

Table des matières :

Introduction général.....	
<i>Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque.....</i>	1
I. Introduction.....	1
II. L'énergie solaire.....	1
1. Le rayonnement solaire.....	1
1.1 Le rayonnement direct.....	2
1.2 Le rayonnement diffus.....	2
1.3 Le rayonnement réfléchis.....	2
2. Energie solaire photovoltaïque.....	2
2.1 L'effet photovoltaïque	3
2.2 Historique.....	4
2.3 Notions relatives à un système photovoltaïque.....	4
2.4 Les éléments d'un système photovoltaïque.....	5
2.4.1 Modules photovoltaïque.....	5
2.4.2 Stockage.....	6
2.4.3 Régulateur.....	6
3. La cellule photovoltaïque.....	7
III. Application avec l'outil PC1D.....	16
1. logiciel PC1D.....	16
2. Simulation d'une cellule photovoltaïque de type SI.....	16
3 Simulation d'une cellule photovoltaïque de type INP.....	29
V. Conclusion.....	38

Chapitre II : Etat de l'art de l'énergie photovoltaïque	39
I. Introduction.....	39
II. Utilisation des panneaux et projets.....	39
1. Satellite.....	39
2. Usage domestiques.....	39
3. Ou entreprises.....	40
4. Les nouveaux gadgets.....	41
5. Les voitures et les avions.....	41
6. Les champs solaires.....	42
7. La tour solaire.....	42
8. Un nouveau concept...la vitre teinté.....	43
III. Etude du dimensionnement solaire.....	43
IV. Principe de fonctionnement des panneaux.....	44
1. les panneaux solaires thermiques.....	44
2. Les panneaux solaires photovoltaïques.....	44
V. Avantages et inconvénients des panneaux solaires.....	46
1. Avantages.....	46
2. Inconvénients.....	46
VIII. Conclusion.....	51
Chapitre III : Dimensionnement d'un système autonome.....	53
I. Introduction.....	53
II. Différents types de systèmes photovoltaïques.....	54
1. Système autonome.....	55

2. Système hybride	55
3. Système connectés au réseau.....	56
III. Principe de fonctionnement d'une installation PV.....	56
1. Dimensionnement des systèmes photovoltaïques.....	56
1.1 critère de dimensionnement.....	56
1.2 Principe de dimensionnement d'une installation photovoltaïque en site isolé.....	57
1.3 Les étapes du dimensionnement.....	57
1.4 Stockage de l'énergie électrique.....	58
1.5 Les batteries dans les systèmes PV.....	59
b. Tension.....	60
c. Recharge.....	60
d. L'auto décharge.....	60
e. Durée de vie	60
f. Modèle électrique de la batterie.....	61
• Influence de la température sur la capacité de la batterie.....	62
• Influence de la température sur l'état de charge et décharge de la batterie.....	62
2. Dimensionnement d'un système autonome.....	67
3. Travail théorique.....	67
3. Simulation.....	68
VI Conclusion.....	72

Introduction générale

Le regain actuel d'intérêt pour les énergies renouvelables est dû sans aucun doute à la prise de conscience mondiale qui débouche sur la nécessité de revoir les politiques énergétiques, à la fois pour lutter contre les émissions de CO₂ et pour prévenir une pénurie majeure d'énergie classique.

Alors de nombreuses énergies non polluantes, ou renouvelables, ou abondantes partout à la surface du globe pourraient être utilisées par l'homme tel que l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire qui sont des énergies à ressource illimitée qui regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire qui est donc une possibilité de développement efficace et durable tant que le soleil brille encore, c'est pour cela que les recherches scientifiques se développent dans le sens de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes solaires.

L'optimisation des systèmes solaires est basée sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement.

L'exploitation directe de l'énergie solaire relève une technologie bien distincte c'est de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire photovoltaïque.

Elle provient de la transformation directe d'une partie de rayonnement solaire en énergie électrique, cette conversion d'énergie s'exécute par le biais d'une cellule dite cellule 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 au soleil. La tension générée par une cellule (PV) peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

L'association de plusieurs cellules (PV) en séries/parallèles donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV), qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale, dépendant de niveau d'éclairement et de la température, ainsi que de vieillissement de l'ensemble de composants.

Bien que la cellule photovoltaïque soit connue depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelque milliwatts au mégawatt,

cette technologie reste encore sous le débat notamment à cause de rendement de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique qui est encore faible.

L'objet de ce travail est donc l'étude et la modélisation permettent de dimensionner un système photovoltaïque autonome pour l'électrification d'un habitat individuel.

Ce travail est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons des notions sur le système photovoltaïque, l'énergie solaire ainsi que le fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque aussi le rendement quantique et le rendement électrique: application avec l'outil PC1D.

Le deuxième chapitre présente l'état de l'art de l'énergie photovoltaïque, et les panneaux (installation photovoltaïque).

Le troisième chapitre est consacré pour le dimensionnement d'une station autonome photovoltaïque ainsi la simulation par le logiciel PV sol.

Nous finalisons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque

I. Introduction :

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés.

La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants d'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée, permettant une maintenance réduite.

Le but d'un système photovoltaïque (PV) est d'utiliser la conversion directe de l'énergie solaire par effet photovoltaïque pour subvenir aux besoins en énergie électrique de l'utilisation. [1]

II. L'énergie solaire :

Le soleil est une étoile, située à environ 150 millions Km de la terre. Le soleil a un diamètre de 1 390 000 Km, soit plus de 100 fois notre planète. Il est composé d'hydrogène et d'hélium.

La terre décrit autour du soleil dans un plan dit "plan de l'écliptique", la terre tourne sur elle-même, selon un axe incliné de 23°27' sur le plan de l'écliptique. [1]

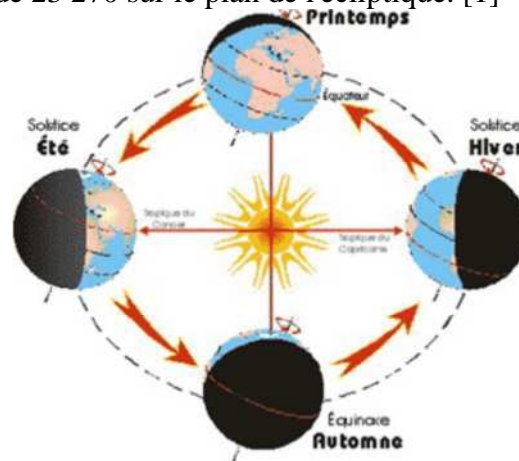


Figure I.1: Mouvement de la terre.

1. Rayonnement solaire :

Le soleil tire son énergie de réactions thermonucléaires se produisant dans son noyau.

L'énergie émise par le soleil est sous forme d'ondes électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire.

En traversant l'atmosphère, le rayonnement va subir des transformations par absorption et par diffusion, on distingue pour cela. [2]

1.1 Le rayonnement direct :

Les rayons du soleil atteignent le sol sans subir de la modification (sans diffusion par l'atmosphère). Les rayons restent parallèles entre eux. [2]

1.2 Le rayonnement diffus :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire rencontre des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc. Ces obstacles ont pour effet de repartir un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions. [2]

1.3 Le rayonnement réfléchi :

C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante par exemple : la neige ; cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée.

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure suivante : [2]

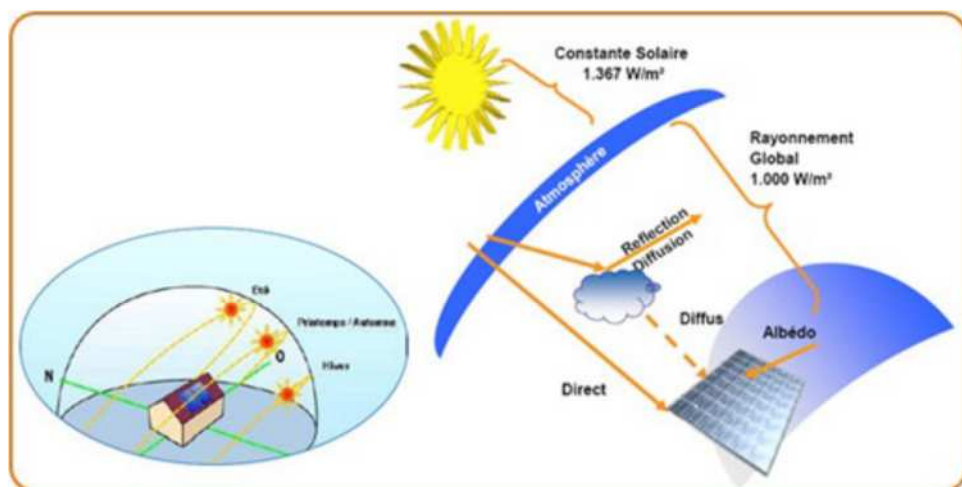


Figure I.2: Le rayonnement solaire.

2. Energie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque fait l'objet d'un grand intérêt ces dernières années.

Elle est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique (Figure I.2). Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire.

Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

Dans un **isolant électrique** : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.

Dans un **conducteur électrique** (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.

Dans un **semi-conducteur** : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il ya donc courant électrique sous l'exposition à la lumière. [3]

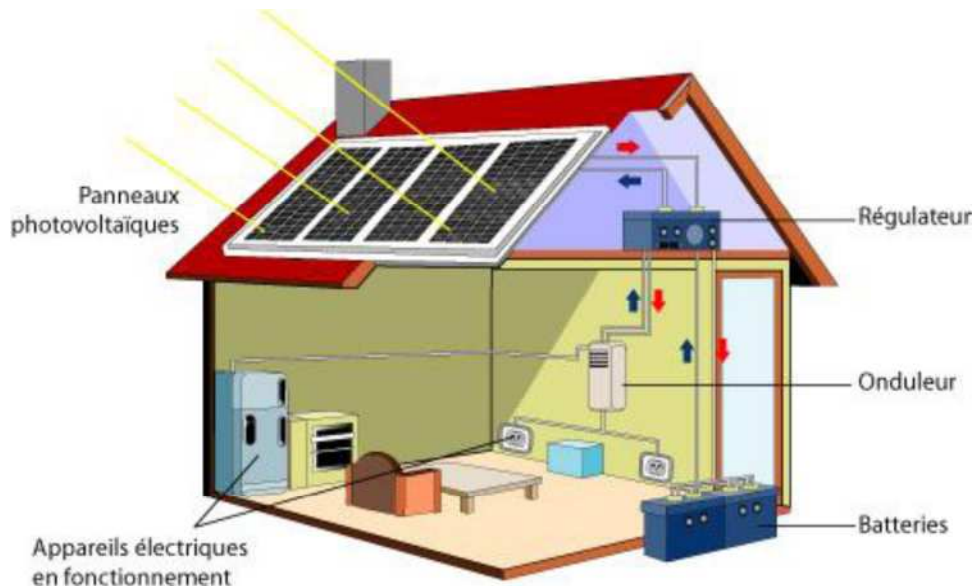


Figure I.3: Système solaire photovoltaïque

2.1. L'effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », à été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse.

Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure. [5]

2.2 Historique : Découverte de l'effet photovoltaïque :

Le mot photovoltaïque vient de mot grec "photo" qui signifie la lumière et voltaïque du physicien italien "Alessandro volta".

L'effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en 1939 par le savant Antoine Becquerel. Il a constaté que certains matériaux pouvaient produire de petites quantités d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière.

En 1873, l'ingénieur américain "Willoughby Smith" découvre les propriétés photosensibles du sélénium.

En 1877, "W.G.Adam" et "R.E.Day" expliquent l'effet photovoltaïque du sélénium.

En 1883, "Charles Frits" construit la première cellule en sélénium et or. Elle atteint un rendement d'environ 1%.

En 1905, "Albert Einstein" publie sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière. Cet article lui vaudra le prix Nobel de physique en 1922.

En 1954, Les chercheurs américains "Gerald Pearson", "Darry Chapin" et "Calvin Fuller" travaillent pour les laboratoires Bell mettent au point une cellule PV en silicium.

Les premières applications ont eu lieu dans les années 60 aux équipements de satellites spatiaux (les américains lancent en 1954 le satellite Vanguard qui est alimenté par des piles photovoltaïque ayant un rendement 9%.

Puis à partir de 1970, l'utilisation terrestre est pratiquée sur des sites isolés.

Dans les années 1980, on assiste à la mise en place des premières centrales photovoltaïques. [5]

2.3 Quelques notions relatives à un système photovoltaïque:

Cellule PV : Dispositif PV fondamental pouvant générer de l'électricité lorsqu'il est soumis un rayonnement solaire.

Module PV : Le plus petit ensemble de cellules solaires interconnectées complètement protégées de l'environnement.

Chaîne PV : Circuit dans lequel les modules PV sont connectés en série afin de former des ensembles de façon à générer la tension de sortie spécifiée. Dans le langage courant, les chaînes sont plus communément appelées « *string* ».

Groupe PV : Ensemble de chaînes constituant l'unité de production d'énergie électrique en courant continu.

Boîte de jonction : Boîte dans laquelle tous les groupes PV sont reliés électriquement et où peuvent être placés d'éventuels dispositifs de protection.

Onduleur : Dispositif transformant la tension et le courant continu en tension et en courant alternatifs.

Partie courant continu : C'est la partie d'une installation PV située entre les modules PV et les bornes de courant continu de l'onduleur.

Partie courant alternatif : C'est la partie de l'installation PV située en aval des bornes courant alternatif de l'onduleur.

Monitoring : Le monitoring (anglicisme) consiste à surveiller et à effectuer les mesures relatives au suivi d'une installation PV.

Irradiation : C'est l'énergie du rayonnement solaire. Elle correspond {la quantité d'énergie reçue pendant une durée définie exprimée en kWh-2. [1]

2.4 Les éléments d'un système photovoltaïque :

Afin de bien comprendre le fonctionnement d'un système photovoltaïque, il est utile d'analyser les principaux composants. Les éléments d'un système photovoltaïque dépendent de l'application considérée.

Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque :

- Modules.
- Batteries.
- Régulateurs de charge.
- Convertisseurs.
- Générateurs.
- Stockage. [1]

2.4.1 Les modules photovoltaïques :

Un module photovoltaïque est un générateur électrique de courant continu lorsqu'il est exposé à la lumière. Le module photovoltaïque est constitué d'un cadre rigide le plus souvent en aluminium permettant la fixation et d'une vitre transparente en verre trempé sur le dessus.

A l'intérieur se trouve un ensemble de cellules photovoltaïques reliées électriquement entre elles. En effet ceux sont elles qui génèrent le courant. Elles sont assemblées en série ou en parallèle à l'intérieur du module afin de cumuler leur puissance et de les rendre plus résistantes à l'environnement externe. [5]

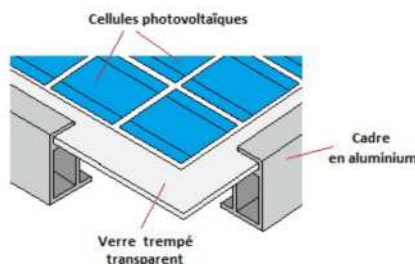


Figure I.4 : Structure d'un module photovoltaïque.



Figure I.5: Module PV.

2.4.2 Stockage :

Le stockage assure deux fonctions principales :

- Il permet de satisfaire les besoins en énergie électrique malgré le caractère aléatoire et discontinu de l'énergie solaire (rythme jour/nuit, variation en fonction des heures du jour et des saisons).

- Outre sa fonction de stockage d'énergie, il assure un rôle de tampon, entre la production et l'utilisation en fixant la tension du système. Celle-ci reste dans la zone de fonctionnement optimal (fonction d'adaptation d'impédance).

Les deux principaux types d'accumulateurs utilisables actuellement sont :

- Les accumulateurs au plomb.

- Les accumulateurs au cadmium-nickel (accumulateurs à électrolyte alcalin).

- Les accumulateurs au cadmium-nickel peuvent être utilisés pour des applications de puissance relativement faible.

Le coût élevé de ce type d'accumulateurs (par rapport aux accumulateurs au plomb) en limite l'utilisation pour les mini et micro-puissances. Le stockage est représenté par des batteries, disposées en série dont le nombre définirait la tension de fonctionnement et la capacité de stockage désirées.

La durée de vie des accumulateurs dépend en général de leur condition d'utilisation, pour ces deux types des batteries la durée de vie est de 10 à 15 ans, mais à une condition essentielle, c'est de maintenir leur état de charge supérieur à 50 %.

- **Batterie :**

Il existe trois grandes utilisations pour les accumulateurs :

- La batterie de démarrage.

- La batterie de traction.

- La batterie stationnaire.

Une batterie n'est pas seulement caractérisée par ses dimensions, son nombre d'éléments et sa capacité, mais doit répondre à différents critères :

- Durée de la décharge.

- Régime de décharge.

- Aptitude à la recharge.

- Température d'utilisation.
- Résistance mécanique.
- Fréquence des adjonctions d'eau distillée.
- Entretien.
- Durée de vie envisagée.

Il y a parfois contradiction dans les exigences, nécessitant alors un compromis ; c'est le cas de la batterie solaire à laquelle on demande des performances de batterie de traction et de batterie stationnaire :

- Batterie de traction, parce qu'on lui demande un cycle journalier de décharge (pas toujours suivi d'une recharge).

- Batterie stationnaire, parce qu'on lui demande de stocker une énergie et de la restituer en cas de coupure secteur, qui sera le non-enseillement. [5]

- **Influence des différents paramètres :**

Les paramètres les plus importants agissant sur la vitesse des réactions chimiques et électrochimiques sont :

-**Paramètres externes** : température, pression, temps.

-**Paramètres électriques** : potentiel, intensité.

-**Paramètres de l'électrode** : nature de matériau, surface, géométrie, état de surface.

-**Paramètres de la solution** : concentration des espèces électro actives, nature du solvant, concentration de l'électrolyte.

-**Paramètre du transfert de masse** : mode (diffusion), concentration à la surface de l'électrode.

2.4.3 Régulateur :

-Le régulateur assure deux fonctions principales :

- La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du générateur PV à l'utilisation.

- **Principe de son fonctionnement :**

La densité de l'électrolyte de la batterie est théoriquement un excellent indicateur d'état de charge, mais souvent cet indicateur ne prend sa valeur caractéristique que plusieurs jours après sa charge.

De plus, il faudrait agiter l'électrolyte pour faire une bonne mesure. Enfin, cette mesure est difficile à automatiser. Finalement l'indicateur utilisé est la tension aux bornes de la batterie. Cette grandeur est la seule facilement mesurable capable de donner une estimation de l'état de charge. [6]

3. La cellule photovoltaïque :

Pour passer de l'effet photovoltaïque à l'application pratique, il est nécessaire de trouver des matériaux qui permettent d'optimiser les deux phases essentielles de ce principe:

1. Absorption de la lumière incidente.
2. Collection des électrons en surface.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Ils sont composés d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique (effet photovoltaïque).

Nous nous sommes donc intéressés au fonctionnement de ces cellules ainsi qu'à leur rendement afin de découvrir l'efficacité de ce système.

Le Silicium est l'un des matériaux le plus courant sur terre, c'est le sable, mais un haut degré de pureté est requis pour en faire une cellule photovoltaïque et le procédé est coûteux. Selon les technologies employées, on retrouve le Silicium monocristallin avec un rendement de 16 à 18%, le Silicium Poly cristallin de rendement de 13 à 15%, le silicium amorphe présente une efficacité entre 5 et 10%. D'autres matériaux tels que l'Arséniure de Galium et le Tellure de Cadmium qui sont en court de test dans les laboratoires est présentent un rendement de (38%). [7]

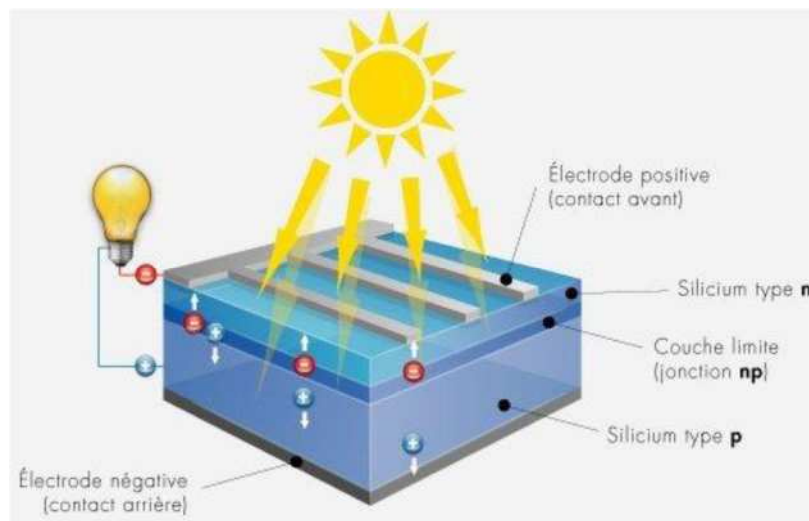


Figure I.6 : Cellule photovoltaïque.

3.1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclairage et celui d'un générateur de courant produisant un courant I_{ph} auquel se soustrait le courant de la

polarisation de la diode en polarisation directe, n'est qu'une représentation simplifiée du fonctionnement de la cellule.

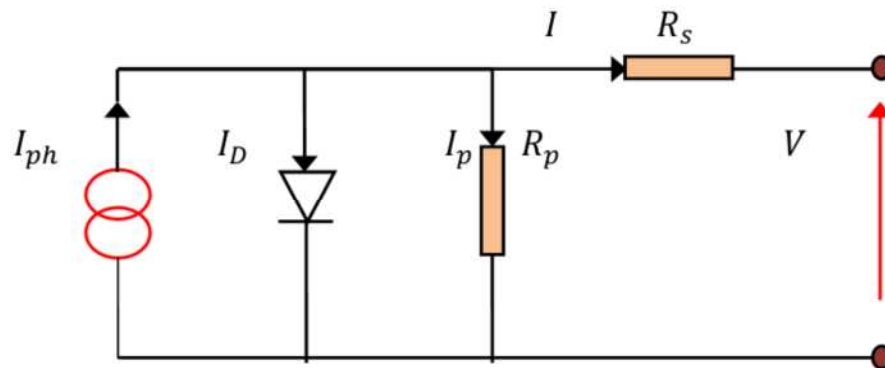


Figure I.7: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Les différents paramètres de ce modèle sont :

- a. Le générateur de courant : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photo généré.
- b. La résistance série R_s : elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- c. La résistance R_p : également connue sous le nom de court circuit, elle peut être due à un court circuit sur les bords de la cellule. On l'appelle aussi résistance de fuite.
- d. La diode : modélise la diffusion des porteurs dans la base de l'émetteur. [7]

3.2 Fabrication des cellules photovoltaïques :

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz.

La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Il est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont métallisés : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques. [1]

3.3 Les différents types de cellules :

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs: de sulfure de cadmium (CDs), de tellure de cadmium (CdTe), de Germanium (Ge), de sélénium (Se) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est actuellement le semi-conducteur le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. En effet, il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques dont les plus importants sont les suivantes :

3.3.1 Les cellules à silicium monocristallin :

Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont formées d'un seul cristal. Elles sont en général d'un bleu uniforme.

Avantage :

Elles permettent d'obtenir des rendements élevés (rendement entre 13 à 17%).

Inconvénients :

Leur coût est très élevé.

Rendement faible sous un faible éclairage.

3.3.2 Les cellules à silicium poly-cristallin :

Elles sont constituées de plusieurs cristaux. La cellule a un aspect bleuté mosaïque (pas uniforme). Leur rendement est de 11 à 15%.

Avantage :

Un bon rendement, mais cependant moins bon que pour les cellules monocristallines.

Elles offrent actuellement un bon rapport qualité/prix.

Inconvénients :

Rendement faible sous un faible éclairage.

3.3.3 Les cellules amorphes :

Le silicium est utilisé en couche mince, il n'est pas cristallisé. Il est déposé sur une plaque de verre. Ce type de cellule on le trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation (montre, calculatrice).

Avantage :

Moins cher que les autres.

Fonctionnement avec un éclairage faible.

Inconvénients :

Rendement faible.

Performances qui diminuent avec le temps, durée de vie courte.

3.3.4 Les cellules multi-jonctions :

Les cellules multi jonctions sont constituées de différentes couches qui permettent d'absorber la majorité de spectre solaire. Mais ces cellules ne sont pas commercialisées.

3.3.5 Les cellules organiques :

Encore au stade de la recherche, cette nouvelle technologie permet à présent la production de cellules solaires organiques légères, flexibles sur une grande surface et moins chères à produire. Les cellules PV organiques sont de trois types ; moléculaire, polymère et hybride. [8]

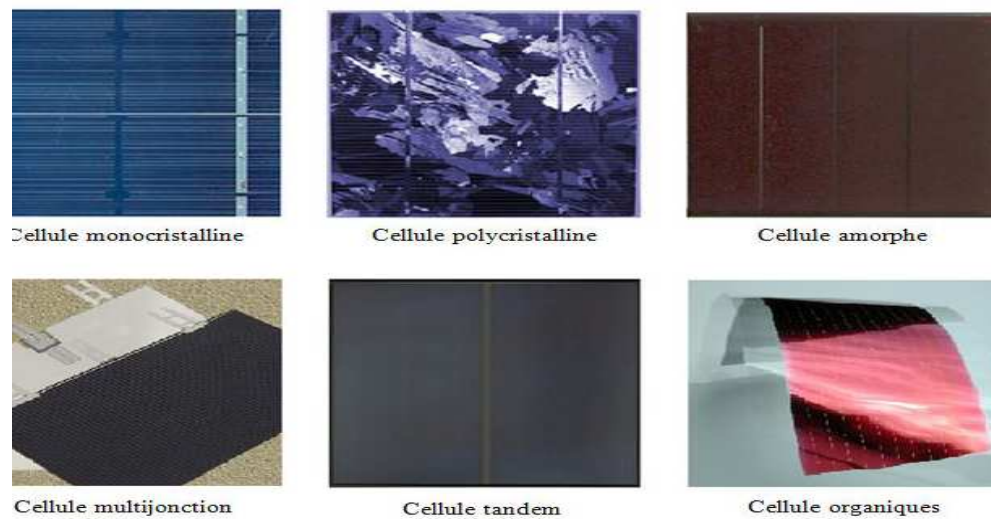


Figure I.8: Types de cellules photovoltaïques.

3.4 Principe de fonctionnement d'une cellule :

La cellule photovoltaïque est un composant électronique capable de fournir de l'énergie si elle est éclairée convenablement, elle est composée de deux semi-conducteurs, une des faces est dopée N (par exemple du phosphore), l'autre dopée de type P (par exemple du bore). Des électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique. [8]

3.4.1 Dopage de type P :

On introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.

3.4.2 La jonction PN :

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopé P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner.

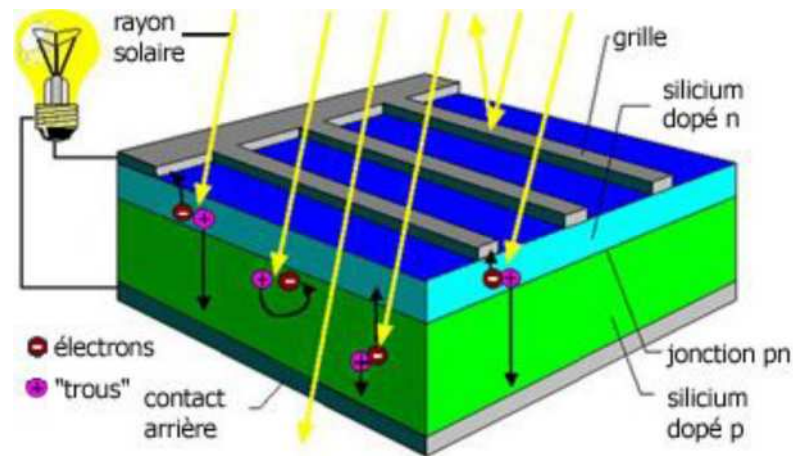


Figure I.9: représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.

- **Comportement de la jonction PN utilisée comme capteur PV :**

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celle représentées par la figure :

Sans éclairage le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode.

Ainsi sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer.

Sous polarisation inverse seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule.

Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants directs ou inverses comme pour des jonctions classiques sont sensibles à la température de jonction.

Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons –trous supplémentaires sont créées dans le matériau en fonction du flux lumineux.

Ce phénomène aussi appelé effet photovoltaïque ne se produit que si l'énergie des photons est supérieure égale à l'énergie de la bande interdite du matériau. La différence de potentiel qui en résulte aux bornes de la structure caractérise l'effet photovoltaïque et se situe selon les matériaux de la structure de la jonction.

3.5 Les différents types de pertes dans une cellule solaire :

Le rendement d'une cellule solaire est limité par différents types de pertes. Ces pertes peuvent être classées selon les pertes intrinsèques et extrinsèques ou selon les pertes optiques et électriques.

Et il y a plusieurs sources de pertes:

- Perte par réflexion.



- Perte thermodynamique.
- Perte par recombinaison.
- Perte par résistance électrique.
- **Les pertes extrinsèques :**

Ce sont les pertes qu'on peut éliminer. Il s'agit notamment des pertes due a la réflexion, l'ombrage du au contact, la résistance série, la collecte incomplète des porteurs photo générés, l'absorption dans la couche fenêtre et la recombinaison non radiative.

- **Les pertes intrinsèques :**

Ce type de pertes est du au deux raisons suivantes :

1/ l'incapacité de la cellule solaire mono jonction à répondre efficacement a toute les longueurs d'onde du spectre solaire. la cellule solaire devient transparente pour les photons dont leurs énergie est inferieure à l'énergie de la bande interdite du semi conducteur.

D'autre part, si les photons ont une énergie supérieure à la bande interdite le supplément d'énergie est dissipé sous forme de chaleur.

2/ Le deuxième type est du a la recombinaison radiative dans la cellule. [8]

3.6 Le rendement des cellules solaires :

Le rendement de conversion énergétique, est le pourcentage d'énergie convertie (photons en courant) et collectée, quand une cellule est connectée à un circuit électrique. [8]

3.7 Pourquoi le rendement est-il limité?

La plus efficace cellule solaire est faite d'un matériau convertisseur parfait:

Cela suppose une absorption parfaite, pas de réflexion de telle sorte que tous les photons d'énergie $E > E_g$ sont absorbés et créent un électron dans la bande supérieure. Si l'on suppose en plus que l'on a une parfaite séparation de charge de telle sorte que tous les électrons qui ne se recombinent pas sont transmis dans le circuit connecté, on obtient le courant maximum possible pour cette bande interdite. [8]

3.8 Les principales raisons pour lesquelles une cellule solaire ne donne pas des performances idéales sont:

-Absorption incomplète de la lumière incidente.

-Une plus faible efficacité des photons de haute énergie et pas d'absorption des photons de très basse énergie $< E_g$.

- Recombinaison non-radiative des porteurs de charges générés (présence de défauts).

- Chute de tension due à la résistance électrique entre le point de génération des électrons et le circuit extérieur. [8]

3.9 Comment augmenter le rendement des cellules solaires?

Pour augmenter le rendement des cellules solaires on peut:

Améliorer l'interaction avec la lumière.

Augmenter l'absorption.

Réduire la réflexion.

Concentrer la lumière.

Transformer et mieux adapter le spectre solaire:

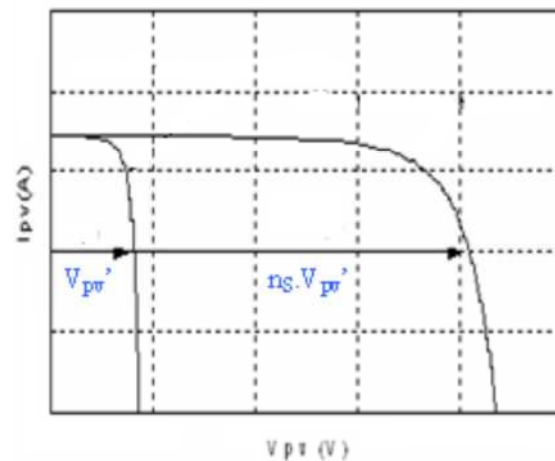
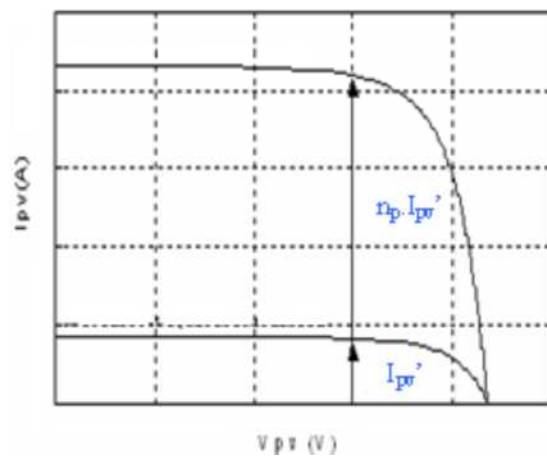
Par up-conversion pour les photons proches infrarouges.

Par down-conversion pour les photons ultra-violets. [8]

3.10 De la cellule au champ photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de ns cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle de np cellules accroît le courant en conservant la tension (figure II.3). Si toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le module photovoltaïque qui fournit un courant I_{pv} sous une tension V_{pv} . [8]

(a): Groupement parallèle.



(b): Groupement série.

Figure II.10 : Caractéristiques de groupement de cellules photovoltaïque.

Le panneau photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature

métallique qui permet de supporter le champ solaire avec une orientation et un angle d'inclinaison spécifique.

Le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands.

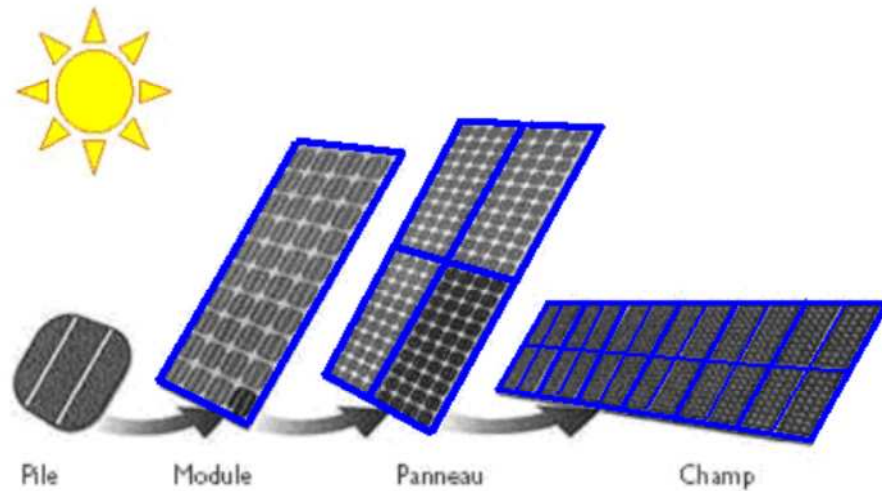


Figure I.11 : De la cellule au champ photovoltaïque.

4. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

4.1 Avantages du photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- Ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- Ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- Une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.

- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Ils ont une longue durée de vie.
- Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

4.2 Inconvénients du photovoltaïque :

Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.

Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevée.

Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. [8]

III. Application avec l'outil PC1D :

1. Le logiciel PC1D :

Le logiciel PC1D a été développé au centre de recherches de microélectronique de l'université de New South Wales en Australie. C'est l'un des simulateurs largement répandu pour la modélisation des cellules photovoltaïques. Le programme écrit en langage Pascal, résout des équations non linéaires dépendant du temps pour le transport des électrons et des trous dans les dispositifs semi-conducteurs, particulièrement les cellules solaires.

Le programme est interactif, incorporant :

- Un bilan de fenêtres de dialogues tabulées pour introduire les données physiques et géométriques.
- Des affichages graphiques pour examiner les résultats.

Méthodologie :

L'exploitation du logiciel nécessitera la détermination des données spécifiques au matériau choisi tel que :

La permittivité.

La structure de bande (l'énergie du gap, l'affinité électronique, la concentration intrinsèque, le rapport N_c/N_v).

Les paramètres de recombinaison (coefficient Auger, influence du dopage en volume et en surface) :

La mobilité des électrons ainsi que les trous.

L'indice de réfraction.

Le coefficient d'absorption.

La mise en œuvre des programmes permettra de démontrer la fiabilité tout en comparant avec les procédés expérimentaux. [11]

2. Simulation d'une cellule photovoltaïque de type SI :

La simulation avec le logiciel PC1D a pour but d'étudier le rendement électrique et quantique sous l'influence des paramètres physiques et géométrique sur une cellule photovoltaïque :

- **Caractéristiques I-V d'une cellule solaire :**

Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants:

Courant de court circuit (I_{cc}) : C'est la plus grande valeur du courant générée par une cellule.

Tension en circuit ouvert (V_{oc}) : Représente la tension aux bornes de la diode quand elle est traversée par le photo-courant I_{Ph} ($I_d = I_{Ph}$).

Les performances de la cellule sont représentées à travers la caractéristique courant-tension $I(V)$. cette dernière apporte une lecture claire des paramètres caractérisant la cellule solaire, comme le rendement de la cellule, les différents types des résistances parasite, le facteur de forme.

Aussi on peut utiliser cette caractéristique pour contrôler et commander les paramètres physiques de la cellule tels que le dopage et l'épaisseur des couches. Le courant est mesuré en fonction de la tension appliquée sous obscurité et sous ensoleillement, la lumière permet de décaler la courbe $I-V$ vers le bas dans le quatrième quadrant, car le courant photoélectrique provoque la production de l'énergie.

Afin d'obtenir la courbe $I(V)$ expérimentalement nous avons réalisé une expérience au laboratoire du physique énergétique qui est d'exposé le module photovoltaïque sous éclairement et mesurer les différentes valeurs du courant I et de la tension V en changeant la valeur de la résistance selon le tableau suivant : **Tableau I.1** : mesure de courant et de tension.

R (ohm)	I(A)	U(V)
0	-1.87	0
2	-1.85	4.02
4	-1.83	7.7
7	-1.8	11.11
9	-1.76	13.06
10	-1.59	16.2
50	-1.5	17.77

On a obtenue la courbe ci-dessus :

- **Caractéristique I(V) sous éclairnement :**

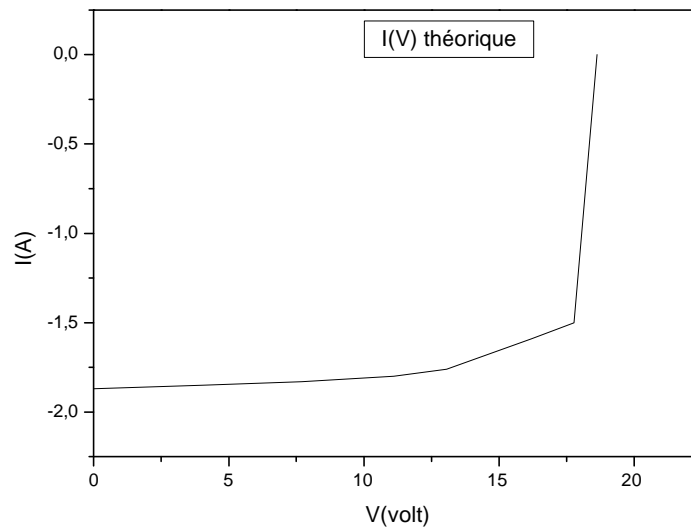


Figure I.12 : Caractéristique I(V).

Nous avons aussi réalisé une autre expérience qui est de relié deux modules photovoltaïque et mesurer le courant et tension de ces deux modules.

- **Mesure de tension :**

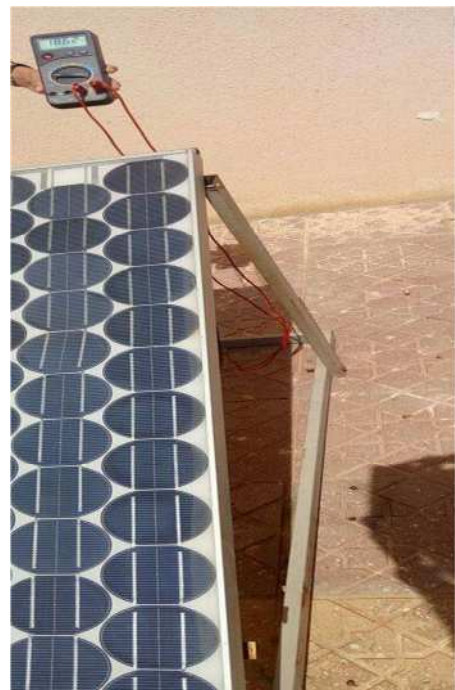


Figure I.13 : le premier module photovoltaïque **Figure I.14 :** le deuxième module photovoltaïque

Nous avons mesuré une tension égale à $U=18.5V$ au premier module et $U=18.65$ au deuxième module ; on remarque qu'elles sont presque identique.

- **Mesure de courant :**

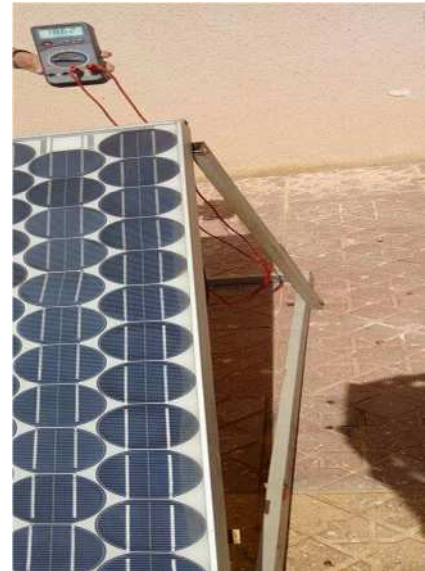


Figure I.15 : le premier module photovoltaïque **Figure I.16:** le deuxième module photovoltaïque

Nous avons mesuré un courant égal à $I= 2.5A$ au premier module et $I=2.5A$ au deuxième module ; l'association des deux modules nous a donné un courant égal à $I=5A$. [1]

- **Le rendement quantique d'une cellule solaire QE :**

Le rendement quantique donne la probabilité qu'un photon incident d'énergie E fournira un électron à un circuit externe. Il est considéré comme un paramètre quantitatif et qualitatif dans la description de la cellule solaire. Il permet de mesurer le nombre des électrons en sortie de la cellule solaire par rapport au nombre de photons incidents. Il permet aussi la quantification des pertes dans la cellule solaire (réflexion à la surface, pertes des photons de faibles et fortes énergie).

Ce qui nous aide à interpréter nos résultats et introduire des améliorations sur la cellule.

Le rendement quantique dépend de plusieurs propriétés du matériau : coefficient d'absorption, profondeur de jonction, l'épaisseur de la zone de charge de déplétion, la durée de vie des porteurs et leur mobilité, la recombinaison en surface etc....

Le rendement quantique interne représente le rapport entre le nombre de porteurs collectés et le nombre de photons traversant la surface du dispositif. Ce rendement est calculé numériquement par le logiciel PC1D en fonction de la longueur d'onde λ . [1]

$$\text{Rendement quantique} = \frac{\text{Nombre de photon absorbé ayant interagit avec les } e}{\text{nombre de photo absorbé}}$$

- **Le rôle de la couche anti reflet :**

La surface de la cellule solaire est le siège d'une forte quantité de pertes par réflexion ; 34% des pertes sont localisées dans la surface d'une cellule en Si dans les grandes longueurs d'onde (1.1 μ m) et plus de 54% aux courtes longueurs d'onde (0.4 μ m).

L'une des méthodes utilisées dans la conception des cellules solaires pour minimiser ce type de pertes est l'utilisation de couches antireflet (CAR .Anti-Reflective coatings) ou bien la texturisation de la surface.

La CAR est un revêtement diélectrique mince avec très faible valeur d'indice de réfraction. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux.

Pour une incidence normale de la lumière sur une surface plane et lisse, l'épaisseur de la couche antireflet est choisie de sorte que la longueur d'onde dans le matériau diélectrique soit égale au quart de la longueur de l'onde incidente.

Les matériaux utilisés comme couche antireflet doivent avoir les propriétés optiques suivantes :

- Une bonne adhérence de contact.
- Etre transparents dans la gamme de sensibilité des cellules solaires [0.2-1.2 μ m].
- Réduire au maximum la réflexion.

Les matériaux typiques utilisés dans l'empilement d'une couche antireflet sont présentés dans le tableau ci-dessus. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux matériaux diélectriques différents). [9]

Matériau	N
MgF2	1.38
SiO2	1.46
Al2O3	1.76
Si3N4	2.05
Ta2O5	2.2
Zn S	2.36
SiO2	1.8-1.9
TiO2	2.62

Tableau I.2 : L'indice de réfraction à 590 nm (2.1 eV), des matériaux couramment utilisés revêtement anti reflet.

2.1 Influence des paramètres physiques :

Dans cette partie le but est de changer le dopage émetteur de base et voir les différents graphes obtenue concernant le rendement électrique et le rendement quantique d'une cellule photovoltaïque en suivant ces étapes :

- On ouvre un nouveau fichier contenant le nom « PVCELL ».
- On choisi le matériau silicium.
- La couche antireflet existe en la remarquant dans le schéma de la figure suivante:

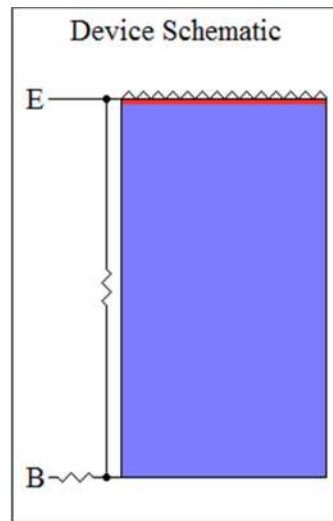


Figure I.17 : schéma de la jonction.

- On change le dopage au niveau de la partie « Region ».
- On garde le mode ONE-SUN.exc pour obtenir la caractéristique I(V) et le mode SCAN-QE.exc pour obtenir le rendement quantique.

On obtient les graphes ci-dessus :

***caractéristiques I(V) à différentes valeurs du dopage :**

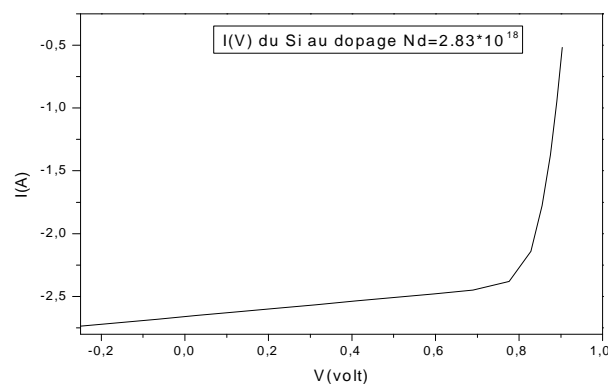


Figure I.18 : Caractéristique I(V) à une valeur dopage.

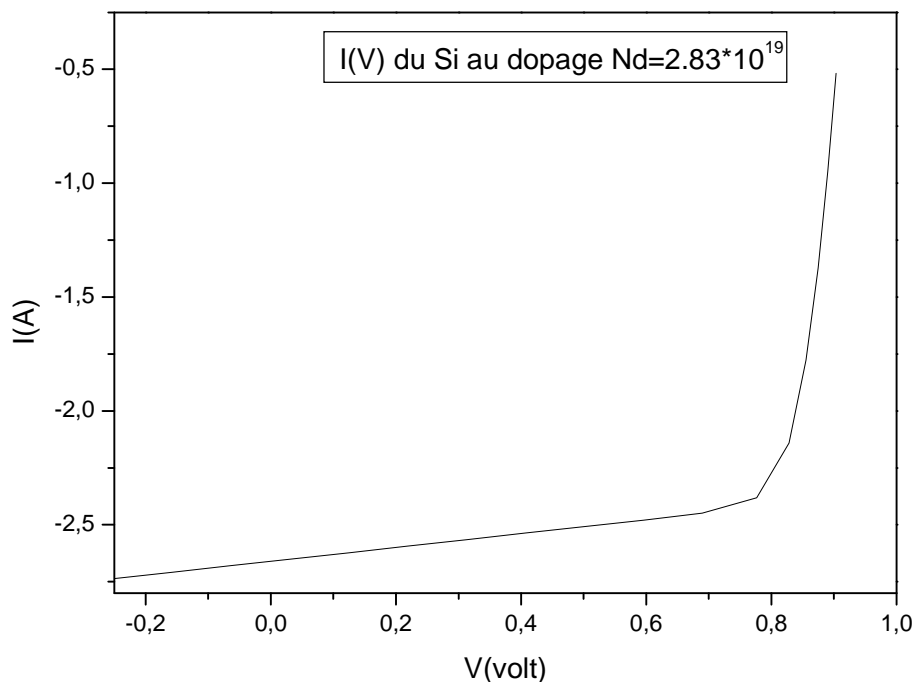


Figure I.19 : Caractéristique I(V) à une valeur dopage

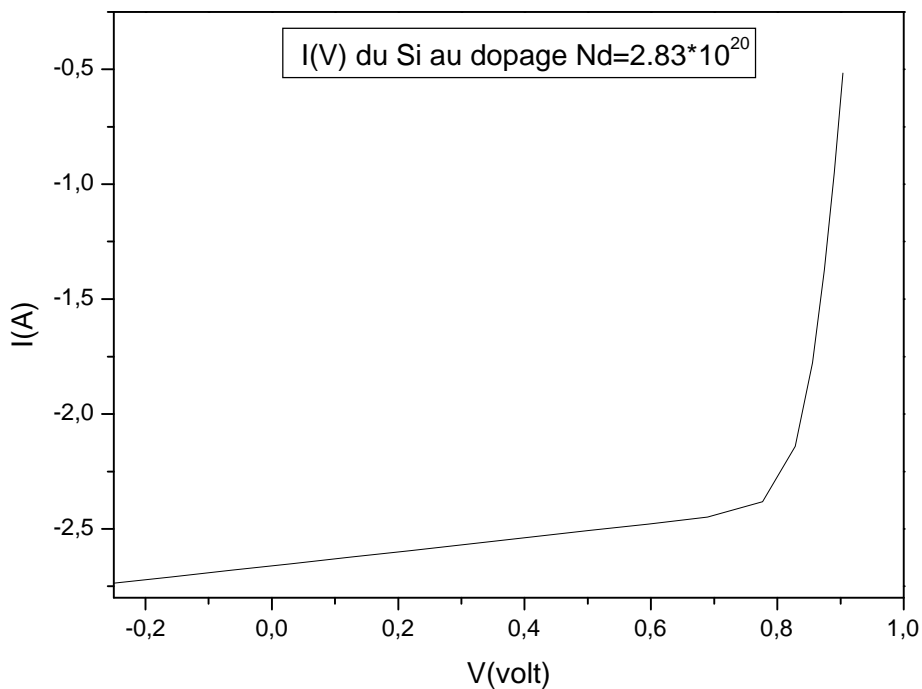


Figure I.20 : Caractéristique I(V) à une valeur dopage

Observation :

Dans cette partie on a varié le dopage Nd entre $2.83 \cdot 10^{20}$ et $2.83 \cdot 10^{18}$ alors que l'épaisseur reste fixe a la valeur $0.2 \mu\text{m}$; on observe que le courant varie entre -2.9A et -2.87A ; en augmentant la valeur du dopage le courant augmente proportionnellement.

Interprétation :

Dans ce cas ; le courant est insensible au dopage alors que Voc augmente, ce qui conduit à l'augmentation du rendement de la cellule.

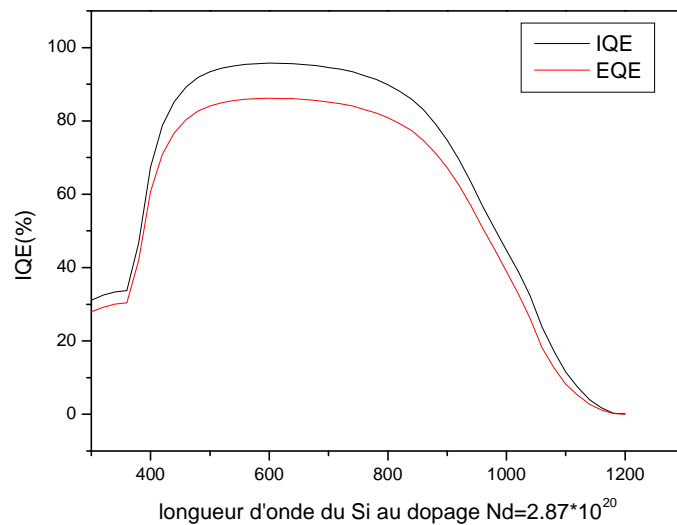
***le rendement quantique externe et interne a différents valeurs du dopage :**

Figure I.21 : Rendement quantique a une valeur de dopage.

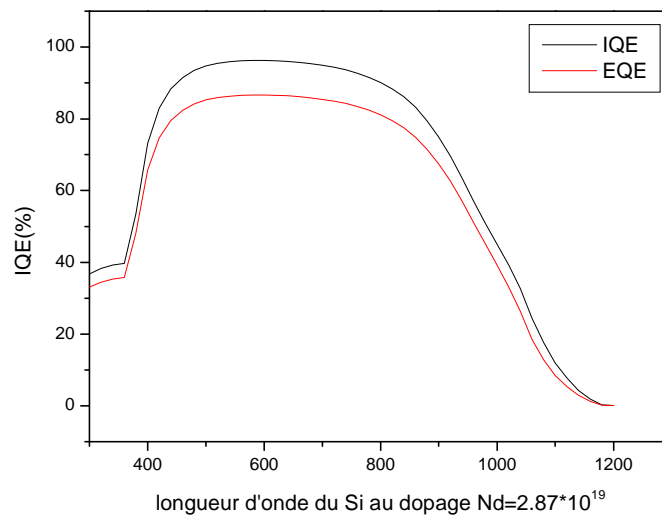


Figure I.22 : Rendement quantique a une valeur de dopage.

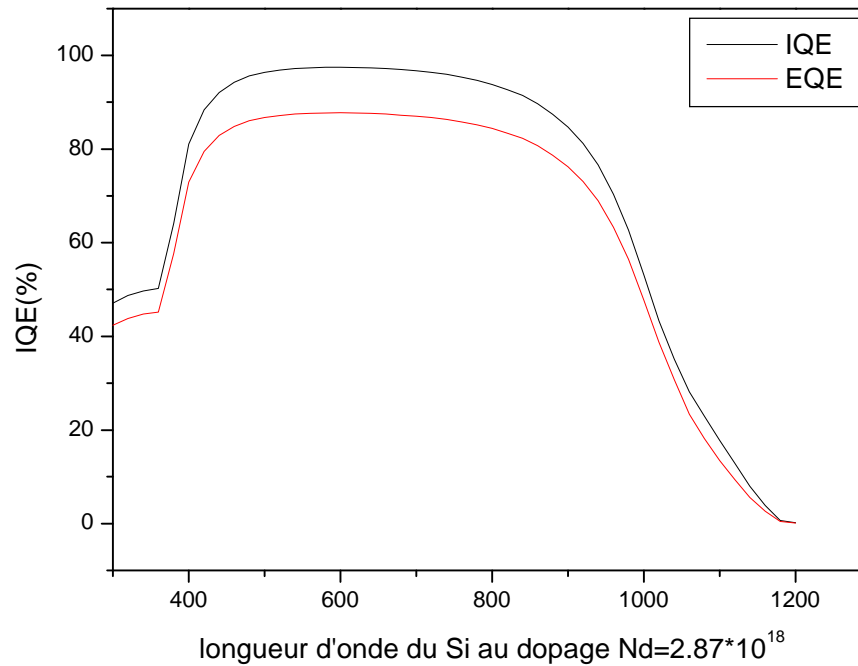


Figure I.23 : Rendement quantique a une valeur de dopage.

***Le rendement électrique a différentes valeurs de dopage :**

On a obtenue la courbe ci-dessus dans la figure I du rendement électrique en fonction du dopage par le rapport de la puissance donnée par le logiciel PC1D et la puissance incidente P_i à différentes valeurs de dopage qui varie entre 2.83×10^{20} et 2.83×10^{18} .

$$\eta \% = \frac{\text{puissance}}{P \text{ incidente}}$$

DOPAGE (cm^{-3})	RENDEMENT(%)
2.83×10^{20}	21.9
2.83×10^{19}	25.06
2.83×10^{18}	26.6
2.83×10^{17}	28.7

Tableau I.3 : valeurs de dopage et de rendement.

***Courbe du rendement électrique en fonction du dopage du SI :**

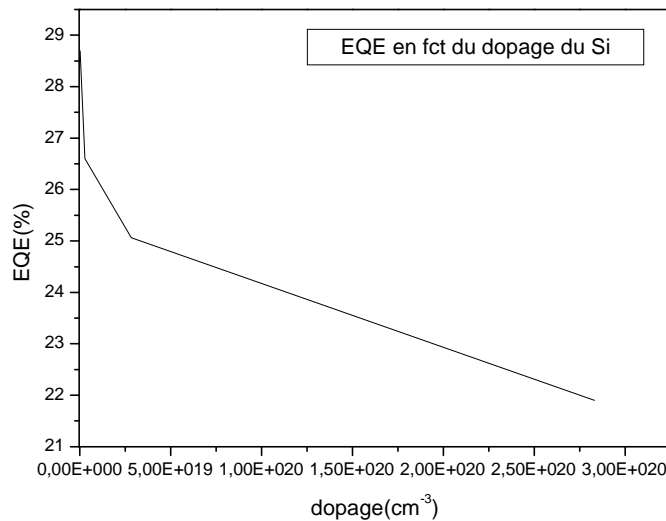


Figure I.24 : Rendement électrique en fonction du dopage.

Interprétation :

Par l'obtention des différents graphes en fonction de différentes valeurs de dopage et d'épaisseur pour le matériau « Silicium » on conclue que le rendement électrique se modifie en fonction du dopage : il diminue en accroissant la valeur du dopage.

2.2 Influence des paramètres géométriques :

Dans cette partie le but est de changer l'épaisseur et voir les différents graphes obtenue concernant le rendement électrique et le rendement quantique d'une cellule photovoltaïque :

- En changeant la valeur de la surface dans la partie « Region ».

On obtient les graphes ci-dessus :

***Caractéristiques I(V) en fonction de l'épaisseur :**

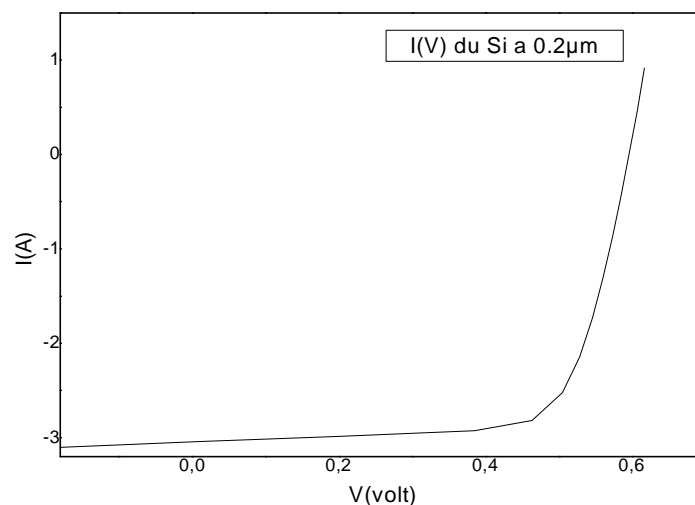


Figure I.25 : Caractéristique I(V) à une valeur d'épaisseur 0.2μm

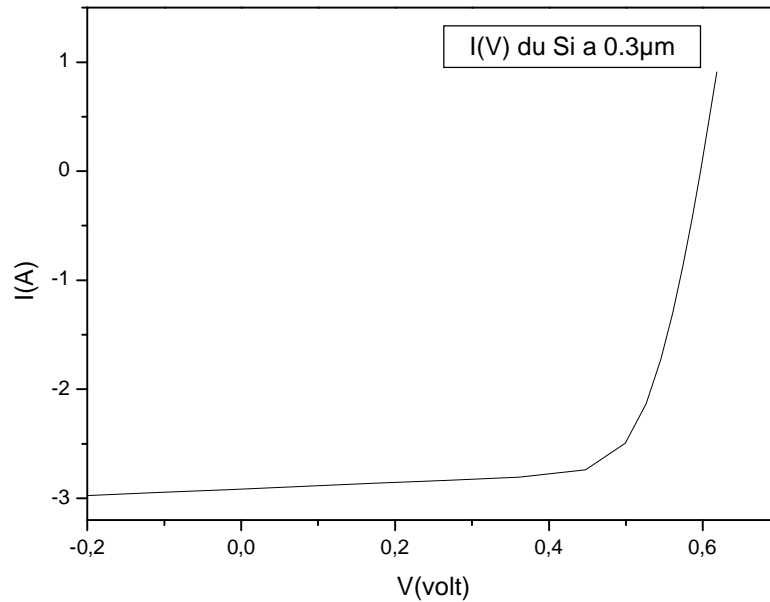


Figure I.26 : Caractéristique I(V) à une valeur d'épaisseur 0.3µm

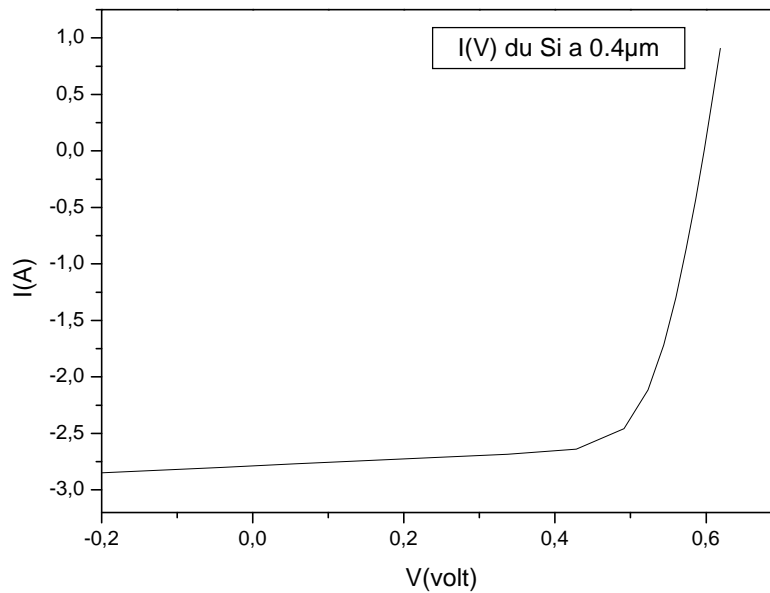


Figure I.27: Caractéristique I(V) à une valeur d'épaisseur 0.4µm

Observation :

Dans cette partie on a varié l'épaisseur Nd entre 0.2μ et 0.4μ alors que le dopage reste fixe à la valeur $2.83 \cdot 10^{20}$; on observe que le courant varie entre -2.6A et -2.32A ; en augmentant la valeur de l'épaisseur le courant augmente proportionnellement.

***Le rendement quantique externe et électrique en fonction de l'épaisseur :**

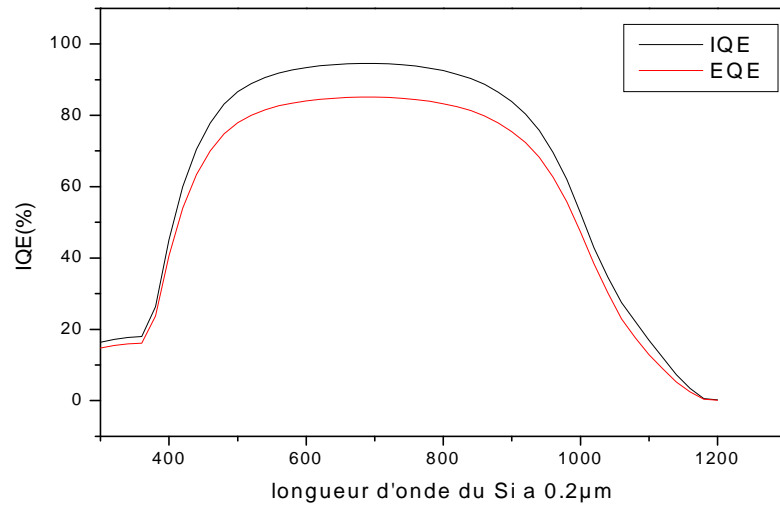


Figure I.28: Rendement quantique a une valeur d'épaisseur 0.2µm.

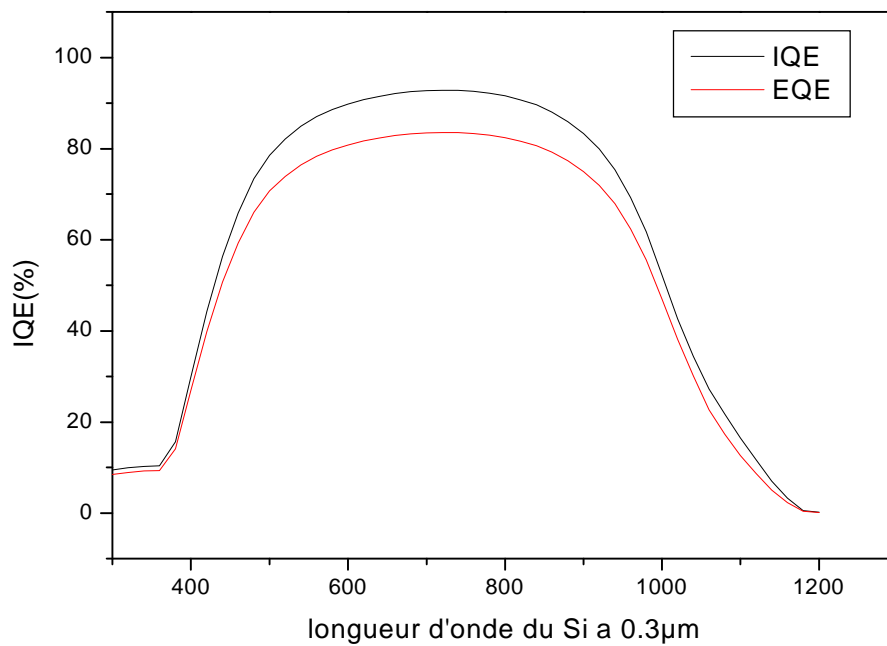


Figure I.29: Rendement quantique a une valeur d'épaisseur 0.3µm.

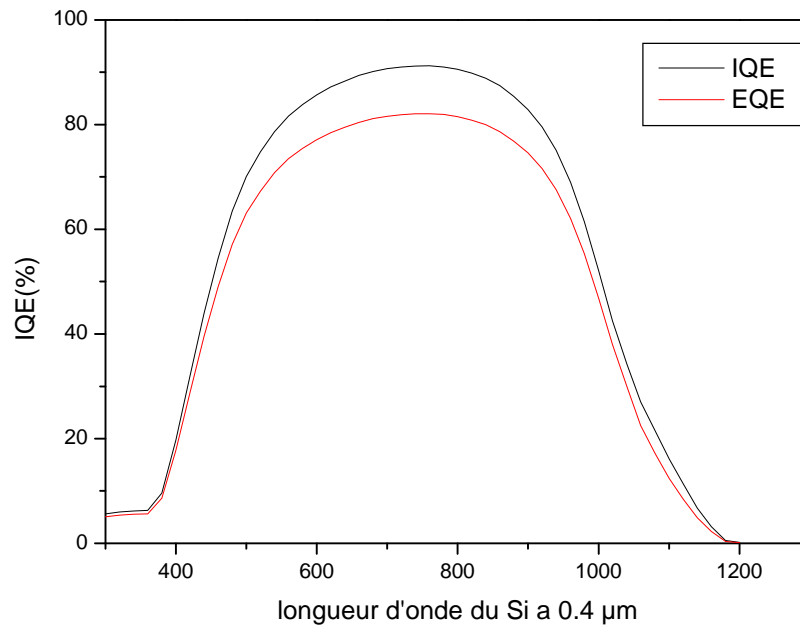


Figure I.30: Rendement quantique a une valeur d'épaisseur 0.4µm.

***Le rendement électrique a différents valeurs d'épaisseur :**

On a obtenue la courbe ci-dessus dans la figure I du rendement électrique en fonction de l'épaisseur par le rapport de la puissance donnée par le logiciel PC1D et la puissance incidente P_i à différentes valeurs de l'épaisseur qui varie entre 0.2 µm et 0.4 µm .

$$\eta \% = \frac{\text{puissance}}{P \text{ incidente}}$$

Epaisseur (µm)	RENDEMENT (%)
0.2	9.10
0.3	5.11
0.4	3.15

Tableau I.4 : Valeurs d'épaisseur et de rendement.

Courbe du rendement électrique en fonction de l'épaisseur du SI :

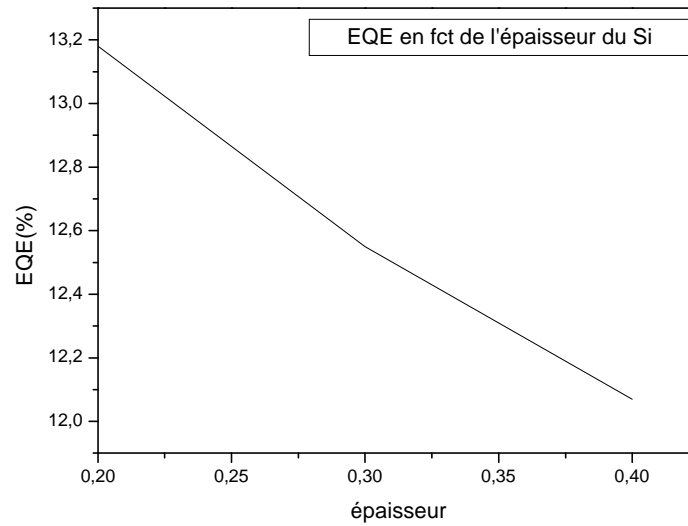


Figure I.31 : Rendement électrique en fonction de l'épaisseur.

Interprétation :

Par l'obtention des différents graphes en fonction de différentes valeurs d'épaisseur pour le matériau « Silicium » ; on remarque que l'augmentation de l'épaisseur Wp cause une diminution dans le rendement électrique.

3. Simulation d'une cellule photovoltaïque de type INP :

Le but est de choisir le matériau INP au niveau du logiciel PC1D et faire la simulation :

3.1 Influence des paramètres physiques :

Dans cette partie on a changé le dopage et on a choisi le matériau « Inp » ; on a obtenu les graphes suivants :

*caractéristiques I(V) à différents valeurs de dopage :

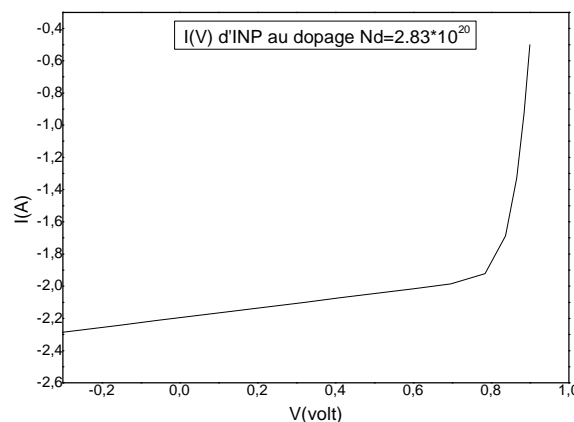


Figure I.32 : Caractéristique I(V) à une valeur dopage.

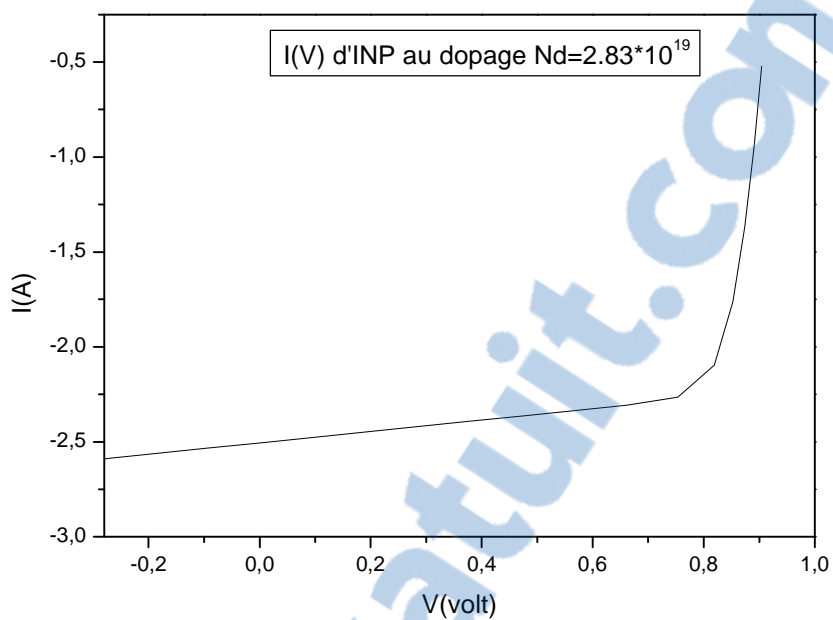


Figure I.33: Caractéristique I(V) à une valeur dopage.

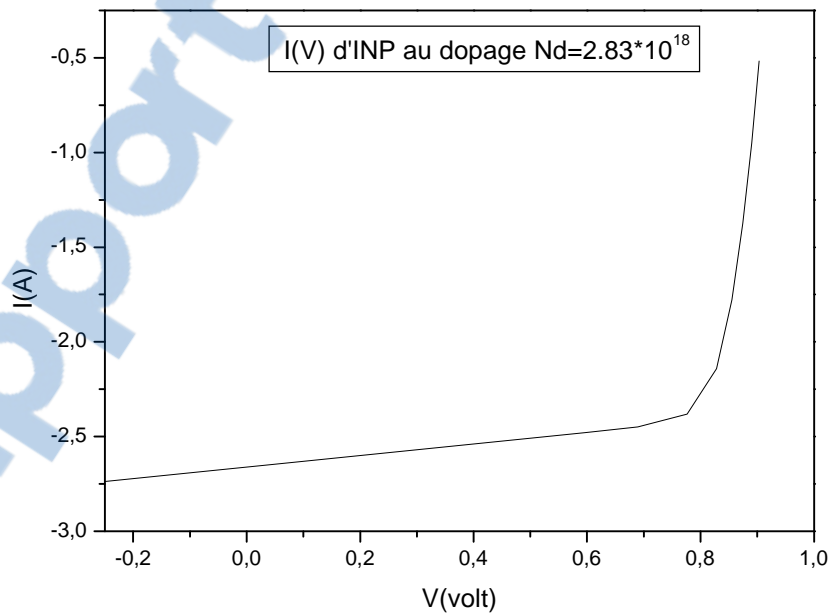


Figure I.34 : Caractéristique I(V) à une valeur dopage.

***Le rendement quantique externe et interne a différents valeurs de dopage :**

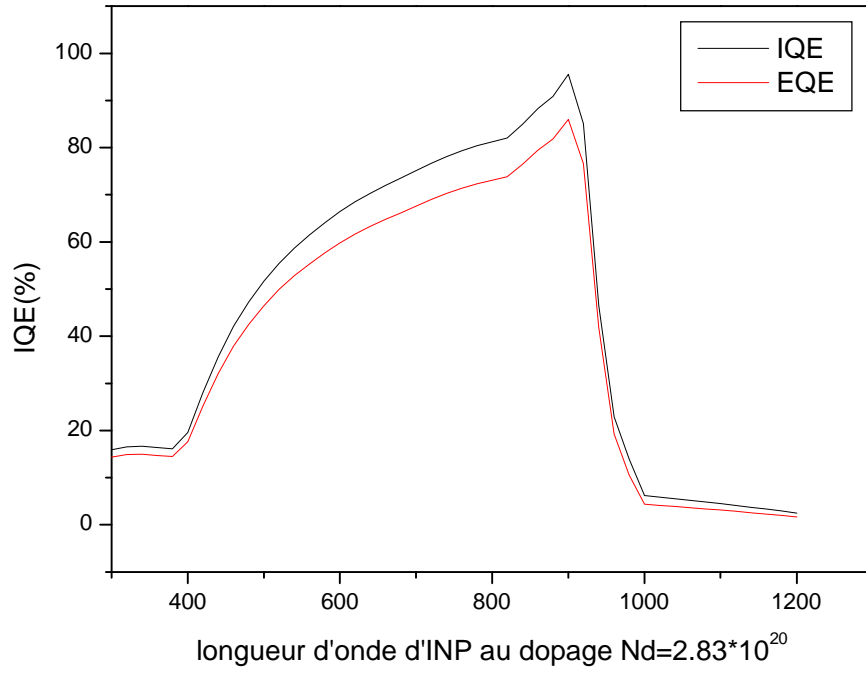


Figure I.35 : Rendement quantique a une valeur de dopage.

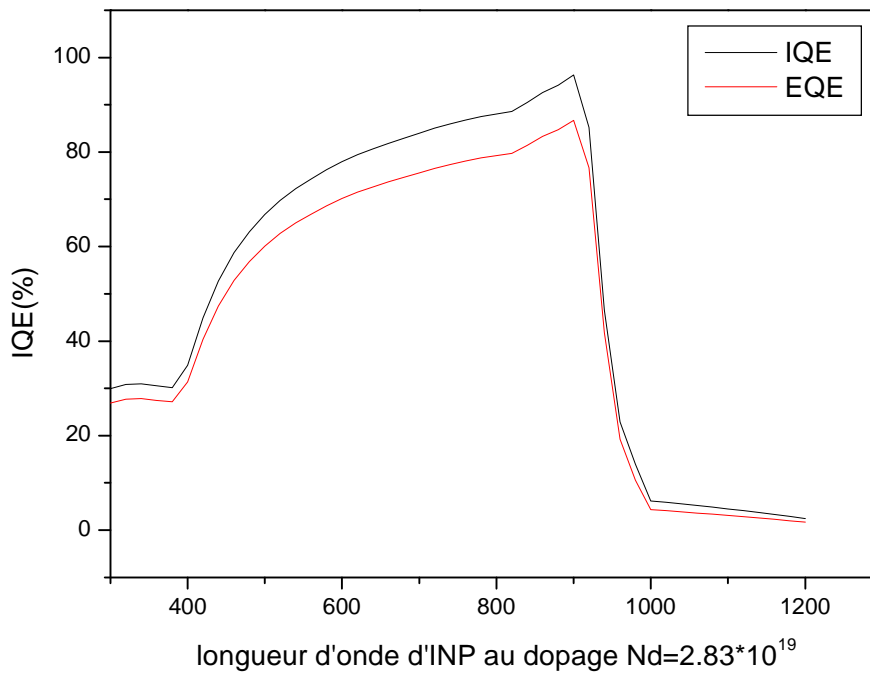


Figure I.36 : Rendement quantique a une valeur de dopage.

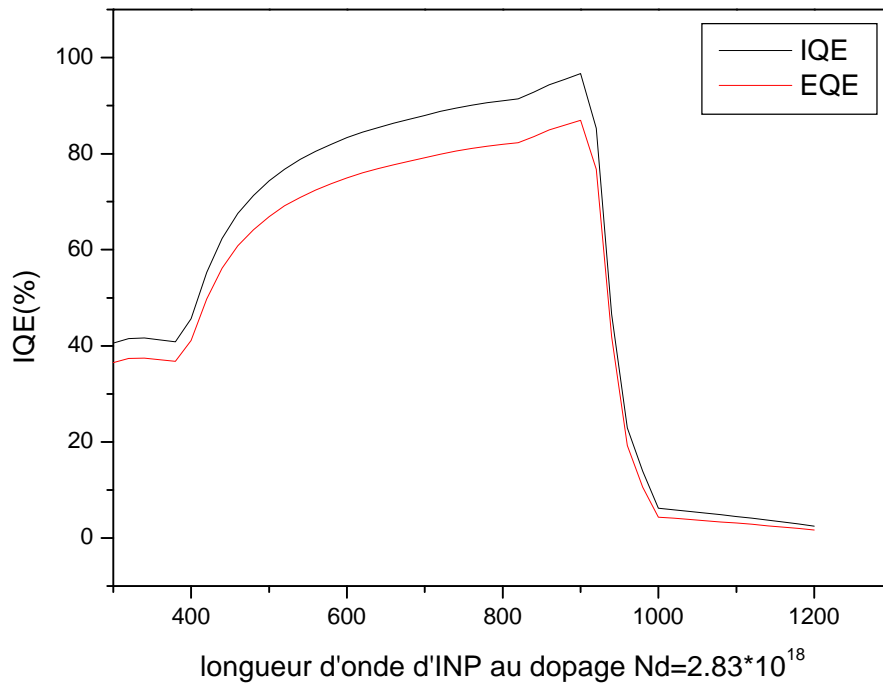


Figure I.37: Rendement quantique a une valeur de dopage.

***Le rendement électrique a différents valeurs de dopage :**

On a obtenue la courbe ci-dessus dans la figure I du rendement électrique en fonction du dopage par le rapport de la puissance donnée par le logiciel PC1D et la puissance incidente P_i à différentes valeurs de dopage qui varie entre $2.83 \cdot 10^{20}$ et $2.83 \cdot 10^{18}$.

$$\eta \% = \frac{\text{puissance}}{P \text{ incidente}}$$

DOPAGE (cm^{-3})	RENDEMENT(%)
$2.83 \cdot 10^{20}$	13.6
$2.83 \cdot 10^{19}$	12.55
$2.83 \cdot 10^{18}$	12.60
$2.83 \cdot 10^{17}$	11.80

Tableau I.5 : Valeurs de dopage et rendement d'INP.

- **Courbe du rendement électrique en fonction du dopage de l'INP :**

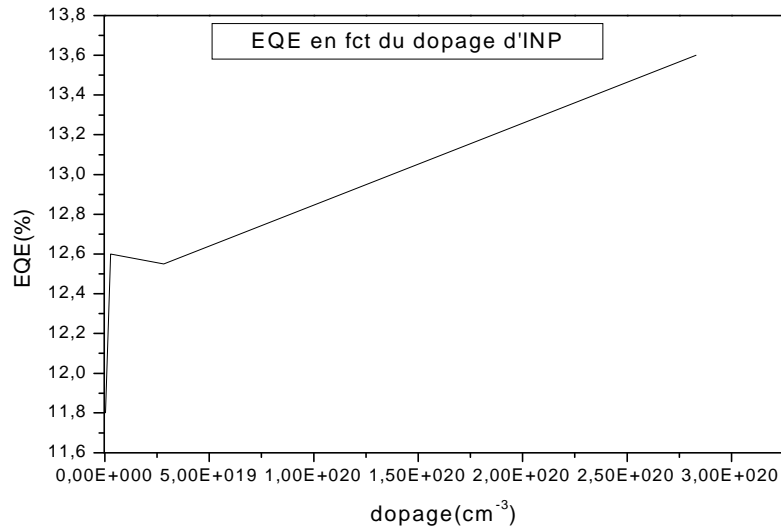


Figure I.38 : Rendement électrique en fonction du dopage.

Interprétation :

Pour le matériau « INP » on conclue que le rendement électrique se modifie proportionnellement en fonction du dopage : il augmente en élevant la valeur du dopage.

3.2 Influence des paramètres géométriques :

Dans cette partie on a changé l'épaisseur ; on a obtenue les graphes suivants :

*Caractéristiques I(V) a différents valeurs de l'épaisseur :

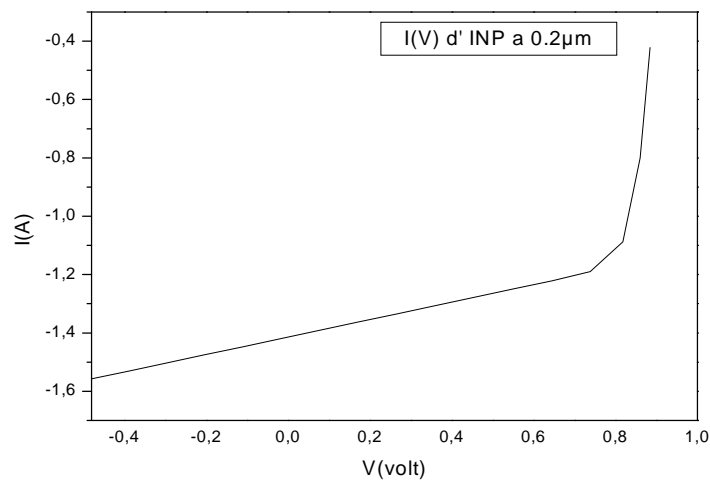


Figure I.39 : Caractéristique I(V) a une valeur de d'épaisseur.

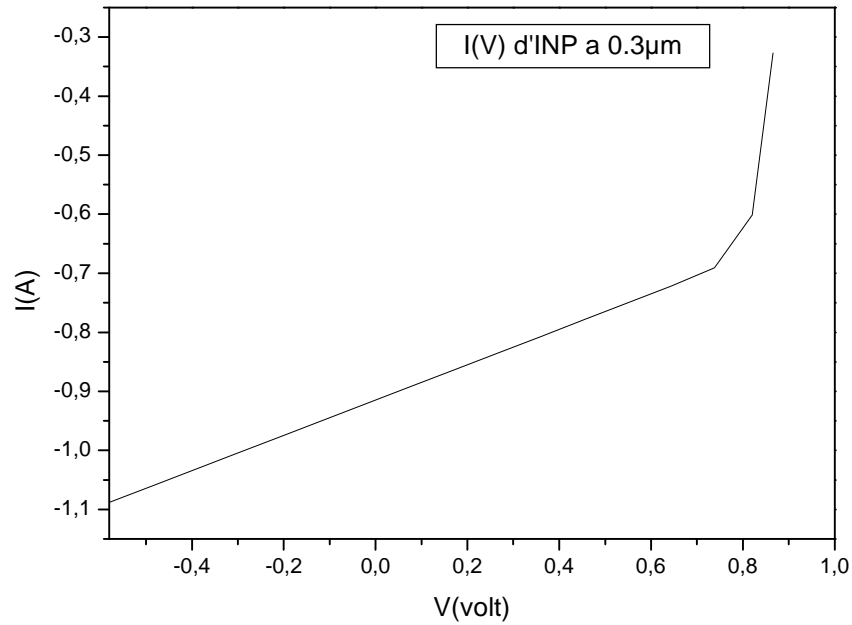


Figure I.40 : Caractéristique I(V) a une valeur de d'épaisseur.

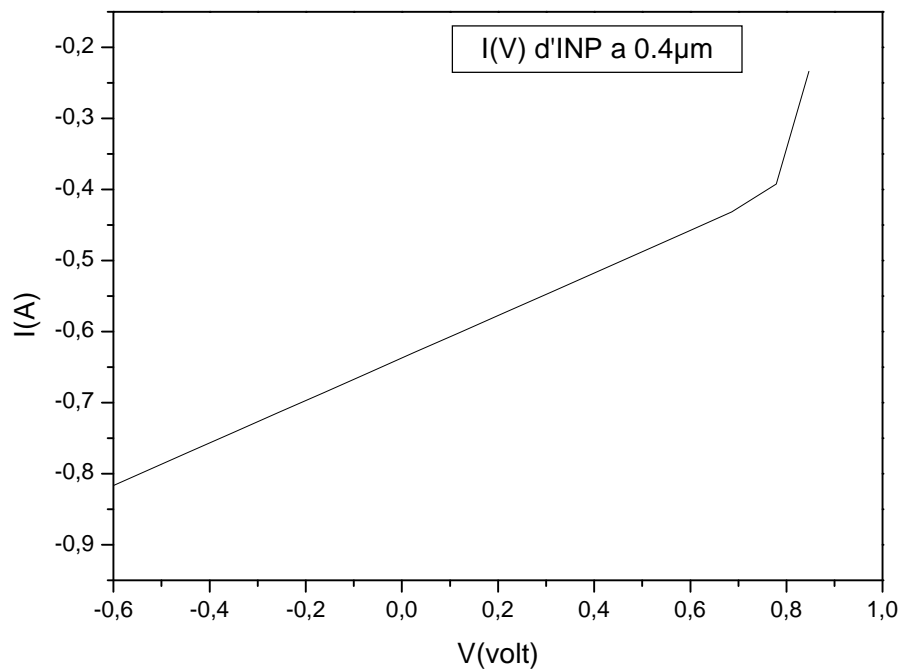


Figure I.41 : Caractéristique I(V) a une valeur de d'épaisseur.

Observation :

Dans cette partie on a varié l'épaisseur entre $0.2\mu\text{m}$ et $0.4\mu\text{m}$ alors que le dopage reste fixe a la valeur $2.83 \cdot 10^{20}$; on observe que le courant varie entre -1.56A et -0.89A ; en augmentant la valeur de l'épaisseur le courant augmente proportionnellement.

***Le rendement quantique externe et interne a différents valeurs de l'épaisseur :**

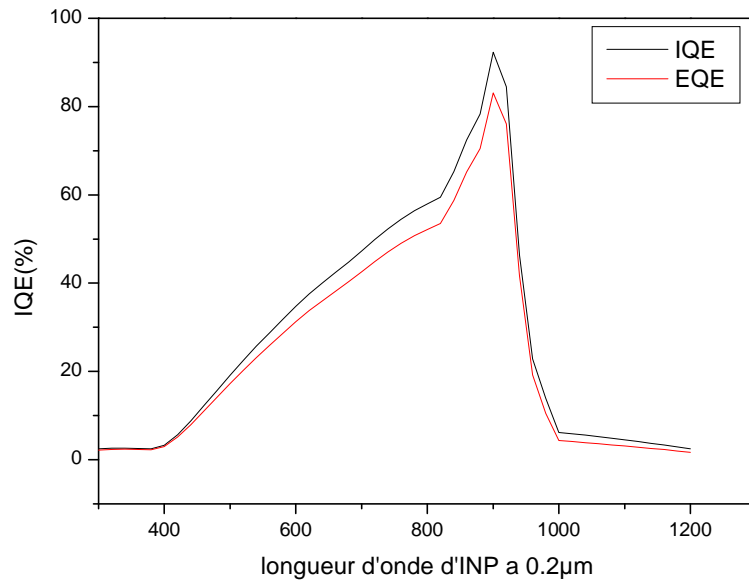


Figure I.42 : Rendement quantique a une valeur d'épaisseur.

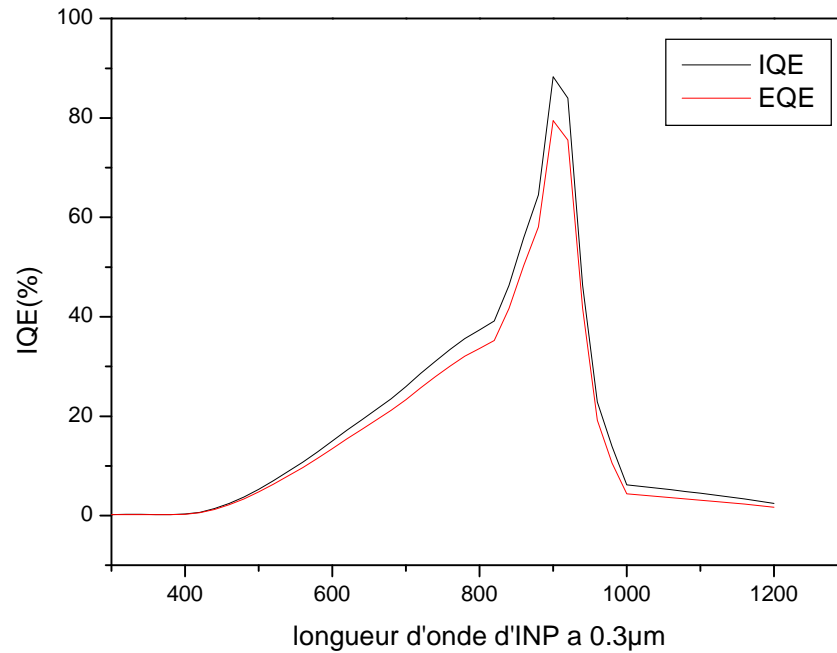


Figure I.43 : Rendement quantique a une valeur d'épaisseur.

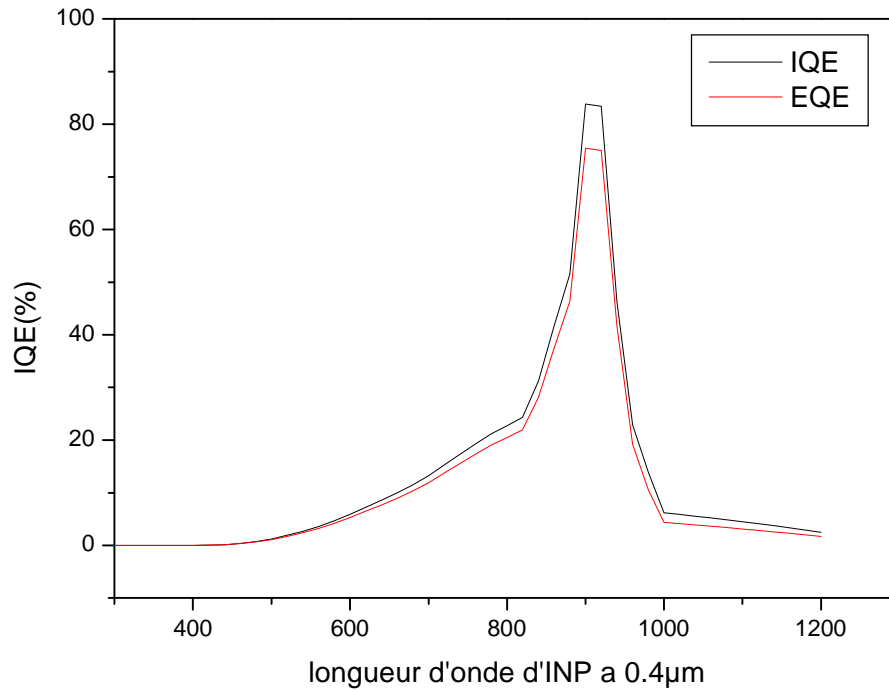


Figure I.44 : Rendement quantique a une valeur d'épaisseur.

***Le rendement électrique a différents valeurs de l'épaisseur :**

On a obtenue la courbe ci-dessus dans la figure I du rendement électrique en fonction de l'épaisseur par le rapport de la puissance donnée par le logiciel PC1D et la puissance incidente P_i à différentes valeurs de l'épaisseur qui varie entre $0.2 \mu\text{m}$ et $0.4 \mu\text{m}$.

$$\eta \ \% = \frac{\text{puissance}}{P \text{ incidente}}$$

Epaisseur (μm)	RENDEMENT (%)
0.2	13.18
0.3	12.55
0.4	12.07

Tableau I.6 : Valeurs d'épaisseur et de rendement d'INP.

- **Courbe du rendement électrique en fonction du dopage de l'INP :**

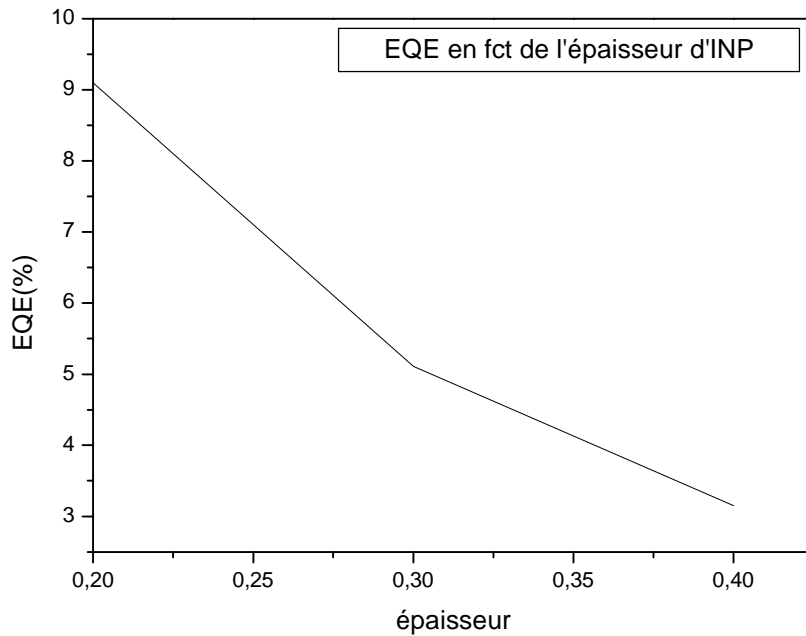


Figure I.45 : Rendement électrique en fonction de l'épaisseur.

Interprétation :

Pour le matériau « INP » on conclue que le rendement électrique se modifie proportionnellement en fonction de l'épaisseur: il diminue en élevant la valeur de l'épaisseur.

- **Conclusion de la simulation :**

Les résultats que nous avons obtenus montrent bien l'effet de l'épaisseur et du dopage sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire étudiée. En résumé :

- La diminution de l'épaisseur améliore le rendement de conversion de la cellule.
- L'augmentation du dopage entraîne une augmentation dans la tension de circuit ouvert et le facteur de forme alors que le photo-courant est pratiquement constant.

IV. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur l'énergie solaire, le rayonnement solaire, ensuite nous avons présenté l'effet photovoltaïque ainsi que la cellule solaire, ses différents types, son principe de fonctionnement, le rendement, le rôle de la couche anti reflet et les différents types pertes pouvant exister dans une cellule solaire, ainsi la simulation par le logiciel PC1D.

Dans le chapitre suivant, nous nous attacherons à étudier la technologie des panneaux solaires, leurs utilisations, leurs fonctionnement, leurs installations ainsi que leurs rendement.

Chapitre II : Etat de l'art de l'énergie photovoltaïque

I. Introduction :

Il arrive sur Terre 15000 fois plus d'énergie que ce dont nous avons besoin. En 1836, le chercheur français Antoine Becquerel trouve le moyen de convertir cette énergie lumineuse en énergie électrique. Son idée commença à être étudiée un siècle plus tard et aboutit à l'invention des panneaux solaires photovoltaïques.

Aujourd'hui, l'énergie solaire reste peu utilisée mais se développe de plus en plus notamment en Allemagne, au Japon et aux Etats-Unis qui sont les trois plus grandes puissances solaires mondiales.

Dans le cadre de notre PFE, nous avons donc décidé de travailler sur cette énergie d'avenir que sont les panneaux solaires. Ce sujet s'inscrit dans le thème *Environnement et Progrès* et croise deux matières : la Physique - Chimie et les Mathématiques. [13]

II. L'utilisation des panneaux et projets :

De nos jours, de plus en plus d'installations et de produits innovants deviennent autonomes grâce à l'utilisation de panneaux solaires.

1. Les satellites :



Figure II.1 : satellite

L'une des premières utilisations des panneaux solaires fut pour les satellites. En effet, ceux-ci ne peuvent naturellement pas être reliés par un câble et sont le plus clair du temps exposés au soleil. Bien que les rendements des panneaux solaires fussent faibles à l'époque des premiers satellites, ceux-ci ont des besoins énergétiques très faibles lorsqu'ils sont en orbite.

L'appareil est donc autonome. [13]

2. L'usage domestique :

De plus en plus de particuliers font installer des panneaux solaires chez eux. Il y a alors deux cas : soit ils ont pris conscience de l'écologie et veulent faire un geste pour l'environnement, soit ils habitent dans un endroit isolé non raccordé au réseau EDF.



Figure II.2 : l'usage domestique.

3. Ou en entreprises :



Figure II.3: Campus.

Certaines entreprises se mettent également au solaire comme le *Campus* qui a recouvert en 2006 tous ses toits avec des panneaux photovoltaïques. Il s'agit tout simplement de la plus grande installation solaire en entreprise des Etats-Unis. La puissance énergétique de 1.6 mW permettrait d'alimenter en électricité 1000 maisons moyennes de Californie. [1]

4. Les nouveaux gadgets :

Le téléphone portable :



Figure II.4 : téléphone portable.

Que ce soient des chargeurs de portables..



Figure II.5: chargeur portable.

Ainsi des petites lampes ...ou carrément des lampadaires :

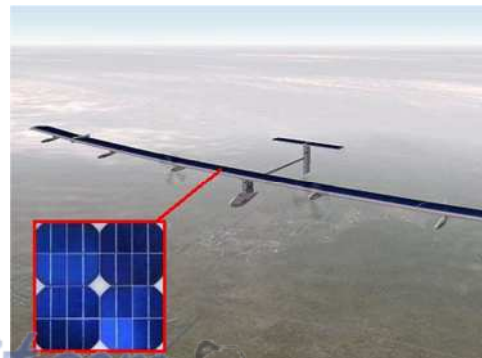


Figure II.6 : lampadaire.

Beaucoup de nouveaux produits sont prévus pour fonctionner de façon autonome grâce à l'utilisation de panneaux solaires.

Nouveauté : Il existe maintenant des panneaux solaires pliables. On peut les rouler et les emmener partout avec nous. [13]

5. Les voitures et les avions :



De nombreux prototypes de voitures sont réalisés chaque année dans le monde. Des courses tests sont organisées chaque année en Australie. Cette voiture, *la Nuna II*, a récemment battu le record de vitesse avec une vitesse moyenne de 96.8 km.h^{-1} .

Le projet s'est également étendu à l'aviation avec des avions solaires tel que le médiatique « Solar Impulse ». [13]

6. Les champs et centrales solaires :

Ces 1 200 000 m² de panneaux solaires photovoltaïques sont bien réels, il s'agit là de la plus grande centrale solaire mondiale inaugurée en 2007 en Allemagne (déjà leader mondial de la puissance solaire). La puissance énergétique peut atteindre jusqu'à 10 MW.

Il existe également des projets de centrale solaire dans l'espace, ce qui permettrait aux panneaux d'être toujours exposés aux rayons du Soleil, la centrale produirait donc de l'électricité de façon régulière et en grande quantité. Cependant, ce projet rencontre des difficultés au niveau de l'installation de cette centrale, ainsi que pour transporter l'énergie produite jusqu'à la Terre. [1]

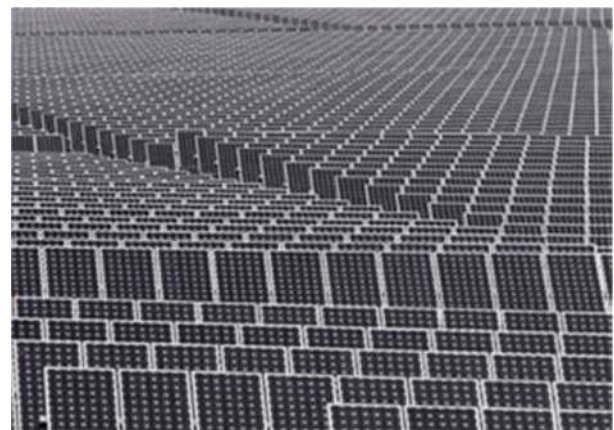


Figure II.7 : champs solaires

Figure II.8: plusieurs panneaux

7. La tour solaire :



Figure II.9: Tour solaire

Le principe est de disposer un champ de miroirs autour de la tour (haute d'au moins 300 m), ceux-ci réfléchissant les rayons du Soleil en un même point à la base de la tour. L'air se réchauffe très fortement et par différence de densité s'élève dans la tour, actionnant des turbines.

Des projets existent également en Australie pour une tour qui atteindrait 1 km de haut. [13]

8. Un nouveau concept... La vitre teintée :

Un nouveau concept est en cours de développement. Il s'agirait d'une vitre teintée qui serait fabriquée de telle sorte que les rayons lumineux soient réfractés puis piégés dans le verre. Ils seraient ensuite réfléchis jusqu'aux extrémités de la vitre, celles-ci étant pourvues de cellules photovoltaïques. Ainsi, seuls les bords des panneaux auraient besoin d'être équipées de cellules photovoltaïques, le reste du panneau pouvant rester (plus ou moins) transparent.

Voici un petit schéma pour clarifier les choses. [13]

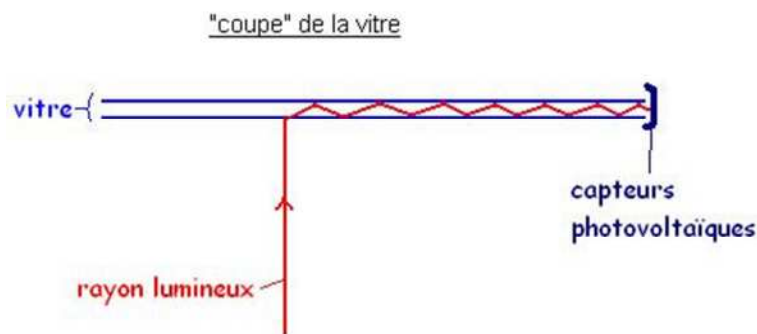


Figure II.10 :coupe de la vitre

Grâce à ce concept, toutes les vitres pourraient un jour produire de l'énergie électrique. Cependant, ceci n'est encore qu'à l'état de projet donc pour en savoir plus... attendre quelques années).

III. Etude du dimensionnement solaire :

L'énergie fournie par les panneaux solaires est directement proportionnelle à l'ensoleillement. Afin d'optimiser au mieux l'installation il faut donc tenir compte de ce facteur et du lieu de l'installation.

Les particuliers qui veulent raccorder leur installation au réseau EDF ont deux possibilités : utiliser ce qu'il produise et revendre le reste ou vendre la totalité de la production et acheter l'électricité dont ils ont besoin. La plupart des installations sont garanties 25 ans contre une baisse de rendement de 10%. C'est une des seules choses que les entreprises peuvent garantir car la durée de vie d'un panneau solaire est à ce jour encore inconnue.

Les panneaux solaires sont également utilisés pour des applications mobiles (camping-car, bateaux, ...). [14]

VI. Principe de fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques :

Nous pouvons distinguer deux types de panneaux solaires :

- Les panneaux solaires **thermiques** : Ces panneaux convertissent la lumière en chaleur. Ils sont souvent utilisés dans des installations domestiques où ils sont reliés à un chauffe-eau.
- Les panneaux solaires **photovoltaïques** : Plus complexes, ils transforment la lumière du Soleil directement en électricité.

1. Les panneaux solaires thermiques :

Les panneaux solaires thermiques transforment la **lumière en chaleur**, le plus souvent pour des chauffe-eaux.

2. Les panneaux solaires photovoltaïques :

Les panneaux solaires photovoltaïques, parfois appelés photoélectriques, transforment la **lumière en électricité**. Ces panneaux sont donc les plus répandus mais aussi les plus complexes

Ces panneaux sont tout simplement un assemblage de cellules photovoltaïques, chacune d'elles délivrant une tension de 0.5V à 0.6V. Elles sont donc assemblées pour créer des modules photovoltaïques de tension normalisée comme 12V.

Un panneau constitué de 20 cellules photovoltaïques va donc délivrer une tension U de 12V, et cela quelque soit l'ensoleillement. Mais pour faire fonctionner des appareils électriques, c'est la puissance P (en Watt) qui détermine l'énergie électrique. Et $P=U \times I$, c'est donc l'intensité du panneau qui va déterminer l'énergie électrique. Et c'est l'intensité qui varie en fonction de l'ensoleillement.

Exemple :

Prenons un panneau de 12 V.

Lorsque l'irradiation solaire est maximale (1000 W/m²), l'intensité et par conséquent la puissance délivrées par le panneau seront élevées.

Puissance (W) = Tension (V) × Intensité (A).

$$P = 12 \times 10.$$

$$P = 120 \text{ W.}$$

La puissance fournie dans les conditions optimales est 120 W pour une irradiation de 1000 W, le rendement est donc de 12%, on peut donc déduire que ce panneau est constitué de cellules poly-cristallines.

Lorsque l'irradiation solaire est faible (50 W/m^2), l'intensité et par conséquent la puissance délivrées par le panneau seront faibles.

$$P = U \times I.$$

$$P = 12 \times 0.5.$$

$$P = 6 \text{ W}.$$

La puissance fournie pour une faible irradiation solaire peut être de 6 W. On peut toujours y aller pour faire fonctionner un four qui consomme 3500 W ! Une forte irradiation solaire est donc indispensable.

Comprendre le fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque est essentiel lorsque l'on souhaite recourir à cette technologie. Le module solaire photovoltaïque est un système capable de capter l'énergie envoyée par le soleil vers la Terre, et de la convertir en courant électrique continu. Il existe également des équipements qui produisent de l'eau chaude à partir de l'énergie solaire.

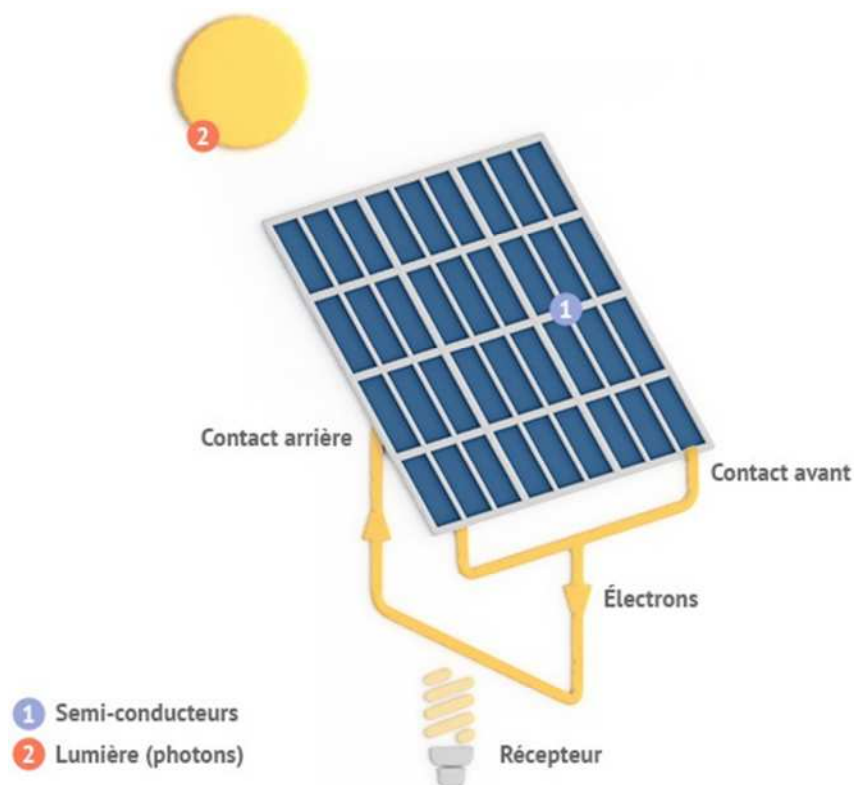


Figure II.11 : panneau solaire

Le fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque repose sur plusieurs éléments :

- Un module composé de cellules photovoltaïques transformant l'énergie en tension électrique continue.
- Un système de montage, également appelé système d'intégration à la toiture qui ancre le panneau photovoltaïque au bâti.
- Un abrévement qui établit une jonction étanche entre le panneau et le reste de la toiture.

À cela s'ajoutent les équipements électriques, et en particulier l'onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif et permet d'alimenter votre maison, ou le réseau public de distribution d'électricité. Le prix d'achat d'un panneau solaire photovoltaïque reste élevé, mais baisse d'année en année. De plus, des aides financières sont disponibles afin de vous aider à assumer le coût de départ [14].

V. Avantages et inconvénients des panneaux :

1. Avantage :

-L'énergie photovoltaïque peut être installée partout, même en ville.

-L'énergie photovoltaïque est renouvelable et gratuite.

-Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.

-Le contrat d'achat est conclu pour une durée de 20 ans.

-La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voire de générer des revenus.

- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.

-L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de son propriétaire.

-Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé

2. Inconvénients :

-Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé .

-Le rendement réel de conversion d'un module est faible.

-Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.

-Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante.

-Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans). [14]

VI. Coûts et rentabilité :

Les rendements des panneaux solaires varient selon de nombreux facteurs, mais en mettant tous les atouts de notre côté, nous verrons à quel point les panneaux solaires peuvent être rentables.

- Influence de l'angle d'incidence.
- Influence de l'orientation.
- Influence de l'angle d'inclinaison.
- Récapitulatif.
- Etude pour des panneaux solaires photovoltaïques.
- Etude pour des panneaux solaires thermiques.

VII. L'installation des panneaux solaires :

Pour installer des **panneaux photovoltaïques**, l'idéal est d'avoir une pente de toit orientée vers le Sud, d'une inclinaison de 30° et surtout qui n'est masquée par aucun obstacle venant faire de l'ombre (arbre, immeuble voisin...). Il suffit de disposer d'une pente de toit dégagée et bien orientée. Pour être sûr de la qualité de l'installation.

Une certaine souplesse est autorisée, bien évidemment. Le mieux est de réaliser d'abord une estimation pour savoir si le toit est adapté à la production d'**électricité solaire**.

L'installateur viendra installer les panneaux sur le toit de la maison. Pour profiter du meilleur tarif de rachat de l'électricité, les panneaux devront être intégrés à la toiture. Les **panneaux solaires** produits aujourd'hui sont tout à fait adaptés à cette utilisation, notamment en termes d'étanchéité. L'installateur posera également l'onduleur et fera le raccordement au réseau, avec un compteur pour mesurer la quantité d'électricité revendue au réseau.

Pour les étapes l'installation : Après avoir calculé le besoin en électricité, il faut choisir la **meilleure orientation** possible pour les panneaux. L'idéal est un **toit orienté** vers le Sud et **incliné à 30°**. Puis, l'emplacement du matériel tracé et la découpe de la tuile effectuée, le panneau solaire s'installe sur la charpente.

Les panneaux solaires seront ensuite reliés à un ou plusieurs onduleurs puis raccordés au réseau électrique. [14]



Figure II.12 : exemple d'un panneau sur le toit d'un habitat

1. Influence de l'angle d'incidence :

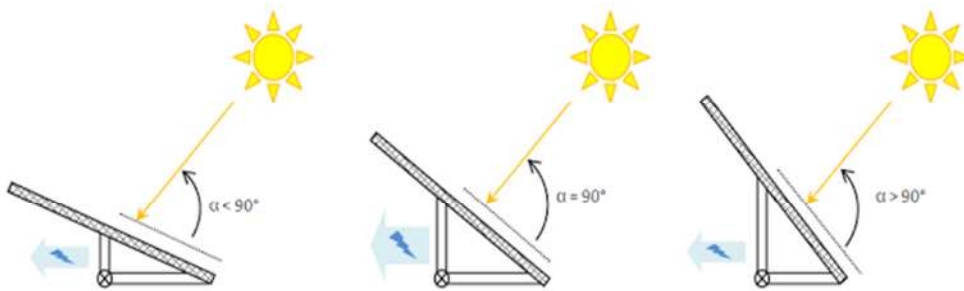


Figure II.13 : Inclinaison de 90° par rapport aux rayons du soleil (au centre) = production optimale

L'angle d'incidence, c'est l'angle formé par les rayons du Soleil et le plan du panneau.

L'angle d'incidence joue un rôle majeur pour les rendements du panneau. Il est défini selon l'équation suivante :

$$R = \sin \beta \times 100$$

avec R le rendement en % et β l'angle d'incidence en $^\circ$.

Ainsi, comme on pouvait s'en douter, le rendement est maximal lorsque les rayons arrivent perpendiculairement au panneau.

$$R = \sin \beta \times 100.$$

$$R = \sin 90^\circ \times 100.$$

$$\mathbf{R = 100 \% .}$$

Alors que pour un angle de 45° par exemple, le rendement n'est que de 70%.

$$R = \sin \beta \times 100.$$

$$R = \sin 45^\circ \times 100.$$

$$R = 70 \text{ \%}.$$

Voici donc le graphique représentatif du rendement en fonction de l'angle d'incidence :

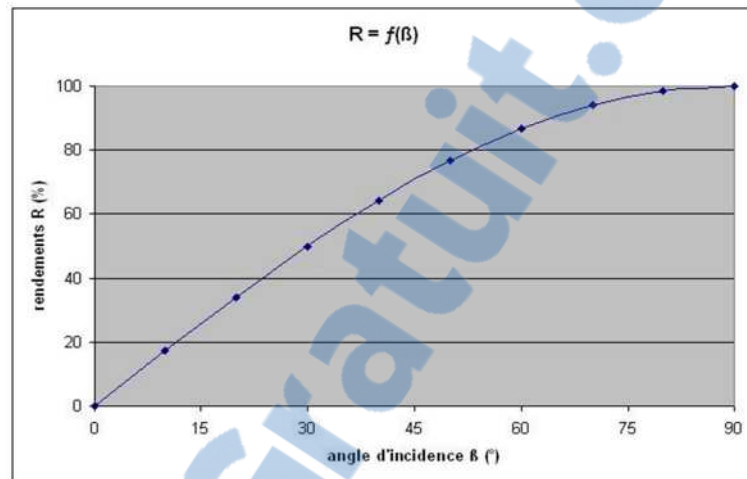


Figure II.14 : Le rendement en fonction l'angle d'incidence

2. Influence de l'orientation :

Globalement, les rayons du Soleil viennent donc plus du Sud que des autres directions; d'autant plus qu'à midi, lorsque le Soleil est au zénith et donc plein Sud, le rayonnement est le plus Intense.

La meilleure orientation pour un panneau solaire est donc vers le Sud.

3. Influence de l'angle d'inclinaison :

L'angle d'inclinaison est l'angle formé par le plan du sol et le plan du panneau.



Figure II.15 : L'angle d'inclinaison

Le panneau se retrouvant donc perpendiculaire aux rayons du Soleil. Cependant, selon les saisons, l'inclinaison de la Terre varie. Pour garder une production d'énergie du panneau la plus régulière possible tout au long de l'année, on va garder l'angle de 45° Sud.

Le panneau sera donc incliné comme ci-dessous au cours de l'année.

On ne choisit cependant pas l'inclinaison de son toit : Si le panneau est incliné d'un angle de moins de 45°, la production d'énergie sera importante en été mais faible en hiver. Inversement, si le panneau est incliné d'un angle de plus de 45°, la production d'énergie sera importante en hiver mais faible en été. [14]

4. Rendement des panneaux solaires :

Le taux de rendement photovoltaïque des panneaux solaires photovoltaïques indique le rapport entre la puissance produite et la puissance du rayonnement capté. Il est exprimé en pourcentage.

Le rendement des panneaux solaires photovoltaïques peut varier en fonction de technologies utilisées, mais il est généralement compris entre 6 à 20 %. Le rendement photovoltaïque d'une installation de panneaux solaires dépend de plusieurs facteurs:

- La puissance de l'installation photovoltaïque, calculée en kilowatt/crête (kWc), elle est égale au produit de la surface par le facteur de puissance. Exemple pour des panneaux solaires composé de cellule poly-cristallines et d'une surface de 15 m² : $15 \times 0,115 = 1,72$ kWc.
- La surface des panneaux solaires photovoltaïques.
- L'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires, ils doivent être orienté plein sud et incliné de 30° par rapport à l'horizontal.
- La situation géographique ou plus précisément la latitude. En fonction de la géo localisation de votre habitation, l'ensoleillement varie et par conséquent la production annuelle d'électricité varie également.
- Enfin il faut faire attention à l'architecture de la maison, la présence d'ombres qui pourraient gêner la réception des rayons solaires par le panneau photovoltaïque (bâtiments voisins, arbres, poteau etc.).

Pour finir il faut noter que si votre installation vise à l'autonomie électrique, le panneau solaire doit être orienté de manière à obtenir un rendement constant, été comme hiver, quelle que soit la course du soleil. [14]

VIII. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donnée une description générale sur les panneaux solaires qui sont une solution pour les endroits isolés, non raccordés au réseau électrique et pour rendre des installations autonomes. L'énergie solaire peut également s'avérer très avantageuse dans le cas d'installation chez des particuliers.

Cependant, les panneaux solaires ne sont actuellement pas rentables pour une production à grande échelle, à cause de nombreuses limites et des autres sources d'énergie plus avantageuse telle que le nucléaire.

Les panneaux solaires sont donc parfaits pour compléter les besoins énergétiques mais toute l'énergie ne peut être produite entièrement par leur utilisation.

Chapitre III : Dimensionnement d'un système photovoltaïque

I. Introduction :

Par estimation près de deux milliards de personnes n'ont toujours pas accès à l'électricité. En effet, si dans la plupart des pays en voie de développement que les réseaux électriques existent, ils concernent souvent les grands centres urbains.

Les zones rurales sont donc souvent exclues, entravant ainsi leur développement, l'expansion industrielle, ainsi que l'augmentation de la population ont entraîné un développement important de la demande de l'énergie. Pour la satisfaire, à long terme, l'utilisation des sources d'énergie d'origine fossile conduira d'une part à une surexploitation de ces ressources et à une dégradation de l'environnement d'autre part.

L'utilisation de source d'énergie non nuisible à l'environnement, comme les énergies renouvelables est nécessaire afin d'assurer une relève énergétique.

L'électrification par voie photovoltaïque nécessite un raccordement de dispositifs capables de convertir l'énergie solaire en énergie électrique exploitable à des fins d'alimentation.

Et pour la réalisation d'une installation photovoltaïque, le dimensionnement reste une étape indispensable.

Dimensionner un système PV c'est déterminer en fonction de sollicitations telles que l'ensoleillement et le profil de charge, l'ensemble des éléments de la chaîne PV, à savoir, la taille du générateur, la capacité de stockage, le cas échéant la puissance d'un convertisseur, voire l'inclinaison des modules et la tension d'utilisation.

Une installation surdimensionnée veut dire des surcoûts, tandis qu'une installation sous dimensionnée veut dire manque de fiabilité.

Quelque soit la méthodologie utilisée et la précision avec laquelle sont pris en compte les différents composants de la chaîne, on reste confronter à deux types d'estimations :

- La première sur la demande qui dans la plupart des cas est assez grossièrement définie car souvent mal connue et qui subit des fluctuations journalières, hebdomadaires ou saisonnières.

- La seconde sur le gisement solaire au sujet duquel on se heurte à un manque crucial de données représentatives. Ce problème nous amène à calculer l'irradiation selon des données relatives au site de l'installation.

Ceci démontre que la fiabilité d'une installation PV est étroitement liée au dimensionnement qui est lié à son tour à la disponibilité de données fiables. Le mérite d'une installation PV est souvent mesuré par sa capacité à fournir de l'énergie en toute circonstance.

II. Différents types de systèmes photovoltaïques :

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes **autonomes**, les systèmes **hybrides** et les systèmes **connectés à un réseau**. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

1. Les systèmes autonomes :

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau.

Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes ont les possibilités de couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.

Le couplage direct implique un fonctionnement au fil du soleil, donc à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Les charges typiques à courant continu qui peuvent satisfaire le critère (tension constante à puissance variable) sont les accumulateurs électrochimiques. Les charges alternatives sont les pompes à eau, c'est le pompage au fil du soleil, le stockage est néanmoins présent sous la forme d'eau emmagasinée (dans un réservoir).

Dans la plus part des cas une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale. [16]



Figure III.1 : système autonome

2. Les systèmes hybrides :

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue.

Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif.

Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC).

Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence.

La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative.

3. Système connecté au réseau :

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectée à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution.

Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau. [16]

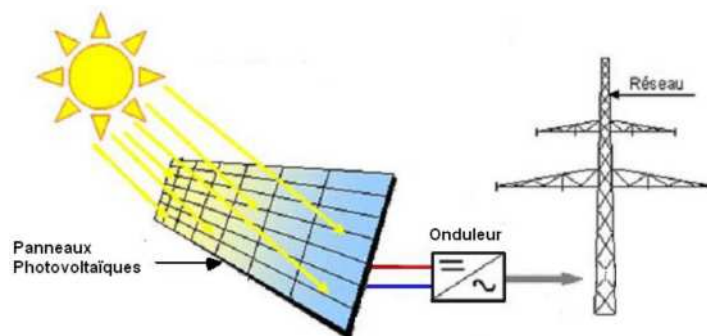


Figure III.2 : Systèmes photovoltaïque connectés au réseau

III. Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque :

Les générateurs transforment directement l'énergie solaire en électricité (courant continu). La puissance est exprimée en Watt-crête (Wc), unité qui définit la puissance électrique disponible aux bornes du générateur dans les conditions d'ensoleillement optimales.

Un ou plusieurs onduleurs convertissent le courant continu produit en courant alternatif à 50Hz et 220 V. Selon le choix retenu, toute ou une partie de la production est injectée sur le réseau public, et le reste est consommé par le producteur. Lorsque la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'électricité nécessaire. [16]

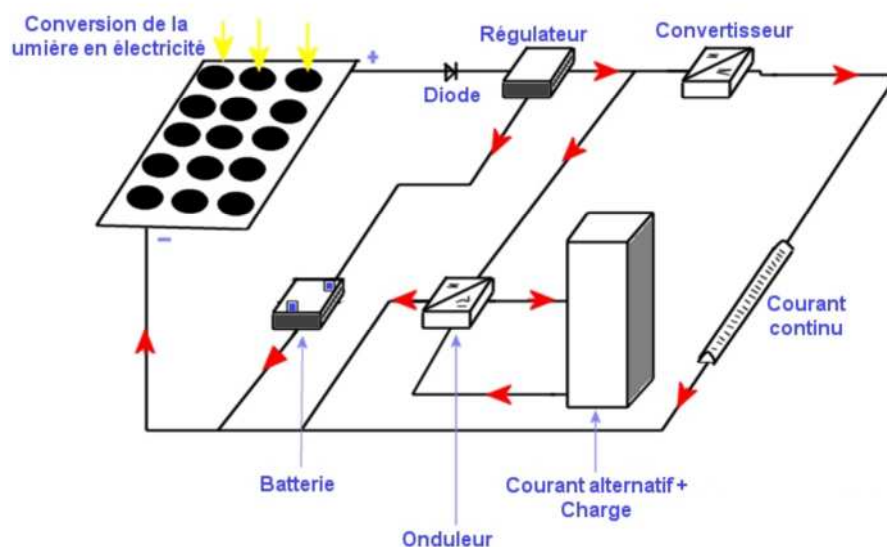


Figure III.3 : schéma explicatif du fonctionnement

1. Dimensionnement des systèmes photovoltaïques :

1.1 Critère de dimensionnement :

Les deux critères importants du dimensionnement optimal sont :

- La satisfaction d'une condition sur le comportement énergétique du système en termes d'autonomie ou de déficit autorisé, en effet l'utilisateur a la possibilité de définir au départ l'autonomie du système ou la satisfaction d'un certain taux de couverture pour la période la plus défavorable.

- L'équilibre du couple générateur/stockage.

Ces deux critères cités précédemment ont le principal avantage de traduire ce que les utilisateurs pensent des systèmes photovoltaïques.

1.2 Principe de dimensionnement d'une installation photovoltaïque :

L'efficacité de toute installation électrique dépend fondamentalement de la rigueur de son dimensionnement et de son utilisation car il influe directement sur le coût et les performances d'une installation.

Le dimensionnement a pour but de déterminer la puissance du générateur photovoltaïque et la capacité de la batterie, à partir des données d'ensoleillement du site d'une part et des besoins électriques de l'utilisateur d'autre part. [16]

1.3 Les étapes du dimensionnement :

Les étapes suivantes permettent de dimensionner un système photovoltaïque :

- Estimation des besoins journaliers en électricité E_j (en Wh/j).
- Estimation de l'irradiation journalière.
- Choix d'une inclinaison optimale en fonction du gisement local.
- Estimation de la capacité de stockage requise en fonction de l'autonomie désirée.

1.4 Présentation des paramètres d'entrée intervenants dans le dimensionnement :

D'une manière générale, les paramètres à prendre en compte pour concevoir et dimensionner un système photovoltaïque sont assez nombreux et concernent :

- Le lieu où sera placé le générateur PV.
- Le système PV (modules, régulateur, convertisseur et batteries).
- La charge.

1.4.1 Paramètres relatifs au système Photovoltaïque :

Les paramètres concernant le système donnent à titre indicatif un ordre de grandeur du rendement de l'installation, sont relatifs aux modules photovoltaïques, éléments de batterie, régulateur et convertisseur existants dans le marché.

Ces paramètres basés sur un critère liant d'un côté la satisfaction des besoins et le fonctionnement optimal du système et de l'autre la disponibilité. [17]

1.4.2 Paramètres relatifs au site d'installation :

Le dimensionnement du générateur PV est dicté par les conditions relatives au site. Pour adopter les capacités générateur PV / batterie, aux conditions de charge, il est indispensable de connaître les caractéristiques de l'irradiation solaire par jour ou par mois, soit l'énergie moyenne reçue sur un plan donné, à l'endroit même où sera situé le générateur PV.

Les données doivent être connues pour chaque mois de l'année. Elles peuvent être obtenues par des organismes nationaux de météorologie ou par des calculs (outil informatique), qui exigent les paramètres d'entrées suivants :

- Latitude.
- Altitude.

- Réflectivité du sol ou albédo.
- Irradiation moyenne journalière la plus défavorable dans l'année, soit mesurée ou calculée.

1.4.3 Paramètres concernant le module PV :

Les paramètres concernant le module PV sont :

- Tension maximale.
- Courant maximal.
- Puissance maximale.

Les paramètres aux conditions standards (1000 W, 25 °C) sont donnés par le constructeur.

- L'inclinaison des modules, est un paramètre qui est relatif à la latitude du lieu. Pour notre cas on précisera l'inclinaison minimale et maximale comme données d'entrée, afin d'optimiser cette inclinaison. [17]

1.4.4 Paramètres concernant les batteries de stockage :

Les paramètres relatifs au système de stockage sont donnés selon la disponibilité des batteries à capacité normalisée :

- Profondeur de décharge selon le constructeur.
- Rendement énergétique de la batterie.

Le dimensionnement du stockage est basé sur les paramètres d'un accumulateur au plomb acide. [17]

1.4.5 Paramètres concernant le régulateur de charge :

Les paramètres sont, la tension selon la puissance de la charge (voir chapitre 3) et le rendement donné par le constructeur.

1.4.6 Paramètres concernant le convertisseur :

Pour le convertisseur continu/alternatif on précisera le rendement seulement, qui est aussi donné par le constructeur.

1.4.7 Paramètres concernant la charge :

Notre utilisation est l'électrification d'un village par l'énergie solaire photovoltaïque, les paramètres concernant la charge sont :

- Type d'alimentation continue ou alternative.
- Puissance de la charge.
- Durée de fonctionnement moyenne par jour.

1.5 Le stockage de l'énergie électrique :

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Il y a nécessité de stockage chaque fois

que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire. En effet :

- La demande énergétique est fonction de la charge à alimenter, les appareils utilisés fonctionnent soit en continu, soit à la demande.
- L'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, été/hiver) et aléatoire (conditions météorologiques).

Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un stockage d'énergie. Les différents moyens actuellement utilisables sont : les batteries, les piles à combustibles, les super-condensateurs, les volants d'inertie...

Le système de stockage le plus couramment utilisé dans les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques. [17]

1.6 Les batteries dans les systèmes photovoltaïques :

Les systèmes photovoltaïques exigent habituellement des batteries qui peuvent être chargées pendant le jour et déchargées durant la nuit. Ces batteries doivent fonctionner ainsi pendant des années sans marquer plus qu'une détérioration minimale de leurs rendements, tout en satisfaisant la demande, les jours où il n'y a que peu ou pas de soleil. Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes:

- **Autonomie** : nombre de jours pendant lesquels la batterie doit fournir la puissance requise sans être rechargée ni subir de dommage.
- **Courant de surcharge** : une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelque instant, c'est à dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV.
- **Stabilisation de la tension** : une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

Les propriétés électriques suivantes sont généralement employées pour caractériser :

Une batterie.

Sa capacité.

Sa tension.

La charge et le courant maximum qu'elle peut supporter.

La conservation de la charge (donc sans autodécharge).

Sa durée de vie, en nombre de cycles ou en années.

a. Capacité de batterie :

La capacité d'une batterie représente la quantité de courant qui peut être extraite d'une électrode via l'électrolyte et matériaux actifs des électrodes sur une charge. Elle est exprimée en Ampère heure (1Ah=3600 Coulomb) ou en Wattheure Wh (1Wh = 3600 J).

La capacité de batterie dépend de plusieurs facteurs. Elle est déterminée sous des conditions de décharge fixées, habituellement à courant constant ($C=I.t$) avec t : le temps de décharge au bout de laquelle la tension atteint une certaine valeur prédéfinie.

En pratique, cette capacité dépend du courant, du temps de décharge ainsi que de la température. Par exemple, la capacité qui est extraite en 5 heures jusqu'à atteindre la tension minimale acceptée est appelée capacité 5 heures ou $C5$ en abrégé. Le courant de décharge correspondant est appelé courant $I5$.

b. Tension de batterie :

La figure (III.4) reprend l'évolution de la tension durant la charge d'une cellule de batterie plomb-acide. La charge théorique d'une batterie au plomb s'effectue donc en trois phases.

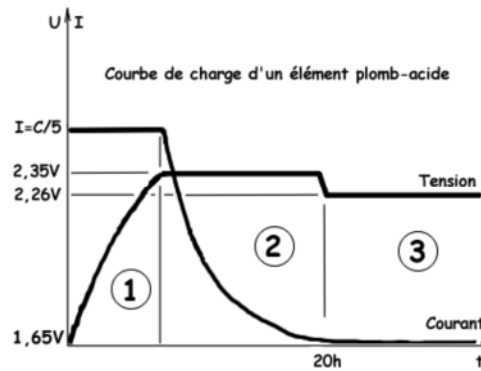


Figure III.4: Evolution de la tension et du courant avec le temps durant la charge d'un élément plomb-acide.

c. La recharge de batterie:

La recharge appropriée d'une batterie (dans le cas de batterie plomb-acide) devient prépondérante pour obtenir une durée de vie et des performances optimales quelque en soit les conditions d'utilisation de cette batterie. De plus, il existe des exigences techniques telles que la fiabilité et la longévité. Plusieurs méthodes de charge existent, nous pouvons citer : charge à courant constant, charge à tension constante, et charge rapide.

d. L'auto décharge :

Même lorsque la batterie ne débite pas, sa capacité a tendance à diminuer lentement. Cet effet est connu sous le nom d'auto décharge. Celle-ci peut résulter de plusieurs causes [Del 98]. En premier lieu, la densité d'acide diminue au cours du temps pour des batteries non hermétiques. Elle est principalement due à la présence de petites impuretés métalliques sur les électrodes, conduisant à la formation de micro piles et la génération d'un faible courant interne.

e. La durée de vie de la batterie :

La durée de vie d'une batterie solaire s'évalue en nombre de cycles de charge/décharge qu'elle est capable de supporter. La durée de vie moyenne des batteries de tous types a

considérablement augmentée lors des deux dernières décennies grâce à l'utilisation de nouvelles technologies de fabrication et à l'emploi de nouveaux matériaux : utilisation du polypropylène pour les enveloppes externes, meilleure étanchéité de l'enceinte, alliages plus résistants à la corrosion, meilleure gestion de la batterie et bien d'autres encore.

Parmi les technologies des batteries on trouve les batteries : Plomb-acide, nickel-cadmium (Ni-Cd), Lithium-ion, Nickel-hydrure métallique ou Ni-MH, Nickel-Zinc...

La batterie au plomb acide se distingue des autres types de batteries et cela pour les avantages suivant :

Un bon rendement.

Un Meilleur compromis en terme de coût / performance / entretien.

Sa durée de vie.

Caractéristique électrochimique favorable.

Une large disponibilité.

Entretien faible ou nul.

Bonne tenue aux températures extrêmes.

Un faible cout.

f. Modèle électrique de la batterie :

Comme la batterie joue un rôle important en termes de stockage dans les installations photovoltaïques, elle devrait avoir un bon modèle, représentant son comportement réel. Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment.

Modèle idéal de la batterie :



Figure III.5 : Modèle idéal batterie

Dans ce modèle la batterie est représentée par une simple source de tension comme un circuit équivalent et les paramètres internes sont ignorés.

- **Influence de la température sur la capacité de batterie :**

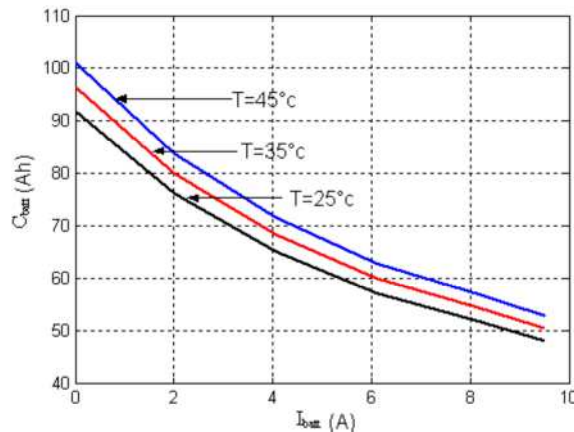


Figure III.6 : Influence de la température sur la capacité.

La capacité augmente avec la température de l'élément. Ce fait s'explique d'une part, par l'augmentation du coefficient de diffusion des solutions d'acide sulfurique, d'autre part par la baisse de la résistivité de l'électrolyte pour les concentrations généralement employées. Inversement, en basse température, la capacité disponible est nettement moins importante.

- **Influence de la température sur l'état de charge et de décharge de la batterie:**

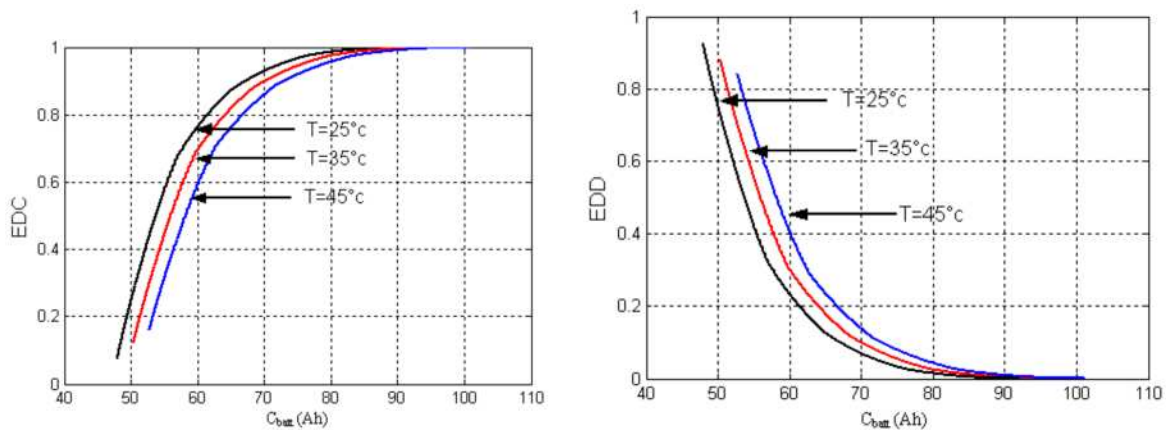


Figure III.7 : Influence de la température sur l'état de charge et de décharge

2. Dimensionnement et simulation d'une station autonome (habitat) :

2.1. Rayonnement solaire en Algérie :

On peut avancer qu'il ya peu de pays qui reçoivent autant de flux d'énergie solaire que l'Algérie car elle est située entre les latitudes 20 et 37 degré nord paradant du principe que latitude et climat sont liées a l'ensoleillement.

La figure au-dessous représente Irradiation globale reçue sur surface horizontale dans la période 1992-2002.

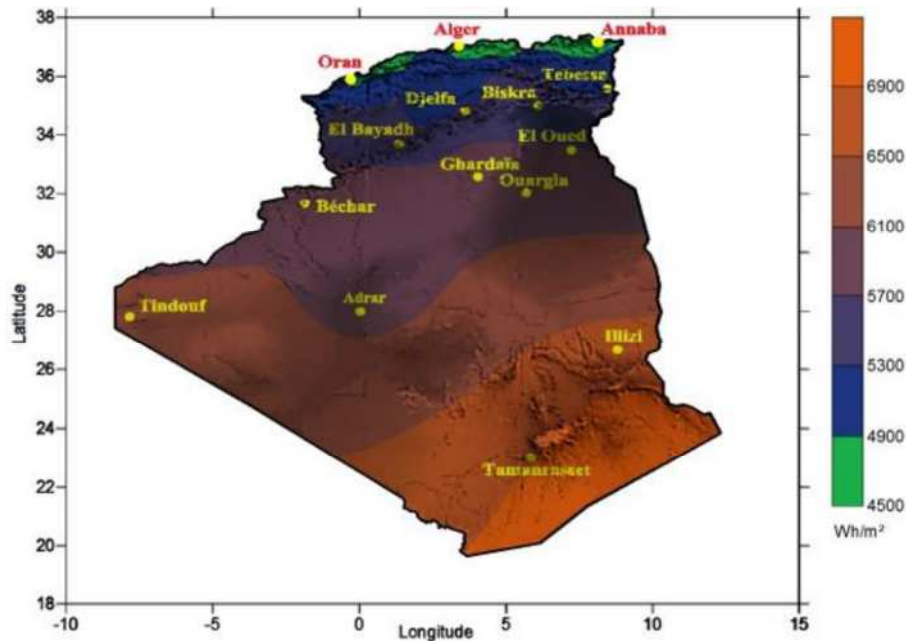


Figure III.8: Irradiation globale reçue sur surface horizontale.

2.2 Durée d'insolation moyenne :

L'insolation est par définition : l'exposition à la lumière solaire, on définit le pourcentage d'insolation comme étant le rapport du nombre heures sur la durée astronomique du jour.

Les valeurs d'insolations mensuelles moyennes sont calculées durant 2013, pour la région de TLEMCEM sont représentées sur la figure, nous avons pris les durées d'insolations par l'office national de météorologie du mandat d'Algérie.

La durée d'insolation maximale S_0 est calculée par l'expression suivante :

$$S_0 = 2/15 \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \Phi$$

: La latitude de lieu, δ : La déclinaison.

D'après la figure III.9 suivante:

La durée d'insolation varie entre 8h/jour et 9h/jour dans la période janvier à mi-mars, et après la mi-mars jusqu'à mi-juillet la durée d'insolation augmente avec le passage du mois, où jusqu'à un pic à la mi-juillet 11.68h, d'après cette période jusqu'à la fin d'année la durée d'insolation diminue jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur la plus basse 6.37h. [16]

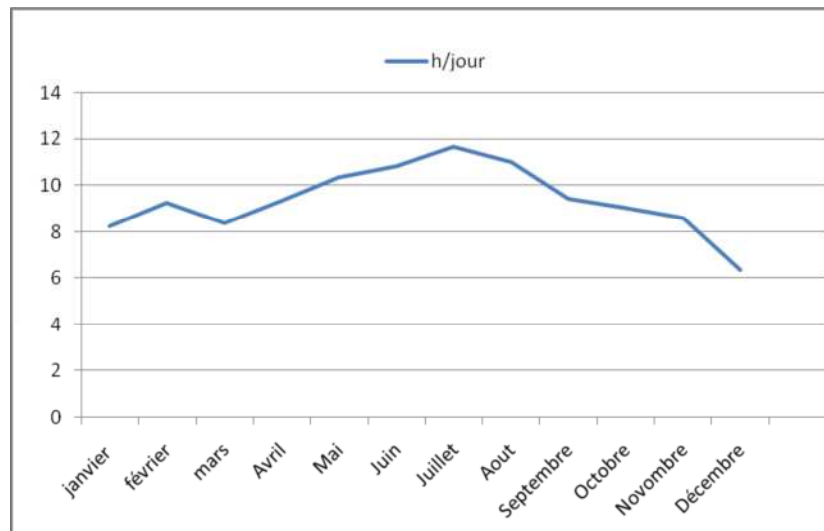


Figure III.9: Durée d'insolation moyenne.

2.3 Température moyenne mensuelle :

La connaissance de la température est décisive pour choix du système photovoltaïque, les valeurs mensuelles moyennes de la température, pour la ville de TLEMCEN calculées durant 2013, sont représentées sur la figure, nous avons pris les températures par l'office national de météorologie du mandat d'Algérie.

La température annuelle moyenne est 28.09°C

Le mois de janvier est plus froid avec une température moyenne minimale de 1.2°C .

Le mois de juillet étant plus chaud avec une température moyenne maximale de 47°C .

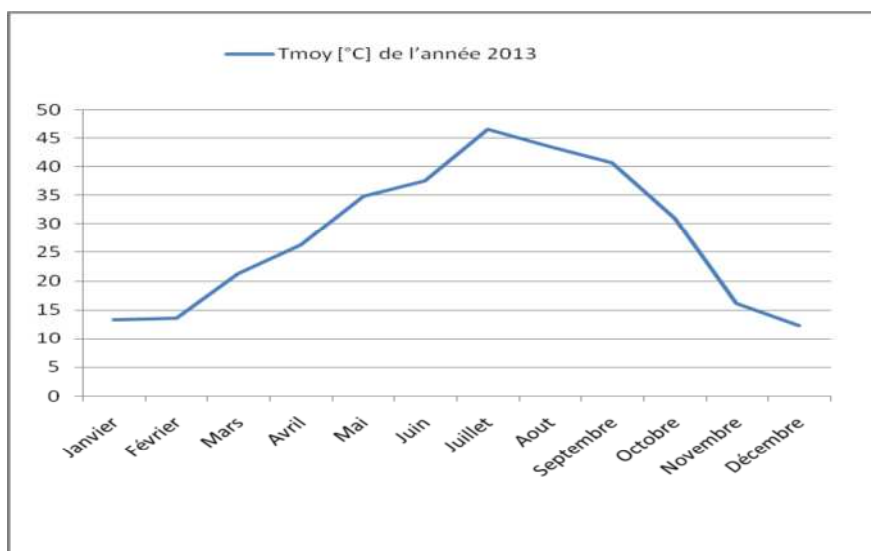


Figure III.10 : température moyenne mensuelle.

D'après la Figure : on observe la température moyenne mensuelle dans la période janvier et la fin de février presque constante, et après cette période la température augmente progressivement atteindre à une valeur maximum 47°C dans la mi-juillet, et dans la période mi-juillet jusqu'à la fin d'année la température diminue progressivement atteindre à une valeur minimale 1.2°C.

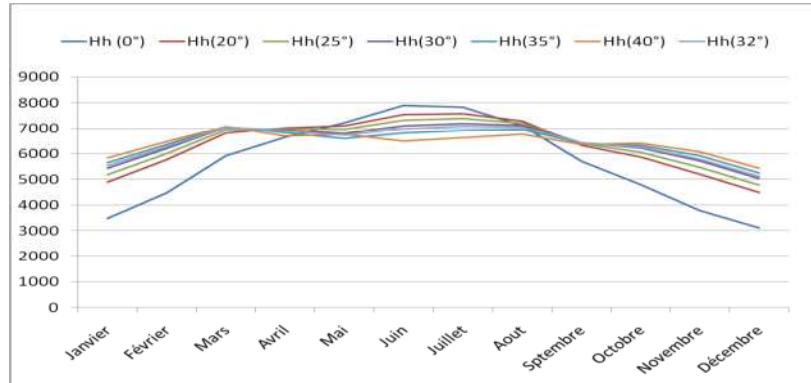


Figure III.11 : Irradiation globale journalière de la ville de Tlemcen.

D'après la figure III-11 on observe dans la période (janvier-avril) chaque fois l'angle d'inclinaison augmente les irradiations solaire augmentent, et dans les mois de la fin d'avril jusqu'à septembre chaque fois l'angle d'inclinaison diminue les irradiations augmentent et dans les mois octobre jusqu'à décembre les irradiations diminuent avec l'angle d'inclinaison augmente.

2.4 Présentation de l'habitat a étudié :

On a pris l'exemple d'un habitat située dans la ville de TLEMCCEN en Algérie.

2.5 Description de la maison :

Nombre de personnes : 4 personnes.la mère, le père et 2 enfants.

Nombre de pièce : cette maison est constituée de 4 chambres, un salon, une cuisine, une salle de bain, un couloir et une cour.

2.6 Analyse de la consommation électrique de l'habitat :

2.6.1 Consommation domestique :

La consommation électrique d'un ménage varie au cours du temps. Certains appareils électriques sont branchés en permanence (réfrigérateur, congélateur, etc.) ; d'autres sont utilisés à différents moments de la journée.

Pour définir la consommation d'un ménage en vue du dimensionnement d'un système photovoltaïque, trois questions sont importantes

1. Quelle est la puissance maximale utilisée ? (Combien d'appareils sont utilisés en même temps ?).

2. Quelle est la quantité totale d'énergie utilisée pendant un an ? (en KWh).

3. A quels moments de la journée, l'énergie est-elle utilisée ?

2.6.2 Différents profils de consommation :

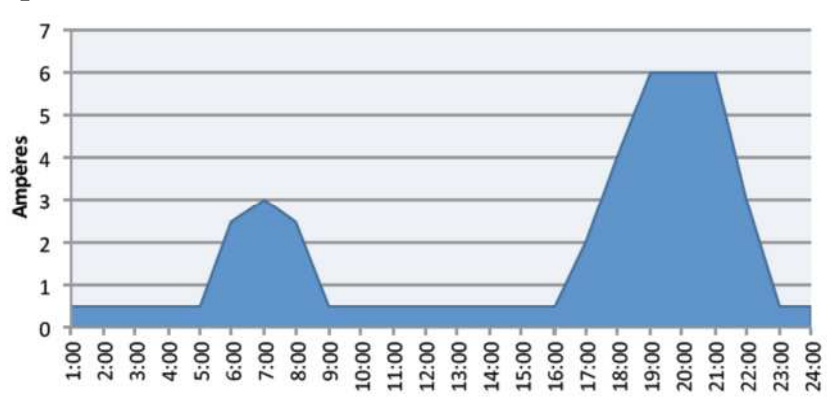


Figure III.12 : Consommation d'une journée en début de semaine.

On a résumé les besoins électriques de la maison dans le tableau suivant vu l'équipement utilisé dans chaque pièce de la maison :

La pièce	L'équipement électrique
Salon	-TV -lampe -climatiseur
Chambre d'enfant	-01Lampe
Chambre des pères	chauffage électrique -lampe -veilleuse -sèche cheveux
Cuisine	-lampe -frigo -four -cafetière
Couloire	-Une lampe
Salle de bain	-2lampe et lampe néon -machine a laver
Cour	-Une lampe

Tableau III.1 : La pièce et L'équipement électrique dans la maison.

2.6.3 Estimation des besoins d'électricité (Wh/j) :

La consommation électrique journalière (ou besoin journalier (B_j) en (Wh/j)) est donnée par le produit de la puissance nominale de la charge (W) et du nombre d'heure d'utilisation journalière (h/j).

- **Puissance et les horaires d'utilisation des différents équipements électriques utilisés :**

Equipement	Puissance (w)	Horaires
Télévision	95	3h/J
Climatiseur	1500	3h/J
Grand frigo	250	5h/J
Petit Frigo	110	5h/J
6 lampes de 75 lampes	75	3h/J
Radio	55	2h/J
Machine à laver	450	1h/J
Chauffage électrique	2000	2h/J
Four	650	2h/J
3 lampes néon	40	3h/J
1 lampe néon	18	3h/J

Tableau III.2 : Puissance et horaire d'utilisation.

3. Travail théorique :

3.1 La puissance crête du système PV :

$$P_{Crête} = E_j(W_j) / [H_{min}(kWh/m^2) \cdot h_{batt} \cdot h_{elec}].$$

H_{min} : l'irradiation journalière (en Wh/m²).

H_{batte} : rendement énergétique des batteries.

H_{onde} : rendement énergétique de l'onduleur (si besoin en alternatives).

H_{elec} : rendement énergétique des autres composants électroniques.

E_j : besoins journaliers en électricité.

3.2 Calcul de la puissance crête :

L'éclairage : 40W-3h/j.

L'éclairage : 18W-2h/j.

L'éclairage : 13W-2h/j.

Radio : 10W-3h/j.

Téléviseur : 60W-3h/j.

Tension d'alimentation : 230V-50HZ.

Rendement onduleur=0.

Rendement batterie=0.7.

Nombre de jour d'autonomie=8jours.

Irradiation décembre : 4Kwh/m²/j.

$$P \text{ crêtes} = 392 / (4 * 0.7 * 0.8).$$

Pc=175W

3.3 Calcul de la capacité batterie :

$$C \text{ (A.h)} = E_j \cdot N_j / (0.8 * V * \text{hond}).$$

Si la tension de la batterie=24V.

$$C = 326 * 8 / (0.8 * V * 0.8).$$

C=170Ah

4. Simulation :

4.1 Description de logiciel PV SOL :

PV*SOL nous propose plusieurs façons d'exploiter les résultats de la simulation, c'est un logiciel pratique qui permet de planifier et de concevoir des systèmes photovoltaïques, de réaliser des simulations dynamiques et d'analyser le rendement des systèmes.

PV*SOL comprend aussi l'outil 3D dédié à la visualisation et à l'analyse de l'ombrage des systèmes connectés en réseau avec montage des modules en parallèles ou intégrés au toit.

PV*SOL incluent les caractéristiques suivantes :

- Implantation automatique et manuelle des modules.
- 8000 stations météorologiques complétées par une base de données en ligne.
- Grande bibliothèque comprenant plus de 13000 modules et 3100 onduleurs.
- Calcul graphique du nombre de modules sur un toit.

-Synthèse des résultats dans un rapport simplifié et un rapport détaillé avec visualisation du toit et calcul du rendement.

- Le Schéma donné par PVSOL après avoir entré les besoins énergétiques de l'habitat :

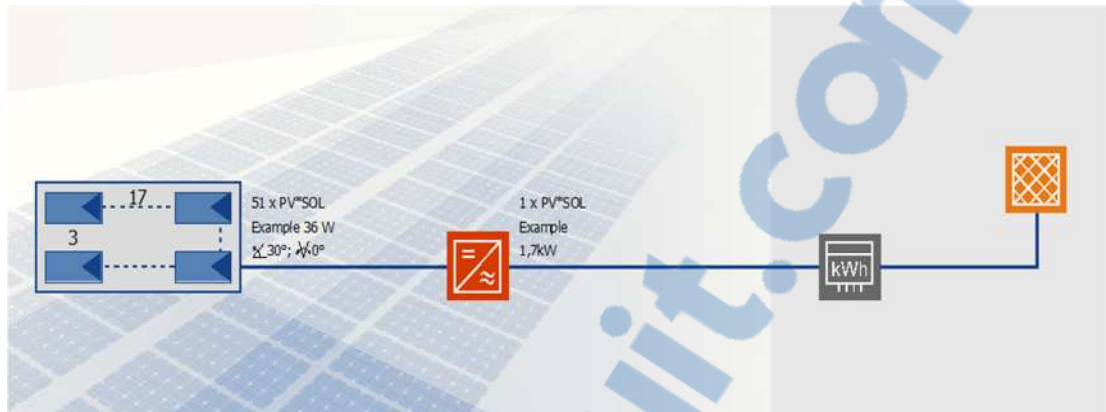


Figure III.13 : Schéma PVSOL.

4.2 Résultats de la simulation :

On prend l'exemple de l'habitat et on l'applique au logiciel PV sol pour faire la simulation et obtenir les différentes courbes à propos de notre étude et d'analyser le rapport de projet contenant le rendement spécifique annuel et le rendement du système.

5.2.1 Les courbes obtenues par la simulation :

- Courbe de la variation de température :

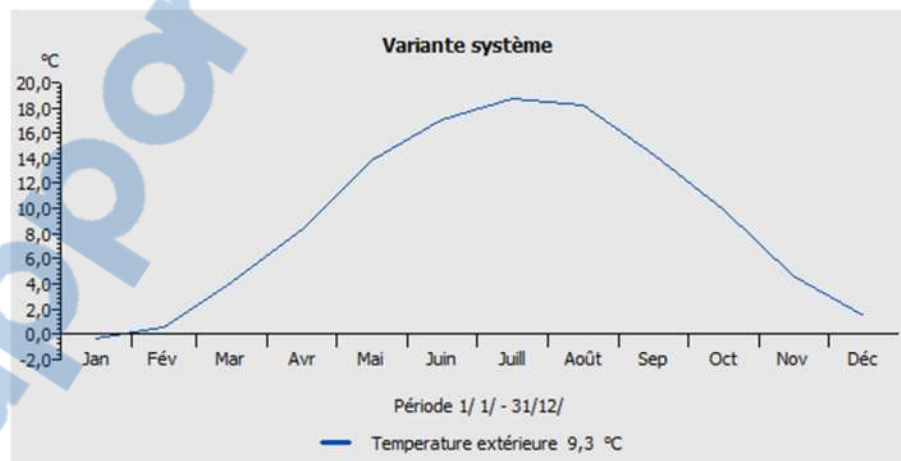


Figure III.14 : variation de température.

Commentaire :

D'après la courbe de la variation de température donnée par la simulation avec le logiciel PVSOL nous distinguons que la température est maximal au mois de juillet et minimal au mois de janvier.

- Courbe de La variation de la vitesse du vend :

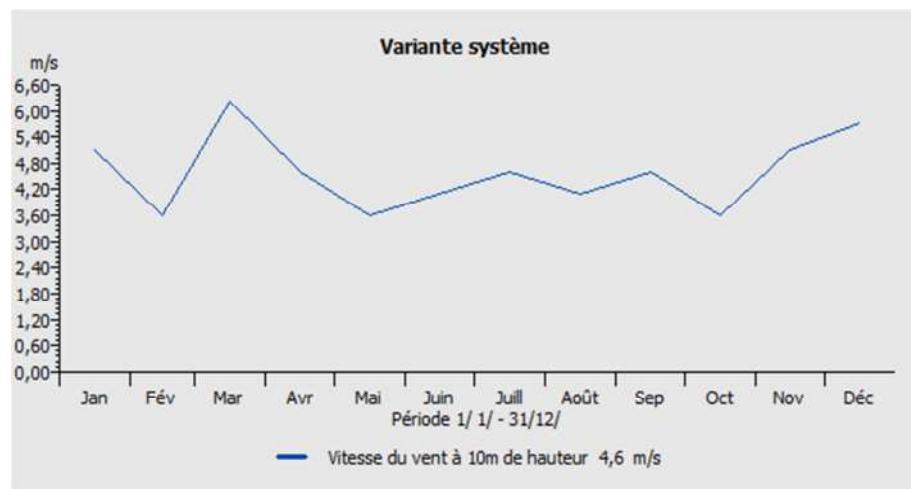


Figure III.15 : La variation de la vitesse du vend.

Commentaire :

D'après la courbe de la variation de la vitesse du vent donnée par la simulation avec le logiciel PVSOL nous distinguons que cette variation est acceptable et elle ne pose aucune influence au système.

- Courbe de l'irradiation spécifique sur l'horizontal :

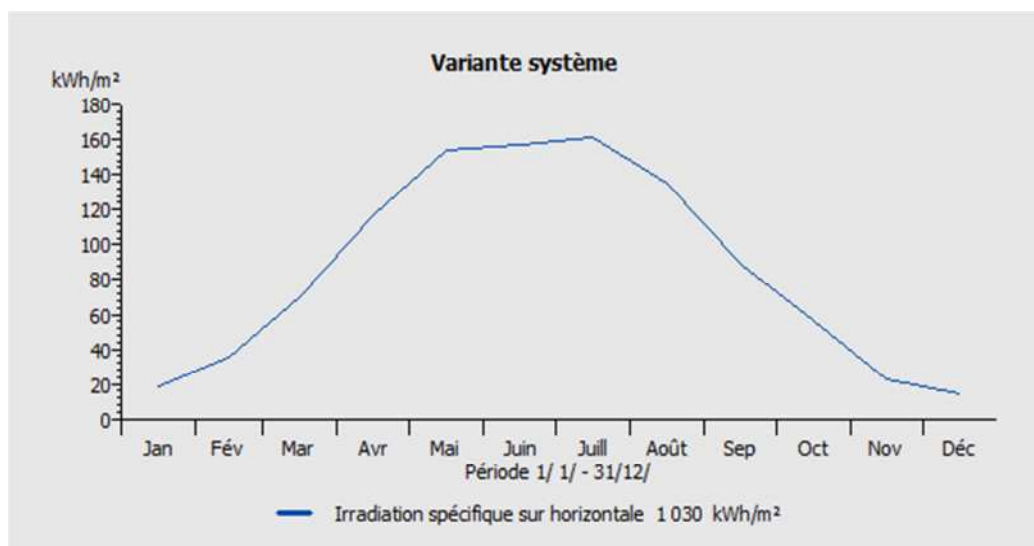


Figure III.16 : Irradiation spécifique sur l'horizontal.

Commentaire :

D'après la courbe de l'irradiation spécifique sur l'horizontal donnée par la simulation avec le logiciel PVSOL nous distinguons qu'elle varie proportionnellement avec la température.

- Rendement du système en fonction de la consommation individuelle :

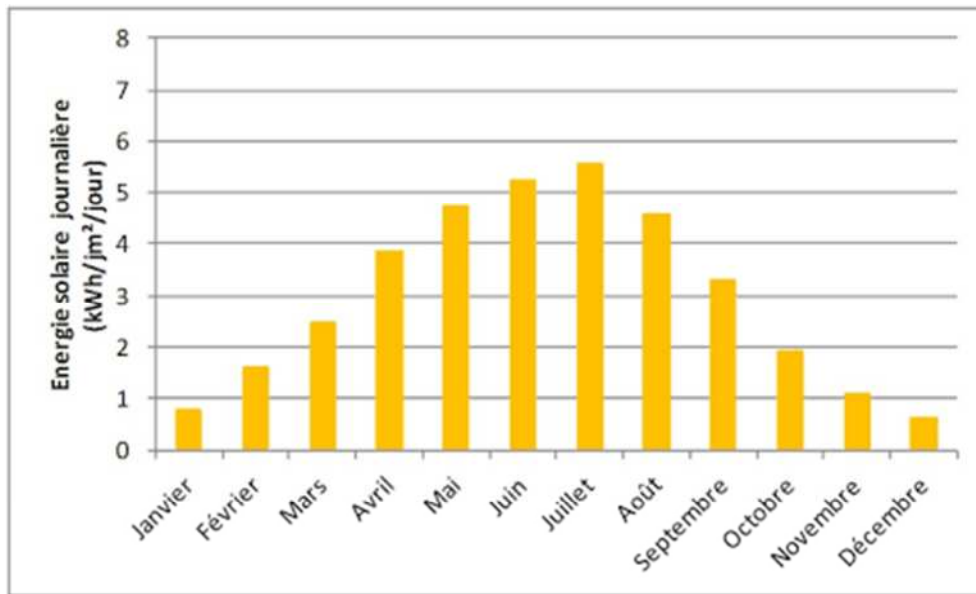


Figure III.17 : Rendement avec consommation.

- Cout et rentabilité :

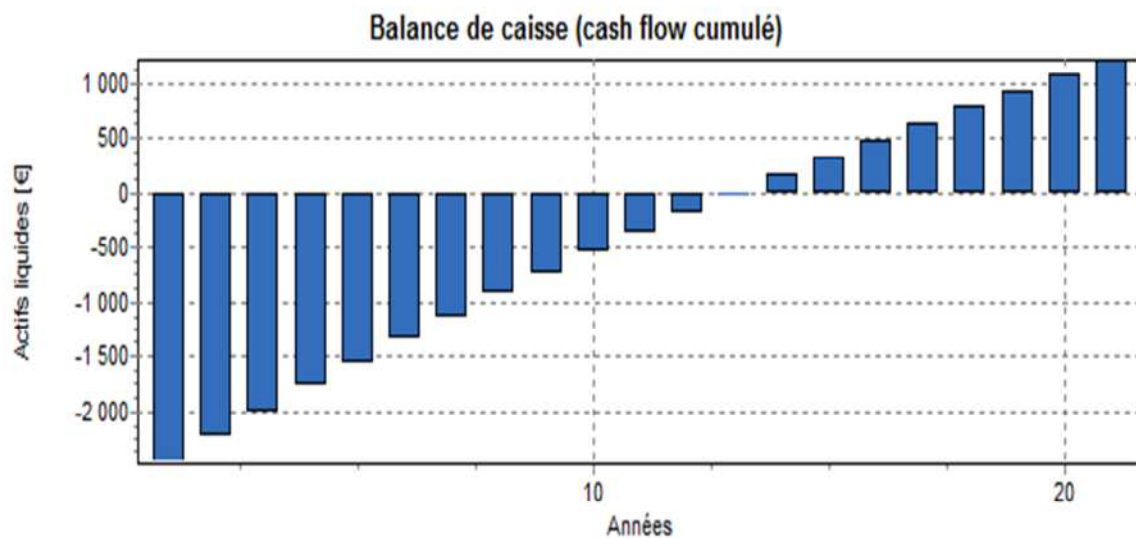


Figure III.18 : Cout et rentabilité.

VI Conclusion :

Dans ce chapitre le but c'était de dimensionner un système photovoltaïque autonome et faire la simulation avec un logiciel bien défini qui est PVSOL ; nous avons cité les différents types de systèmes PV, le principe de fonctionnement d'une installation PV, nous avons établi un cahier de charge contenant les équipements énergétiques, leurs puissance de l'habitat à étudier ainsi les différents profils de consommation pendant les jours de la semaine.

Nous avons fini notre travail par la simulation avec PVSOL qui nous a bien défini les courbes de variation de température, l'irradiation, vitesse du vent, le rendement, cout et rentabilité.

Conclusion général

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles de l'énergie renouvelable, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque présente donc un intérêt particulier pour les pays en voie de développement : elle est susceptible d'améliorer très rapidement et moyennant un coût optimal les conditions de vie et de productivité des habitations géographiquement dispersées.

Notre travail a été mené de la façon suivante :

Dans le premier chapitre on a exposé des généralités concernant les cellules photovoltaïques conventionnelles, leur principe de fonctionnement, les différents types et technologies, et les facteurs limitant leurs rendements, l'influence de la couche anti reflet ce dernier dégrade progressivement avec les Pertes optiques, résistives.

Dans le deuxième chapitre on a donné des notions générales sur les panneaux solaires, leur domaine d'utilisation, leur fonctionnement, leur installation, ainsi l'influence de l'angle d'incidence et d'inclinaison.

Dans le troisième chapitre nous avons appliqué notre but de cette étude est de dimensionner un système photovoltaïque autonome ; nous avons bien défini le principe de fonctionnement de cette installation ainsi les étapes de dimensionnement du système en établissant un cahier de charge contenant les besoins énergétique de l'habitat ainsi les profils de la consommation électrique. Ces étapes nous ont permis de calculer la puissance crête et la capacité de stockage. Ensuite nous avons fait appel à la simulation avec un logiciel PVSOL pour bien obtenir les différentes courbes à propos de notre étude et d'analyser le rapport de projet contenant le rendement spécifique annuel et le rendement du système.

D'une manière générale, cette étude a apporté les éléments nécessaires pour la mise en place du dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome.



**Recherches
bibliographiques**

- [1] **Jean jacques, Beziane** (18 Nov.2012) – L'énergie solaire.
- [2] **Alain Cheron** – Le rayonnement solaire dans l'environnement terrestre, 2014
- [3] **Anne LABOURET et Michel Villosz** – Energie solaire photovoltaïque, 4^e édition, 2012.
- [4] **Revue Systèmes Solaires**, Journal des Énergies Renouvelables –http://www.energies-renouvelables.org/accueil_systemes_solaires.
- [5] **Serge Poignant** – L'énergie photovoltaïque, Rapport D'information, 2009, Assemblée Nationale Constitution du 4 Octobre 1958 Treizième Législature.
- [6] **Dib Wassila** – Modélisation des structures photovoltaïque : aspects et fondamentaux et applique», Thèse de Doctorat, 2010, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen.
- [7] **Alain RICAUD** – Photopiles solaires. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (Suisse), Collection « Cahiers de Chimie » (De la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés).
- [8] **Benahmed Benabdallah Nadia** – Propriétés physique des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et simulation des cellules a base de Si, Thèse de Magister, 2006, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.
- [9] **Malika Madani** – Réalisation des couches antireflet dans les cellules solaires a couches minces ; Thèse de Magister, 2006, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.
- [10] **Benoit Brousse** : – Réalisation et caractérisation photovoltaïque obtenue par dépôt physique Thèse de Doctorat, 2004, Université de Limoges.
- [11] **Nichiporuk Oleksiy** – Simulation, Fabrication et analyse de cellules photovoltaïque. Thèse de Doctorat, 2005, Ecole Doctorale : Electronique, Electrotechnique et Automatique.
- [12] **Bernard Moine, Antonio Pereira, Amina Bensalah-Ledoux, Christine Martinet.** Laboratoire de Physico-chimie des Matériaux Luminescents UMR 5620 du CNRS, Université Claude-Bernard Lyon1, France ; les cellules solaire et leurs rendements ; conférence 02/12/09 - 04/12/09.
- [13] **Thèse de doctorat, UNIVERSITE PARIS-SUD ÉCOLE DOCTORALE,** Laboratoire de Génie Electrique de Paris soutenue le 16/12/2014 par **Thomas Mambrini** : Caractérisation des panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles.
- [14] **B. CHIKH-BLED, I. SARI-ALI ET B. BENYOUCEF** Université Abou-Bakr Belkaïd, Faculté des Sciences Unité de Recherche de Matériaux et Energies Renouvelables (URMER) 13000 Tlemcen, Algérie ; Méthode de dimensionnement optimal d'une installation photovoltaïque.

[15] **BENCHERIF Mohammed** ; Etude des panneaux photovoltaïques ; Thèse docteur en physique université Abou-bekr belkaid Tlemcen ; page 11/40-42

[16] **V. Boitier, C. Alonso**, (2013) Mémoire Pour l'obtention du titre de MAGISTER Option : Physique énergétique Présenté Par : SMAIL SEMAOUI Thème Etude de l'électrification d'un village avec de l'énergie solaire photovoltaïque Soutenu, le: 23 / 06 / 2014 ; dimensionnement d'un Système Photovoltaïque.

[17] **F. Gama – Yettou** Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda (2007) 141 – 144 ; Etude et simulation du fonctionnement des installations photovoltaïques

Résumé : L'objectif de ce travail est le dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter un habitat non connecté au réseau. Pour réaliser le dimensionnement de ce système on doit connaître l'emplacement de la région, l'inclinaison des panneaux solaires, la durée d'insolation journalier et la quantité de la consommation d'électricité dans cet habitat. Pour faciliter l'accès aux dimensions du système nous avons utilisé un logiciel PVSOL qui permet de planifier et de concevoir des systèmes photovoltaïques, de réaliser des simulations dynamiques et d'analyser le rendement des systèmes et qui nous donne un aperçu sur les courbes de variation de température, l'irradiation, la vitesse du vent, le cout et la rentabilité.