

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimy – Bordj Bou Arreridj Faculté
des Sciences et de la Technologie

Département Sciences de la Matière



جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعريريج »

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم علوم المادة

Mémoire de fin d'études

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

Filière : Physique
Option : Physique des Matériaux

THÈME :

**Etude expérimentale de la variation de tension de circuit ouvert
d'une cellule solaire sous différentes température**

Préparé par : RAHMOUNE Amel

Soutenu le: 26/06/2022

Devant le jury :

Président: KAHOUL Abdelhalim

Rapporteur: DAOUDI Salim

Examineur: SAHNOUNE Yassine

Professeur

MCA

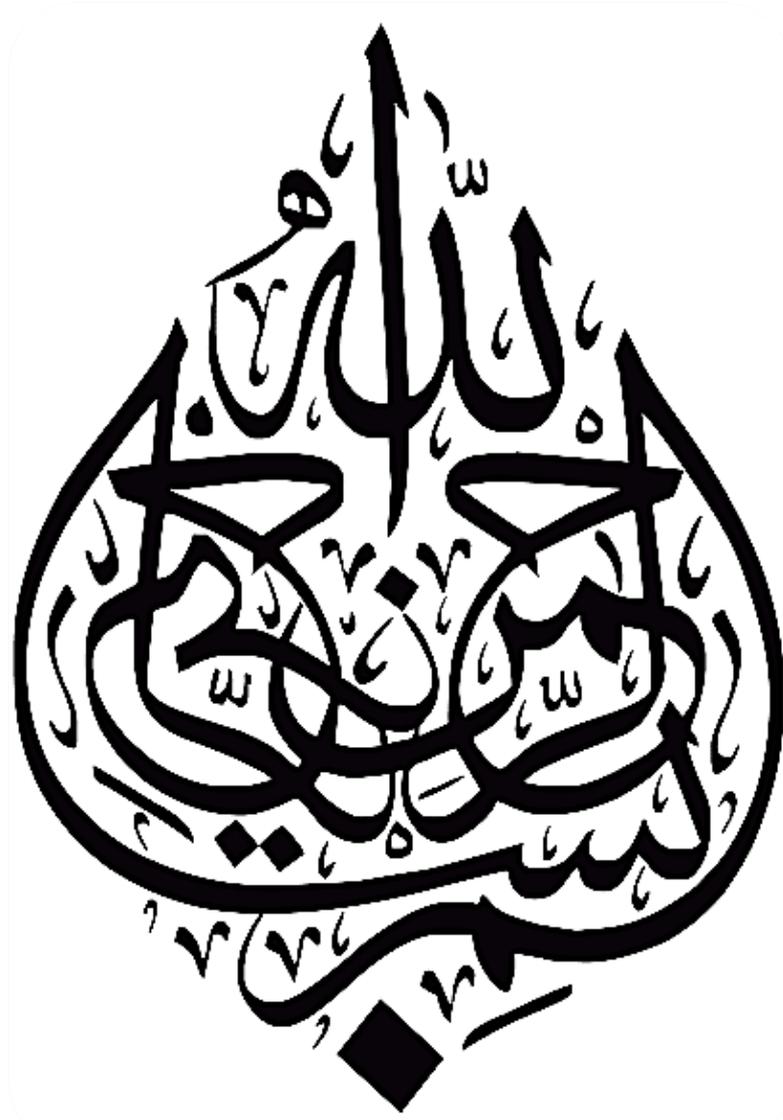
MCA

Université de BBA

Université de BBA

Université de BBA

Année Universitaire 2021-2022



Remerciement

*J'exprime en premier lieu toute ma reconnaissance à mon encadrant Monsieur **DAOUDI Salim** pour m'avoir accueilli tout au long de ce travail.*

Je le remercie très sincèrement pour avoir dirigé et m'aidée à progresser grâce à ses conseils et son sérieux ainsi que son encouragement qui m'ont été d'une grande aide dans l'élaboration de cette recherche.

*J'adresse mes sincères remerciements au Professeur **KAHOUL Abelhalim**, qui me fait l'honneur d'accepter de présider le jury de ce mémoire et de m'avoir encouragé dès le début.*

*Je remercie vivement Monsieur **SAHNOUNE Yacine**, d'avoir accepté de représenter le jury de ce mémoire.*

Je tiens à remercier tous les enseignants qui nous ont aidés à accumuler les connaissances nécessaires au cours du cursus universitaire.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à toute ma famille.

Je remercie tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à l'aboutissement de ce travail.

RAHMOUNE Amel

Dédicace

Je dédie ce travail :

*À ma très chère maman pour son soutien
inconditionnel et pour m'avoir toujours encouragé à
avancer et m'avoir permis de réaliser mes études
dans les meilleures conditions.*

*À l'âme de mon père précieuse que dieux ait
Mercie en lui.*

*À mon frère Yacine, ma sœur Fairouze et son
petit ange Amir.*

*Je n'oublie pas à penser de tous ceux qui me sont
cher.*

AMEL

Sommaire

Sommaire

Liste des figures et des Tableaux

Introduction générale :..... 2

Chapitre I: Gisement solaire

I.1 Introduction..... 5

I.2 Généralité sur le Soleil..... 6

I.2.1 Définition du Soleil.....6

I.2.2 Caractéristiques du Soleil7

I.2.3 Composition interne du solaire.....8

I.2.4 Les couches du Soleil sous la surface visible10

I.2.5 Le Soleil comme réacteur nucléaire naturel10

I.3 Le rayonnement solaire hors atmosphère 12

I.3.1 Définition d'un corps noir :.....12

I.3.2 Rayonnement solaire dans l'espace.....13

I.3.3 La constante solaire13

I.4 L'atmosphère..... 14

I.4.2 La structure de l'atmosphère14

I.4.3 La composition chimique de l'atmosphère.....16

I.4.4 Les composantes du rayonnement solaire16

I.4.5 La masse d'air18

I.5 Mouvement apparent du Soleil.....19

I.5.2 Coordonnées du Soleil20

I.6 Mouvement de la Terre 23

I.6.1 Les coordonnées terrestres.....24

I.6.2 Heur et temps25

I.6.3 Relation entre temps légale et temps solaire27

I.7 Durée et taux d'ensoleillement..... 28

I.8 Conclusion..... 30

BIBLIOGRAPHIE Chapitre I 31

Chapitre II: L'énergie solaire

II.1 Introduction 34

II.2 Historique 36

II.3 Rayonnement solaire porteur d'énergie	36
II.4 L'effet photovoltaïque	37
II.6 Le dopage :.....	41
II.6.1 Principe de dopage	41
II.6.2 Méthodes de dopage	41
II.6.3 Les type de dopage	42
II.6.4 La jonction P-N	43
II.7 Les différents types des cellules photovoltaïques	43
II.8 Les avantages et les inconvénients des panneaux solaires photovoltaïques	46
II.9 Conclusion	47
BIBLIOGRAPHIEChapitre II.....	48
Chapitre III: Effet de température sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque (V_{co})	
III.1 Introduction.....	50
III.2 Méthodes d'extraction des paramètres d'une cellule solaire.....	50
III.2.1 Les méthodes théoriques	50
III.2.2 Les méthodes expérimentales	51
III.2.3 Les méthodes empiriques	52
III.4 Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire	54
III.4.1 Courant de court-circuit I _{cc}	54
III.4.2 La tension en circuit ouvert V _{co}	54
III.4.3 La puissance maximale	54
III.4.4 Le facteur de forme FF	54
III.4.5 Le rendement de conversion d'énergie η	54
III.5 Association des cellules.....	55
III.5.1 Association en série	55
III.5.2 Association en parallèle	55
III.5.3 Association mixte	56
III.6 Modélisation de la cellule photovoltaïque.....	56
III.6.1 La caractéristique de Module PV	56
III.6.2 Evolution de la caractéristique I-V	57
III.7 Zones de fonctionnement d'une cellule solaire	58
III.8 L'effet de température sur de V_{CO} d'une cellule solaire	58
III.9 Caractérisation expérimentale T-V_{CO} d'une cellule de silicium en conditions réel	61
III.9.1 Appareilles et matérielles utilisées	61
III.9.2 Photo de notre expérience	62

<i>III.9.3 Schéma électrique équivalent de l'essai expérimental :</i>	62
<i>III.9.4 Résultats de l'expérimental à $E= Cst$</i>	62
<i>III.10 Conclusion</i>	64
<i>BIBLIOGRAPHIE Chapitre III</i>	65
<i>Conclusion générale</i>	68

Liste des figures et des Tableaux :

Chapitre I

Figure 1	Carte mondiale de l'irradiation solaire globale (annuelle et journalière moyenne).	5
Figure 2	Comparaison entre le Soleil et la Terre.	7
Figure 3	Notre galaxie (la Voie lactée) et le bras d'Orion.	7
Figure 4	Parties du Soleil.	10
Figure 5	La 1 ère étape de la fusion nucléaire solaire.	11
Figure 6	La 2ème étape de la fusion nucléaire solaire.	11
Figure 7	La 3ème étape de la fusion nucléaire solaire.	11
Figure 8	Intensité du rayonnement du corps noir dû au changement de température.	13
Figure 9	Les valeurs de la constante solaire au cours de l'année	14
Figure 10	La structure de l'atmosphère Terrestre.	15
Figure 11	Structure thermique et chimique verticale de l'atmosphère Terrestre	16
Figure 12	Les composantes du rayonnement solaire globale ; l'albédo, direct et diffus.	17
Figure 13	Les masses d'air au zénith AM0, AM1 .et AM1.5 et AM2	19
Figure 14	Trajectoire apparente du Soleil	20
Figure 15a	Déclinaison du Soleil en fonction du numéro du jour de l'année J.	21
Figure 15b	Déclinaison du Soleil dans un an.	21
Figure 16	Coordonnées équatoriales	22
Figure 17	Coordonnées horizontales	23
Figure 18	Mouvement de la Terre autour du Soleil et sa rotation sur elle-même dans une année.	24
Figure 19	Coordonnées géographiques.	25
Figure 20	Evolution annuelle de l'équation du temps.	26
Figure 21	Heures d'ensoleillement par jour.	29
Figure 22	Durée moyenne du jour en Algérie.	29
Figure 23	Taux d'ensoleillement en Algérie.	29

Chapitre II

Figure 1	Énergie solaire photovoltaïque.	34
Figure 2	L'énergie solaire thermique pour produire de la chaleur.	35
Figure 3	L'énergie solaire thermodynamique.	35
Figure 4	Le spectre solaire et l'énergie émise.	37
Figure 5	L'effet photovoltaïque.	39
Figure 6	Raffinage du silicium	39
Figure 7	Four à arc.	41
Figure 8	Étapes dans la fabrication d'un système photovoltaïque.	42
Figure 9	Dopage de type N.	43
Figure 10	Dopage de type P.	43
Figure 11	La jonction P-N	44
Figure 12	Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin.	44
Figure 13	Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin.	45
Figure 14	Cellule silicium amorphe.	45
Figure 15	Cellule photovoltaïque en couche mince à base de cuivre.	46
Figure 16	Cellule multijonction.	

Chapitre III

Figure 1	Exemple de mise en œuvre d'un convertisseur MPPT-temp V_{oc} DC-DC	52
Figure 2	Schéma électrique d'une cellule solaire.	53
Figure 3	Circuit électrique d'une cellule solaire idéal.	53
Figure 4	Circuit électrique d'une cellule solaire réel.	55
Figure 5	Schéma d'association en série.	55
Figure 6	Courbe I-V des cellules en série	56
Figure 7	Association en parallèle	56
Figure 8	Courbe I-V des cellules en parallèle	56
Figure 9	Association mixte	56
Figure 10	Courbe I-V des cellules en (série/parallèle)	56
Figure 11	La courbe I-V	57
Figure 12	les différentes zones de caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque	58
Figure 13a	Dépendance à la température de la tension en circuit ouvert à l'irradiante de 756 W/m^2 pour une cellule solaire ($50 \times 50 \text{ mm}^2$), photocellule BPYP35, photocellule BPYP30	59
Figure 13b	La dépendance à la température de la tension en circuit ouvert au irradiante 756 W/m^2 pour la cellule solaire Siemens	59
Figure 14a) Dépendance des courbes I – V des cellules solaires monograin CZTSSe obtenues à la température dans une intensité lumineuse de 100 mW/cm^2	61
Figure 14b	Tension de circuit ouvert V_{CO} des cellules monograin CZTSSe en fonction de la température éclairée avec différentes intensités lumineuses	61
Figure 15	Photo de l'essai expérimentale	61
Figure 16	Montage d'expérience pour la caractéristique T- V_{CO} d'une cellule solaire	62
Figure 17	Courbe de variation de V_{CO} en fonction de température	63

Liste des tableaux :

Chapitre I

Tableau 1	Liste des caractéristiques du Soleil.	8
Tableau 2	L'abondance des éléments dans le Soleil.	9
Tableau 3	Les types des rayonnements électromagnétiques hors atmosphérique.	18
Tableau 4	Correction d'altitude pour la masse d'air traversée	19

Chapitre III

Tableau 1	Résultats expérimentaux.	62
Tableau 2	Résultats du calcul empirique	63

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale:

La consommation mondiale d'énergie est inextricablement liée au développement de l'industrie et des systèmes de transport. Actuellement, la plupart de l'énergie électrique utilisée est produite par combustion de ressources non renouvelables dites fossiles (Le pétrole, le gaz naturel et le charbon C), ce qui entraîne de nombreux inconvénients, notamment la pollution, le réchauffement climatique, l'appauvrissement de la couche d'ozone et le risque d'épuisement de ces ressources d'ici quelques décennies.

La solution la plus verte pour l'environnement est de rendre compte l'importance des énergies renouvelables qui sont divers en comptent le vent, la géothermie, les flux marins et océaniques et le solaire photovoltaïque ...etc. Ce dernier est une source très puissante, le Soleil émet un rayonnement électromagnétique dans la gamme de longueurs d'onde de 0,22 à 10 microns (μm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se répartit grosso modo comme suit :

- 9% dans le domaine UV ($<0,4 \mu\text{m}$).
- 47% dans le visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$).
- 44% dans le domaine infrarouge ($>0,8 \mu\text{m}$).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement avec une puissance moyenne de 1,37 kilowatts par mètre carré (kW/m^2), plus ou moins 3 %, selon que la Terre s'éloigne ou se rapproche du Soleil dans son orbite autour de lui. Cependant, une partie de celle-ci est absorbée par l'atmosphère, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface de la Terre dépasse rarement $1,2 \text{ kW/m}^2$ (1200 W/m^2). La rotation et l'inclinaison de la Terre font également varier l'énergie disponible en un point donné en fonction de la latitude, de l'heure et de la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et bien d'autres phénomènes météorologiques provoquent des changements horaires et quotidiens qui tantôt augmentent et tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendre diffus [1].

Cette énergie est captée par des panneaux solaires utilisant la technologie à effet photovoltaïque. Celui-là représente ainsi la seule alternative existante à la production d'électricité à partir de la force mécanique, du fait de transformation d'énergie portée dans les éléments contenus dans la lumière du Soleil sur une cellule dite photovoltaïque, celle-là aussi a ses types de différents matériaux, le matériau le plus connu dans l'industrie de photovoltaïque est le silicium cristallin considéré abondant, facile à posséder et non toxique.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la caractérisation d'une cellule photovoltaïque en circuit ouvert et voir l'effet de la température sur les grandeurs caractéristiques de ce module :

- Dans le premier chapitre de ce travail nous allons voir quelques notions d'astronomie ainsi que le gisement solaire mondial, Ensuite nous allons définir la notion de rayonnement et des coordonnées solaire et terrestre et quelques facteurs qui réduisent l'intensité du rayonnement solaire.
- Dans le deuxième chapitre nous allons parler de l'énergie solaire photovoltaïque, et son importance dans la production d'électricité et nous allons voir une

Introduction générale

description générale de la technologie fabrication et raffinage du silicium et le dopage et les types des cellules PV.

- Dans le troisième chapitre nous allons effectuer la caractéristique T- V_{CO} d'un générateur photovoltaïque en circuit ouvert et l'influence de la température sur la performance de cellule PV en réalisant une expérience correspondant à cette caractéristique.

Finalement, nous terminerons ce travail par une conclusion générale



Chapitre I
GISEMENT SOLAIRE

I.1 Introduction

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire au cours d'une période donnée, son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale.

Le Soleil émet un rayonnement équivalent à la consommation annuelle mondiale d'énergie soit environ 100.000 TW ou 8.7 milliards de tonnes, à la Terre et à son atmosphère en un peu plus d'une demi-heure. À partir de 70 km d'altitude, le rayonnement solaire subit au cours de son trajet vers la surface terrestre des phénomènes des diffusions et d'absorption dus aux gaz aérosols et aux nuages présents dans l'atmosphère¹, De ce fait, c'est en moyenne moins de la moitié du rayonnement solaire qui parvient jusqu'à la surface du globe [1].

La figure (I.1) ci-dessous représente la quantité d'ensoleillement mondiale annuel et journalier. Nous voyons que la partie médiane de la carte mondiale a la plus grande quantité de rayonnement, qui atteint environ 2300 à 2700 kWh/m² plus ou moins par an, or de 6.5 à 7.5 kWh/m² par jour, tandis que les parties inférieure et supérieure de la même carte ont à la moyenne de 1500 à 2100 kWh/m² par an et moins de rayonnement estimé de 700 à 1400 kWh/m² par an. On remarque que, le gisement solaire moyen de l'Algérie est d'environ 2100 kWh/m² par an.

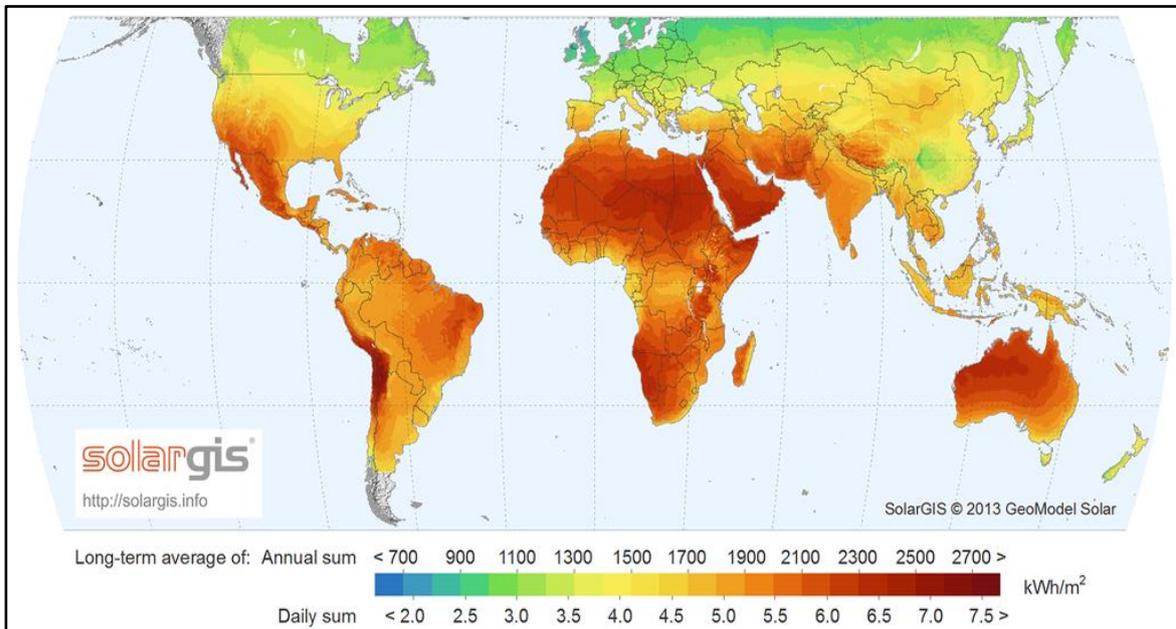


Figure (I.1) : Carte mondiale de l'irradiation solaire globale (annuelle et journalière moyenne).

1 La limite entre l'atmosphère terrestre et l'espace a été définie "arbitrairement" par la FÉDÉRATION AÉRONAUTIQUE INTERNATIONALE (FAI).

I.2 Généralité sur le Soleil

La « météo spatiale » peut sembler contradictoire. Pourtant, c'est elle qui fait référence aux conditions changeantes dans l'espace, est un domaine de recherche actif et peut avoir des effets profonds sur Terre. Nous connaissons tous les hauts et les bas de la météo sur Terre et la puissance des tempêtes qui peuvent être dévastatrices pour les personnes et les plantes, c'est bien que nous soyons séparés du Soleil par une grande distance ainsi que par le vide de l'espace en effet, les grandes explosions sur le Soleil peuvent provoquer des changements dans l'atmosphère et le champ magnétique de la Terre, parfois même causant de graves problèmes sur le terrain [2].

En étudiant le Soleil, nous apprenons également beaucoup de choses qui nous aident à comprendre les étoiles en général. Le Soleil est en termes astronomiques, une étoile plutôt ordinaire pas exceptionnellement chaude ou froide, vieille ou jeune, grande ou petite. En effet, nous avons de la chance que le Soleil soit typique, tout comme les études de la Terre nous aident à comprendre les observations des planètes les plus éloignées, le Soleil sert également de guide aux astronomes pour interpréter les messages contenus dans la lumière que nous recevons des étoiles lointaines. Le Soleil est dynamique, en constante évolution, équilibrant les forces de la nature pour se maintenir en équilibre [2].

I.2.1 Définition du Soleil

Le Soleil, comme toutes les étoiles, est une énorme boule de gaz extrêmement chaud, largement ionisé, brillant par sa propre puissance. Son diamètre est tellement grand, 109 fois plus grand que celui de la Terre et a assez suffisamment de volume pour contenir 1,3 million de volumes Terrestres².

Le Soleil évidemment n'a pas de surface solide ou de continents comme la Terre, ni de noyau solide. Pourtant, il a beaucoup de structure et peut être considéré comme une série de couches comme un oignon, en effet, il ya des énormes changements qui se produisent dans l'intérieur et l'atmosphère du Soleil, ainsi que des éruptions dynamiques et violentes qui se produisent quotidiennement dans ses couches externes. Dans la figure (I.2), la Terre est montrée à l'échelle avec une partie du Soleil et une boucle géante de gaz chaud sortant de sa surface.

2 Modifier de "Fraknoi, Andrew, David Morrison, and Sidney C Wolff. *Astronomy*. Houston, Texas: OpenStax, 2016. OpenStax. Web. 13 Oct. 2016."

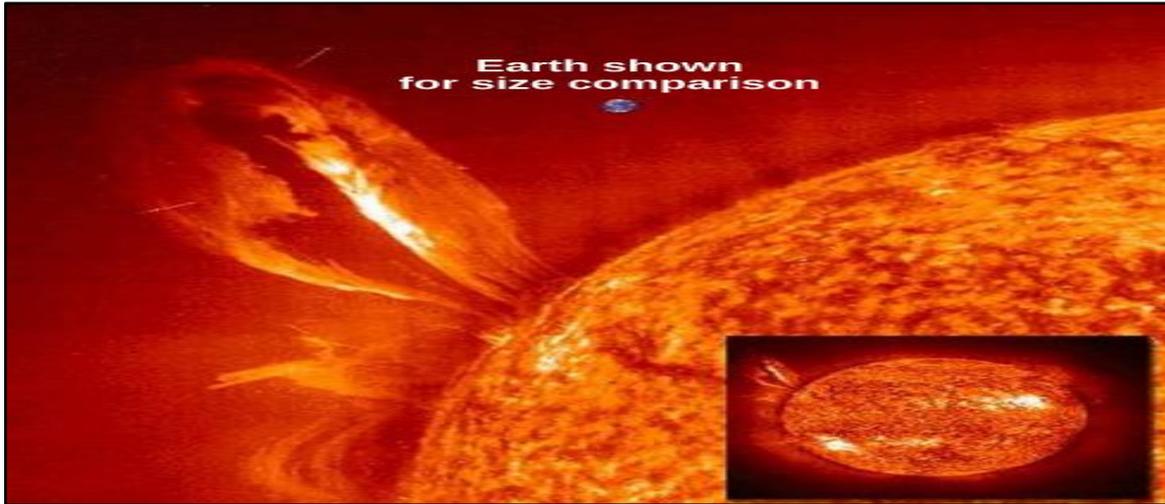


Figure (I.2): Comparaison entre le Soleil et la Terre.

I.2.2 Caractéristiques du Soleil

Le Soleil réside à environ 26 000 années-lumière du centre de la Voie lactée³, dans une vrille de notre galaxie d'origine connue sous le nom de bras d'Orion⁴. Tous les 230 millions d'années, le Soleil et le système solaire qu'il emporte avec lui effectuent une orbite autour du centre de la Voie lactée. Bien que nous ne puissions pas le sentir, le Soleil trace son orbite à une vitesse moyenne de 450 000 milles (ou 724 204,8 km) à l'heure [3].

La figure (I.3) ci-dessous représente respectivement La Voie lactée et le bras d'Orion.

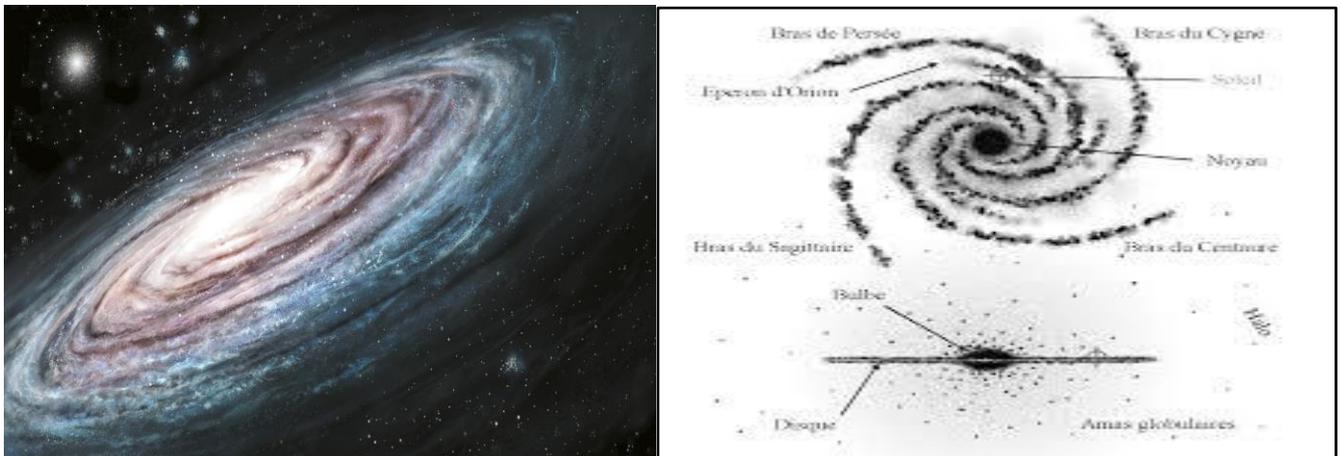


Figure (I.3): Notre galaxie (la Voie lactée) et le Bras d'Orion.

3 «La Voie lactée est le nom de notre galaxie. Foyer du Système solaire, elle est de type spiral, s'étend sur environ 100.000 années-lumière et contient 100 à 400 milliards d'étoiles. À cela il faut ajouter au moins autant de planètes Via <https://www.futura-sciences.com/sciences>».

4 Est un bras spiral mineur de notre galaxie « la Voie lactée». C'est dans ce bras que se situe notre Système solaire via https://youtu.be/F2zOHTOQg_U

Le Soleil se situe à 5 600 000 000 UA du centre de la Voie lactée dans le Bra d'Orion. Certaines des caractéristiques de base du Soleil sont répertoriées dans le **tableau (I.1)**.

Caractéristique	Valeur
Distance moyenne entre le Soleil et la Terre	1 UA ⁵ l'équivalent de 149,597,892 km
Masse	333 400 masses Terrestres ($1,99 \times 10^{30}$ kg)
Diamètre angulaire moyen	31'59'' ³
Diamètre de la photosphère	109,3 × diamètre de la Terre ($1,39 \times 10^6$ km)
Densité moyenne	1.41 g/cm ³ (1400 kg/m ³)
Constante solaire	1370 W/m ²
Luminosité (la puissance solaire)	3.8×10^{26} W
Température effective	5800 K
Période de rotation à l'équateur	le Soleil tourne en 25 jours à l'équateur et 30 jours aux pôles ⁶

Tableau (I.1) : Liste des caractéristiques du Soleil ⁷[2].

I.2.3 Composition interne du solaire

De quoi est composée le Soleil ? En mécanique quantique nous pouvons utiliser le spectre de raies d'absorption d'une étoile pour déterminer quels éléments existent dedans. Ils ont trouvé que le Soleil contient les mêmes éléments que la Terre seulement pas dans les mêmes proportions. Environ 73% de la masse du Soleil est constituée d'hydrogène et 25% d'hélium. Tous les autres éléments chimiques (comme le carbone, l'oxygène et l'azote) ne représentent que 2 % de notre étoile. Les 10 gaz les plus abondants dans la couche de surface visible du Soleil sont répertoriés dans le tableau (I.2) [2].

5 UA Unités Astronomique.

6 ASTRONOMIE SUR LES MONTS. (2021, October 20). Quelle est la période de rotation du soleil .Club ASTRONOMIE SUR LES MONTS. <https://www.echosciences-savoie-mont-blanc.fr/membres/club-d-astronomie-paul-gidon>.

7 De "<https://openstax.org/books/astronomy/pages/1-introduction>".

Éléments	Pourcentage par nombre d'atomes	Pourcentage en masse
Hydrogène	92.0	73.4
Hélium	7.8	25.0
Carbone	0.02	0.20
Azote	0.008	0.09
Oxygène	0.06	0.80
Néon	0.01	0.16
Magnésium	0.003	0.06
Silicium	0.004	0.09
Soufre	0.002	0.05
Fer	0.003	0.14

Tableau (I.2):L'abondance des éléments dans le Soleil.

Nous remarquons que la composition de la couche externe du Soleil est très différente de la croûte Terrestre. La plupart des éléments que l'on trouve dans le Soleil sont sous forme d'atomes, avec un petit nombre de molécules, toutes sous forme de gaz, le Soleil est très chaud qu'aucune matière ne peut survivre sous forme de liquide ou solide. En effet, le Soleil est si chaud que de nombreux atomes qu'il contient sont ionisés, disons dépouillés d'un ou plusieurs de leurs électrons. Cette élimination des électrons de leurs atomes signifie qu'il y a une grande quantité d'électrons libres et d'ions chargés positivement dans le Soleil, ce qui en fait un environnement électriquement chargé assez différent de l'environnement neutre.

Au XIX^e siècle, les scientifiques ont observé une raie spectrale à 530,3nm dans l'atmosphère extérieure du Soleil, appelée la couronne, cette ligne n'avait jamais été vue auparavant, et on a donc supposé que cette ligne était le résultat d'un nouvel élément trouvé dans la couronne, rapidement nommé coronium⁸.

8 «Hunter, A. Origin of the Coronium Lines . nature, 1942. Print.»

I.2.4 Les couches du Soleil sous la surface visible

L'illustration suivante montre les différentes parties du Soleil, depuis le noyau chaud où l'énergie est générée, jusqu'aux régions où l'énergie est transportée vers l'extérieur, d'abord par rayonnement, puis par convection, puis à travers l'atmosphère solaire. Les parties de son atmosphère sont également appelées photosphère, chromosphère et couronne. Certaines caractéristiques typiques de l'atmosphère sont représentées, telles que les trous coronaux et les proéminences solaires.

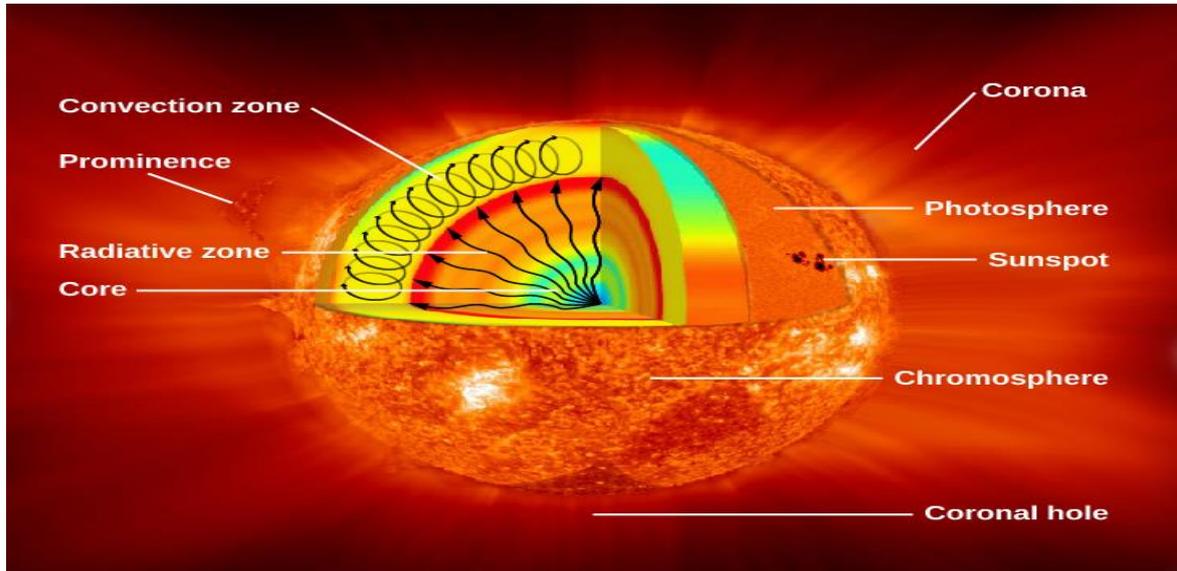


Figure (I.4):Parties du Soleil.

Les couches du Soleil sont différentes les unes des autres et chacune joue un rôle dans la production d'énergie que le Soleil émet finalement. Le noyau du Soleil est extrêmement dense et est la source de toute son énergie. À l'intérieur du noyau, l'énergie nucléaire est libérée du noyau représente environ 20 % de la taille de l'intérieur solaire et on pense qu'il a une température d'environ 15 millions de K [3], ce qui en fait la partie la plus chaude du Soleil.

I.2.5 Le Soleil comme réacteur nucléaire naturel

À cause de la fusion thermonucléaire des atomes d'hydrogène créant de l'hélium, une énorme quantité d'énergie est libérée sous forme de rayonnement électromagnétique et de vent solaire donne la vie telle que nous la connaissons sur Terre.

En 1920 l'astrophysicien britannique Arthur Eddington propose que le Soleil génère de la chaleur et de la lumière en "brûlant" l'hydrogène en hélium, selon Eddington à cause de la gravité, la matière est comprimée que les gaz s'échauffent, ce qui fait du Soleil une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la température du noyau de Soleil atteint 15 millions K, à cette température quatre atomes d'hydrogène fusionnent pour devenir un seul atome d'hélium libérant deux protons au cœur du Soleil, à chaque fois cette réaction se fait environ de 4 millions de tonnes de la masse est convertie en énergie qu'il émet sous forme de rayonnement électromagnétiques. Dans les étoiles comme le Soleil, la combustion nucléaire se produit à travers un processus en trois étapes appelé la chaîne proton-proton ou p-p, les figures suivantes représentent ces 3 étapes [4].

- Dans la première étape, deux protons entrent en collision pour produire du deutérium, un positron et un neutrino.

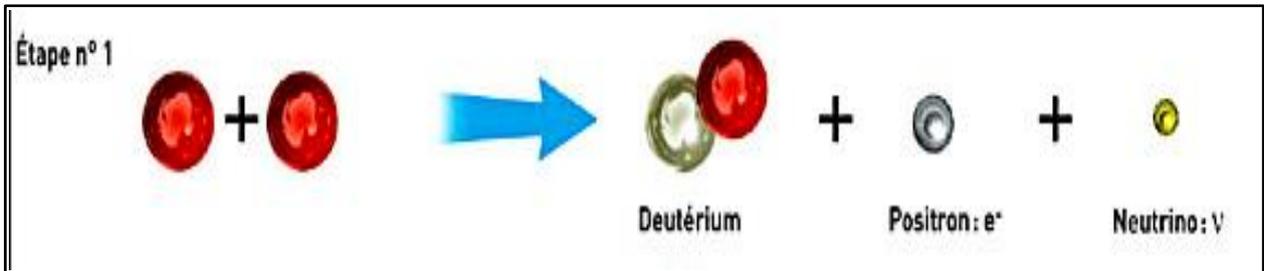


Figure (I.5) : La 1^{ère} étape de la fusion nucléaire solaire.

- Dans la deuxième étape, un proton entre en collision avec le deutérium pour produire un noyau d'hélium-3 et un rayon gamma.

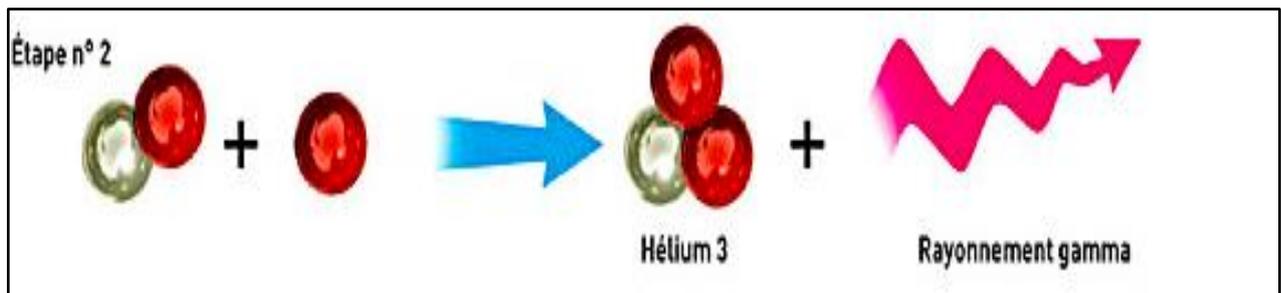
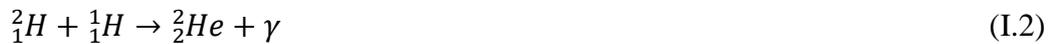


Figure (I.6): La 2^{ème} étape de la fusion nucléaire solaire.

- Dans la troisième étape, deux hélium-3 entrent en collision pour produire un noyau d'hélium-4 normal avec la libération de deux protons et de l'énergie égale à 26,7 MeV.

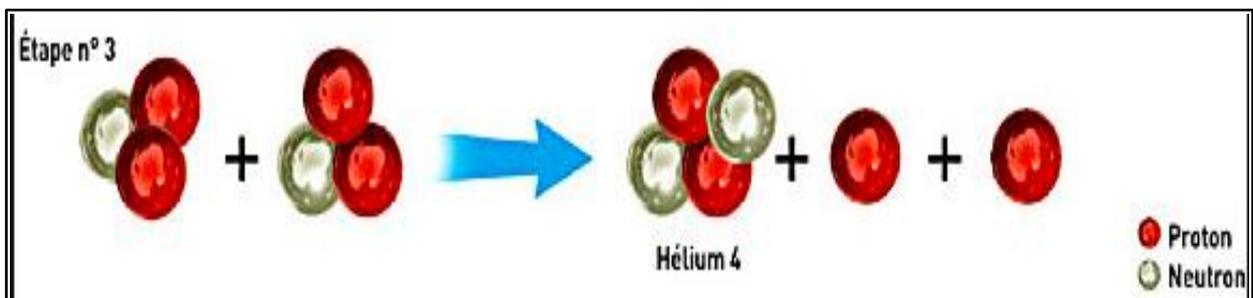


Figure (I.7): La 3^{ème} étape de la fusion nucléaire solaire.

I.3 Le rayonnement solaire hors atmosphère

Le rayonnement solaire hors atmosphère est une énergie lumineuse dite «extraterrestre» vaut 1367 W/m^2 [5], met environ 8 minutes pour parvenir à la Terre. La lumière visible représente 46 % de l'énergie totale émise par le Soleil. 49 % du rayonnement énergétique émis par le Soleil se situe au-delà du rouge visible, dans l'infrarouge. C'est ce rayonnement que nous ressentons comme une onde de chaleur. Le reste

Du rayonnement solaire, l'ultraviolet, représente l'ensemble des radiations de longueur d'onde inférieure à celle de l'extrémité violette du spectre visible. Au moins 35 % du rayonnement solaire intercepté par la Terre et son atmosphère sont réfléchis vers l'espace. Une partie du rayonnement qui atteint la Terre a été diffusée dans toutes les directions au cours de la traversée de l'atmosphère, en rencontrant des molécules d'air, des aérosols et des particules de poussière (c'est ce rayonnement diffus, appartenant notamment à la frange bleue du spectre visible qui est responsable de la couleur bleue du ciel clair). D'autre part, la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone de l'atmosphère absorbent 10 à 15 % du rayonnement solaire. Le reste du rayonnement atteint directement à la surface.

Dans le domaine visible l'intensité lumineuse atteint pour :

- Corps noir parfait au 5900 °K et les rayonnements solaire extraterrestre qui (masse d'air AM_0) environ de $2000 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$.
- Rayonnement solaire Terrestre (masse d'air $AM_{1.5}$) environ de $1000 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$.

I.3.1 Définition d'un corps noir :

Un corps noir en physique est un corps qui absorbe toute énergie qu'il reçoit (la lumière sous forme des ondes électromagnétique). Cette absorption se traduit par une agitation thermique qui provoque l'émission d'un rayonnement thermique, en d'autre terme, il absorbe tous les spectres lumineux qu'il reçoit, quelles que soient ses longueurs d'onde, et les retransmet sous forme d'énergie thermique, dit rayonnement du corps noir. Le spectre de rayonnement émis est déterminé par la température du corps noir. Lorsque la température change, le spectre change, le corps noir ajustera sa température pour que son émission, le spectre contient juste assez d'énergie pour équilibrer l'énergie absorbée. Le corps noir serait en équilibre lorsque la température qui l'en permet est atteinte [6,7].

La figure suivante montre quelques exemples de spectres de corps noir, si nous comparons ces spectres à ceux des étoiles réelles, nous voyons que les spectres réels sont très comme les spectres du corps noir. Nous remarquons que dans n'importe quelle gamme de longueurs d'onde, un corps noir plus chaud dégage plus énergie qu'un corps noir plus froid de même taille. Nous voyons également que lorsque la température augmente, le pic du spectre se déplace vers des longueurs d'onde plus courtes.

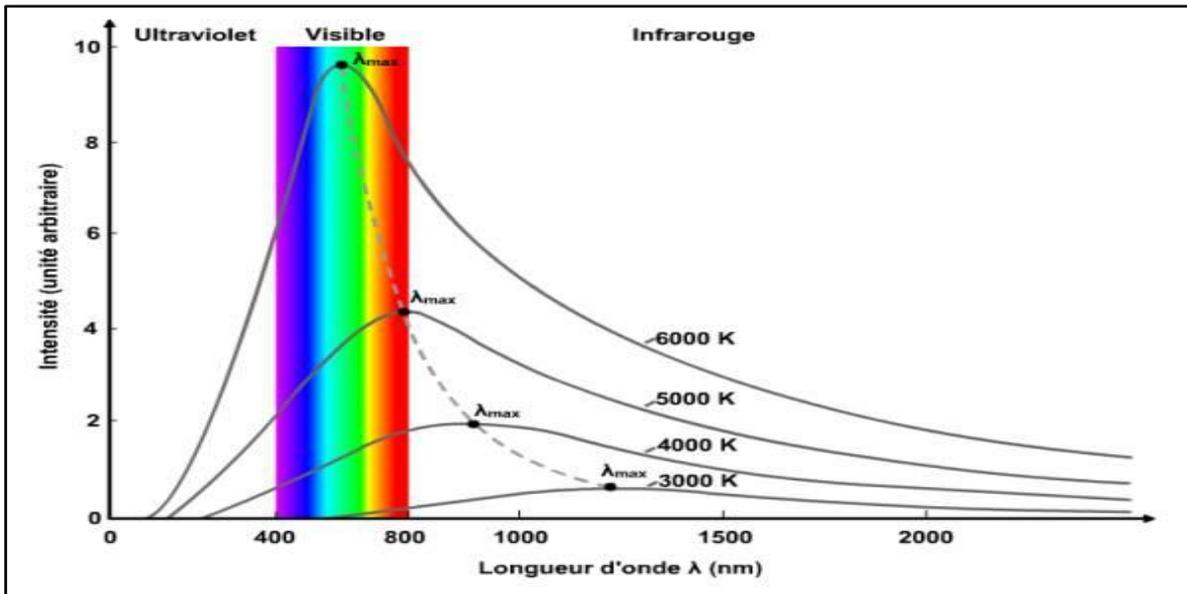


Figure (I.8): Intensité du rayonnement du corps noir dû au changement de température

I.3.2 Rayonnement solaire dans l'espace

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de la lumière visible mais aussi d'autres; d'onde radio, infra rouge, l'ultraviolet, rayons X et les rayons gamma. En fait le Soleil émet des radiations dans toutes les longueurs d'ondes électromagnétiques, tous ces ondes voyagent dans l'espace à la vitesse de lumière (300.000 km/s) [8].

Avec l'invention des satellites, en se facilite la découverte d'un ciel foisonnant de rayonnements électromagnétiques, ils nous font découvrir des sources extrêmement intense de rayons X et de rayons gamma, qui surviennent dans l'univers lors d'événement violents comme par exemple les exposition de supernova⁹, une grande majorité des rayons est arrêté absorbés par les divers composantes de l'atmosphère une partie des infrarouges par la vapeur d'eau, une partie des ultraviolets par la couche d'ozone, les rayons X et les rayons Gamma par l'oxygène, c'est jusqu'aux années 1960 le début de la conquête spatiale¹⁰, qu'on est comprenais que l'atmosphère joue un rôle d'un écran qui participent à notre radioprotection car il est efficace contre les RX et les rayons Gamma [9].

I.3.3 La constante solaire

La constante solaire correspond au flux solaire reçu sur une unité de surface située à 1 UA (unité astronomique) de distance du Soleil et exposée perpendiculairement à ses rayons, sans atmosphère pour les absorber partiellement. Elle s'exprime en W/m^2 et varie au cours de l'année, en fonction de la position de la Terre sur son orbite. En effet, dans le cas de la Terre, l'orbite n'est pas un cercle parfait mais une ellipse variant entre un minimum; nommé périhélie, et un maximum; nommé aphélie, le Soleil occupant le foyer de l'ellipse. Lorsqu'elle est à l'aphélie, la Terre est ainsi éloignée du Soleil d'environ 1,017 UA (soit

9 Une supernova est l'ensemble des phénomènes qui résultent de l'implosion d'une étoile en fin de vie, notamment une gigantesque explosion qui s'accompagne d'une augmentation brève mais fantastiquement grande de sa luminosité.

10 De 1957 à 1969, la conquête spatiale est un enjeu majeur de la guerre froide. Elle est le terrain d'une compétition technologique acharnée entre l'URSS et les États-Unis, où chacun tente de démontrer sa supériorité. Via <https://www.linternaute.com/>.

environ 152 millions de kilomètre), constitue le point où la planète est à la plus grande distance du Soleil), atteignant environ 1320 W/m^2 , et lorsqu'elle est au périhélie, elle en est à 0,983 UA de distance (soit environ 147 millions de kilomètres) elle est la plus forte et tourne autour de 1412 W/m^2 . On observe donc une différence de 5 millions de kilomètres entre ces deux extrêmes, pour une moyenne d'environ 1367 W/m^2 . Cette valeur est à distinguer du rayonnement solaire incident moyen, qui se calcule en prenant en compte la dissipation de cette énergie sur l'ensemble de la surface de la Terre, quatre fois plus importante que la surface du disque équatorial. Ainsi, le rayonnement solaire incident moyen correspond à la constante solaire divisée par quatre, soit environ 340 W/m^2 . Ces données sont prises en compte dans le bilan radiatif terrestre [8].

Périhélie (3 janvier) : 1410 W / m^2

Aphélie (3 juillet): 1320 W / m^2

Moyenne annuelle: 1368 W / m^2

L'orbite Terrestre est une ellipse de faible excentricité (2%).

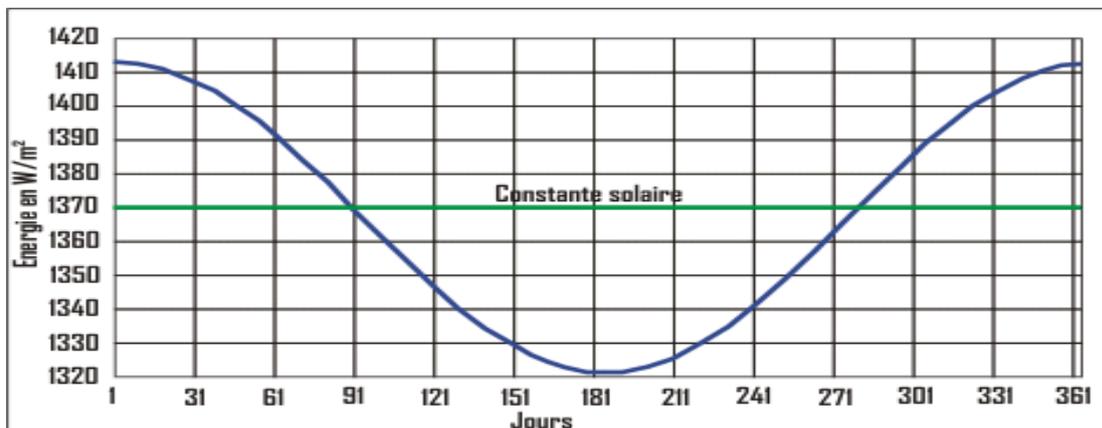


Figure (I.9): Les valeurs de la constante solaire au cours de l'année¹¹

I.4 L'atmosphère

L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse d'un corps céleste (planète, Etoile ou lune naturelle), l'atmosphère de notre planète joue un rôle important principalement dans sa protection et maintenir la vie sur sa surface, car il bloque une grande partie des différents rayons provenant du Soleil et les rayons cosmiques, dont la plupart sont des rayons X et des rayons gamma.

I.4.2 La structure de l'atmosphère

Aujourd'hui, en se fondant sur les variations de température, on divise l'atmosphère en quatre couches distinctes : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère. Au-delà se trouve l'exosphère Figure (I.10, 11), une couche qui assure la transition entre l'atmosphère et l'espace interplanétaire et dans laquelle les particules présentes se trouvent en si faible densité que la notion de température météorologique n'a plus de sens [12].

¹¹ https://apalis.fr/herve.silve/images/energie_solaire.gif.

Troposphère: celle-là est la couche la plus près du sol. Son épaisseur est légèrement supérieure au-dessus de l'équateur, 12 km d'altitude aussi presque 90% d'air se trouve ici en revanche, c'est à ce niveau que les phénomènes météorologiques s'y produisent comme la pluie, la neige, les nuages, les arcs-en-ciel,... etc. La température baisse d'environ 10 °C par kilomètre d'altitude.

Stratosphère: de 12 à 50 km (38 km), Plus on monte dans la stratosphère, plus la température est élevée (de -56 °C à -5 °C), c'est là où se trouve la couche d'ozone qui contient environ de 9% d'air, car il y a moins de friction dans l'air, les jets peuvent y circuler.

Mésosphère: à une altitude de 50 à 80 km (35 km) et en ce niveau-là la température diminue avec l'altitude. Elle peut chuter jusqu'à -90 °C, dans cette couche Le phénomène des étoiles filantes se produit; les météores¹² en provenance de l'espace s'enflamment et se consomment en arrivant dans la mésosphère.

Thermosphère: à une altitude de 80 à 700 km, dont l'air est rare, en plus la température augmente avec l'altitude, passant de -90 °C à plusieurs centaines de degrés Celsius, les satellites y sont placés en orbite et les aurores boréales¹³ (polaires) s'y produisent.

Exosphère: se situe au-delà de 700 km, cette couche est la limite de l'atmosphère Terrestre et c'est là que les navettes spatiales¹⁴ orbitent.

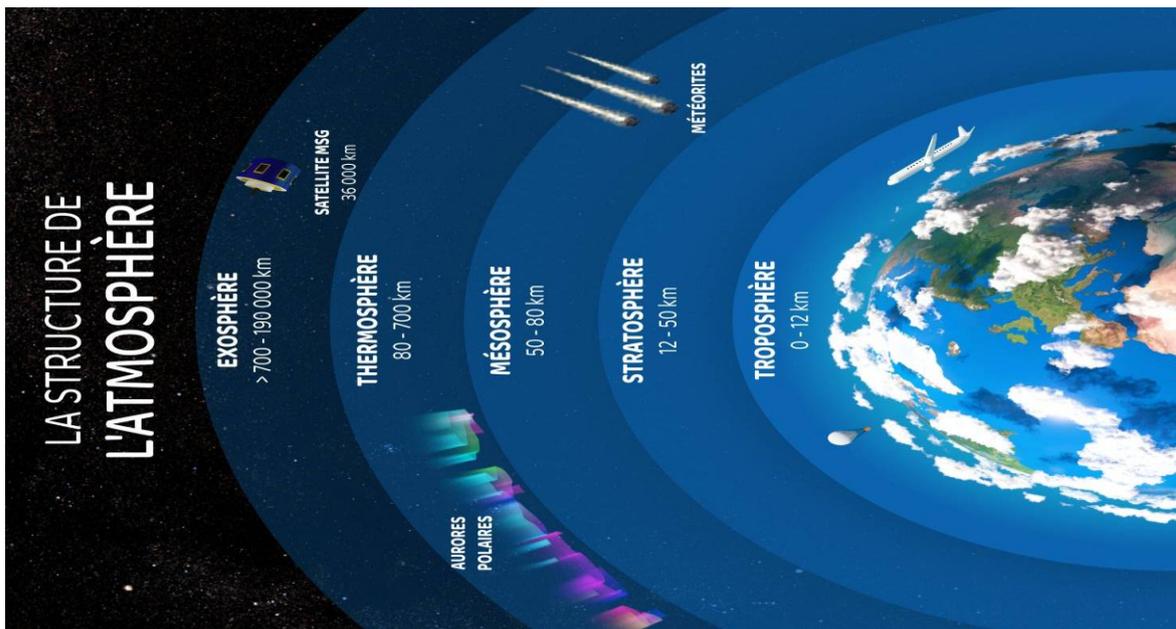


Figure (I.10): La structure de l'atmosphère Terrestre

- 12 Un météore est un objet qui se consume entièrement en entrant en contact avec l'atmosphère de la Terre. En langage courant, on appelle un météore une étoile filante.
- 13 Une aurore polaire est un phénomène lumineux produit lorsque des particules du vent solaire entrent en collision avec les particules de l'atmosphère terrestre, plus précisément celles dans la thermosphère.
- 14 Navette spatiale: Un vaisseau spatial qui peut revenir sur Terre en effectuant un atterrissage contrôlé tel qu'un avion ou un planeur et peut être réutilisé pour une mission ultérieure.

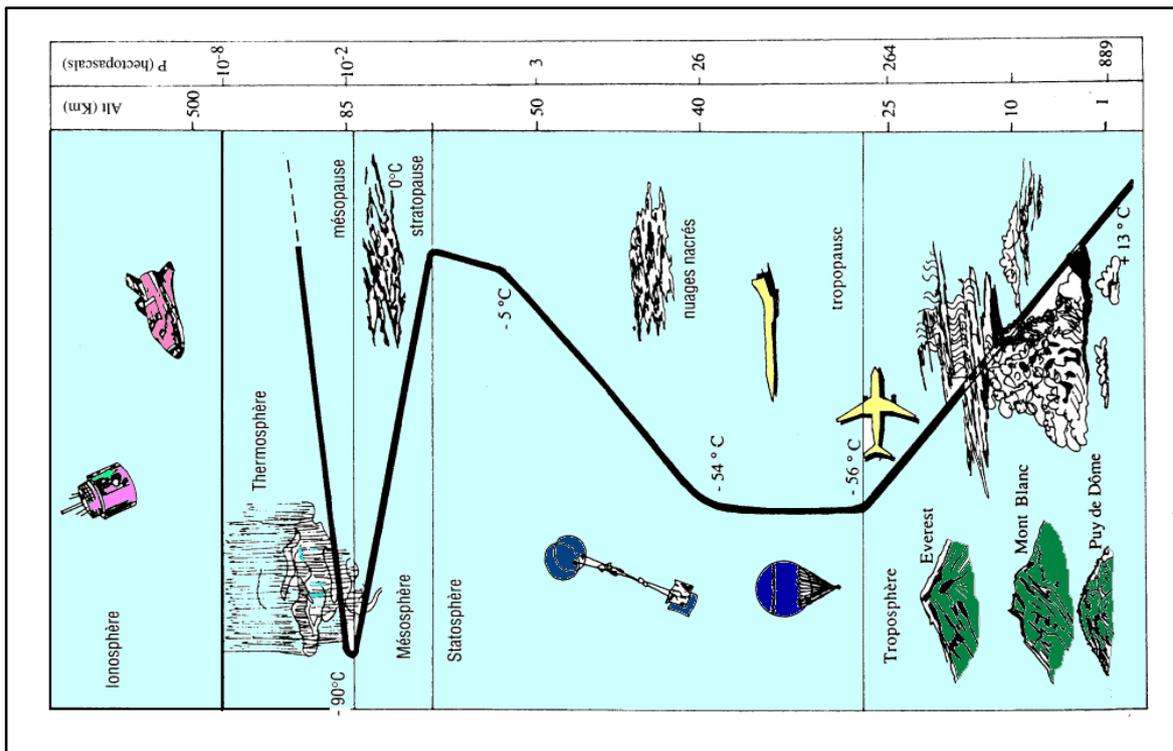


Figure (I.11): Structure thermique et chimique verticale de l'atmosphère Terrestre.

I.4.3 La composition chimique de l'atmosphère

La composition de l'atmosphère est à peu près la même pour les trois premières couches: 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 0.9 % d'argon, 0.03 % de CO₂ et des traces d'autres gaz, avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une mince couche d'ozone dans la stratosphère dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus durs. L'essentiel des modifications subies par le rayonnement solaire se fait dans la troposphère par diffusion, diffraction, absorption, réfraction par des gaz de température et de densité croissante. 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 bar. 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, 30 m 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 [13].

I.4.4 Les composantes du rayonnement solaire

- **L'albédo:** L'albédo est la part des rayonnements solaires qui sont renvoyés vers l'atmosphère. Il permet de calculer grâce à un facteur entre 0 et 100 le rayonnement solaire réfléchi par une surface, 0 correspondant à une surface absorbant tous les rayons, et 100 à une surface renvoyant tous les rayons.
- **Rayonnement solaire direct :** Le rayonnement solaire direct se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire. Il est donc nul lorsque le

Soleil est occulté par les nuages. il est mesuré à l'aide d'un pyrhéliomètre constamment dirigé vers le Soleil [14].

- **Rayonnement solaire diffus :** C'est la composante du rayonnement solaire incidente sur un plan récepteur après avoir été diffusée par les nuages, les poussières, les aérosols et le sol et subissant le phénomène de multi réflexions. Elle parvient ainsi de toute la voute céleste. Il est mesuré à l'aide d'un Pyranomètre [14].
- **Rayonnement global:** Le rayonnement global correspond à la somme des deux composantes du rayonnement solaire défini précédemment à savoir la composante directe et diffuse [14].

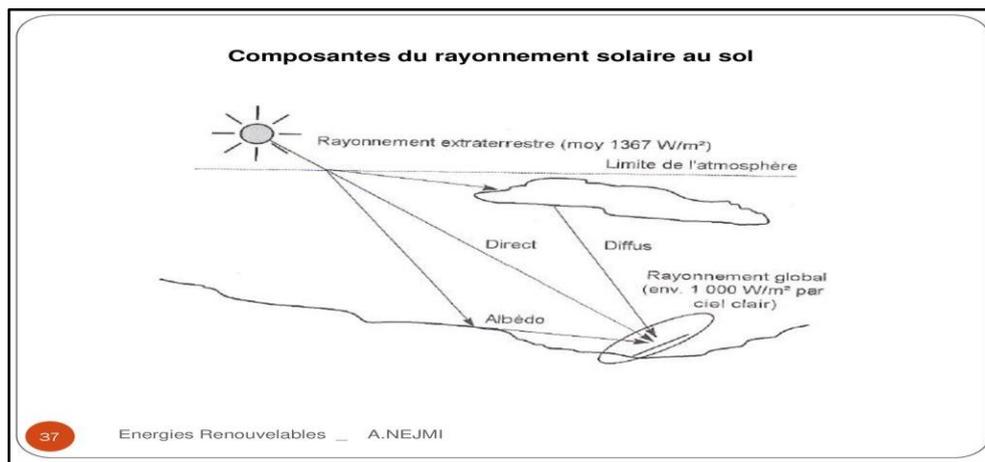


Figure (I.12): Les composantes du rayonnement solaire globale: l'albédo, direct et diffus.

Le tableau suivant présente les types des rayonnements électromagnétiques injecté par le Soleil vers l’atmosphère terrestre et leur définition et utilisation.

Type du rayonnement électromagnétique	Définition	Utilisation
Les ondes radio	Ils ont la petite fréquence du spectre et transportent peu d'énergie.	radio, télévision, cellulaire
Les micro-ondes	Un type des ondes radio, peuvent faire vibrer les particules et en augmenter la température.	transmissions par satellite, téléphone cellulaire et par interne.
Les rayons infrarouges	Ils ont une longueur d'onde plus grande que le rouge visible malgré ils ne sont pas visible mais il est possible de percevoir la chaleur qu'ils transmettent.	télécommande à distance, communication avec les satellites
La lumière visible	Des ondes électromagnétiques visibles, sous forme d'un ensemble des six couleurs rouge, orange, jaune, vert, bleu, violet (la lumière blanche).	éclairage, laser, photographie, écrans d'ordinateurs
Les rayons ultraviolets	Des rayons invisibles, mais certains animaux sont en mesure de les percevoir ils transportent une plus grande quantité d'énergie que la lumière visible.	traitement de certaines maladies, stérilisation d'instruments chirurgicaux
Les rayons X	Ils transportent une grande quantité d'énergie, ils peuvent traverser des objets ou des substances.	radiographie, inspections des bagages.
Les rayons gamma	Ils transportent une très grande quantité d'énergie ils traversent des objets ou des substances très facilement.	traitement du cancer, conservation des aliments.

Tableau (I.3): Les types des rayonnements électromagnétique hors atmosphérique [8].

I.4.5 La masse d’air

Paramètre d’unité, c’est l’épaisseur verticale de l’atmosphère moyenne réduite à 7.8km (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; donnée par la formule :

$$OM = \frac{OA}{\sinh} \tag{I.1}$$

Cette formule n'a pas la même à une pression P différente de 1013mbar (1.013 bar) et à une altitude z (km), on désignera par masse atmosphérique ou nombre d'air masse le nombre m [13]:

$$m = \frac{P_m}{1013} \cdot \frac{1}{\sinh} \cdot \exp\left(-\left(\frac{z}{7.8}\right)\right) \tag{I.2}$$

Où P_m est la pression atmosphérique au niveau de la mer. Et celle-là peut varier autour de sa valeur de référence égale à 1 013 hPa (mbar) entre 950 hPa (dépression) et 1 050 hPa (anticyclone) [13].

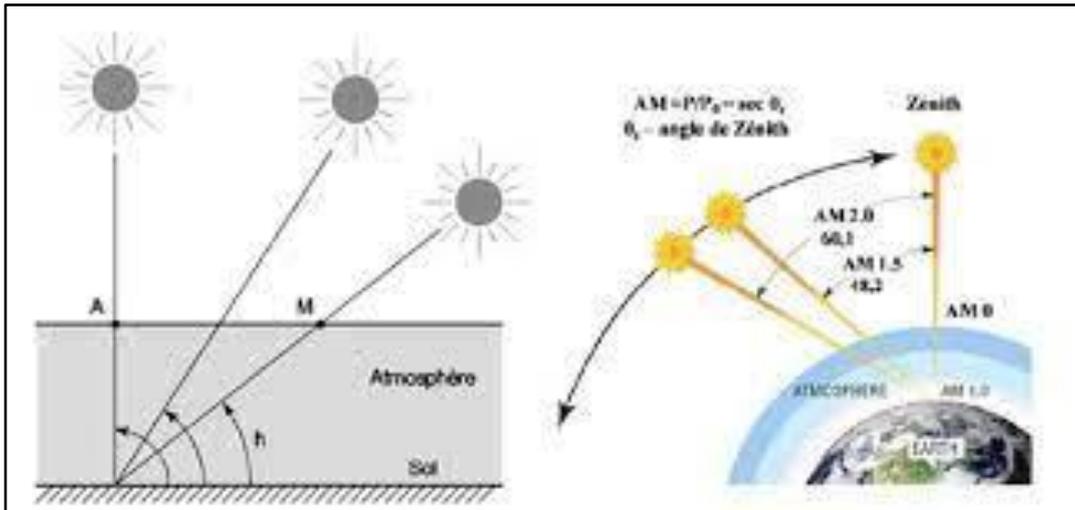


Figure (I.13): les masses d'air au zénith AM₀, AM₁ .et AM_{1.5} et AM₂.

Soleil au zénith, niveau de la mer: θ = 0°; AM 1

Soleil à h=42 ° sur l'horizon: θ=48.5°; AM 1.5

Soleil à h=30 ° sur l'horizon: θ=60°; AM 2

On peut calculer la pression atmosphérique à n'importe quelle altitude et en déduit la masse d'air traversée à partir de la formule (I.2) [13]:

$$m = \frac{P_m}{1013} \cdot \frac{1}{\sinh} \cdot \exp\left(-\left(\frac{z}{7.8}\right)\right) \tag{I.2}$$

altitude	M	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Pression	hPa	1013	950	891	836	784	736	690	648	607	570	535
Masse d'air traversée		1.00	0.94	0.88	0.83	0.77	0.73	0.68	0.64	0.60	0.56	0.53

Tableau (I.4): Correction d'altitude pour la masse d'air traversée [14].

I.5 Mouvement apparent du Soleil

Pour un observateur situé sur la surface de la Terre, le Soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et la longitude du lieu où il se trouve. Rappelons que la latitude est la distance angulaire d'un point quelconque du globe par rapport à l'équateur (de 0 à 90° dans l'hémisphère nord). Quant à la longitude, c'est également un angle, donné par

rapport au méridien de Greenwich (arc de cercle passant par les 2 pôles et la ville de Greenwich en Angleterre) en se déplaçant vers l'Est [5].

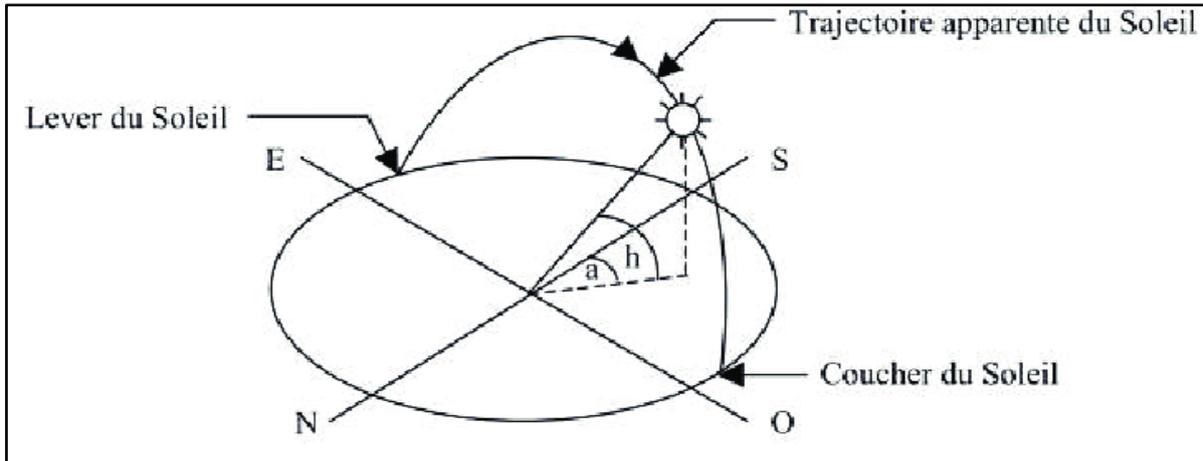


Figure (I.14): Trajectoire apparente du Soleil.

I.5.2 Coordonnées du Soleil

La position du Soleil est déterminée à partir d'un niveau tel que la surface de la Terre par exemple, à chaque instant de la journée et de l'année grâce à deux systèmes différents de mesure de coordonnées :

- Par rapport au plan équatorial du lieu (repère équatorial) .
- Par rapport au plan horizontal de la Terre (repère horizontal).

I.5.2. a. Coordonnées équatoriales

Le mouvement du Soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la Terre à l'aide de deux angles (δ , H).

1) La déclinaison du Soleil δ

C'est l'angle de la direction du Soleil avec le plan équatorial. δ varie entre deux valeurs extrêmes : $-\delta_0 \leq \delta \leq \delta_0$

Avec $\delta_0 = 23^\circ 45'$

La déclinaison δ (N), en fonction du jour de l'année, est représentée par la formule approchée suivante [15]:

$$\delta = \frac{180}{\pi} \arcsin \left(\sin \pi \frac{23.45}{180} \sin \frac{2\pi}{365.25} (J - 81) \right). \quad (I.3)$$

La déclinaison varie sinusoidalement au cours de l'année. Elle est maximum (23.45) le 22 juin, au solstice d'été et minimum (-23.45), le 21 décembre, au solstice d'hiver. Cette angle est nulle le 21 mars et le 23 septembre, aux équinoxes de printemps et d'automne.

La variation de la déclinaison du Soleil au cours de l'année est représentée par la figure (I-15 a) et (I-15 b) :

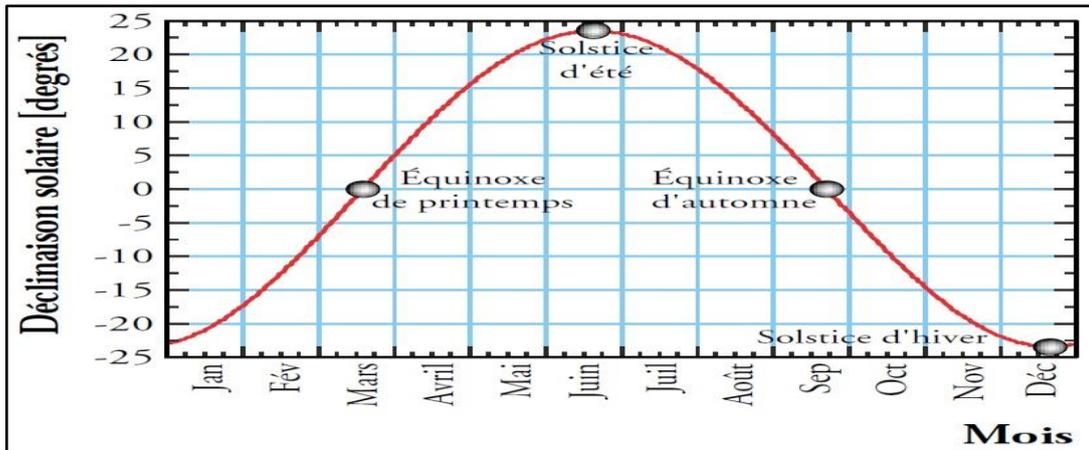


Figure (I.15a) : Déclinaison du Soleil en fonction du numéro du jour de l'année J.

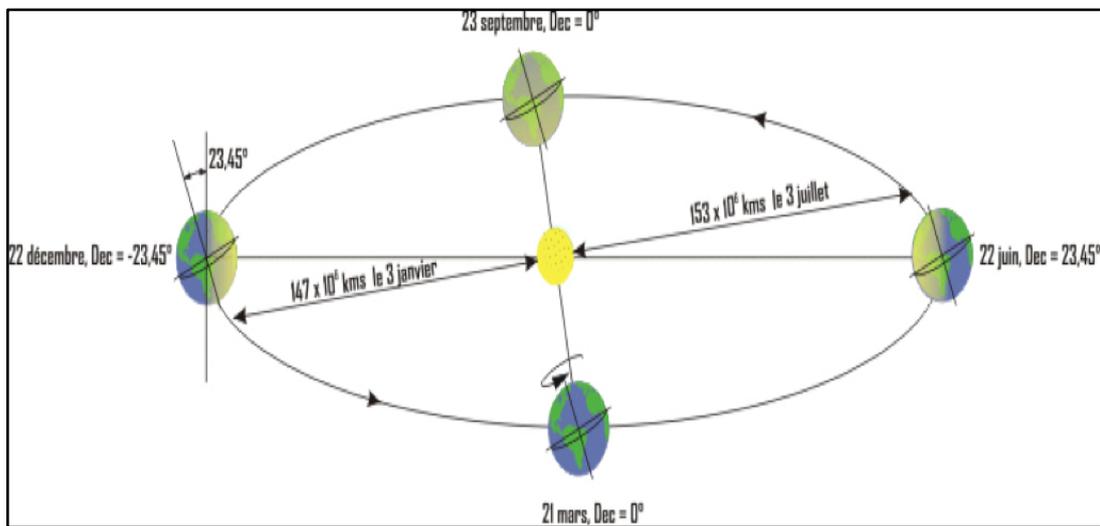


Figure (I.15b): Déclinaison du Soleil dans un an.

2) **L'angle horaire (H):** C'est l'angle compris entre la méridienne origine passant par le sud et la projection du Soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du Soleil dans le ciel [16].

$$H = 15^{\circ}(TSV - 12) \tag{I.4}$$

$$TVS = TL - DE + \left(\frac{E_t + 4\lambda}{60}\right) \tag{I.5}$$

$$E_t = 9.87 \sin(2J') - 7.53 \cos(J') - 1.5 \sin(J') \tag{I.6}$$

$$J' = \frac{2\pi}{365}(J - 81) \tag{I.7}$$

TSV : temps solaire vrai, le temps solaire vrai est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence.

L'angle H vaut 0° à midi, 90° à 18 heures et -90° à 6 heures en heure solaire vrai.

DE: décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich. (Égale 1 pour l'Algérie).

Le terme relatif à l'équation du temps est généralement négligeable.

TL: temps légal. (Donné par une montre).

E_t : correction de l'équation du temps¹⁵.

λ : longitude de lieu.

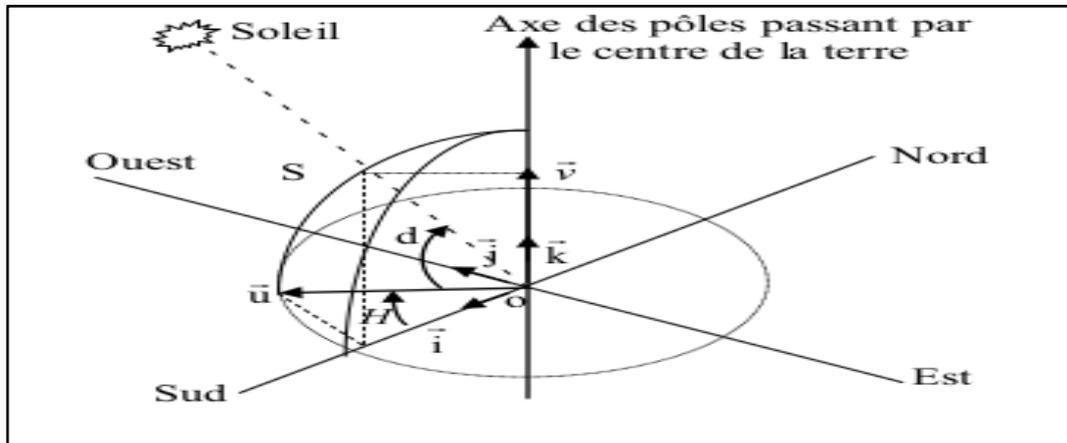


Figure (I.16): Coordonnées équatoriales [16].

I.5.2. b. Coordonnés horizontales

1) La hauteur du Soleil (h): La hauteur du Soleil (h), ou encore l'altitude, est l'angle formé par le plan horizontal du lieu considéré et le vecteur "point local Soleil" .Il est particulièrement égal à:

0° au lever et au coucher astronomiques du Soleil,

90° à midi temps solaire vrai.

Cette hauteur du Soleil intervient fortement sur la valeur de l'éclairement solaire et pour apprécier cette valeur en un point et une heure donnés il est nécessaire de calculer cette hauteur, avec de la formule suivante :

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(H) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \tag{I.8}$$

h: la hauteur du Soleil. δ : déclinaison du Soleil.

H: l'angle horaire. φ : latitude de lieu.

2) L'azimut du Soleil (a): C'est l'angle que fait sur le plan horizontal la projection de la direction du Soleil avec la direction du sud.

L'azimut du Soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cdot \cos h}{\sin h} \tag{I.9}$$

15 L'équation du temps est un paramètre utilisé en astronomie pour rendre compte du mouvement apparent relatif du Soleil par rapport au soleil moyen, lesquels peut différer l'un par rapport à l'autre de plus ou moins un quart d'heure environ.

Avec a : varie entre -180° et $+180^\circ$.

$a > 0$ vers l'ouest

$a < 0$ vers l'est

$a = 0$ direction du sud

La figure ci-dessous représente les coordonnées horizontales du Soleil:

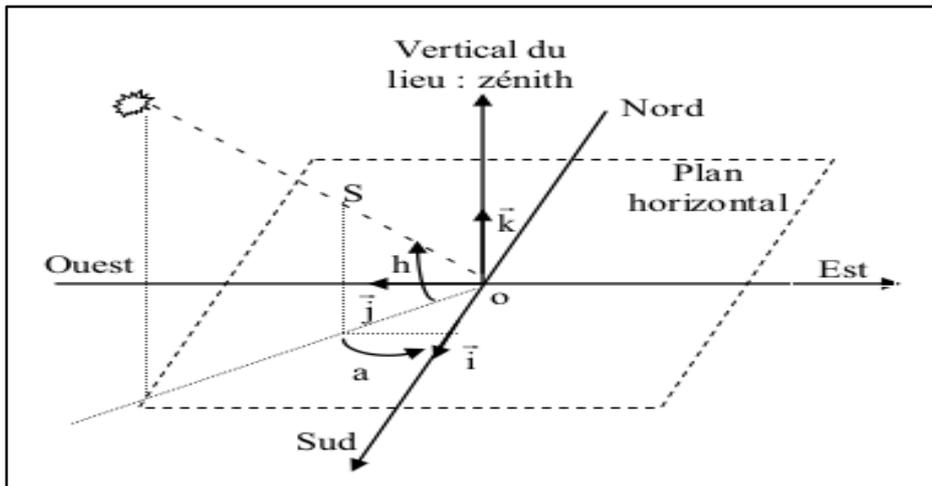


Figure (I.17): Coordonnées horizontales [16].

La hauteur (h) et l'azimut (a). La hauteur varie de 0° (horizon) jusqu'à 90° (zénith) et l'azimut est mesuré sur le plan horizontal à partir du Nord (N). Un objet de hauteur négative n'est pas visible depuis le lieu d'observation.

I.6 Mouvement de la Terre

La Terre a deux mouvements; le premier est sa rotation sur elle-même autour de son axe NORD – SUD est de $23h56'04''$ soit une vitesse de $1674,36$ km/h à l'équateur. En fait la rotation apparente du ciel ne se fait pas exactement en 24 heures mais en 23 h 56 mn 04 secondes. Cette différence fait que chaque jour le ciel se décale d'Est en Ouest de 3 minutes et 56 secondes soit un approchant de 2 heures par mois sur une année. D'où l'apparition de nouvelles constellations à chaque saison. Viennent ensuite des mouvements imposés par l'environnement céleste dans lequel évolue la Terre et qui vont avoir une répercussion évolutive sur la vie que porte la Terre par le biais des changements physiques et positionnels qu'elle va subir.

Et un deuxième qui est la révolution dans telle se déplace sur une orbite elliptique autour du Soleil à une vitesse naviguant entre $29,294$ et $30,285$ kilomètres par seconde. Cette vitesse variant en fonction de la distance de la Terre au Soleil. Lorsqu'elle se rapproche de son étoile elle accélère pour ralentir ensuite lorsqu'elle s'éloigne. Le Soleil occupe un des foyers selon la première loi de Kepler¹⁶.

16 Les planètes décrivent des orbites en forme d'ellipses dont le Soleil occupe un des foyers.

La vitesse de déplacement de la Terre le long de son orbite n'est pas uniforme. C'est l'aire balayée par unité de temps par le segment de droite qui va de la Terre au Soleil qui est constante (vitesse aréolaire, deuxième loi de Kepler¹⁷).

L'axe de rotation de la Terre sur elle-même n'est pas perpendiculaire au plan contenant l'ellipse de révolution (plan de l'écliptique). Le plan dans lequel se trouve l'équateur Terrestre (plan équatorial) fait un angle de $23^{\circ}45'$ avec le plan de l'écliptique.

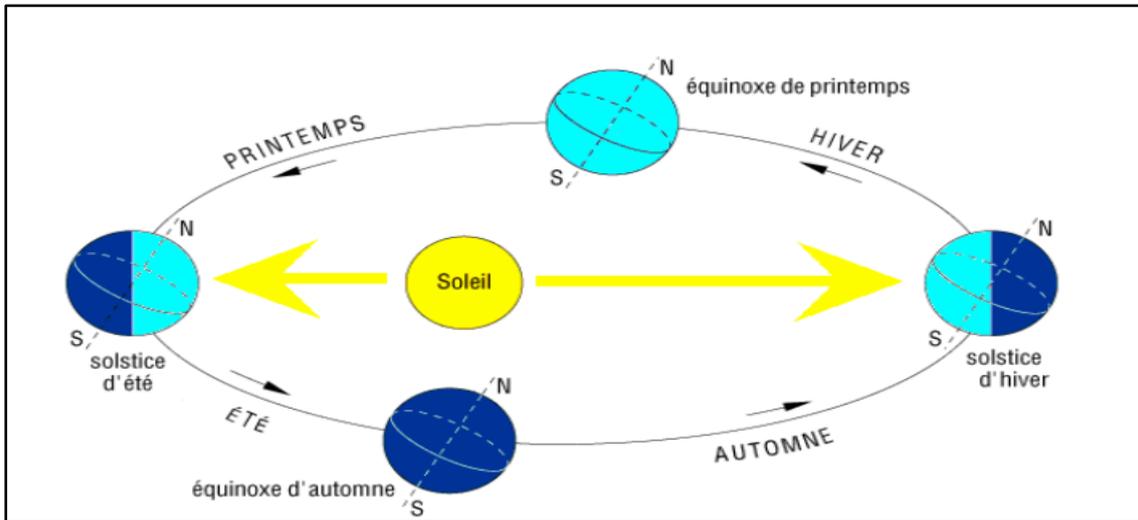


Figure (I.18):Mouvement de la Terre autour du Soleil et sa rotation sur elle-même dans une année.

I.6.1 Les coordonnées terrestres

Les coordonnées terrestres sont données par rapport au pôle terrestre et le plan de l'équateur terrestre, ce système constitue un référentiel terrestre. Les coordonnées polaires terrestres portent les noms de latitude (notée φ) et longitude (notée L) terrestres. L'axe instantané de rotation de la Terre se déplace par rapport aux étoiles, mais il reste quasi fixe par rapport à la croûte terrestre. Par contre la Terre n'étant pas parfaitement sphérique (elle est aplatie aux pôles), on doit distinguer deux types de coordonnées ; des coordonnées géographiques (ou astronomiques) et des coordonnées géocentriques.

En première approximation la Terre est assimilée à un ellipsoïde de révolution. Un méridien terrestre est un arc de longitude constante joignant les deux pôles terrestres, sur cet ellipsoïde on définit une méridienne origine passant par les deux pôles géographiques. Cette méridienne origine porte le nom de méridien international (méridien de Greenwich). Pour un lieu donné, on distingue une seule longitude et deux latitudes :

La latitude géocentrique φ' qui est l'angle entre la direction allant du centre de la Terre au lieu considéré et le plan de l'équateur terrestre.

¹⁷ Le rayon-vecteur reliant une planète au Soleil balaie des aires égales en des temps égaux. Le rayon-vecteur est une droite imaginaire reliant le Soleil, situé à un des foyers de l'ellipse, à la planète située sur l'ellipse.

La latitude géographique ou astronomique φ qui est l'angle entre la normale à l'ellipsoïde de référence et le plan de l'équateur terrestre.

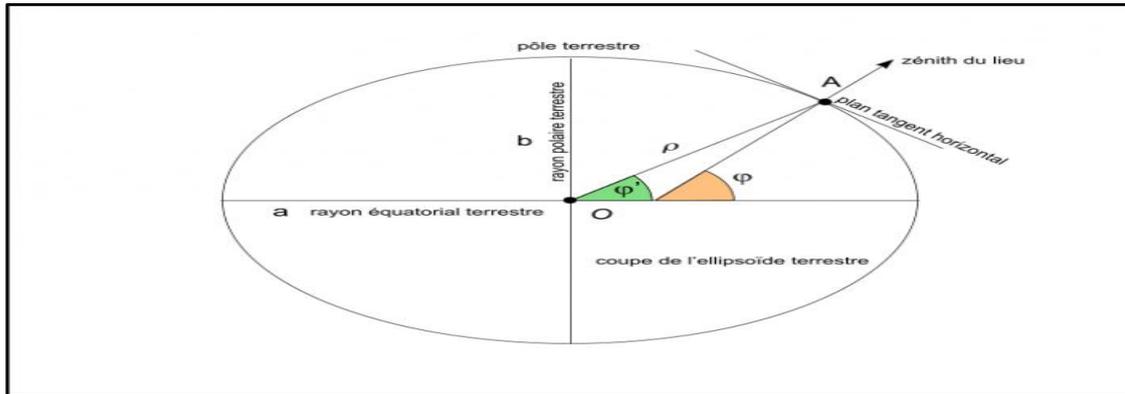


Figure (I.19): coordonnées géographiques.

I.6.2 Heur et temps

1) Fuseau horaire

Un fuseau horaire est une zone de la surface Terrestre où, à l'origine, l'heure adoptée doit être identique en tout lieu. Ce système a été proposé par l'ingénieur et géographe montréalais Sir Sandford Fleming en 1876, avec le méridien de Greenwich comme origine des temps, la ligne de changement de date au méridien 180° (est et ouest), et en divisant le globe en 24 fuseaux horaires de même taille. La zone couverte par un fuseau, limitée par deux méridiens distants de 15°, s'étend du pôle nord au pôle sud; elle est centrée sur un méridien dont la longitude est multiple de 15°. Le premier fuseau est donc centré sur le méridien de Greenwich. Au passage d'un fuseau à l'autre l'heure augmente ou diminue d'une heure [17].

2) Les cinq temps

- **Temps universel:**

C'est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich GMT (Greenwich Mean Time) qui est le méridien central du fuseau horaire. Pour en déduire le temps légal ou local (TL), il convient d'ajouter au temps universel le décalage du fuseau horaire [18].

$$TL = TU + \text{décalage} \tag{I.10}$$

- **Temps Local solaire:**

La différence entre temps solaire local et temps universel est appelée correction de longitude. La correction de longitude est donnée par la formule [18]:

$$TSL = TU + \frac{\lambda}{15} \tag{I.11}$$

- **Equation du temps:**

Jusqu'en 1964, la mesure du temps était basée sur la rotation de la Terre : le jour était défini comme l'intervalle de temps entre deux passages du Soleil par le même méridien. Toutefois, les jours solaires ne sont pas égaux, car l'angle «H» que fait le Soleil avec le méridien du lieu ne correspond pas exactement au temps solaire local bien que la Terre

tourne régulièrement sur elle-même ; en fait, l'expérience montre que les passages du Soleil dans le plan méridien d'un lieu donné ne se succèdent pas avec exactement 24h d'intervalle et le midi vrai peut atteindre une avance de 16min ou un retard de 14min par rapport à 12h. Selon l'époque de l'année. Deux facteurs interviennent dans cette variation :

- De l'excentricité de l'ellipse qui décrit la course de la Terre autour du Soleil, il résulte, d'après la loi de Kepler (loi des aires) que la vitesse orbitale au périhélie (Décembre) est plus grande qu'à l'aphélie (Juin). La Terre a donc une variation saisonnière de sa vitesse orbitale qui affecte l'heure de passage du Soleil au méridien.

- D'autre part, l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique introduit une oscillation supplémentaire de la durée du jour solaire.

Cet écart Δt entre temps solaire local (TSL) et temps solaire vrai (TSV) est désigné sous le terme d'équation du temps .Aussi, le mouvement de la Terre dissipant de l'énergie au détriment de son énergie cinétique, celle-ci ralentit, et des mesures précises ont constaté qu'entre 1900 et 1974, la Terre a accumulé 44 secondes de retard dans sa rotation annuelle, ce qui signifie que la durée du jour moyen augmente de 1,6 s par an (figure 21)[13].

De l'équation (I.7) on développe [19]:

$$E_t = 9,87. \sin\left(720. \left(\frac{J-81}{365}\right)\right) - 7.53. \cos\left(360. \left(\frac{J-81}{365}\right)\right) - 1.5. \sin\left(360. \left(\frac{J-81}{365}\right)\right) \quad (I.12)$$

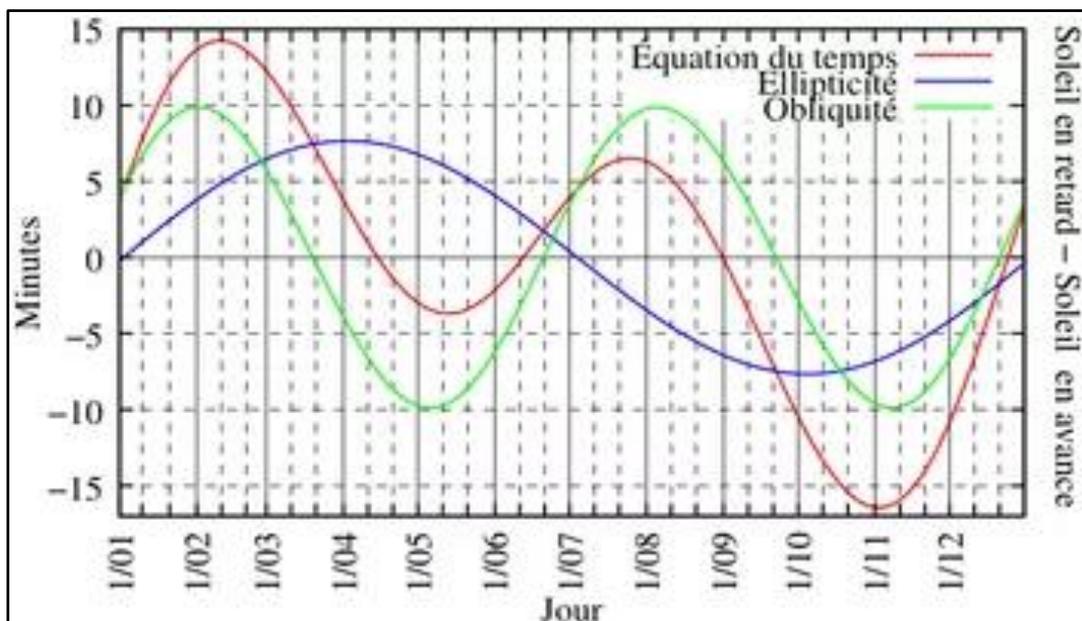


Figure (I.20): Evolution annuelle de l'équation du temps.

- **Temps solaire vrai:** C'est le temps solaire local corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée à l'excentricité de l'orbite de la Terre autour du Soleil [13]:

$$TSV = TSL + \Delta t \quad (I.13)$$

Pour un lieu de longitude λ , il existe une correspondance directe entre angle horaire H, temps solaire vrai TSV, temps solaire local TSL et temps universel TU:

$$\text{De } H = 15^\circ. (TSV - 12) \quad (\text{I.5})$$

$$\text{Et } TSV = TSL + \Delta t \quad (\text{I.13})$$

Δt étant le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'État considéré celui de l'Algérie est 1h.

$$TSL = TU + \frac{\lambda}{15} \quad (\text{I.11})$$

$$H = 15^\circ. \left(\left(TU + \frac{\lambda}{15} + \Delta t \right) - 12 \right) \quad (\text{I.14})$$

- **Heure légale:**

Pour des raisons évidentes de commodité, il est bon que les horloges d'un même pays indiquent la même heure. On définit ainsi le temps des horloges de façon arbitraire pour tout un territoire. Aux USA le territoire s'étend sur 4 fuseaux horaires; il a fallu définir trois temps d'horloge: Eastern time, Central time et Western time [13]. Ce qui fait que le décalage horaire entre Washington et l'Algérie est de +5h, il est de + 7h avec Denver et + 8h avec Los Angeles.

I.6.3 Relation entre temps légale et temps solaire

1) Equation du temps : On appelle jour solaire vrai, l'intervalle de temps qui sépare deux passages consécutifs du Soleil au méridien du lieu. Le jour solaire n'est pas constant et varie au cours de l'année entre 23h59m39s et 24h0m30s. On a défini un « Soleil moyen » qui revient au méridien après 24h0m0s. Ce Soleil moyen se déplace donc de façon uniforme sur l'équateur céleste et parcourt les 360° en 24h. Le « Soleil vrai » correspond au Soleil réel, tel que l'on peut l'observer. L'accumulation d'écarts (d'avances ou de retards) du Soleil vrai par rapport au Soleil moyen porte le nom d'équation du temps. Ces écarts sont liés en partie au fait que la trajectoire de la Terre n'est pas rigoureusement circulaire autour du Soleil.

2) Une référence unique : le méridien de Greenwich

Le temps solaire corrigé de l'équation du temps et de la longitude est appelé le Temps Universel, noté UT

De l'heure en temps universel à l'heure de la montre : La correction due à l'heure d'hiver et d'été consisté à ajouter, à l'heure de Temps Universel, 1h en hiver ou 2h en été.

En résumé, la relation entre le temps solaire et l'heure légale et de la conversions du TSV sur le cadran en temps légal des montres et pour cela on doit :

Ajouter l'équation du temps.

Ajouter la longitude du lieu.

I.7 Durée et taux d'ensoleillement

Bordj Bou Arréridj est l'une des régions les plus froides en Algérie, avec une température journalière maximale moyenne de seulement 23 degrés. Pendant une longue période de l'année, les températures sont constamment supérieures à 25 degrés et peuvent atteindre 37 degrés de chaleur. La meilleure période pour voyager est en raison des températures plus chaudes de juin à septembre. En revanche, les mois froids sont pratiquement sans attrait touristique de novembre à mars.

Le nombre d'heures d'ensoleillement désigne le temps pendant lequel le Soleil est réellement visible. C'est-à-dire sans que la visibilité soit entravée par des nuages, du brouillard ou des montagnes. Avec 12 heures par jour, juillet est le mois le plus ensoleillé en province Bordj Bou Arréridj. C'est en décembre que le Soleil brille le moins longtemps [20].

Pas aussi extrême que dans les pays nordiques, mais tout de même perceptible. Les journées sont plus longues en été qu'en hiver. Les journées les plus longues sont celles de juin, qui durent jusqu'à 14:40 heures. En revanche, les nuits sombres les plus longues se situent en hiver (dans l'hémisphère sud, c'est exactement l'inverse). En décembre, la nuit dure près de 15 heures à Alger et les journées commencent environ 2 heures plus tard.

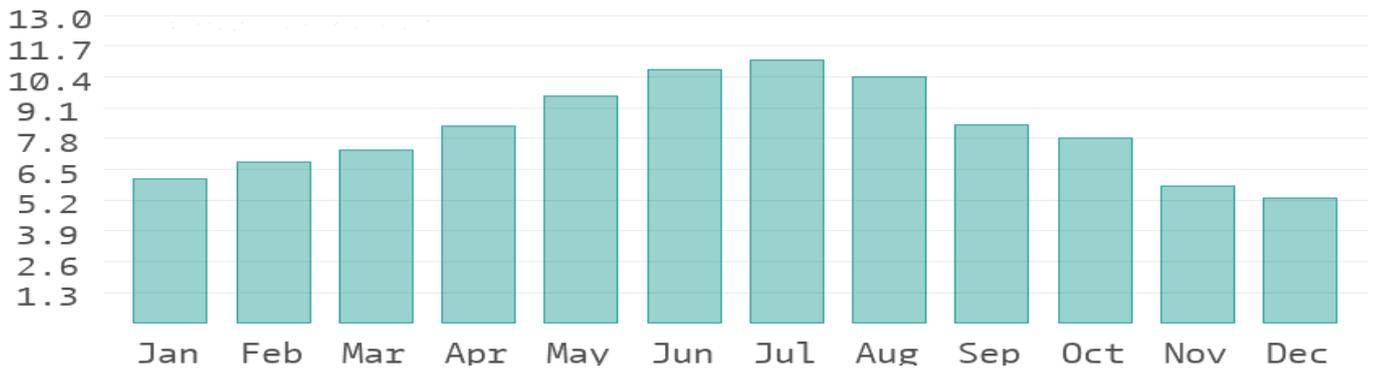


Figure (I.21): Heures d'ensoleillement par jour.

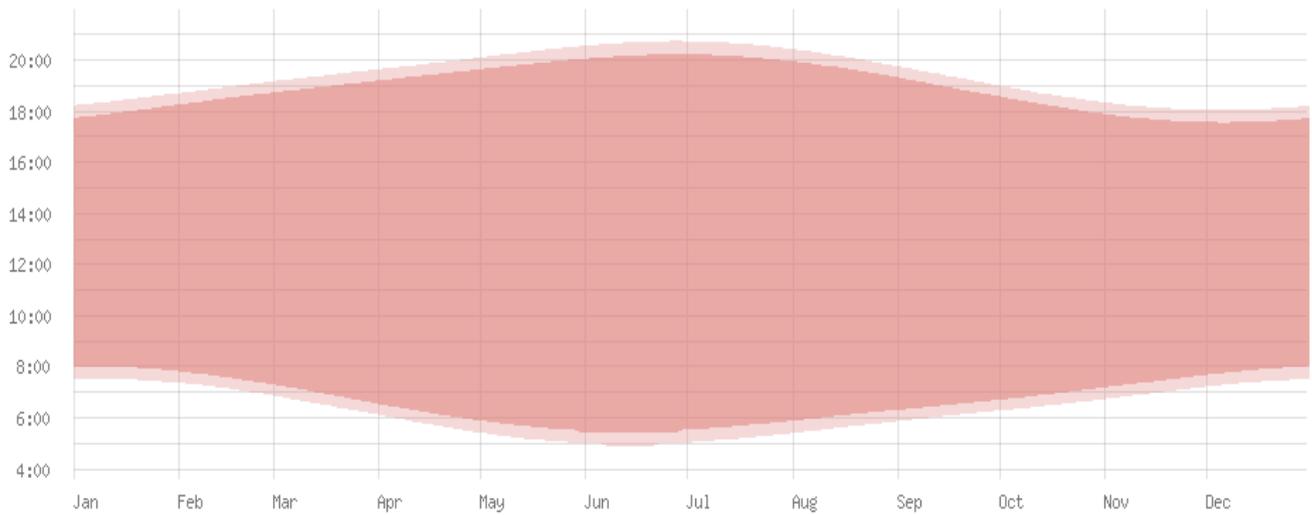


Figure (I.22): Durée moyenne du jour en Algérie.

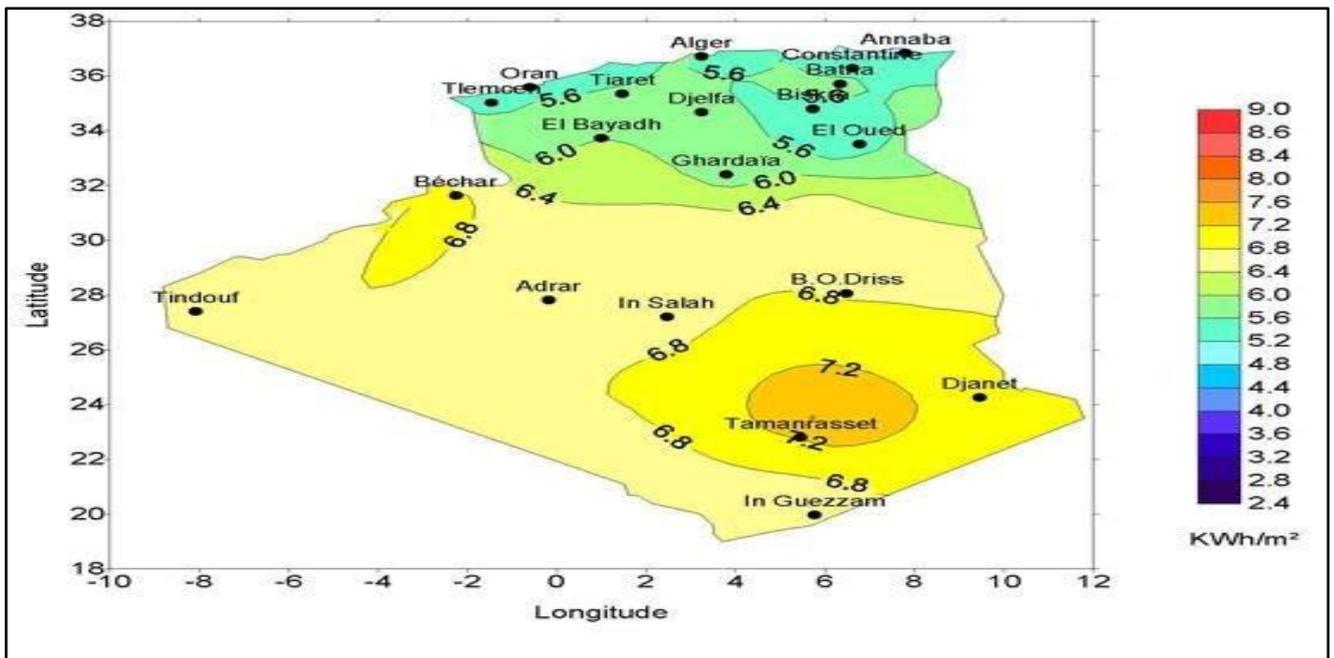


Figure (I.23): Taux d'ensoleillement en Algérie.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité quelques notions sur le soleil et les propriétés de son rayonnement. Aussi nous avons estimé le flux énergétique solaire moyen de l'année qui est disponible en abondance sur toute la surface terrestre à une quantité importante malgré qu'il s'agit d'une atténuation lors qu'elle traverse l'atmosphère, à cause de sa composition et ses propriétés, la terre reste toujours protégée des rayonnements nocifs, cette énergie est de l'ordre de 1367W/m^2 à une distance soleil-terre (AM_0) dans l'espace hors atmosphérique, cette énergie est atténuée par les couches atmosphériques terrestres, de la lumière visible, gaz carbonique et de la couche d'ozone pour atteindre finalement environ 1000W/m^2 sur la surface terrestre.

Nous avons également décrit les trajectoires et les coordonnées solaires et terrestres et leur influence sur les changements du temps dans le monde. Finalement, nous avons vu le climat de la wilaya de Bordj Bou Arréridj et ces différents changements au cours de l'année.

BIBLIOGRAPHIE Chapitre I

- [1]. Anil Kalyanpur, Marc-Etienne Mercadier, Philippe Blanc, «*Gisement solaire en France : caractérisation de la ressource énergétique, profil de répartition et volatilité*» ARTICLE dans une revue dans le domaine des sciences de l'environnement 2013.
- [2]. Fraknoi, Andrew, David Morrison, and Sidney C Wolff. *Astronomy*. Houston, Texas: OpenStax, 2016. OpenStax. Web. 13 Oct. 2016. <https://openstax.org/books/astronomy/pages/1-introduction>
- [3]. GRESHKO M, NATIONAL GEOGRAPHIC STAFF. 2018 Sep. THE SUN EXPLAINED, Learn more about the life-giving star at the center of our solar system. NATIONAL GEOGRAPHIC (September). <https://www.nationalgeographic.com/science/article/news-parker-solar-probe-launch-sun-nasa-space#:~:text=4%3A45-,SUN%20101,-Learn%20about%20the> .
- [4]. Solar Physics. (2022, March 3). NASA (National Aeronautics and Space Administration), <http://solarscience.msfc.nasa.gov/> .
- [5]. LABOURET, A., & Viloz, M. (2005). Energie Solaire Photovoltaïque. DUNOS, Paris. <https://fr.b-ok.africa/book/6162728/d67cdf>
- [6]. Bonnet, G. (2005, March 17). Le corps noir. CULTURES SCIENCES PHYSIQUE. <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/CorpsNoir.xml#>
- [7]. Marc L. Kutner. *Astronomy: A Physical Perspective*, 2nd Ed. New York, USA: Cambridge University Press, 2003.
- [8]. Le Spectre électromagnétique. (n.d.). Retrieved from <http://www.e-scio.net/>
- [9]. Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire – IRSN, Les rayonnements cosmiques, <https://youtu.be/OOZBb6o9NQ0>
- [10]. la constante solaire <https://www.futura-sciences.com/sciences/> .
- [12] Jean-Pierre CHALON, « ATMOSPHERE - La couche atmosphérique terrestre », Encyclopædia Universalis [en ligne], consulté le 20 mai 2022. URL: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/atmosphere-la-couche-atmospherique-terrestre/>.
- [13]. A. Ricaud, *Gisement solaire et transferts énergétiques Energies Renouvelables*, Université de Cergy Pontoise, 2011. https://doi.org/https://www.cythelia.fr/images/file/Gisement-solaire_Alain%20Ricaud_Jan-2011.pdf
- [14]. LAOUAR Mounira & BECHENEB Imane, Estimation du Rayonnement Solaire par Deux Modèles Semi-Empiriques (LACIS & HANSEN, DAVIES & HAY) dans le site de Ghardaïa. Université de Ghardaïa, 2019.
- [15]. Benoit Beckers & Pierre Beckers ,*Comment calculer la déclinaison du soleil*. Septembre 2010. http://www.heliodon.net/downloads/Beckers_2010_Helio_007_fr.pdf .

[16].Bendjellouli Zakaria. Contribution À la modelisation d'une cellule solaire, these de MAGISTER, UNIVERSITE DE BECHAR 2009.

[17]. Horloge mondiale : quelle heure est-il à travers le monde ? 2022. 24TimeZones. <https://24timezones.com/>

[18].Mr. OUDRANE Abdellatif,{Contribution à la Modélisation et au Développement des Systèmes de Chauffage Solaire à Usage Individuel} Thèse Doctorat. Ecole Nationale Polytechnique d'Oran 2018.

[19].A. M'Raoui, S. Mouhous, {Etude statistique du rayonnement solaire à Alger}, Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°4, pp.637 – 648, 2011.

[20] <https://www.donneesmondiales.com/> .



Chapitre II
L'ENERGIE SOLAIRE

II.1 Introduction

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergies considérables renouvelables, vient directement du soleil, elle est inépuisable car elle est permanente et intense. Le soleil est un réacteur nucléaire naturel à cause des réactions thermonucléaires qui se produisent à l'intérieur de son noyau, des millions des rayonnements électromagnétiques sont émet dans l'espace vers tous le system solaire en particulier vers notre planéne. Cette énergie transmise par le rayonnement solaire rend possible la vie sur terre par rapport d'énergie lumineuse (lumière) et d'énergie thermique (chaleur). Permettant la présence d'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux.

Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité. Elle sera captée par des panneaux solaires ou des centrales thermiques. Ces installations captent les rayons produits par le soleil. Elles convertissent ensuite l'énergie du soleil en électricité, plus précisément, le principe est de transformer l'énergie portée par les photons dans la lumière, en électricité.

C'est là que rentre en jeu la cellule photovoltaïque : lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie des photons lumineux, ces derniers génèrent un courant électrique continu qui sera converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur.

On sait qu'il existe trois types d'exploitations de l'énergie solaire:

- **L'énergie solaire photovoltaïque:**

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue par l'énergie des rayonnements du soleil. C'est la raison pour laquelle les panneaux photovoltaïques qui vont les récolter, se trouvent installés sur les toits, avec la meilleure orientation possible, le but est qu'ils soient exposés un maximum aux rayonnements du soleil, pour récolter les photons du soleil, et en faire ensuite de l'électricité.

La composition des panneaux solaires est conçue de telle sorte que la superposition des couches, chargées négativement ou positivement, produit une tension électrique quand un photon les traverse. Un fil raccordé à une borne positive et un autre à la borne négative, un peu à l'image d'une pile, permet de mettre à profit l'énergie ainsi produite (fig II.1).

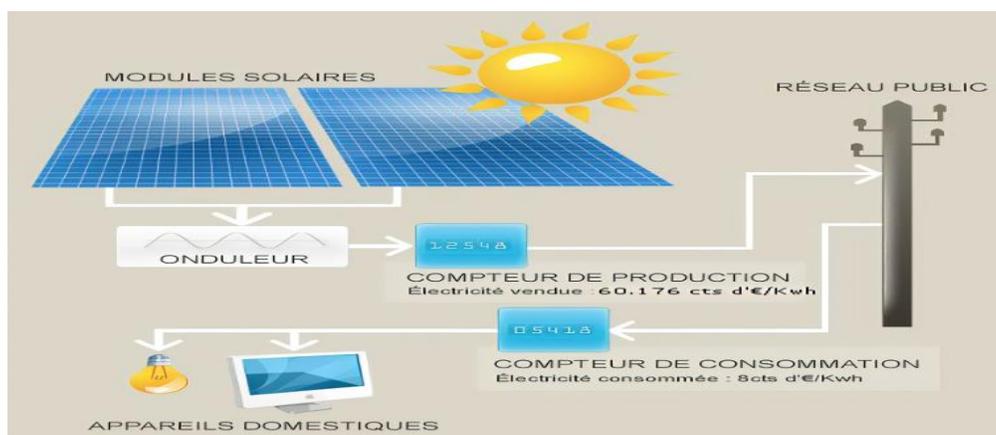


Figure (II.1): Énergie solaire photovoltaïque.

- **L'énergie solaire thermique:**

Est l'énergie thermique du rayonnement solaire, elle est captée dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.) (Fig. II.2).

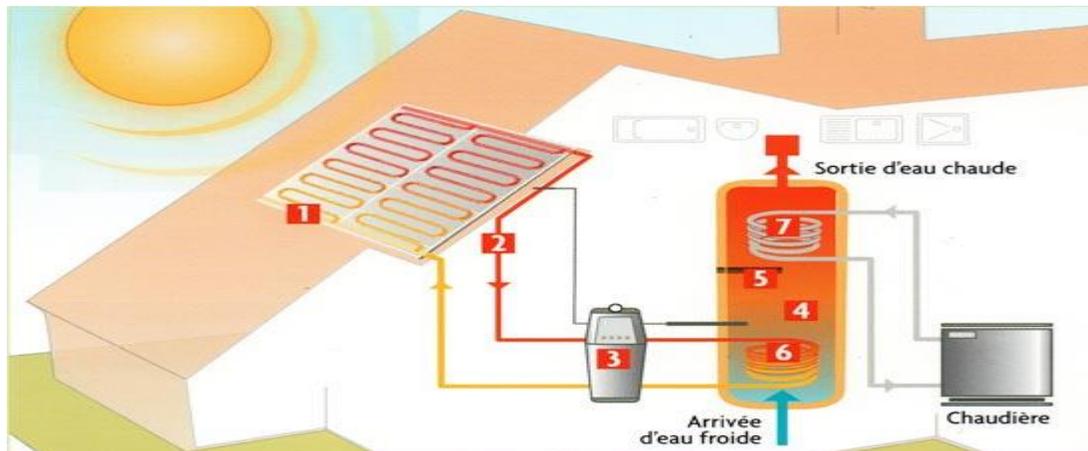


Figure (II.2): L'énergie solaire thermique pour produire de la chaleur.

- **L'énergie solaire thermodynamique:**

L'énergie solaire thermodynamique est produite via des centrales solaires à concentration. Il s'agit d'un assemblage de miroirs contenant des fluides caloporteurs, couplés à un générateur d'électricité solaire. À l'image des panneaux solaires thermiques, ce sont les miroirs qui transforment l'énergie collectée par les rayons du soleil, en chaleur qui sera convertie en électricité au moyen d'un turbo-alternateur Figure (II.3).

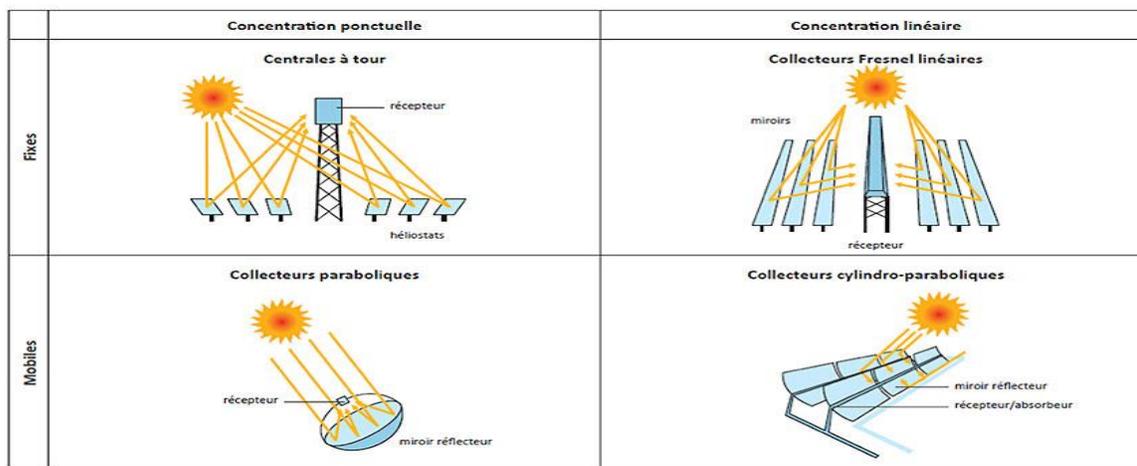


Figure (II.3): L'énergie solaire thermodynamique ¹⁸.

¹⁸ Source : Eduscol - Ministère de l'éducation nationale

II.2 Historique

Bien que la ressource d'énergie solaire ait toujours existé, son utilisation est assez récente dans l'histoire de l'humanité.

On voit apparaître les premières réalisations technologiques solaires au XIX^e siècle mais c'est véritablement pendant la deuxième partie du XX^e siècle que l'énergie solaire commence à apparaître comme une source d'énergie importante, particulièrement avec le développement du photovoltaïque, c'est dans le cadre de la course à l'espace entre Américains et Russes que la R&D¹⁹(La recherche et développement), dans cette énergie fait un bond. Puis peu à peu, à partir des années 1970, l'énergie photovoltaïque prend place dans l'industrie terrestre.

Dans le domaine de l'énergie photovoltaïque en particulier, son histoire remonte à environ deux siècles, en 1839, lorsque le physicien français Edmond Becquerel découvrit le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide connu comme L'effet photovoltaïque.

En 1875, Werner Von Siemens présente devant l'Académie des Sciences un exposé décrivant l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, mais il faudra attendre le début du XX^e siècle pour en obtenir une explication, grâce notamment aux travaux d'Albert Einstein et à la compréhension de la nature corpusculaire de la lumière et de la quantification de son énergie [1].

En 1954 : Chapin, Pearson et Prince, trois chercheurs américains, font la démonstration d'une cellule photovoltaïque performante à l'heure où l'industrie spatiale cherche de nouvelles façons d'alimenter ses satellites.

En 1958 : Une cellule avec un rendement de 9% a été activée. Les premiers engins spatiaux alimentés par des cellules solaires sont lancés en orbite.

En 1973 : La première maison à énergie photovoltaïque est en cours de construction à l'Université du Delaware.

En 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie [2].

II.3 Rayonnement solaire porteur d'énergie

Le spectre solaire est la répartition des longueurs d'onde ou des couleurs de la lumière. La lumière est composée de nombreuses longueurs d'onde de couleur qui se distinguent par leur gamme de longueurs d'onde. Les grains de photons de lumière qui composent le rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation [3]:

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

h: La constante de Planck.

¹⁹R&D: est l'ensemble des activités entreprises « de façon systématique en vue d'accroître la somme des connaissances, y compris la connaissance de l'homme, de la culture et de la société, ainsi que l'utilisation de cette somme de connaissances pour de nouvelles applications ».

ν : La fréquence.

c : La vitesse de la lumière dans le vide.

λ : La longueur d'onde.

Le rayonnement émis par le soleil correspond à la température du corps noir à 6000 °C.

L'intensité du rayonnement au-dessus de l'atmosphère est d'environ 1,36 kW/m², avec un centre spectral à 0,48 μm.

La répartition d'énergies en fonction de la longueur d'onde est :

- Le domaine de l'ultra-violet ($0 < \lambda < 0.3$) μm, représente environ (7%) de l'énergie totale émise par le soleil.
- Le domaine du visible ($0.3 < \lambda < 0.78$) μm, représente (47.3%) de l'énergie totale.
- Le domaine de l'infrarouge ($1 < \lambda < 2$) μm, représente (45.7%) de l'énergie totale.

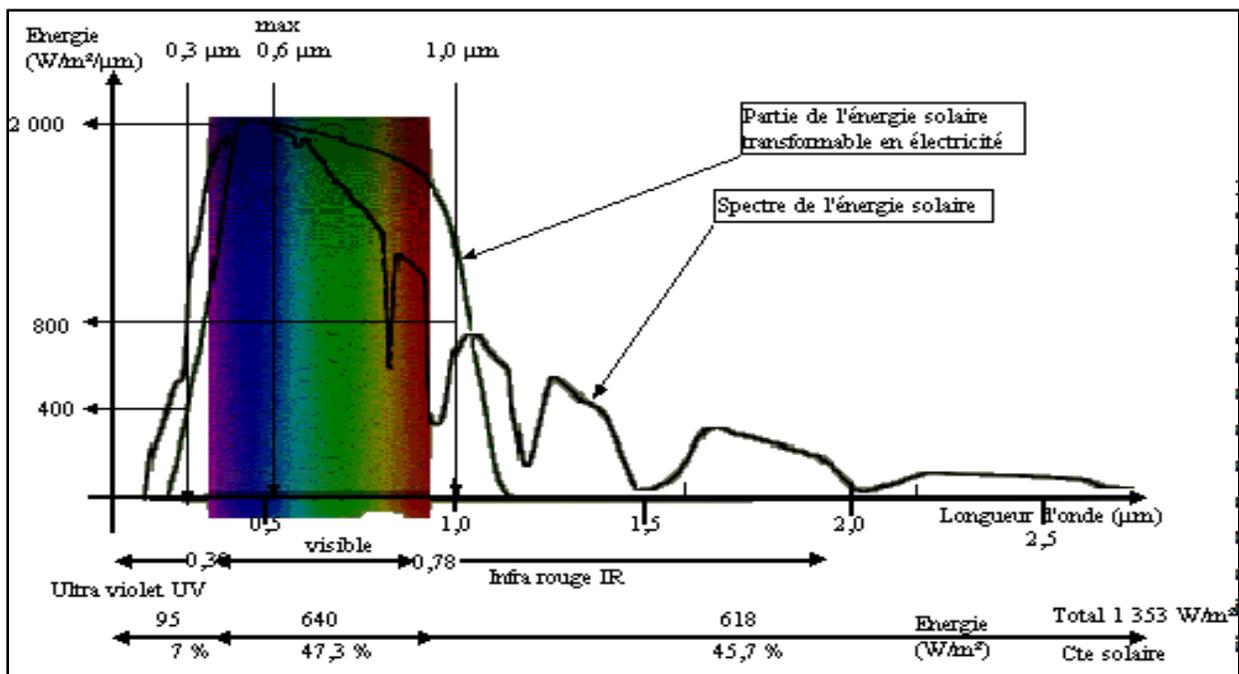


Figure (II.4): Le spectre solaire et l'énergie émise.

II.4 L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » est dérivé du mot grec « photos » (o : lumière, clarté) et du patronyme du physicien italien (Alessandro Volta), qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom au volt.

L'effet photovoltaïque, découvert par le français Edmond Becquerel en 1839. Il est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire seulement la lumière solaire (et pas la chaleur), qui sera directement transformée en électricité et peut être utilisée pour alimenter un appareil ou recharger une batterie.

L'effet photovoltaïque représente ainsi la seule alternative existante à la production d'électricité à partir de la force mécanique, puisque toutes les autres techniques sans exception, renouvelables ou non, font appel à des génératrices tournantes (alternateurs ou dynamos) qui peuvent être actionnées de diverses manières : vapeur, vent, force de l'eau, courants marins.

La lumière du soleil se compose de photons contenant une énergie correspondant aux différentes longueurs d'onde du spectre solaire. Quand un photon heurte une cellule photovoltaïque, son énergie peut être transférée à un électron dans le matériau semi-conducteur de la cellule, avec cette énergie supplémentaire, l'électron peut alors s'échapper de sa position normale dans l'atome créant un « trou », qui deviendra une partie d'un courant dans un circuit électrique. C'est ce qu'on appelle la paire électron-trou.

Une cellule photovoltaïque est une diode, formée de deux couches de matériaux de semi-conducteur dopées de sorte que l'une conduise les charges négatives et l'autre, les charges positives. Ce phénomène crée un champ électrique permanent dans la cellule.

Grâce à cet effet diode et lorsque la paire électron-trou a été créée, les charges négatives vont être séparées des charges positives et il se crée donc une différence de potentiel entre les couches N et P de la cellule. Un courant circule si une résistance (ampoule par exemple) est placée entre ces contacts [4]. La figure suivante représente l'effet photovoltaïque :

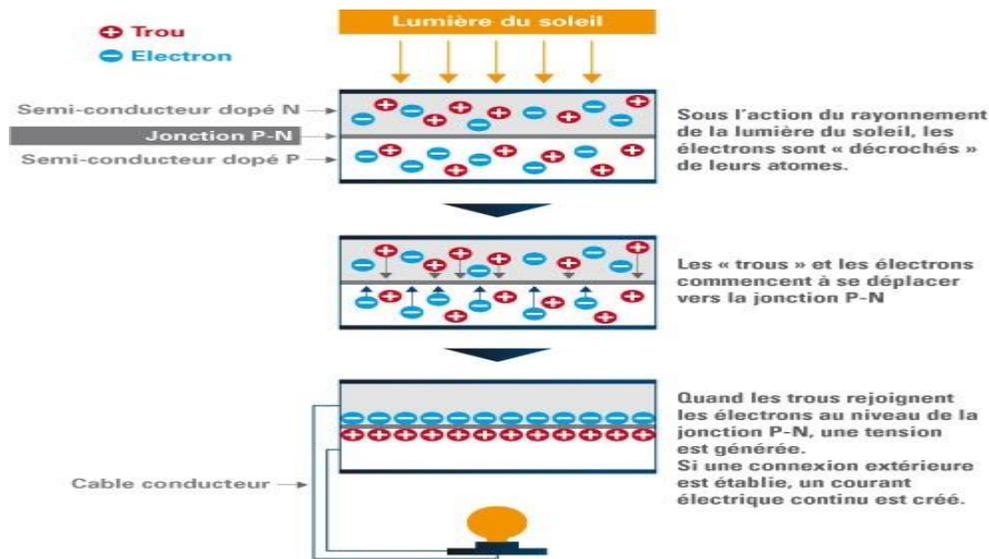


Figure (II.5) : L'effet photovoltaïque.

II.5 Le silicium métallurgique (MG-SI) : Le silicium est un semi-conducteur qui n'existe pas à l'état naturel il doit être combiné avec de l'oxygène pour fabriquer des oxydes ou des silicates. Une grande partie de la croûte terrestre est constituée de silice, qui représente environ 26 % de la masse totale de la terre. C'est le deuxième élément le plus abondant, après l'oxygène la figure suivante représente les étapes de raffinage du silicium.

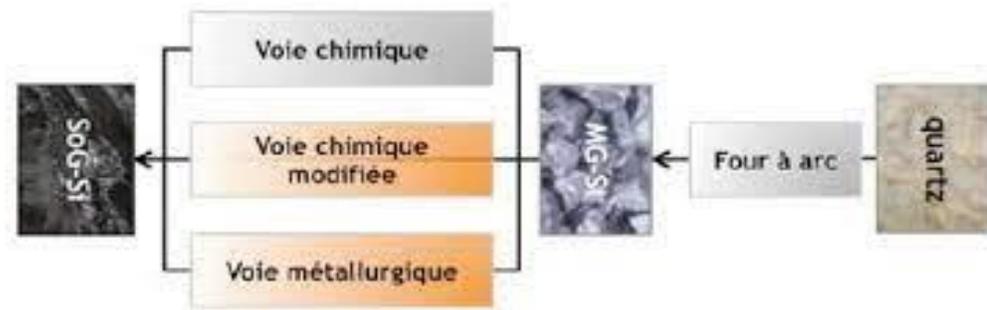


Figure (II.6): Raffinage du silicium [5].

Le silicium métallurgique (MG-Si) résulte de la transformation de la silice dont on a extrait l’oxygène. Cette réaction, appelée réduction carbothermique, consiste à porter à des températures très élevées un mélange de quartz et d’espèces carbonées (réducteurs du type coke, houille et bois), qui vont se combiner avec l’oxygène du quartz pour donner du monoxyde puis du dioxyde de carbone. Le bois permet aussi d’espacer les matériaux. La réduction de la silice par le carbone est un procédé mis en œuvre dans les fours électriques de l’industrie sidérurgique depuis le début du 20^{ème} siècle [5].

En 2010, la production de silicium poly cristallin a été de 145 000 tonnes, dont 83% pour l’industrie solaire, l’industrie photovoltaïque a produit 8 GWc de panneaux photovoltaïques à base de silicium cristallin. L’obtention de ce matériau arrive en fin d’un processus de raffinage que l’on peut séparer en deux grandes étapes [6] :

La transformation du quartz en silicium de grade métallurgique ou MG-Si: Elle est réalisée dans un four à arc Figure (II.7), outil typique de l’industrie métallurgique. La pureté du MG-Si est de l’ordre de 98 à 99%.

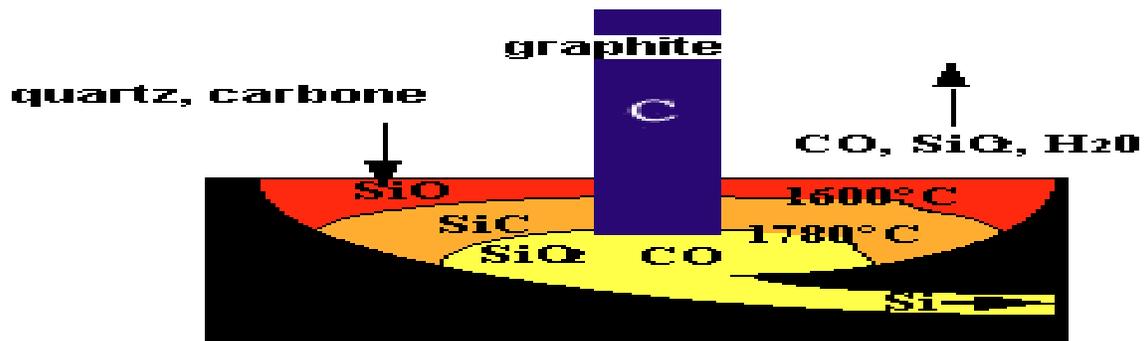


Figure (II.7): Four à arc.

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



La silice est mélangée avec des réducteurs tels que le coke²⁰ de pétrole, des charbons bitumineux, la houille et des copeaux de bois, en fonction des applications finales du silicium, la silice doit être relativement pure, en particulier, elle doit avoir une faible teneur en oxyde de fer; de plus, les réducteurs doivent être soigneusement choisis. Ce mélange est versé dans un creuset de plusieurs mètres de diamètre équipé d'électrodes de carbone dont la température est d'environ 1700°C mais peut atteindre 3000°C à la pointe des électrodes. Du silicium à l'état liquide est recueilli dans des « poches », grâce à des orifices pratiqués dans le creuset.

Le volume de monoxyde de carbone (CO) formé est très important: plus de 5 000 m³ par tonne de silicium, de plus, la réduction est délicate car il faut éviter la formation de SiC.

- **La purification du silicium métal en silicium de grade solaire ou SoG-Si, d'une pureté de 99,99%:** Elle est réalisée par le procédé Siemens, hérité de l'électronique et utilise des réacteurs chimiques pour synthétiser le silicium poly cristallin ou poly-Si. De toute la chaîne de production des modules photovoltaïques, c'est l'étape la plus consommatrice en énergie. En raison du coût de cette étape et du fait qu'une pureté moindre peut être tolérée, des techniques pour produire le silicium solaire à partir de nouveaux procédés chimiques mais aussi métallurgiques, le procédé Elkem notamment, sont explorées [7].
- **Voie métallurgique : procédé Elkem**

L'objectif de la filière métallurgie est de réduire les coûts de fabrication tout en maintenant une qualité adéquate pour les applications solaires. Plusieurs industries et centres de recherche développent aujourd'hui des méthodes pour réduire le passage des composés gazeux afin de réaliser des économies d'énergie. Les procédés de travail des métaux sont traditionnellement caractérisés par une série de fusions et de solidifications consécutives qui permettent l'élimination progressive des impuretés.

Le projet PhotoSil, porté par la société française Apollon Solar, associe les expertises du CEA-Liten, du CNRS et de FerroPem. Le procédé consiste à effectuer une première fusion-solidification pour séparer les impuretés métalliques beaucoup moins solubles dans le solide que dans le liquide ; les impuretés restantes (notamment l'alésage) sont ensuite extraites en traitant le liquide par un plasma réactif, ce qui entraîne la formation de composés volatils. Le développement a été validé début 2008 sur des lots de plus de 50 kg, et les rendements cellulaires ont été mesurés à 15 % fin 2008[7].

²⁰Le coke est un résidu de carbone quasi pur obtenu par chauffage du charbon par pyrolyse. Il se présente sous forme de pierres de taille variable à l'apparence granuleuse, poreuse et fissurée. Très résistant mécaniquement et perméable, le coke possède une masse volumique d'environ 650 kg/m³.

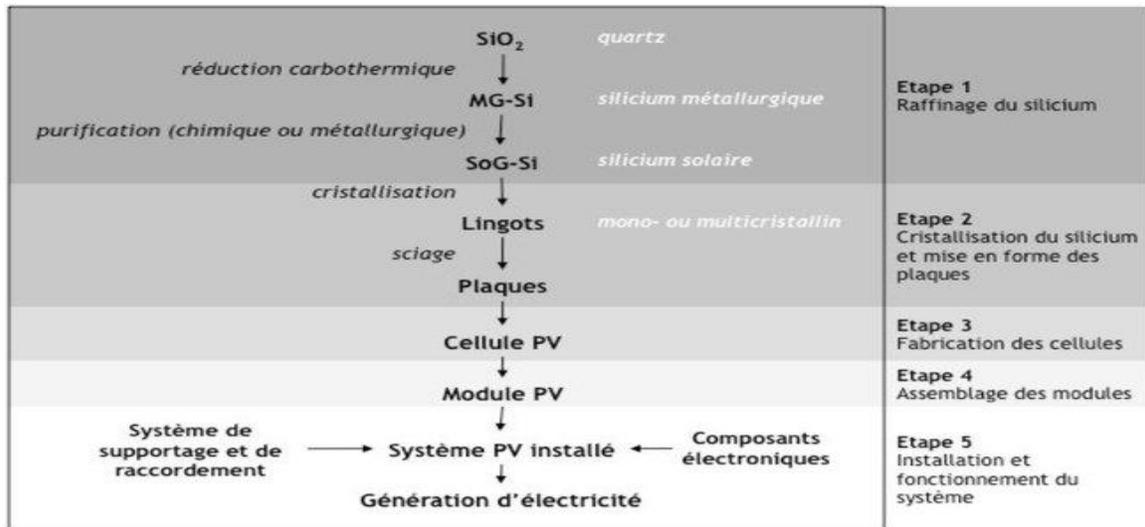


Figure (II.8): Étapes dans la fabrication d'un système photovoltaïque.

II.6 Le dopage :

Le silicium fut découvert en 1824 par J.J. Berzelius à Stockholm, en Suède. Il a de nombreuses applications dans diverses industries. Le silicium ultra-pur est utilisé, par exemple, dans l'industrie semi-conductrice du fait de ses caractéristiques semi-conductrices [8].

II.6.1 Principe de dopage

Dans le domaine des semi-conducteurs, le dopage est le processus d'ajout d'impuretés en petites quantités à une substance pure comme le silicium afin de modifier ses propriétés de conductivité. Les propriétés des semi-conducteurs sont principalement déterminées par le nombre de porteurs de charge qu'ils contiennent. Lorsqu'on introduit des impuretés dans un semi-conducteur, ses propriétés sont profondément modifiées. Le semi-conducteur est alors dit dopé. Ces porteurs sont les électrons ou les trous, le dopage d'un matériau consiste à introduire, dans sa matrice, des atomes d'un autre matériau, qui vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous [9].

II.6 .2 Méthodes de dopage

II.6.2.a Dopage par diffusion : Le dopage de diffusion est réalisé dans un four. Le dopant est disponible auprès d'**une source solide** : l'échantillon contenant le dopant est placé dans les quatre. L'atome dopant est alors transporté jusqu'à l'échantillon par un vecteur de gaz inerte issu du composé solide qu'il sublime. P₂O₅ en est un exemple (dopage N du Silicium). La 2^{ème} source est **une source liquide** où le gaz vecteur flotte dans le liquide ou gèle sa surface à une certaine température. La pression partielle du composé dans le gaz est égale à la tension de vapeur du liquide. POCl₃ en est un exemple (dopage N du Silicium). La dernière source est **une source de gaz** : un gaz contenant du dopant est introduit dans les quatre. Les exemples incluent PH₃ (dopage N du Silicium), B₂H₆ (dopage P du Silicium) et AsH₃ (dopage N du Silicium).²¹ [8].

²¹ De « Wikipédia ».

II.6.2.b Dopage par implantation ionique : Le dopage par ionisation consiste à accélérer des impuretés ionisées avec un champ électrique afin de fournir l'énergie nécessaire pour pénétrer dans le matériau dopant. Cette méthode permet l'utilisation d'une large gamme d'éléments dopants. La clôture mono-électronique et la chambre à vide permettent une grande reproductibilité et des dopages localisés.

Plus l'énergie cinétique d'un ion est grande, plus il va s'enfoncer profondément dans le réseau cristallin du substrat. Ainsi, le profil de dopage est déterminé en contrôlant le dosage et l'énergie.

L'un des inconvénients du dopage par implantation ionique est le désordre cristallin sévère provoqué par les collisions entre les ions incidents et les atomes du matériau. Il en résulte des défauts qui augmentent la probabilité d'échec.

II.6.2.c Dopage par transmutation : Le dopage par transmutation a lieu dans un réacteur nucléaire expérimental. Le dopant est obtenu par la réaction de capture de l'isotope ^{30}Si (qui est présent dans environ 3% du silicium). L'isotope ^{31}Si ainsi produit se désintègre en ^{31}P via la radioactivité. Un atome dopé au phosphore (dopage « N ») est donc précisément introduit dans le réseau cristallin, assurant une homogénéité inégalée.

Les semi-conducteurs résultants sont utilisés dans des applications d'électronique de puissance telles que le tramway, le TGV et le contrôle de véhicules électriques/hybrides.

II.6.2.d Dopage par technique laser : Le dopant est introduit par un gaz chimisorbant. Un laser à excimère provoque un cycle de fusion/solidification très rapide (de l'ordre de 10⁻⁸s) au cours duquel le dopant est dispersé dans la phase liquide. Comme la vitesse de diffusion des dopants est très rapide dans le liquide et négligeable dans le solide, la répétition de cette procédure permet d'obtenir une densité de dopants qui dépasse les limites de solubilité obtenues avec les approches conventionnelles.

II.6.3 Les type de dopage

Dopage de type N : On obtient un semi-conducteur de type N en dopant le cristal de silicium avec des atomes possédant 5 électrons sur leur couche de valence. On utilise ainsi le phosphore appartenant à la 5^{ème} colonne de la classification périodique des éléments. Quatre de ces 5 électrons de valence du phosphore sont mis en commun avec les atomes de silicium voisins pour réaliser des liaisons de covalence, le cinquième électron libre dans la bande de conduction. L'atome de phosphore qui a fourni un électron libre est appelé atome donneur, il a perdu sa neutralité pour devenir un ion positif fixe.

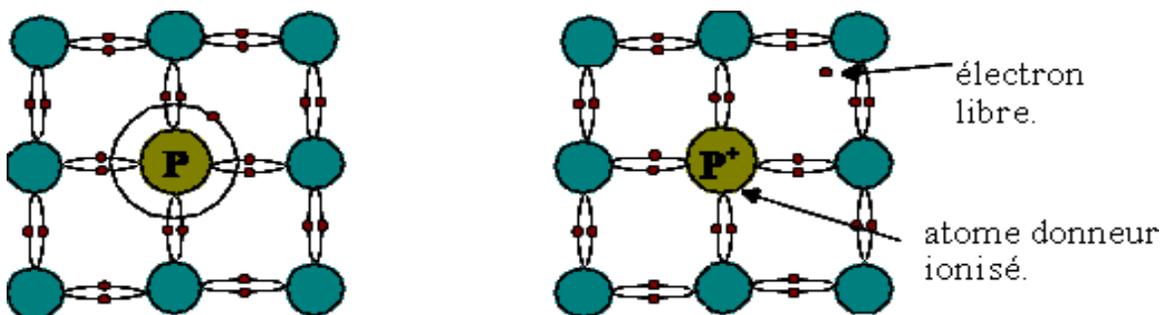


Figure (II.9): Dopage de type N.

Dopage de type P : C'est la même chose que le dopage de type N, sauf qu'à la place de mettre un noyau de phosphore, on met un noyau de bore qui comporte un électron de moins que le silicium, soit 3 électrons sur la couche périphérique. Il y a un déficit d'électron. Ainsi le dopage de type est positif. La place manquante de l'électron est appelée trou.

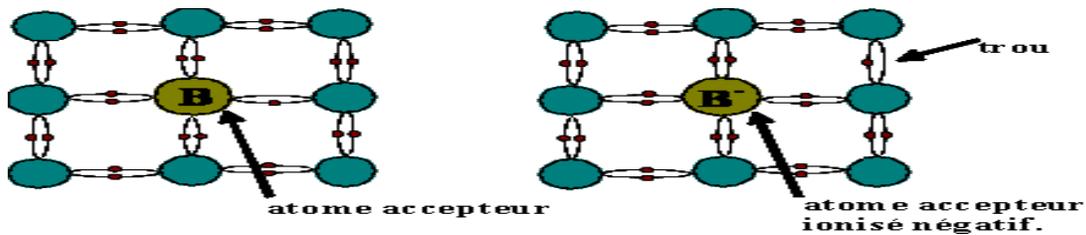


Figure (II.10): Dopage de type P.

II.6.4 La jonction P-N

Une jonction P-N désigne une région du cristal où le dopage varie brusquement, de p à n. Lorsque la région dopée p entre en contact avec la région dopée n, les électrons et les trous s'écoulent spontanément d'un côté de la jonction à l'autre, ce qui entraîne une zone de déplétion, ou zone de charge d'espace (ZCE), avec presque aucune concentration de porteurs libres. Alors qu'un semi-conducteur dopé est un bon conducteur, la jonction ne laisse presque jamais passer le courant. La taille de la zone de déflexion varie en fonction de la contrainte appliquée sur un côté du joint.

Plus la taille de cette zone est grande, plus la résistance du joint est faible. Le style d'affichage de la tension de courant de la jonction I(V).

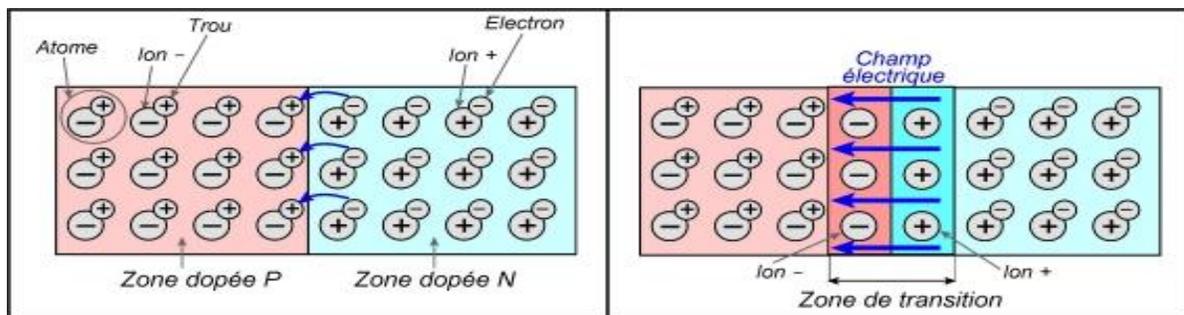


Figure (II.11) : La jonction P-N.

II.7 Les différents types des cellules photovoltaïques

1) La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

Ce type de cellule photovoltaïque est l'une des plus répandues. Elle est obtenue à partir de silicium monocristallin, appliqué en une tranche simple. Elle permet de composer des panneaux solaires qui vont produire de l'électricité servant à alimenter une habitation ou le réseau public par exemple.

De ses avantages elle a le meilleur rendement que le polycristallin (environ 150 Wc/m²) et une durée de vie importante (+/- 30 ans) par contre elle aussi des inconvénients tel que son rendement est faible sous un faible éclaircissement de plus elle est plus cher que celle du polycristallin [11].

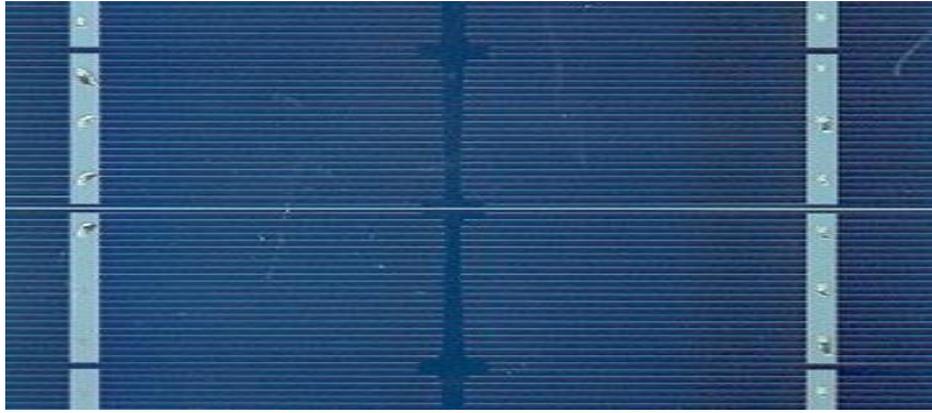


Figure (II.12) : Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin.

2) La cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin

Facilement reconnaissable grâce à ses cristaux bleus, cette cellule photovoltaïque se compose d'une seule tranche de silicium. Elle est de forme carrée. On la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles.

Son rendement est bon (environ 100 Wc/m^2) Dure (+/- 30 ans). Plus, moins cher que le monocristallin, mais sous un faible éclaircissement son rendement diminue.

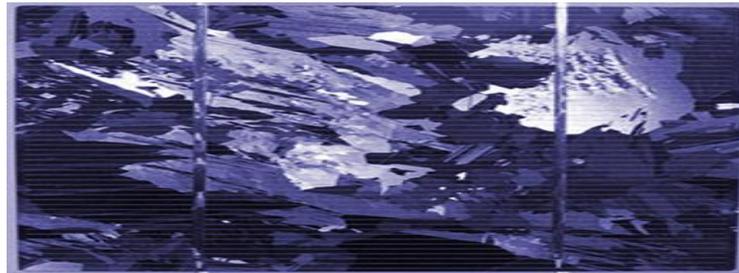


Figure (II.13) : Cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin.

3) Cellule silicium amorphe en couche mince

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ». Ce genre de cellule fonctionne sous un éclaircissement faible, moins sensible aux températures élevées, en plus elle est souple.

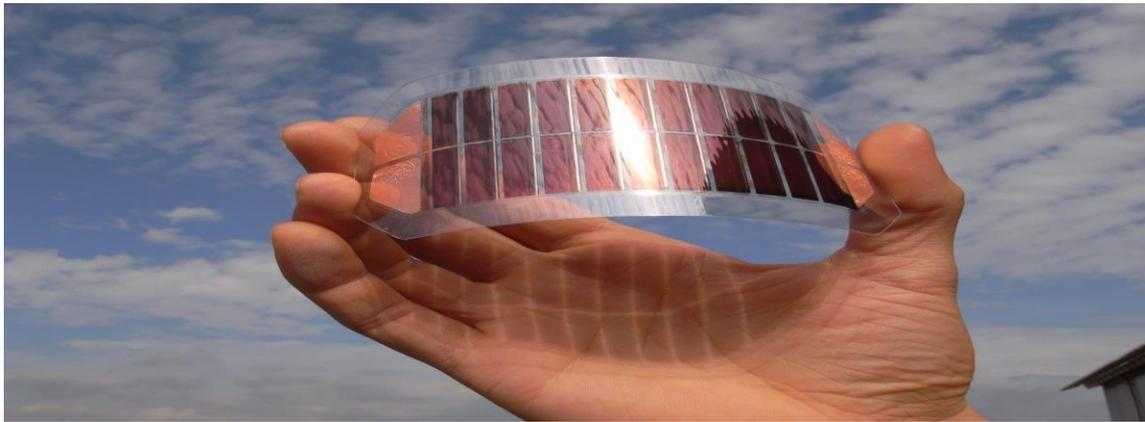


Figure (II.14) : Cellule silicium amorphe.

4) Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS

Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type CIS (cuivre, indium, sélénium) ou CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium). Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre). De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince. Elle aux meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince, elle peut être construite sur un substrat flexible. Mais ces cellules en couche mince ont un rendement plus faible que les cellules "épaisses".



Figure (II.15) : Cellule photovoltaïque en couche mince à base de cuivre.

5) Cellule multi jonction: Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion. Son rendement est inégalé, mais peu d'applications commerciales.



Figure (II.16) : Cellule multi jonction.

II.8 Les avantages et les inconvénients des panneaux solaires photovoltaïques

II.8.1 Les avantages : Les nombreux arguments que nous avons vus démontrent que l'énergie photovoltaïque est une source d'énergie respectueuse de l'environnement. L'installation d'un système photovoltaïque n'est donc pas une fausse déclaration, de plus, un système photovoltaïque peut être combiné avec une pompe à chaleur, par exemple. Le photovoltaïque peut aussi générer de la chaleur. Ainsi, il y a des énergies qui peuvent être créées sans augmenter notre dette énergétique. Une fois installés, les panneaux n'émettent aucun CO₂ tout en convertissant la lumière du soleil en électricité [12].

- Une énergie gratuite, renouvelable, non toxique et sans rejets dans l'environnement (dans son fonctionnement).
- Le rayonnement solaire est colossal et disponible par tous.
- L'énergie photovoltaïque par panneaux est parfaitement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins.
- L'énergie photovoltaïque peut être installée partout même sur des toits situés en ville (à condition qu'ils soient bien orientés et sans ombre portée).
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité et à moindre coût.
- Les panneaux photovoltaïques ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni technicien hautement spécialisé.
- Le silicium qui sert à fabriquer les cellules photovoltaïques est abondant sur Terre.
- Les panneaux photovoltaïques restituent en 2 ans $\frac{1}{2}$ l'énergie qui a été nécessaire à leur fabrication.
- Les matériaux utilisés (verre, aluminium et silicium) résistent aux conditions météorologiques extrêmes.
- Des modules bénéficiant d'une garantie de 20 ans à 80 % de leur rendement. .
- Une durée de vie probable des panneaux photovoltaïques de 20 à 35 ans.
- Le système est silencieux et n'entraîne pas de perturbation du milieu environnemental.

II.8.2 Les inconvénients :

- Le coût élevé de son installation.
- Sa puissance dépend directement des conditions climatiques, le rendement réduit en l'absence de rayonnement solaire.
- La nécessité de stockage d'énergie électrique sous forme chimique pour une installation autonome.
- Les panneaux photovoltaïques ont une perte de rendement de 1 % par an.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé de l'énergie solaire et de son importance et comment tirer partie de cette énergie naturelle considérée comme renouvelable en convertissant le rayonnement solaire reçue directement en électricité grâce à la technologie d'effet des cellules photovoltaïques que nous avons expliqué leurs types, fonctionnement et certains de leurs avantages dans la production d'énergie électrique et les inconvénients qui en résultent.

BIBLIOGRAPHIE Chapitre II

- [1]. Kleider, J. 2013. 6. Effet photovoltaïque : principes physiques. In Mosseri, R., & Jeandel, C. (Eds.), L'énergie à découvert. CNRS Éditions. Doi : 10.4000/books.editions-cnrs.10923
- [2]. B. Flèche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », juin 2007, p5.
- [3]. Energie solaire Recherche, I.2.2. Spectre solaire p 3/31 <http://e-learning.univ-tebessa.dz/moodle/mod/resource/view.php?id=7859> .
- [4]. Photovoltaïque, Effet photovoltaïque. <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/effet-photovoltaque.html> .
- [5]. NEKOUS Mohamed «Elaboration du silicium à partir du sable du désert Algérien» Mémoire de magister, 'Mohamed Boudiaf' Université d'ORAN ,2013.
- [6]. TECHNIQUES DE FABRICATION DES MODULES AU SILICIUM <https://www.photovoltaique.info/> .
- [7]. Cécile Miquel, Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental .Hespul énergies renouvelables et efficacité énergétique, Juillet 2009.
- [8]. My Little Blog Fonderie > C >> Alliage (Al, Zn, fonte, acier ...) > Le silicium dans les alliages de fonderie ,08 juillet 2020. <http://souspression.canalblog.com/> .
- [9]. Abdoulwahab Adaine. Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université de Lorraine, 2018. Français. FfNNT : 2018LORR0085. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01870260> .
- [10]. Frédéric Boucard. Modélisation de la diffusion des dopants dans le silicium pour la réalisation de jonctions fines. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 2003. Français. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00003671> .
- [11] Les différents types de cellules photovoltaïques, <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaiques> .
- [12]. Solaire : panneaux photovoltaïques production électricité, «Panneaux solaires photovoltaïques avantages-inconvénients rentabilité » 2016/2022. <https://www.picbleu.fr/page/panneaux-solaires-photovoltaiques-avantages-inconvenients-rentabilite> .

Chapitre III
Effet de température sur
les caractéristiques d'une
cellule photovoltaïque
(V_{co})

III.1 Introduction

Avec la découverte de l'effet photovoltaïque en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel cette énergie peut aussi soit utilisée pour la production de l'électricité, les cellules solaires des systèmes photovoltaïques transforment la lumière du soleil en énergie électrique [1].

Le rayonnement solaire nous donne un éclairage qui est le paramètre le plus important dans l'effet photovoltaïque, mais aussi nous donne de la chaleur et dans ce cas le changement de la température peut affecter les paramètres d'une cellule PV précisément la tension de circuit V_{CO} ouvert, c'est ce dont nous parlerons dans ce chapitre.

III.2 Méthodes d'extraction des paramètres d'une cellule solaire

III.2.1 Les méthodes théoriques :

Trois méthodes différentes ont été utilisées pour obtenir les caractéristiques courant-tension des cellules solaires [2].

La première méthode: est la plus courante utilise une lumière fixe, généralement d'intensité connue, et une charge résistive ajustée entre les conditions de court-circuit et de circuit ouvert, tout en surveillant la tension aux bornes des cellules solaires et le courant sortant de ces bornes [2-3]; cette méthode de mesure s'applique à la cellule solaire dans son mode de fonctionnement photovoltaïque normal, et la caractéristique courant-tension obtenue de cette manière est donc appelée "caractéristique de sortie photovoltaïque". Dans le cas des mesures pour des applications de cellules photovoltaïques à des densités de courant relativement élevées, les résistances de l'effet shunt peuvent être négligées, la caractéristique courant-tension obtenue par cette méthode est généralement décrite par l'équation suivante:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{q}{AkT}\right)(V - IR_s) - 1 \right] - I_L \quad (\text{III.1})$$

Cette équation reproduit suffisamment bien les caractéristiques obtenues dans la plupart des cas. Depuis une cellule solaire agit comme un générateur dans ce test, la caractéristique courant tension est obtenue en le quatrième quadrant du plan courant-tension.

I_L : le courant généré par la lumière.

I: courant aux bornes.

V: la tension.

R_s : la résistance série interne.

I₀ : le courant de saturation des diodes

q : la charge électrique, k: la constante de Boltzmann.

T: la température absolue et

A: une constante sans dimension est dans la plupart des cellules solaires près de 2,5 à 3.

La deuxième méthode: teste la cellule solaire comme une diode sans application d'aucune illumination, mais en fournissant du courant continu. Alimentation à partir d'une alimentation de polarisation externe. La caractéristique courant-tension obtenue de cette manière est donc appelée "diode direct caractéristique ". Encore une fois, la tension aux bornes des cellules solaires et le courant dans ces bornes les terminaux sont mesurés. La caractéristique obtenue par cette méthode tombe dans le premier quadrant du plan courant-tension [3].

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{q}{Akt}\right)(V - IR_s) - 1 \right] \quad (\text{III.2})$$

La caractéristique directe de la diode diffère de la caractéristique de sortie photovoltaïque décrit par l'équation (III.1) par l'absence du courant généré par la lumière I_L et par la direction positive résultante du courant terminal.

La troisième méthode: pour obtenir les caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire apparaît plus sophistiqué que les deux précédents. La cellule solaire est à nouveau illuminée, mais dans ce boîtier à intensité lumineuse variable, la quantité d'éclairage n'a pas à être connue si la valeur du courant lumineux généré I_L peut être déterminée.

Cet état est remplie lorsque l'amplitude de la résistance série de la cellule est suffisamment petite pour que le courant de sortie I de l'appareil mesuré par la méthode de sortie photovoltaïque est constant pour toutes les tensions aux bornes comprises entre 0 et 0,1 volt, dans ce cas, le circuit de mesure peut être constitué d'un interrupteur, d'un voltmètre à haute résistance et d'un milliampèremètre à faible résistance, La chute de tension aux bornes du milliampèremètre doit être inférieur à 50 mV et la résistance dans le circuit du voltmètre[3].

$$I_L = I_0[\exp(\frac{q}{AKT} \cdot V_0) - 1] \tag{III.3}$$

III.2.2 Les méthodes expérimentales :

Température MPPT – Tension en circuit ouvert: Dans leur article (Nuno M. M et al.2018) mentionnent que dans la méthode MPPT-temp V_{oc} , la température de la cellule PV (TPV) est déduit uniquement du module PV V_{CO} , considérant L'eq (III.4) [5], où V_{CO}^{STC} représente le module PV, V_{CO} et V_{PV}^{STC} la température de la cellule PV, toutes deux sur Conditions Standards de test (STC: température de la cellule PV 25°C ; irradiance 1000W/m² ; masse d'air 1,5) et μ_{CO} le circuit ouvert coefficient de température[4].

En observant L'eq (III.4), il est clair que la température de la cellule PV dépend uniquement Des paramètres du module PV. À partir de ces informations, et en utilisant L'eq (III.5) [5], [6], [7], la tension MPP (V_{MPP}) est déterminé.

$$T_{PV} = \frac{V_{CO} - V_{CO}^{STC}}{\mu_{CO}} + T_{PV}^{STC} \tag{III.4}$$

$$V_{MPP}(T_{PV}) = V_{MPP}(T_{PV}^{STC}) + (T_{PV} - T_{PV}^{STC})\mu_{CO} \tag{III.5}$$

La méthode MPPT basée sur la température des cellules PV est similaire à la méthode de la tension constante et pour cette raison il est simple de mettre en œuvre [6]. En utilisant les mesures de V_{CO} pour déterminer la température du module PV le problème concernant l'irrégulier la distribution de la température du générateur PV est dépassé.

La figure (III.1) montre un exemple de MPPT-temp V_{CO} DC-DC implémentation du convertisseur :

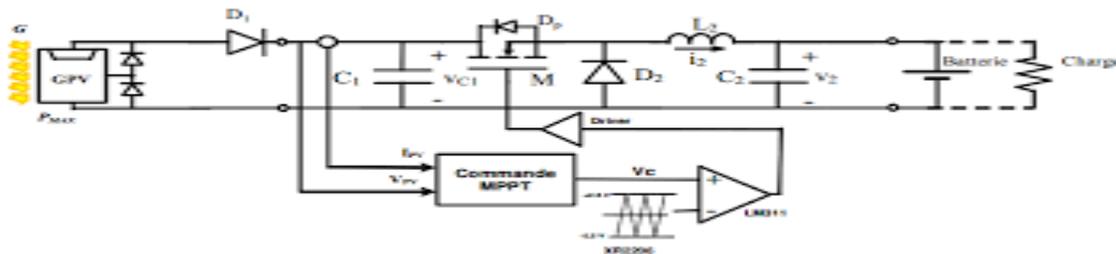


Figure (III.1): Exemple de mise en œuvre d'un convertisseur MPPT-temp V_{oc} DC-DC.

Après avoir déterminé la tension MPP, à l'aide du capteur tension de sortie mesurée (V_{out}), le convertisseur D est réglé à l'aide l'équation de gain correspondante. Cet algorithme MPPT peut être considéré comme plus simple que les algorithmes couramment utilisés, car il ne nécessite l'utilisation que de deux capteurs de tension. Un pour mesurer la sortie du module PV Tension (VPV) et autres pour mesurer la tension de charge [8]. Dans plus, même s'il s'agit d'un MPPT basé sur la température algorithme, il rejette l'utilisation de capteurs de température. Ce ressort que la mise en œuvre pratique de la tension les capteurs peut être réalisé au moyen d'une division de tension.

III.2.3 Les méthodes empiriques : Les méthodes les plus utilisées pour extraire les paramètres électriques sont [15]:

1. La méthode des moindres carrés [16].
2. La méthode de Newton [17].
3. La méthode de Levenberg Marquardt [18].

La méthode des moindres carrés (Least Mean Square : LMS) est l'une des méthodes les plus utilisées pour modéliser des mesures expérimentales par une fonction analytique prédéterminée [19.20], cette méthode consiste à minimiser l'écart moyen absolu ou relatif entre l'ensemble de N mesures I_m (V_i) et l'ensemble des résultats I_c (V_i) calculés par le modèle de l'équation (III.6). En d'autre terme, il s'agit de minimiser la fonction suivante [19]:

$$Q_{lms} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\ln(I_c(V_i)) - \ln(I_m(V_i))}{\ln(I_m(V_i))} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (III.6)$$

avec:

Q_{lms}: écart moyen relatif.

V_i: tension de polarisation.

Le modèle utilisé (S. Keraï, K. et al, 2003) pratiquement pour décrire la relation entre le courant et la tension de polarisation dans les diodes à jonction pn, est donné par l'équation (III.7) [21]:

$$I = I_s \left[\exp\left(q \frac{V - R_s I}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (III.7)$$

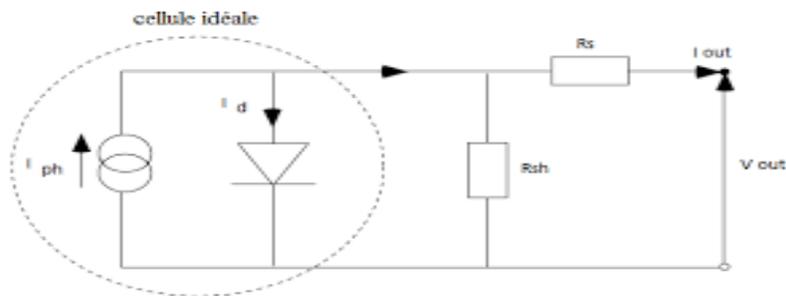
n: le facteur d'idéalité.

Le modèle donné par l'équation (III.7) montre que le courant I est une fonction implicite de la tension V ce qui ne permet pas d'appliquer la méthode LMS qui exige l'utilisation d'une fonction explicite. Si on ne tient pas compte de l'effet de la résistance de fuite due au courant de saturation I_s, ce dernier est négligé devant le courant total I. Ceci est possible dans la mesure où V > 3 kT/q (S. Keraï, et al. 2003). Donc l'équation (III.7) devient :

$$I = I_s \exp\left(q \frac{V - R_s I}{nKT}\right) \quad (III.8)$$

Dans le travail de (S. Keraï, et al, 2003) appliqué des méthodes d'optimisation basées sur l'algorithme des moindres carrés afin de déterminer les valeurs du courant de saturation I_s, du facteur d'idéalité n et la résistance série R_s des caractéristiques expérimentales I-V de cinq diodes bipolaires en 6H-SiC à structure JTE.

III.3 Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire



Figure(III.2): Schéma électrique d'une cellule solaire²².

III.3.1 Cas idéal : On a l'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme:

$$I = I_{cc} - I_D = I_{cc} - I_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \tag{III.9}$$

Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire idéal est:

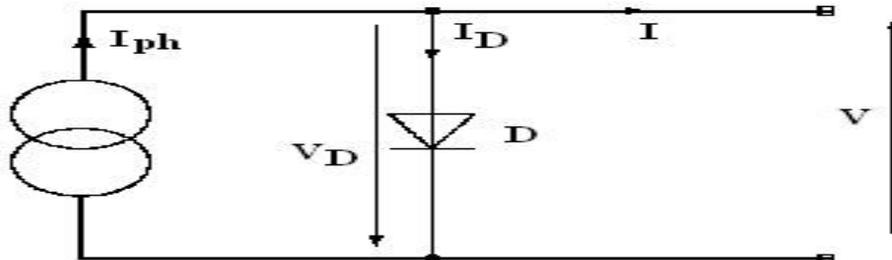


Figure (III.3) : circuit électrique d'une cellule solaire idéal.

I_D : Courant de diode donnée par : $I_D = I_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$ (III.10)
 I, V : Courant et tension de la cellule.

III.3.2 Cas réel: La performance d'une cellule solaire réelle est limitée par l'influence de deux phénomènes physiques assimilables à deux résistances (R_S et R_P).

- R_S : Résistance série.
- R_P : Résistance parallèle Shunt.

R_S et R_P modifient le courant de court-circuit de la cellule en photo- courant I_{ph} , on aura donc le montage électrique équivalent suivant:

- I_{ph} : photo-courant

²²http://www.foad.uadb.edu.sn/pluginfile.php/3813/mod_book/chapter/1522/schema%20equivalent.png.

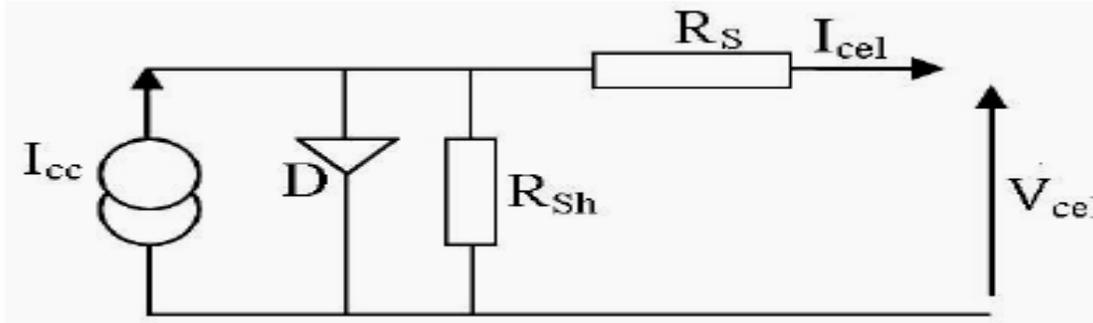


Figure (III.4): circuit électrique d'une cellule solaire réel.

III.4 Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire

III.4.1 Courant de court-circuit I_{cc} : Il définit la quantité des paires électron-trou créé G et qui traverse la jonction sans recombinaison entre L_n et L_p [9].

$$I_{ph} = qG(L_n + L_p) \tag{III.10}$$

G: la conductance.

L_n: longueur de diffusion des électrons.

L_p: longueur de diffusion des trous.

III.4.2 La tension en circuit ouvert V_{co} : C'est la tension pour laquelle la diode à l'obscurité (I = 0) fournit un courant égal au courant de court-circuit I_{cc}. Elle est obtenue à partir de l'équation [9]:

$$V_{co} = \frac{k.T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1\right) \tag{III.11}$$

III.4.3 La puissance maximale : Une cellule PV possède un point pour lequel sa puissance débitée est maximum. Ce point est tangent à une courbe d'isopuissance. On la nomme P_{max}.

$$P_M = V_M \times I_M \tag{III.12}$$

III.4.4 Le facteur de forme FF: On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max}, dans des conditions d'éclairement, de température et de vitesse de circulation de l'air ambiant donnés, et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{co} (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale) :

Il définit l'efficacité de la cellule solaire, il est obtenu comme suit:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{co} \cdot I_{cc}} \tag{III.13}$$

III.4.5 Le rendement de conversion d'énergie η: C'est le rapport de la puissance maximale générée et de la puissance du rayonnement solaire incident.

$$\eta_M = FF \cdot \frac{V_{co} \cdot I_{cc}}{P_0} = \frac{(I_M \cdot V_M)}{P_0} \tag{III.14}$$

P₀ : est la puissance incidente.

III.5 Association des cellules

III.5.1 Association en série : Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

$$V_{sCO} = N_s * V_{CO} \tag{III.15}$$

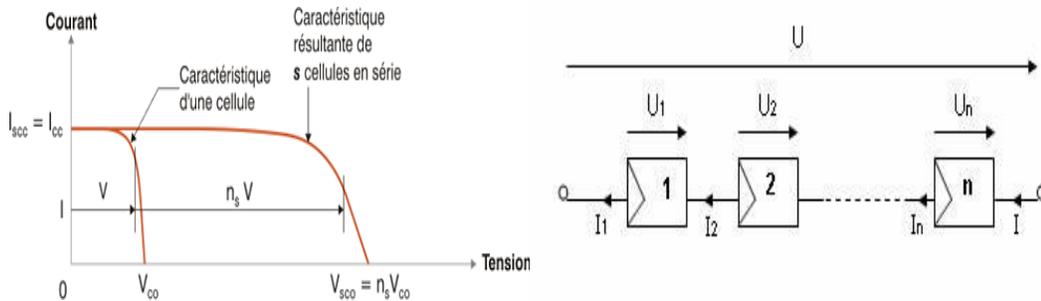


Figure (III.6): Courbe I-V des cellules en série.²³ Figure (III.5): Association en série²⁴.

I_{cc} = I_{scc} : est le courant de court-circuit des cellules en série.

I : courant d'une cellule.

V_{CO} : Tension de circuit-ouvert.

V_{sCO} : Tension de circuit-ouvert des cellules en série, n_s : nombre des cellules.

III.5.2 Association en parallèle : Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

$$I_{pcc} = N_s * I_{cc} \tag{III.16}$$

V_{pCO} = V_{CO} : Tension de circuit-ouvert des cellules en parallèle.

I_C = I_{pcc} : Courant de court-circuit des cellules en parallèle.

²³<https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/Ph13.png>.

²⁴https://sites.uclouvain.be/lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaiques/Cellule/Figures/Association_clip_image002.jpg.

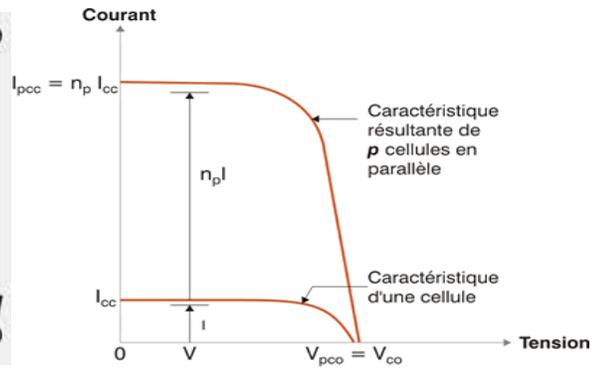
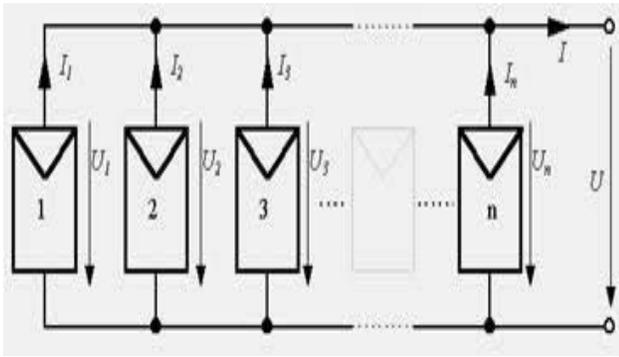


Figure (III.7): Association en parallèle²⁵

Figure (III.8): Courbe I-V des cellules en parallèle²⁶.

III.5.3 Association mixte : Pour augmenter la puissance des générateurs photovoltaïque on est obligé à grouper les cellules photovoltaïques en série et en parallèle pour obtenir un générateur mixte équivalent. Ce sont les caractéristiques globales d'une installation des cellules.

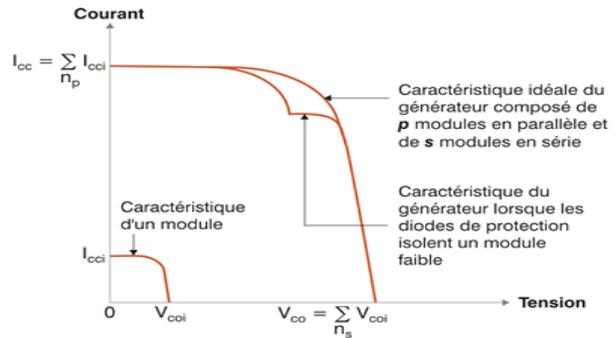
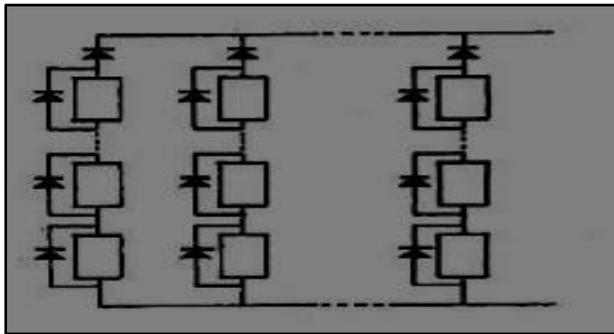


Figure (III.9): Schéma d'association mixte²⁷

Figure (III.10): Courbe I-V en (série/parallèle)²⁸

III.6 Modélisation de la cellule photovoltaïque

III.6.1 La caractéristique de Module PV: La caractéristique I-V pour un module est décrite par l'équation non linéaire. Pour des modules supposés dépourvus de fuites (R_{sh} infinie) cette relation est [8]:

$$V = V_{th} \cdot \log\left(\frac{I_{ph} - I}{I_s} + 1\right) - R_s I \tag{III.17}$$

avec:

V_{th} : tension thermique.

I_{ph} : le photo- courant.

I_s : courant de saturation.

R_s : la résistance de module.

²⁵https://sites.uclouvain.be/lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaïques/Cellule/Figures/Association_clip_image002_0000.jpg.

²⁶<https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/Ph12.png>.

²⁷<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images>

q=tbn:And9GcSEhSY9CRIBu6IPRU4YRDCoEKDwvzGAR6EzPw&usqp=CAU.

²⁸<https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/Ph11.png>.

Pour identifier l'équation (III.17), trois mesures sont nécessaires: le courant dans le court-circuit, la tension dans le circuit ouvert et les coordonnées du point de puissance optimale (V_{op} , I_{op}) [14].

La tension V_{th} , la résistance série R_s sont respectivement identifiées par les équations suivantes [13], [14]

$$V_{th} = n_s \cdot n \cdot k \cdot \frac{T}{q} \tag{III.18}$$

$$R_{th} = \frac{V_{th} \cdot \ln\left[\left(1 - \frac{I_{op}}{I_{cc}}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_{co}}{V_{th}}\right) + \frac{I_{op}}{I_{cc}}\right] - V_{op}}{I_{op}} \tag{III.19}$$

avec :

n_s : le nombre des cellules en série dans le module.

n : le facteur d'idéalité ($1 < n < 2$) pour une cellule.

III.6.2 Evolution de la caractéristique I-V : La courbe I-V de l'équation (III.18) est une courbe arbitraire de référence, applicable à un niveau d'éclairement et de température de la cellule en particulier. Pour d'autres valeurs d'éclairement et de température [8].

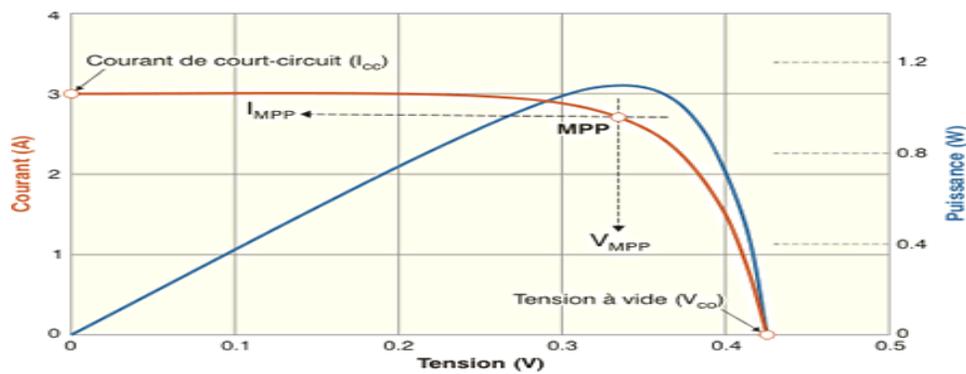


Figure (III.11): La courbe I-V²⁹

L'évolution de l'équation (III.18) se fait par les équations suivantes :

- Photo-courant I_{ph} :

$$I_{ph}(E, T) = I_{cc.ref} * \left(\frac{E}{E_{ref}}\right) [1 + \alpha \times \Delta T] \tag{III.20}$$

avec :

E : l'éclairement, (W/m^2).

α : Le coefficient de température de courant ($A/^\circ C$).

$$\Delta T = T_{mod} - T_{modref} \tag{III.21}$$

- T_{mod} : La température de module qui varie en fonction de la température ambiante et l'éclairement, selon la relation linéaire suivante [7].

²⁹https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fenergieplus-lesite.be%2Ftheories%2Fphotovoltaique%2Fcaracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques%2F&psig=AOvVaw3puHvSAkEv9cVyDQq0c8l7&ust=1654507389639000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCOiIL_-lfgCFQAAAAAdAAAAABAD.

$$T_{mob} = T_{amb} + \frac{(NOCT-20)}{800} * E \quad (III.22)$$

Avec : NOCT la température nominale de fonctionnement des cellules de module qui est mesurée sous les conditions suivantes : journée claire d'ensoleillement moyenne de 800W/m², une température ambiante de 20°C et une vitesse moyenne du vent de 1m /s.

- Courant de saturation de module [10]:

$$I_s = I_{s,ref} * \left(\frac{T_{mod}}{T_{ref}}\right) * \exp\left[\left(\frac{E_g * q}{n * k}\right) * \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{mod}}\right)\right] \quad (III.23)$$

Avec : E_g: l'énergie de gap.

III.7 Zones de fonctionnement d'une cellule solaire : Cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant I_{cc} (courant de court-circuit). De même, elle coupe l'axe des abscisses en V_{co} (tension maximale de circuit ouvert). On peut regrouper trois zones essentielles [11]:

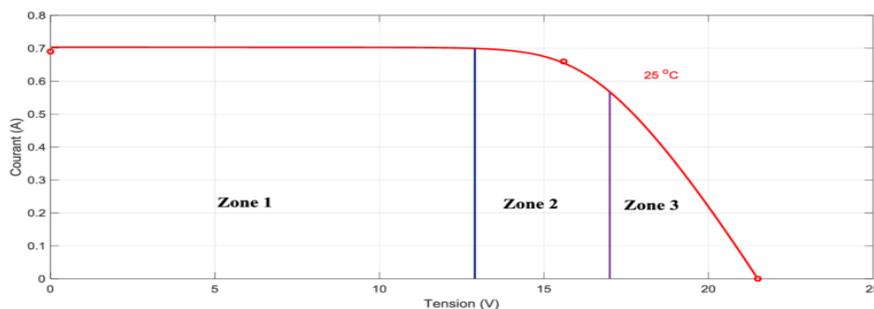


Figure (III.12): les différentes zones de caractéristique I=f(V) d'une cellule photovoltaïque³⁰.

La zone (1): pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant où il reste constant quelle que soit la tension.

La zone (2): correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux autres zones représente la région de fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

La zone (3): dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension, la variation de courant correspondant à une tension presque constante.

III.8 L'effet de température sur de V_{co} d'une cellule solaire

Dans les applications terrestres, les cellules solaires sont généralement exposées à des températures variant de 10 à 50 °C. Les performances d'une cellule solaire sont influencées par la température en tant que paramètres de performance, à savoir. La tension en circuit ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit (I_{cc}), le facteur de forme (FF) et le rendement (η) dépendent de la

³⁰<https://www.researchgate.net/profile/Taibi-Djamel/publication/326030398/figure/fig2/AS:642592718979072@1530217451078/7-Differentes-zones-de-la-caracteristique-IV-T25C-o.png>

température(Singh.2008), Il a il a été montré plus tôt [23] que V_{CO} diminue à un taux de 2,3 mV/K alors que I_{CC} augmente légèrement avec la température (T). Le facteur de forme (FF) aussi diminue et tout cela conduit à une diminution globale de l'efficacité de la cellule [22,21].

La dépendance de V_{CO} sur T :La dépendance de la tension en circuit ouvert à la température [23, 24] est:

$$V_{CO}(T) = V_{CO}(T_0) - \left[\frac{E_{g0}}{e} - V_{CO}(T_0)\right]\left(\frac{T}{T_0} - 1\right) - \frac{3KT}{e} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \tag{III.24}$$

Avec, E_{g0}: énergie de bande interdite (eV), à T= 0K.

Pendant le travail d'une cellule solaire, si la température augmente de 40 K, dans le cas où T₀= 300K et T=340K $\ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \approx 0.125$ et $\frac{3KT}{e} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \approx 10mA$ on peut les négligés .Ainsi, nous obtenons de l'équation (III.24) une fonction approximativement linéaire:

$$V_{CO}(T) \approx V_{CO}(300K) - cost(T - 300K) \tag{III.25}$$

Le changement de V_{CO} avec la température calculée de l'eq (III.24) est:

$$\frac{dV_{CO}}{dT} = \frac{\frac{E_{g0}}{e} - V_{CO}(T_0)}{T_0} - \frac{3K}{e} \tag{III.26}$$

Dans le cas de T₀=300K, E_{g0}=1.21 eV et V_{CO}(T₀)=0.55V, typique pour la cellule solaire au silicium, nous obtenons de l'eq (III.26) [24]:

$$\frac{dV_{CO}}{dT} = -2.45(mV/K) \tag{III.27}$$

La tension en circuit ouvert en fonction de la température est représentée :

- pour une cellule solaire multicristalline au silicium, deux diodes fonctionnant comme des cellules photovoltaïques : BPYP30, BPYP35 sur la figure (III.13a)
- et pour la cellule photovoltaïque Siemens de type 5 sur la figure (III.13b).

Tous ces schémas sont linéaires selon la relation (III.25). À partir de ces diagrammes [24], ils ont trouvé les deux coefficients. (b) (a)

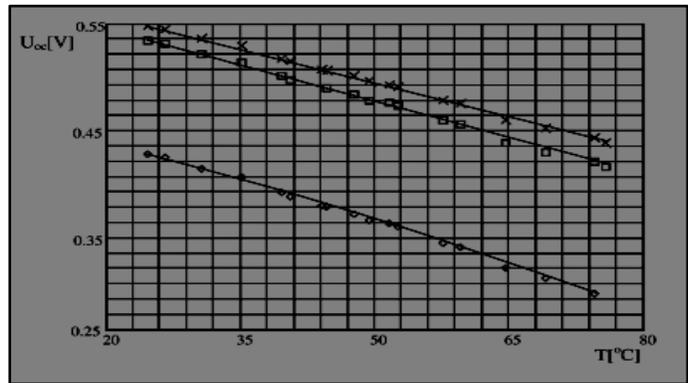
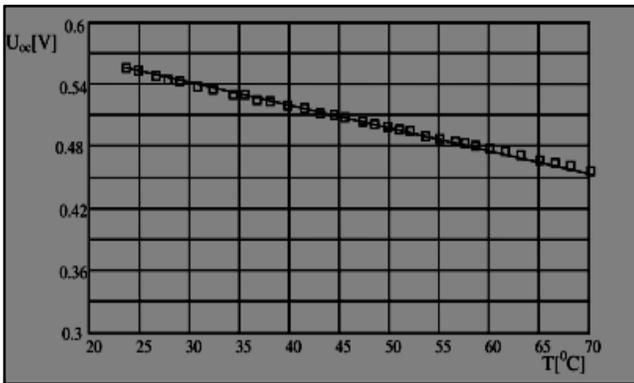


Figure (III.13) a : Dépendance à la température de la tension en circuit ouvert à l'irradiante de 756 W/m² pour une cellule solaire (50 ×50 mm²), photocellule BPYP35, photocellule BPYP30 **b**: La dépendance à la température de la tension en circuit ouvert au irradiante 756 W/m² pour la cellule solaire Siemens.

Dans l'article (E. Radziemska, E. Klugmann.2002) ils ont montré une petite augmentation du courant de court-circuit, une réduction significative de la tension en circuit ouvert et de la puissance électrique des cellules photovoltaïques.

Un autre travail (J. Krustok, et al, 2009) [25], dans lequel ils ont calculés les paramètres de la cellule solaire monograin Cu₂ZnSn (Se_x, S_{1-x})₄, en fonction de la température. Pour une intensité lumineuse de 100 mW/cm², $le^{\frac{dV_{CO}}{dt}} = 1.91 \text{ mV/K}$, ce qui fait la diminution de la tension en circuit ouvert V_{CO} et E a était proche de l'énergie de la bande interdite de 1,2 eV. La recombinaison dominante est liée à la recombinaison dans la région de charge d'espace. Le rendement relatif des cellules solaires diminue avec la température avec une pente de 0,013%/K. Le facteur d'idéalité de la diode n était proche d'une valeur de 2 et a montré une très faible augmentation avec la température.

Les cellules CZTSSe ne sont pas vraiment idéales, et il faut donc tenir compte également de la résistance série R_S et de la conductance parallèle G_{Sh} de ces cellules. Puis la cellule solaire l'équation sera donnée par:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V - R_S I)}{nkT}\right) - 1 \right] + (V - R_S I) - I_{ph} \quad (\text{III.28})$$

En général, n a une valeur comprise entre 1 et 2 comme nous avons déjà illustrés, mais des valeurs supérieures à 2 sont également possibles. Dans le cas où il n'y a pas de recombinaison dans la région de charge d'espace, n devrait avoir une valeur de 1. Si par contre le courant est dominé par la recombinaison dans la région de charge d'espace, n devrait être 2 [25].

V_{CO} est obtenu de l'Eq. (III.28) (en prenant I = 0) :

$$V_{CO} = \frac{nkT}{q} \ln \left[1 - \frac{G_{sh} V_{CO}}{I_0} + \frac{I_{ph}}{I_0} \right] \quad (\text{III.29})$$

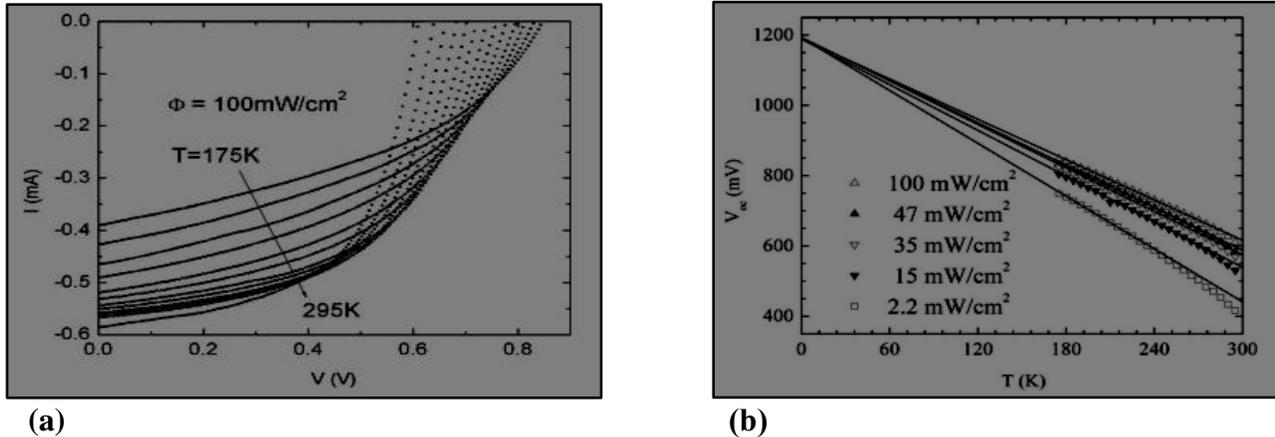
Selon la théorie, I₀ est fonction des propriétés du matériau et il est également sensible à la température. En général (Green, 1982; Rau et Schock, 1999):

$$I_0 = I_{00} \exp\left[-\frac{E_A}{nkT}\right] \simeq AT^3 \exp\left[-\frac{E_A}{nkT}\right] \quad (\text{III.30})$$

Où l'énergie d'activation E_A et aussi I₀₀ dépendent principalement du mécanisme de recombinaison dominant dans la cellule solaire. En cas de recombinaison massive E_A, E_g où E_g est l'énergie de la bande interdite du matériau absorbant. D'après l'eq (III.29) on s'attend à une dépendance linéaire de V_{CO} sur la température, si I_{ph} >> G_{sh}, V_{CO} et I_{ph} >> I₀. Alors de (III.29) et (III.30) V_{CO} est:

$$V_{CO} = \frac{E_A}{q} - \frac{nkT}{q} \ln \left[\frac{I_{00}}{I_{ph}} \right] \quad (\text{III.31})$$

À l'intervalle de $T = \{0K, 300K\}$ Ils ont obtenues les courbe suivantes :



Figures (III.14) : **a)** Dépendance des courbes I – V des cellules solaires monograin CZTSSe obtenues à la température dans une intensité lumineuse de 100 mW/cm^2 . **b)** Tension de circuit ouvert V_{CO} des cellules monograin CZTSSe en fonction de la température éclairée avec différentes intensités lumineuses. Les lignes droites sont des ajustements linéaires de l'eq (III.31)

III.9 Caractérisation expérimentale T- V_{CO} d'une cellule de silicium en conditions réel:

La caractéristique température-tension (de circuit ouvert) T- V_{CO} d'un dispositif électronique est la relation $V_{CO}=f(T)$ qui lie la tension appliquée à ce dispositif à la température. Pour une cellule PV, la caractéristique T- V_{CO} est sa carte d'identité.

III.9.1 Appareilles et matérielles utilisées :

Nous avons réalisé une expérience dans laquelle la cellule photovoltaïque au ABS/PC (Acrylonitrile Butadiene Styrene /polycarbonate) de $265 \times 150 \times 19 \text{ mm}$, était exposée à une intensité lumineuse constante. Cette expérience a été réalisée au cours d'une journée très ensoleillée, le 6 juin 2022 à 13 h et 20 min. À l'Université de Mohamed el Bachir El Ibrahimy, BBA. De longitude $4,801377^\circ$ Est, et latitude de $36,047034^\circ$ Nord.

Pour tracer une caractéristique (T- V_{CO}) d'une cellule PV, il nous faut avoir :

- **Voltmètre:** connecté en parallèle pour mesurer la tension électrique aux bornes de la cellule PV.
- **Thermomètre infrarouge:** est un instrument de mesure de la température de surface d'un objet à partir du rayonnement du corps noir - rayonnement de type corps noir - qu'il émet dans l'infrarouge.
- **Cellule PV:** générateur d'électricité.
- **Source lumineuse :** lampe de lumière blanche d'intensité constante.

III.9.2 Photo de notre expérience :



Figure (III.15): Photo de l'essai expérimentale.

III.9.3 Schéma électrique équivalent de l'essai expérimental :

Le schéma électrique de l'essai expérimental comme illustré sur la figure (III.16) :

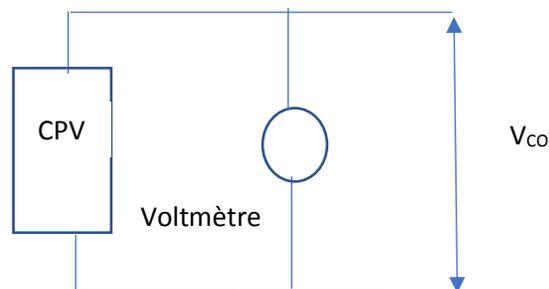


Figure (III.16): montage d'expérience pour la caractéristique T-V_{CO} d'une cellule solaire.

III.9.4 Résultats de l'expérimental à E= Cst

Les valeurs mesurées à partir de notre expérience sont rapporté dans le tableau suivant :

T (°C)	21.7	35.9	36.5	36.9	38.1	39.8	41.6	43.5	46.2
V _{co} (V)	3.49	3.2	3.17	3.15	3.11	3.06	3	2.94	2.86

Tableau (III.1): résultats expérimentaux.

L'équation d'interpolation de l'expérience:

Nous avons utilisés la méthode des moindres carrés pour interpoler les valeurs expérimentaux mesurée avec **Origin 6.0** un logiciel de traitement et d'analyse de données scientifiques.

Nous avons obtenu l'équation d'interpolation suivante :

$$V_{CO} = AT^2 + BT + C \tag{III.32}$$

avec: $A = 2.8978136132.$, $B = -0.0559666772.$, $C = 4.8265740214.$

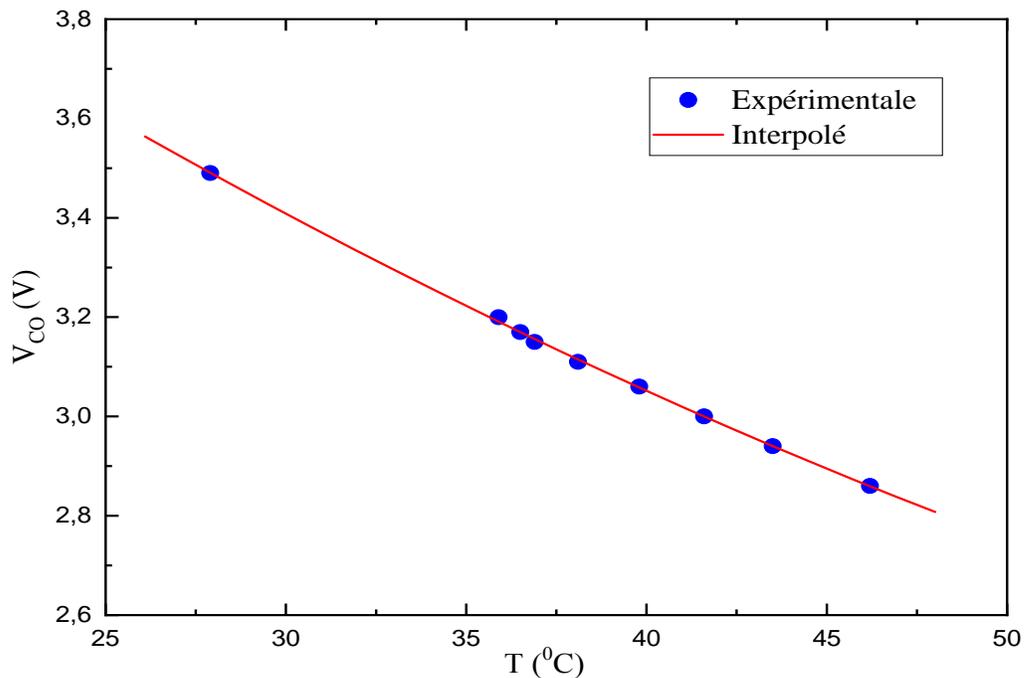


Figure (III.17): Courbe de variation de V_{CO} en fonction de température.

On remarque qu'il existe une relation de proportionnalité directe entre la tension de circuit ouvert et la température sachent qu'avec l'augmentation de T, V_{CO} diminue.

Chapitre III

Effet de température sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque (V_{co})

Le tableau suivant représente les valeurs empiriques extrait de la courbe T-V_{CO} :

T(°C)	V _{CO} (V)	T(°C)	V _{CO} (V)
25	3.61	36	3.19
26	3.57	37	3.15
27	3.53	38	3.12
28	3.49	39	3.08
29	3.45	40	3.05
30	3.41	41	3.02
31	3.37	42	2.99
32	3.33	43	2.96
33	3.3	44	2.93
34	3.26	45	2.89
35	3.22	46	2.87

Tableau (III.2) : Résultats du calcul empirique.

III.10 Conclusion

La cellule solaire est l'endroit où la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique se produit.

Dans ce chapitre nous avons vu et conclu d'après les résultats de l'expérience de notre travail et les résultats des expériences d'autres travail {(Singh.2008),(E. Radziemska, E. Klugmann.2002), (J. Krustok, et al,2009)} que la température appliquée à la cellule solaire a un effet particulièrement important sur le modèle photovoltaïque et ses grandeur caractéristique précisément dans le cas d'un circuit ouvert à la tension V_{CO}. L'augmentation de la température T diminue la tension de circuit ouvert V_{CO}.

BIBLIOGRAPHIE Chapitre III

- [1]. SOLAR GENERATION 6, **Solar photovoltaic electricity empowering the world.**
W w w . g r e e n p e a c e . o r g . 2 0 1 1 ,
<https://www.greenpeace.org/archive-international/Global/international/publications/climate/2011/Final%20SolarGeneration%20VI%20full%20report%20lr.pdf>.
- [2]Corinne Alonso. **Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie. Micro et nanotechnologies/Microélectronique.** Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2003.
- [3]Wolf, M. and Rauschenbach, H. (1963) **Series Resistance Effects on Solar Cell Measurements.** **Advanced Energy Conversion**, 3, 455-479.
[https://doi.org/10.1016/0365-1789\(63\)90063-8](https://doi.org/10.1016/0365-1789(63)90063-8)
- [4].Nuno M. M. da Rocha, Lucas L. Brighenti, Júlio César Passos et Denizar C. Martins, **MPPT ALGORITHM BASED ON PV CELL TEMPÉRATURE, USING OPEN CIRCUIT VOLTAGE MEASUREMENT, COMBINED WITH PV CELL COOLING.** *Eletrôn. Potên., Joinville*, v. 23, n. 4, p. 477-486, out./dez. 2018.
- [5].D.L. S. Solano, “**Sistema de Supervisão e Controle de Geração Solar Fotovoltaica para Aplicação em Microrredes Inteligentes**”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil, 2016.
- [6].M. A. G. de Brito, L. P. Sampaio, G. A. e Melo, and C. A. Canesin, “**Contribuição ao Estudo dos Principais Algoritmos de Extração da Máxima Potência dos Painéis Fotovoltaicos**”, in *Eletrônica de Potência SOBRAEP*, vol. 17, no. 3, pp. 592–600, Aug. 2012.
- [7].R. F. Coelho, F. M. Concer, and D. C. Martins, “**A MPPT approach based on temperature measurements applied in PV systems**”, in *IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, pp. 1–6, 2010.
- [8].Z. Peng, M. R. Herfatmanesh, and Y. Liu, “**Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimisation**”, in *Energy Conversion and Management*, vol. 150, pp. 949–955, Oct. 2017.
- [9]H.RAUSCHENBACH, **Understanding Solar Measurements**, *Semicond. Prod. Applie. News.* Hoffman Electronics Corp., El Monte, Calif. (1960).
- [10].W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga, **Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin**, *Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen* (2007) 301 – 306.
- [11].CHAPITRE I, Généralités sur les technologies des cellules solaires 14-15.
- [12]Ahmed DJAFOUR, Mohamed Salah AIDA et Boubaker AZOUI, {**Modélisation de la caractéristique de sortie d'un module photovoltaïque installé à Ouargla**} *Univ Ouargla, Constantine et Batna*, Vol. 6, N° 2, Octobre 2014.
- [13].W.Xiao, W. G. Dunford ET A. Capel, «**A Novel Modeling Method for Photovoltaic Cells**», 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference.
- [14].R. Khezzar, M. Zereg ET A. Khezza, «**Comparative Study of Mathematical Methods for Parameters Calculation of Current-Voltage Characteristic of Photovoltaic Module** », *International Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO 2009*.

Chapitre III Effet de température sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque (V_{co})

- [15]. El Hadi Chahid, Mohammed Idali Oumhand, M'barek Feddaoui, Mohammed Erritali, Abdessamad Malaoui. **Effect of Measurement Factors on Photovoltaic Cell Parameters Extracting**, Vol. 7, No. 1, February 2017, pp. 50-57.
- [16]. W. H. Press, et al, "**Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing**", 2nd Ed. Cambridge University Press, vol. 9, pp. 362 – 367, 2002.
- [17]. T. Easwarakhanthan, et al., "**Nonlinear Minimization Algorithm for Determining the Solar Cell Parameter with Microcomputers**", International Journal of Sustainable Energy, vol. 4, pp. 1-12, 1986.
- [18]. D. Marquardt, "**An Algorithm for Least Squares Estimation of Non Linear Parameters**" SIAM Journal of Applied Math, vol. 11, pp. 431-441, 1963.
- [19]. S. Keraï, K. Ghaffour et N.E. Chabane-Sari, **Méthodes d'Extraction des Paramètres des Caractéristiques I-V de Diodes Bipolaires de Puissance en 6H-SiC à Structure JTE**, Université Abou Bakr Belkaïd P 1-2 / 5, 2003.
- [20]. K. Arbenz et O. Bachmann, "**Elément d'Analyse Numérique et Appliquée**" Presse polytechniques et universitaires romandes, 1992.
- [21]. S. M. Sze, "**Physics of Semiconductor Devices**" Ed. JOHN WILEY & SONS, New York, 1981.
- [22]. Priyanka Singh , S.N. Singh a , M. Lal , M. Husain, **Température dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell**, New Delhi, India 2008.
- [23].] Carlson D. **Low-cost power from thin-film PV, electricity**, Lund: Lund University Press; 1989
- [24]. E. Radziemska, E. Klugmann, **Thermally affected parameters of the current–voltage characteristics of silicon photocell**, Energy Convers. Manage. 43 (2002) 1889–1900.
- [25]. J. Krustok, R. Josepson, M. Danilson, D. Meissner, «**Temperature dependance of $Cu_2ZnSn(SexS_{1-x})_4$ monograin solar cells**», Université de technologie de Tallinn 2009, revue Solar Energy 84 (2010) 379–383.
- [26]. Green, M.A, **Solar Cells**. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs 1982.



Conclusion générale

Conclusion générale:

Réduire les nuisances pour l'environnement est devenue une préoccupation majeure ces dernières années. De nombreuses pistes de recherche se sont donc focalisées sur l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire. L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable, elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle, qui est le Soleil.

Cette énergie est la plus raisonnable car elle est gratuite est totalement verte pour l'environnement (non toxique), L'énergie photovoltaïque peut être installée partout même sur des toits situés en ville (à condition qu'ils soient bien orientés et sans ombre portée). Sur les sites isolés, aussi l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité et à moindre coût.

Nous avons vu dans le premier chapitre quelques notions sur le soleil et les propriétés de son rayonnement et nous avons conclu que le flux énergétique solaire moyen de l'année qui est disponible en abondance sur toute la surface terrestre à une quantité importante malgré qu'il s'agit d'une atténuation lors qu'elle traverse l'atmosphère, à cause de sa composition et ses propriétés, la terre reste toujours protégée des rayonnements nocifs, cette puissance est de l'ordre de : 1367W/m^2 au spectre (AM_0) dans l'espace hors atmosphérique.

Ensuite dans le deuxième chapitre nous avons introduit l'énergie solaire photovoltaïque et son importance et comment tirer parti de cette énergie naturelle considérée comme renouvelable en convertissant le rayonnement solaire reçue directement en électricité grâce à la technologie d'effet des cellules photovoltaïques que nous avons expliqué leur types leur fonctionnement et certains de leurs avantages dans la production d'énergie électrique et les inconvénients qui en résultent.

Dans le troisième chapitre nous avons cité quelque méthode d'extraction des paramètres d'une cellule PV et nous avons décrit ces deux modèles idéal et réel et d'après des travaux de recherche précédent nous avons également remarqué l'effet de la température sur la tension de circuit ouvert qui correspond bien à notre propre expérience.

Finalement on conclure que la température diminue la tension de circuit ouvert donc elle l'affecte considérablement.

ملخص :

يقدم هذا العمل اختبارا تجريبيا يهدف إلى إظهار تأثير درجة الحرارة المحيطة على جهد الدائرة المفتوحة بشدة إضاءة مستمرة, يعد جهد الدائرة المفتوحة من أحد الخصائص المهمة التي تميز الخلية الكهروضوئية السيليكونية ، بجمع النتائج التي تحصلنا عليها في تجربتنا و نتائج أعمال سابقة ، يمكننا أن نستنتج أن درجة الحرارة تقلل من الجهد الناتج بدرجة كبيرة.

كلمات مفتاحية : الطاقة الشمسية , خلية كهروضوئية , جهد الدائرة المفتوحة .

Résumé :

Ce travail présent un essai expérimental qui vise à démontrer l'effet de la température ambiante sur la tension de circuit ouvert pour un éclairage constant, la tension de circuit ouvert V_{CO} est l'un des importants paramètres qui caractérise la cellule photovoltaïque au silicium. En recueillant les résultats que nous obtenons dans notre expérience et les résultats des travaux précédents, nous pouvons conclure que la température fait diminuer la tension V_{CO} d'un impact important.

Mots clés : énergie solaire, cellule PV, tension de circuit ouvert V_{CO} .

Abstract:

This work presents an experimental test that aims to demonstrate the effect of ambient temperature on the open circuit voltage V_{OC} for constant illumination, the open circuit voltage is one of the important parameters that characterizes the silicon photovoltaic cell. Collecting the results we obtain in our experiment and the results of previous work, we can conclude that the temperature make decrease the voltage V_{OC} of a significant impact.

Keywords:

Solar energy, Silicon photovoltaic cell, Open circuit voltage V_{OC} .