



République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Mémoire de fin d'études

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

Filière : Physique

Option : Physique des Matériaux

THÈME

**Modélisation et simulation du panneau solaire sous
différents rayonnement**

Préparé par :

MOUSSAOUI Hanène

Devant le jury :

Président : DAOUDI Salim

Rapporteur : IMAKHLAF Anis

Examineur : SAHNOUNE Yassine

Année Universitaire 2020-2021

Remerciements

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

*Après, je tiens à remercier Monsieur **Imakhlaf Anis** pour l'encadrement qu'il m'a assuré et ses précieux et judicieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce projet, sa confiance témoignée, sans oublier sa qualité humaine. Il trouve ici ma gratitude et ma reconnaissance profonde.*

Je tiens également à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :
Mes grand-mères Louisa Et Aicha.*

*Mes très chers parents, Ibrahim et Farida pour leur sacrifices, et qui n'ont jamais
cessé de m'encourager que Dieu me les garde.
Mes grands-pères Saïd et Abdallah.*

Mes chères sœurs Zinèb, Dallel, Allaa et Malek.

*Mon très cher frère Abdeljalil.
Mes chers Farid, Kamel et Walid.*

*Mes amis Halima, Sid Ali, Djazia, Rachida, Chayma, Sami et Hamza.
Mon encadreur Ms Imakhlaf.*

Sommaire

Introduction Générale.....

Chapitre 01

I.	Introduction.....	1
II.	Historique.....	1
	II-1 Dès l'Antiquité.....	1
	II-2 Au XVIIIème siècle.....	3
	II-3 Au XIXème siècle.....	4
	II-4 A partir du XXème siècle.....	5
III.	Le Soleil.....	7
	III-1- Définition.....	7
	III-2- La composition interne du soleil.....	8
	III-3- La composition externe du soleil.....	9
IV.	L'énergie.....	10
	IV-1- Définition.....	10
	IV-2- Les sources d'énergie.....	11
V.	L'énergie solaire.....	15
	V-1- Constante d'illumination.....	16
	V-2- La constante solaire.....	16
	V-3- L'Atmosphère.....	17
	V-4- La constante solaire au sol.....	18
	V-5- La masse d'air.....	19
VI.	Le rayonnement solaire.....	20
	VI-1- Rayonnement directe I.....	22
	VI-2- Rayonnement diffus D.....	22
	VI-3- Le rayonnement global G.....	22
	VI-4- Albédo.....	22
VII.	Paramètres Astronomiques.....	23
	VII-1- coordonnées équatoriales.....	23
	VII-2- coordonnées horizontales du soleil.....	24
VIII.	Paramètres géographiques.....	25
IX.	Les radiations solaires.....	26
X.	Conclusion.....	27

Chapitre 02

I.	Introduction.....	28
II.	Définition de la conversion photovoltaïque.....	29
III.	La cellule solaire.....	29
IV.	Circuit électrique équivalent.....	30
V.	Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire.....	31
VI.	Le mécanisme de la conversion photovoltaïque.....	33
VII.	Influence des différents paramètres sur la caractéristique I (V).....	35
	VII-1- Influence de l'éclairement et de la température.....	35

	VII-2- Influence de la résistance série et la conductance shunt.....	37
	VII-3- Influence du courant de saturation et du facteur d'idéalité.....	38
VIII.	Les modules photovoltaïques.....	39
	VIII-1- Association en série.....	39
	VIII-2- Association en parallèle.....	39
	VIII-3- Association en série parallèle.....	40
IX.	Paramètres électriques d'une cellule PV.....	41
X.	Conclusion.....	44

Chapitre 03

I.	Introduction.....	45
II.	Physique de rayonnement solaire.....	46
III.	Généralité sur les semi-conducteurs.....	50
IV.	Physique du composant photovoltaïque.....	54
V.	Effet PV.....	61
VI.	Caractéristique et réponse spectrale.....	64
VII.	Conclusion.....	73

Chapitre 04

I.	Introduction.....	74
II.	Résultats et discussion.....	75
III.	Commentaires.....	83
IV.	Conclusion.....	83

	Conclusion Générale.....	
	Bibliographie.....	

Liste de figures

Chapitre 01 :

Figure 1 : Incendie de la flotte romaine lors du siège de Syracuse en -212.

Figure 2 : Un miroir ardent.

Figure 3 : Coupe transversale d'une " boîte chaude" avec thermomètre.

Figure 4 : Plans et photos de la centrale thermique de Méadi en Egypte en 1913.

Figure 5 : La première voiture solaire.

Figure 6 : Coupe du Soleil et trajet des photons vers la surface.

Figure 7 : les énergies renouvelables et les énergies non renouvelables.

Figure 8 : la Structure verticale de l'atmosphère.

Figure 9 : la variation de la constante solaire en fonction de numéro de jour.

Figure 10 : Rayonnement solaire transmis à la Terre.

Figure 11 : Différents composants de rayonnement.

Figure 12 : Coordonnées solaires selon Le repère horizontal.

Figure 13 : Angle horaire, hauteur et Azimut du soleil par rapport à un plan.

Figure 14 : latitude et longitude.

Chapitre 02 :

Figure 1 : Structure standard d'une cellule solaire.

Figure 2 : Circuit électrique équivalent à une photopile.

Figure 3 : Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire.

Figure 4 : Notion de facteur de forme FF d'une cellule solaire.

Figure 5 : mécanismes fondamentaux de l'effet photovoltaïque.

Figure 6 : composition du panneau solaire et du générateur photovoltaïque.

Figure 7 : Caractéristiques $I(V)$ d'un panneau solaire pour différents éclaircissements.

Figure 8 : Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$.

Figure 9 : Influence de la résistance série sur la caractéristique $I(V)$.

Figure 10 : Effet de la résistance shunt sur la pente de la caractéristique en court-circuit.

Figure 11 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de N_s cellules identiques.

Figure 12 : Caractéristique $I(V)$ pour l'association parallèle.

Figure 13 : générateur photovoltaïque formé de N_{ms} module en série et N_{bp} branche en parallèle.

Figure 14 : schéma électrique d'une cellule PV.

Chapitre 03 :

Figure 1 : Rayonnement du corps noir en fonction de sa température.

Figure 2 : Spectre de rayonnement du soleil et raies d'absorption par l'atmosphère.

Figure 3 : Trois composantes du rayonnement solaire global.

Figure 4 : Résistivité du silicium en fonction de la concentration d'impuretés à 300 K.

Figure 5 : Comportement typique de la conductivité électrique en fonction de T.

Figure 6 : Bande d'énergie d'un semi-conducteur intrinsèque.

Figure 7 : dopage de type N et de type P.

Figure 8 : Les impuretés donneurs et accepteurs.

Figure 9 : Exemple de structures de bandes d'énergie de semi-conducteurs à gaps indirect (Ge et Si) et direct (AsGa).

Figure 10 : Absorption optique des semi-conducteurs à gap direct et indirect.

Figure 11 : Dopage des semi-conducteurs.

Figure 12 : Formation d'une jonction *p-n* entre deux semi-conducteurs dopés.

Figure 13 : Génération des paires électron-trou dans le réseau cristallin du silicium.

Figure 14 : Schéma de bande de la jonction *n-p* d'une cellule solaire.

Figure 15 : Pertes des porteurs photo-générés par transmission et excès d'énergie.

Figure 16 : Schéma et caractéristiques I-V d'une cellule.

Figure 17 : Réponse spectrale d'une cellule (rendement quantique).

Figure 18 : Schéma équivalent d'une cellule.

Figure 19 : Courant débité et tension aux bornes d'une cellule.

Figure 20 : Assemblage de cellules.

Figure 21 : Module de 230 W (doc. EDF-PWT) composé de 60 cellules (6×9) de 156 mm 156mm.

Figure 22 : Évolution des performances d'un module photovoltaïque en fonction de la température d'utilisation.

Chapitre 04 :

Figure 1 : Variation de l'irradiation annuelle en fonction de nombre du jour pour différents sites Algériens.

Figure 2 : Variation de puissance en fonction du potentiel pour différents sites Algériens.

Figure 3 : Variation du courant en fonction du potentiel pour différents sites Algériens.

Figure 4 : Variation de puissance en fonction du courant pour différents sites Algériens.

Liste des tableaux

Chapitre 01 :

Tableau 1 : Carte d'identité du Soleil.

Tableau 2 : valeurs de la constante solaire en fonction du nombre d'air masse.

Chapitre 03

Tableau 1 : Abréviations.

Chapitre 04

Tableau 1 : Variation de l'irradiation en fonction du site à 25 Mars.

Tableau 2 : Variation de l'irradiation en fonction du site à 20 Juin.

Tableau 3 : Variation de l'irradiation en fonction du site à 15 Aout.

Introduction Générale

Introduction générale

De nos jours, l'homme a à sa disposition sur la Terre de nombreuses sources d'énergie. Les plus utilisées sont les énergies dites fossiles (charbon, pétrole, gaz) car non renouvelables et issues d'un long processus de transformation de la matière organique, parce qu'elles sont faciles à exploiter, et rentables. Cependant, pour différentes raisons, il s'avère que ces énergies ne peuvent plus être utilisées. Tout d'abord, les réserves d'énergie fossiles commencent à s'amoinrir. Ensuite, en raison de la très forte demande en provenance des pays en voie de développement comme la Chine et l'Inde pour ne pas les citer, les prix de ces énergies ne cessent d'augmenter, les rendant inabordables pour certaines personnes. Et puis, lors de leur utilisation, ces énergies émettent une grande quantité de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, notamment) qui participent fortement au réchauffement planétaire, qui devient un problème grandissant pour la Terre et les êtres vivants.

De nombreuses énergies non polluantes, ou renouvelables, ou abondantes partout à la surface du globe pourraient pourtant être utilisées par l'homme. Entre autres, on distingue l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire. Mais l'énergie éolienne n'est pas assez rentable, au sens qu'elle ne permet pas de produire beaucoup d'énergie par unité de surface. L'énergie nucléaire, même si elle a un fort rendement, produit des déchets très polluants et peu dégradables. De plus elle fait peur en raison des graves accidents qui peuvent se produire (catastrophe de Tchernobyl), et en raison du risque de prolifération nucléaire. L'énergie hydroélectrique a un bon rendement mais, un fort impact écologique et humain, n'est pas disponible partout, et la plupart des espaces qui lui sont propices sont déjà saturés de barrages (1).

Actuellement, les énergies renouvelables sont d'actualité et très favorisées du fait qu'elles sont abondantes et non polluantes. Parmi les énergies renouvelables, celle qui est la plus développée, la plus populaire et la plus répandue est : l'énergie solaire. C'est une énergie qui est très abondante, inépuisable et durable car elle peut être employée dans différents secteurs : l'agriculture, l'habitat, les centrales électrique; et pour différents domaines : chauffage, électricité, chauffe-eau, dessalement des eaux salines. De plus nous avons le choix entre différentes installations pour optimiser son rendement selon son utilisation ainsi on trouve la filière photovoltaïque où la conversion se fait directement via le module solaire qu'est fabriqué par des matériaux qu'on appelle semi-conducteurs comme le silicium, le germanium

Introduction Générale

et autre, et on trouve la filière photo thermique où le flux solaire est convertit en chaleur afin de l'utiliser pour le chauffage du fluide caloporteur et économiser en terme d'utilisation des ressources fossiles comme le pétrole et le gaz et atténuer les émissions du gaz à effet de serre. L'énergie photovoltaïque a connu un développement formidable en l'espace de 50 ans. La recherche spatiale a permis de financer les recherches initiales. La compréhension des phénomènes physiques qui a découlée de ces recherches a permis de développer de nombreux matériaux avec succès par la suite, et petit à petit, avec la baisse du cout des matières utilisées et une meilleure maitrise de la technologie, les panneaux photovoltaïques ont quitté l'espace pour être utilisés sur la Terre. Mais comment exploiter au mieux cette énergie? Et quels sont les enjeux liés à son utilisation ?

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839. Cette conversion d'énergie peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule photovoltaïque (PV). La quantité d'énergie électrique ainsi générée peut varier en fonction du matériau utilisé, des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité à collecter les électrons avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau. L'association possible de plusieurs cellules PV en série/parallèle permet d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande. Ces associations constituent un générateur photovoltaïque (GPV) avec des caractéristiques courant-tension $I(V)$ spécifiques, non-linéaires et présentant des points de puissance maximale (PPM) dépendant du niveau d'éclairement, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble (2).

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

Chapitre 01

Généralités sur le gisement solaire

I. Introduction

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures (3).

II. Historique

L'utilisation de l'énergie solaire est un fait très ancien. L'énergie solaire est à l'origine de la vie sur Terre: les premiers organismes photosynthétiques l'utilisaient déjà il y a 3,6 milliards d'années pour produire leur matière organique. Le but de cette sous-partie est de montrer que l'évolution des techniques d'exploitation de l'énergie solaire s'est faite en plusieurs phases (1).

II-1 Dès l'Antiquité

Dans l'antiquité les Grecs et les Romains savaient utiliser l'énergie solaire. Pour allumer la flamme des jeux olympiques, ils utilisaient une sorte de miroir parabolique primitif, le skaphia, car pour eux seuls les rayons du Soleil étaient assez purs pour allumer cette flamme.

Le philosophe grec Socrate (-470; -399) a enseigné l'architecture bioclimatique en expliquant que les maisons orientées au sud bénéficiaient de la chaleur du Soleil en hiver, tandis qu'en

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

été, le soleil se retrouvait quasiment au-dessus du toit laissant les maisons dans une extrême fraîcheur.

On raconte qu'Archimède (-287; -212) réussit à enflammer des bateaux de la flotte romaine qui assiégeait Syracuse en -212, grâce à de nombreux miroirs géants en bronze polis tous orientés sur le même point du navire. Mais ce fait a fait débat au cours des siècles, certains savants jugeant en effet cette histoire improbable. Aujourd'hui on est pourtant presque sûr que cette histoire est un mythe, si l'on en croit l'expérience réalisée par des étudiants du MIT (Massachusetts Institute of Technology) qui ont réitéré l'expérience d'Archimède en 2005 et on réussit à enflammer en 10 minutes et à 30 mètres une reconstitution de bateau romain, qui cependant était sèche et immobile, ce qui a facilité l'enflamment (1).



Figure 1 : Incendie de la flotte romaine lors du siège de Syracuse en -212 (1).

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

II-2 Au XVIIIème siècle



Figure 2 : Un miroir ardent (1).

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

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

Le célèbre chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) invente en 1774 un très puissant four solaire dans le but de faire fondre des métaux sans que ceux-ci soient pollués par les produits des combustibles. Pour cela il utilise deux lentilles convergentes montées comme un télescope et dont les foyers sont alignés sur une droite parallèle aux rayons du Soleil, et qui lui permettent d'obtenir une température d'environ 1755°C.

Le suisse Horace Bénédict de Saussure (1740; 1799) invente en 1767 le tout premier four solaire qu'il appelle "boîte chaude" qui lui permet de démontrer l'effet de serre. Il obtient une température de 160°C (1).

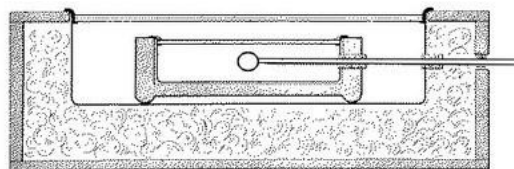


Figure 3 : Coupe transversale d'une " boîte chaude" avec thermomètre (1).

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

II-3 Au XIXème siècle

Le XIXème est marqué par la découverte de l'effet photovoltaïque et le perfectionnement des techniques d'exploitation du solaire thermique.

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

En 1872, l'ingénieur suédois Charles Wilson construit un distillateur solaire au Chili dans le but d'alimenter en eau douce une mine. Sur une surface de 4700 m², ce distillateur produisit pendant 40 ans 23000 litres d'eau par jour à un prix minime.

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

Le professeur français Augustin Mouchot inventa le principe de poursuite du Soleil avec un capteur à concentration. En 1873, grâce à une subvention du conseil général de Tours il construit une machine de 4m²qu'il présente en 1875 à l'Académie des Sciences. En 1877, c'est une subvention du conseil général d'Alger qui lui permet de construire un nouveau capteur de 20m² couplé à une machine à vapeur qu'il expose lors de l'Exposition Universelle de Paris de 1878. L'engin, d'une puissance d'un demi-cheval (368 W), permet d'imprimer le journal de l'Exposition Le Soleil à raison de 500 exemplaires/heures. La machine eut un grand succès et fut primée. Augustin Mouchot avait déjà deviné que les énergies fossiles que les occidentales commençaient à utiliser n'étaient pas inépuisables. C'est pour cela qu'il préconisait et étudiait l'énergie solaire qui selon lui était déjà l'énergie du futur. C'est ce qu'il écrivait dans le livre qu'il publiait en 1869, *La Chaleur Solaire et ses Applications Industrielles* (1).

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

II-4 A partir du XXème siècle

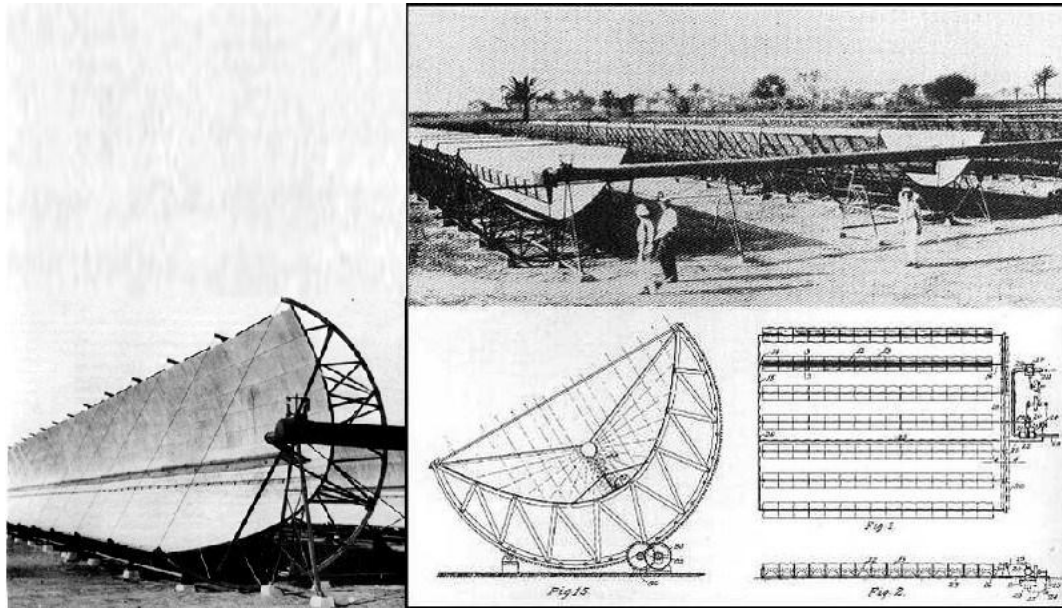


Figure 4 : Plans et photos de la centrale thermique de Méadi en Egypte en 1913 (1).

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

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

Le français Félix Trombe (1906; 1985) invente le premier four solaire à concentration: en 1944, lors de leur fuite, les allemands abandonnent un projecteur de DCA. Ces projecteurs

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

très puissants qui permettaient de repérer les avions ennemis dans le ciel nocturne sont des miroirs paraboliques orientables au foyer duquel on plaçait une puissante ampoule ce qui donnait un faisceau de lumière parallèle. Trombe décide d'utiliser de réutiliser le projecteur abandonné à l'envers et de jour. Le projecteur est placé de telle manière que les rayons du soleil sont concentrés au foyer du miroir. Quand on place une bûche de bois au niveau du foyer celle-ci s'enflamme instantanément.

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

Il faut attendre 1954 pour voir la création de la toute première cellule photovoltaïque au silicium. Elle est mise au point par les américains Gerald Pearson, Daryl Chapin et Calvin Fuller, des laboratoires de la Bell Téléphone.

Le four de Montlouis

Mais la technologie mise au point est hors de prix: non seulement elle à un faible rendement mais en plus elle nécessite l'utilisation du silicium très cher à l'époque. Il faut attendre 1958 et l'invention d'une cellule d'un rendement de 8% pour son premier emploi par l'industrie aérospatiale. Le premier satellite équipé de cellules photovoltaïques, Vanguard 1, est donc lancé en 1958.

La première maison alimentée en électricité par des cellules photovoltaïque est construite en 1973. Puis le choc pétrolier de 1980 donne un grand élan aux technologies solaires devenant d'un coup moins chères. De nombreux projets de centrales thermiques solaires apparaissent dans le monde, comme la centrale Thémis en France dont la construction s'étale 1980 à 1982. En Australie, la 1ère voiture solaire parcourt 4000km. Indépendamment du pétrole, de nombreux petits appareils portatifs sont équipés de cellule photovoltaïque comme des calculatrices ou des montres (1).



Figure 5 : La première voiture solaire (1).

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

Mais avec le contre-choc pétrolier de 1986, de nombreux projets sont arrêtés et en France la centrale Thémis est fermée.

Mais aujourd'hui, dans un contexte avéré de réchauffement climatique et de flambée des prix des énergies fossiles, l'énergie solaire est de nouveau propulsée sur le devant de la scène.

L'exploitation du solaire par l'homme s'est donc déroulée en 3 phases:

- La découverte (Antiquité), ET redécouverte (XVIIIème siècle);
- L'expérimentation (XVIIIème ET XIXème siècles);
- Le développement à grande échelle des moyens d'exploitation (XIXème et XXème siècles).

Et elle n'est pas un fait récent, contrairement à ce que nous avons souvent tendance à le penser (1).

III. Le Soleil

III-1- Définition :

Le Soleil est une étoile, la seule du système solaire, et la plus proche de nous. La plus proche après elle est Proxima du Centaure, située à 4,2 année lumières du Soleil (1).

Le soleil reste jusqu'à présente la plus importante source d'énergie malgré la distance considérable qui le sépare de la terre (149.6×10^6 de kilomètres).

Il s'agit d'une immense sphère lumineuse composée principalement de gaz ionisé, et du plus grand corps céleste du système solaire. Il est si grand qu'il pourrait contenir plus d'un million de planètes Terre.

La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimé à 90×10^{15} GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que 180×10^6 GW. Arrivant à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dues principalement aux phénomènes d'absorption et de diffusion. De là, on introduit la notion de l'éclairement comme étant la densité de puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux, dans les conditions atmosphériques optimales. Cette densité de puissance atteinte 1 kW/m^2 pour un site situé au niveau de la mer.

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires (4).

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m^2 crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m^2 lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

Carte d'identité du Soleil :

Âge	4,6 milliards d'années
Diamètre équatorial	1 392 530 km
Circonférence	4 372 544 km
Distance par rapport à la Terre	149 598 000 km
Composition (éléments / pourcentage)	Hydrogène 73,46% Hélium 24,85% Oxygène 0,77% Carbone 0,29% Fer 0,16% Néon 0,12% Azote 0,09% Silicium 0,07% Magnésium 0,05% Soufre 0,04% Autres éléments 0,01%
Température	Noyau 15 000 000 K Zone radiative 1 500 000 K Zone de convection et photosphère 6 000 K
Densité (eau=1)	1,41

Tableau 3 : Carte d'identité du Soleil (1).

III-2- La composition interne du soleil

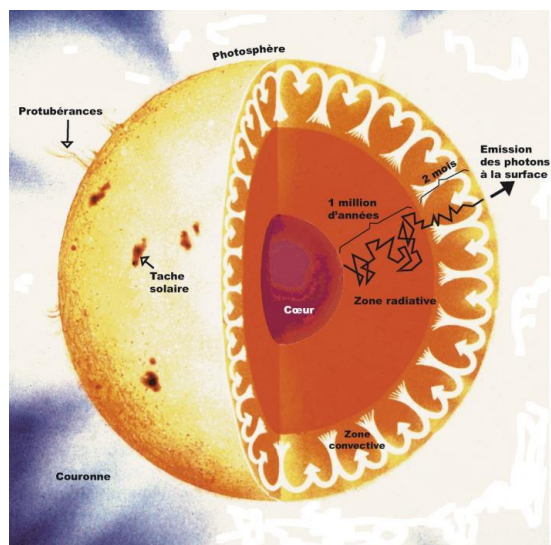


Figure 6 : Coupe du Soleil et trajet des photons vers la surface (1).

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

a- Le cœur du soleil

De 0 à 210000 Km. Il représente 50 pour cent de la masse du Soleil. Cette région est le lieu des réactions de fusion nucléaire. La température est de 15 millions de degrés au centre, elle diminue quand on s'éloigne du centre. Lorsqu'elle atteint 7 millions de degrés, la chaleur devient insuffisante pour entretenir les réactions de fusion (5).

b- La zone radiative

De 0 à 480000 km. C'est la partie interne de soleil, elle englobe le cœur, dans cette zone, l'énergie est transportée par radiation. La température de sa partie la plus externe est de 2 millions de degrés. Une zone dite radiative avec un cœur où les réactions nucléaires transforment les ions hydrogène en hélium ; cœur et zone radiative représente 98 pour cent de la masse du soleil (5).

c- La zone de convection

De 480000 à 690000 km. Cette zone représente 2 pour cent de la masse du soleil. De turbulents mouvements de plasma assurent le transfert d'énergie vers l'extérieur. Le nom de ces zones est lié au mode de transport de l'énergie, produite dans la partie centrale et évacuées ensuite vers l'extérieur du soleil. Le transport se fait soit par radiation (propagation sous forme d'ondes électromagnétiques) soit par convection (c'est le mouvement de la matière qui assure le transfert de la chaleur) (5).

Elle s'étend de 0,7 rayon solaire à 400 km de la surface du Soleil environ. Elle permet les échanges d'énergie entre la zone radiative et la photosphère. En raison de sa faible densité, les échanges dans cette zone se font par convection: les gaz chauds remontent à la surface, se refroidissent, puis redescendent, se réchauffent, remontent, et ainsi de suite (1).

III-3- La composition externe du soleil

Les couches externes du soleil constituent son « atmosphère »

a- La photosphère

C'est la surface visible du soleil, elle n'est pas une surface solide, mais le lieu où les propriétés du milieu changent radicalement. A ce niveau, la matière du soleil, opaque à l'intérieur, devient transparent. Elle contribue pour 99 pour cent au rayonnement solaire. Cette surface de quelque centaine de kilomètre, sa température est d'environ 6000 (6).

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

Elle s'étend sur les derniers 400 km du rayon de l'étoile. Une partie de la lumière visible que nous percevons y est produite. Elle est composée de gaz moins denses que les autres couches du Soleil (1).

b- La chromosphère

La chromosphère est la partie basse de l'atmosphère solaire, elle contribue très peu au rayonnement du soleil. C'est une couche très hétérogène d'une épaisseur moyenne de 2000 à 3000 km. Sa température est de plusieurs milliers de degrés et croît vers l'extérieur pour atteindre 20000C. Elle est visible de courts instants lors des éclipses totales (5).

c- La couronne

La couronne est la couche la plus externe de l'atmosphère du soleil. Sa température est de l'ordre du million de degrés et sa densité est 100 millions de fois plus faible que celle de la terre. Elle s'étend jusqu'à des distances égales à plusieurs rayons solaires et se fond dans le milieu interplanétaire. La photosphère est tellement brillante qu'elle empêche d'observer la couronne, sauf lors des éclipses totales du soleil (5).

IV. L'énergie

IV-1- Définition

Le terme énergie est tiré du Grec « enegon » qui signifie force en action. L'énergie c'est la capacité de fournir un travail, d'imprimer un mouvement, d'élever la température (chauffer un logement, cuire des aliments, etc.). Elle est obtenue par l'utilisation de forces naturelles comme le vent ou l'énergie solaire, de la combustion de carburants ou de combustibles (pétrole, essence, gazole, fioul, gaz naturel, charbon, bois, etc.) ou de l'électricité (7).

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

IV-2- Les sources d'énergie

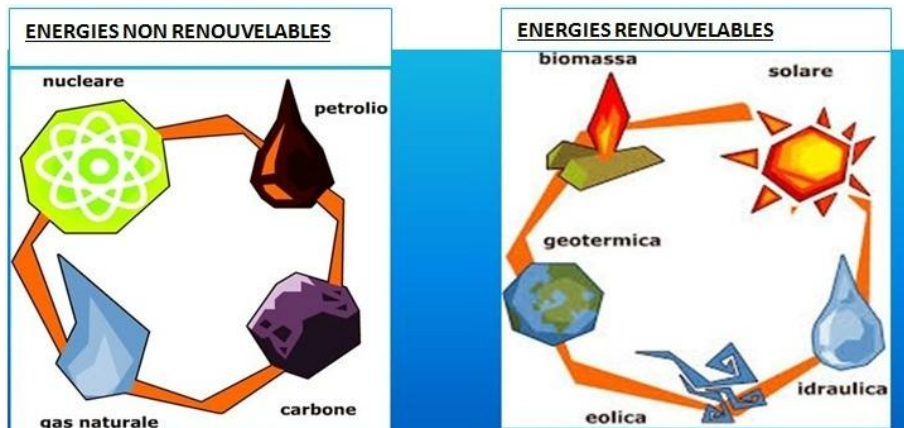


Figure 7 : les énergies renouvelables et les énergies non renouvelables.

a- Les énergies non renouvelables

Les énergies non renouvelables sont des principalement les combustibles fossiles (pétroles, gaz naturel, charbon), qui sont des formes d'énergie chimique provenant de la biomasse stockées au cours de millénaire passés, ainsi que la fusion nucléaire dérivée de l'uranium. Comme leur nom l'indique, les réserves correspondant à ces sources d'énergie sont limitées et se renouvellent pas, du moins pas dans des périodes de temps à l'échelle de l'homme (8).

b- Types des fossiles

Le pétrole : est un mélange complexe d'éléments chimiques contenant de l'hydrogène et du carbone, appelés hydrocarbures, qui se forme naturellement dans des nappes souterraines présentes dans les roches sédimentaires. Au sens large, il inclut les produits non raffinés (primaire) et les produits raffinés (secondaires). Le pétrole brut est la principale matière première servant à fabriquer un très grand nombre de produits pétrolière secondaire (mazout, diesel, fioul, essence, lubrifiant, etc.) l'industrie pétrolière utilise plusieurs unités de mesure, en fonction de la masse (tonne métrique) ou en fonction du volume (litre, baril ou mètre cube). Plusieurs pays utilisent plutôt la tonne d'équivalent pétrole (Tep) dans leur bilan énergétique (9).

Le gaz naturel : désigne plusieurs gaz, essentiellement du méthane, qui sont présents dans les gisements souterrains sou forme liquide ou gazeuse. Pour faciliter le transport sur de longues distances, on réduit sa température à -160 degrés Celsius pour produire du gaz naturel

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

liquéfié (GNL). Les données sur le gaz naturel sont indiquées soit en unité d'énergie (Téra joule –TJ), soit en unité de volume (million de mètres cubes) (9).

Le charbon : est essentiellement constitué de carbone. Il existe plusieurs types de charbon ; et de produits dérivés du charbon regroupés sous l'appellation « combustibles solides et gaz manufacturés ». Mentionnons que dans la plupart des statistiques sur l'énergie, on exclut le bois de chauffage et le charbon de bois pour plutôt les inclure dans la catégorie des énergies renouvelables. En fonction de leur pouvoir calorifique décroissant, on distingue trois catégories de charbon : la houille (charbon à vapeur), le lignite et le charbon sous-bitumineux. Les types de charbon se différencient par leurs caractéristiques physiques et chimiques (9).

L'énergie nucléaire : il s'agit d'un phénomène naturel produit par la fusion de noyaux d'atomes. L'usage civil de l'énergie nucléaire consiste, quant à elle, dans la fission de noyaux d'atomes qui libèrent une grande quantité de chaleur convertie le plus souvent en électricité. On utilise pour cela un métal, l'uranium, dont l'isotope « U235 » est le seul élément fissile naturel. L'énergie nucléaire ne rejette aucun gaz à effet de serre, mais dégage des particules sous forme de rayonnements, la radioactivité. Elle est donc neutre à l'égard du réchauffement climatique, mais pose le problème du devenir des déchets radioactifs (9).

c- Avantages et inconvénients des énergies non renouvelables

➤ Avantages des énergies renouvelables

- ✓ Largement disponible, du moins actuellement ;
- ✓ Simple à utiliser et ingénier, étant donné qu'il est basé sur un processus simple combustion ;
- ✓ Peu coûteux ;
- ✓ Facile à transporter.

➤ Inconvénients des énergies renouvelables

- ✓ Contribuer au réchauffement de la planète, ou le réchauffement planétaire ;
- ✓ Causes de la pollution comme les pluies acides, ce qui fait mal les animaux et les plantes à travers le monde ;

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

- ✓ Source potentielle d'instabilité politique mondiale, étant donné que nombreux pays sont dépendants aux autres nations de ces ressources énergétiques non-renouvelables ;
- ✓ Bien que ces ressources énergétiques ont un certain nombre d'avantages. Les inconvénients sont à l'origine des nations, les sociétés et les propriétaires de maison individuelles à prendre des mesures pour élargir notre accès aux ressources énergétiques renouvelables comme l'eau, l'énergie éolienne et solaire.

d- Les énergies renouvelables

Est dite « renouvelable » toute sources d'énergie, autre que les combustibles fossiles et la fission nucléaire, dont la consommation ne limite pas son utilisation future. On considère donc qu'une énergie est renouvelable si elle est produite à un rythme supérieur ou égal à sa consommation (10).

e- Types des énergie renouvelables

L'éolien : Les aérogénérateurs, mis en mouvement par le vent, fabriquent des dizaines de millions de mégawatheures. Utile dans les sites isolés, cette électricité alimente aussi les grands réseaux de distribution. Les éoliennes mécaniques servent à pomper de l'eau dans de nombreux pays (9).

La petite hydroélectricité : Elle désigne les centrales ne dépassant pas 10 MW de puissance. Des turbines installées sur les cours d'eau utilisant la force motrice des chutes pour générer de l'électricité. Celle-ci est injectée dans le réseau ou alimente des sites qui n'y sont pas raccordés. Les petites centrales avec les grands barrages et les usines marémotrices forment la filière hydraulique, deuxième source d'énergie renouvelable dans le monde (11).

La biomasse : masse des végétaux réunit le bois, la paille, les rafles de maïs, le bio gaz et les biocarburants :

- Le bois énergie représente 14 pour cent de la consommation énergétique mondiale. Issu des déchets de la forêt ou des industries du bois, il est brûlé pour produire de la chaleur.
- Le bois gaz est issu de la fermentation des déchets organiques. Sa combustion produit de la chaleur, mais également de l'électricité par cogénération.
- Les biocarburants proviennent de plantes cultivés (tournesol, betterave, colza, etc.). le biodiesel (ou ester méthylique d'huile végétale, EMHV), l'éthanol, et son dérivé,

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

l'éthyle-tertio-butyle-éther, l'ETBE sont les plus courants. Ils sont mélangés à de l'essence ou à du gazole (11).

La géothermie : cette énergie utilise la chaleur du sous-sol. Avec une température moyenne ou faible, on chauffe des locaux, alors qu'une température élevée permet de produire de l'électricité par vapeur interposée (11).

Le solaire photovoltaïque : des modules solaires produisent de l'électricité à partir de la lumière du soleil. Ils alimentent des sites isolés ou le réseau de distribution général. L'intégration à l'architecture est l'avenir du photovoltaïque dans les pays industrialisés (11).

Le solaire thermique : les capteurs solaires produisent de l'eau chaude sanitaire. Ils peuvent être aussi utilisés pour le chauffage, idéalement par le sol. Plusieurs dizaines de millions de mètres carrés de capteurs sont installés dans le monde. Les capteurs solaires dits « haute température » produisent de l'électricité par vapeur interposée : quelques grandes centrales de ce type existent dans le monde (11).

f- Avantages et inconvénients des énergies renouvelables

➤ Avantages

- Les énergies renouvelables permettent d'économiser les ressources d'énergies fossiles, qui au rythme de notre consommation, risquent de s'épuiser définitivement dans un avenir proche à l'échelle humaine.
- L'utilisation des énergies renouvelables est principalement motivée par ces effets sur la réduction des gaz à effet de serre, cause significative du réchauffement climatique. La production de gaz à effet de serre liée aux énergies renouvelables existe mais elle reste très inférieure à celle produite par la combustion des ressources fossiles. Elle est principalement issue de la fabrication des systèmes d'exploitation (panneaux solaires, éoliennes, etc.) nécessaires pour puiser le flux énergétique.
- Le développement, la production et l'utilisation d'équipements capables de convertir une énergie renouvelable en énergie consommable pour nos besoins quotidiens est un générateur d'emploi. Cela fait appel au savoir-faire de manufacturiers, d'installation, de personnels de maintenance mais aussi de personnels administratifs pour gérer le développement ainsi que le déploiement de ce type de énergie. Les ressources étant

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

exploitées localement, leur utilisation contribue au développement à l'échelle d'une collectivité territoriale.

- La consommation d'énergie propre économise les ressources naturelles tout en générant des économies pour le consommateur. En effet, la raréfaction de certaines énergies fossiles comme le pétrole et les moyens d'extraction que cela implique entraînent la flambée des prix. Les recours aux énergies renouvelables est donc le moyen de limiter la consommation de ressources associées à des tarifs en hausse. Aujourd'hui, l'utilisation des énergies renouvelables encouragée par des aides au financement et des propositions de rachat d'énergie comme pour la production décentralisée d'électricité (photovoltaïque et éolien), laisse entrevoir de nouveaux modes de consommation.

➤ Inconvénients

- Avoir recours aux énergies renouvelables signifie adapter les infrastructures de production par de grands chantiers. Exploiter de telles énergies peut avoir un impact négatif sur les écosystèmes (barrages, inondations de vallées). Les projets sont chers à mettre en œuvre, et « énergies renouvelables » ne rime pas toujours avec « énergie propre » : construire les sites entraîne une production de CO₂, et l'utilisation d'énergies renouvelables peut dégager de la chaleur. A ce jour, le seul rendement des énergies renouvelables ne suffirait pas à satisfaire la demande énergétique mondiale ; d'où un recours encore fort au pétrole, au charbon.

V. L'énergie solaire

C'est une gigantesque bombe thermonucléaire dont la puissance, émise sous forme de photons, représente un chiffre considérable: $3,82 \cdot 10^{26}$ Watts. C'est le résultat de la combustion de 596 millions de tonnes par seconde d'hydrogène convertis en 592 millions de tonnes par seconde d'hélium. La perte, 4 millions de tonnes/seconde, se traduit sous forme de rayonnement gamma. Chaque cm² de sa surface émet une énergie de 6 kilowatts. Mais il n'arrive sur Terre que 5 milliardièmes ($5 \cdot 10^{-9}$) de cette puissance.

Cette pile thermonucléaire fonctionne grâce à la transformation de 4 noyaux d'atomes d'hydrogène qui fusionnent, pour fournir 1 noyau d'atome d'hélium avec la libération d'une énergie de 25 000 mégawatts par gramme et par seconde.

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

Cette énergie provient du centre. La pression comprime les noyaux d'hydrogène et permet ainsi la fusion. Il ne faut pas confondre la fusion avec la fission, qui casse les noyaux dans une bombe atomique. La fusion d'un gramme d'hydrogène libère 140 milliards de calories, la calorie étant la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un gramme d'eau de 15°C à 16°C.

Le transfert d'énergie du centre vers la surface s'effectue par rayonnement et par convection. La zone de convection est limitée par la photosphère, épaisse de 200 km, et appelée ainsi parce que presque la totalité du rayonnement visible provient d'elle. Elle a une apparence granuleuse, provoquée par la turbulence de la partie supérieure de la zone de convection.

Cette pression empêche les photons d'atteindre la surface dès leur création. Ainsi, ils mettent 2 millions d'années pour sortir des profondeurs du Soleil, tandis qu'il leur faut 8 minutes pour arriver sur Terre. Quant aux neutrinos, fabriqués en même temps, ils sortent instantanément. Absolument rien, n'est capable de les arrêter. Par conséquent, il est très difficile de les étudier. Ainsi, la recherche des neutrinos nous renseigne sur la lumière qui sortira dans 2 millions d'années du Soleil. Aujourd'hui, le taux est inférieur à ce que l'on attendait. Cela peut signifier que dans 2 millions d'années, la température sera plus basse avec des conséquences très importantes sur l'environnement terrestre (12).

V-1- Constante d'illumination

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (*pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km*), c'est ce que l'on appelle **la constante solaire (égale à 1367W/m²)** (13).

Le rayonnement est un phénomène de transfert d'énergie via des ondes électromagnétiques L'énergie solaire apporte + de 99.9% de l'énergie totale utilisée par le climat ainsi la quantité de rayonnement solaire (RS) interceptée à l'extérieure de l'atmosphère par le disque planétaire s'appelle la constante solaire ou bien constante d'illumination.

V-2- La constante solaire

La constante solaire est la puissance reçue hors atmosphère par unité de surface placée perpendiculairement au rayonnement solaire (14).

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

E_{sc} ($w.m^{-2}$) est la constante solaire estimée à $1353 w.m^{-2}$ jusqu'au début des années 1970. Cette constante représente le flux d'énergie lumineuse issue du soleil.

La variation de cette valeur est particulièrement fonction de la distance Terre soleil provenant de l'excentricité de l'orbite de la Terre. Des mesures précises effectuées par les satellites ont permis de donner ces variations au cours de l'année avec des valeurs comprises entre $1322 w.m^{-2}$ en Juillet et $1412 w.m^{-2}$ en Janvier. L'organisation météorologique internationale a finalement retenue comme constante solaire standard : $E_0 = 1367 w/m^2$

Avec cette valeur on obtient $T_s = 5777 k$ et $M_s = 63,2 w/m^2$ (15).

V-3- L'Atmosphère

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

✓ La structure de l'atmosphère :

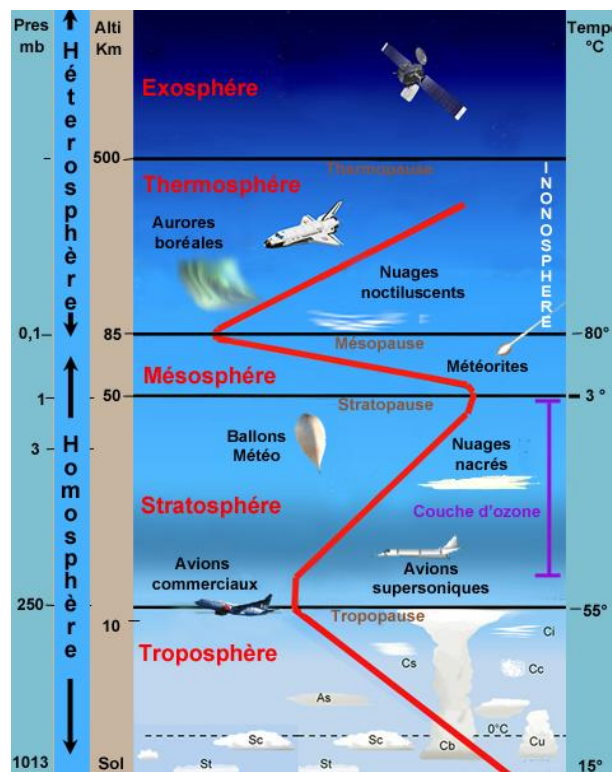


Figure 8 : la Structure verticale de l'atmosphère (16).

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

✓ 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, absorption, réfraction par des gaz de température et densité croissante (16).

V-4- La constante solaire au sol

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

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

Équation 1

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

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

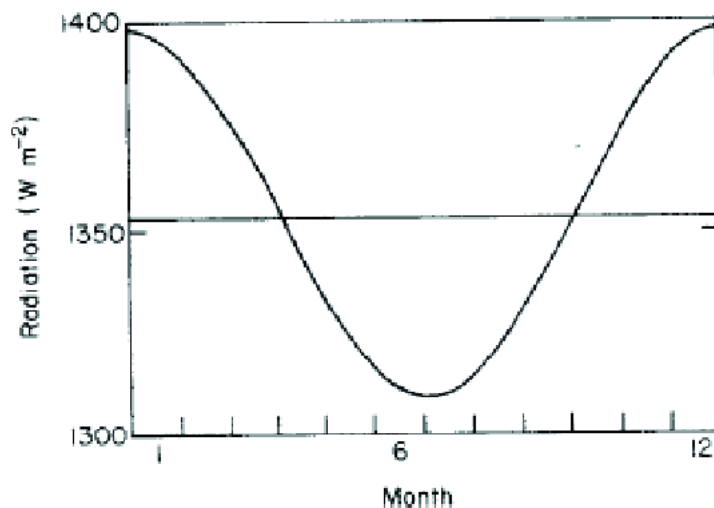


Figure 9 : la variation de la constante solaire en fonction de numéro de jour.

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

V-5- La masse d'air

La masse gazeuse totale traversée est de 10 tonnes/m², elle équivaut à 7,8 km d'atmosphère ramenée aux conditions de température et de pression dites normales : T=0°C ; P=1013 mbar. Si ces gaz étaient tous ramenés aux conditions normales, en 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, quelque mm de Krypton, de méthane de NO et de NO₂ et seulement 5 mm d'ozone (16).

Prenant pour référence unité, l'épaisseur verticale de l'atmosphère moyenne réduite à 7,8 km (conditions dites normales), supposant cette couche plane et stratifiée horizontalement, la longueur du trajet rectiligne d'un rayon lumineux incliné d'un angle h par rapport à l'horizontale sera donnée par la forme :

$$OM = \frac{OA}{\sin h}$$

Équation 2

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

$$m = \frac{p}{1013} \times \frac{1}{\sin h} \times \exp^{\frac{-z}{7,8}}$$

Équation 3

Avec :

P (hPa ou mbar) : pression,

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

Z (Km) : altitude.

Dans les conditions normales et au niveau de la mer (ou z=0 Km, p=1013hPa ou mbar), on obtient l'expression suivante :

$$m = \frac{1}{\sin h}$$

Équation 4

On cite autres conditions tel que :

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

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

AM₁ : Lorsque le soleil est au zénith, on dit que l'on a les conditions AM₁ car les rayons lumineux traversent une épaisseur d'atmosphère unité (7.8 Km).

AM_{1,5} : Le nombre 1,5 indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1,5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith.

AM₂ : On obtient les conditions AM₂ lorsque le soleil est situé à 30° sur l'horizon.

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

Le Tableau (2) indique les valeurs de la constante solaire en fonction du nombre d'air masse.

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

Tableau 4 : valeurs de la constante solaire en fonction du nombre d'air masse (16).

VI. Le rayonnement solaire

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800 K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 µm) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0,75 et jusqu'à 4 µm environ). L'énergie véhiculée par ce rayonnement, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairage de 340 W.m⁻² (Figure 10). Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d'éclairage qu'apporte le soleil au système Terre+ atmosphère, environ 100 W.m⁻² sont réfléchis vers l'espace ; seul le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la Terre (17) (18).

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

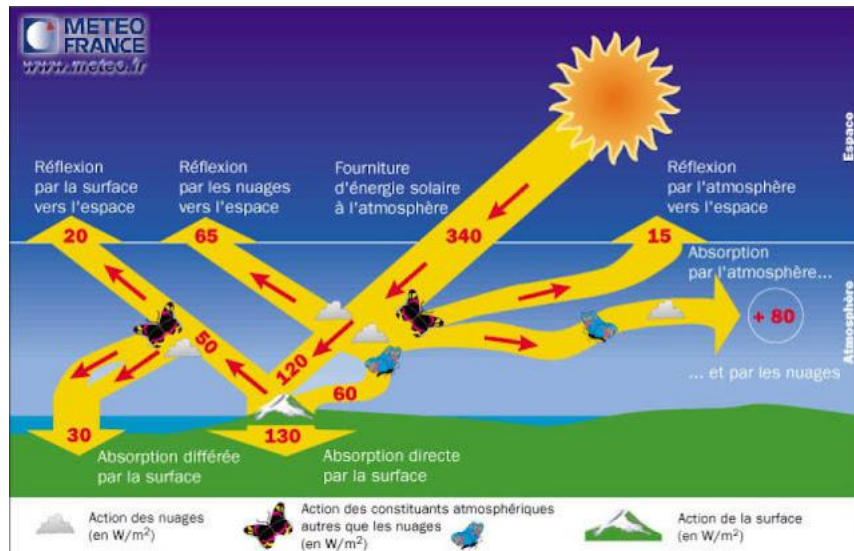


Figure 10 : Rayonnement solaire transmis à la Terre.

La figure 10, publiée par Météo France, montre que près du quart de cet éclaircissement incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère : pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages (65 W.m^{-2}), le reste (15 W.m^{-2}) étant dû aux autres constituants atmosphériques comme les gaz et aérosols. Il reste donc 180 W.m^{-2} qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont les deux tiers (120 W.m^{-2}) se font directement, le reste (60 W.m^{-2}) s'effectuant par diffusion vers le bas.

Intervient alors un processus complexe d'interaction entre la diffusion vers le bas et la réflexion. Sur les 180 W.m^{-2} incidents, la surface terrestre, qui possède un albédo moyen élevé, devrait renvoyer dans l'atmosphère environ 50 W.m^{-2} . En fait, la majeure partie de l'éclaircissement qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard et s'ajoute partiellement aux $180 - 50 = 130 \text{ W.m}^{-2}$ de rayonnement solaire non réfléchis à son contact. Bien que l'absorption du rayonnement solaire soit un phénomène continu, on peut simplifier la compréhension du processus précédent en supposant que les 50 W.m^{-2} réfléchis par la surface du globe se répartissent entre 20 W.m^{-2} définitivement renvoyés vers l'espace interplanétaire et 30 W.m^{-2} qui reviennent à la surface terrestre après diffusion différée vers le bas. Cette énergie s'ajoute aux 130 W.m^{-2} initialement non réfléchis pour constituer approximativement les 160 W.m^{-2} qu'absorbe la surface terrestre (17).

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

VI-1- Rayonnement directe I

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

VI-2- Rayonnement diffus D

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

VI-3- Le rayonnement global G

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

Figure Les trois composantes du rayonnement solaire global.

VI-4- Albédo

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

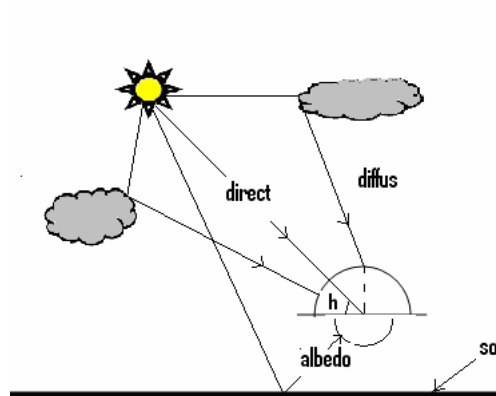


Figure 11 : Différents composants de rayonnement.

$$L' \text{albedo}_{AB} = \frac{\text{énergie réfléchi}}{\text{énergie recue}}$$

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

VII. Paramètres Astronomiques

VII-1- coordonnées équatoriales

a- La déclinaison δ

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial (figure.8). La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année : elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ses deux valeurs extrêmes au solstice d'hiver ($-23^{\circ},27'$) et au solstice d'été ($+23^{\circ},27'$). Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Cooper (19).

$$\delta = 23,45^{\circ}(\sin(\frac{360}{365} + nj284)) \quad \text{Équation 5}$$

b- L'angle horaire ω (ah)

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi vrai. L'angle horaire est donné par la relation suivante : $\omega = 15(TSV - 12)$ où TSV est le temps solaire vrai (figure 11) (19).

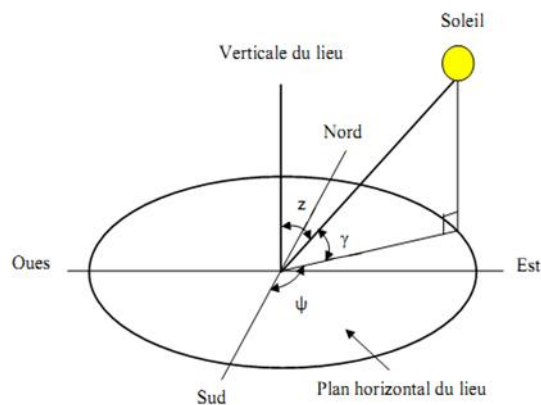


Figure 12 : Coordonnées solaires selon Le repère horizontal.

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

VII-2- coordonnées horizontales du soleil

Le soleil est repéré par les grandeurs suivantes :

a- L'azimut ψ :

L'azimut est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et la direction sud. Il se compte de 0° à 360° à partir du sud dans le sens rétrograde. La relation qui donne l'azimut est donnée ci-dessous (19):

$$\cos\psi = (\sin\gamma \sin\theta - \sin\delta) / \cos\gamma \cos\theta$$

Équation 6

b- L'angle de la hauteur solaire γ (ou bien h_s) :

C'est l'angle compris entre la direction du soleil et le plan horizontal. γ varie de 0° à 90° vers le zénith et de 0° vers -90° vers le nadir. L'angle de la hauteur solaire est donné par (19):

$$\sin\gamma = \sin\theta \sin\delta + \cos\theta \cos\delta \cos\omega$$

Équation 7

c- La distance zénithale z :

C'est l'angle entre la direction du soleil et la verticale du lieu (zénith). L'angle z est complémentaire de γ (19).

$$\cos z = \sin\delta \sin\theta + \cos\delta \cos\theta \cos\omega$$

Équation 8

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

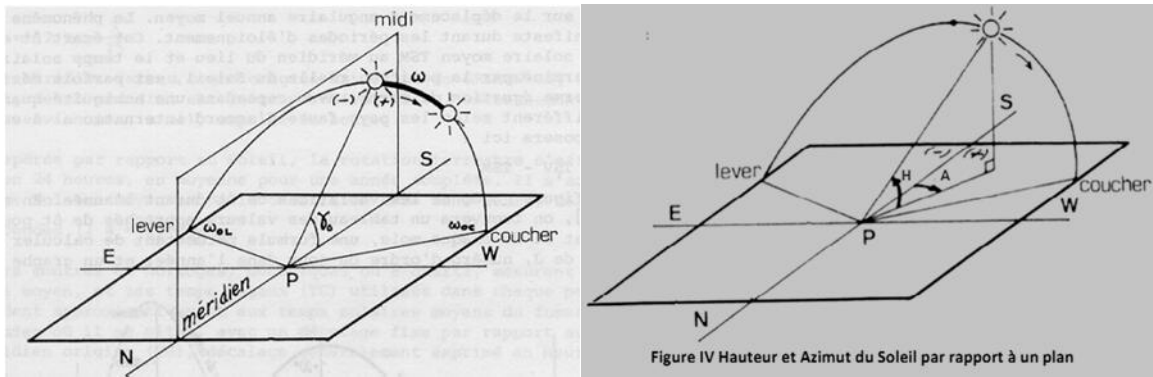


Figure 13 : Angle horaire, hauteur et Azimut du soleil par rapport à un plan.

VIII. Paramètres géographiques

Afin de repérer un site sur la surface terrestre, on doit définir des grandeurs géométriques :

a- La latitude θ :

Elle est définie comme étant l'angle que fait la verticale du lieu par rapport au plan équatorial, en plus s'elle est positive, le lieu en question se trouve dans l'hémisphère nord sinon du sud (19).

b- La longitude φ :

Définie comme étant l'angle compris entre le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré, elle est comprise entre -180° et 180° , et du fait que la terre prend 24 heures pour compléter une rotation autour d'elle-même, aussi chaque heure correspond à 15° d'écart de longitude, ainsi chaque degré de longitude représente 4minutes (19).

c- L'Altitude :

C'est la distance verticale exprimée qui sépare le point considéré du niveau de la mer pris comme origine (zéro mètre) ou bien surface de référence (19).

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

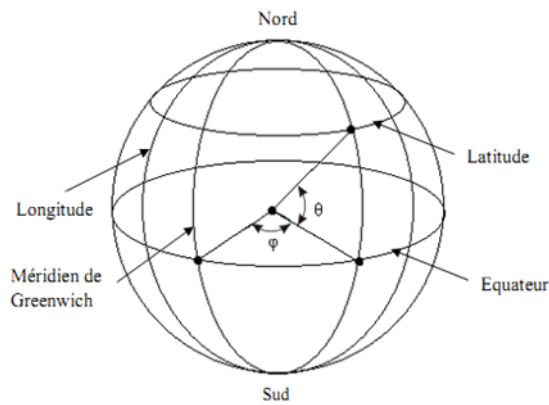


Figure 14 : latitude et longitude (19).

IX. Les radiations solaires

Le soleil produit de l'énergie en quantités énormes, et la majeure partie se dissipe dans l'espace. Seule une petite quantité de celle-ci est irradiée sur terre. L'énergie solaire, à la différence des combustibles fossiles et nucléaires, est disponible éternellement ; nous ne manquerons d'énergie solaire que quand le feu nucléaire du soleil s'éteindra. L'énergie solaire est dispersée sur toute la surface de la terre, alors que les mines de charbon, de pétrole et d'uranium sont concentrées dans des zones très localisées. Avant de nous servir de l'énergie solaire nous devons la stocker (20).

L'irradiation solaire exprime la quantité d'énergie reçue, au niveau de sol, par unité de surface. Ses unités usuelles sont de J/m^2 , J/m^2 , Wh/m^2 ou bien KWh/m^2 .

La radiation solaire varie en intensité selon la latitude, la saison, l'heure et la couverture nuageuse. Les régions de basse latitude (plus proches de l'équateur) reçoivent plus de radiation solaire par an que les latitudes plus proches de pôles. Il y a plus de radiation solaire en été qu'en hiver car en été, le soleil est directement au-dessus de nous, alors qu'en hiver il se trouve plus bas à l'horizon. La radiation solaire est d'autant plus intense que le soleil est haut dans le ciel (à midi) que quand il est bas (à l'aube et au crépuscule). Les nuages éparpillent à la fois la lumière incidente et absorbent une partie de l'énergie solaire, réduisant ainsi l'intensité (20).

✓ L'irradiation en Algérie :

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important compte tenu des valeurs de la durée d'insolation enregistrées sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre même les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara. Par conséquent, la quantité d'énergie reçue au sol quotidiennement est de $5KWh/m^2$, soit

CHAPITRE 01 : Généralités sur le Gisement solaire

près de 700KWh/m² par au nord et de 2263KWh/m² au sud, ce qui favorise l'utilisation de l'énergie solaire dans différents domaines tel que la production de l'électricité, le séchage agroalimentaire (19).

X. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire comme les coordonnées terrestres et horaires, les temps de base et le mouvement de la terre autour de soleil. Ensuite, nous avons présenté les différents types de rayonnements (direct, diffus, albédo et global) et une vue générale sur l'irradiation en Algérie.

Chapitre 02

Caractéristiques Des Cellules Solaires

I. Introduction

L'électricité est aujourd'hui le vecteur énergétique le plus aisé à exploiter, mais avant de consommer il aura fallu le produire. La production d'électricité photovoltaïque a connu ces dernières années un accroissement d'intérêt par une production dépassant 1800 MW à travers le monde. Cet accroissement était accompagné par une valorisation des recherches visant l'optimisation de l'énergie fournie par les cellules solaire (21).

Historique

Le mot *photovoltaïque* vient du grec *Photos* qui signifie lumière et de *Volta* du nom du physicien italien **Alessandro VOLTA** qui, en 1800, découvrit la pile électrique, de ce fait, le photovoltaïque n'est que de l'électricité à partir de la lumière.

Historiquement, L'effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en 1839 par **Edmund Antoine BECQUEREL**, autrefois baptisée l'*effet photo-électrique*. Il a constaté que certains matériaux pouvaient produire de petites quantités d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. **Albert EINSTEIN** se pencha sur ce travail. En 1905, il publie un papier sur le potentiel de production d'électricité à partir de la lumière du soleil. Ce document explore l'effet photovoltaïque, technologie sur laquelle est fondé le panneau solaire.

En 1913, **William COBLENTZ** a posé le premier brevet pour une cellule solaire, mais il ne pourra jamais la faire fonctionner. En 1916, **Robert MILLIKAN** a été le premier à produire de l'électricité avec une cellule solaire. Pendant les quarante années suivantes, personne ne fit beaucoup de progrès en énergie solaire car les cellules photovoltaïques avaient un trop mauvais rendement pour transformer la lumière du soleil en énergie.

Le premier panneau solaire a été construit en 1954 par les laboratoires Bell. Il a été appelé batterie solaire mais c'était juste un effet d'annonce car il était trop coûteux à produire.

Ce sont les satellites qui ont réellement fait avancer l'énergie solaire dans les années 1960 lors la course à l'espace. C'était la première utilisation importante de la technologie solaire. Grâce à l'espace, les panneaux solaires ont prouvé leur fiabilité. Le coût de production des cellules solaires a également diminué.

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

L'énergie solaire a eu un second élan au cours de la crise de l'énergie dans les années 1970. Quand le prix du pétrole a augmenté de façon spectaculaire, les panneaux solaires photovoltaïques ont commencé à être utilisés pour la première fois dans les maisons. Depuis les panneaux solaires se sont développés lentement. Pendant longtemps, ils ont été considérés comme des sources d'énergies alternatives.

II. Définition de la conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque, se définit par la transformation directe d'une énergie électromagnétique (*rayonnement*) en énergie électrique de type continu directement utilisable. Lors de l'absorption de la lumière, la génération des paires électron-trou ainsi que la séparation de ces porteurs de charges constituent un processus important non seulement pour les mesures et la détection de lumière (*photo-détecteurs*) mais aussi pour la conversion de la lumière en énergie chimique (*photosynthèse*) et en énergie électrique (*cellules solaires*).

III. La cellule solaire

La cellule photovoltaïque, est un composant optoélectronique qui est la base des installations produisant cette énergie. Elle fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution. Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (*Si*) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et d'indium (*CuIn(Se)₂* ou *CuInGa(Se)₂*), tellurure de cadmium (*CdTe*), etc.

L'architecture des cellules solaires a subi une évolution rapide, et aboutit à une architecture dite *standard* schématisée sur la **Figure 1**. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre.

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

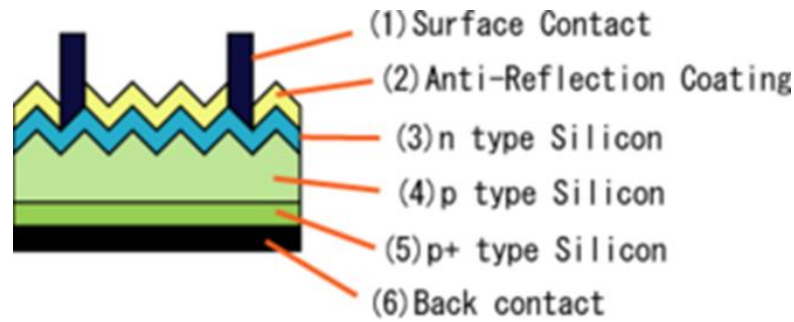


Figure 1 : Structure standard d'une cellule solaire.

IV. Circuit électrique équivalent

Le tracé du circuit électrique équivalent d'un système est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques (Source, résistance, diode). Nous allons décrire ici par cette méthode une diode PV dans l'obscurité et sous illumination. Lorsqu'on expose la surface d'une cellule solaire à la lumière, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner comme étant un générateur d'énergie, en délivrant un courant électrique continue. En effet, ce comportement électrique de la cellule n'est d'autre que celui d'une diode sous éclairage. Ainsi, le régime électrique d'une photopile constitué d'une *jonction PN*, peut être décrit bel et bien, via l'équation suivante (22):

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right) - 1 \right] - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}}$$

Équation 9

Avec : $\beta = -\frac{q}{kT}$

Où :

q : Est la charge de l'électron en **Coulomb**.

k : La constante de Boltzmann en Joule par **Kelvin**.

T : La température en **Kelvin**

V : La tension aux bornes de la cellule photovoltaïque en **Volt**

I : Le courant délivré par la photopile en **Ampère**

I_{ph} :Le photocourant en **Ampère**

I_s : Le courant de saturation en **Ampère**

n : Le facteur de non idéalité de la jonction

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

R_s : Résistance série caractérisant les divers contacts et connexion, en Ω .

R_{sh} : Résistance shunt qui modélise les courants de fuites de la jonction, en Ω

La **Figure 2** représente avec des composants électriques, le comportement électrique équivalent déduit de l'équation 1.

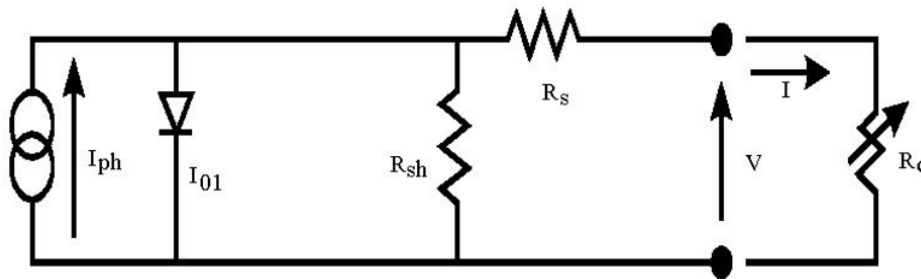


Figure 2 : Circuit électrique équivalent à une photopile (23).

V. Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire

Les performances d'une cellule solaire sous illumination peuvent être complètement décrites via la caractéristique $I=f(V)$. Cependant, et pour des raisons pratiques, il est suffisant de caractériser $I=f(V)$, seulement, par quelques paramètres caractéristiques **Figure 3**.

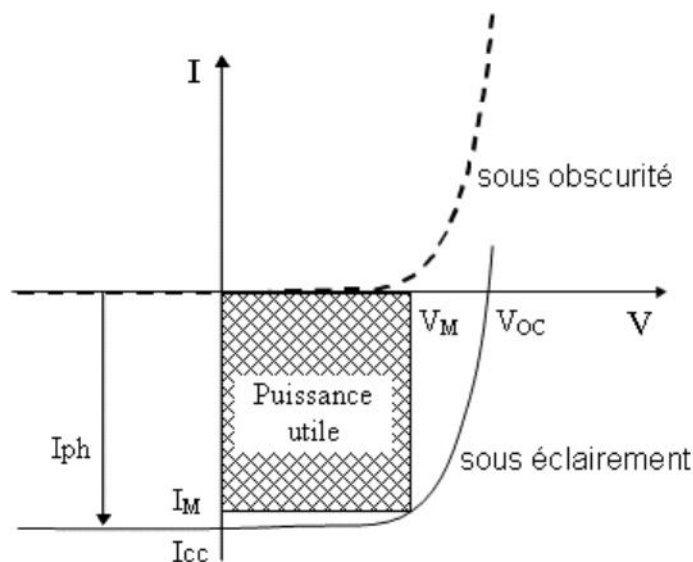


Figure 3 : Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire.

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

À partir de la caractéristique $I=(V)$ illustrée ci-dessus, qui montre d'une diode à jonction PN sous obscurité et sous éclairage, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule, à savoir:

I_{CC} : Courant de court-circuit (obtenu pour $V=0$) ;

V_{CO} : Tension en circuit ouvert (obtenu pour $I=0$) ;

I_M : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque;

V_M : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la photopile;

FF : Le facteur de forme, appelé également *fill-factor*, paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule solaire ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage qu'est illustré sur la **Figure 4**.

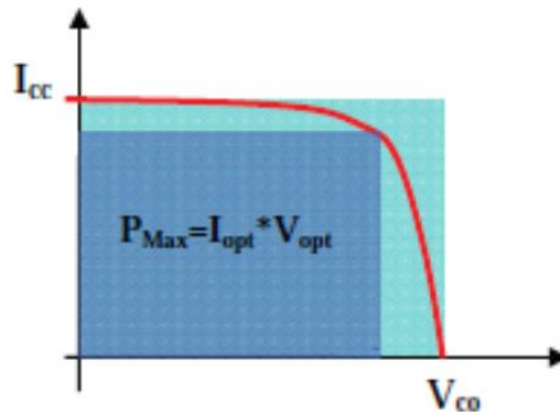


Figure 4 : Notion de facteur de forme FF d'une cellule solaire.

Le facteur de forme est défini comme suit :

$$FF = (\text{Puissance maximale délivrée sur la charge}) / (I_{cc} \times V_{co})$$

Donc :

$$FF = \frac{I_M \times V_M}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}}$$

Équation 10

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \times V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales.

η : Rendement de conversion, qui est défini comme suit :

$$\eta = (\text{Puissance électrique maximale fournie}) / (\text{Puissance solaire incidente})$$

Ou encore :

$$\eta = \frac{I_M \times V_M}{p_i \times S} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{p_i \times S}$$

Équation 11

Avec :

p_i : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface ;

S : Surface de la cellule solaire sous l'éclairement.

VI. Le mécanisme de la conversion photovoltaïque

Les mécanismes fondamentaux intervenant lors d'une conversion photovoltaïque, au sein d'un matériau approprié, sont :

- L'absorption de l'énergie lumineuse et donc les quanta d'énergie (*photons*);
- La transformation de l'énergie absorbée à des charges électrique pour les rendre libres ;
- La collecte de ces charges puis les acheminées dans un circuit électrique extérieur.

L'optimisation de la conversion photovoltaïque exige que l'absorption soit maximale, ainsi qu'une collection sans perte.

Pour assurer une conversion optimale, les cellules solaires doit être fabriquée à partir d'un matériau absorbant dans la bande optique du spectre solaire, possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie, transformant l'énergie lumineuse sous forme potentielle et non thermique, et d'une structure de collecte de faible résistance électrique (24).

Afin qu'on puisse décrire les différents mécanismes relatif à l'effet photovoltaïque, citer ci-dessus, on considère la *jonction PN* illustrée sur la **Figure 5**.

Quand une cellule solaire est illuminée, essentiellement par les radiations solaires, l'énergie lumineuse sera absorbée, c'est le *mécanisme d'absorption*.

Physiquement, les photons absorbés interagissent avec les électrons, en lui communiquant leurs énergie cinétique, et donc les excités de la bande de valence vers la bande de

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

conduction, créant ainsi les paires électron-trou, dans ce cas-là on parle du *mécanisme du transfert de l'énergie au porteurs de charges*.

Ensuite, les électrons de la région p du dispositif diffusent, en les orientant vers la région n via le champ électrique locale de la *jonction PN*. Tandis que c'est le contraire qui se passe dans la région n , où les trous vont diffusés vers la région p sous l'action du champ électrique interne, il en résulte le *mécanisme de la collection*.

Ce dernier n'est d'autre qu'une séparation de charge, ce qui mène à une différence de potentielle entre les deux régions de la jonction, dont un courant électrique sera délivré, à travers un circuit électrique extérieur, on parle ici de *l'acheminement de porteurs de charges*.

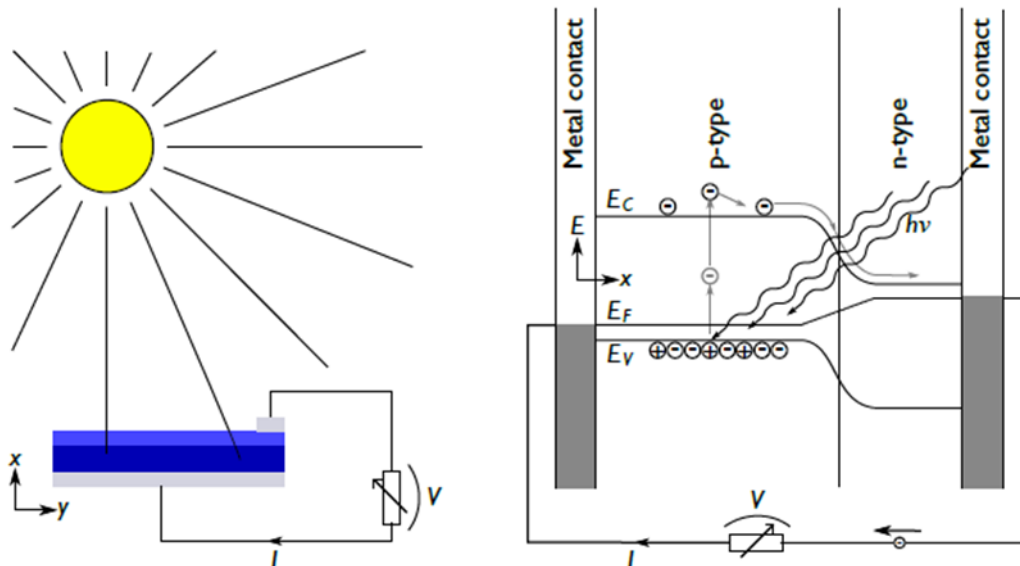


Figure 5 : mécanismes fondamentaux de l'effet photovoltaïque. La photopile est illuminée sous le Soleil. La radiation excite les porteurs de charges à travers la bande interdite du matériau absorbant, et elles sont séparées par la jonction PN.

La puissance délivrée à la charge extérieure, surtout, est gouvernée par l'irradiation qui arrive sur la cellule solaire et la charge elle-même. Avec une petite impédance de charge, le courant délivré sera plus proche au courant du court-circuit, et bien sûr, une tension très petite. Par contre, une impédance importante de la charge, la tension électrique à ces borne sera plus proche de celle du circuit-ouvert, avec un courant moins intense.

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

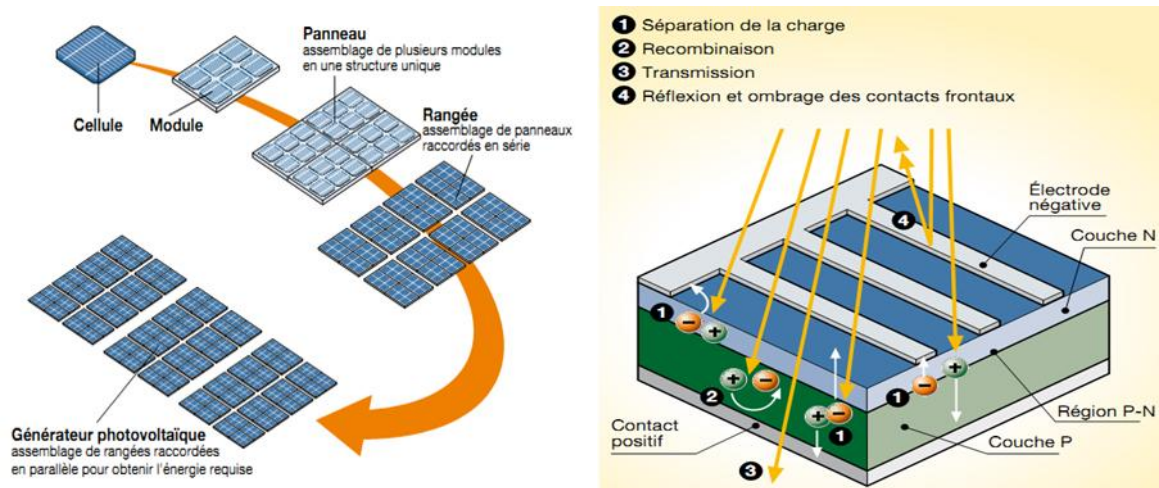


Figure 6 : composition du panneau solaire et du générateur photovoltaïque.

Sur les 100% de l'énergie incidente, cette dernière se répartit de la façon suivante :

1. 23% de photons ayant une grande longueur d'onde et donc une énergie minimale pour faire libérer les électrons
2. 32% de photon ayant de courte longueur d'onde d'où le phénomène de transmission
3. 20% de gradient électrique dans la cellule
4. 8.5% de recombinaison des porteurs de charges
5. 3% de perte par réflexion et l'effet d'ombrage des contacts frontaux
6. 0.5% perte en résistance série (perte par conduction)
7. 13% d'énergie électrique utilisable (rendement d'un panneau solaire)

VII. Influence des différents paramètres sur la caractéristique I (V)

VII-1- Influence de l'éclairement et de la température

La **Figure 7** présente les caractéristiques d'une cellule solaire type, pour plusieurs intensités de rayonnement solaire. On remarque le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement. Par contre la tension n'est pas dégradée lorsque la lumière baisse.

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

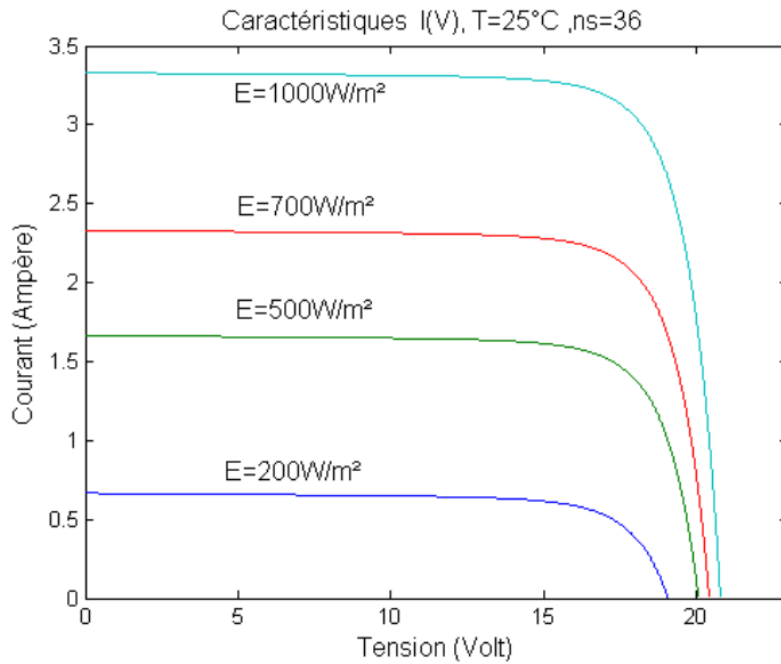


Figure 7 : Caractéristiques I(V) d'un panneau solaire pour différents éclairements.

L'influence de la température est très significative, ce qui nous conduit à une considération soigneuse, lors de la mise en marche des systèmes photovoltaïques.

Sur la **Figure 8**, on illustre l'effet de la température sur le comportement des photopiles. Elle montre une diminution considérable de la tension électrique délivrée avec l'augmentation de la température. Tandis que, le courant gagne quant à lui un petit peu de l'intensité. Ceci peut être expliqué par la baisse du gap, ce qui provoque l'accroissement de la concentration des porteurs de charge, puisque la transition entre les niveaux devienne plus probable.

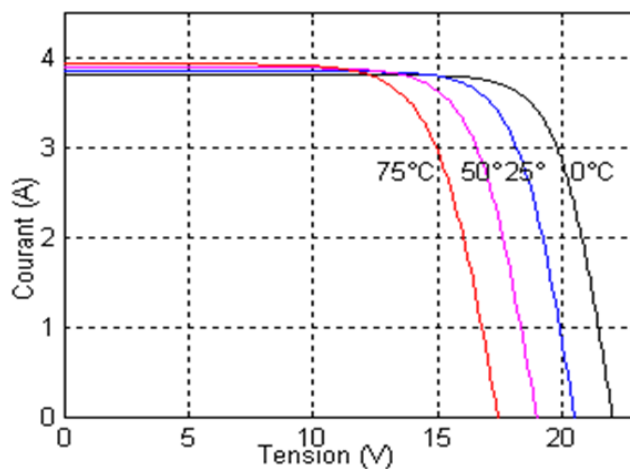


Figure 8 : Influence de la température sur la caractéristique I (V).

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

Il faut signaler que l'accroissement du courant sous l'effet d'une hausse température, peut être négligé au point de puissance maximale, et le comportement global de la cellule en température est une perte de 0,4 à 0,5 %/°C.

VII-2- Influence de la résistance série et la conductance shunt

La résistance série est gouvernée par la résistivité du matériau, par les résistances de contact des électrodes et par la résistance de la grille collectrice. Elle agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit, comme il est montré sur la **Figure 9**.

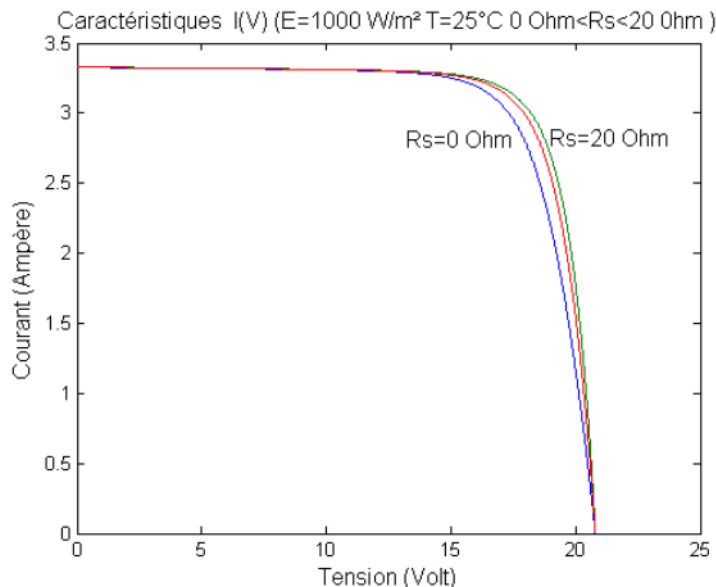


Figure 9 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I (V).

La résistance shunt peut être causée par les défauts existant au sein du matériau, tel que : les dislocations...dans la zone de déplétion ou le long de la cellule solaire. Son effet est illustré sur **Figure 10**, et il est clair qu'elle change la pente de la courbe au voisinage du point du courant de court-circuit.

En fait, une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la cellule solaire ; à cause de cela une photopile dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclaircissement.

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

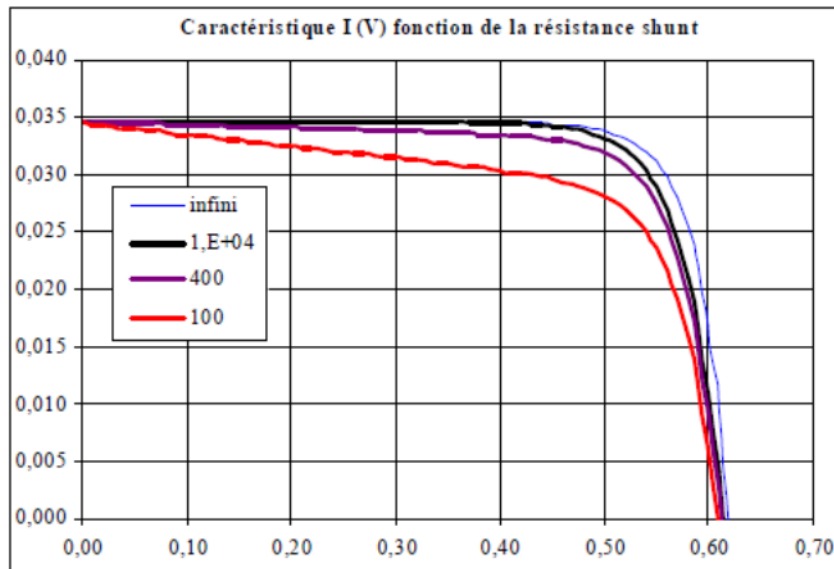


Figure 10 : Effet de la résistance shunt sur la pente de la caractéristique en court-circuit.

Vu que ces deux résistances sont liées à la technologie d'élaboration des jonctions et des électrodes, il faut minimiser R_s et faire en sorte que R_{sh} ne soit pas trop faible.

VII-3- Influence du courant de saturation et du facteur d'idéalité

Le courant d'une cellule solaire idéale sous illumination, peut être obtenu en posant $R_s = 0$ et $R_{sh} \rightarrow \infty$ dans l'équation (1), ainsi on a :

$$I = I_s \left(\exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right) - I_{ph}$$

Équation 12

On pose $I = 0$ on aura la tension maximale dont la photopile peut fournir, et elle correspond à la tension du circuit-ouvert, alors on écrit :

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right)$$

Équation 13

Ainsi, une diminution du courant de saturation I_s entraîne une augmentation de V_{co} . Notons qu'une diminution d'un facteur 10 de I_s n'entraîne qu'une augmentation de 50mV de V_{co} . C'est la même chose pour le facteur d'idéalité, c.-à-d. son augmentation influe inversement sur le point de puissance maximale d'une cellule solaire.

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

VIII. Les modules photovoltaïques (24) (25)

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance au regard des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. En effet, une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension très faible, par principe, puisqu'il s'agit d'une tension de jonction. Les générateurs photovoltaïques sont, par conséquent, réalisés par association d'un grand nombre de cellules élémentaires.

VIII-1- Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La **Figure 11** montre la caractéristique résultante (I_{sc} , V_{sc0}) obtenue en associant en série (indice s) n_s cellules identiques (I_{cc} , V_{c0}), ainsi :

$$I_{sc} = I_{cc} \text{ et } V_{sc0} = n_s V_{c0}$$

Équation 14

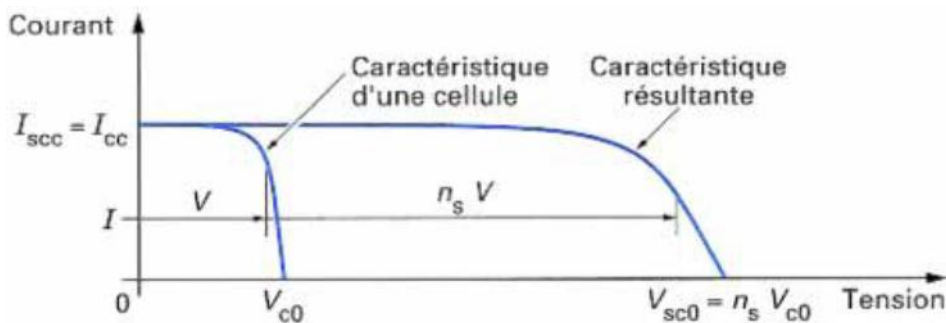


Figure 11 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de N_s cellules identiques.

VIII-2- Association en parallèle :

En reliant n_p modules identiques en parallèle **Figure 12**, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche, ainsi on écrit :

$$I_{pcc} = n_s I_{cc} \text{ et } V_{pco} = V_{co}$$

Équation 15

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

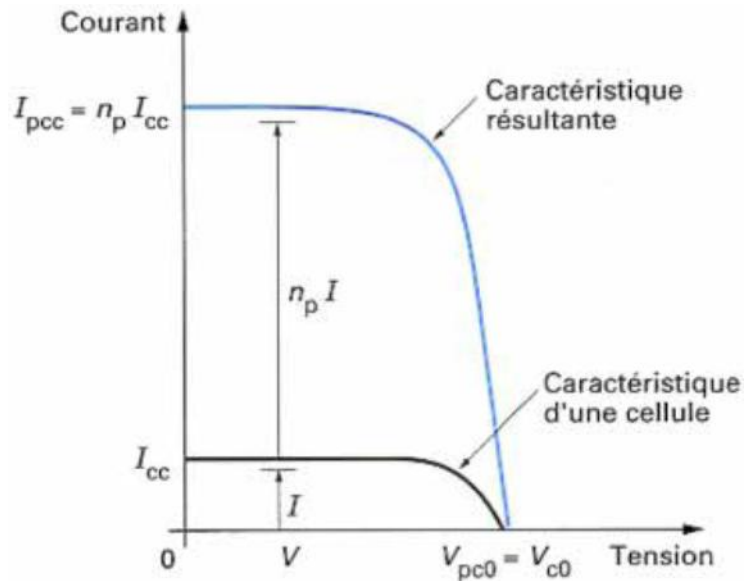


Figure 12 : Caractéristique I(V) pour l'association parallèle.

VIII-3- Association en série parallèle :

Afin d'obtenir des puissances de quelque kW à quelque MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux, et de les monter en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un *générateur photovoltaïque* ou sous-station.

La **Figure 13** présente un tel groupement de n_{ms} modules en série dans une branche et de n_{bp} branches en parallèle. Si P_m , V_m , I_m et R_m sont les caractéristiques du module de base, les caractéristiques correspondantes de la sous-station seront :

- $n_{ms} \cdot n_{bp} \cdot P_m$ pour la puissance,
- $n_{ms} \cdot V_m$ pour la tension,
- $n_{bp} \cdot I_m$ pour le courant,
- La résistance de charge optimale sera égale à $R_m \cdot n_{ms} / n_{bp}$.

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

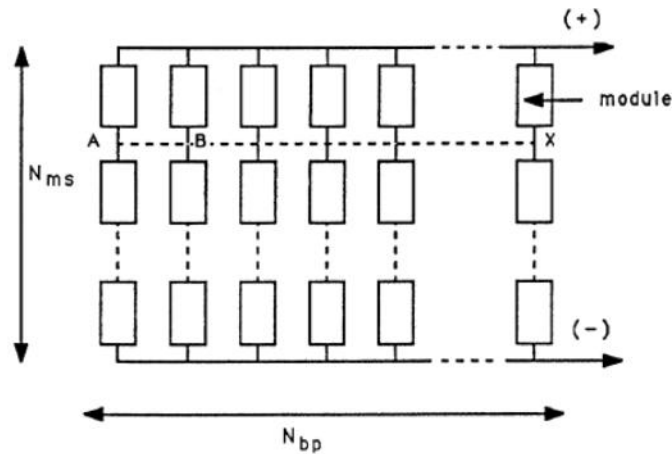


Figure 13 : générateur photovoltaïque formé de N_{ms} module en série et N_{bp} branche en parallèle.

IX. Paramètres électriques d'une cellule PV

1. Schéma électrique équivalent d'une cellule PV :

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

Le schéma équivalent est constitué d'une diode (D) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le courant arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) (26).

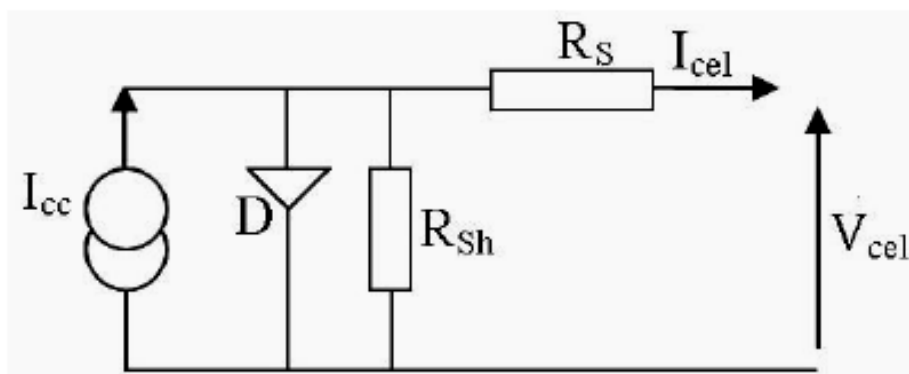


Figure 14 : schéma électrique d'une cellule PV.

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

Le rôle de chaque composant électrique est :

- **Générateur de courant I** : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photo généré.
- **La diode D** : modélise la jonction PN.
- **La résistante série R_s** : les pertes ohmiques sont prises en compte par la résistance R_s placée en série. La résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau de connexions des cellules (27).
- **La résistante shunt (R_{sh})** : la résistance R_{sh} reprend les pertes par recombinaison non-radiative et par courant de fuite. La résistance shunt représente les fuites autour de la jonction PN dues aux impuretés et sur les coins de cellule (27).

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

2. Les grandeurs principales d'une cellule PV :

a) Tension à circuit ouvert V_{co} :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse (28).

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

Équation 16

b) Courant court-circuit I_{cc} :

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

$$R_{sh} \rightarrow 0 \quad \text{donc} \quad I = \frac{V}{R} \rightarrow I_{cc}$$

Équation 17

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

c) Point de puissance maximale P_{max} :

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

$$P_m = I_m \times V_m$$

Équation 18

e) Le rendement η :

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

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}}$$

Équation 19

f) Facteur de forme :

Le facteur de forme peut être vu comme une mesure de la qualité de la cellule. Si l'on considère une cellule dont la R_s est nulle et la R_{sh} est infinie, le point de puissance maximum correspond au produit de I_{cc} par la V_{co} ; la cellule est alors idéal. Le FF correspond au rapport entre ce point de puissance maximum théorique $I_{CC} \times V_{CO}$ et le produit $I_{MP} \times V_{MP}$, point de puissance maximum réel (29).

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

Équation 20

CHAPITRE 02 : Caractéristiques Des cellules solaires

X. Conclusion

L'énergie photovoltaïque a connu un développement formidable en l'espace de 50 ans. La recherche spatiale a permis de financer les recherches initiales. La compréhension des phénomènes physiques qui a découlée de ces recherches a permis de développer de nombreux matériaux avec succès par la suite, et petit à petit, avec la baisse du coût des matières utilisées et une meilleure maîtrise de la technologie, les panneaux photovoltaïques ont quitté l'espace pour être utilisés sur la Terre.

Dans ce chapitre on a présenté les concepts dont la connaissance est nécessaire à la compréhension de l'exploitation de l'énergie photovoltaïque. Dans un premier temps, nous décrirons le soleil et son rayonnement. Nous montrerons ensuite ce qu'est une cellule solaire, en insistant sur les propriétés qui sont importantes dans le processus de conversion photovoltaïque. À la fin du chapitre, les différentes configurations des modules photovoltaïques ainsi que leurs déséquilibres de fonctionnement seront décrites.

Chapitre 03

Électricité Photovoltaïque

I. Introduction

L'énergie solaire est une source d'énergie accessible à tous (industriels, collectivités et particuliers). Grâce à celle-ci, il est possible de produire trois types d'énergies : l'énergie calorifique avec les installations solaires thermiques (chauffe-eau solaire ou climatiseur solaire), l'énergie électrique avec les installations solaires photovoltaïques et le solaire à concentration thermodynamique. La production d'électricité d'origine photovoltaïque, basée sur la conversion de la lumière du soleil, est en pleine expansion depuis deux décennies. Sa part dans le bouquet énergétique mondial de 2050 sera certainement importante compte tenu de la pénurie et/ou de la pollution des autres ressources.

L'électricité photovoltaïque a dans un premier temps été développée pour des applications autonomes sans connexion à un réseau électrique pour par exemple des satellites de télécommunication ou pour des habitations isolées. On la trouve maintenant dans des applications de diverses puissances comme les calculatrices, les montres et d'autres objets d'utilisation courante. En effet, cette électricité produite par des cellules photovoltaïques individuelles peut alimenter diverses charges continues sans difficulté. Plus récemment, avec l'émergence d'installations photovoltaïques connectées au réseau de distribution, le photovoltaïque a connu un développement important en tant que moyen de production d'électricité.

Cette évolution constante a été rendue possible grâce aux recherches fondamentales menées dans le domaine des matériaux photovoltaïques, mais aussi par l'amélioration progressive des dispositifs de gestion de cette énergie menée en parallèle. En effet, l'électricité photovoltaïque est une source d'énergie intermittente, à caractère non-linéaire et dépendante de nombreux paramètres comme l'irradiance et la température. Il a donc fallu adapter cette source d'énergie à notre mode de consommation, soit en stockant la production solaire dans des batteries ou dans tout autre moyen de stockage en cours de développement, soit en la renvoyant sur le réseau électrique public.

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

II. Physique de rayonnement solaire (30)

1- Rayonnement du corps noir : soleil hors atmosphère, constante solaire :

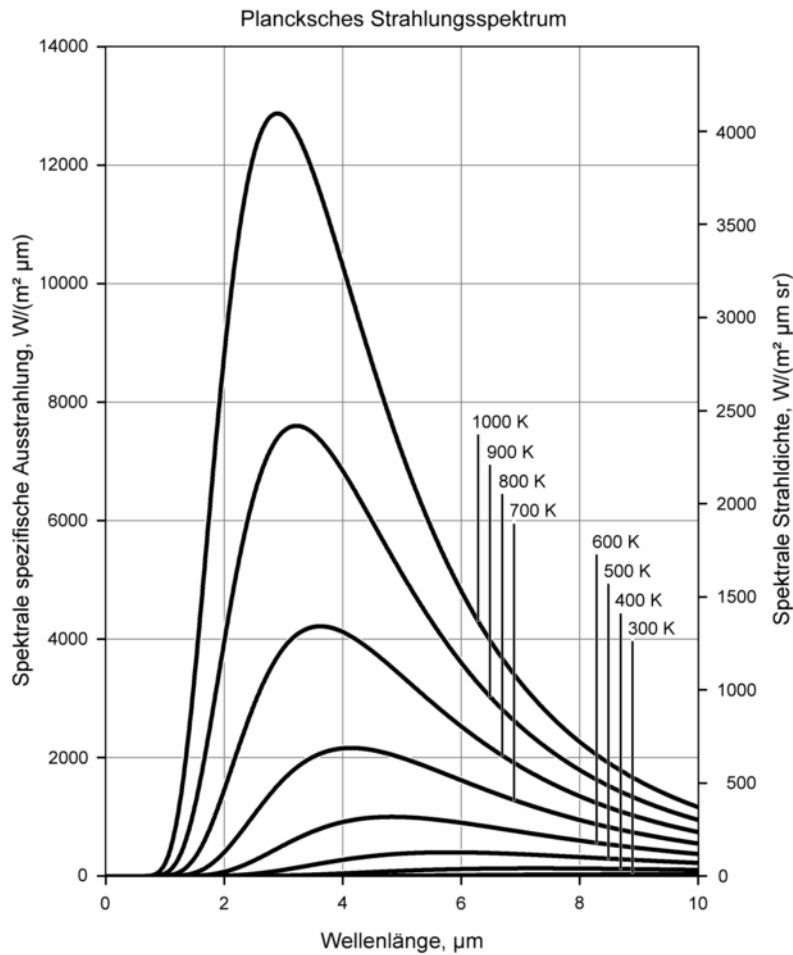


Figure 1 : Rayonnement du corps noir en fonction de sa température.

Abréviations	
μc-Si	Silicium microcristallin
a-Si	Silicium amorphe
CIS	Chalcogénures
Cz	Tirage Czochralski
EMC	Croissance électromagnétique
FZ	Tirage par zone flottante
HIT	Hétérostructure
mc-Si	Silicium multicristallin
pc-Si	Silicium polycristallin
p-i-n	Structure à zone intrinsèque
pm-Si	Silicium polymorphe

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

p-n	Structure à jonction plane
RCC	Cellule à contacts arrières
Sc-Si	Silicium monocristallin

Tableau 1 : Abréviations.

On peut considérer, en première approximation, que l'énergie du rayonnement du soleil hors de l'atmosphère suit la loi du rayonnement du corps noir (**figure 1**). En effet, pour de grandes longueurs d'ondes, c'est-à-dire pour des photons peu énergétiques, la loi donnant l'énergie moyenne rayonnée $[E(\lambda, T)]$ par unité de volume des photons dans un intervalle de longueur d'onde $d\lambda$ se réduit à la loi classique de Rayleigh-Jeans :

$$E(\lambda, T) d\lambda = (8\pi kT / \lambda^4) d\lambda$$

Équation 21

Avec k : constante de Boltzmann.

Ainsi, plus le corps noir émet à une température élevée, plus son rayonnement est énergétique, et la longueur d'onde du maximum énergétique diminue : c'est la loi de déplacement de Wien. Le rayonnement devient visible par l'œil humain pour des couleurs allant du rouge au violet. En intégrant la densité moyenne d'énergie totale par unité de volume des photons sur toutes les fréquences (ou longueurs d'onde λ), nous obtenons la célèbre loi de Stefan-Boltzmann :

$$E(T) = \sigma T^4$$

Équation 22

Avec E (W/m²) flux énergétique par unité de surface,

σ : constante de Stefan ($\sigma = 5,7 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

Le soleil a une température de surface estimée à 5 760 K.

Le flux énergétique, en provenance de cet astre, intercepté dans l'angle solide représenté par la terre vaut : $E_0 = 1\,350 \text{ W/m}^2$

Il est connu sous la dénomination : « **constante solaire** » **hors atmosphère**, c'est-à-dire pour une masse atmosphérique nulle (AM₀, Air Mass 0).

CHAPITRE 03 : électricité Photovoltaïque

2- Rayonnement perçu au sol (Rôle de l'atmosphère) :

Pour la fabrication de cellules photovoltaïques à usage terrestre, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu au niveau du sol (**figure 2**). L'atmosphère terrestre modifie le spectre énergétique du rayonnement solaire par l'action de trois mécanismes principaux :

– **l'absorption par les gaz** : chaque gaz possède des raies caractéristiques.

Les plus marquantes sont, dans l'ordre des longueurs d'ondes croissantes : l'ozone (O₃), l'oxygène (O₂), toute une série de raies d'absorption, dues à la vapeur d'eau (H₂O), et dans l'infrarouge lointain au gaz carbonique CO₂ ;

– **la diffusion moléculaire de Rayleigh** est causée par les molécules d'air, dont la taille est très inférieure à la longueur d'onde de la lumière. La diffusion de Rayleigh varie en λ^{-4} et explique la couleur bleue du ciel clair et le passage de la couleur du soleil à l'orange et au rouge lorsqu'il est bas sur l'horizon (lorsque le soleil est bas, le trajet optique augmente et contribue à l'atténuation des UV et des longueurs d'onde du bleu) ;

– **la diffusion par les aérosols** (de taille semblable à la longueur d'onde de la lumière), par les poussières et les fumées (dont la taille des particules varie de 0,5 à 10 μm) provoque également une variation spectrale en λ^{-n} , avec n compris entre 0 et 4. Par contre, pour les gouttelettes d'eau des nuages, dont la taille est nettement supérieure à la longueur d'onde, la diffusion est sans variation de spectre. Elle provient de l'ensemble des phénomènes de réflexion, réfraction et de diffraction. Le rayonnement diffus des jours à forte nébulosité peut représenter 10 à 15 % du rayonnement solaire arrivant au sol en provenance de toute la voûte céleste. Il est sans orientation particulière, et il est donc impossible de le concentrer au moyen de lentilles optiques.

Ainsi le rayonnement qui arrive au sol possède au moins deux composantes : une composante diffuse D et la composante directe I qui peut être collectée par des systèmes optiques à concentration.

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

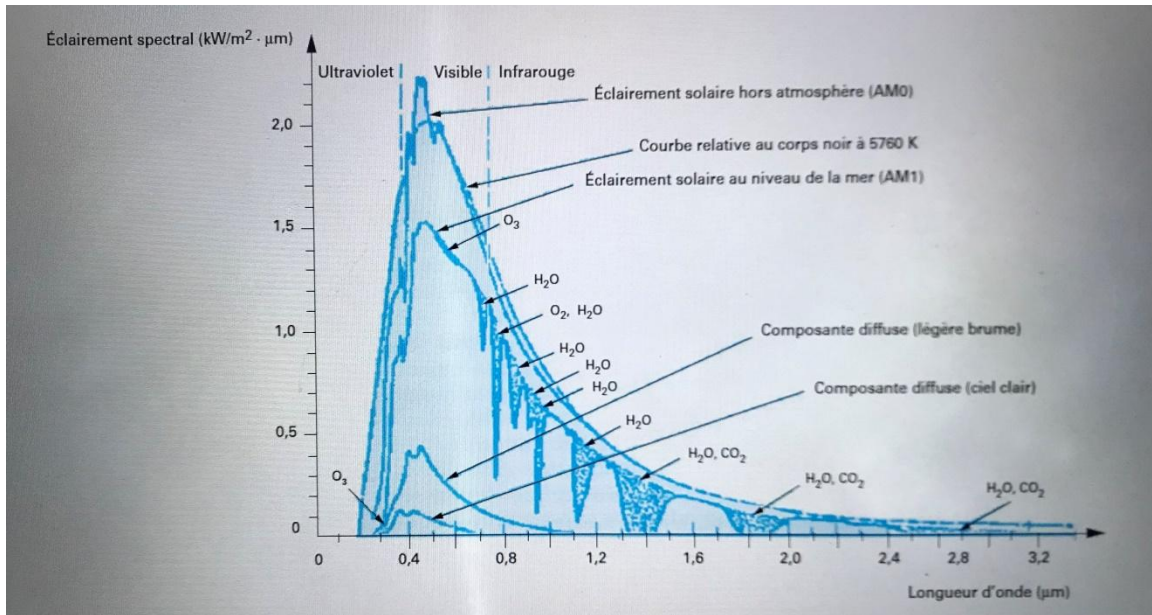


Figure 2 : Spectre de rayonnement du soleil et raies d'absorption par l'atmosphère.

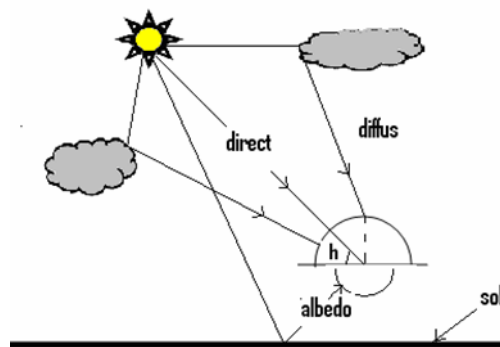


Figure 3 : Trois composantes du rayonnement solaire global.

Toute forme le **rayonnement global** G qui est le rayonnement pris en compte pour la détermination du rendement des cellules solaires.

Dans les régions nordiques, où le ciel est souvent couvert, le rayonnement diffus peut représenter jusqu'à 80 % du rayonnement global, de sorte que l'on peut poser directement les modules photovoltaïques au sol. Par contre, dans ce cas, on ne bénéficie plus de l'albédo (**figure 3**), c'est-à-dire de la fraction du rayonnement réfléchi par un sol blanc (*albédo* en latin).

Par convention, le rayonnement global G perçu au niveau du sol est donné en fonction de

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

l'épaisseur atmosphérique effectivement traversée (Air Mass x , AM_x) par rapport à l'épaisseur normalisée à 1 ($x = 1$) pour un soleil au zénith (Air Mass one, AM_1).

On a un soleil sous $AM_{1,5}$ lorsque le soleil fait un angle α avec l'horizon, tel que l'épaisseur d'atmosphère effectivement traversée est égale à une fois et demie l'épaisseur pour un soleil au zénith.

III. Généralité sur les semi-conducteurs (31)

1) Introduction :

Les semi-conducteurs dont sont basés les principaux dispositifs électroniques sont des matériaux dont les propriétés électriques sont intermédiaires entre l'état isolant et l'état conducteur. Mais se caractérisent principalement par certaines propriétés telles que la variation de la conductivité en fonction de la température (la résistivité est l'inverse de la conductivité; $\rho/σ$). La conductivité dans les semi-conducteurs à l'inverse des métaux, augmente avec la température. L'un des principaux semi-conducteurs utilisés est le silicium, il constitue avec le germanium les semi-conducteurs de base sur lesquelles reposent de nos jours les majorités des applications de l'électronique.

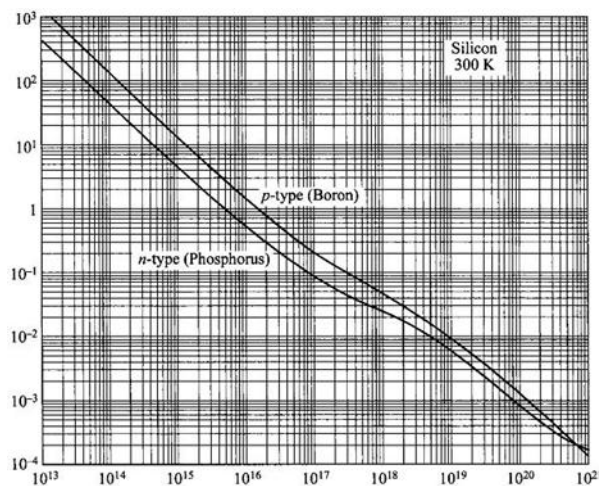


Figure 4 : Résistivité du silicium en fonction de la concentration d'impuretés à 300 K.

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

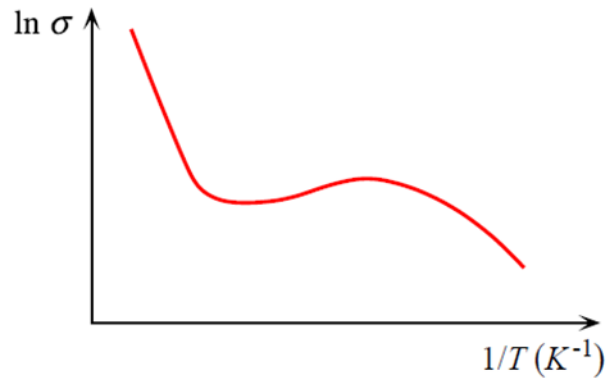


Figure 5 : Comportement typique de la conductivité électrique en fonction de T.

2) Semi-conducteur intrinsèque:

Un cristal est un ensemble d'atomes qui interagissent entre eux grâce à la dernière couche peuplée. Les électrons de cette dernière couche sont appelés électrons de valence. Les liaisons qu'ils forment entre atomes sont appelées liaisons de valence ou liaisons covalentes; elles sont réalisées par le milieu commun des électrons de valence.

Exemple: réseau cristallin du Si ou Ge : le Si ayant 4 électrons périphériques, chaque atome établit des liaisons covalentes avec les atomes voisins, ce type de semi-conducteur où aucune impureté n'est présente s'appelle semi-conducteur intrinsèque. Si on apporte au matériau une énergie $E > E_G$. La radiation va échanger son énergie avec le matériau et permettre de faire passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. Ce départ va donner naissance à un « trou » dans la bande de valence.

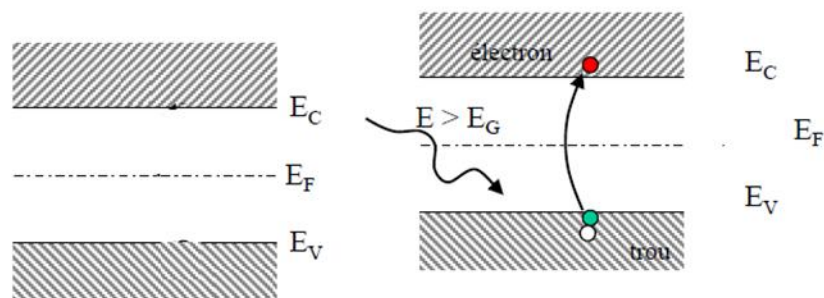


Figure 6 : Bande d'énergie d'un semi-conducteur intrinsèque.

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

3) Semi-conducteur extrinsèque :

En réalité dans la nature on ne trouve que rarement des composés très purs cristallographiquement. La plupart des cristaux contient des impuretés. D'autre part un Semi-conducteur intrinsèque présente une grande résistance. Exemple: pour faire passer un courant de 1 mA dans un barreau de semi-conducteur intrinsèque de dimension $l=1\text{ mm}$, $S=1\text{ mm}^2$, il faut appliquer une tension de $V=7800\text{ V}$, $R=7.8.10^6\text{ Ohm}$ pour le Si et $V=2.10^{10}\text{ V}$, $R=2.10^{13}\text{ Ohm}$ pour le Gal. Ces chiffres montrent bien que dans les applications courantes on ne peut pas utiliser des semi-conducteurs intrinsèques. Il est donc nécessaire de trouver un moyen pour abaisser considérablement la résistance de ces semi-conducteurs c'est à-dire augmenter le nombre de leurs électrons libres ou de leurs trous.

4) Dopage des semi-conducteurs :

pour augmenter considérablement le nombre d'électrons libre ou de trous dans un semi-conducteur on va introduire dans son réseau cristallin des atomes d'impuretés choisis de telle sorte qu'ils créent un niveau possible pour les électrons ou les trous très près de la bande de conduction ou de valence pour cela, il faut en premiers bien choisir des impuretés de substitution . Dans le cas de Silicium on distingue deux types d'impuretés: une impureté de type pentavalent c'est-à-dire des impuretés ayant 5 électrons périphériques et une impureté de type trivalent c'est-à-dire des impuretés ayant 3 électrons périphériques.

a. Semi-conducteur extrinsèque de type N:

Dans le cas d'un type N pour le silicium qui a 4 électrons périphériques on introduit de phosphore P qui a 5 électrons périphériques. Dans les liaisons de covalence entre Silicium et phosphore un électron de phosphore se trouve en surnombre. Les impuretés donneurs introduisent un niveau d'énergie supplémentaire, à l'énergie E_d ($E_C - E_d = 0.044\text{ eV}$), qui se trouve dans la bande interdite L'électron excédentaire ne pourra réaliser aucune liaison et étant faiblement lié à l'atome de phosphore, il restera libre dans le cristal. A la température ambiante cet électron est donc libéré dans le réseau par agitation thermique et occupe un état de la bande de Conduction. Dès lors que l'atome de phosphore perd son électron il devient une charge (ion) positive: on dit alors qu'il s'est ionisé, qu'il est devenu une impureté ionisée. Le cristal sera alors extrinsèque de type N et on dira que l'atome de phosphore est une impureté de type donneur.

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

b. Semi-conducteur extrinsèque de type P:

Si maintenant on peut augmenter le nombre des trous dans le silicium, on choisit un atome pouvant remplacer l'atome de silicium dans le réseau cristallin, mais n'ayant que 3 électrons périphériques: par exemple du bore (B). Il y a donc une liaison covalente qui va avoir tendance à capter un électron. Chaque atome de bore crée donc un trou dans le réseau cristallin. L'atome de bore est une impureté ionisée (3 protons et 4 électrons) et le cristal sera extrinsèque de type P. On dit que l'atome de bore est une impureté de type accepteur. La schématique de ces deux types de matériaux est la suivante:

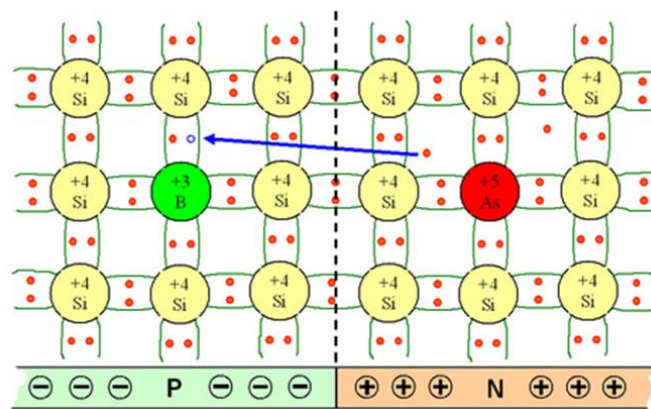


Figure 7 : dopage de type N et de type P.

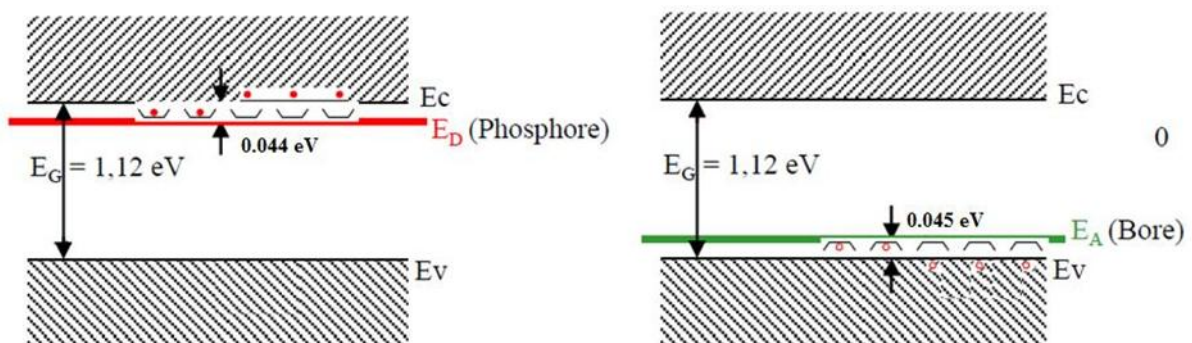


Figure 8 : Les impuretés donneurs et accepteurs introduisent un niveau d'énergie supplémentaire, aux énergies E_D et E_A respectivement, dans la bande d'énergie d'un semi-conducteur extrinsèque.

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

IV. Physique du composant photovoltaïque (32)

A. Électrons dans un potentiel périodique, schéma de bandes :

1- Bandes d'énergie :

Dans un cristal où les atomes sont liés à leurs proches voisins, il faut faire appel à la solution de l'équation de Schrödinger, proposée par Bloch en 1928, pour expliquer l'existence de bandes d'énergies permises séparées par une bande d'énergie interdite.

Pour ne pas rentrer dans des détails qui relèvent de la physique quantique des solides, il est suffisant de retenir qu'il existe une bande supérieure permise pour les électrons d'énergie E en fonction du vecteur d'onde (k) de l'onde électromagnétique associée au photon :

$$k = 2\pi/\lambda$$

Équation 23

La bande permise pour les électrons d'énergie E est appelée **bande de conduction** E_c avec des minimums d'énergie permise. La bande inférieure est appelée **bande de valence** E_v avec des maximums d'énergie permise pour les vacances d'électrons, c'est-à-dire des **trous**. Les bandes E_c et E_v sont séparées par une bande d'énergie interdite E_g (g pour la dénomination anglaise de gap), et ne sont pas forcément en vis-à-vis, d'où la notion de semi-conducteurs à énergie de bande interdite directe ou indirecte.

Les matériaux composés binaires, tels que l'arséniure de galium AsGa ou le tellure de cadmium CdTe, ou ternaires, comme les halogénures CuInSe₂, sont des semi-conducteurs à **gap direct**, alors que les semi-conducteurs de la colonne IV du tableau de classification périodique des éléments, comme le silicium et le germanium (Si, Ge), sont à **gap indirect** (**figure 9**).

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

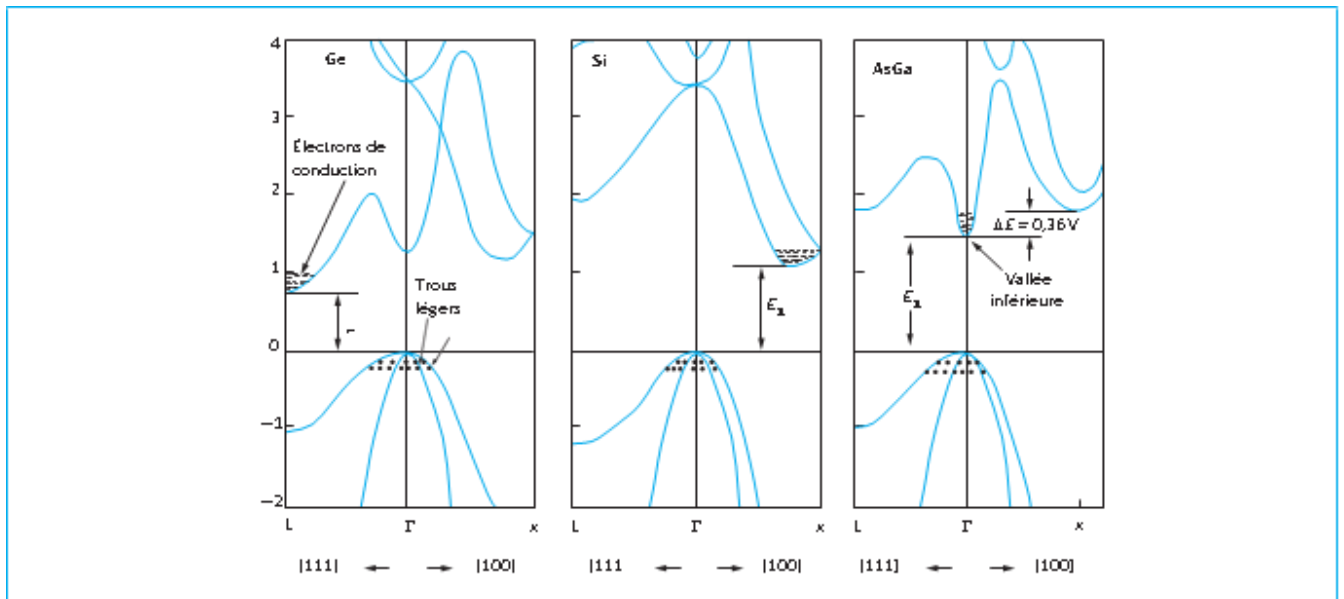


Figure 9 : Exemple de structures de bandes d'énergie de semi-conducteurs à gaps indirect (Ge et Si) et direct (AsGa).

Il y a une absorption optique dès que l'énergie d'un photon incident est suffisante pour déclencher le transfert d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. La détermination expérimentale du seuil d'absorption optique constitue le moyen le plus simple de mesurer avec précision la largeur de bande interdite.

2- Caractère optique du rayonnement :

(La figure 10) donne la variation du coefficient d'absorption optique $\alpha(\lambda)$ en fonction de la longueur d'onde λ . L'intensité I de la lumière absorbée à une profondeur x dans le matériau suit la relation :

$$I(x) = I_0 \exp[-\alpha(\lambda)x]$$

Équation 24

À partir de cette relation, on détermine la profondeur d'absorption de chaque longueur d'onde dans le matériau. Les radiations de courtes longueurs d'onde dans l'ultraviolet sont absorbées très rapidement, c'est-à-dire dans une zone proche de la surface du semi-conducteur. Le rayonnement infrarouge est absorbé sur une épaisseur plus importante, d'autant plus si le matériau est à énergie de bande interdite indirecte, comme c'est le cas pour le silicium cristallin c-Si sur la (figure 10). Cette dépendance de la profondeur d'absorption à la longueur d'onde limite les performances des cellules

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

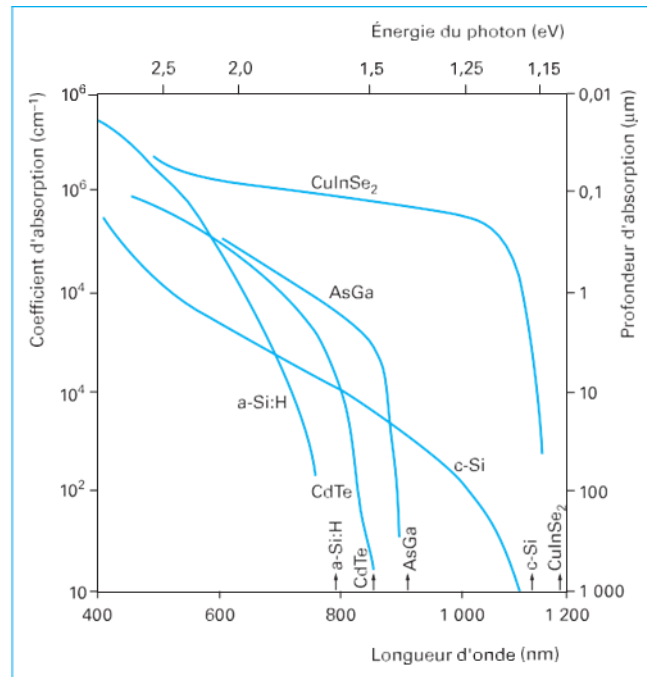


Figure 10 : Absorption optique des semi-conducteurs à gap direct et indirect.

Pour les semi-conducteurs à énergie de bande de transition directe [AsGa, CdTe, CuInSe₂ ou silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H)], le front d'absorption en fonction de l'énergie des photons, ou de leur longueur d'onde, est très raide (figure 11). La transition de bande de valence à bande de conduction est alors satisfaite sans faire intervenir une particule supplémentaire : le phonon, cette particule est associée aux modes vibratoires du réseau du cristal. Elle rend la probabilité d'absorption plus faible et le front d'absorption plus progressif, comme c'est le cas pour le silicium.

3- Caractère énergétique du photon associé :

Après cette analyse du caractère optique du rayonnement, passons au caractère énergétique du photon associé. Selon la loi de la mécanique quantique d'équivalence, l'énergie minimale nécessaire au photon pour franchir la bande d'énergie interdite est égale à l'énergie de propagation électromagnétique de l'onde associée :

$$E = mc^2 = hc/\lambda$$

Équation 25

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

Avec :

E : énergie de la particule.

Le produit hc : où h est la constante de Planck et c la vitesse de la lumière, est une constante égale à 1,24 lorsque la longueur d'onde

λ : est exprimée en micromètre et l'énergie E en (électronvolts).

B- **Semi-conducteurs intrinsèques et dopés :**

Sous l'influence de la température, quelques électrons de la bande de valence peuvent acquérir suffisamment d'énergie pour franchir la bande d'énergie interdite et passer dans la bande de conduction.

1- **Semi-conducteur intrinsèque :**

Pour un semi-conducteur intrinsèque, la probabilité de trouver un trou au-dessous du niveau d'équilibre des charges, appelé **niveau de Fermi** (EF), est la même que celle de trouver un électron au-dessus du niveau de Fermi.

Pour une température donnée T , les concentrations d'électrons dans la bande de conduction [$n_c(T)$] et de trous [$p_v(T)$] dans la bande de valence sont égales $n_c(T) = p_v(T)$, et le niveau de Fermi est situé au milieu de la bande interdite.

La concentration intrinsèque des porteurs de charge (n_i) est donnée en faisant :

$$n(i)^2 = n(c) \times p(v) = N_c \times N_v \times \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

Équation 26

Avec :

N_c et N_v densités effectives d'états qui désignent, respectivement, un nombre de places disponibles en bas ou en haut des bandes de conduction et de valence.

$$n_i = 1,6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ pour le silicium.}$$

2- **Semi-conducteur dopé :**

Un donneur est une impureté qui s'est substituée à l'un des atomes du réseau, c'est-à-dire un élément atomique, dont le nombre d'électrons de valence est supérieur à celui de l'atome du réseau qu'il remplace.

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

Pour le silicium, ces éléments sont du groupe V du tableau périodique (P, AS, Sb). Sur les cinq électrons de valence d'un atome de phosphore incorporé au réseau de silicium, quatre servent à établir les liaisons chimiques covalentes et le cinquième se libère, sous l'effet de la température, dans la bande de conduction. L'atome donneur est alors ionisé positivement (**figure 11b**).

Sachant qu'à température ambiante toutes les impuretés sont déjà ionisées et que N_d est le nombre d'atomes donneurs, le nombre d'électrons n dans la bande de conduction est presque égal à N_d^+ . Comme ces électrons sont beaucoup plus nombreux que les électrons libérés par la température, le niveau de Fermi se déplace vers la bande de conduction. Pour le silicium, où le nombre d'atomes est de $5 \times 10^{22} \text{ cm}^3$, une concentration d'impuretés introduite d'une part par million (ppm) représente une concentration d'électrons dans la bande de conduction de $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Cette dernière est trois millions de fois plus importante que celle des porteurs intrinsèques. On dit alors que le matériau est dopé de **type n**, ou plus simplement qu'il est de type n (**figure 11b**).

Un semi-conducteur de **type p** du groupe IV est dopé par une impureté qui s'est substituée à l'un des atomes du réseau cristallin mais cette fois-ci, l'impureté est du groupe III (B, Al, Ga), et elle comporte trois électrons de valence (un de moins que l'atome qu'il remplace). Les liaisons manquantes (on parle de défauts d'électrons de valence) sont décrites comme des trous positifs p , dont la concentration est égale à celle des accepteurs N_a , en négligeant les trous libérés par la température. L'impureté s'ionise négativement. Le niveau de Fermi se déplace alors vers la bande de valence (**figure 11c**).

CHAPITRE 03 : électricité Photovoltaïque

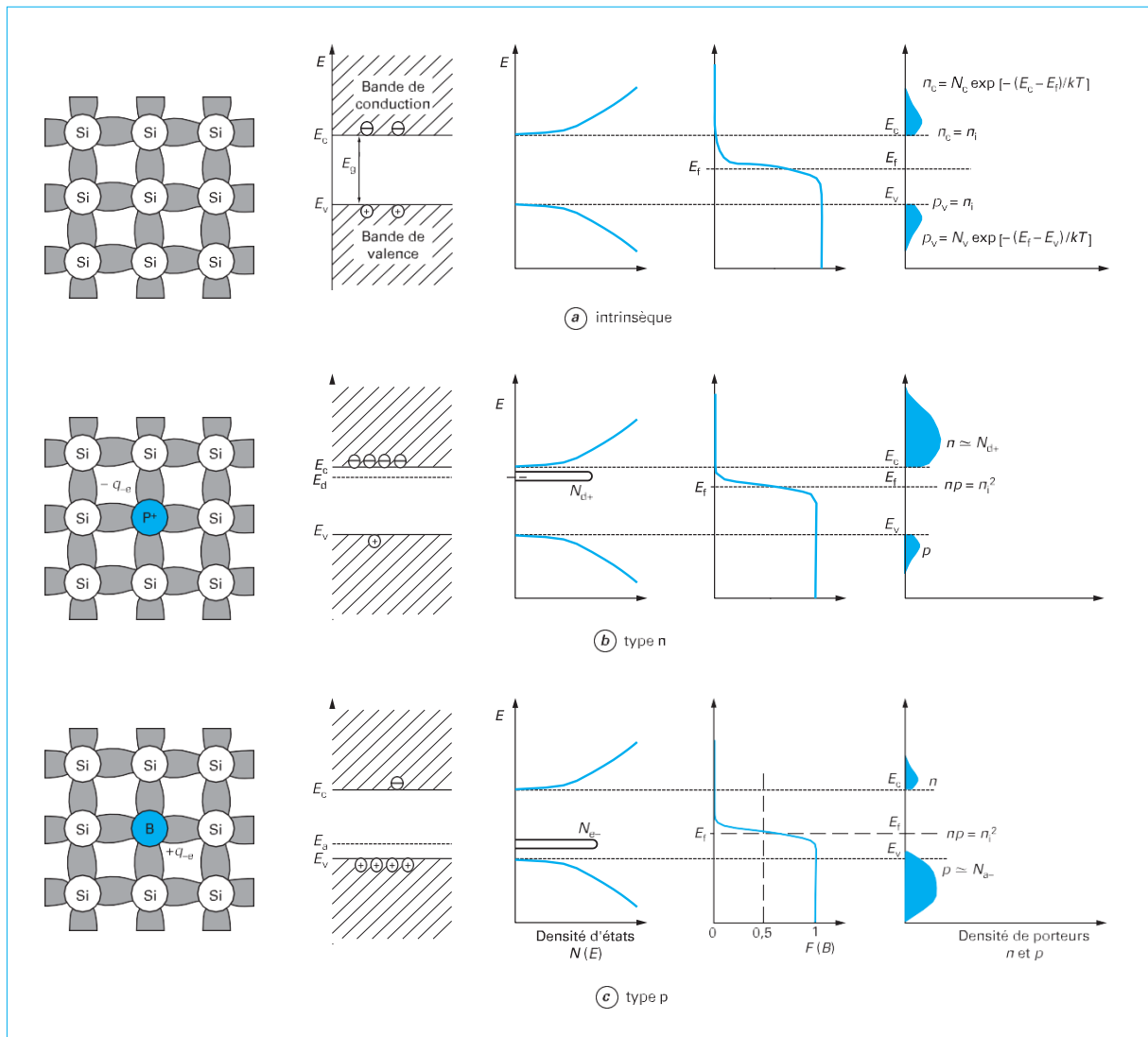


Figure 11 : Dopage des semi-conducteurs.

3- Jonction de deux semi-conducteurs dopés

Si maintenant on réunit deux semi-conducteurs de même bande interdite (**figure 12a**), l'un dopé n (avec une concentration de phosphore N_d de $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$), l'autre dopé p (avec une concentration de bore N_a de 10^{15} cm^{-3}), il se forme à la jonction entre ces deux matériaux une zone de transition. Afin de conserver l'équilibre des charges, on a : $-qN_a = qN_d$ (**figure 12b**), et on appelle cette région **zone de charge d'espace** ou **zone de déplétion**. Le niveau de Fermi de la région dopée n est d'autant plus proche de la bande de conduction que le niveau de dopage au phosphore est élevé. De même, le niveau de Fermi de la région dopée p est proche de la bande de valence. La différence d'énergie entre leurs niveaux de Fermi est égale à la différence entre leurs potentiels chimiques. Comme ces potentiels doivent s'égaliser, il apparaît une différence d'énergie qV_b à la jonction entre les

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

bandes de conduction et de valence respectives des deux semi-conducteurs dopés n et p . Le niveau de Fermi résultant de la réunion des deux matériaux est unique tout en restant proche de la bande de conduction dans la zone dopée n et proche de la bande de valence dans la zone dopée p (**figure 12c**). Cette barrière de potentiel (**figure 12d**) s'oppose au courant de majoritaires, c'est-à-dire aux électrons, pour les semi-conducteurs dopés n , ou aux trous, ceux dopés p , qui tendent à diffuser vers la région où ils sont peu nombreux. Le champ électrique qui règne dans la zone de transition est représenté (**figure 12e**), et les concentrations en trous et en électrons sont données sur la (**figure 12f**).

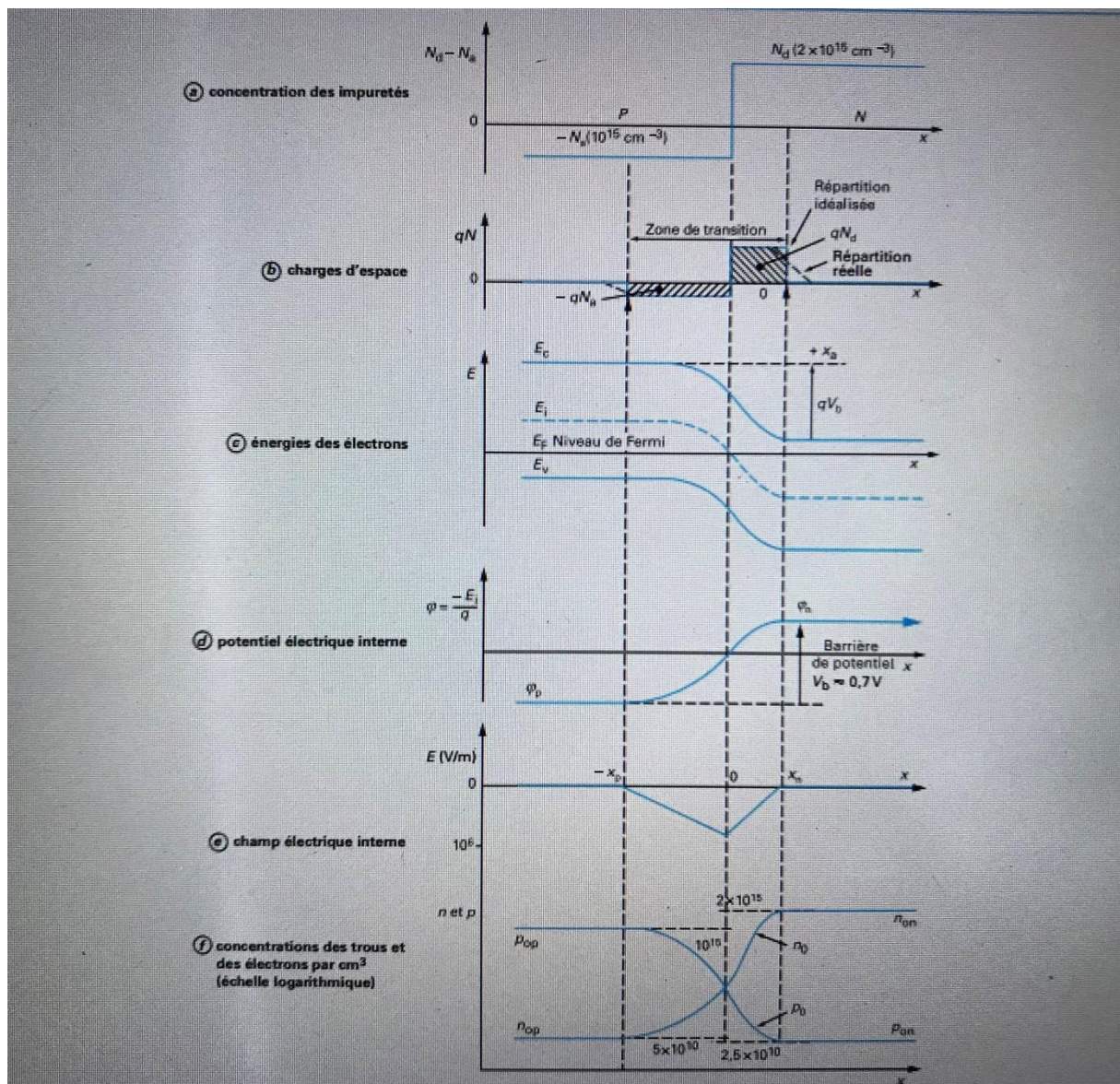


Figure 12 : Formation d'une jonction $p-n$ entre deux semi-conducteurs dopés.

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

En réalité, dans une cellule photovoltaïque au silicium, la jonction est très dissymétrique : le côté p , appelé **base**, est épais pour absorber une grande partie du rayonnement solaire (typiquement de l'ordre de 200 à 300 μm) et peu dopé en atomes de bore lors de sa fabrication (typiquement à une concentration de 5×10^{15} à $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). Le côté n , appelé **émetteur**, est exposé à la lumière et est dopé par une diffusion d'atomes de phosphore sur une très faible épaisseur (typiquement de l'ordre de 0,3 μm) à une forte concentration, proche de la solubilité limite de l'élément dans le silicium (de 1 à $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$). Ainsi la barrière de potentiel maximale est de : $v_B = 0,9 \text{ V}$.

Les porteurs minoritaires (trous de la région n et électrons de la région p) vont migrer sous l'action du champ interne qui favorise leur passage dans la région opposée à leur région d'origine. Ils donnent naissance à deux courants inverses de minoritaires qui s'additionnent pour s'opposer au courant de diffusion des majoritaires.

V. Effet PV :

1) Génération d'une paire électron-trou :

Chaque photon incident de la lumière du soleil, ou de tout autre corps lumineux, crée dans le réseau cristallin du semi-conducteur une paire électron-trou (**figure 13**), si son énergie est suffisante pour provoquer la montée d'électrons supplémentaires aux électrons d'origine thermique de la bande de valence vers la bande de conduction.

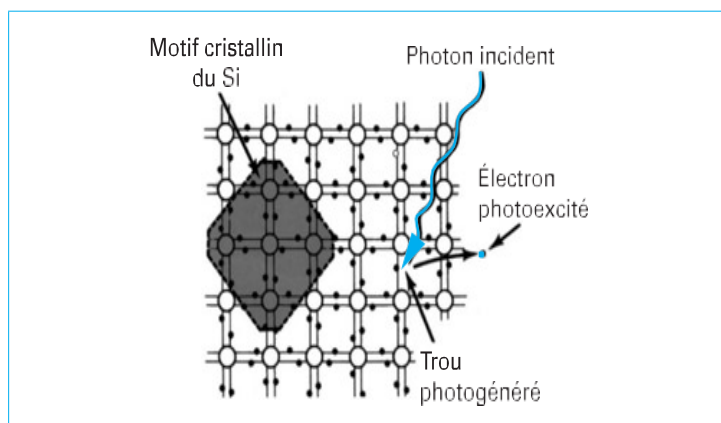


Figure 13 : Génération des paires électron-trou dans le réseau cristallin du silicium.

2) Courant généré dans une cellule à jonction $n-p$:

(La **figure 14**) représente la jonction $n-p$ d'une cellule solaire $p + n$, dont la hauteur de barrière, $q v_B$, est au mieux égale à 0,9 eV (q désigne la charge de l'électron). Un courant y

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

circule, dont l'intensité (i) dépend des valeurs caractéristiques relatives à l'émetteur, à la zone de déplétion et à la base.

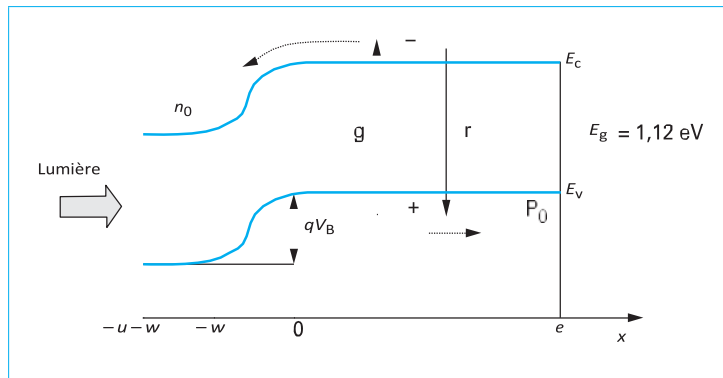


Figure 14 : Schéma de bande de la jonction $n-p$ d'une cellule solaire.

✓ Dimensions typiques d'une cellule photovoltaïque :

- la zone dopée, n_0 , appelée émetteur (E), présente une concentration en atomes de phosphore de 1 à $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, son épaisseur est $u = 0,3 \text{ } \mu\text{m}$;
- la zone de transition (de charge d'espace ou de déplétion), w , de l'ordre de $0,3 \text{ } \mu\text{m}$, et s'étend presque totalement dans la zone moins dopée p_0 ;
- la zone dopée P_0 , appelée base (B), a une faible concentration d'atomes de bore, de 5×10^{15} à $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; son épaisseur e est de l'ordre de 200 à $300 \text{ } \mu\text{m}$, afin d'absorber la partie proche infrarouge du rayonnement solaire.

Le courant résulte des taux nets de génération [$g(x, \Phi_{ph})$] et de recombinaison [$r(x, \Phi_{ph})$] de photo porteurs, et est donné par :

$$i = g(x, \Phi_{ph}) - r(x, \Phi_{ph}) \quad \text{Équation 27}$$

$$i = i(ph) - i(d) \quad \text{Équation 28}$$

Avec

Φ_{ph} : flux de photons incidents,

$i(ph)$: courant photo généré à une profondeur x ,

$i(d)$: pertes de courant dans la diode à jonction $n-p$.

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

3) Pertes de paires électron-trou

■ Les plus importantes pertes non compressibles sont les **pertes radiatives dues aux photons trop énergétiques** (ultraviolet UV) ou pas assez énergétiques (infrarouge : IR) pour générer une paire d'électron-trou:

– les **photons IR**, qui ne sont pas absorbés par la cellule, traversent tout le matériau (zone A de la **(figure15)**). La perte en énergie due aux photons IR représente 18 % de l'énergie incidente;

– les **photons UV** ne génèrent qu'une seule paire d'électron-trou. L'excédent d'énergie est transféré au réseau sous forme de chaleur et contribue à élever la température de la cellule en fonctionnement (**zone B de la figure 15**). La perte en énergie due aux photons UV représente 28 % de l'énergie incidente. Il reste donc en théorie un rendement de conversion potentiel de 54 %.

Malheureusement, il existe d'autres pertes qui sont d'origine électrique et optique. ■ Parmi les plus importantes pertes d'origine électrique, on cite la **perte en tension**. En effet, si la hauteur de barrière maximale est de l'ordre de 0,9 V pour le silicium, les meilleures tensions en circuit-ouvert (V_{oc}) sont de 600 mV et au maximum de 700 mV pour les cellules à très haut rendement.

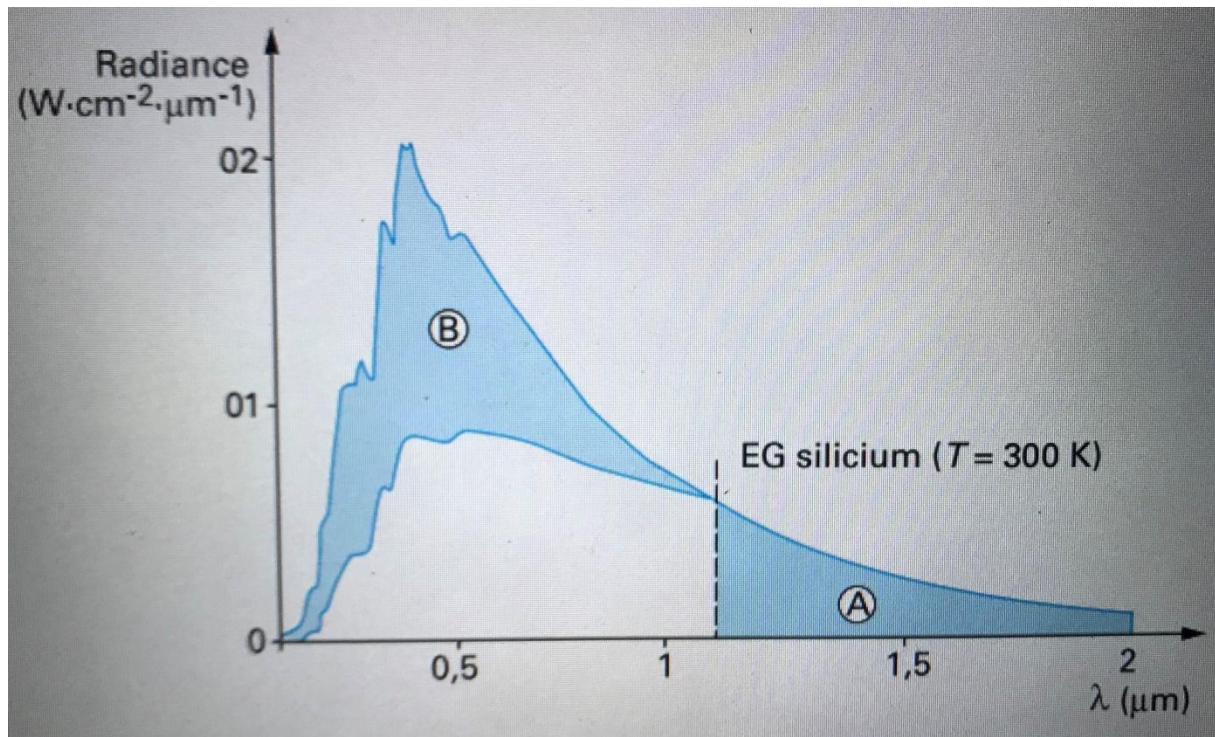


Figure 15 : Pertes des porteurs photo générés par transmission et excès d'énergie.

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

Le facteur de forme de la courbe de la diode est aussi un facteur important de pertes, ainsi que les recombinaisons des porteurs en surface ou en volume de la cellule (la diode n'est pas une diode parfaite) avec une résistance série et shunt des contacts. La grille métallique de collecte des charges sur la face frontale couvre 5 à 7 % de la surface totale.

■ Le silicium réfléchit 30 % de la lumière, les **pertes optiques** peuvent être réduites par le dépôt d'une **couche antireflet**. Au début de l'industrialisation, le dépôt était à base de TiO₂. Maintenant, un dépôt de nitrure de silicium hydrogéné SiN (H) est préféré pour ses bonnes propriétés antireflets (avec un taux résiduel de réflexion de 3 à 4 %) et surtout pour sa passivation de surface et de volume.

D'autres procédés permettent **d'améliorer le rendement** :

- la structuration de la surface en pyramides inversées ou en nid-d'abeilles augmente le piégeage de la lumière ;
- le dépôt de couches de passivation sur les surfaces et l'introduction d'un sur-dopage $n+$ sous les doigts de la grille de collecte réduisent les pertes par résistance série des contacts ;
- l'application d'un champ électrique $p+$ sur la face arrière diminue la recombinaison des porteurs générés trop près de cette face.

Ces opérations technologiques coûteuses permettent d'obtenir en laboratoire un rendement élevé, avec un record de 24,7 % proche du rendement théorique [3]. Le coût reste toutefois un facteur déterminant pour les cellules industrielles, dont les rendements se situent au moins à 8 points de rendement au-dessous de la valeur record.

VI. **Caractéristiques et réponse spectrale (33):**

1) **Paramètres caractéristiques et rendement de conversion d'une cellule :**

Comme nous l'avons décrit précédemment, le courant est donné par la relation :

$$i = i(ph) - i(d)$$

Équation 29

où i_d le courant d'obscurité circulant dans la jonction est égal à :

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

$$i(d) = i(0) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

Équation 30

La densité de courant de court-circuit i_{cc} , déterminée pour $V = 0$, est directement proportionnelle à l'éclairement i_{ph} :

$$i(cc) = i(ph)$$

Équation 31

On en déduit la tension en circuit-ouvert V_{co} par annulation du courant :

$$V_{co} = kT \ln\left(\frac{i(ph)}{i(0) + 1}\right) / q$$

Équation 32

La puissance débitée par la cellule est : $P = IV$, et au point de fonctionnement maximal m :

$$P_m = V_m \times I_m$$

Équation 33

Le facteur de remplissage (ou de forme) FF est défini par le rapport :

$$FF = I_m \times V_m / \left(\frac{i(cc)}{v(co)}\right)$$

Équation 34

Le rendement de conversion énergétique η_c de la cellule est le plus souvent donné sous la forme suivante, en fonction des grandeurs mesurables :

$$\eta_c = FF i(cc) \times V(co) / P(incid)$$

Équation 35

Avec P_{incid} puissance incidente.

Par convention, le rendement de conversion d'une cellule est toujours mesuré pour une puissance incidente de 100 mW/cm^2 et un spectre solaire correspondant à un soleil sous $AM_{1,5}$

Exemple : la cellule représentée sur le graphique de (**la figure 16**) a une densité de courant I_{cc} égale à 33 mA/cm^2 , une tension V_{co} de $0,56 \text{ V}$ et un facteur de remplissage FF égal à $0,81$. Elle a un rendement de conversion η_c de 15% .

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

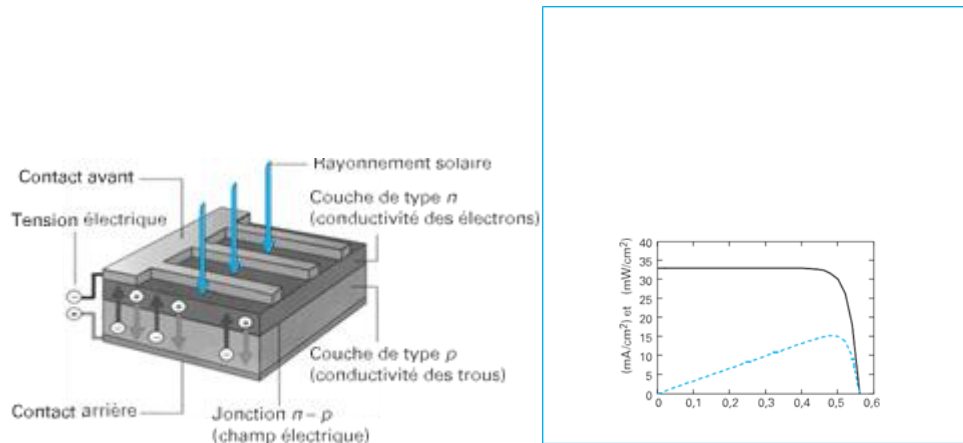


Figure 16 : Schéma et caractéristiques I-V d'une cellule.

2) Rendement quantique d'une cellule :

Le courant photo généré $[i_{ph}(\lambda)]$ sur toute l'épaisseur e d'une base d'une cellule est la somme de trois contributions :

- la première, relative à l'absorption des photons, est en $\exp(-\alpha x)$;
- la deuxième dépend de la création de paires électron-trou que l'on peut considérer comme égal à 1 ;
- la troisième, en rapport avec la collecte des électrons, dépend de la longueur de diffusion des porteurs L_D dans la zone où ils sont minoritaires.

La **longueur de diffusion des porteurs minoritaires** L_D (c'est-à-dire des électrons L_n de la base ou des trous L_p de l'émetteur) est déterminée par la qualité du matériau et par son niveau de dopage :

$$L(D) = (D\tau)^{1/2} = ((kT/q)\mu)^{1/2}$$

Équation 36

Avec :

$D = (kT/q) \mu$: coefficient de diffusion des électrons ou des trous,

μ ($m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$) : mobilité des électrons et des trous,

τ (s) : durée de vie des électrons et des trous (τ_n ou τ_p).

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

(La figure 17) montre la réponse spectrale détaillée des trois zones (émetteur, zone de charge d'espace et base) de la cellule, ainsi que la réponse globale. On note que les contributions sont complémentaires:

- l'émetteur exploite les photons les plus énergétiques qui ne pénètrent que très peu dans le matériau;
- la zone de déplétion est sensible aux radiations intermédiaires du visible (avec un maximum dans le jaune);
- la base s'occupe des photons de plus basse énergie jusqu'à la limite d'absorption du silicium à 1,1 eV.

L'importance relative des trois zones dépend d'une utilisation astucieuse des paramètres suivants :

- le coefficient d'absorption ;
- la profondeur de jonction ;
- la longueur de diffusion ;
- les vitesses de recombinaison des trous et des électrons respectivement sur la face avant (S_p) et arrière (S_n). Il est à noter que la recombinaison en surface est d'autant plus importante que le dopage est élevé.

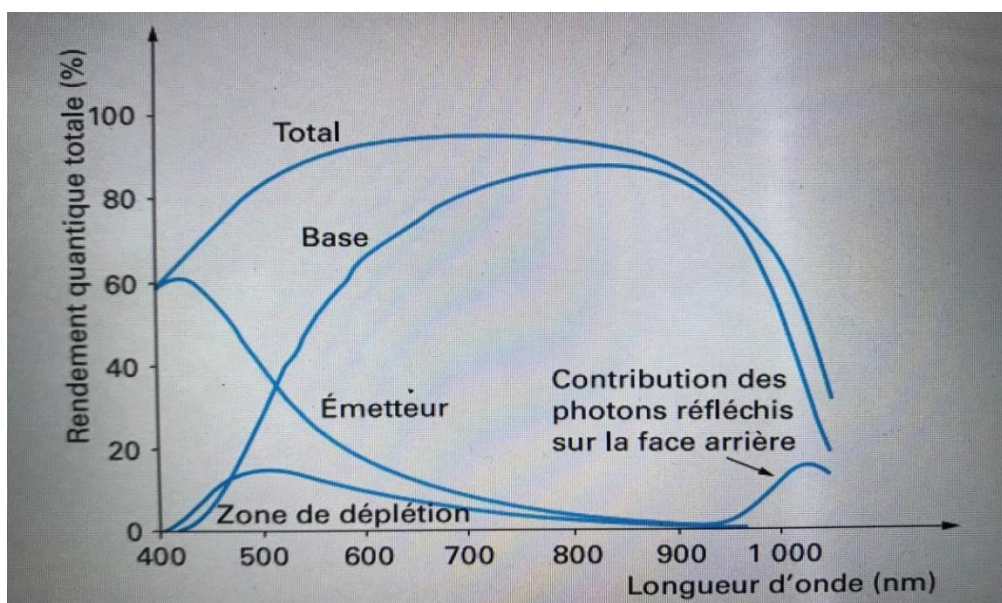


Figure 17 : Réponse spectrale d'une cellule (rendement quantique).

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

A. Convertisseur photovoltaïque (34) :

1) La cellule, un élément générateur de courant :

Il est souvent très utile pour les utilisateurs et installateurs de systèmes photovoltaïques de considérer la cellule en tant qu'un élément générateur de courant.

a- Schéma équivalent d'une cellule solaire

Le schéma équivalent d'une cellule solaire (**figure 18**) comprend le générateur d'énergie, dont le courant I_{ph} est proportionnel à l'éclairement. Le courant I , circule dans le circuit extérieur (c'est-à-dire dans la charge et dans la résistance série R_s). Il est égal à la différence entre le courant I_{ph} et le courant perdu dans la diode I_d qui circule dans la résistance de shunt R_{sh} . Les valeurs de R_s résistance série et R_{sh} de shunt doivent être très faibles pour la première et élevées pour la seconde. Les valeurs typiques sont :

$$R_s = 0,5 \text{ à } 2 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

$$R_{sh} = 2 \times 10^3 \text{ à } 2 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

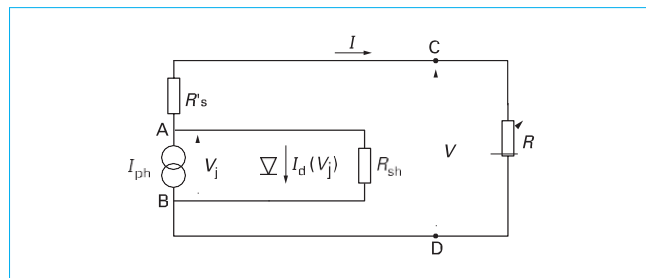


Figure 18 : Schéma équivalent d'une cellule.

b- Performances réelles d'une cellule solaire :

Les performances réelles d'une cellule solaire de 10 cm de côté (c'est-à-dire de 100 cm²), à une température maintenue à 25°, sont données sur (**la figure 19**). Le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement ($I = I_{ph}$). Le courant débité dans le circuit extérieur est de 3,2 A pour une intensité du rayonnement solaire de 1 000 W/m² et de l'ordre de 300 mA pour une intensité du rayonnement de 100 W/m².

Pour une journée sans soleil direct avec un rayonnement diffus de l'ordre de 100 W/m², la tension chute de 580 mV à une valeur de l'ordre de 520 mV. Dans ce cas, le courant I_d perdu dans la diode n'est plus négligeable.

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

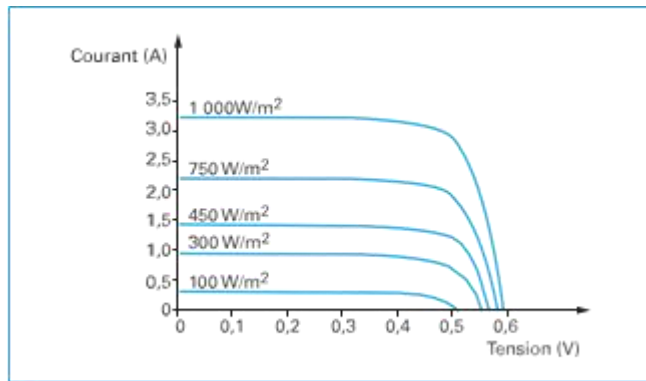


Figure 19 : Courant débité et tension aux bornes d'une cellule.

2) Module photovoltaïque :

Les cellules individuelles sont assemblées en **montage en série** « les tensions s'additionnent », (**figure 20a**) ou **en parallèle** « les courants s'additionnent », (**figure 20b**). On réalise ainsi des modules photovoltaïques.

Les cellules sont triées par le fabricant afin qu'elles aient à peu près toutes les mêmes caractéristiques et pour éviter que la plus mauvaise cellule, c'est-à-dire celle de résistance série la plus élevée, ne détermine les performances de l'ensemble.

CHAPITRE 03 : électricité Photovoltaïque

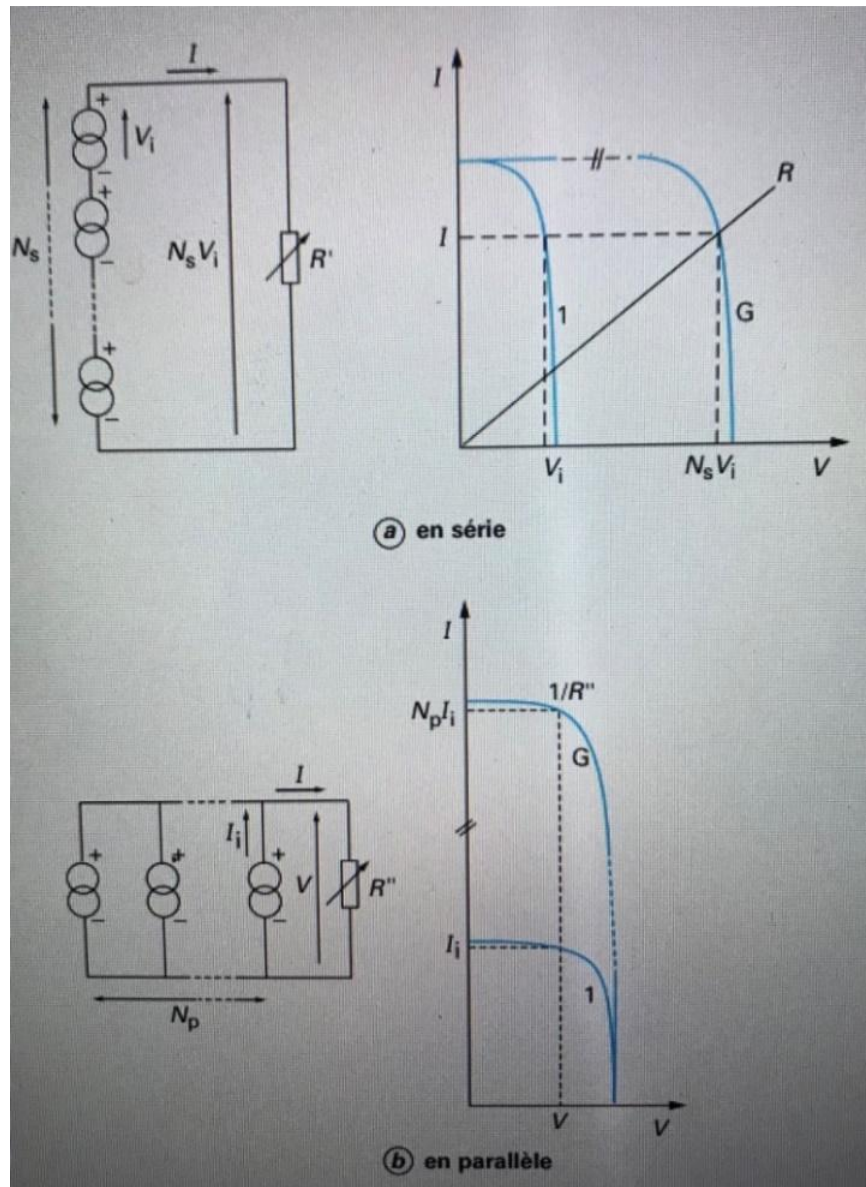


Figure 20 : Assemblage de cellules.

Un module relativement courant est représenté sur la figure 15. Ce module de 230 W [4] se compose de 54 cellules de $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$ et de $300 \mu\text{m}$ d'épaisseur, montées en six rangées de neuf cellules. Deux rangées de neuf sont en série ; ainsi, on peut choisir une tension maximale de l'ordre de 9 V (montage parallèle des deux séries de 18 cellules) ou de 18 V (toutes les séries sont en série).

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

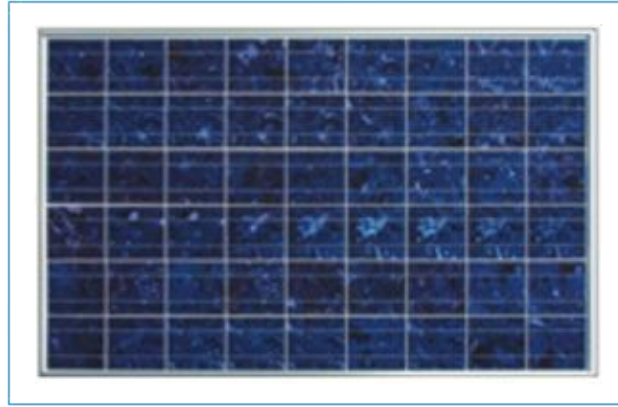


Figure 21 : Module de 230 W (doc. EDF-PWT) composé de 60 cellules (6×9) de 156 mm 156 mm.

Le rapport entre ces deux surfaces T_f est appelé taux de foisonnement. C'est le taux d'occupation en cellules du module.

Pour le modèle de module de (**la figure 21**), le taux T_f est égal à $T_f = 81\%$

Pour assurer, par exemple, une recharge d'une batterie de 12 V, un système de diode anti-retour et un système de contrôle de la charge complète l'installation.

3) **Problème du stockage de l'énergie photovoltaïque :**

Il est nécessaire de stocker l'électricité chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps par rapport à l'apport du soleil. Les durées de stockage peuvent être très variables, de quelques heures (passage de nuages), d'une nuit, à plusieurs jours ou plusieurs mois pour des systèmes autonomes, et selon le degré que l'on se fixe au niveau de la sécurité d'approvisionnement.

L'intérêt des **accumulateurs électrochimiques** est la disponibilité d'une tension quasiment constante. Le pont de fonctionnement est fixé, par cette tension, sur une droite. Celle-ci doit être aussi proche que possible de la droite définissant la charge optimale d'un générateur photovoltaïque.

Les plus anciennes et les plus robustes, pour de profondes décharges, restent les batteries au plomb. Les accumulateurs du type Cd-Ni devront être abandonnés en raison de la prochaine interdiction du cadmium. Parmi les alternatives, on peut citer les accumulateurs qui utilisent un électrolyte liquide (ions lithium dans du bisulfure de titane) et qui ont une grande capacité de stockage, une bonne stabilité en température et une étanchéité parfaite. Le stockage est le maillon faible d'un ensemble de production d'électricité photovoltaïque : en effet, la durée de vie des batteries est souvent inférieure à trois ans, pour des cycles avec

CHAPITRE 03 : électricité Photovoltaïque

des décharges profondes. Le temps de retour énergétique de la batterie est un autre point faible. Si le module photovoltaïque rembourse en 2 à 4 ans l'énergie dépensée pour sa fabrication, soit un dixième de sa durée de vie, en revanche, le temps de retour énergétique des batteries est de deux à quatre ans, et donc supérieur à la durée de vie de certaines batteries.

De ce fait, l'électricité photovoltaïque délivrée en courant continu, avec un stockage par batterie, est proche de 1,3 €/kWh.

Alors que les systèmes connectés aux réseaux sont à 0,4 €/kWh. Il est donc urgent de lancer des programmes de recherche sur de nouvelles batteries (par exemple sur les batteries Li-Ions) afin d'allonger leur durée de vie et de rendre cette dernière la plus proche possible de celle des modules. La technologie Li-Ions présente des caractéristiques très intéressantes :

- fort rendement énergétique ;
- durée de vie élevée ;
- absence de maintenance ;
- prédictibilité du comportement.

La baisse des coûts et le développement du marché dépendent de trois facteurs : le coût du générateur photovoltaïque, le coût du stockage de l'énergie et le rendement global du système.

4) Effet de la température d'utilisation sur le module photovoltaïque :

La température d'utilisation est un paramètre important dans le comportement des cellules et des modules photovoltaïques en raison de leur exposition à un flux énergétique solaire de 1 kW/m² (plus communément appelé irradiance). Avec une conversion au mieux de l'ordre de 15 %, cette énergie est majoritairement dissipée en chaleur (environ 80 %), le reste étant réfléchi (environ 5 %). Ainsi en l'absence d'une ventilation correcte, la température de la cellule et du module peut monter à plus de 70°C à midi (**figure 22**). On observe alors une légère augmentation du courant en raison de la diminution de la largeur de la bande interdite et une diminution significative de la tension (– 0,4 %/K) en raison d'une forte augmentation du courant direct de la diode.

CHAPITRE 03 : *électricité Photovoltaïque*

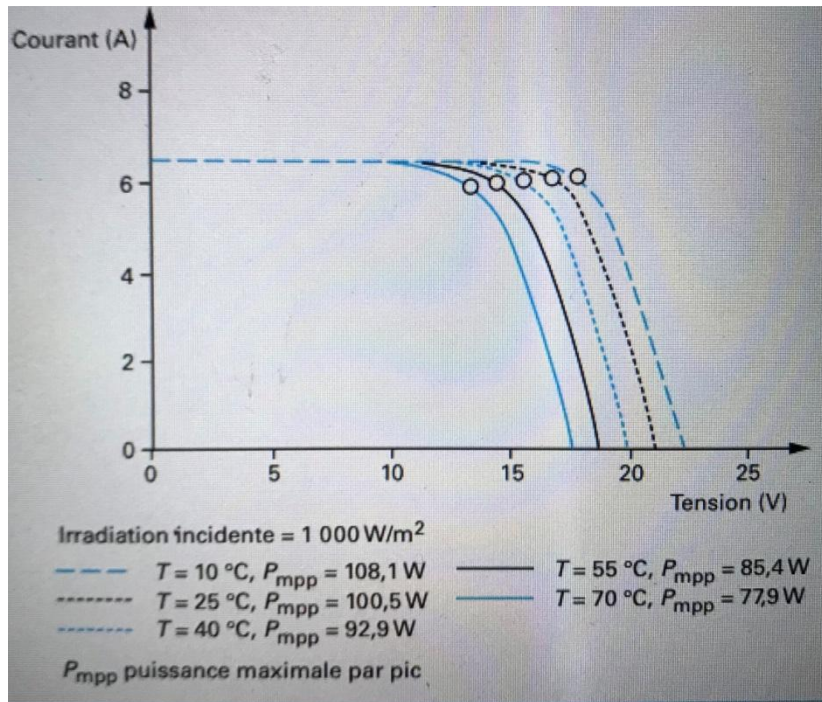


Figure 22 : Évolution des performances d'un module photovoltaïque en fonction de la température d'utilisation.

En résumé, l'augmentation de température se traduit par une baisse de la puissance ($-0,35\%/K$) et surtout par un déplacement du point de puissance maximale, qui nécessite une adaptation de la valeur de la charge. Durant l'été, la perte peut représenter jusqu'à 12 % en relatif du rendement de conversion effectif moyen du module.

VII. Conclusion

Ce chapitre, consacré à la production d'électricité par conversion de la lumière du soleil à l'aide de cellules solaires, permet de donner au lecteur un minimum de connaissances des principes de la conversion photovoltaïque, incluant des notions relatives à l'énergie transmise par le soleil, ainsi que quelques éléments de physique des semi-conducteurs et des principaux mécanismes de transport des charges électriques. La connaissance des caractéristiques électriques fondamentales (tension, courant et rendement de conversion) du dispositif photovoltaïque et son usage en tant que générateur de courant (convertisseur lumière-électricité) sont nécessaires pour une évaluation rapide du dimensionnement d'une installation photovoltaïque.

Chapitre 04

Résultats et discussion

I. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi, une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix le plus performant avec le moindre coût possible.

La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telle que le rayonnement solaire, la température, la vitesse du vent et l'éclairement. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit être correctement dimensionné. Cependant les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système (35).

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension. Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations V-I à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou issues de la mesure directe sur le module.

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un

CHAPITRE 04 : Résultats et discussion

comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque (36).

II. Résultats et discussion

Dans la première figure de dessous, nous avons choisi quelques sites algériens et nous avons dressé la variation annuelle de l'irradiation, aussi on peut voir que celle-ci diffère en fonction du jour ainsi elle commence petite pour presque tous les sites, puis en fur et à mesure qu'on s'approche de l'été, sa valeur augmente considérablement puis elle redescend en sortant de l'été et suivant aux journées d'automne et d'hiver, et ça est dû aux changements de plusieurs paramètres qui guident la variation de l'irradiation tels que : la déclinaison, la distance terre soleil, constante solaire corrigée Et l'angle de lever de soleil.

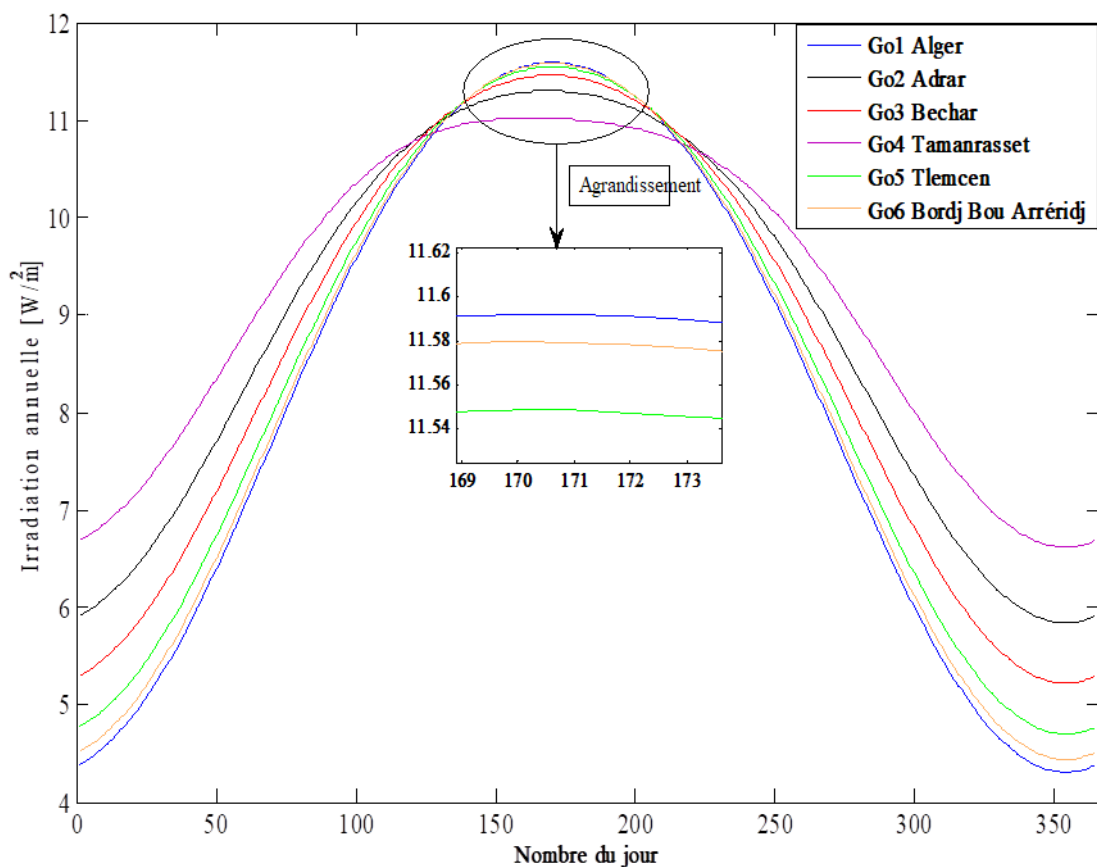


Figure 1 : Variation de l'irradiation annuelle en fonction de nombre du jour pour différents sites Algériens.

CHAPITRE 04 : Résultats et discussion

Une fois nous avons ces coordonnées, (irradiation), on va voir comment le panneau suit aussi ces variations. Ici ci-dessous, on a dressé les variations possibles dans le panneau, c'est-à-dire puissance en fonction du courant, tension en fonction de courant et enfin puissance en fonction de la tension pour les différents sites sous les mêmes caractéristique du panneau solaire afin de relater et comportement de la cellule.

Tableau 1 : Variation de l'irradiation en fonction du site à 25 Mars.

Point 1 : à j = 85 c'est-à-dire le 25 Mars

Site	Irradiation
Alger	867,1
Adrar	951,1
Bechar	919,2
Tamanrasset	986,6
Tlemcen	890
Bordj Bou Arreridj	874,9

CHAPITRE 04 : Résultats et discussion

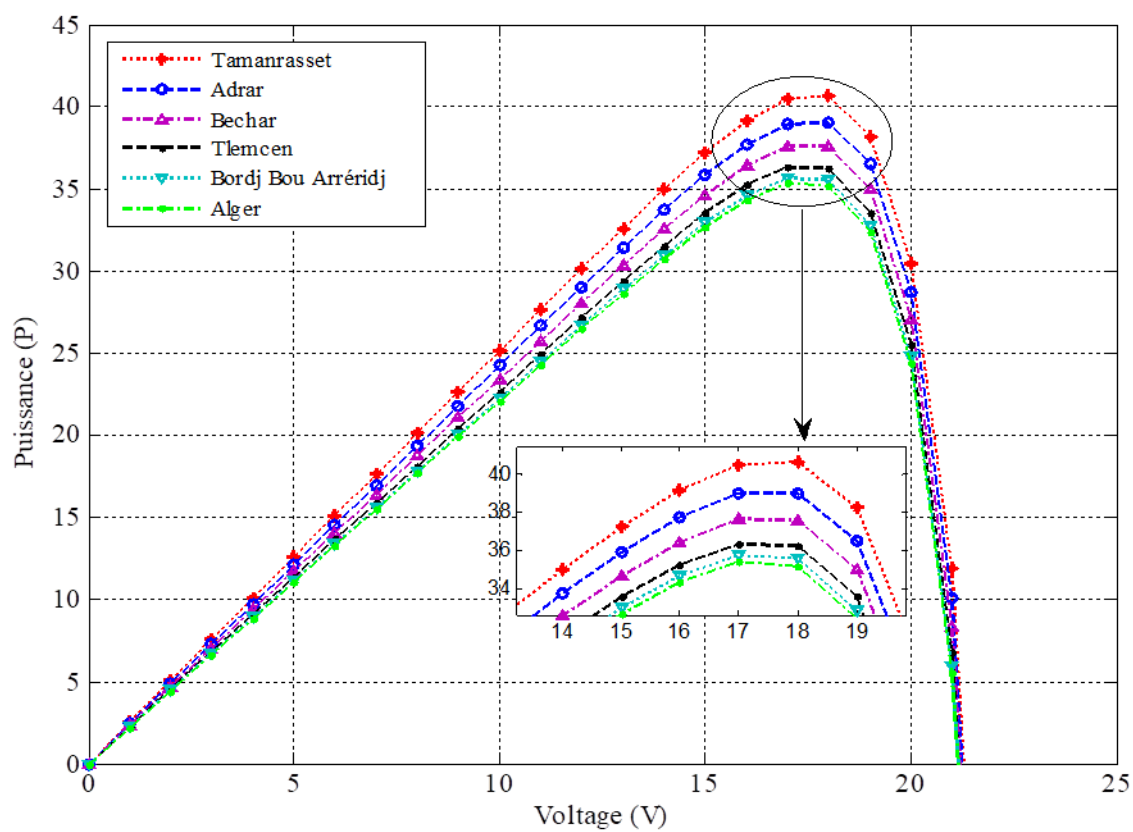


Figure 2 : Variation de puissance en fonction du potentiel pour différents sites Algériens.

CHAPITRE 04 : Résultats et discussion

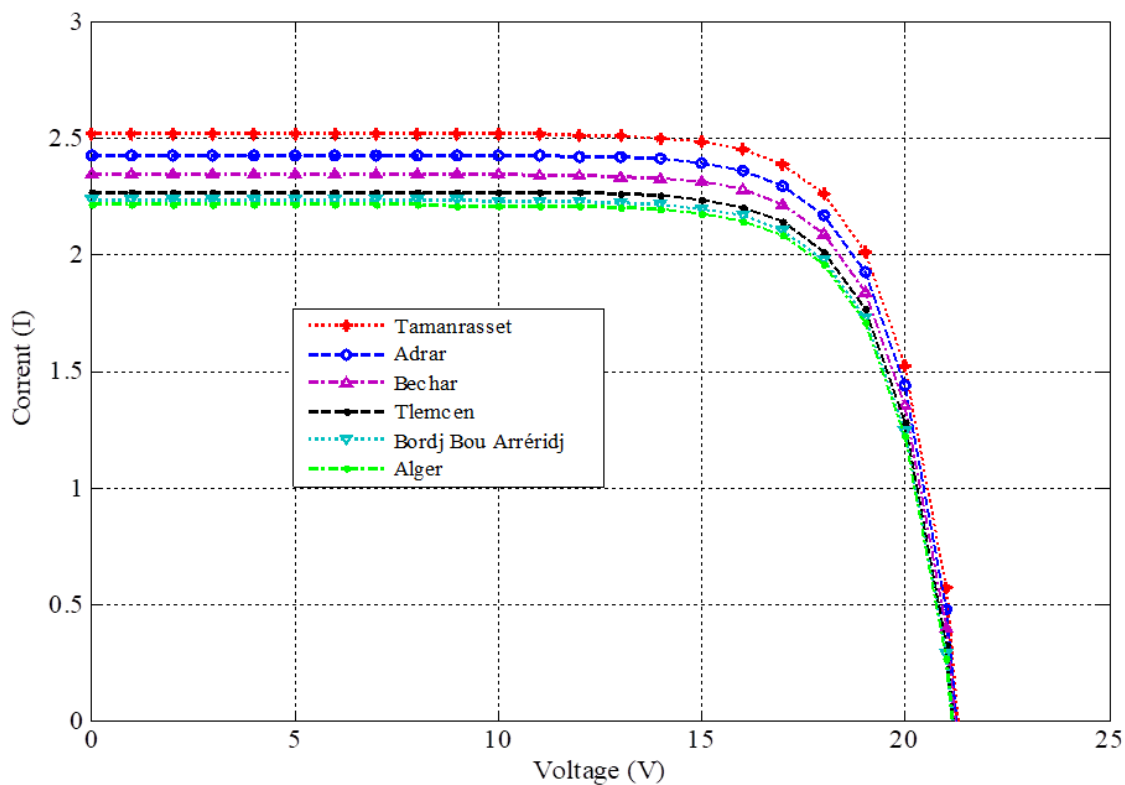


Figure 3 : Variation du courant en fonction du potentiel pour différents sites Algériens.

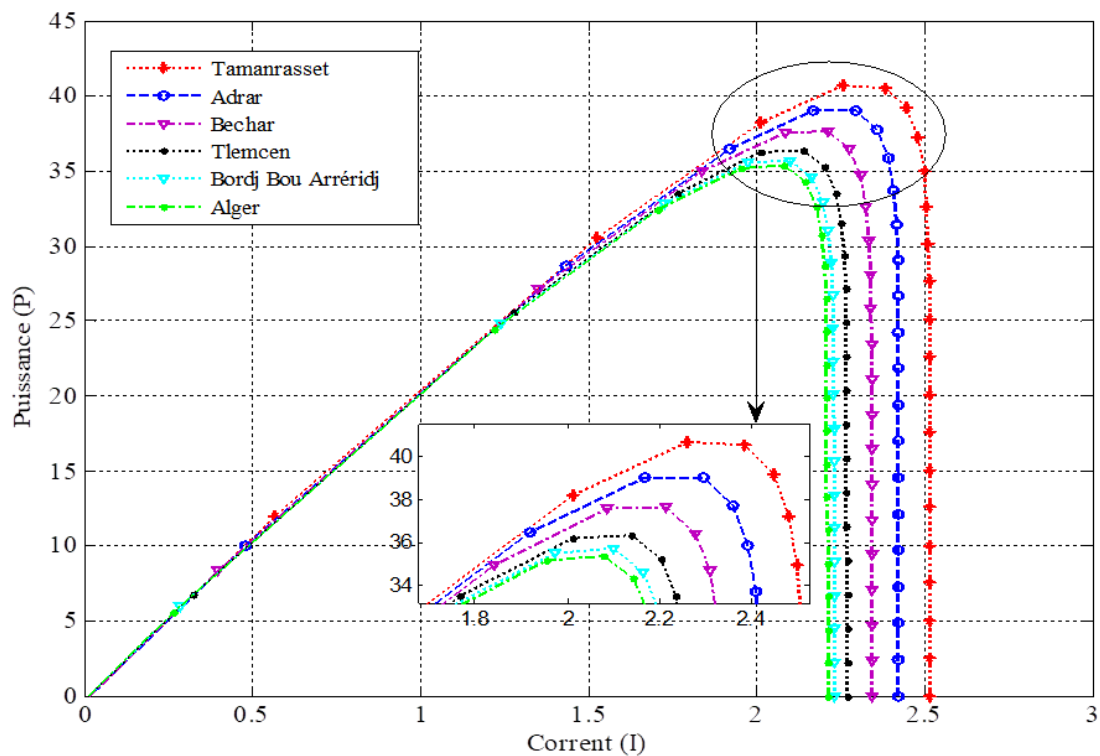


Figure 4 : Variation de puissance en fonction du courant pour différents sites Algériens.

CHAPITRE 04 : Résultats et discussion

Tableau 2 : Variation de l'irradiation en fonction du site à 20 Juin.

Point 2 : à J=170 c'est-à-dire le 20 Juin

Site	Irradiation
Alger	1159
Adrar	1130
Bechar	1146
Tamanrasset	1102
Tlemcen	1155
Bordj Bou Arreridj	1158

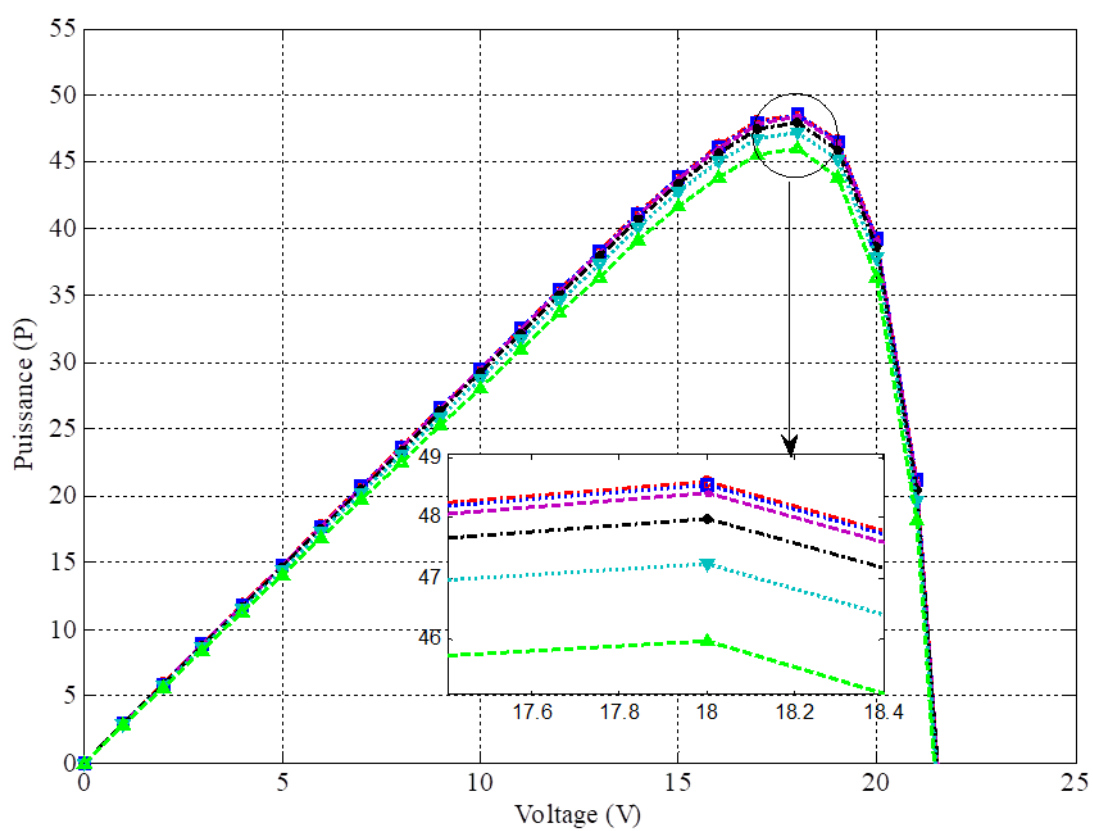


Figure 5 : Variation de puissance en fonction du potentiel pour différents sites Algériens au 20 Juin.

CHAPITRE 04 : Résultats et discussion

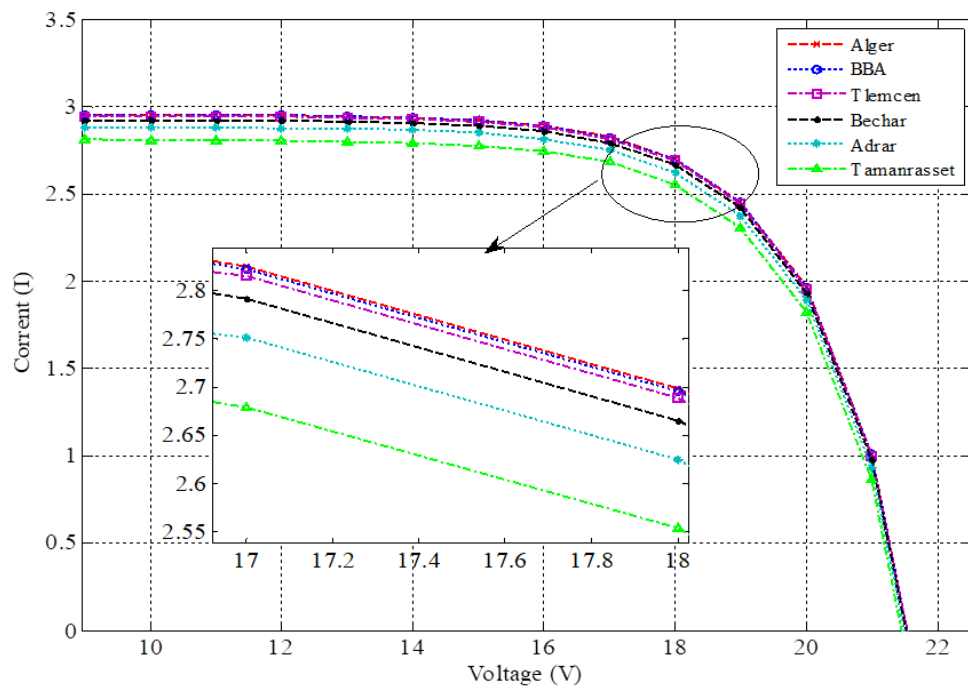


Figure 6 : Variation du courant en fonction du potentiel pour différents sites Algérien au 20 Juin.

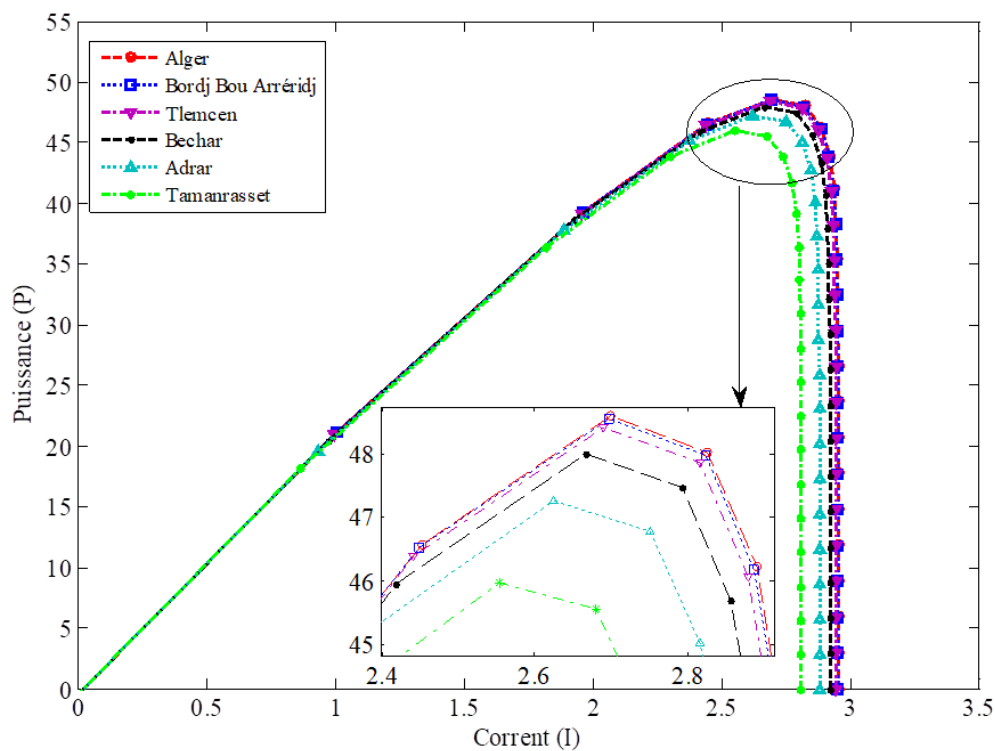


Figure 7 : Variation de la puissance en fonction du courant pour différents sites Algériens 20 Juin.

CHAPITRE 04 : Résultats et discussion

Tableau 3 : Variation de l'irradiation en fonction du site à 15 Aout.

Point 3 à J=225 c'est-à-dire 15 Aout

Site	Irradiation
Alger	1043
Adrar	1130
Bechar	1059
Tamanrasset	1102
Tlemcen	1050
Bordj Bou Arreridj	1045

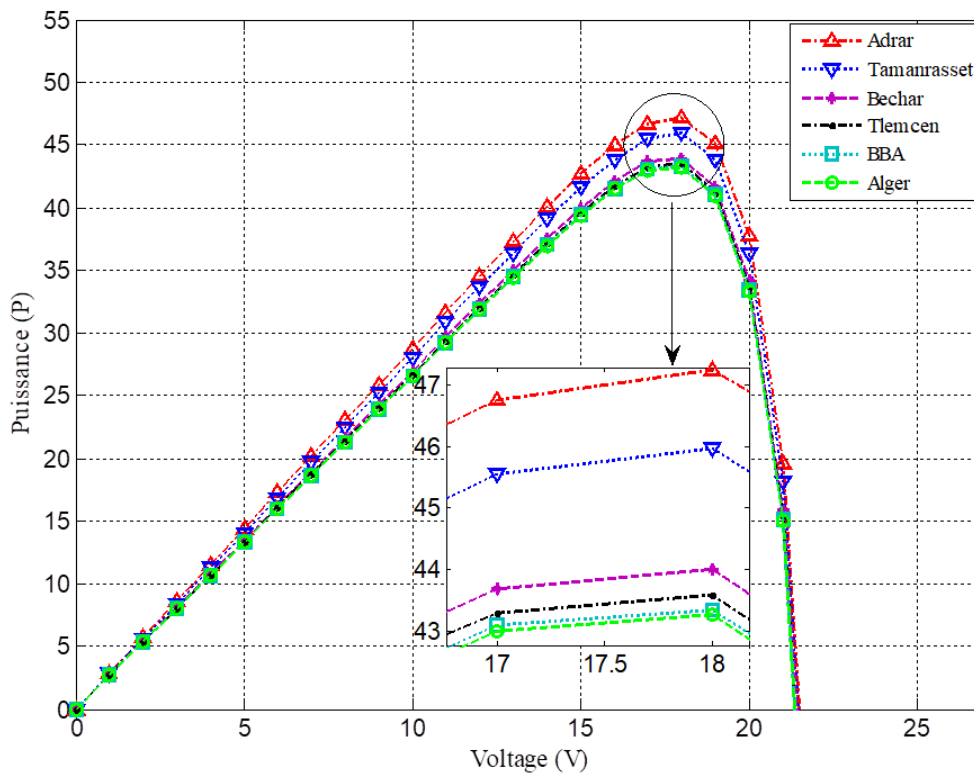


Figure 8 : Variation de puissance en fonction de la tension pour différents sites Algériens au 15 Aout.

CHAPITRE 04 : Résultats et discussion

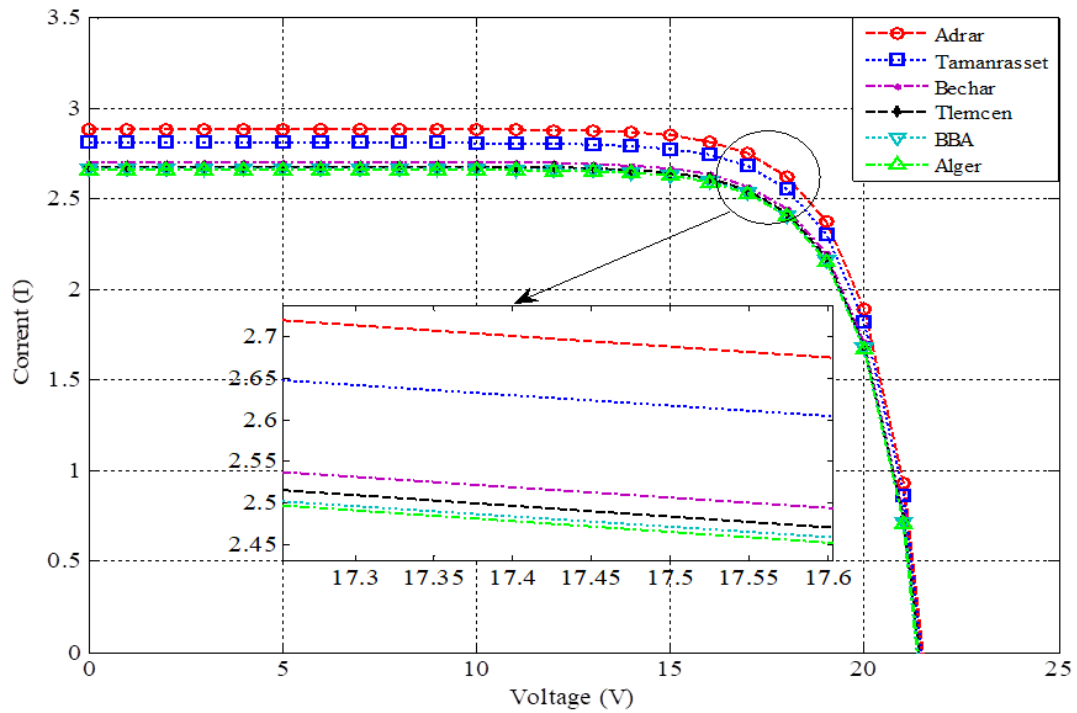


Figure 9 : Variation du courant en fonction de la tension pour différents sites Algériens au 15 Aout.

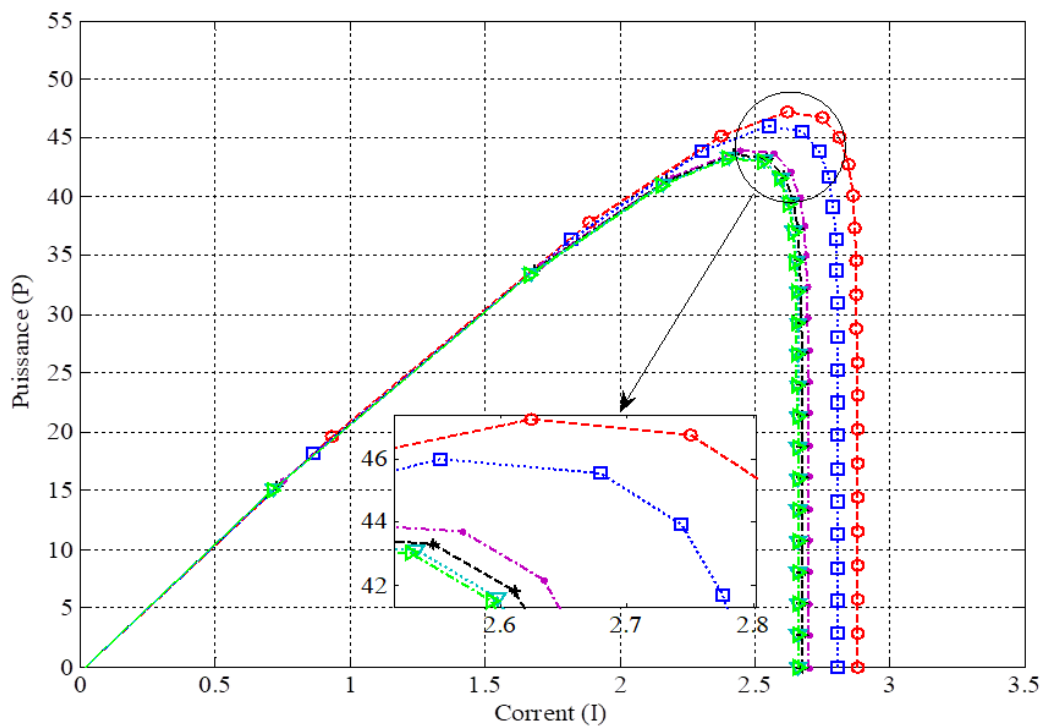


Figure 10 : Variation de puissance en fonction du courant pour différents sites Algériens au 15 Aout.

CHAPITRE 04 : Résultats et discussion

III. Commentaires

- Dans la 1^{ère} figure, on voit que l'éclairement change avec le nombre de jours où dans certaines régions au début de l'année il commence grand que les autres régions puis en approchant de l'été (à peu près entre (120 et 250) la situation est inversée où les régions dominantes dans l'hiver auront un éclairement moins que les autres et en sortant vers le jour 250, la tendance retourne comme elle a démarrée, et ça est clairement justifiée à cause de plusieurs facteurs qui gouvernent et guide, surtout la déclinaison qui change de $-23^{\circ}27'$ au $+23^{\circ}27'$ ce qui affecte sur l'éclairement.
- Dans la 2^{ème}, 5^{ème}, 8^{ème} figure, on voit que la puissance varie en fonction du potentiel, elle commence à grandir jusqu'à elle prend une valeur maximale pour une valeur fixe du potentiel après la puissance diminue sans vers le zéro pour une valeur approximative du potentiel.
- La 3^{ème}, 6^{ème}, 9^{ème} figure présente une variation du courant en fonction du potentiel d'une façon décroissante le courant atteint une valeur maximale pour une nulle tension après il diminue tant vers le zéro.
- Dans la 4^{ème}, 7^{ème}, 10^{ème} figure, on voit que la puissance varie en fonction du courant, on remarque que la puissance commence à grandir jusqu'à elle atteint une valeur maximale après elle diminue vers le zéro.

IV. Conclusion

La cellule solaire est le lieu où la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique se produit. C'est une des applications les plus connues des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium.

Une cellule photovoltaïque suit une loi $I=f(U)$ bien particulière que l'on nomme caractéristique. Les valeurs I_{CC} (courant de court-circuit) et V_{CO} (Tension de circuit ouvert) sont des valeurs caractéristiques propres à chaque cellule. Il faut savoir que ces valeurs et l'allure de la caractéristique dépend de nombreux autres facteurs comme le type de semi-conducteur, l'ensoleillement, la température de la cellule.

En effet, on observe une perte de tension en sortie ainsi que les courants de fuite. Cette perte de tension est modélisée donc par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_{sh} .

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'utilisation des énergies renouvelables a connu ces dernières années un développement considérable. L'élément de base de cette énergie est la cellule photovoltaïque qui a été l'objet de plusieurs dans plusieurs laboratoires de recherche.

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent la modélisation d'un système de production d'électricité photovoltaïque. L'étude est basée sur les différentes caractéristiques d'une cellule PV.

En effet, pour la conception des systèmes photovoltaïques, la donnée la plus utile concernant les relevés mensuels du rayonnement global reçu par un panneau photovoltaïque solaire, ce dernier incliné par rapport à l'horizontal d'un angle correspondant à la latitude du lieu pour favoriser la captation de l'énergie solaire.

La cellule solaire se comporte comme un générateur dont la tension à ses bornes et le courant qu'il débite représentent la caractéristique $I(V)$. Cette caractéristique est influencée par plusieurs facteurs tels que : la température, le flux lumineux, la résistance shunt, la résistance série.

En effet, la production d'énergie électrique à l'aide de panneau photovoltaïque présente un point optimum de fonctionnement, c'est-à-dire, qu'il existe une tension aux bornes du générateur pour laquelle la puissance récoltée est maximale. Ce point optimum a une particularité de varier avec l'éclairement et la température.

Bibliographie

Bibliographie

1. **Gouzien, Elie.** *L'énergie solaire.*
2. **Pastor, Angel Cid.** *Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques, thèse de doctorat.* Toulouse : Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse , 2006.
3. **Kamelia, Helali.** *Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative, Mémoire de MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE.* TIZI-OUZOU : UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE, 2012.
4. **B.Chaouki, B.Tarek.** *Optimisation floue neuronale et génétique d'un système photovoltaïque connecté au réseau", Mémoire ingénieurs.* Biskra : s.n., 2007.
5. *www.cea.fr.* [En ligne] commissariat à l'énergie atomique, direction de la communication bâtiment siège-91191GiF-sur yvette cedex, 2009. SSN1637-5408.
6. **JP.Maratrety.** *le soleil.* s.l. : Club d'astronomie Quazar95, 2006.
7. **Favennec, Jean-Pierre.** *Géopolitiques de l'énergie : besoins, ressources, échanges mondiaux, éditions thecnip.* 2011.
8. *Introduction aux problèmes énergétiques globaux.* **Renaud Gicquel, May Gicquel.** Feance : presse des mines amazon, 2013.
9. *Urbain Proulx, un juste prix pour l'énergie du Québec.* **Marc, Diane Brassard.** Québec : Presse de l'université du Québec, 2011.
10. **Senden, Gérald.** *gestion de l'énergie dans l'entreprise.*
11. *http/www.energies-renouvelables.org.* [En ligne]
12. **Fouad, Yacine.** *étude des nouvelles générations de cellules, mémoire de magister en rayonnements et matière.* Oran : université des sciences et de le technologie d'Oran, mohamed boudiaf (USTO.MB), 2011.
13. **Zakaria, Benjellouli.** *contribution à la modélisation d'une cellule solaire, mémoire de Magister en micro-électronique-photovoltaïque .* Bachar : université de Bachar, 2009.
14. **Florence Trouillet, Jean-Marc Vallée.** *www.inrp.fr.* [En ligne]
15. **Astier, Stéphane.** *Dossier technique de l'ingénieur, l'expertise technique et scientifique de référence.* 2008. d3935.
16. **Ricaude, Alain.** *gisement solaire et transferts énergétique.* s.l. : université CERGY-Potoise, 2011.
17. **Navarro, José Miguel.** *Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le visible, Thèse de doctorat.* s.l. : Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
18. **Singo, Akassewa Tchapo.** *Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Thèse de doctorat.* s.l. : université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
19. **Fariza, Meziani.** *Détermination du gisement solaire par traitement d'image MSG, mémoire de magister en électronique.* Tizi Ouzou : Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

Bibliographie

20. **Linda R. breg, peter H. Raven, David.** *envirement de boeck*. France : Amazon, 2008.
21. **Abderrazak, M.Guenounou.** *Mise au point de nouveaux procédés de mesure des caractéristique directe et inverse des modules photovoltaïque et différents technologies*. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid , 2009.
22. **A. Zerga, B. Benyoucef and J.P. Charles.** *Insufficiencies of the Single Exponential Model and Efficiency of the Double Exponential Model in the Optimization of Solar Cells Efficiency, Active and Passive Electronic Components*. 1998.
23. **W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga.** *étude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin*. Tlemcen : Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen, 2007.
24. *Photopiles solaires*. **A, Ricaud.** Lausanne : Presses polytechniques et universitaires Romandes, 1997.
25. **S, Protin L. and Astier.** *Convertisseurs photovoltaïques, Techniques de l'ingénieur*. 1996.
26. **Said, A.** *étude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage PV, mémoire Magistère*. Biskra : université de Biska, 2000.
27. **fateh, M.salma.** *modélisation d'un système multi générateurs PV inter connectés au réseau électrique*. Sétif : Université Farhat Abbas, 2011.
28. **Mohamed, Missoum.** *contribution de l'énergie PV dans la performance énergitique de l'habitat à haute qualité énergitique en Algérie*. 2011.
29. **Mambrini, Thomas.** *caractérisation des panneaux solaire PV en condition réels d'implantation et en fonction des différentes technologies, thèse doctorat* . paris : Université Paris sud, 2014.
30. **Ricaud, Alain.** *photopiles solaires "De la phisique de la conversion photovoltaïque aux filères, matériaux et procédés"*. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1997.
31. **Fanet, Henry Mathieu et Hervé.** *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques : cours et exercices corrigés*. Paris : s.n., 2009.
32. **(c), Kittel.** *Physique de l'état solide* . Paris : Dunod Université, 1994.
33. **GREEN (M.A.), WANG (A.), ZHENG (G.F.),ZHANG (Z.), WENHAM (S.R.), ZHAO (J.), SHI(Z.) et HONSBERG (C.B.)**. – *23,5 % efficiency and other recent improvements in silicon solar cell and module performance*. Amsterdam : s.n., 1994.
34. **(L.W.), YASUI (R.K.) et SCHMIDT.** *IEEE PV specialists Conf*. 1970.
35. **yahia, A. Ould mohamed.** *étude et modalisation d'un générateur photovoltaïque, revue des Energie Renouvelables Vol.11 N° 3* . 2008.
36. **O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed.** *Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models »7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal*. 2002.

Résumé

Résumé

Le travail entrepris dans ce mémoire a pour vocation d'y étudier une cellule voire un panneau photovoltaïque soumis au différent éclairement et c'est grandement modéliser en choisissant différentes région d'Algérie comme témoins qui ont différent latitudes et voir comment premièrement l'éclairement change durant une année et puis les caractéristiques courant-tension, puissance-tension et puissance-courant du panneau.

Abstract

The work undertaken in this memory has as aims to study a solar cell or a panel of solar cell, submitted to different irradiation of sun, and it was so modeled by selecting various cities and regions of Algeria as landmark with different latitude and declination and see how the irradiation changes over the year and establish the variation the power-voltage, courant-voltage and power-courant.

ملخص

يهدف العمل المنجز في هذه المذكرة الى دراسة خلية الطاقة او لوح شمسي معرض لإشعاع شمسي مختلف وهذا ما تمت محاكاته باختبار ولايات و مناطق مختلفة من الجزائر وهذا لتغير خطوط الطول و العرض و الارتفاع و كذلك زاويا ميلان الارض وتم عرضه من خلال مخطط الاشعاع الذي يتغير باختلاف الامكنة و كذلك الخصائص الطاقة-التواتر, الطاقة-التيار و التيار-التواتر الذي كان الهدف الاساسي.