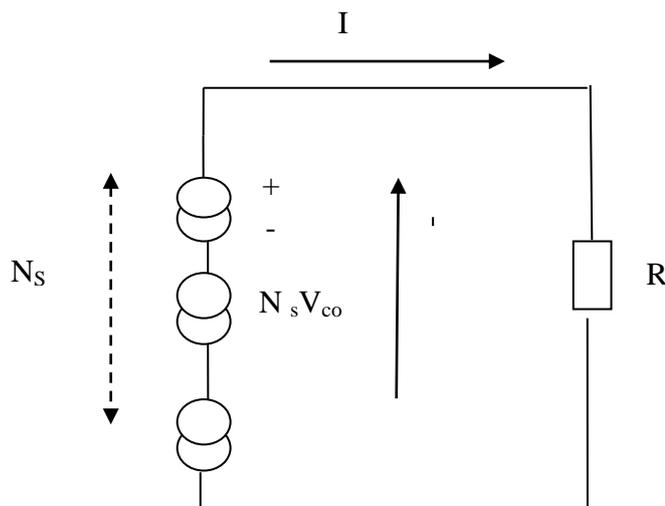


Figure III-1 : Schéma d'un groupement en série de n_s cellules identiques.

b) Mise en parallèle des cellules photovoltaïques :

Pour faire augmenter le courant du générateur PV, on dispose d'un nombre (N_p) de cellules en parallèle. Les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. L'équation suivante résume les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (N_p) cellules [15] :

$$I_{ccp} = N_p \times I_{cc} \quad (\text{III-3})$$

$$V_{co} = V_{cop} \quad (\text{III-4})$$

- I_{ccp} : la somme des courants de court-circuit de (N_p) cellules en parallèle

- V_{cop} : la tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle

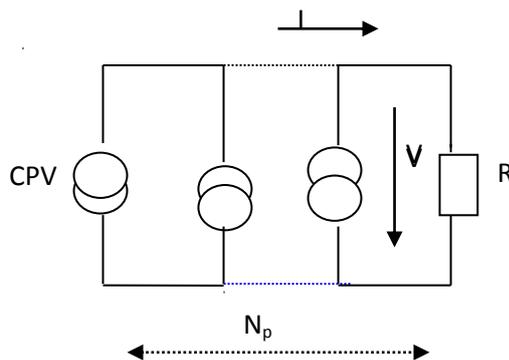


Figure III-2 : Schéma d'un groupement en parallèle de N_p cellules identiques.

c) Groupement Série parallèle et la protection des cellules:

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, voir figure 2.10, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont donnés par les relations (III-5) et (III-6):

$$I_{cct} = n_p \times I_{cc} \quad (\text{III-5})$$

$$V_{Oct} = n_s \times V_{oc} \quad (\text{III-6})$$

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, en une série pour éviter les courants inverses et en parallèle, dit diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas

de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de protection associée. La diode by-pass, lorsqu'elle se met à fonctionner, court-circuite alors une partie du panneau comme indique la figure (3-3), évitant ainsi la circulation de courants inverses au sein des cellules défectueuses. La dégradation d'une seule cellule condamne donc le groupe de cellules associées à la cellule défectueuse et protégée par la diode by-pass à ne pas produire de puissance. Ce phénomène de perte partielle de puissance est à comparer à la perte totale d'un panneau entier en cas de problème sur une cellule avec un panneau fonctionnant sans protection [15].

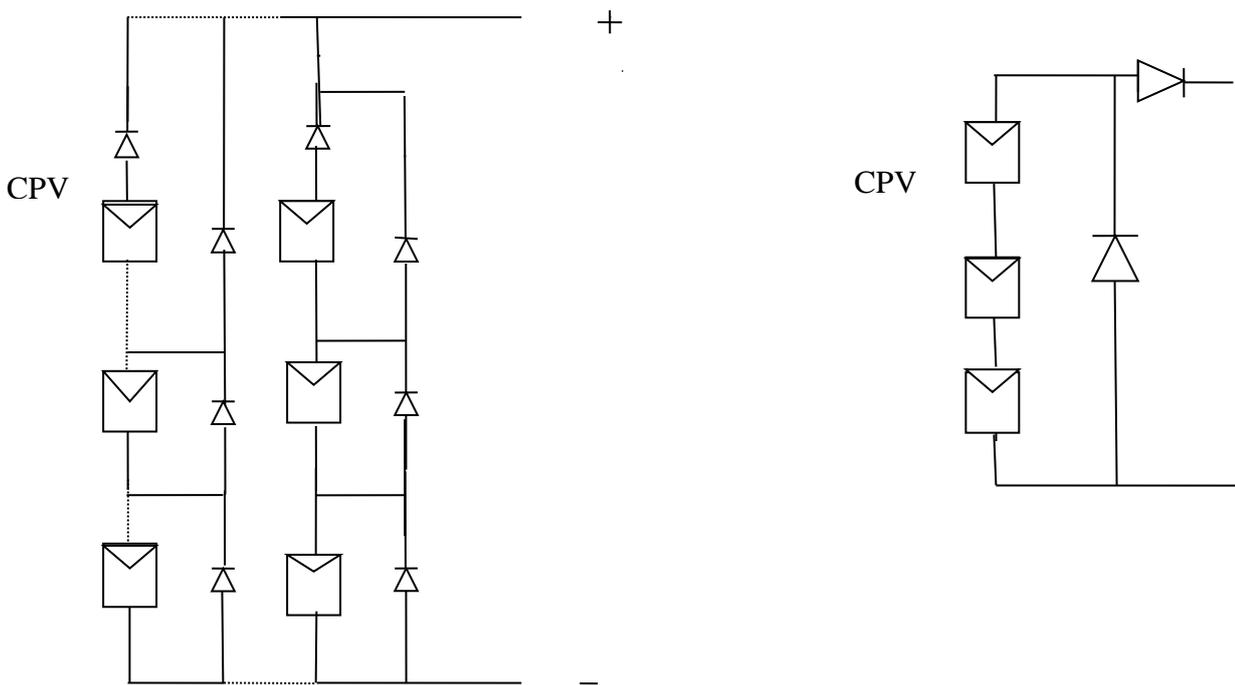


Figure III-3 : Schéma d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques.

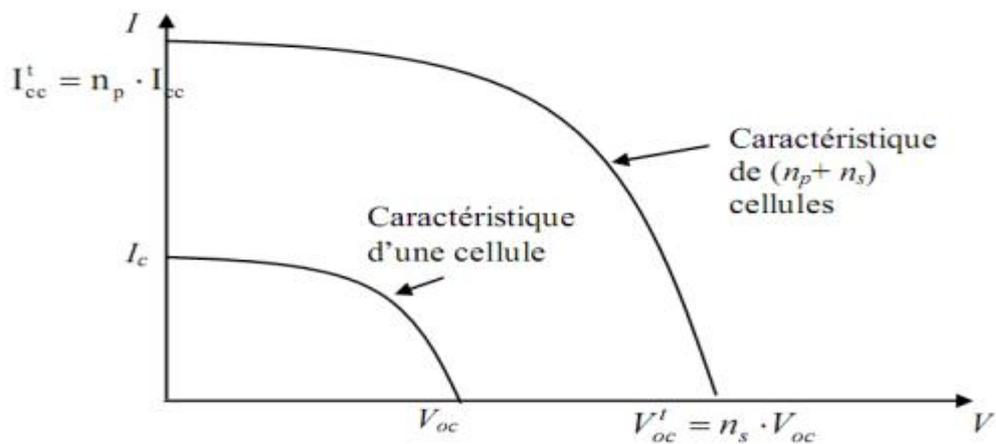


Figure III-4: caractéristique résultante d'un groupement.

III-3.Paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque :

III-3-1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

La figure (III-5) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule :

- . La résistance montée en série (R_s) représente la résistance de contacte et de connexion.
- . La résistance shunt (R_{sh}) montée en parallèle représente le courant de fuite.
- . Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN [25].

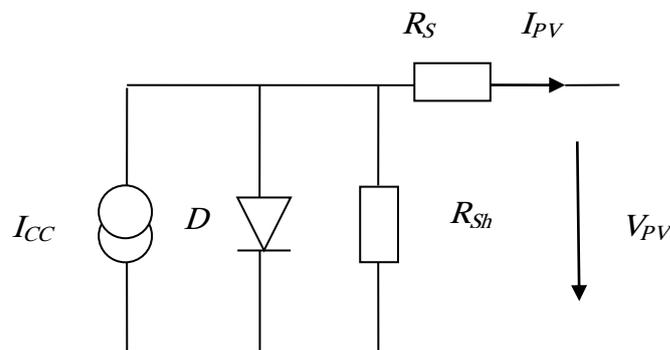


Figure (III-5) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Le rôle de chaque composant électrique :

- a) Générateur de courant I_{ph} :** il délivre le courant I_{ph} correspondant au photo généré.
- b) La diode D :** modélise la jonction PN.
- c) la résistance série R_s :**

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semi-conducteurélectrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion [23].

d) la résistance parallèle R_{sh} :

La résistance parallèle (shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau, épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace. L'existence de fissures et de défauts de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle R_{sh} [23].

III-3-2 Les grandeurs principales d'une cellule photovoltaïque :**a) Tension à circuit ouvert :**

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 [15].

$$I = 0 \text{ et } R_{chg} = 0 \rightarrow V = V_{co}$$

b) Courant de court-circuit, I_{cc} :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la cellule éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. La résistance de la charge est tant vers zéro [27].

$$R_{ch}=0 \text{ donc } I = \frac{V}{R} \rightarrow I_{cc} \quad (\text{III-6})$$

C) Le point de puissance maximale (PPM):

C'est le point où le générateur travaille en rendement maximal et produit une puissance de sortie maximale [3].

$$P_m = I_m \times V_m \quad (\text{III-7})$$

$-I_m$ et V_m : Le courant et la tension correspondants au point PPM respectivement.

d) Rendement η :

Le rendement des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} [20].

$$\eta = \frac{p_{max}}{p_{in}} = \frac{FF \times V_{CO} \times I_{CC}}{P_{in}} \quad (III-8)$$

c) Le facteur de forme FF :

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule Pmax , et le produit du courant de court-circuit (Icc) par la tension de circuit ouvert (Vco) (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale) [20]:

$$FF = \frac{p_{max}}{v_{co} \times I_{CC}} \quad (III-9)$$

$$FF = \frac{I_m \times v_m}{I_{CC} \times V_{CO}} \quad (III-10)$$

III-4 les Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

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, en parallèle avec une diode figure (III.12) qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. D'après la loi de nœuds [20]:

$$I = I_{ph} - I_d$$

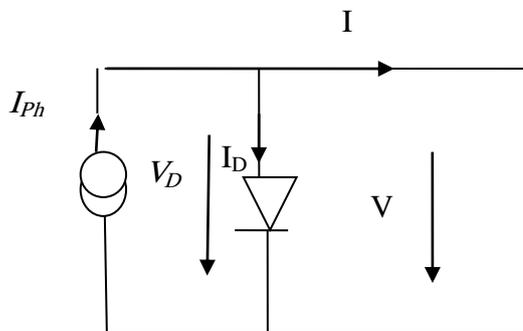


Figure III-6 : Modèle de cellule photovoltaïque idéale.

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (III-11)$$

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

$$I_d = I_o \cdot \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (III-12)$$

I_o : Le courant de saturation inverse de la diode [A].

V_d : La tension aux bornes de la diode [V].

$V_t: \frac{KT}{q}$ Potentielle thermique.

K : Constant de Boltzmann, $K=1.38 \times 10^{-23} \text{J.k}^{-1}$.

Donc la relation devient : $I = I_{ph} - I_o \cdot \left(\text{Exp} \left(\frac{V_d}{V_t} \right) - 1 \right)$

III-4-2.Modèle réelle :

Le modèle photovoltaïque précédent ne prenait pas en compte 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. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_{sh} [20].

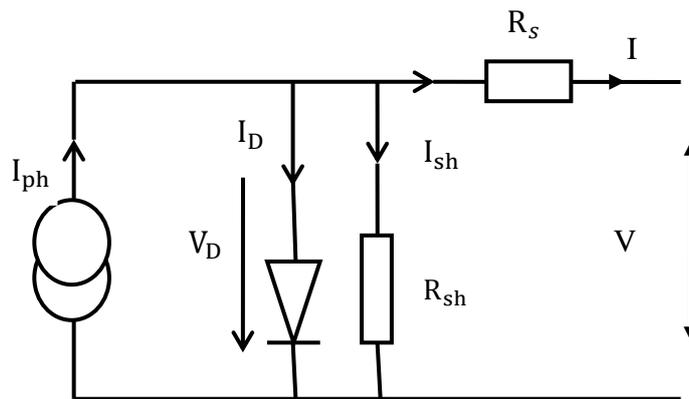


Figure III-7: Modèle de la cellule photovoltaïque réelle.

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{III-13}$$

$$I_{sh} = \left(\frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \right) \tag{III-14}$$

$$I_d = I_o \cdot \left(\text{Exp} \left(\frac{V_d}{V_t} \right) - 1 \right) \tag{III-15}$$

I: Le courant fourni par la cellule.

I_{ph} : Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_o : Le courant de saturation de la diode.

R_s : Résistance en série (\square).

R_{sh} : Résistance en parallèle (\square)

$$I = I_{ph} - I_o \cdot \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (\text{III-16})$$

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

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

III-5-1. 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 1333×10^2 Lux figure (III-8) cette expérience a été réalisée au cours d'une journée très ensoleillée le 1 juin 2021 à 14 h et 00 min. Université Mohamed el Bachir El Ibrahimi, BBA. De longitude $4,801377^\circ$ Est, et latitude de $36,047034^\circ$ N.

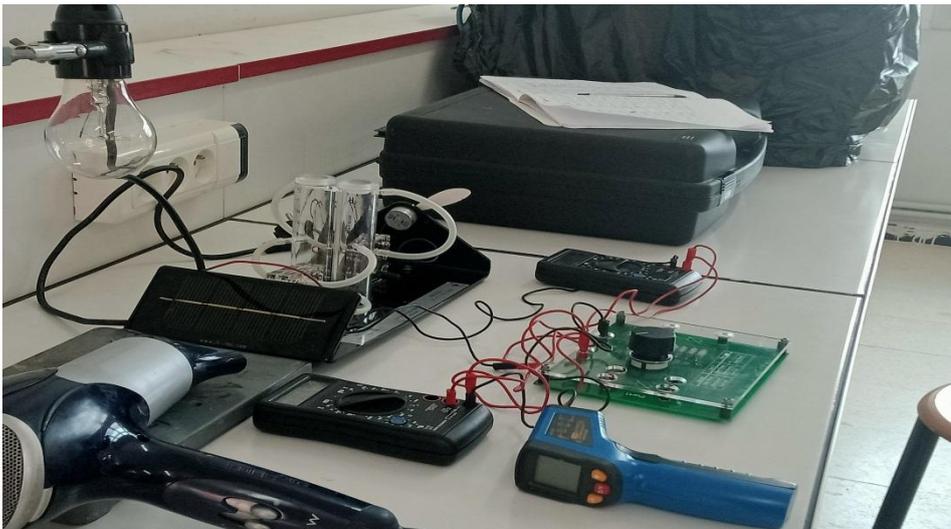


Figure III-8 : Appareils et matérielles de expérience.

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

a) Résistance variable de $0 \square$ à $330 \square$: Pour permettre d'étudier l'évolution de la tension et le courant électrique.

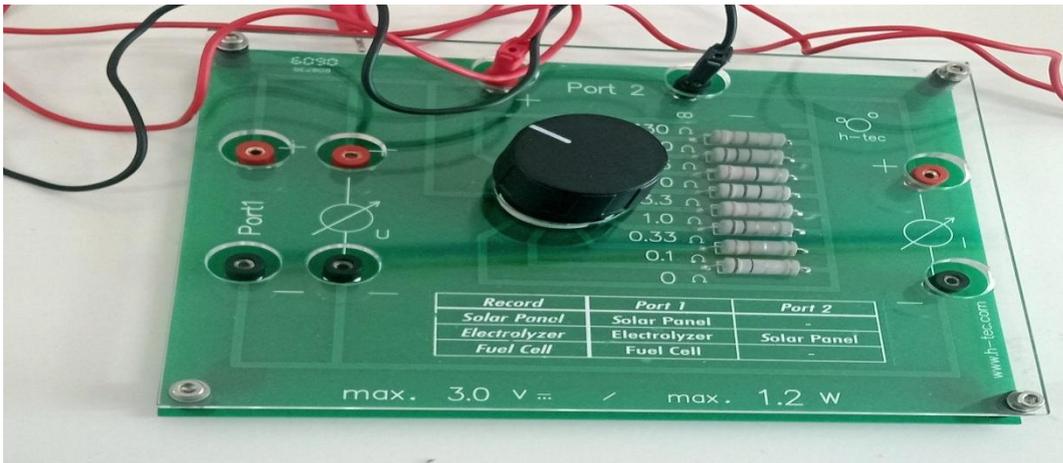


Figure III-9 : Résistance variable

b) **Ampèremètre:** connecté en série pour mesurer le courant électrique de la cellule PV.



Figure III-10: Ampèremètre

c) **Voltmètre :** connecté en parallèle pour mesurer le tension électrique de la cellule PV.



Figure III-11 : Voltmètre

d) THERMOMETER INFRAROUGE : pour mesurer la température.



Figure III-12 : THERMOMETER INFRAROUGE.

E) Source lumière.

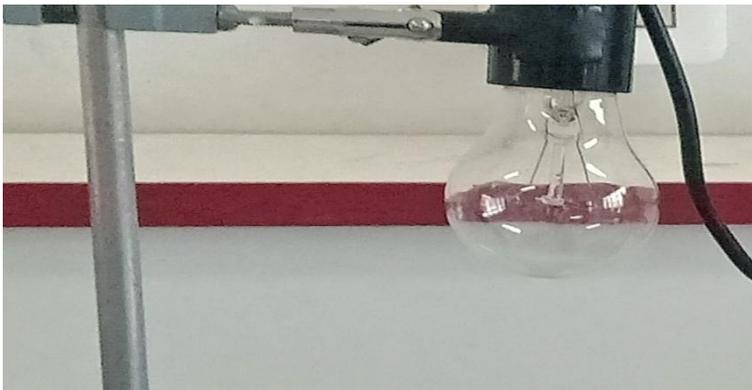


Figure III-13 : Source lumière.

F) appareil de chauffage.



Figure III-14 : appareil de chauffage

III-5-3. schéma électrique équivalent :

Le schéma électrique de l'essai expérimental comme illustré sur la figure

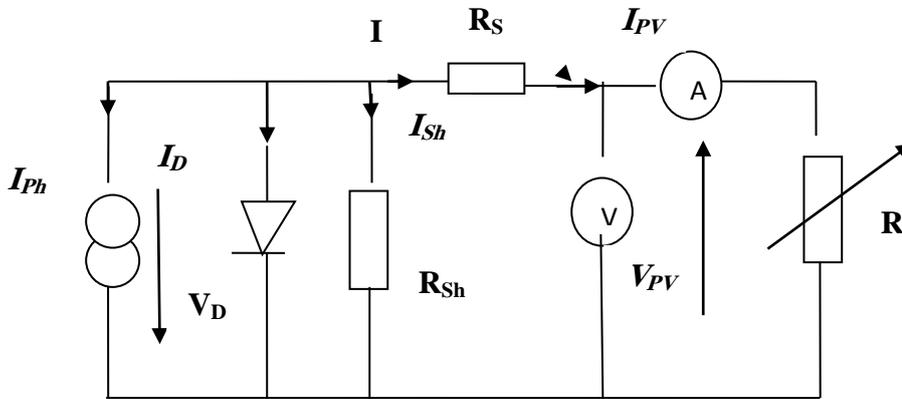


Figure III-15 : Le schéma électrique de l'essai expérimental

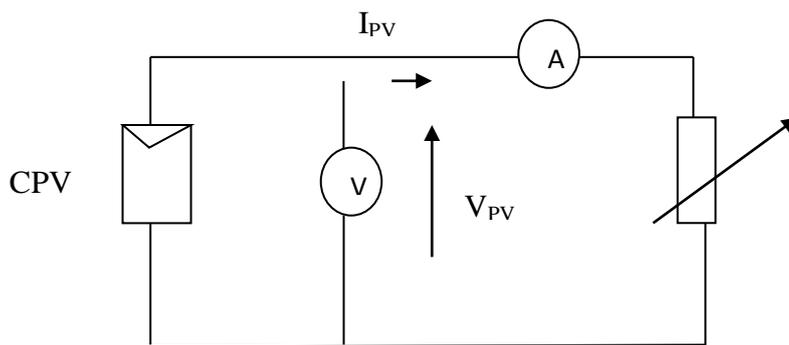


Figure III-16 : circuit électrique de l'essai expérimental

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

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

$T_1=25.2^\circ\text{C}$			$T_2=27.8^\circ\text{C}$		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)
0.17	0.0235	0.003995	0.12	0.0237	0.002844
0.16	0.0235	0.00376	0.16	0.0236	0.003776
0.15	0.0235	0.003525	0.19	0.0236	0.004484
0.14	0.0235	0.00329	0.19	0.0235	0.004465
0.19	0.0235	0.004465	0.45	0.0233	0.010144
0.37	0.0233	0.008621	0.89	0.0222	0.01975
0.84	0.0222	0.018648	1.44	0.0136	0.019584
1.47	0.0129	0.018963	1.6	0.0047	0.00752
1.67	0.0047	0.007849	1.67	0.0038	0.006346
1.75	0	0	1.74	0	0

Tableau III-1 : les résultats de l'expérience.

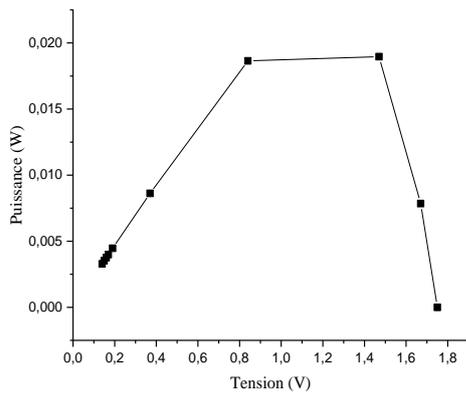
$T_3=35.6^\circ\text{C}$		
V(V)	I(A)	P(W)
0.34	0.0237	0.008058
0.55	0.0233	0.012815
0.38	0.0237	0.009006
0.6	0.023	0.0138
0.7	0.023	0.0161
0.77	0.0225	0.017325
1.26	0.017	0.02142
1.5	0.0105	0.01575
1.62	0.0041	0.006642
1.79	0	0

Tableau III-2: les résultats de l'expérience.

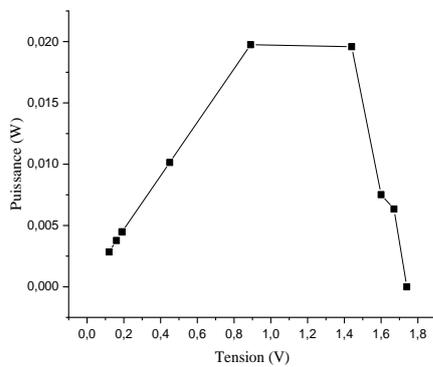
La puissance mesure pour chaque point dans le tableau. Cela leur permet ensuite de tracer la caractéristique (P-V) puissance - tension $P = f(V)$ selon la formule :

$$P=V \times I=R \times I^2.$$

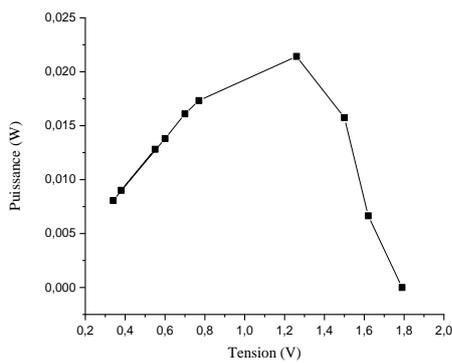
La puissance électrique mesure en watt ($1\text{W}=1\frac{\text{J}}{\text{s}}$)



FigureIII-17 : la variation de puissance en fonction de la tension électrique de T_1 .



FigureIII-18 : la variation de puissance en fonction de la tension électrique de T_2 .



FigureIII- 19: la variation de puissance en fonction de la tension électrique de T_3 .

Caractéristique (P-V) puissance - tension pour $T = 25.2^{\circ}\text{C}$

On voit que la puissance atteint une valeur maximale de 0.0189W pour une tension de 1.47V et une résistance 100 . Cette valeur de la puissance est celle trouvée dans le tableau par le produit $V \times I$ au niveau de I_{max} .

Remarque :

L'ensemble des résultats obtenus sont presque les mêmes avec les résultats théoriques et les autres essais.

Les grandeurs nécessaires de la cellule utilisée dans l'expérience de T_1 :

- ✓ Tension de circuit ouvert : $V_{CO}=1.75$ v
- ✓ Courant de court-circuit : $I_{CC}=2.35 \times 10^{-2}$ A
- ✓ La puissance maximale : $P_{max}=1.89 \times 10^{-2}$ W
- ✓ Le Courant maximale : $I_{max}=1.29 \times 10^{-2}$ A
- ✓ Le Tension maximale : $V_{max} = 1.47$ V
- ✓ Le facteur de forme : $FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{CC} \times V_{CO}} = \frac{1.29 \times 10^{-2} \times 1.47}{1.75 \times 2.35 \times 10^{-2}} = 0.4615$
- ✓ Le Rendement η : $\eta = \frac{FF \times V_{CO} \times I_{CC}}{P_{in}}$

$T_4 = 38^\circ\text{C}$		
V(V)	I(A)	P(W)
0.3	0.024	0.0072
0.22	0.024	0.00528
0.29	0.0238	0.006902
0.33	0.0238	0.007854
0.46	0.0236	0.010856
0.65	0.0232	0.01508
1.06	0.0203	0.021518
1.43	0.0117	0.016731
1.6	0.0041	0.00656
1.68	0	0

$T_5 = 49^\circ\text{C}$		
V(V)	I(A)	P(W)
0.04	0.0247	0.000988
0.05	0.0247	0.001235
0.04	0.0246	0.000984
0.06	0.0246	0.001476
0.11	0.0244	0.002684
0.27	0.0242	0.006534
0.77	0.023	0.01771
1.33	0.0134	0.017822
1.53	0.0046	0.07038
1.60	0	0

Tableau III-3 : les résultats de l'expérience

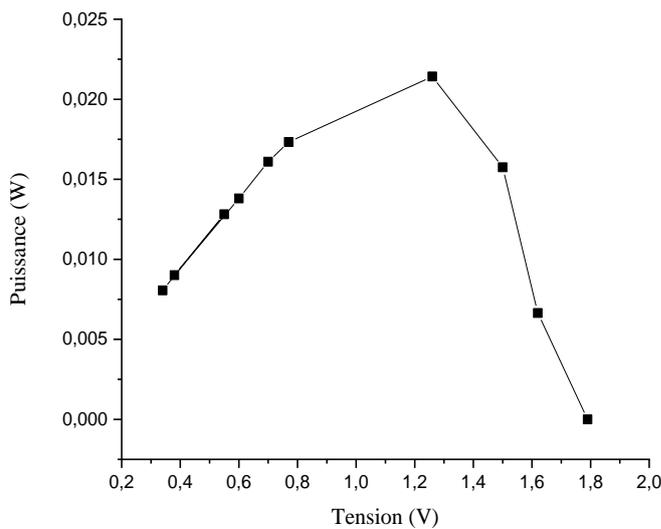


Figure III- 20: la variation de puissance en fonction de la tension électrique de T_4 .

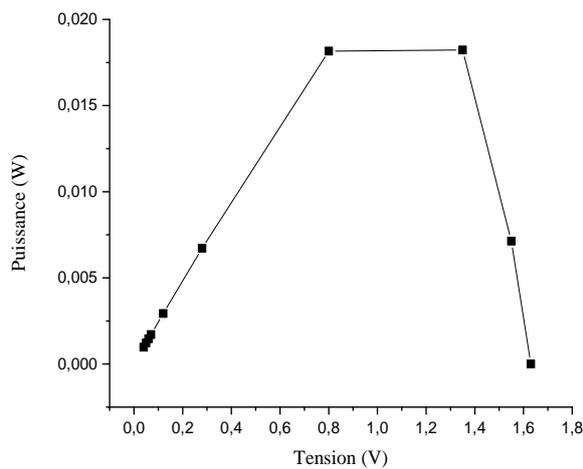


Figure III- 21: la variation de puissance en fonction de la tension électrique de T_5 .

Conclusion :

Dans ce chapitre présenté Les éléments constituant la plateforme de caractérisation PV en extérieur et en intérieur installée à l'UDES. Le modèle photovoltaïque idéale ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. Dans le Modèle réelle observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite [23]. Cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_{sh} .

Les résultats de caractérisation du panneau solaire au silicium amorphe, grâce à la plateforme de caractérisation PV. La puissance électrique résultante de cette conversion dépend la température et l'éclairement et de la répartition spectrale de rayonnement solaire [8].

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 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 aucune 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[8].

Dans le premier chapitre, nous aborderons ainsi en premier temps quelques notions indispensables sur le gisement solaire, à savoir les Coordonnées du soleil et les Coordonnées terrestres.

Le second chapitre est consacré aux généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi une explication sur le Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre nous avons les caractéristiques et paramètre d'influence sur une cellule photovoltaïques.

Dans le troisième chapitre nous avons effectué plusieurs mesures, qui nous ont permis d'obtenir les caractéristiques $P(V)$ d'évaluer ainsi la production électrique du panneau PV en fonctionnement pour différentes températures et irradiances solaires.

Référence et bibliographique

Référence et bibliographique

Référence et bibliographique :

[1] : www.calamea.comcalamea.

[2] : Vincent Tatischeff (CSNSM, CNSR/Université paris sud) XXV^{ème} Festival d'astronomie de Fleurance, le 13 aout 2015.

[3] : BIDI Manel, thèse de Master, Conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures, Université de M'sila.

[4] : www.cea.fr Commissariat à l'Énergie Atomique, Direction de la communication Bâtiment Siège - 91191 Gif-sur-Yvette cedex (SSN 1637-5408).

[5] : JP. Maratrey, le soleil, club D'ASTRONOMIE QUAZAR 95. Février 2006.

[6] : Yves JANNOT, Technique de l'ingénieur, THERMIQUE SOLAIRE, Mars 2011

[7] : Alain Ricaud, Gisement solaire et transferts énergétiques, Université de CERGY-PONTOISE. Jan-2011.doc.

[8] : SAOULI SARA, étude des caractéristiques courant Tension d'une cellule de silicium. Université BBA.

[9] : Stéhan ASTIER, DOSSIER TECHNIQUE DE L'INGÉNIEUR, L'expertise technique et scientifique de référence d3935, 10/05/2008.

[10] : Charles Chauviagnet: L'énergie solaire dans le bâtiment, Editions Eyrolle 1981

P22, 32 et p147-148.

[11] : YACINE Fouad, thèse de Magistère, DES NOUVELLES GENERATIONS DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES, Université Des Sciences et de le Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO.MB).

[12] : MAHDI KHALED, thèse DE MAGISTER, Conception et réalisation d'un concentrateur sphérique, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE.

[13] : HAL, Introduction `a la physique du Soleil Jean-Marie Malherbe, `Ecole thématique, HAL Id: cel-00682269 <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00682269>

Submitted on 24 Mar 2012.

Référence et bibliographique

[14] : LALOU ABDELHAK, L'ENERGIE SOLAIRE ET POUR DES BESOINS D'HABITATION, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA.

[15] : MISSOUM MOHAMMED, Magistère en génie mécanique, Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie, UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF.

[16] : MEZIANI Fariza, Mémoire de Magister, Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZU.

[17] : HADJ BELKACEMI Mohammed, Mémoire de Master, Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé, Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen Faculté des Sciences.

[18] : <https://elearning.univ-bba.dz>, Site de l'université de Bordj Bou-Arréridj,

Cours Energie Solaire de 3ème année licence physique énergétique.

[19] : Ghenissa Hocine, MASTER ,SITE ISOLE PAR VOIE CLASSIQUE ET SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE CAS DE WILYA DE BISKRA LABRECH-TOLGA, Université Mohamed Khider Biskra.

[20] : Halouane Assia, thèse de Master, Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES.

[21] : Meghellet Hanine, thèse de Master, Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque, Université Colonel Akli Mohand-Oulhadj Bouira.

[22] : BOUKHERS Djamil, thèse de Magistère, OPTIMISATION D'UN SYSTEME D'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE APPLICATION AU POMPAGE, Université Mentouri de Constantine.

[23] : Melle DJELLOUT Thileli et Melle MAKOUR Sarah, Etude de l'effet de la température et de l'éclairement sur les performances des modules photovoltaïques à base de silicium amorphe, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.

[24] : Zerguine Bilal, thèse de Magistère, MODELISATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION ELECTRIQUE PAR LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA .

Référence et bibliographique

[25] : BOUZEGANE Mhenna GAOUAOUI Ferhat, Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADEMIQUE, Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou.

[26] : LYCEE DES METIERS, DE LA ,METALLURGIE ET DE LA VENTE, JEAN CAILLAUD, R U E L L E S U R T O U Y R E.

[27] : Zouhair El Jouad. Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques. Physique [physics]. Université d'Angers, 2016. Français. NNT: 2016ANGE0022.tel-01443621.

Résumé

Dans ce travail, nous avons présenté étudié Les caractéristique puissance -Tension (P-V) d'une cellule solaire de silicium. Nous avons commence par le gisement solaire et L'énergie solaire photovoltaïque. Pour le deuxième partie nous présenté modélisation et les résultats de La caractérisation puissance -Tension (P-V) d'une cellule photovoltaïque. nous avons réalisé une expérience sur une l'éclairement naturel constante, température et résistance variable, avons effectué plusieurs mesures, qui nous ont permis d'obtenir les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque. Après analysé et comparé les résultats expérimentaux avec les autres valeurs littérature, en général en accord avec les autres valeurs théoriques.

Abstract

In this work, we have presented studied the power-voltage (P-V) characteristics of a silicon solar cell. We started with the solar field and solar photovoltaic energy. For the second part we presented modeling and the results of the power-voltage characterization (PV) of a photovoltaic cell. We carried out an experiment on a constant natural illumination, temperature and variable resistance, carried out several measurements, which allowed us to obtain the characteristics of a photovoltaic cell. After analyzing and comparing the experimental results with the other literature values, in general in agreement with the other theoretical values.

الملخص

في هذا العمل، قدمنا دراسة خصائص الطاقة والجهد (P-V) لخلاية شمسية من السيليكون. بدأنا بالمجال الشمسيو الطاقة الشمسية الكهر وضوئية. النمذجة و نتائج توصيف القدرة والجهد (PV) لخلاية كهر وضوئية. أجرينا تجربة علمنا لإضاءة الطبيعية الثابتة و درجة الحرارة و المقاومة المتغيرة، و قمنا بإجراء العديد من القياسات، مما سمح لنا بالحصول على خصائص الخلية الكهر وضوئية. بعد تحليل و مقارنة النتائج التجريبية مع القيم الأدبية الأخرى، بشكل عام بالاتفاق مع القيم النظرية الأخرى.