



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et

De la Recherche Scientifique

Université de M'sila

Faculté des Sciences

Département de Physique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de :

MASTER

Domaine : **Sciences de la matière**

Filière : **Physique**

Option : **Sciences des Matériaux**

Par

BOUGUERRA NOUR ELHOUDA

THEME

Etude estimative de la production d'électricité solaire en utilisant des cellules photovoltaïques à base des semi-conducteurs

Soutenue le : **24/06/2013**

Devant le jury composé de :

H. BAAZIZ	MCA Univ. de M'sila	Président
M. SALMI	MCB Univ. de M'sila	Rapporteur
M. BEN HAMIDA	MAA Univ. de M'sila	Examineur

Promotion **Juin 2013**

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre 1 : L'énergie solaire en Algérie	3
1.1.1 Définition	4
1.1.2 Soleil	4
1.1.3 Constante solaire	5
1.1.4 Durée et taux d'ensoleillement	6
1.1.5 Potentiel solaire en Algérie	7
1.1.6 Les systèmes photovoltaïques en Algérie	9
Chapitre 2 : Les cellules solaires	12
2.1.1 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire	13
2.1.2 Conversion de l'énergie photovoltaïque	15
2.1.3 Définition	16
2.1.4 Silicium	16
2.1.5 L'effet photovoltaïque	17
2.1.6 Fabrication de la cellule solaire	20
2.1.7 Différents types des cellules solaires	28
2.1.8 Modèle d'une cellule solaire	30
2.1.9 Présentation du modèle mathématique	31
2.2.1 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque	32
Chapitre 3 : Electricité solaire produite et énergie consommée	34
3.1 Logiciel RETScreen	35
3.1.1 Description	35
3.1.2 Type de systèmes photovoltaïques	35

3.1.3 Données des produits	36
3.1.4 Modèle énergétique	36
3.1.5 Données mensuelles	37
3.2 Application aux sites algériens	38
3.2.1 Sites choisies	38
3.2.2 Logement Type	40
3.3 Résultats	41
3.3.1 Production d'énergie	41
3.3.2 Analyse des coûts	45
Conclusion générale	48
Bibliographie	49

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire à été effectué au département de

Physique, faculté des sciences, université de M'sila.

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **SALMI***

Mohamed Maître de conférences au département de Physique à l'université

de M'sila.

*Je remercie vivement Messieurs : Hakim **BAAZIZ** et Mohamed **BEN HMIDA***

d'avoir

accepté de représenter le jury de cette mémoire.

Pour sa disponibilité et son suivi sérieux de ce travail.

*Un grand merci à l'ingénieure Amr **SHALABY** pour son aide et sa*

disponibilité.

Je profite de ces remerciements pour exprimer mon affection pour mes

Parents, sœurs, et mes frères et toute la famille.

Je tiens à remercier particulièrement tous mes enseignants, mes compagnons

d'études et

de solitude pour leur présence dans ma vie. et les responsables de département

de Physique

à L'université de M'sila pour leur gentillesse et leur disponibilité.

Enfin mes remerciements s'adressent à tous ceux qui ont participé de près

ou de loin à la réalisation de ce travail.

Grand Merci ...

INTRODUCTION

INTRODUCTION

En raison du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication, une croissance de la consommation mondiale d'électricité a été observée pendant les dernières décennies. Cependant, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables (carbone, pétrole, gaz, nucléaire), dont le délai d'épuisement est estimé à quelques décennies. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant.

Le développement des sources d'énergies renouvelables et non polluantes est donc d'actualité. Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, les flux marins et océaniques, la géothermie, le solaire (cellules photovoltaïques), etc.... Ce dernier est une source d'énergie très puissante.

En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 Watt/m². La quantité totale d'énergie solaire reçue au niveau du sol pendant une semaine dépasse l'énergie produite par les réserves mondiales de pétrole, de carbone, de gaz et d'uranium. Mais dans la plupart des cas, une conversion (transformation) de l'énergie du rayonnement solaire en électricité est nécessaire. L'électricité photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules photovoltaïques.

La production d'électricité photovoltaïque connaît une croissance importante depuis les années 1990-95, pour dépasser les 2500 MW en 2006. Les projections les plus courantes prévoient un marché annuel est de l'ordre de 3 GW pour l'année 2010, et entre 9 et 21 GW pour 2020. Pour faire face à cette croissance, la recherche dans le domaine s'oriente sur deux axes essentiels, qui peuvent sembler opposés : augmenter le rendement des cellules, tout en diminuant les coûts de production. Le matériau le plus commercialisé dans l'industrie photovoltaïque est le silicium cristallin (abondant, facile à processeur, non toxique).

Cependant, dans le coût du module, le prix du matériau intervient pour environ 50% et de nombreuses études visent donc à réduire les coûts relatifs à la préparation des substrats. Le travail présenté dans cette mémoire a porté sur étude estimative de la production d'électricité solaire en utilisant des cellules photovoltaïques à base des semi-conducteurs, dont on a divisé le travail en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'énergie solaire en Algérie, le deuxième chapitre étudie théoriquement les cellules solaires et leur rendement et le dernier chapitre décrit le logiciel qu'on a utilisé pour estimer l'énergie électrique produite à partir de l'énergie solaire.

Enfin on termine par une conclusion ou les synthèses des travaux effectués ainsi que les principaux résultats sont mentionnés.

Chapitre 1

L'énergie solaire en

Algérie

1.1.1 Définition

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KW/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [1]. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- **L'énergie solaire thermique:** qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- **L'énergie solaire photovoltaïque:** qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.
- **L'énergie solaire passive:** est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

1.1.2 Soleil

Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale, sans elle la vie n'existerait pas sur terre. C'est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène, ses caractéristiques physiques principales [2] sont données dans le tableau 1.1. L'énergie du soleil provient des réactions thermonucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 564.10 Tonnes d'hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ($E = mc^2$), ce qui représente une énergie totale de 36.10^{22} W.

Caractéristique	Valeur
Masse	$1.989. 10^{30} \text{Kg}$
Diamètre	$1.392. 10^9 \text{m}$
Masse volumique moyenne	1410Kg/m^3
Puissance rayonnée	$3.83.10^{26} \text{W}$
Température superficielle	5770°K
Vitesse de déplacement	216Kms^{-1}

Tableau 1.1 : Caractéristiques principales du soleil

1.1.3 Constante solaire (I_0)

La valeur moyenne du flux solaire reçu par le plan perpendiculaire d'un mètre carré de surface et placé à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre est appelée constante solaire, notée I_0 . Cette valeur déterminée à partir des mesures réalisées à l'aide de ballon, de fusée ou des satellites. La valeur moyenne annuelle est $I_0 = 1353 \text{W/m}^2$, confirmée par les travaux de Thekaekara et Duncan [3 ,4] et qui ont proposé la valeur de 1367W/m^2 . Cette valeur est en fonction de la distance Terre – Soleil, qui varie quelque peu au cours de l'année. Le tableau 1.2 indique les valeurs de la constante solaire pour chaque mois et l'écart relatif du flux solaire par rapport à cette constante solaire.

Date 1 ^{er}	Flux solaire (W/m ²)	Ecart relatif (%)
Janvier	1399	+3,40
Février	1394	+3,03
Mars	1379	+1,92
Avril	1354	+0,07
Mai	1333	-1,48
Juin	1312	-3,03
Juillet	1308	-3,33
Aout	1312	-3,03
Septembre	1329	-1,77
Octobre	1350	-0,22
Novembre	1373	+1,48
Décembre	1392	+2,88

Tableau 1.2 : Valeurs du flux solaire à la limite de l'atmosphère terrestre.

En première approximation, on peut calculer la valeur de E en fonction du numéro du jour de l'année j [7-9] par :

$$E = E_0 [1+0,033\cos (0,98j)] \quad (1.1)$$

1.1.4 Durée et taux d'ensoleillement

➤ Durée d'ensoleillement

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent le soleil, totalement ou partiellement, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol. On dit que la nébulosité est plus ou moins importante selon qu'il a beaucoup ou peu de nuages. On appelle durée effective d'ensoleillement ou insolation S, le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré. On appelle rayonnement direct le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis son émission par le soleil.

➤ **Taux d'enseillement**

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'enseillement S_0 . On appelle taux d'enseillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'enseillement S_0 [5] :

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (1.2)$$

1.1.5 Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie dispose d'un gisement solaire très important. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (Hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de $5\text{KWh}/\text{m}^2$, sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2\text{an}$ au Nord et $2263\text{KWh}/\text{m}^2\text{an}$ au sud du pays. Le tableau 1.3 résume le Potentiel solaire [6,7].

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie(%)	4	10	86
Durée moyenne d'enseillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m^2)	1700	1900	2650

Tableau 1.3 : Potentiel solaire en Algérie

Une évaluation par satellite, effectuée par l'agence spatiale allemande, a montré que l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen [8]. Il est de $169,440\text{Tera-Watts.heure}/\text{an}$ (TWh/an) pour le solaire thermique et de $713,9\text{TWh}/\text{an}$ pour le photovoltaïque [9].

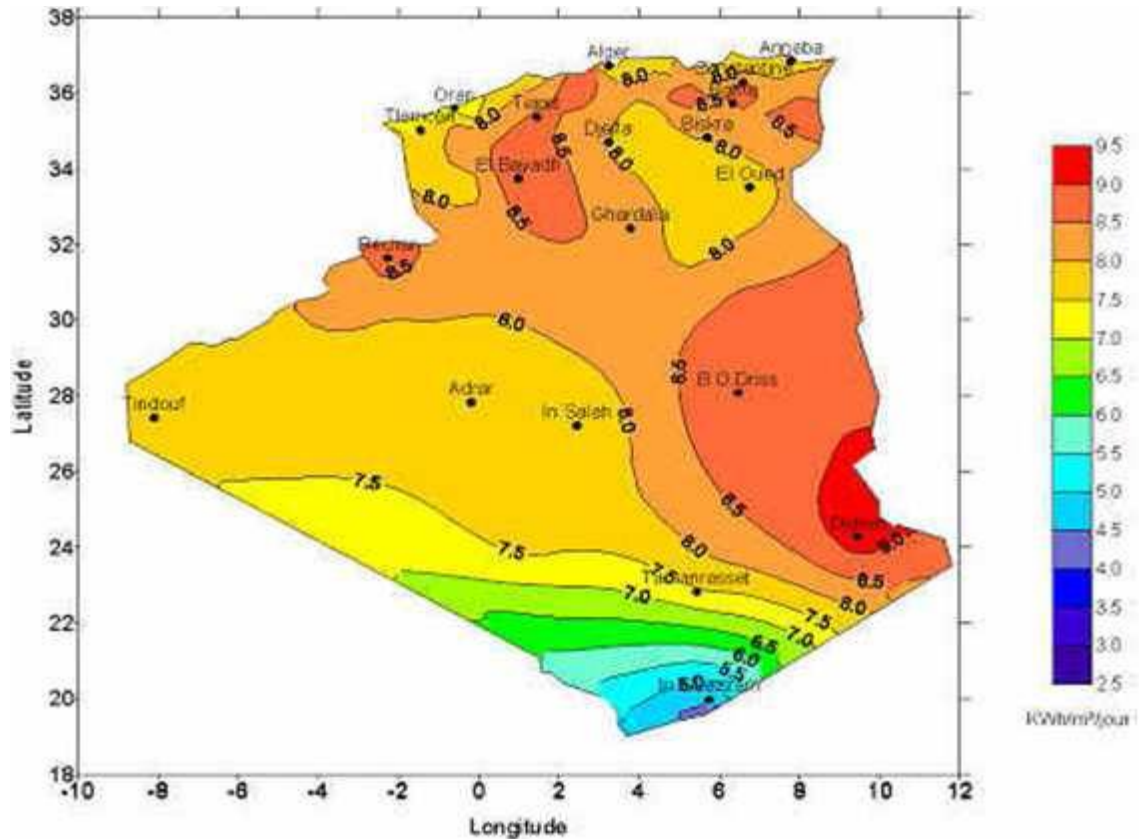


Figure 1.1 : Carte de l'irradiation solaire en Algérie (mois de juillet) [9].

b- Représentation graphique des fractions d'insolation

On peut représenter les valeurs des fractions d'insolation σ en fonction du mois, pour Chaque station. Par simple observation des courbes, on peut reconnaître trois groupes types de climat [10].

(a) : climat de l'Algérie du nord :

σ Élevé en été (aux alentours de 0,8) et moyen en hiver (environ 0,5).

(b) : climat du Sahara :

σ Très élevé en été (plus de 0,8) et élevé en hiver (environ 0,7 et plus au sud (0,8)).

(c) : climat influencé par le climat de l'Afrique intertropicale :

σ Élevé avec des valeurs plus faibles en été (saison des pluies dans le Sahel, plus au Sud) et maximum en mars.

1.1.6 Les systèmes photovoltaïques en Algérie

a- Politique nationale de développement de l'énergie solaire

La politique nationale de promotion et de développement des énergies renouvelables en Algérie est encadrée par des lois et des textes réglementaires. Les principaux textes régissant les énergies renouvelables sont :

1. **La loi n° 99-09** [11] : cette loi favorise le développement des énergies renouvelables en l'inscrivant comme un des outils de maîtrise de l'énergie à travers les économies qu'elle permet de réaliser. Elle stipule que des avantages financiers, fiscaux et en matière de droits de douane peuvent être accordés pour les actions et les projets qui concourent à la promotion des énergies renouvelables.

2. **La loi n° 02-01** [12] : cette loi permet à la commission nationale de régulation de l'électricité et du gaz de prendre des dispositions en matière d'organisation du marché pour la promotion de la production d'électricité à partir des énergies renouvelables. Les producteurs utilisant les énergies renouvelables peuvent ainsi bénéficier de primes nommées couts de diversification.

3. **La loi n° 04-09** [13] : cette loi prévoit l'élaboration d'un programme nationale de Promotion et des énergies renouvelables et la mise en place d'un observatoire national chargé de la promotion et du développement de l'utilisation des énergies renouvelables.

4. **Le décret exécutif relatif aux coûts de diversification de la production d'électricité** [14] : Le décret définit les taux de prime alloués aux producteurs d'électricité à partir des énergies renouvelables. La prime peut atteindre jusqu'à 300% du prix par KWh de L'électricité dite conventionnelle selon la nature de la source d'énergie renouvelable utilisée et le taux de contribution de la dite énergie.

b- Programmes nationaux d'utilisation de l'énergie photovoltaïque

Trois principaux projets relatifs à l'utilisation de l'énergie photovoltaïque et initiée par les pouvoirs publics sont décrits comme suit :

- Un programme annuel d'électrification rurale portant sur l'alimentation électrique par le biais de l'énergie photovoltaïque de centaines de foyers avec une puissance installée de l'ordre de 500 KW par année [15].
- Un programme de développement du pompage d'eau dans l'agriculture à travers le photovoltaïque ayant pour objectif la réalisation de 80 pompes pour une puissance de 257KW.
- Un programme quinquennal (2009- 2013) de développement des rejets steppiques par l'électrification photovoltaïque de 4270 foyers et tentes.

c- Electrification photovoltaïque

L'Algérie a réalisé beaucoup de projets dans les zones rurales qui utilise l'énergie électrique produite à partir du photovoltaïque, parmi eux [16] : Electrification de plus de 1000 foyers.

- Electrification de 15 écoles
- Electrification de 15 mosquées
- Electrification de 20 postes de sécurité

Le tableau 1.4 résume la puissance installée dans les willayas du territoire national. Malgré ces projets réalisés, ils restent faibles par rapport aux pays développés. En 2007 par exemple la production de la puissance électrique fournie des systèmes photovoltaïque dans l'union européenne est 2392 MW [17] et au Japon et les Etats Unis est 400 MW et 200 MW respectivement, cependant que la production de l'Algérie atteint 2358 KW [18].

Wilayas	Puissance installée (KW)
ALGER	47
ADRAR	235
BATNA	8
BECHAR	48
BISKRA	5
BLIDA	6
BORD BOU ARERIDJ	2
BOUIRA	3
CONSTANTINE	2
DJELFA	115
EL-BAYADH	79
EL-OUED	31
GHARDAIA	33
ILLIZI	154
KHENCHLA	13
LAGHOUAT	93
MASCARA	1
MEDEA	5
M'SILA	46
NAAMA	88
OUARGLA	61
OUM EL BOUAGHI	13
TAMANRASSET	579
TEBESSA	64
TIARET	90
TINDOUF	96
TIPAZA	2
TIZI OUZOU	6
TLEMCEN	55
SAIDA	40
SETIF	5
SIDI BEL ABBES	39
SOUK AHRAS	6
AURES REALISATIONS	288
TOTAL	2358

Tableau1.4 : puissance électrique photovoltaïque installée par wilaya.

Chapitre 2

Les cellules solaires

2.1.1 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire :

Le développement, l'optimisation et la caractérisation des cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée (le soleil). La surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800K. Ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0,5 μm pour une puissance d'environ 60 MW/m², soit un total de $9,5 \cdot 10^{25} \text{W}$ [19]. En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclairage moyen dans l'année de 1,36 kW/m² hors atmosphère. Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM), elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith :

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (2.1)$$

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation, $\theta=0^\circ$, $AM=1$: la notation utilisée est AM1. AM0 correspond à l'irradiance hors atmosphère, et est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour applications spatiales. Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G, G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffusés, par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des directes. AM1.5G donne une irradiance de 970 W/m², mais a été arrondi à 1 kW/m². L'intensité I_D reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante [19]:

$$I_D = 1.353(0.7^{AM})^{0.678} \quad (2.2)$$

Avec I_D en kW/m², pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur la figure 1.2.

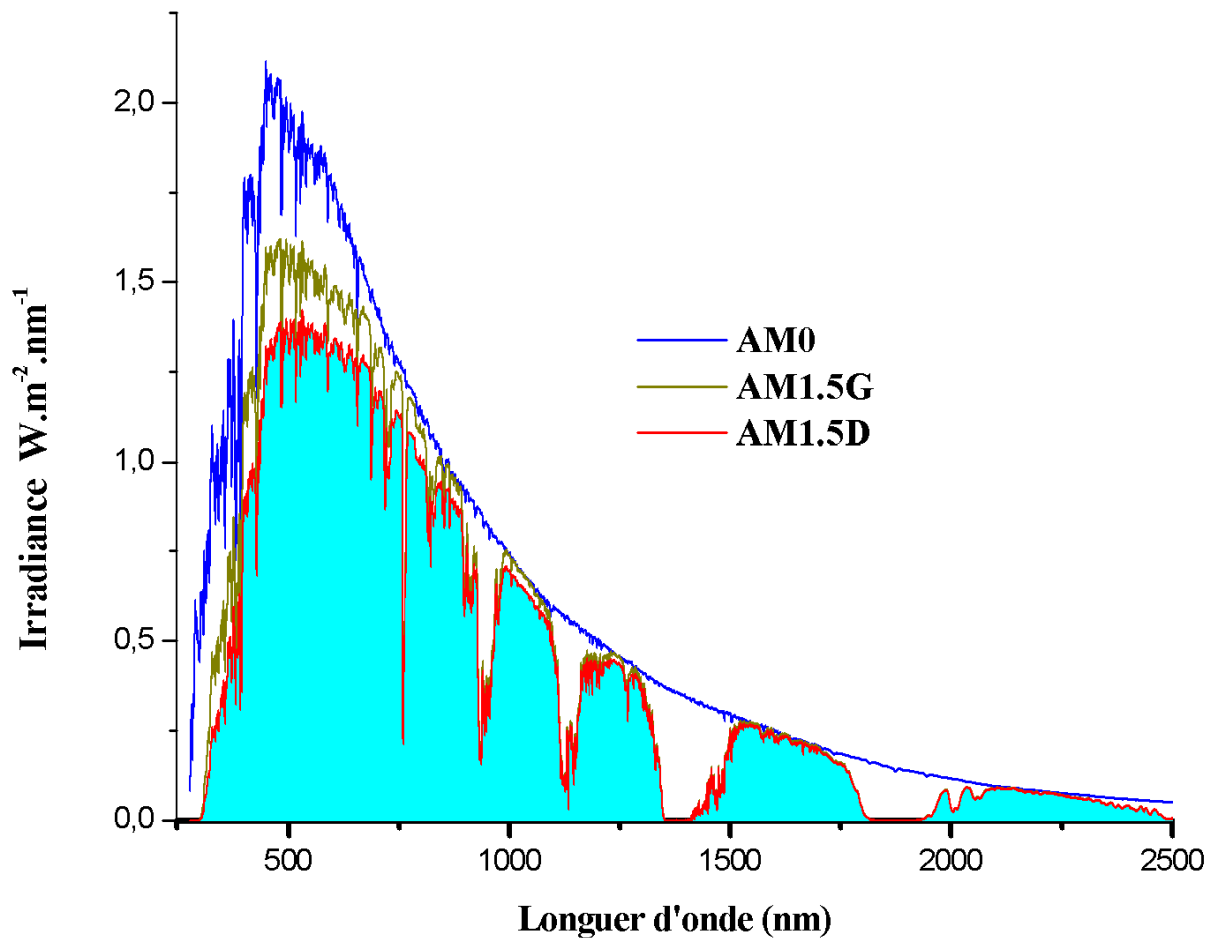


Figure1.2 : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5. [19] Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence.

Il apparaît que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et du proche infrarouge. Les irradiances définies par le nombre AM ne tiennent toutefois pas compte de la variété des conditions climatiques, et de l'altitude du lieu. La terre présente ainsi de grandes disparités dans la répartition de la puissance solaire : Les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé. Les taux d'irradiation solaire effectués par satellites par l'Agence Spatiale Allemande (DLR), montrent des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de $1200 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ dans le Nord du Grand Sahara.

Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de 800 KWh/m²/an limités à la partie sud de l'Europe [20]. Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit: 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque et 35 TWh/an pour l'éolien [21].

2.1.2 Conversion de l'énergie photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière [22]. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. La caractéristique I-V du GPV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, le point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, nous introduisons un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour coupler les deux éléments le plus parfaitement possible. Le problème du couplage parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue n'est pas encore réellement résolu. Un des verrous technologiques qui existe dans ce type de couplage est le problème du transfert de la puissance maximale du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge qui souffre souvent d'une mauvaise adaptation. Le point de fonctionnement qui en découle est alors parfois très éloigné du point de puissance maximale (PPM). La littérature propose une grande quantité de solutions sur l'algorithme de contrôle qui effectue une recherche de point de puissance maximale lorsque le GPV est couplé à une charge à travers un convertisseur statique. La figure 1-3 représente un organigramme de conversion de l'énergie solaire.

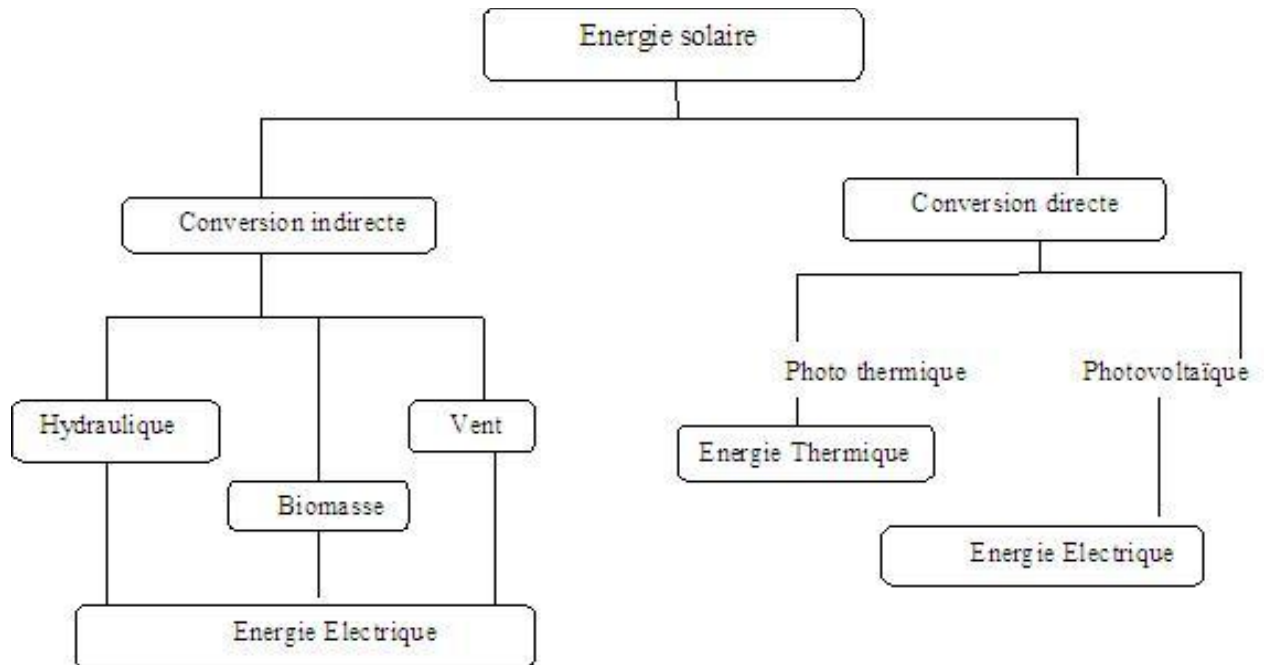


Figure1.3 : Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [23].

2.1.3 Définition

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs [24].

2.1.4 Silicium

Le silicium est l'élément le plus abondant sur terre après l'oxygène, il apparait sous forme de dioxyde (SiO_2), appelé plus communément silice. Le silicium est extrait à l'échelle industrielle par un mécanisme d'oxydoréduction, de la silice à faible teneur en oxyde de fer est mise en contact de composés de carbones, le tout étant porté à très haute température (3000°C) dans des fours électriques à arc.

On obtient du silicium de qualité métallurgique, pur à 98%, qui devient de qualité dite « électronique » après des opérations supplémentaires de purification. Le silicium occupe une place prédominante au sein de l'industrie photovoltaïque grâce à ces nombreux avantages : disponibilité, qualités photovoltaïques assurant au final un bon rendement de conversion, non toxique. Enfin, il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristalline des atomes dopants tels que le Bore (induisant un dopage de type P) ou le Phosphore (induisant un dopage de type N). D'un point de vue photovoltaïque, le seul inconvénient du silicium réside dans sa structure électronique qui présente un gap indirect, gap à 1,12 eV ne correspondant donc pas exactement au maximum d'intensité du spectre solaire. Par conséquent, l'absorption du rayonnement solaire par le silicium sera plus faible que celle d'un semi-conducteur à gap direct comme l'arséniure de gallium GaAs [23].

- **Silicium amorphe (a-si) :** Le silicium amorphe a été le premier matériau utilisé pour réaliser une cellule solaire en couche mince grâce à sa forte absorption. Cependant, le rendement de conversion reste médiocre à cause du taux de recombinaison élevé qui caractérise la structure amorphe. Le silicium amorphe a été d'abord utilisé pour des applications « portables » de faible puissance pour des produits électroniques comme les calculettes ou les montres à quartz. L'amélioration des performances jointes au coût inférieur au silicium cristallin lui ont permis de pénétrer le marché des panneaux solaires dans certaines applications où le coût importe plus que le rendement. Les recherches actuelles se concentrent sur l'amélioration des performances des cellules et la mise au point de techniques de dépôt plus rapides pour développer des cellules multifonctions [25].

2.1.5 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique ce qui met en jeu trois phénomènes physiques intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergie des photons aux particules chargées électriquement.
- La collecte des charges. [26]

➤ **L'interaction photon/semi-conducteur**

L'écart entre la bande de valence et de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure 1.4 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des k , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (voir fig. 1.4). Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique. Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (cf. figure 1.4)). Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de 1,12 eV à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3,4 eV (soit 365 nm).

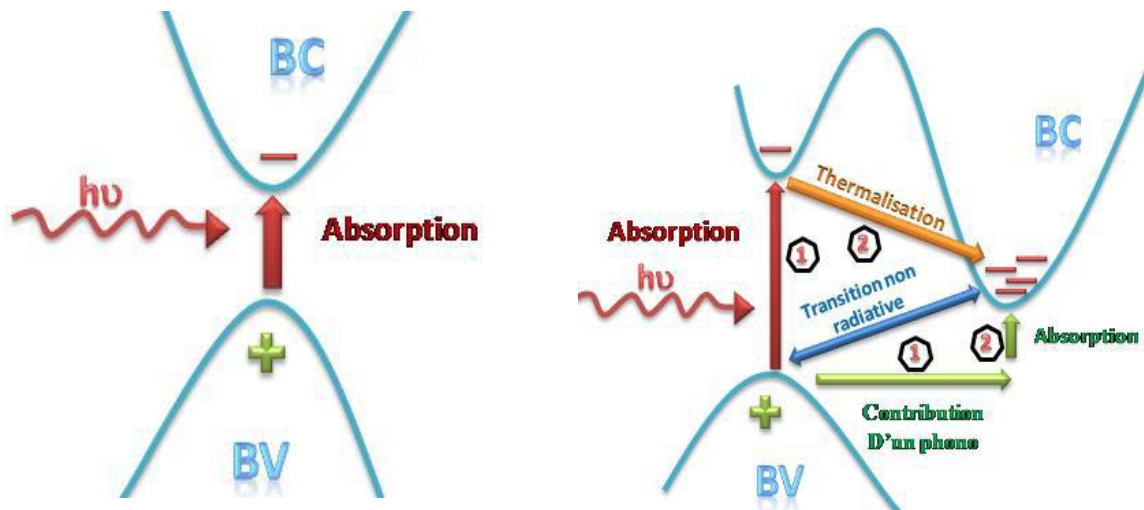


Figure 1.4 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur.

-a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, - b) à un gap indirect [19].

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La figure 1.5 nous donne celui du silicium. Nous constatons que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Å du matériau. Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition. L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.

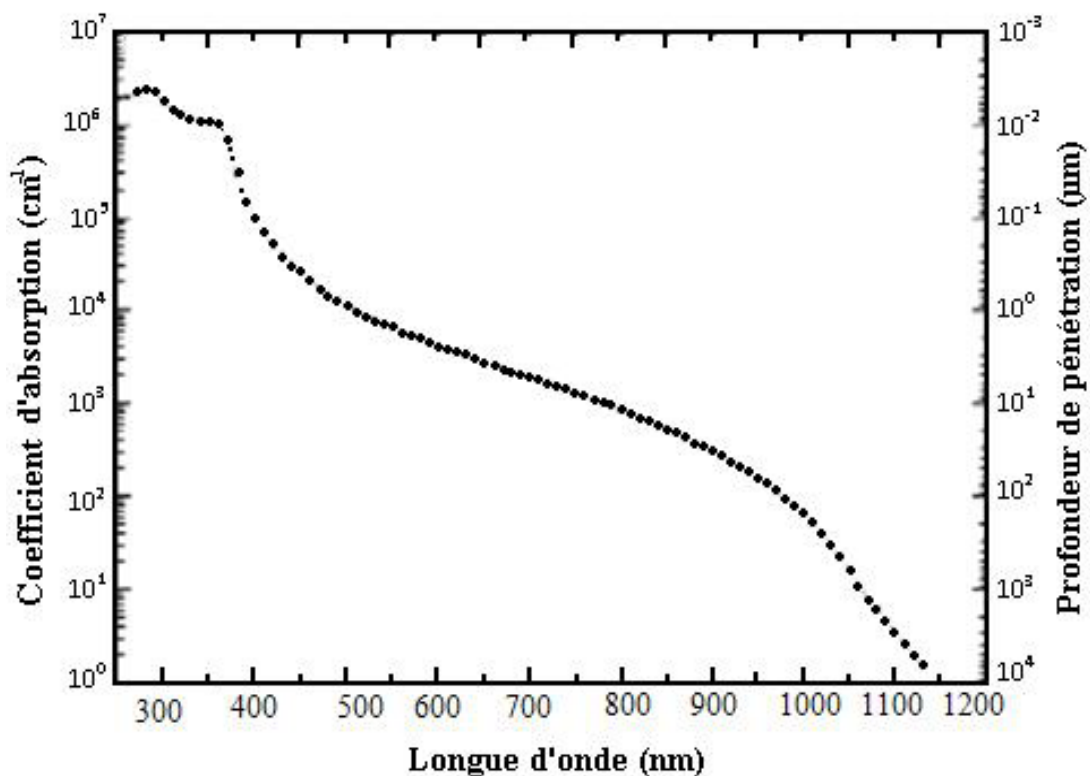


Figure 1.5 : Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde [27].

L'interaction photon-électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau. Notons que nous situons dans un régime de faible injection, c'est à dire que la densité de porteurs photogénèses est faible devant celle des porteurs majoritaires au sein du matériau. Ainsi cet excès de porteurs est plus sensible dans le cas des porteurs minoritaires (trous dans la région dopée n et électrons dans celle dopée p). La cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer ces deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux, et de les collecter dans un circuit électrique extérieur. L'absorption est caractérisée par le taux de génération optique, noté G : il s'agit de taux de création de paires électron-trou (en $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$). Les porteurs minoritaires (électrons dans un matériau de type p ou trous dans un matériau de type n) sont métastables et n'existeront, en moyenne, que pour un temps égal à la durée de vie des porteurs minoritaires. Cette grandeur définit la durée de vie moyenne avant que les porteurs ne se recombinent.

2.1.6 Fabrication de la cellule solaire

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

Deux technologies de cellules photovoltaïques sont présentes aujourd'hui :

- Les cellules dites cristallines (poly et mono)
- Les cellules dites couches minces

Le constituant essentiel d'une cellule photovoltaïque responsable de l'effet photovoltaïque est un semi-conducteur. Le semi-conducteur le plus utilisé aujourd'hui est le silicium. Nous évoquerons donc uniquement le silicium dans cette présentation, mais d'autres semi-conducteurs existent tel que le sélénium, le tellure de cadmium, etc... La fabrication des cellules photovoltaïques en 4 étapes [28] :

- La silice: matière première d'une cellule photovoltaïque
- Extraction purification du silicium photovoltaïque
- Obtention des lingots de silicium
- Obtention des wafers photovoltaïques
- Le dopage et jonction P-N

1. La silice : matière première d'une cellule photovoltaïque :

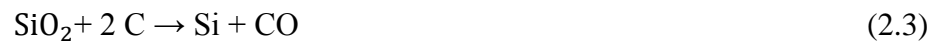
La silice est un composé chimique nommé aussi dioxyde de silicium, de formule chimique SiO₂. La silice se présente sous la forme d'un minéral dur. Dans la nature, on la trouve en grande quantité dans [28] :

- Les roches sédimentaires détritiques (sables, grès),
- Les roches métamorphiques, (schistes, quartzites)
- Les roches magmatiques.

2. Extraction et purification du silicium

Le silicium est un élément chimique de symbole Si. Il n'existe pas à l'état pur dans la nature.

Le silicium (Si) est donc extrait de la silice (SiO₂) grâce à la réaction chimique simplifiée suivante :



Cette réaction se réalise dans un four à arc car elle nécessite de faire fondre la silice. La température du four peut atteindre 3 000 °C. La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW, afin d'enclencher les réactions chimiques. En réalité, la réaction de réduction de la silice en silicium résulte d'un grand nombre de réactions chimiques intermédiaires. Après cette opération, le silicium est obtenu sous forme liquide. Sa pureté est de 98 %. Il faut le purifier encore de plusieurs ordres de grandeur afin d'obtenir un matériau adéquat pour les applications photovoltaïques [28].

Il s'agit, en partant du silicium métallurgique, de faire une purification chimique. De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium.

Au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés à 99.99 %.

3. **Obtention des lingots de silicium :** Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide. Le produit issu de cette étape est un lingot de silicium à l'état solide. Il existe deux grandes méthodes de cristallisation. La première permet d'obtenir du silicium poly cristallin (composé de plusieurs cristaux). La deuxième permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal).
- **Le silicium poly cristallin :** Le silicium liquide est mis dans un creuset en graphite. La technique est simple et peu énergivore.

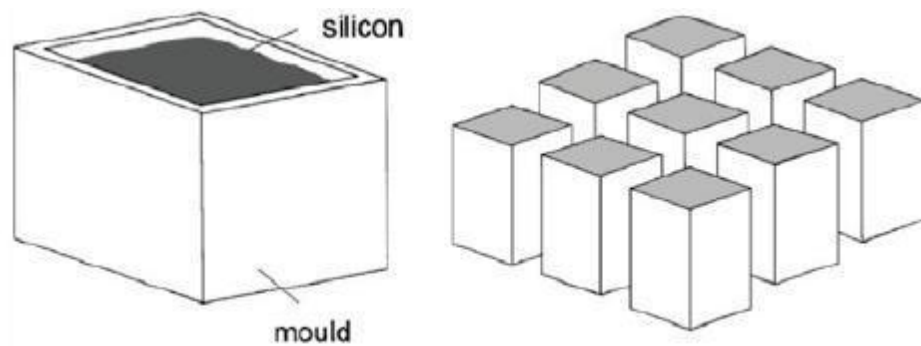


Figure 1.6 : lingots de silicium [28].

Le silicium poly cristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures. On obtient au final des lingots cubique. Cette forme est recherchée afin d'optimiser l'espace lorsque les plaquettes (obtenues par découpage en lamelles des lingots de silicium) seront placées en série sur un module photovoltaïque. Le silicium poly cristallin présente une couleur grise. Il est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientation et de tailles différentes [28].

- **Le silicium monocristallin**

Une des méthodes pour fabriquer du silicium monocristallin est la méthode dite de Czochralski (voir figure 1.7). Le silicium est placé dans un creuset de quartz et maintenu liquide à l'aide d'éléments chauffants. Lorsque la surface est à la température limite de solidification, on y plonge un germe monocristallin. Le silicium se solidifie sur ce germe selon la même orientation cristallographique. On tire lentement le germe vers le haut, avec un mouvement de rotation, tout en contrôlant minutieusement la température et la vitesse.

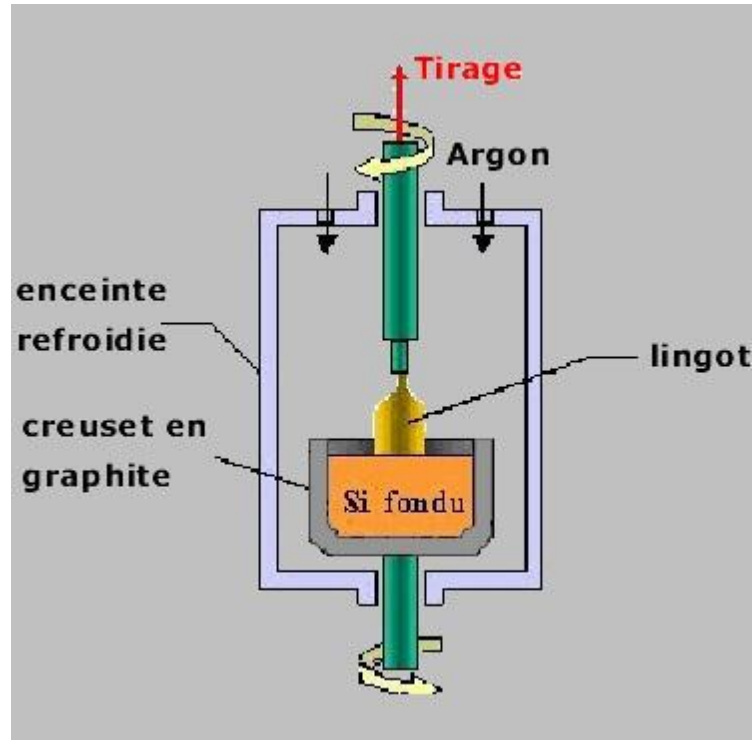


Figure 1.7 : Méthode de Czochralski

Le silicium monocristallin ainsi obtenu, sous forme de lingots circulaires, est constitué d'un seul type de cristal et présente une couleur uniforme grise. Le silicium monocristallin, plus élaboré que le silicium poly cristallin, présente un rendement (conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique) supérieure. Sa production demande cependant une plus grande dépense énergétique. L'équeutage consiste à éliminer les extrémités du lingot soit mal cristallisées soit riches en impuretés. Les extrémités sont ensuite refondues pour le départ d'un nouveau cycle de production. Lors du tirage, le diamètre du lingot varie légèrement ce qui constitue des ondulations à sa surface. Pour obtenir des plaquettes de même diamètre un polissage cylindrique est nécessaire [28].

4. Obtention des wafers photovoltaïques

Les lingots cylindriques (silicium monocristallin) ou parallélépipédiques (silicium polycristallin) de silicium obtenus à l'issue de l'étape de solidification sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers » (en anglais, "wafer" signifie "galette"). La coupe des lingots est effectuée par une scie à fil. Compte-tenu de la faible épaisseur des tranches à découper (300 μm), le principal problème du sciage est la perte de découpe. Afin de minimiser ces pertes, la solution technique retenue est la scie à fil. En effet, la perte de découpe typique des scies à fil est de 200 μm à 240 μm , ce qui représente 55% de perte en moins par rapport aux scies à diamètre intérieur (perte de découpe de 310 μm à 350 μm). Avec une scie à fil, il faut donc 570 μm de silicium pour produire une tranche de 350 μm . L'étape du sciage représente un élément déterminant dans le coût de la production des cellules photovoltaïques.

5. Dopage du silicium

Les wafers de silicium obtenus à l'issue de l'étape de sciage sont alors introduits dans un réacteur de croissance dans lequel va se dérouler l'étape de dopage. Qu'est-ce que le dopage ? Le dopage est une méthode permettant de réaliser la jonction P-N. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques. Le semi-conducteur dopé est alors appelé "semi-conducteur extrinsèque". Il existe deux types de dopage : le type N (Négatif) et le type P (Positif).

- **Dopage de type N**

Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative [28].

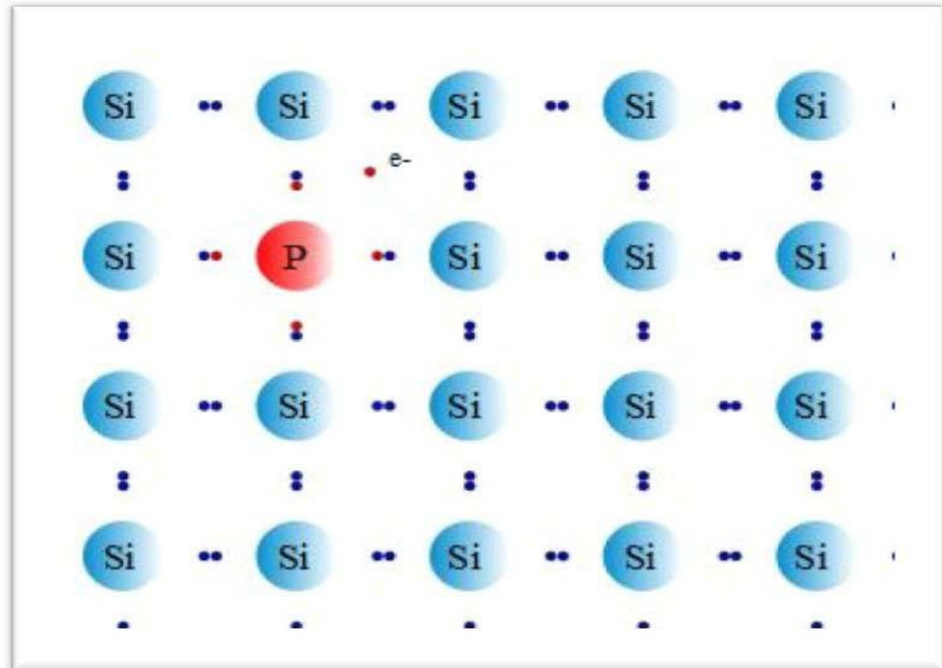


Figure 1.8 : dopage de type N

- **Dopage de type P**

Le dopage de type P consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive [28].

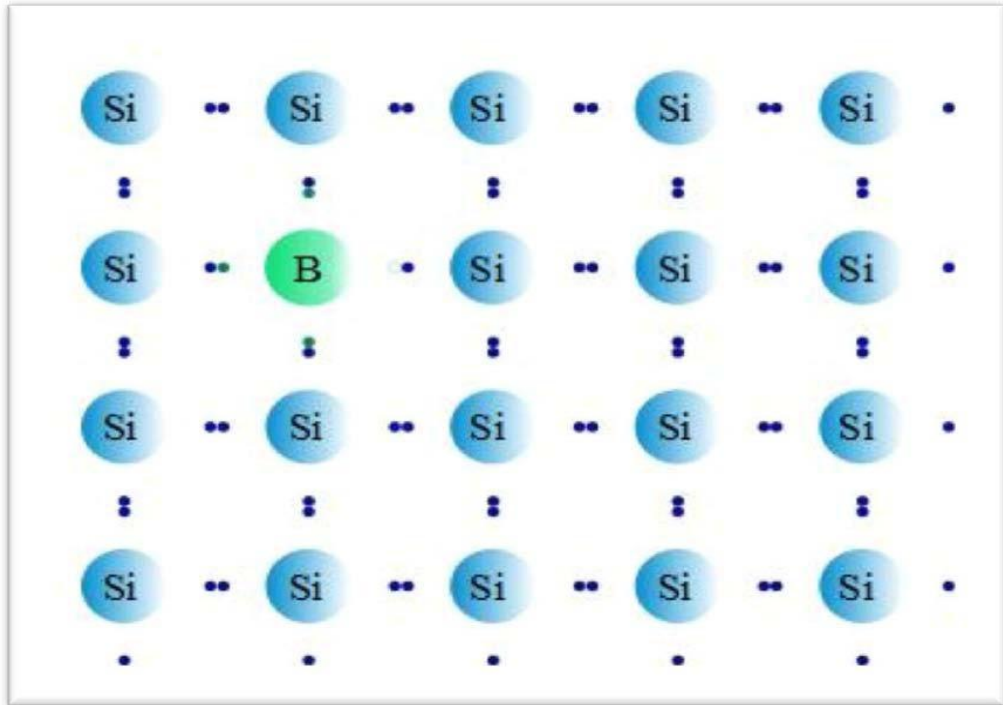
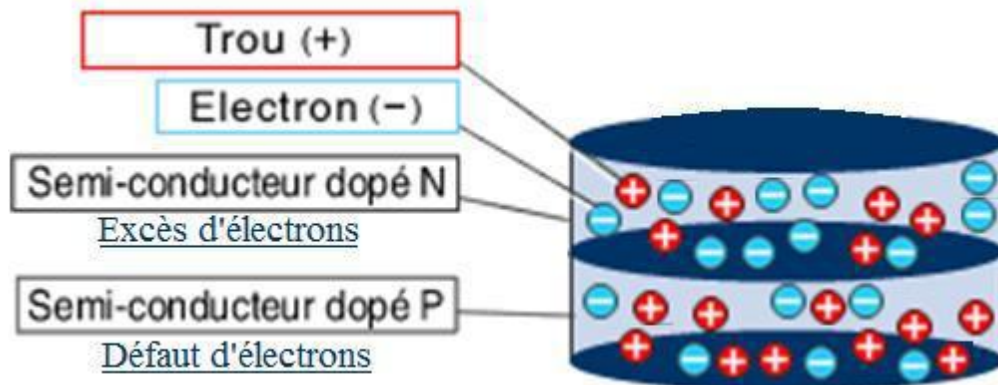


Figure 1.9 : dopage de type P

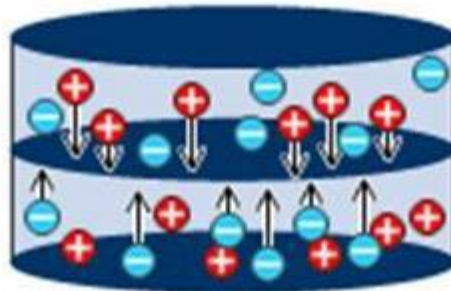
- **Méthodes de dopages :**

- **La diffusion :** On utilise un four, dans lequel on injecte des gaz avec une solution dopante pour le silicium. Avec la chaleur, le dopant a une énergie suffisante pour entrer dans la plaquette de silicium. Cette méthode est assez ancienne, et nécessite d'avoir une température uniforme dans le four.
- **La croissance épi axiale :** Cette méthode utilise toujours un four, mais cette fois-ci les atomes du dopant sont déposés sur le silicium qui représente sous la forme d'une plaquette. On a ainsi un dépôt en surface, et non pas une insertion comme pour la méthode de dopage par diffusion. La température du four doit avoisiner les 1 200°C.
- **Le bombardement ionique :** Une source (appelé faisceau ionique énergétique) produit des ions, qui sont ensuite accélérés, et par le biais d'un contrôle très précis, ceux-ci vont alors se positionner sur la plaquette. L'avantage de ce principe est que l'opération se déroule à température ambiante. Le défaut de cette technique est qu'elle peut provoquer des dommages au silicium induisant un réarrangement indésirable de sa structure cristalline, exigeant ainsi une autre recristallisation.

Dans le processus de fabrication d'une cellule photovoltaïque, les wafers, obtenus par sciage des lingots de silicium purifié, subiront soit un dopage de type N soit un dopage de type P. La suite du procédé est d'associer un wafer dopé N avec un wafer type P :



Les électrons en excès de la région dopé N ont tendance à diffuser vers la région P (où ils sont minoritaires). Il en est de même pour les trous en sens inverse.



Les électrons et les trous se concentrent alors au niveau de l'interface entre les deux tranches (la figure ci-dessous donne une schématisation de la jonction P-N).

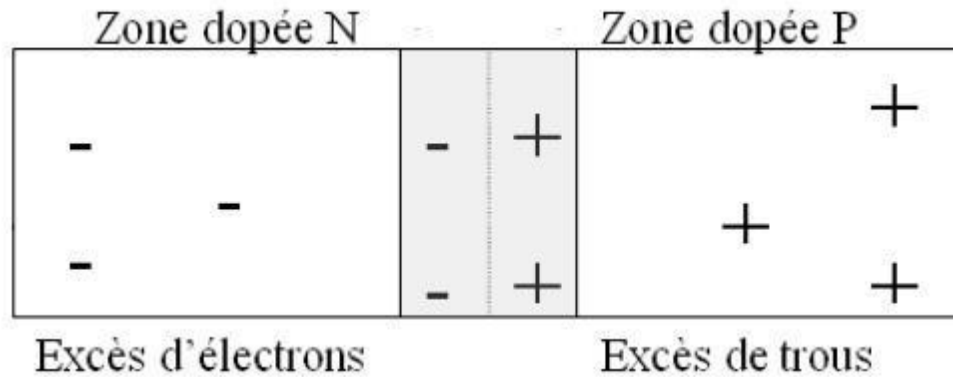


Figure 2.1 : Création de la jonction P-N

Cela a pour effet de créer un champ électrique créant une barrière de potentiel au niveau de la zone centrale. Cette zone devient un isolant et s'appelle la jonction P-N.

Le champ électrique ainsi créé a tendance à repousser les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P. De ce fait, lorsque la zone dopée N est exposée au rayonnement lumineux, un électron de la couche de valence du silicium est arraché, laissant parallèlement un trou. Sous l'effet de champ électrique créé par la jonction P-N, l'électron se déplace à l'extrémité de la zone N, et le trou se déplace à l'extrémité de la zone P. Lorsque les deux faces de ces deux zones sont reliées par un conducteur, un courant se crée, car l'électron va combler le trou. Une cellule photovoltaïque est constituée d'une tranche dopée N posée sur une tranche dopée P. L'interface entre les deux tranches s'appelle la jonction P-N. La tranche dopée correspondra à la partie de la cellule exposée au rayonnement solaire [28].

2.1.7 Différents types des cellules solaires

- **Cellules monocristallines** : sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie, plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium.

Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse [29].

- **Cellules poly cristallines** : sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Durée de vie estimée : 30 ans. Un cristal est un solide avec des façades polygonales, plus ou moins brillant, à structure régulière et périodique, formée d'un empilement ordonné d'un grand nombre d'atomes, de molécules ou d'ions [29].

- **Cellules Amorphes** : ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grande surface à bas coût en utilisant peu de matière première. Nota : En chimie, un composé amorphe est un composé dans lequel les atomes ne respectent aucun ordre à moyenne et grande distance, ce qui le distingue des composés cristallisés. Les verres sont des composés amorphes [29].

2.1.8 Modèle d'une cellule solaire

La caractéristique du courant $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque est schématisée selon la figure (2.2) [1].

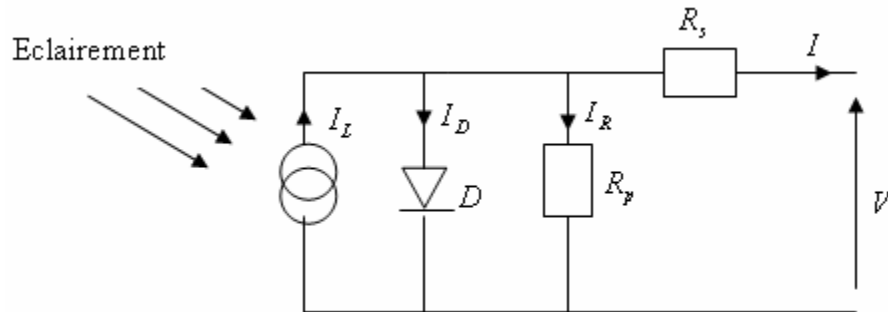
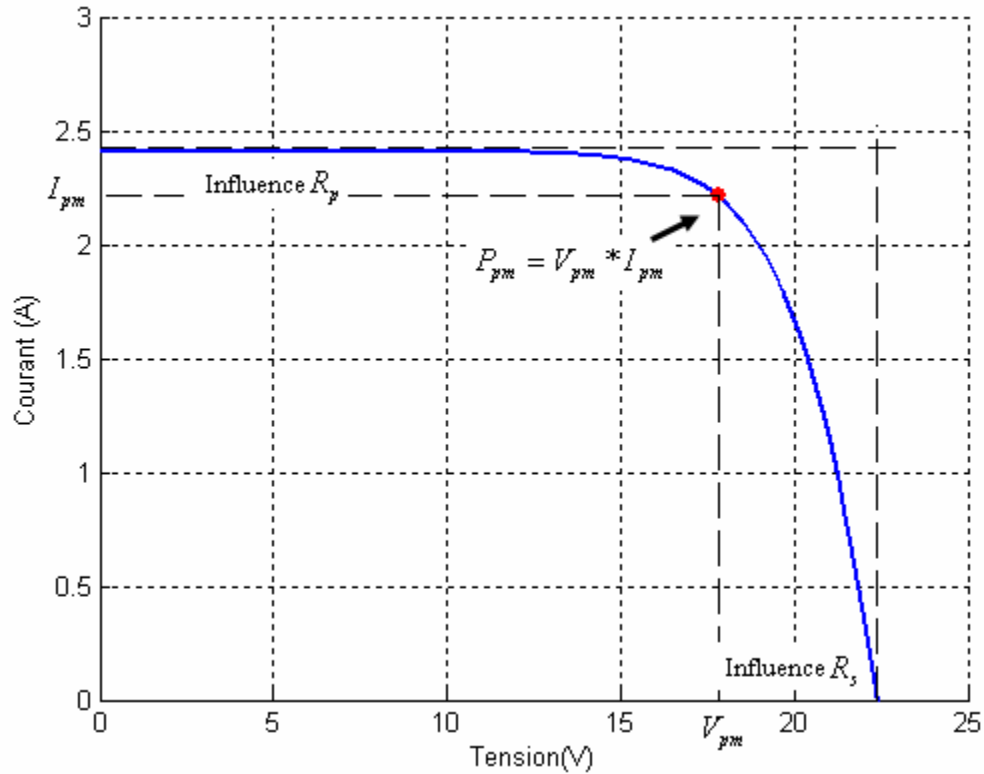


Figure 2.2 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Cette représentation schématique de la cellule photovoltaïque est idéalisée. En réalité, la cellule photovoltaïque comporte une résistance en série R_s et une résistance de dérivation ou shunt R_p . Les modèles utilisés pour le fonctionnement des modules photovoltaïques tiennent en compte l'influence des données variables de l'éclairement et de la température. Nous représentons dans la figure 2.3, un exemple de la caractéristique I-V d'une cellule solaire sous l'influence de l'éclairement et la température.



La figure2.3 : Caractéristique I-V d'une cellule solaire

2.1.9 Présentation du modèle mathématique

A partir de la figure (2.2) la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante:

$$I_L = I_D + I_R + I \quad (2.4)$$

Le courant de jonction I_D est donné par :

$$I_D = I_0 \left(e^{q \left(\frac{I R_S + V}{nKT} \right)} - 1 \right) \quad (2.5)$$

Le courant dans la résistance R_p est donné par :

$$I_R = \frac{V + I R_S}{R_p} \quad (2.6)$$

A partir de l'équation (2.4), on obtient l'expression de courant I :

$$I = I_L - I_D - I_R \quad (2.7)$$

Remplaçons dans (2.7) les équations (2.5) et (2.6) l'équation caractéristique deviendra :

$$I = I_L + \left(e^{q \left(\frac{I R_S + V}{nKT} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I R_S}{R_p} \quad (2.8)$$

Où

I : Le courant de cellule.

V : La tension de cellule.

R_S : La résistance série de la cellule. [Ω].

T : La température de la cellule [$^{\circ}\text{K}$].

q : La charge d'électron $e = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{C}$.

I_0 : Le courant de saturation [A].

K : La constante de Boltzmann ($1.3854 \cdot 10^{-2}\text{JK}^{-1}$).

V_g : La tension de seuil de diode (1.1V).

n : Le facteur de qualité de diode.

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ($R_P = \infty$) l'équation (2.8) devienne:

$$I = I_L + \left(e^{q\left(\frac{IR_S+V}{nKT}\right)} - 1 \right). \quad (2.9)$$

L'équation (2.9) en termes de I et V n'est pas tellement facile à résoudre

Comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton- Raphson) doit être appliquée.

2.2.1 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivants [30] :

- **Courant de court circuit :**

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle.

Dans le cas idéal (R_S nulle et R_P infinie), ce courant se confond avec le photo courant I_L dans

le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (2.5), on obtient:

$$I_{cc} = I_L - I_0 \left(e^{q\left(\frac{R_S+I_{cc}}{nKT}\right)} - 1 \right) - \frac{I_{cc}R_c}{R_p} \quad (2.10)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le

terme : $I_0 \left(e^{q\left(\frac{R_S+I_{cc}}{nKT}\right)} - 1 \right)$ devant I_L .

L'expression approchée du courant de court circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_L}{\left(1 + \frac{R_S}{R_p}\right)}. \quad (2.11)$$

- **Tension de circuit ouvert :**

C'est la tension V_{oc} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_L - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V_{oc}}{nKT} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_p} . \quad (2.12)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{oc} = \left(\frac{q}{nKT} \right) * \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.13)$$

- **Puissance**

Le but recherché par tout utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale.

$$P_m = V_m * I_{mp} \quad (2.14)$$

Par ailleurs, lorsqu'il est question de puissance maximal dans les conditions normalisées d'ensoleillement et de température (STC : 1000 w/10² et 25°), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts crête (w_c).

Le produit ($V_{mp} * I_{mp}$) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit $V_{oc} * I_{cc}$.

- **Facteur de forme**

A partir de la tension de circuit ouvert V_{oc} et de court-circuit I_{cc} , on définit le facteur de courbe F_c ou facteur de forme de la caractéristique de la cellule par :

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{co} I_{cc}} \quad (2.15)$$

Ce facteur de courbe dépend des différentes pertes, particulièrement des résistances R_s et R_{sh} .

Il est de l'ordre de 0.85 pour une cellule usuelle au silicium.

- **Rendement**

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module.

$$\eta = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{I_{incident}} \quad (2.16)$$

Chapitre 3

Electricité solaire produite et énergie consommée.

3.1 Logiciel RETScreen

3.1.1 Description

Le logiciel RETScreen [31] peut être utilisé pour évaluer facilement la production énergétique, le coût du projet d'installation photovoltaïque pour trois applications de base : en réseau électrique, hors réseau et le pompage de l'eau. Pour les applications en réseau, le modèle peut être utilisé pour évaluer les projets raccordés à un réseau isolé ou à un réseau central d'électricité.

3.1.2 Type de systèmes photovoltaïques :

Les systèmes PV sont deux types : autonomes et reliés au réseau [32]:

a - Système autonome : C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.

b- Système photovoltaïque connecté au réseau : Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif (CC-CA). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place, le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons la nuit ou pendant les jours sans soleil. Pour les applications hors réseau, le modèle peut être utilisé pour évaluer les systèmes autonomes (PV-batteries) et hybrides (PV-batteries-groupe électrogène). Pour les applications

de pompage de l'eau, le modèle peut être utilisé pour évaluer des projets PV-système de pompage.

Pour l'évaluation des projets PV, le logiciel RETScreen contient trois feuilles de calcul :

- Modèle énergétique,
- Évaluation de la ressource solaire et calcul de la charge,
- Analyse des coûts.

3.1.3 Données des produits

Certaines des exigences du modèle en matière de données sur les produits sont présentées dans la base de données de ceux ci. Ces dernières donnent des renseignements sur l'équipement associé au projet. La routine de tri de la base des données des produits commence en utilisant le « Type de module PV » sélectionné dans la feuille de calcul modèle énergétique. À partir de la boîte de dialogue on sélectionne le site choisi pour l'étude, suivi du fournisseur, du modèle et du nombre de modules PV. Les données peuvent être collées depuis la boîte de dialogue dans les feuilles de calcul.

Note : Pour accéder à la liste complète des fournisseurs contenus dans la base de données de produits en ligne RETScreen, et à leurs coordonnées, l'utilisateur doit choisir l'option « Tous » à partir de la liste déroulante « Type de module PV » de la boîte de dialogue [33].

3.1.4 Modèle énergétique

Dans cette section du logiciel RETScreen, il y a trois parties:

- Caractéristiques du site qui contient le nom et lieu du projet et station météorologique.
- Paramètre du système qui contient le champ PV et le conditionnement de l'énergie.
- Production annuelle d'énergie qui contient le rendement et la puissance fournie.

3.1.5 Données mensuelles

Dans cette section, on introduit les moyennes mensuelles des données de température et de rayonnement. On spécifie aussi les mois ou les fractions de mois pendant lesquels le système PV sera réellement utilisé (par exemple on indiquera 0,25 pour un mois où le système ne sera utilisé qu'une semaine). Toutes les quantités d'énergie et tous les calculs de coûts de tout le reste du modèle PV sont basés uniquement sur cette fraction de l'année où le système PV est utilisé.

Cela signifie que les mois où l'on n'utilisera pas le système PV, ne seront pas pris en compte dans l'analyse financière ou dans les bilans énergétiques. La raison est que l'analyse n'est pas affectée pour ces mois puisque qu'il n'y aura ni énergie conventionnelle converti, ni production d'énergie solaire à calculer. Pour les mois d'utilisation partielle des équipements, la portion d'utilisation s'applique aussi à tous les autres éléments du bilan. Ces données sont [33] :

- a) **Température moyenne mensuelle** : L'utilisateur entre, en °C, la température moyenne mensuelle de la température extérieure de chaque mois.
- b) **Rayonnement solaire moyen mensuel**: Introduire les valeurs du rayonnement pour chaque mois.
- c) **Rendement global du système PV** : Le modèle calcule le rendement global du système PV, en %. Cette valeur est la quantité d'énergie renouvelable fournie par rapport à l'énergie solaire captée par le module. Typiquement, cette valeur peut varier de 3 à 13 %, en fonction du type de module, du rendement du matériel de conditionnement de l'énergie et de la qualité du rayonnement solaire.

3.2 Application aux sites algériens

3.2.1 Sites choisies

Nous avons choisis des villes types représentant les cinq régions: Nord, Sud, Ouest et Est du territoire algérien. Ces villes sont respectivement:

- Alger
- Tamanrasset
- Oran
- Constantine
- Timimoune

Les coordonnées géographiques de ces sites sont présentées sur le Tableau 3.1.

Station	Latitude (deg) (N)	Altitude (m)	Longitude (deg)
Oran	35.38	99	0.37 W
Tamanrasset	22.47	1378	5.31 E
Alger	36,43	450	2.83 E
Constantine	36.17	687	6.37 E
Timimoune	29,25	312	0,23 E

Tableau 3.1 : Coordonnées géographiques des sites

Le rayonnement solaire global reçu et la température mensuels mesurés obtenus par l'ONM pour les différents sites sont représentés dans la figure 3.1, la figure 3.2.

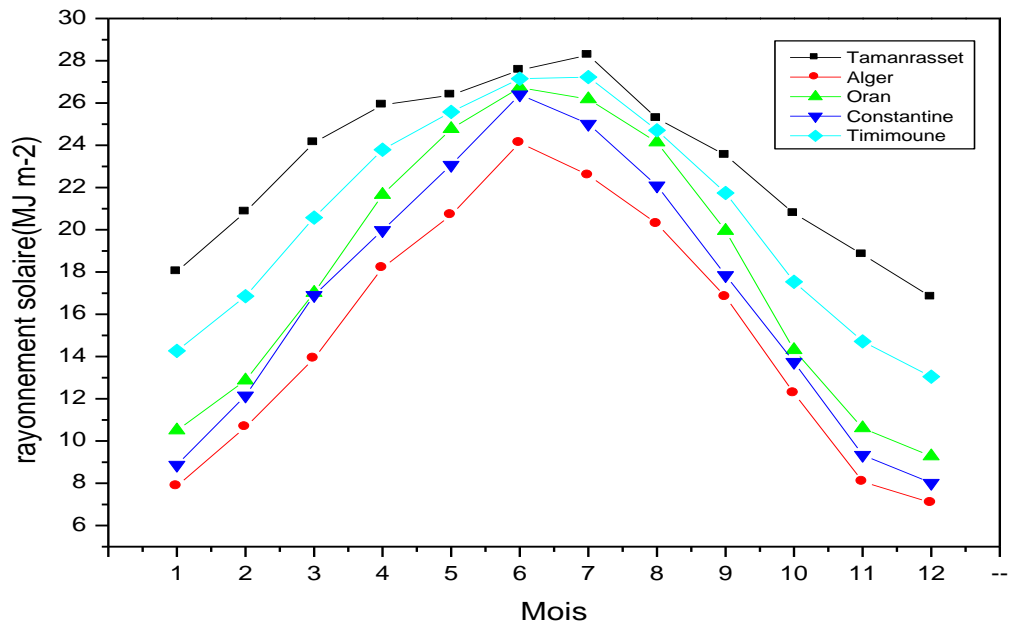


Figure 3.1 : Rayonnement solaire global des sites

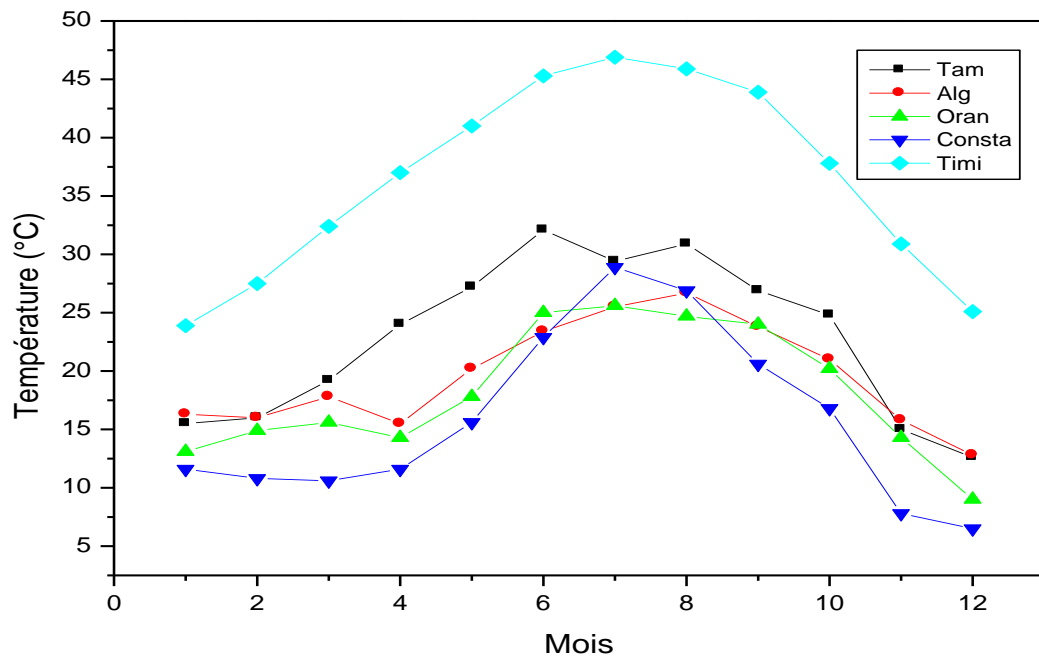


Figure 3.2 : la température mensuelle mesurée des sites.

3.2.2 Logement Type

Le logement choisi pour faire l'objet d'une étude estimative est un logement de type F3 occupé par une famille constituée d'un couple et trois enfants. Dans le tableau 3.2, nous présentons l'estimation des besoins énergétiques journaliers en Wh/j pour les cinq villes [33].

	Puissance (W)		Durée utilisation (heures)	Consommation (Wh/j)
Eclairage	3Chambres	225	5	1125
	Couloir	75	4	300
	Salle de bain	75	2	150
	Toilette	75	1	75
	Cuisine	75	7	525
Equipements	Réfrigérateur	120	22	2640
	Téléviseur	75	10	750
	Ventilateur	120	4	480
	Divers	120	4	480

Tableau 3.2 : Estimation moyenne des besoins énergétiques journaliers en Wh/j pour les cinq villes

3.3 Résultats

3.3.1 Production d'énergie

Les tableaux 3.3 (a, b et c) montrent tous les résultats obtenus en utilisant le logiciel RETScreen des cinq sites choisis dans notre étude en utilisant Manufacturier de modules PV - ABC Inc.

a)-Type de module PV : Mono-si

	Tam.	Alger	Oran	Const.	Tim.
Type de module PV	Mono-si				
Manufacturier de modules PV	ABC Inc.				
Rendement nominal du module PV (%)	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7
Température nominale des cellules en opération(C°)	45	45	45	45	45
Rayonnement solaire annuel (MWh/m ²)	8,65	6,01	7,01	6,60	7,55
Température moyenne annuelle (°C)	22,8	19,6	18,2	15,9	36,5
Rendement moyen de l'onduleur (%)	90	90	90	90	90
Pertes diverses du champ PV (%)	10	10	10	10	10
Taux d'absorption de l'énergie (%)	95,0	95	95,0	95	95
Rendement global du système PV (%)	7,8	8,0	8,0	8,1	7,3
Énergie captée (MWh)	389,172	293,204	341,718	323,667	315,945
Énergie fournie (MWh)	332,742	250,689	292,169	276,735	270,133

b)-Type de module PV : Poly-si

	Tam.	Alger	Oran	Const.	Tim.
Type de module PV	Poly-si				
Manufacturier de modules PV	ABC Inc.				
Rendement nominal du module PV (%)	11	11	11	11	11
Température nominale des cellules en opération(C°)	45	45	45	45	45
Rayonnement solaire annuel (MWh/m ²)	8,65	5,99	7,01	6,6	7,55
Température moyenne annuelle (°C)	22,8	19,6	18,2	15,9	36,5
Rendement moyen de l'onduleur (%)	90	90	90	90	90
Pertes diverses du champ PV (%)	10	10	10	10	10
Taux d'absorption de l'énergie (%)	95	95	95	95	95
Rendement global du système PV (%)	7,4	7,5	7,5	7,4	6,9
Énergie captée (MWh)	8,848	6,882	8,053	7,283	7,109
Énergie fournie (MWh)	7,565	5,884	6,885	6,227	6,078

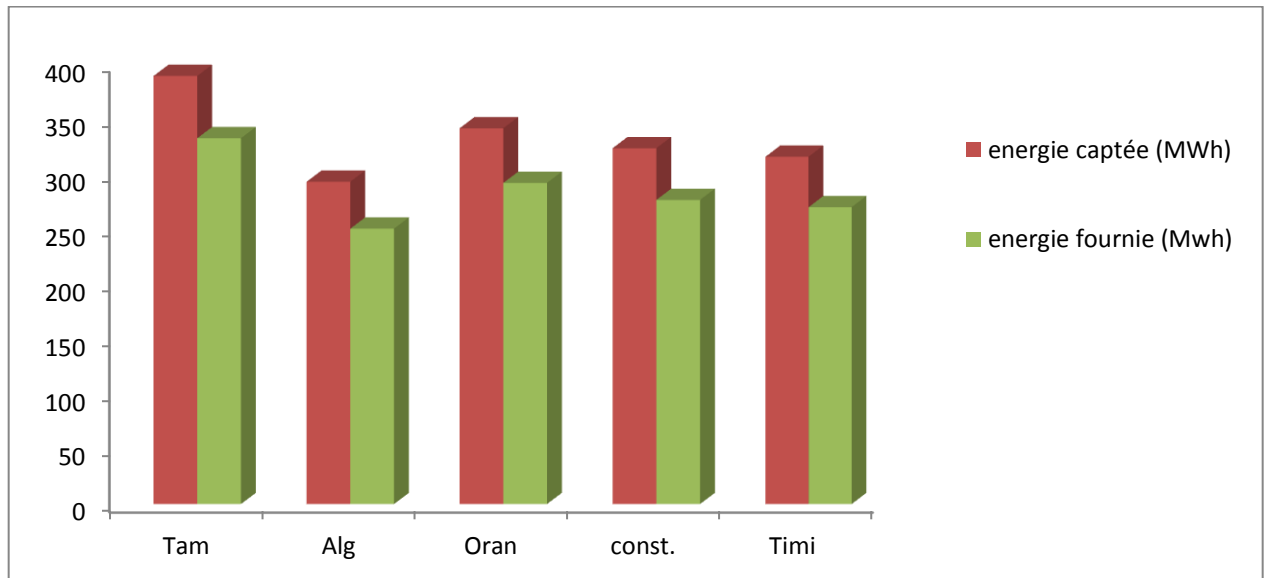
c)-Type de module PV : a-si

	Tam.	Alger	Oran	Const.	Tim.
Type de module PV	a-si				
Manufacturier de modules PV	ABC Inc.				
Rendement nominal du module PV (%)	11	11	11	11	11
Température nominale des cellules en opération(C°)	45	45	45	45	45
Rayonnement solaire annuel (MWh/m ²)	8,65	5,99	7,01	6,60	7,55
Température moyenne annuelle (°C)	22,8	19,6	18,2	15,9	36,5
Rendement moyen de l'onduleur (%)	90	90	90	90	90
Pertes diverses du champ PV (%)	10	10	10	10	10
Taux d'absorption de l'énergie (%)	95	95	95	95	95
Rendement global du système PV (%)	3,7	7,4	7,4	3,7	3,6
Énergie captée (MWh)	2,647	1,943	2,265	2,163	2,241
Énergie fournie (MWh)	2,263	1,661	1,937	1,849	1,916

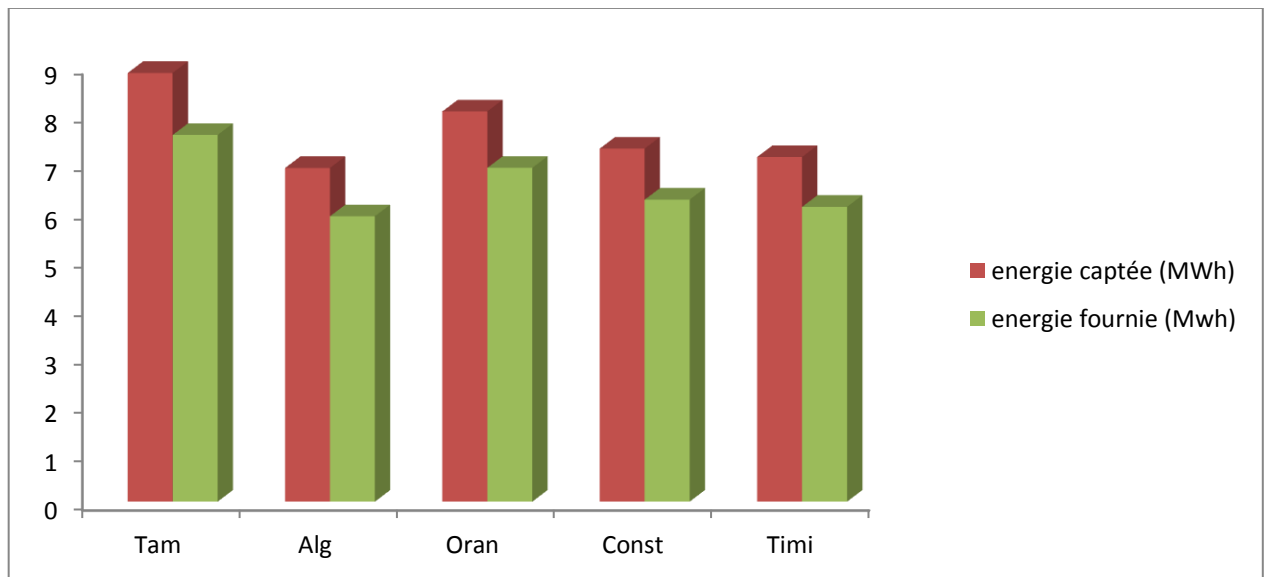
Tableau3.3: Résultats obtenus en utilisant le modèle énergétique « RETScreen » dans les tableaux a, b, c.

Le plus important du résultat pour nous est la valeur annuelle de l'énergie fournie, La valeur maximale de l'énergie électrique fournie 332,742 (MWh) était produite par le module mono si à Tamanrasset et la valeur minimale (1,661MWh) était produite par le module a-si pour le site d'Alger.

a- Mono-si



b- Poly-si



c- a-si

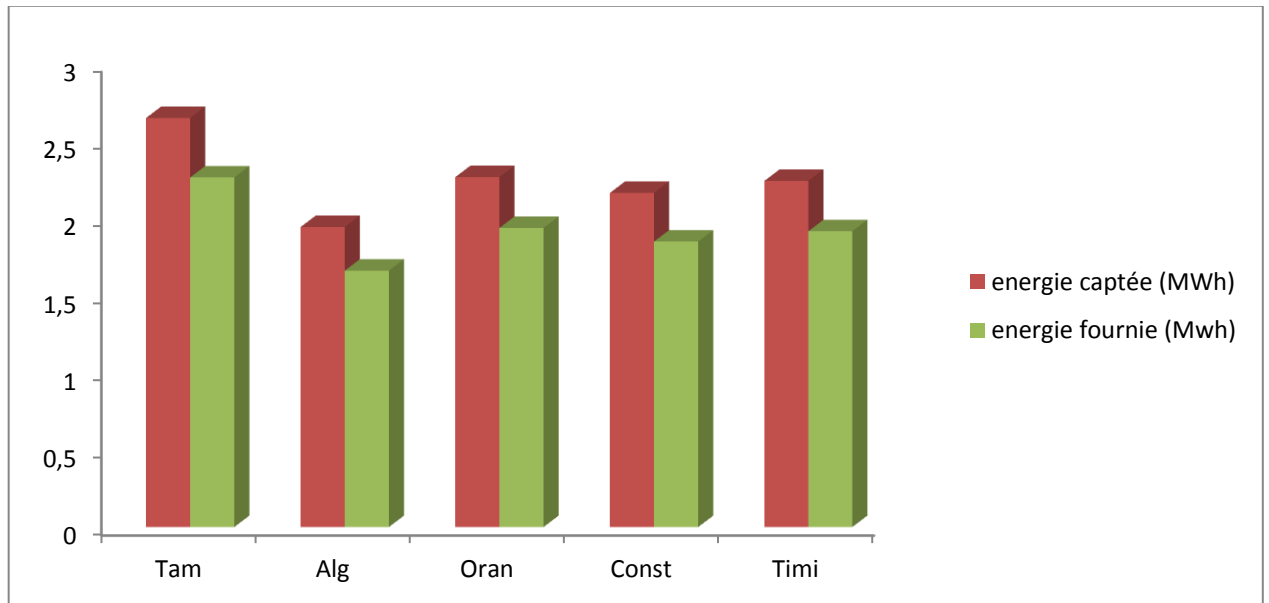


Figure3.3: Bilan annuel de l'énergie fournie et captée

La figure (3.3) montre le bilan annuel des cinq sites et l'énergie fournie et captée, pour les trois model PV mono, poly et a-si d'une maison type. On voit clairement un excès d'énergie fournie. Cet excès sera stocké dans des batteries afin d'être utilisé en l'absence du soleil.

3.3.2 Analyse des coûts

On introduit les prix actuels des équipements solaires et les prix des différentes exploitations dans la fenêtre d'analyse de coût du logiciel RETScreen pour Cinq villes (Tam, Alger, Oran et Constantine, Timimoune) d'un projet investit pour une durée de 25 ans, et les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau3.4.

Équipements et exploitation	Prix (KDA)				
	Tam.	Alger	Oran	Cons.	Tim.
Modules PV	160				
Onduleur	144				
Batterie	190				
Installation du projet	50				
Structure portante	50				
Taxes foncières et assurances	10				
Entretien	10				
Transport	130	100	120	120	138
Frais imprévus	36.2	34.7	35.7	35.7	36 ,45
Coût de projet (KDA)	780,2	748,7	769,7	769,7	788,45

Tableau 3.4: Coûts d'un projet PV estimés par le logiciel –RETScreen –

En comparant les coûts d'investissement du projet avec les coûts de la société de distribution de l'électricité (SDE) calculés pour une durée de 25 ans, et on prend un prix unitaire de KWh égal 4,179 DA, on obtient les résultats mentionnés dans la figure3.4.

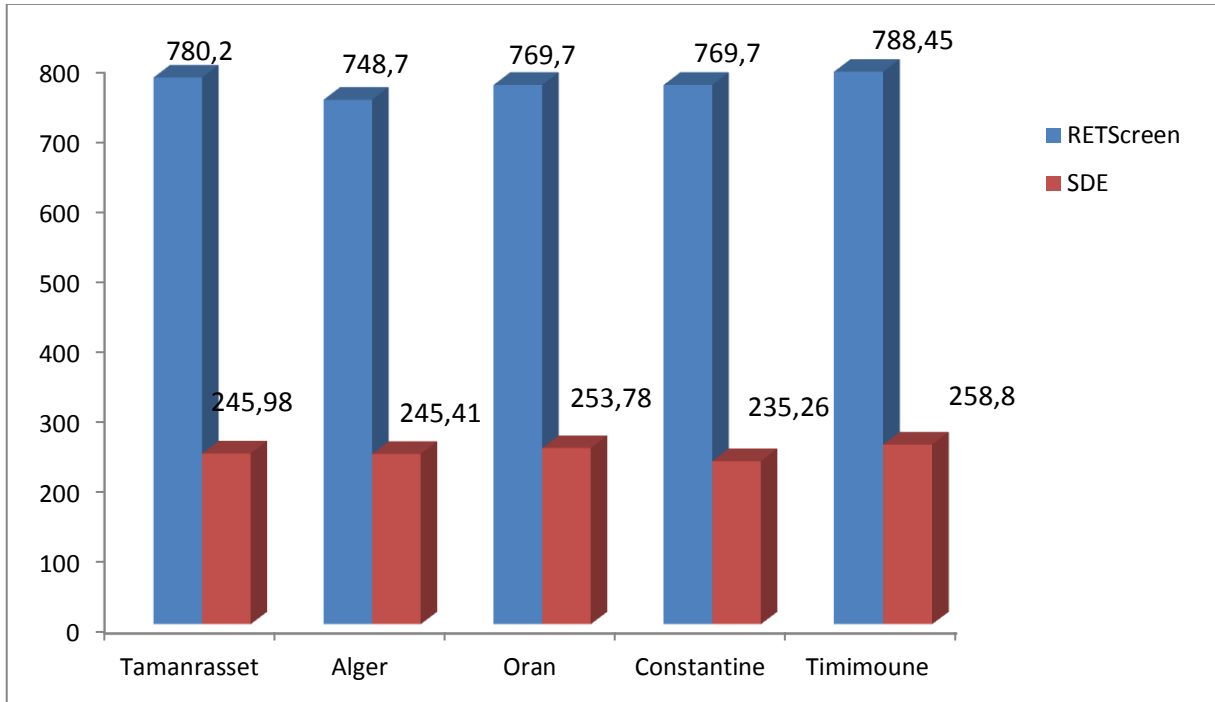


Figure3.4: Comparaison entre les coûts (en KDA) du projet PV estimés par RETScreen et du SDE.

Conclusion

Conclusion

L'énergie solaire est un type d'énergie renouvelable, propre et inépuisable, elle est suffisamment disponible sur le territoire algérien.

L'importance de notre travail se base sur l'exploitation de l'énergie solaire pour produire l'électricité. A cet effet nous avons détaillé une étude sur le gisement solaire en Algérie qui a fait apparaître un potentiel considérable. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la quasi-totalité du territoire national, la durée d'insolation quant à elle dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara.

Nous avons présenté les notions fondamentales concernant le principe de l'effet photovoltaïque, les méthodes de fabrication des cellules solaires et les paramètres essentiels qui permettent de calculer le rendement d'une cellule solaire à partir de la caractéristique courant-tension et les différents constituants de base d'une cellule photovoltaïque conventionnelle.

Nous avons utilisé le logiciel de simulation « RETScreen » pour élaborer une étude estimative d'un projet d'installation des systèmes photovoltaïques. Pour réaliser cette étude et en tenant compte de la disponibilité de données (température et rayonnement solaire), nous avons choisi cinq sites, qui sont : Alger, Tamanrasset, Oran, Constantine et Timimoune.

Le meilleur résultat d'estimation de la puissance fournie du système PV obtenu par simulation était pour Tamanrasset d'une valeur de 332.742 MWh. Le site de Constantine avait le meilleur rendement du système PV avec une valeur de 8.1 %.

Le coût des projets d'installation PV obtenu par le logiciel RETScreen est très élevé par rapport au coût de l'électricité des sources classiques et le meilleur prix pour nous c'était 748,7KDZ, Concernant le projet installé à Timimoune.

Les performances des systèmes photovoltaïques sont fortement affectées par les paramètres climatologiques (Rayonnement solaire et Température) et par le type de cellule solaire.

Bibliographies

Bibliographies

- [1] S. Belakehal, Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables. THESE Doctorat en sciences Université De Constantine (2010).
- [2] A. Lester, D. R. Myers, Solar Energy **80**, 322 (2006). Constantine
- [3] M. P. Thekaekara, Solar Energy **14**, 109 (1973).
- [4] C. H. M. P. Duncan, Solar Energy **5**, 385 (1982).
- [5] M. El-Metwally, Journal of Atmosphérique and Solar-Terrestrial Physics. **67**, 1331 (2005).
- [6] S. Bentouba, A. Slimani, M. S. Boucherit, Revue des Energies Renouvelables **7**, 109 (2007).
- [7] S. Labed, Contribución al desarrollo de métodos para la electrificación rural fotovoltaica a gran escala. Thèse de doctorat.Universidad politécnica de madrid escuela técnica Superior d'ingenieros de telecomunicación, Madrid (2004).
- [8] <http://www.enerzine.com/1/235+algerie-le-nouvel-eldorado-solaire-energie+.html>(consulté mois du décembre 2010).
- [9] R. Sellami, M. Abbas, H. Bendjebbas, Installation et étude d'un chauffe-eau solaire couple a un cumulus pour alimenter la cuisine de l'udes en eau chaude, Rapport préliminaire. Centre de Développement des Energies Renouvelables, Algérie (2007).
- [10] M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie. Office des Publications Universitaires, T. II (1988).
- [11] Loi n°99-09 du 28 juillet, relative à la maîtrise de l'énergie. Journal officiel de la république Algérienne (1999).
- [12] Loi n° 02-01 du 05 février, relative à l'électricité et la distribution publique du gaz par canalisation. Journal officiel de la république Algérienne (2002).

- [13] Loi n° 04-09 du 14 août, relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable. Journal officiel de la république Algérienne (2004).
- [14] Décret N° 04-92 du 25 avril, décret exécutif relatif aux coûts de diversification de la production d'électricité. Journal officiel de la république Algérienne (2004).
- [15] G. Semrouni, Les Energies Renouvelables Les filières développées en Algérie. Séminaire sur les énergies renouvelables en Berlin (2007).
- [16] B. Sarl, Guide des Energies Renouvelables. Ministère de l'Energie et des Mines, Édition (2007).
- [17] O. Nichiporuk, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités. Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon (2005).
- [18] B. Sarl, Guide des Energies Renouvelables. Ministère de l'Energie et des Mines, Édition (2007).
- [19] Honsberg C., bowden. Photovoltaics : devices systems and applications [CDROM]. Sydney (Aus) : univ.of New Wales, 1998.
- [20] D.R. di Valdalbero, 'La Recherche Energétique Européenne: Pont de Coopération sur la Méditerranée', Liaison Energie-Francophonie, N°71, Energie et Développement Durable en Méditerranée, pp. 71 - 76, 2ème Trimestre 2006.
- [21] Document, Liaison Energie-Francophonie. 'Energie et Développement Durable en Méditerranée', N°71, p. 95, 2ème Trimestre 2006.
- [22] S. Petibon, " Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", Thèse de doctorat université Toulouse, 2009.
- [23] M^{me} Dib Wassila Née KAZI-TANI, Modalisation des structures photovoltaïque : aspect, fondamentaux et appliques. thèse de Doctorat Université Abou Bekr Belkid De Tlemcen (2010).
- [24] " Energie photovoltaïque " Guide d'énergie renouvelable 2002.
- [25] Benmachiche Samira, Etude des paramètres limitant le rendement d'une photopile à base d'une structure MIS, Mémoire de Magister Université Hadj Lakhdar de Batna (2009).
- [26] CHAPIN D.M., FULLER C.S., PEARSON G.L. A new silicon pn Junction photocell

for converting solar radiation into electrical power. J. Appl. Phys., 1954, Vol. **25**, pp. 676-677.

[27] Sze S.M. Semi conductor Devices. New York : John Wiley, 1981, 867 p.

[28] <http://www.hallou-solaire.com/usermedia/document-634234564258437500-2.pdf>

[29]http://www.itismajo.it/fff/Documentazione%20Tecnica/Energie_solaire_photovoltaique.pdf .

[30] Y. Pankow, " Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque", Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'ENSAM ED 432, 2004.

[31] G. J. Leng, U. T. Ziegler, N. Meioche, D. S. Parakh, F. Sheriff, K. Bourque, J. Poirier, T. Anderson, A. Richard. Logiciel RETScreen, Ministre de Ressources naturelles Canada (2006).

[32] D.Turcotte, M.Ross and F.Sheriff, "Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools" PV Horizon, Canada, 2001.

[33] M. Salmi, Contribution à La Quantification De L'irradiation Solaire Globale En Algérie Et Applications Aux Générateurs Photovoltaïques, Thèse Doctora En Sciences, Université Ferhat Abbas de Sétif, (2012).

الملخص

يتم إنتاج الكهرباء الفوتوفولطية بواسطة التحويل المباشر لضوء الشمس إلى كهرباء ب استخدام الخلايا الكهروضوئية المصنوعة من المادة النصف الناقلية السيليسيوم . الهدف من هذا العمل هو وضع نماذج لتقييم الطاقة الكهربائية الناتجة من الطاقة الشمسية على مساحة معتبرة من القطر الجزائري وتشمل عدة مناطق وهي : منطقة الجزائر العاصمة,منطقة وهران,منطقة قسنطينة,منطقة تمنراست,منطقة تيميمون.الدراسة التقديرية لمولد كهروضوئي ب استخدام البرنامج RETScreen أعطت أعلى قيمة للاستطاعة الكهربائية المحسوبة لمنطقة تمنراست حيث كانت 332.742 MWh .

Résumé

L'électricité photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules photovoltaïque, Fabrique en matière semi – conducteur (silicium). Le but de ce travail et décrit le logiciel qu'on a utilisé pour estimer l'énergie électrique produite à partir de l'énergie solaire, sur différent sites du territoire algérien. Les sites considérés sont : Tamanrasset, Alger, Oran, Constantine, Timimoune. Une étude estimative de l'énergie fournie par un générateur photovoltaïque, en utilisant le logiciel RETScreen a été faite pour différents sites. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour le site de Tamanrasset avec une énergie de 332,742 MWh.

Abstract

Photovoltaic electricity is obtained by direct transformation of the sunlight into electricity by means of photovoltaic cells. Manufactures of semi - conductor (silicon). The aim of this work is describes the software that was used to estimate the electrical energy produced from solar energy for different Algerian locations, These are: Algiers, Tamanrasset, Constantine, Oran, Timimoune. Using the RETScreen code, an estimative study of the generated power by a photovoltaic generator has been made for different locations. The best results are obtained for Tamanrasset with a generated energy of 332,742 MWh.