

Liste des abréviations

a : l'azimut de soleil [°]

h : l'élévation [°]

h : La constante de Planck [J.s]

PV : photovoltaïque

Er : énergie de conduction [w*s]

Ei : énergie interdite [w*s]

Ev : énergie de valence [w*s]

PN : jonction des couches n_ p

P : puissance [w]

Wc : watt crête

GWh : gigawatt heur

MW : mégawatt

I_{cc} : Le courant de court-circuit

V_{co} : La tension en circuit ouvert

MPP : le point de puissance maximale

V_{mpp} : tension qui correspond à la puissance maximale.

I_{mpp} : intensité de courant qui correspond à la puissance maximale.

$Pg(\lambda)$: L'éclairement monochromatique global [w/m²]

$I_{cc}(\lambda)$: Le courant de court-circuit [A/cm²]

R(λ) : Le coefficient de réflexion du silicium

λ : Le pic d'émission

I : la puissance lumineuse incidente de l'irradiation [w/m²]

E : la puissance lumineuse incidente de l'éclairement [lux]

FF : facteur de forme

n_v : rendement de conversion

$R_s(\lambda)$: La réponse spectrale [A /W]

E : énergie (kwh)

P : puissance (kw)

Q : le débit (L/h)

$R_{ampèremètre}$: la résistance interne de l'ampèremètre (ohm)

V : le volume d'eau dans le baril [litre]

GMP : groupe moto-pompe

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Listes des figures et des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques.

I.1. Introduction	4
I.2. Historique de la cellule photovoltaïque	4
I.3. L'énergie solaire photovoltaïque	5
I.3.1. Rayonnement solaire	5
I.3.2. Irradiance et éclairement	6
I.3.3. Puissance lumineuse disponible en environnement extérieur	7
I.3.4. Système de positionnement automatique de panneaux solaires	8
I.4. La cellule photovoltaïque	9
I.4.1. Définition.....	9
I.4.2. Principe physique d'une cellule PV	10
I .4.2.1. L'absorption de la lumière dans le matériau	10
I.4.2.2. Le transfert de l'énergie lumineuse aux électrons.....	10
I.4.2.3. Les semi- conducteurs	11
I.4.3. L'effet photovoltaïque	14
I.4.4. Caractéristiques électriques essentielles d'une cellule PV	16
I.4.4.1. Circuit électrique idéal	16
I.4.4.2. Schéma équivalent d'une cellule PV	16
I.4.4.3. Paramètres essentiels caractérisant une cellule PV	18
I.5. Logiciel de Simulation d'une cellule photovoltaïque : PC1D	21
I.5.1. La Simulation électrique sous PC1D	21
I.5.2. Aperçu du logiciel	22
I.6. Etude de la cellule photovoltaïque à base de Si.....	23
I.6.1. L'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique.....	23
I.6.1.1. Graphe	23

I.6.1.2. Interprétation du graphe	24
I.6.2. L'influence du dopage de l'émetteur sur le rendement électrique.....	24
I.6.2.1 Graphe	24
I.6.2.2. Interprétation du graphe	24
I.7. Etude de la cellule photovoltaïque à base d'InP	25
I.7.1. L'influence du dopage de l'émetteur sur le rendement électrique.....	25
I.7.1.1 Graphe	25
I.7.1.2. Interprétation du graphe	25
I.7.2. L'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique	25
I.7.2.1.Graphe	25
I.7.2.2. Interprétation du graphe	26
I.8.Evolution du rendement quantique en fonction de la longueur d'onde pour différents dopage	27
I.8.1. Le cas de la cellule du silicium	27
I.9.1. Avantages.....	32
I.9.2. Inconvénients	32
I.10. Différents domaines d'applications	32
I.11. Conclusion	34

chapitreII : Etat de l'art de l'énergie photovoltaïque.

II.1.Introduction	36
II.2.Etat de l'art d'une cellule photovoltaïque	36
II.3.Les différentes filières photovoltaïques	36
II.3.1. La filière silicium	36
II.3.1. 1.Cellules au silicium monocristallin	37
II.3.1. 2.Cellules au silicium poly-cristallines (ou multi cristalline)	37
II.3.1. 3.Cellules au silicium amorphe	38
II.3.1. 4.Cellule au silicium en ruban auto- supporté.....	39
II.3.2. Cellules en couche mince.....	39
II.3.2. 1.Matériaux à base de tellure de cadmium(CdTe)	39
II.3.2.2.Matériaux CIS,CIGS	39
II.3.3. Les cellules III-V multi jonction.....	40
II.3.4. Les cellules colorant ou « Grätzel »	40

II.3.5. Les cellules photovoltaïques organiques	41
II.4. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque.....	42
II.4.1. Passivation des faces avant et arrière	43
II.4.2. Texturation de la surface	43
II.4.3. Couche antireflet.....	43
II.4.4. Contacts face avant et arrière.....	44
II.4.5. BSF	44
II.5.De la cellule au panneau.....	44
II.5.1. Introduction	44
II.5.2. Définition d'un panneau	44
II.5.2.1. La mise en série des cellules.....	45
II.5.2.2. La mise en parallèle des cellules	46
II.5.3. Le module photovoltaïque	47
II.5.3.1. Rendement d'un module.....	48
II.5.3.2.Nombre de cellule par module.....	48
II.5.3.3. Encapsulation et encadrement	49
II.6.Conclusion	49

Chapitre III : Application d'un système énergétique autonome

Calcul PV*SOL

III.1.Introduction.....	51
III.2. Fonctions de logiciel	51
III.3. Les besoins énergétiques	53
III.4. Energie solaire	53
III.5.dimensionnement d'onduleur	53
III.6.Définition de la capacité de la batterie.....	53
III.7.rendement avec consommation.....	54
III.8.Etude d'un cas (avec le logiciel PVSOL)	54
III.8.1.Résultat de simulation.....	61
III.8.conclusion	62

Chapitre IV : Dimensionnement d'une station PV autonome

Pompage de l'eau.

IV.1. Introduction	64
IV.2. Les différents types de systèmes photovoltaïques	64
IV.2.1. Les systèmes autonomes	64
IV.2.2. Les systèmes connectés aux réseaux	66
IV.3. Principe du point de puissance maximale MPPT	67
IV.4. Le stockage de l'énergie électrique	67
IV.4.1. Les batteries dans les systèmes photovoltaïques	67
IV.4.2. Les inconvénients de batterie dans les systèmes PV	68
IV.5. Présentation d'un système de pompage solaire photovoltaïque	68
IV.5.1. Présentation générale	68
IV.5.2. Groupe moto-pompe	69
IV.5.2.1. Le moteur	69
IV.5.2.2. Les pompes	69
IV.5.3. Le pompage le cœur d'une installation d'irrigation pour assurer débit et pression	74
IV.5.3.1. Le pompage au fil du soleil	74
IV.5.3.2. Le pompage avec batterie	74
IV.5.4. Quelques définitions	75
IV.6. Fonctionnement d'une installation de pompage solaire PV sans batterie	77
IV.1. Aperçu sur la première manipulation	79
IV.1.1. Le traçage de la caractéristique I(V) du panneau solaire	79
IV.2. Aperçu sur la deuxième manipulation	81
IV.2.1. Montage de pompage solaire photovoltaïque	81
IV.2.2. Cahier de charges	84
IV. Conclusion	86
Conclusion générale	87
Annexe	88
Bibliographie	93

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont maintenant reconnues comme des sources d'énergie ordinaires à travers le monde. Leur croissance rapide, en particulier dans le secteur électrique, est le fruit de plusieurs facteurs. Il y a notamment la compétitivité grandissante des technologies d'énergies renouvelables du point de vue des coûts ; diverses initiatives politiques ciblées ; l'amélioration de l'accès aux financements ; l'attention portée à la sécurité énergétique et aux solutions environnementales ; la demande croissante en énergie dans les économies en développement et émergentes ; et la nécessité de disposer de services énergétiques modernes. De nouveaux marchés apparaissent ainsi dans toutes les économies autour des énergies renouvelables centralisées et décentralisées.

Depuis quelques temps, l'électricité produite à partir de l'hydraulique, de la géothermie et de quelques sources de biomasse concurrence fortement l'électricité produite à partir de combustibles fossiles. Lorsque les conditions sont réunies (ressources de qualité, cadres réglementaires sécurisés), l'éolien terrestre et le solaire photovoltaïque sont compétitifs, du point de vue des coûts, vis-à-vis des nouvelles capacités fossiles, même sans tenir compte des externalités. Une nouvelle amélioration des coûts a été anticipée, en 2015 et au début de 2016, si l'on s'en tient aux montants historiquement bas proposés dans le cadre d'appels d'offres portant sur la réalisation de capacités électriques dans des pays s'étendant de l'Amérique latine au Moyen-Orient, à l'Afrique du Nord et à l'Inde. [1]

L'Algérie se repose presque exclusivement sur les combustibles fossiles (99.2%) pour répondre aux besoins croissants d'électricité de sa population. Les énergies renouvelables n'occupent donc qu'une faible part du mix électrique national (0.8%) et leur production est partagée entre la filière hydraulique qui a généré 389 GWh en 2013, soit (0.7%) du total, et les filières solaires photovoltaïques (11 GWh) et thermodynamique (58 GWh) qui représentent quant à elles 0.1% du bilan.

La production fossile a augmenté en moyenne de 6.7% par an sur la période 2002-2012.

L'Algérie amorce cependant aujourd'hui une dynamique verte avec le lancement d'un programme prévoyant l'installation de plus de 22000 MW de capacités renouvelables, 12000 MW étant dédiés à couvrir la demande intérieure en électricité et 10000 MW destinés à l'exportation. De plus, l'option du nucléaire est toujours d'actualité pour faire face à la demande d'électricité galopante et une première centrale d'une puissance de 1000 MW pourrait voir le jour en 2025. En parallèle, Sonelgaz, qui contrôle 75% des capacités de production du pays, souhaite miser sur le développement des énergies renouvelables.

Le nouveau programme pour le développement des énergies vertes s'appuiera en grande partie sur le secteur solaire pour lequel l'Algérie dispose d'un des meilleurs potentiels au monde. L'Algérie entend ainsi se positionner comme un acteur majeur de la production d'électricité solaire photovoltaïque, mais également thermodynamique. Le pays a inauguré en juillet 2011 sa première centrale hybride solaire-gaz d'une puissance de 150 MW, dont 30 MW solaires, dans la région saharienne de Hassi R'mel.[2]

Le solaire photovoltaïque peut être utilisé à la fois pour des applications reliées au réseau, c'est le cas des centrales solaires terrestres de grande puissance (jusqu'à plusieurs

Introduction générale

dizaines de mégawatts) et des centrales installées sur les bâtiments (toits et façades), mais également pour des applications non reliées au réseau, dans les zones où la connexion n'est économiquement pas envisageable.

Il est aussi intéressant de noter que la croissance de la filière solaire dans les pays développés et en développement ne répond pas forcément aux mêmes besoins. En effet, dans les régions développées, le développement de l'électricité solaire se fait par la connexion des centrales au réseau électrique. En revanche, dans les régions en développement (Asie du Sud, Amérique du Sud, Afrique sub-saharienne), la croissance de la filière solaire répond davantage à des besoins décentralisés comme l'électrification domestique et les tété-communications. [3]

Les recherches effectuées au cours de ce mémoire ont consisté à mettre en place un modèle pour simuler et étudier les systèmes autonomes d'énergies PV, application au pompage solaire.

Le manuscrit se divise en quatre chapitres :

Initialisation par une introduction générale.

Le premier chapitre portera une présentation générale sur le photovoltaïque.

Le deuxième chapitre sera consacré sur l'état de l'art de l'énergie PV, comprendra les différentes technologies des cellules photovoltaïques.

En troisième lieu, dans le troisième chapitre nous aborderons la simulation d'un système autonome en utilisant logiciel de calcul PV*SOL, avec les paramètres portés dans les différentes publications en donnant des commentaires et des analyses des résultats obtenus.

Finalement, le quatrième chapitre sera consacré sur notre application de pompage solaire qui comprendra l'étude des différentes configurations de pompage solaire et la réalisation d'un système autonome de pompage solaire tout en illustrant les calculs et résultats obtenus.

Chapitre I :

Généralité sur les systèmes photovoltaïques

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction

La technologie du photovoltaïque, qui permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV), est considérée comme l'une des voies les plus prometteuses pour le développement d'énergie propres et renouvelables. Depuis le début du siècle, l'industrie du photovoltaïque a bénéficié d'une croissance exponentielle, pour atteindre une production supérieure à 23 GWc en 2010. Selon le dernier rapport de « GTM Research » (Greentech Media) sur le marché solaire mondial pour le troisième trimestre 2016, la demande mondiale atteindra cette année un nouveau record à 73 gigawatt (GW) en croissance de 33 % par rapport à l'année précédente, avec une majorité de systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité.

Les systèmes photovoltaïques non raccordés au réseau sont également promis à un avenir radieux. D'une part, les systèmes PV isolés permettent, pour un prix compétitif, d'alimenter en énergie électrique des zones qui ne sont pas desservies par le réseau, en particulier dans les pays en voie de développement. D'autre part, les composants de récupération d'énergie par effet photovoltaïque, pour l'alimentation de dispositifs électroniques autonomes, constituent un marché en plein expansion qui représentera plusieurs milliards de dollars à l'horizon 2020, à la fois pour des applications grand public (électronique nomade) mais également professionnelles (capteurs pour le bâtiment et la surveillance des structures).[4]

En 2011, 87 % des installations photovoltaïques installées dans le monde comportaient du **silicium** mono ou multi cristallin. Bien qu'étant l'élément chimique le plus abondant sur **Terre** après l'**oxygène**, le silicium star du photovoltaïque ne peut être trouvé à l'état pur. Il doit donc être extrait de la **silice**, purifié, mis en forme puis dopé avant d'être utilisé. Toutes ces opérations ont un important coût énergétique. [5]

I.2. Historique de la cellule photovoltaïque

Le mot “photovoltaïque” est composé des deux termes grec : “photo” qui désigne la lumière et de “voltaïque” qui tire son origine du nom d'un physicien italien **“ALESSANDRO VOLTA” (1754-1827)** qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la “lumière électrique”.

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

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

1954 : Trois chercheurs américains **“Darry Chapin”, “Gerald Pearson”** et **“Prince”** fabriquent une cellule **Photovoltaïque**.

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

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

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

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



Figure (I -1) : la première voiture alimentée par énergie PV. [6]

Années 80 : Exploitation des systèmes PV pour l'électrification et le pompage d'eau dans les zones isolées.

Fin des années 90 : Exploitation du PV pour la production de l'électricité injectée au réseau dans plusieurs pays développés (Japon, Allemagne).

Années 2000 : Mise en place des politiques favorables pour le PV Réalisation des centrales PV ayant des puissances de dizaines de MW.[7]

I.3. L'énergie solaire photovoltaïque

Désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.

I.3.1. Rayonnement solaire

C'est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'onde électromagnétique. En dehors de l'atmosphère terrestre, il donne un éclairement énergétique à peu près constant et égale à 1367W/m^2 , appelé de ce fait constante solaire. Le Soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible. L'émission d'ondes électromagnétiques par le Soleil est bien modélisée par un corps noir à 6000 Kelvin, donc par la loi de Planck. Le pic d'émission est dans le jaune ($\lambda=570\text{ nm}$), et la répartition du rayonnement est à peu près 46% d'infrarouges, 48% de la lumière visible et 6% pour les ultraviolets. Arrivé au niveau de la mer, c'est-à-dire ayant traversé toute l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire a subi plusieurs « filtrations ». On peut repérer notamment sur le spectre ci-contre les bandes d'absorption de l'ozone (connu pour stopper une bonne partie des ultraviolets), du dioxygène, du dioxyde de carbone et de l'eau. [8]

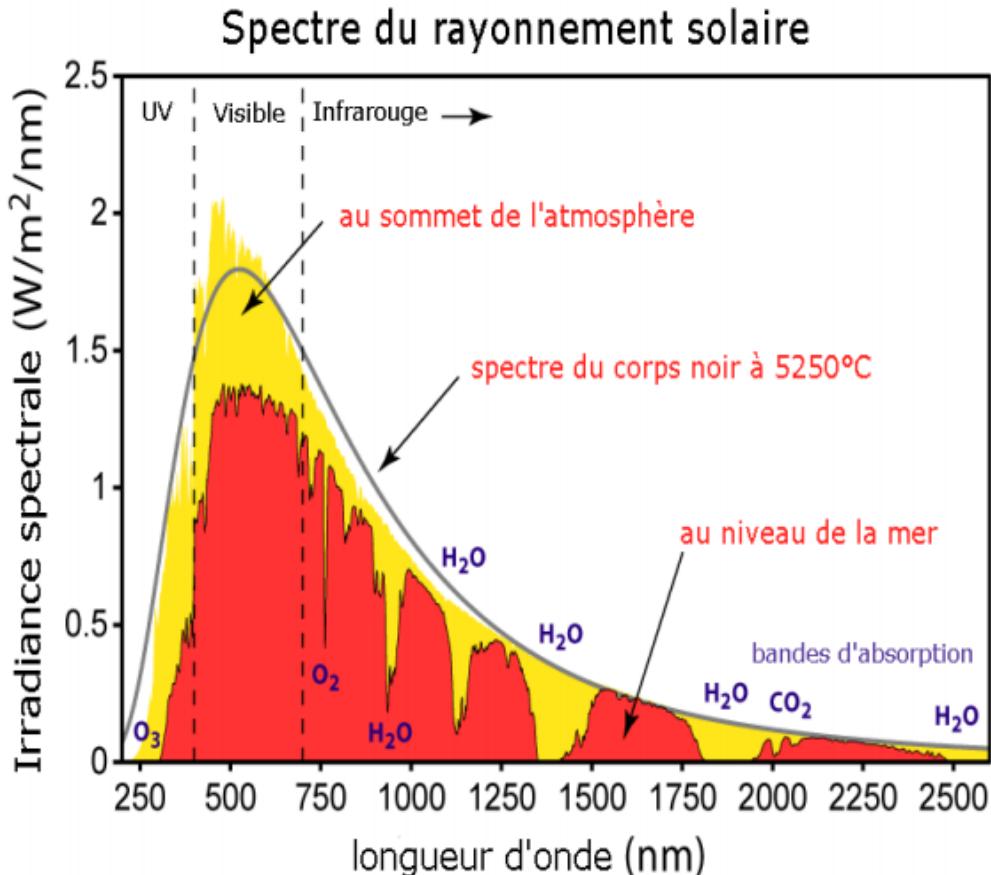


Figure (I-2) : Spectre du rayonnement solaire.

Une faible partie du rayonnement solaire parvient jusqu'à la surface de la Terre, des ondes radio décimétriques aux rayons ultraviolets les plus mous, le reste étant réfléchi ou filtré par l'atmosphère et l'ionosphère.

I.3.2. Irradiances et éclairements

Il existe deux manières de quantifier la puissance lumineuse incidente sur un système photovoltaïque: en unité radiométrique, et en unité photométrique.

- Radiométrie :

En radiométrie, la puissance lumineuse incidente est caractérisée par l'irradiance I (w/m^2).

- Photométrie :

En photométrie, la puissance lumineuse incidente est caractérisée par l'éclairement E (lux).

La fonction décrivant la sensibilité spectrale de l'œil humain $y(\lambda)$ définie par la Commission Internationale de l'Eclairage, est tracée à la figure (1.3).

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

Il faut noter que $y(\lambda)$ est nulle pour les longueurs d'onde λ inférieures à 400nm et supérieures à 700nm. Ainsi le rayonnement ultra – violet ($\lambda < 400\text{nm}$) et le rayonnement infra-rouge ($\lambda > 700\text{nm}$), bien que contribuant à l'irradiance I , n'ont aucun effet sur l'éclairement E .

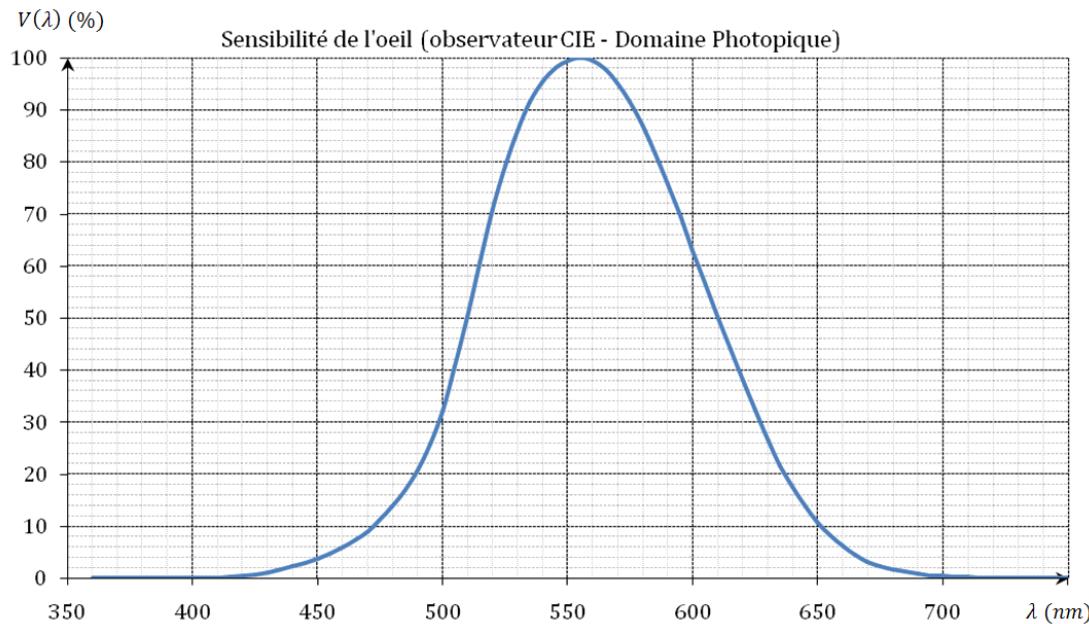


Figure (I.3) : fonction $y(\lambda)$ décrivant la sensibilité spectrale de l'œil humain [CIE].

I.3.3. Puissance lumineuse disponible en environnement extérieur

- Spectre :

La source lumineuse dominante en environnement extérieur est le soleil. L'irradiance spectrale solaire peut être approximée en considérant le rayonnement d'un corps noir à une température de 6000k. La correspondance entre l'irradiance I_{sol} et l'éclairement E_{SOL} est donné par la relation :

$$E_{sol} \sim 100I_{SOL}$$

Où I_{sol} est exprimée en w/m^2 et E_{sol} en lux.

- Niveaux de puissance :

L'irradiation solaire à l'extérieur de l'atmosphère terrestre dépend de la distance entre la terre et le soleil, et varie donc au cours de l'année. La moyenne sur l'année, appelée constante solaire, vaut 1367w/m^2 .

L'irradiance solaire à la surface terrestre est plus faible, du fait des pertes de Lumière dans l'atmosphère par réflexion, absorption et diffusion. Ainsi, Par beau temps et à midi, l'irradiance solaire vaut environ 1000w/m^2 , Soit un éclairement de 100.000 lux. A un point donné de la surface terrestre, l'irradiance solaire varie au cours de la journée (en fonction du cycle jour – nuit) ainsi qu'au cours de l'année (en

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

fonction du cycle des saisons). Une carte du niveau d'ensoleillement annuel, exprimé en kW.h/m², est présentée à la figure [1.4]. [9]

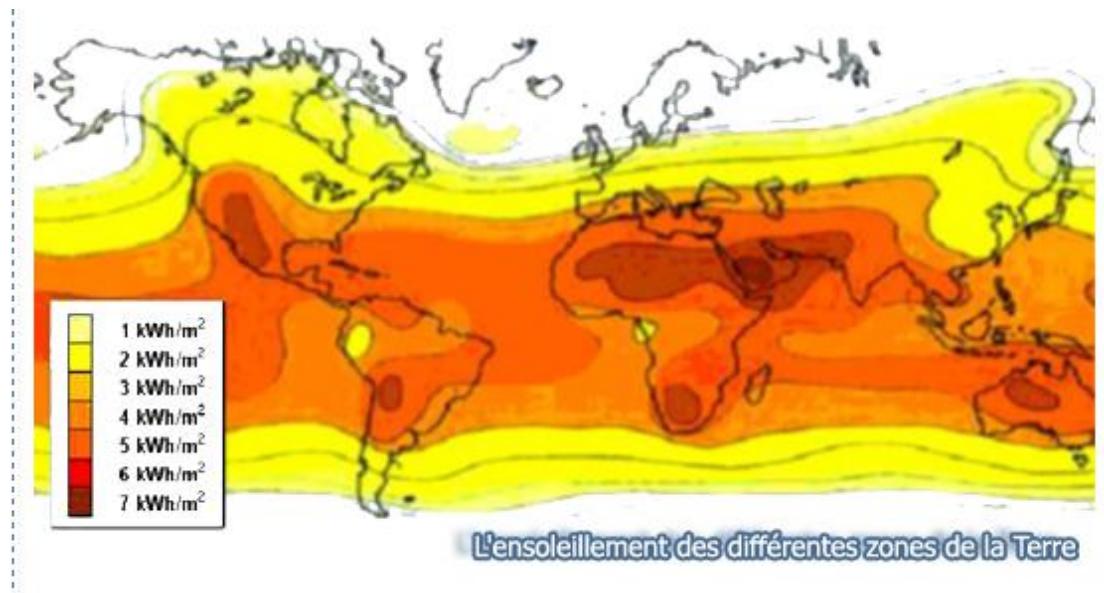


Figure (I.4) : carte du niveau d'ensoleillement annuel, exprimé kW.h/m².

I.3.4. Système de positionnement automatique de panneaux solaires

Le système de positionnement par rapport au soleil peut se faire selon 2 axes, l'**azimut a** et l'**élévation (hauteur h)**. L'**azimut a** du soleil correspond à l'angle horizontal entre la direction du Nord et le soleil. Quand le soleil est en plein Est, il a un azimut de 90°, plein Sud il sera de 180°, et plein Ouest de 270°. L'**élévation h** du soleil correspond à l'angle vertical du soleil par rapport à l'horizon. Ces différents angles varient en fonction de l'heure, de la date (saison) et dépendent de la longitude et de la latitude du système à contrôler. Le positionnement à réaliser sera fait sur 2 axes. Le premier axe correspond à l'**azimut a** et le second correspond à l'**élévation h**.

L'**azimut a** peut se calculer selon la formule suivante :

$$\sin(a) = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos(h)}$$

avec:

ω : angle horaire.

δ : déclinaison du soleil.

h : hauteur du soleil.

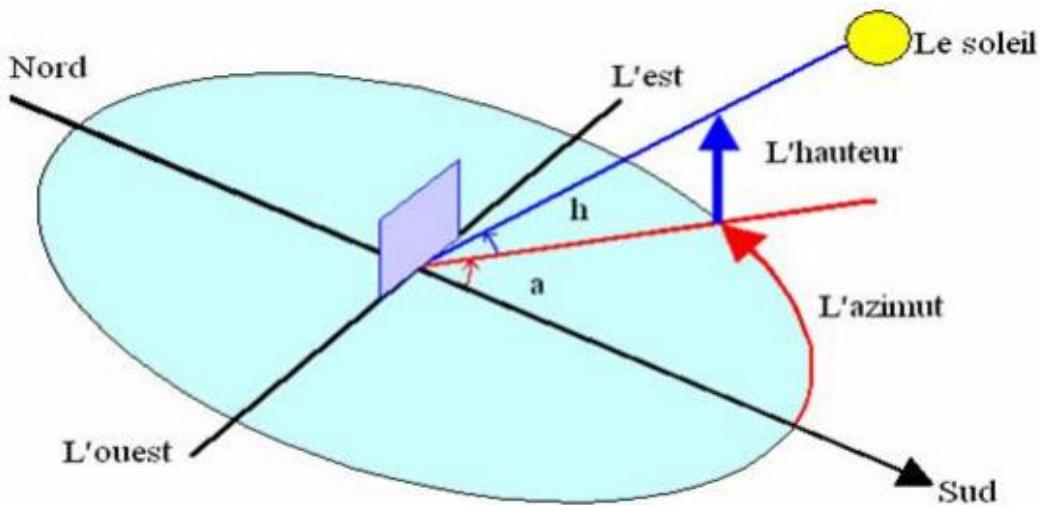


Figure (I.5) : Coordonnées horizontale. [10]

Pour produire un maximum d'électricité, un module photovoltaïque doit être incliné de façon perpendiculaire aux rayons du soleil. Ceci est très généralement impossible à obtenir car la position du soleil varie en fonction de l'heure de la journée et aussi en fonction des saisons.

Il est possible de concevoir des systèmes capables de suivre la trajectoire du soleil. Des modules photovoltaïques sont installés en haut d'un mât rotatif et suivent la trajectoire du soleil afin d'emmageriner le maximum d'énergie. Ils sont généralement installés au sol.

I.4. La cellule photovoltaïque :

I.4.1. Définition :

Une cellule photoélectrique, également appelée photopile ou cellule photovoltaïque est un dispositif électronique à une particularité de produire un courant électrique lorsqu'il est exposé aux rayonnements du Soleil.

Elle est constituée de matériaux semi-conducteurs à base, par exemple, de silicium, de sulfure de cadmium, ou de tellure de cadmium. [9]



Figure (I.6) : Une cellule PV.

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

Les semi-conducteurs sont assemblés en deux couches, l'une dopée positivement (P) et l'autre négativement (N), qui forment une jonction P-N à leur interface.

I.4.2. Principe physique d'une cellule PV

I .4.2.1. L'absorption de la lumière dans le matériau

La lumière est composée de photons. Les photons sont des éléments capables de traverser la lumière et de la pénétrer. Plus généralement un rayon lumineux qui arrive sur un objet peut subir trois événements optiques:

-**la réflexion:** la lumière est renvoyée par la surface de l'objet.

-**la transmission:** la lumière traverse l'objet.

-**l'absorption :** la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est alors restituée sous une autre forme.

I.4.2.2. Le transfert de l'énergie lumineuse aux électrons

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons,(de charge 1.6×10^{-19}) charges négatives élémentaires contenues dans la matière semi-conductrice. Tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau et un ensemble d'électrons gravitant autour.

Ce sont les électrons des couches électroniques périphériques qui vont absorber l'énergie des photons, ce qui les libère de l'attraction électrostatique (et gravitationnelle) du noyau de l'atome. L'énergie d'un photon d'un certain rayonnement est donnée par une relation simple puisqu'elle est proportionnelle à la fréquence du rayonnement utilisée. La constante universelle qui lie ces deux grandeurs est " h ", la constante de Planck.

La constante de Planck a pour unité la fraction de l'énergie sur un temps, c'est-à-dire le Joule-seconde (J.s). Sa valeur, dans le système international d'unités, est :

$$h=6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ J.s.}$$

On a donc la formule: $E = h \cdot f$

L'effet photoélectrique est donc l'émission d'électrons par un métal quand il est exposé à des radiations lumineuses. Les électrons libérés sont en suite susceptibles de produire un courant électrique.

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.4.2.3. Les semi-conducteurs

L'énergie lumineuse des rayons solaire est transformée en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électron et l'autre un déficit d'électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P.

La conductivité électrique désigne la capacité d'un corps à conduire un courant électrique lorsqu'une tension lui est appliquée.

On peut classer les matériaux selon trois types:

- les isolants, comme le verre qui ne conduisent pas le courant
- les conducteurs, principalement les métaux, qui conduisent le courant
- les semi-conducteurs dont la conductance varie en fonction de facteurs

Un matériau semi conducteur est un matériau à l'état solide ou liquide, qui conduit l'électricité à température ambiante, mais moins aisément qu'un métal conducteur. Exemples de semi conducteurs:

- Silicium
- Germanium
- Arséniure de gallium

I.4.2.3.1. Les semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur idéalement pur est appelé intrinsèque ; ou encore lorsque le cristal n'est pas pollué (volontairement ou non) par des impuretés pouvant changer la concentration en porteurs libres.

Pour une température différente de 0 K, des électrons peuvent devenir "libres" c'est-à-dire passer de la bande de valence à la bande de conduction, où leur concentration est notée N. Ces électrons laissent des trous dans la bande de valence avec une concentration notée P eux-aussi libres de se déplacer avec, de plus, une égalité entre les concentrations N et P.

Les deux bandes de valence et de conduction sont séparées par une bande interdite (gap). Pour que l'électron puisse franchir cette bande il doit acquérir une énergie supérieure au gap à travers l'énergie du photon.

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

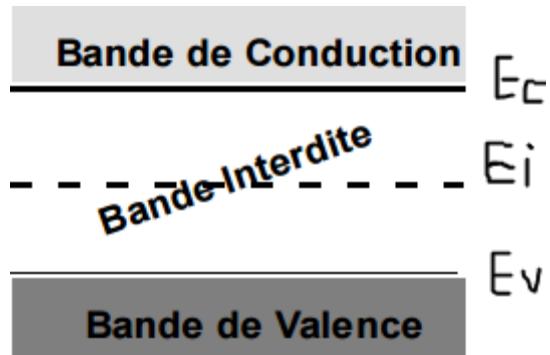


Figure (I.7) : Niveaux d'énergies d'un semi-conducteur.

I.4.2.3.2. Les semi-conducteur extrinsèques

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques.

I.4.2.3.2.1. Le dopage et la jonction P.N

Pour modifier les propriétés conductrices du silicium on y introduit des traces d'un autre élément appelé impureté : c'est le dopage.

Il peut être illustré par l'exemple suivant, qui présente le cas d'une cellule au silicium :

➤ Dopage de type N :

La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence supérieure dans la classification périodique, c'est à dire qui possède plus d'électrons sur sa couche de valence (la couche externe) que le silicium. Le silicium possède 4 électrons sur sa couche de valence : on peut donc utiliser des éléments de la colonne de l'oxygène, par exemple le Phosphore P, celui-ci comporte cinq électrons (un atome pentavalent), soit un de plus que le silicium. Chaque atome P s'insère entre les atomes de Si, 4 électrons d'un atome de P se couplent chacun à un des 4 électrons externes d'un atome de Si. Le 5^{ème}, qui se trouve alors en excès circule mieux. On a ainsi formé un matériau semi-conducteur dit de type N (charges négatives en excès).

➤ Dopage de type P :

La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence inférieure au silicium. Il peut s'agir de Bore B, celui-ci à l'inverse du silicium de type N, possède un électron externe de moins que le silicium (un atome trivalent) : le dopage produit un phénomène inverse. Le réseau atomique comporte localement, au voisinage du bore, un manque d'électron : c'est un "trou", équivalent à une charge positive. Il s'agit d'un matériau semi-conducteur de type P (charges positives en excès).

Conductivité du silicium dopé n et p

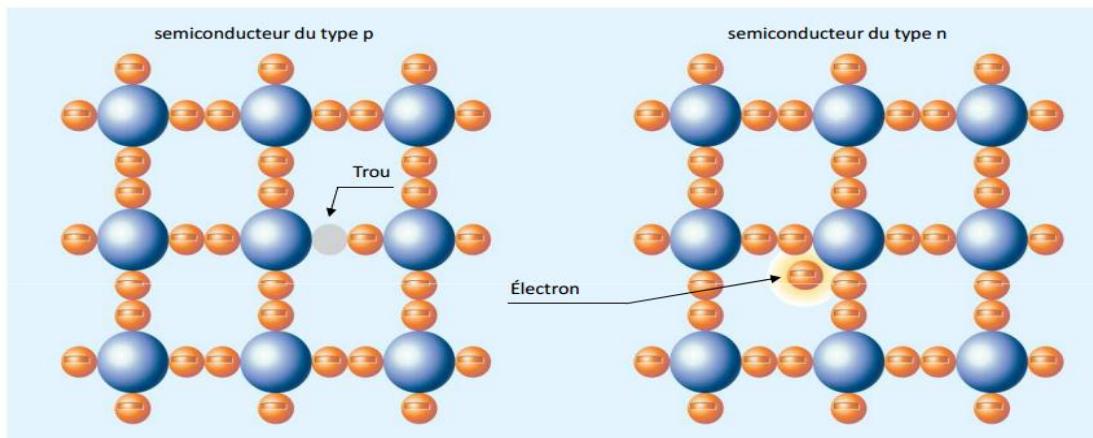


Figure (I.8) : Dopage de type P et N.

➤ La jonction PN :

Lorsqu'on met ces deux semi-conducteurs en contact (de manière à ce qu'il puisse y avoir conduction), on crée une jonction PN, qui doit permettre le passage des électrons entre les deux plaques. Cependant, dans le cas d'une cellule photovoltaïque, le gap du semi-conducteur de type N est calculé de manière à ce que le courant ne puisse pas s'établir seul : il faut qu'il y ait un apport d'énergie, sous forme d'un photon de lumière, pour qu'un électron de la couche N soit arraché et vienne se placer dans la couche P, créant ainsi une modification de la répartition de la charge globale dans l'édifice : la zone de charge d'espace.

Les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de transition où les porteurs libres disparaissent.

Zone de charge d'espace : jonction des couches p-n

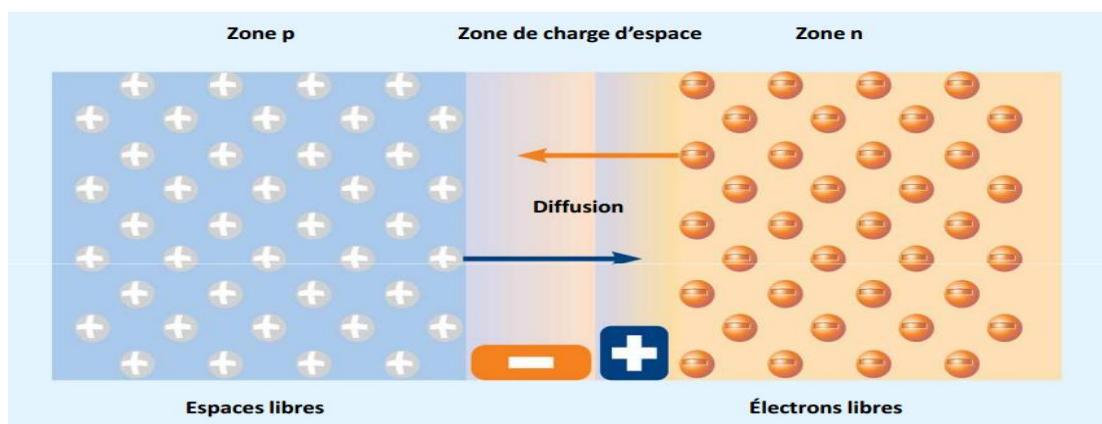


Figure (I.9) : La zone de transition : jonction PN.

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

Deux électrodes sont placées, l'une au niveau de la couche supérieure dopée N et l'autre au niveau de la couche inférieure dopée P : une différence de potentiel électrique et un courant électrique dirigé de N vers P sont créés. [11]

Le silicium est traité d'une certaine manière, on dit dopé, cette technique permet au silicium de jouer le rôle d'une diode, c'est-à-dire que les électrons ne pourront "passer" que dans un unique sens. La technique de dopage d'un semi-conducteur consiste à lui ajouter des impuretés, c'est-à-dire des éléments ayant un nombre différent d'électrons de valence. Les électrons porteurs de charge, générés par la lumière du soleil, sont partiellement perdus dans le volume du silicium à cause de la présence d'impuretés résiduelles (atomes de fer, titane...). Les chercheurs développent donc des procédés permettant de piéger ces atomes dans des zones inactives.

Les atomes du matériau de dopage, ou dopant (donneurs ou accepteurs d'électrons), et ceux du silicium ont un nombre différent d'électrons périphériques. Voici la structure électronique des atomes de phosphore, de silicium et de l'aluminium:

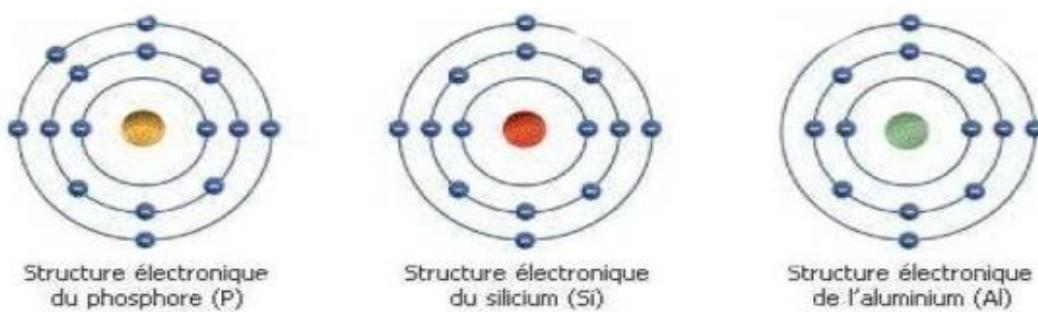


Figure (I.10) : Structure électronique des dopants P et Al et celle du Si.

I.4.3. L'effet photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium (diode). Lorsqu'un matériau (semi conducteur) est exposé à la lumière du soleil, ou encore lorsqu'une jonction PN est exposée à un flux lumineux, des paires « électron-trou » sont créées par les photons dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite du matériau : les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière. Sous l'action de ce bombardement, les électrons auront l'énergie nécessaire pour franchir le GAP, et les électrons sont décrochés des couches de valence pour se retrouver dans la couche de conduction.

Les électrons "décrochés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

Or le déplacement d'électrons, créé par l'énergie des photons, est synonyme de production d'électricité. Une tension se crée alors en présence de lumière aux bornes de la cellule. Si l'on ferme le circuit à l'aide de n'importe quel dipôle telle une lampe, le courant circule dans le circuit. Il est important de noter que la tension est presque constante tandis que l'intensité varie proportionnellement à la quantité de lumière reçue.

Le principe de la conversion photovoltaïque peut être décrit par les mécanismes suivants :

- absorption des photons incidents et création de paires électron-trou si l'énergie du photon incident est supérieure au gap du matériau.
- Diffusion des porteurs de charges minoritaires jusqu'à la zone de charge d'espace. Transfert des charges électriques dans la zone où elles vont être majoritaires grâce au champ électrique présent au niveau de la zone de charge d'espace de la jonction PN et collecte. Au cours de la diffusion des charges vers la zone de charge d'espace les charges électriques peuvent se recombiner et être perdues.
- Dissipation de puissance dans la charge et dans les résistances parasites.

Le matériau semi-conducteur le plus communément utilisé dans les cellules photovoltaïques est le silicium, présent en grande quantité dans le sable.

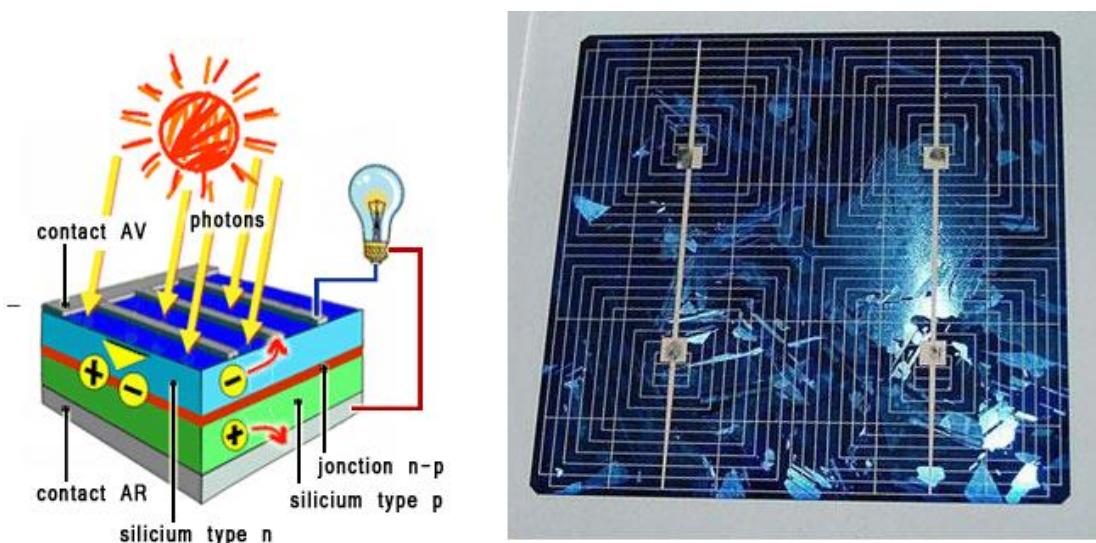


Figure (I.11) : Le principe de fonctionnement d'une cellule PV.

L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité. [11]

I.4.4. Caractéristiques électriques essentielles d'une cellule PV

I.4.4.1. Circuit électrique idéal

Une cellule photovoltaïque idéale peut être modélisée par une source de courant dans un circuit parallèle comprenant une diode, comme illustré dans la figure (1.12). Le courant I généré par la cellule s'écrit alors :

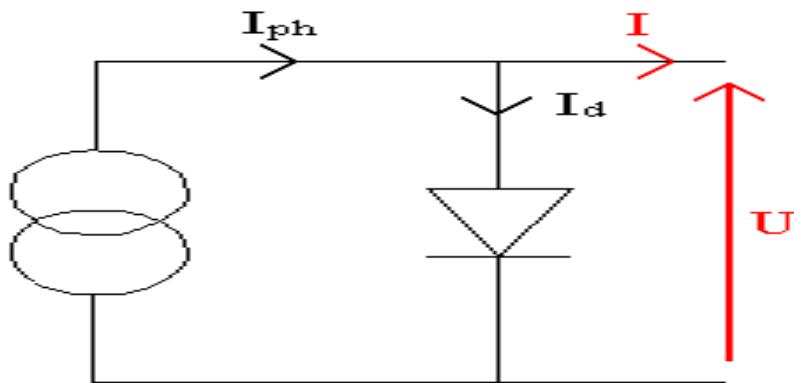


Figure (I.12) : Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque .

$$I = I_{ph} - I_d \quad [1-1]$$

$$I_d = I_s (e^{qv/kT} - 1) \quad [1-2]$$

$$I = I_{ph} - I_s (e^{qv/kT} - 1) \quad [1-3]$$

V : tension.

$K=1.38 \times 10^{-23}$: courant de Boltzmann.

$q=1.602 \times 10^{-19}$: charge de l'électron.

T : température absolue en °K.

I_s : Courant de saturation de la diode.

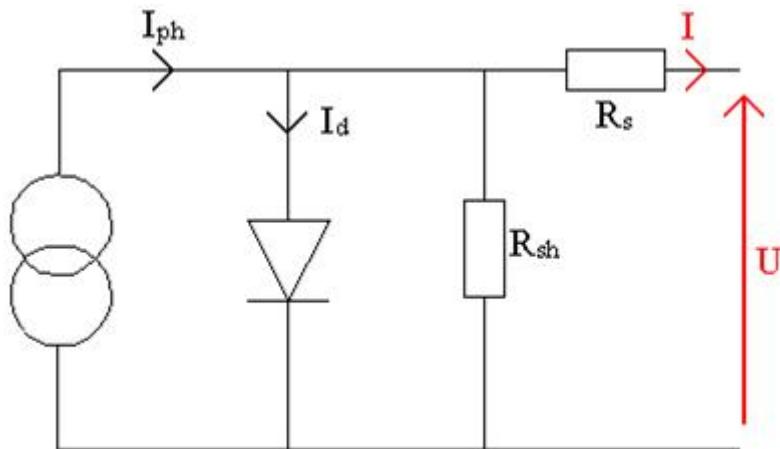
I_{ph} : photo courant.

I_d : Courant de la diode.

I.4.4.2. Schéma équivalent d'une cellule PV

Pour comprendre le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque, il est utile de créer un modèle qui est électriquement équivalent et basé sur des composants électriques discrets. En pratique, aucune cellule PV n'est idéale, il faut donc ajouter au modèle des résistances donc une résistance en parallèle et une en série. Le résultat est "le circuit équivalent d'une cellule PV" représenté ci-dessous :

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques



Figure(I.13) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

Les deux résistances modélisent les pertes internes :

.Résistance série R_s : modélise les pertes ohmiques du matériau.

.Résistance shunt R_{sh} : modélise les courants parasites qui traversent la cellule.

$$I = I_{ph} - I_s (e^{q(U+Rs*I)/KT} - 1) - (U + R_s * I / R_{sh}) \quad [1-4]$$

$$I_D = I_s (e^{q(U+Rs*I)/KT} - 1) \quad [1-5]$$

Avec :

U : tension aux bornes de la cellule.

I_{ph} : photo courant, ou courant généré par l'éclairement.

I_s : courant de saturation de la diode.

R_s : résistance série.

R_{sh} : résistance shunt.

K : constante de Boltzmann.

q : charge de l'électron.

T : température absolue de la cellule.

I_D : courant de la diode.

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant I_{ph} généré par un éclairement.

I.4.4.3. Paramètres essentiels caractérisant une cellule PV

I.4.4.3.1. La courbe courant-tension d'une cellule PV

La cellule photovoltaïque est l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Dans l'obscurité, elle se comporte comme une jonction PN (diode). Dans ces conditions, on retrouve pour une cellule la caractéristique courant - tension d'une jonction PN.

La forme générale de la caractéristique courant-tension d'une cellule est donnée ci-dessous :

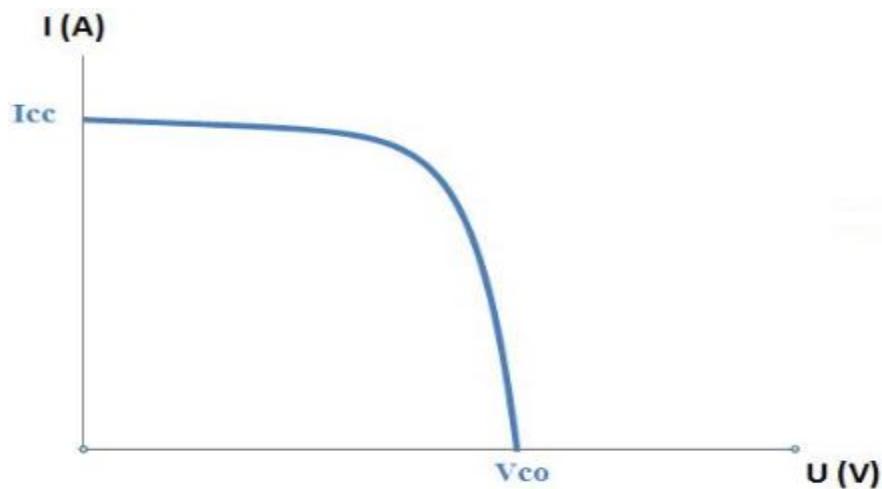


Figure (I.14) : Caractéristique courant-tension d'une cellule PV.

Quand la cellule est illuminée, elle produit un courant d'autant plus élevé que l'éclairement est intense. Ce courant est proportionnel à l'éclairement. On retrouve donc la même caractéristique que ci-dessus, mais décalée vers le bas d'un courant I_{ph} (photo courant) correspondant à l'intensité de l'éclairement.

Enfin, notons que pour obtenir la caractéristique de courant-tension (figure 1.14), on prend comme référence pour le courant le sens opposé à I_D (figure 1.15), soit le sens du photo-courant I_{ph} .

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

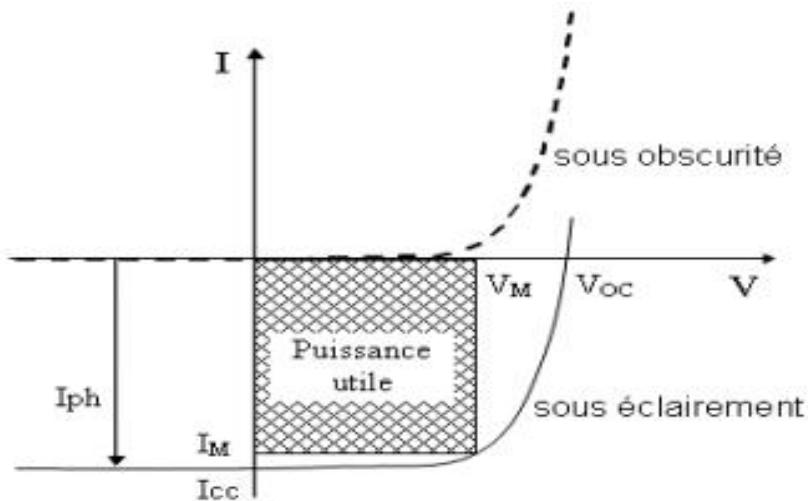


Figure (I.15) : Caractéristique $I(V)$ sous obscurité et sous éclairement d'une cellule PV.

I.4.4.3.2. La caractéristique puissance-tension d'une cellule PV

La puissance fournie par la cellule est tout simplement le produit du courant et de la tension. A partir de la caractéristique courant-tension, il est intéressant de dessiner le graphe de la puissance ($P = U \times I$) en fonction de la tension U , qu'on appelle aussi caractéristique puissance-tension. [12]

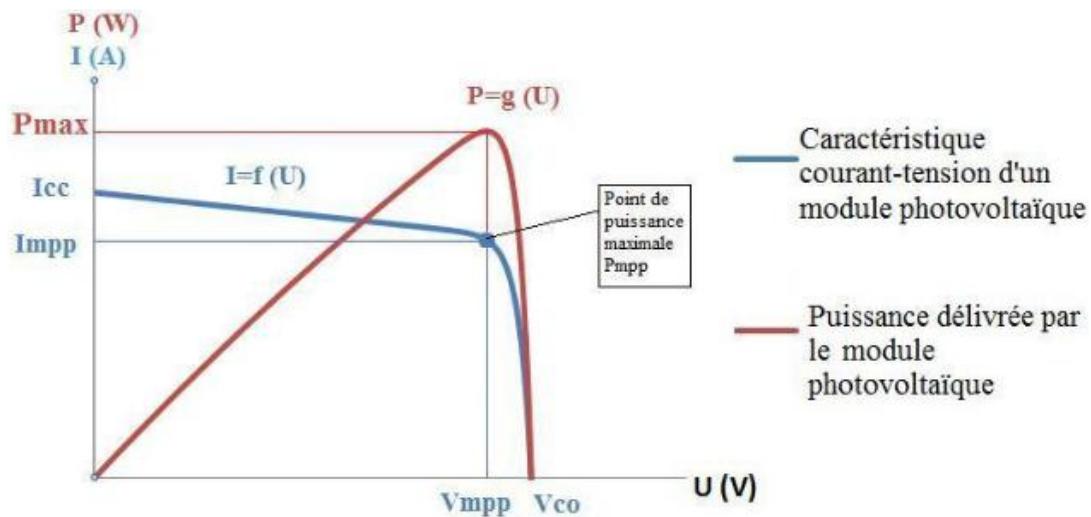


Figure (I.16) Caractéristique $P=f(U)$ puissance-tension d'une cellule PV.

Le point de puissance maximale P_{MPP} – (Maximum Power Point) : correspond aux coordonnées V_{mpp} (tension où le panneau produit son maximum de puissance), et I_{mpp} (intensité correspondant à la tension V_{mpp}). C'est le point de la puissance que le panneau solaire est capable de produire par un ensoleillement optimal.

I.4.4.3.3. Le courant de court-circuit noté I_{cc}

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P=U\times I$) est nulle.

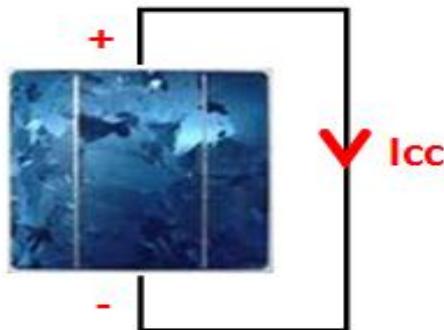


Figure (I.17) : Courant de court-circuit.

I.4.4.3.4. La tension en circuit ouvert notée V_{co}

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P=U\times I$) est nulle.

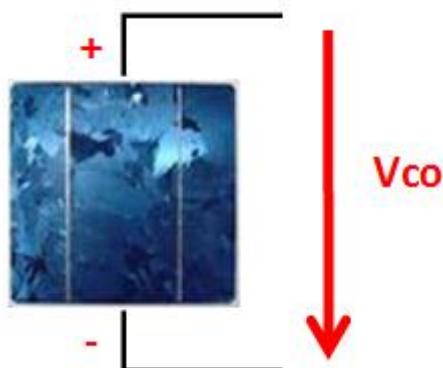


Figure (I.18) : la tension de circuit ouvert.

I.4.4.3.5. Facteur de forme

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule .c'est le rapport entre puissance maximale qui peut fournir une cellule (puissance débitée) P_{max} et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale ou idéale P_I), on le note :

$$FF = P_{max}/P_I = (V_m * I_m)/(V_{co} * I_{cc}) \quad [1-6]$$

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.4.4.3.6. Rendement de conversion d'énergie

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_o . On appelle rendement maximal, le rapport de la puissance maximale fournie Pmax sur la puissance P_o :

$$\eta_m = V_m * I_m / P_o = FF * V_{co} * I_{cc} / P_o \quad [1-7]$$

I.4.4.3.7. Puissance crête

La puissance crête est la puissance nominale délivrée par la cellule pour un ensoleillement de 1KW/m² et pour une température de jonction de 25°C. C'est une donnée du constructeur de la cellule.

I.4.4.3.8. Réponse spectrale

La réponse spectrale est la valeur du courant de court-circuit I_{cc} de la cellule par unité de flux monochromatique incident.

$$R_s(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{Pg(\lambda)} \quad [1.8]$$

où $R_s(\lambda)$ est la réponse spectrale, exprimée en A/W; $Pg(\lambda)$ l'éclairement monochromatique global, exprimé en W/m² et $I_{cc}(\lambda)$ désigne le courant de court-circuit, exprimé en A/cm². La réponse spectrale interne est la valeur du courant de court-circuit de la cellule, par unité de flux monochromatique traversant la surface de la cellule.

$$R_{\text{sin } t}(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{Pg(\lambda)(1-R(\lambda))} \quad [1-9]$$

Où $R(\lambda)$ est le coefficient de réflexion du silicium

Le photo- courant collecté à chaque longueur d'onde relative au nombre de photons incidents sur la surface à cette même longueur d'onde détermine la réponse spectrale du dispositif. [12]

I.5. Logiciel de Simulation d'une cellule photovoltaïque : PC1D

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaires PC1D (Personnel Computer One Dimensionnel) a une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque, il a été développé à l'université “New South Wales de Sydney” en Australie. Son utilisation est très pratique, il permet de simuler n'importe quelle structure photovoltaïque.

I.5.1. La Simulation électrique sous PC1D

La simulation électrique par PC1D est basée sur la résolution numérique des équations fondamentales de transport de charges dans les semi-conducteurs à une dimension qui sont, l'équation de poisson et l'équation de continuité pour les électrons et les trous. La statistique de Boltzmann détermine la concentration des porteurs. Après le maillage automatique par PC1D de la structure étudiée, le

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

simulateur évalue numériquement la résolution de ces équations à chaque nœud du maillage.

I.5.2. Aperçu du logiciel

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la figure (1.19), ce logiciel se divise en quatre parties, les trois premières sont pour la programmation, où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation.

Le PC1D contient des fichiers bibliothèques avec les paramètres des semi-conducteurs cristallins utilisés dans la technologie photovoltaïque comme le GaAs, a-Si, AlGaAs, Si, InP et Ge. Les fichiers des spectres solaires sont aussi disponibles dans ce logiciel, essentiellement les spectres (AM0, AM1.5). Certains paramètres variables des matériaux sont saisis à partir des fichiers externes.

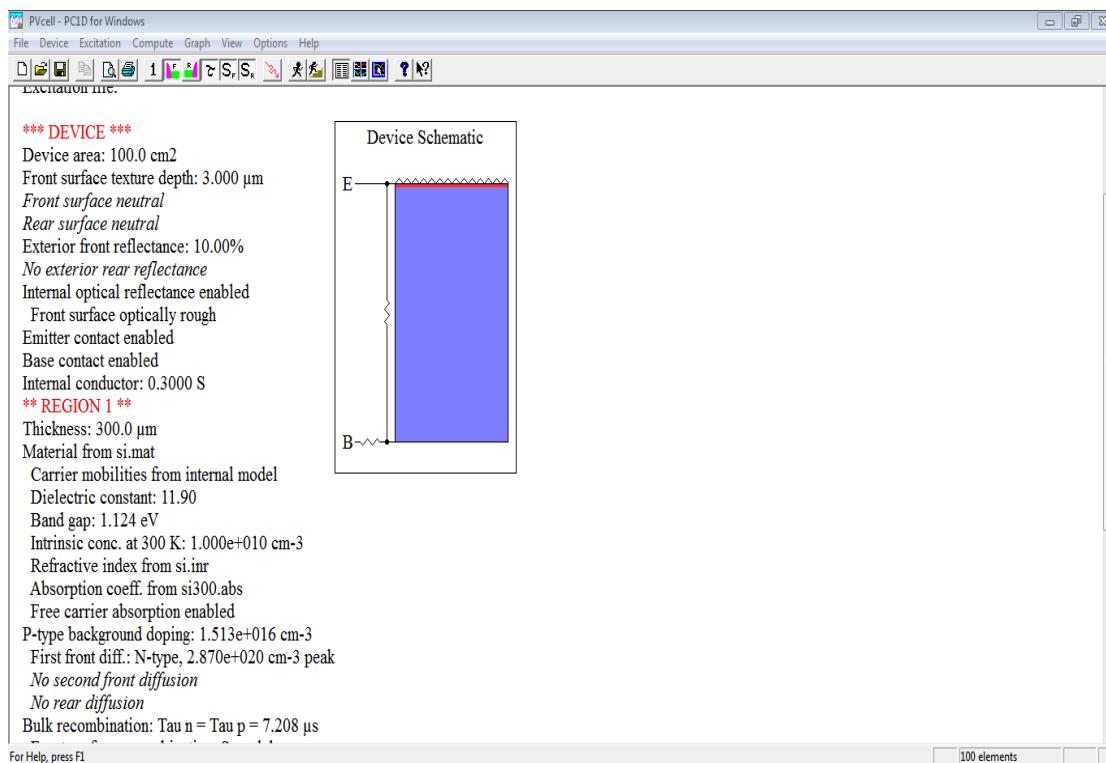


Figure (I.19) : Fenêtre du logiciel PC1D.

Cette interface peut comprendre jusqu'à 5 couches empilées. Chaque couche est prise en charge par le simulateur à travers la fiche suivante :

- Epaisseur de la couche.
- Type de matériau utilisé.
- Mobilité des porteurs.
- Constante diélectrique du matériau.
- Energie du gap.

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

- Concentration intrinsèque.
- Indice de réfraction.
- Coefficient d'absorption.
- Dopage de la couche.
- Diffusion avant (épaisseur et dopage).
- Diffusion arrière (épaisseur et dopage).
- Recombinaison en volume (durée de vie des porteurs).
- Vitesse de recombinaison à l'avant de la couche.
- Vitesse de recombinaison à l'arrière de la couche.

I.6. Etude de la cellule photovoltaïque à base de Si

I.6.1. L'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique, nous avons variés cette dernière de [0.1-1] μm en fixant les autres paramètres.

I.6.1.1. Graphe

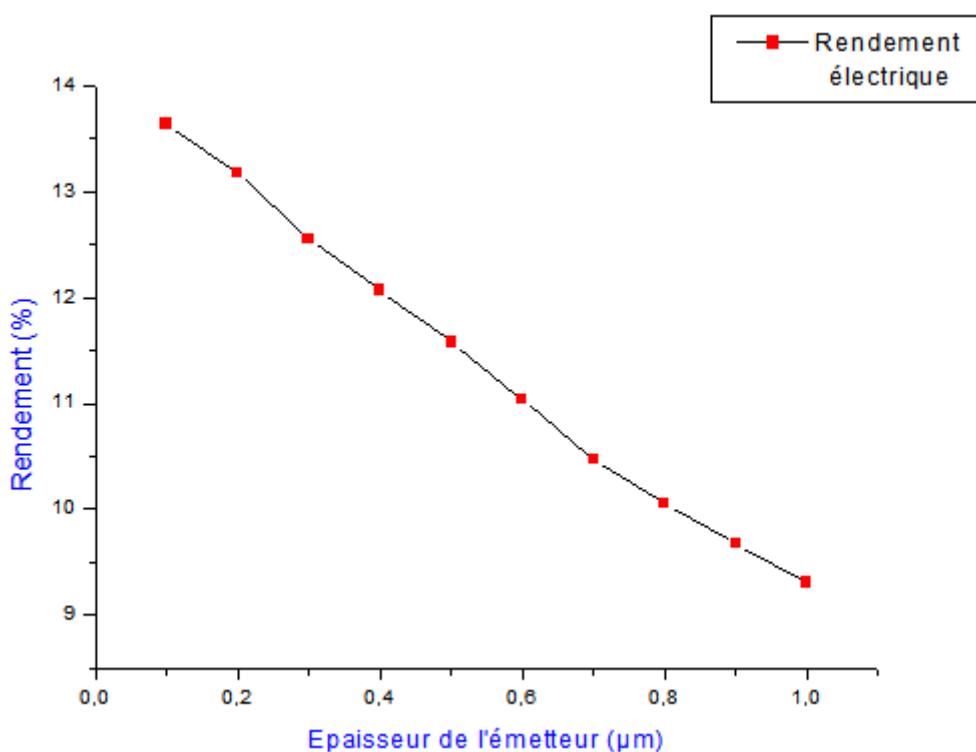


Figure (I.20): variation du rendement électrique en fonction de l'épaisseur de l'émetteur en silicium.

I.6.1.2. Interprétation du graphe

D'après la figure précédentes, les meilleures valeurs du rendement électrique de ces cellules sont obtenus dans le sens décroissant de l'épaisseur ce qui implique l'importance de ce dernier facteur dans l'absorption des photons.

I.6.2. L'influence du dopage de l'émetteur sur le rendement électrique

Nous avons ensuite variés le dopage de l'émetteur en fixant les autres paramètres pour analyser l'influence de ce dernier sur le rendement électrique.

$N_d [10^{17} - 10^{20}]$

I.6.2.1 Graphe

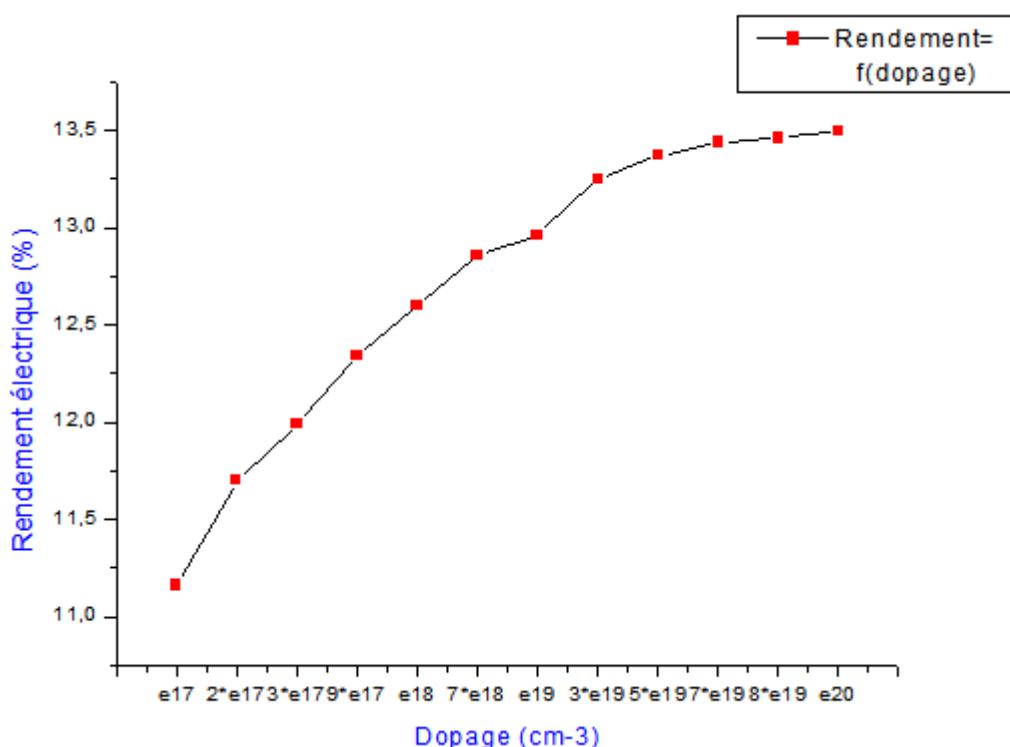


Figure (I.21) : Variation du rendement électrique en fonction du dopage de l'émetteur en silicium.

I.6.2.2. Interprétation du graphe

Nous avons des rendements maximales pour des émetteurs à fort dopage, un dopage du silicium type N de (10^{20}) donne un rendement maximale de (13.5%) pour ces cellules.

I.7. Etude de la cellule photovoltaïque à base d'InP

I.7.1. L'influence du dopage de l'émetteur sur le rendement électrique

De la même manière que nous avons étudiés le **Si** nous faisons pour l'**InP**, c'est-à-dire nous varions le dopage de l'émetteur en fixant les autres paramètres.

Nd [10^{17} - 10^{20}]

I.7.1.1 Graph

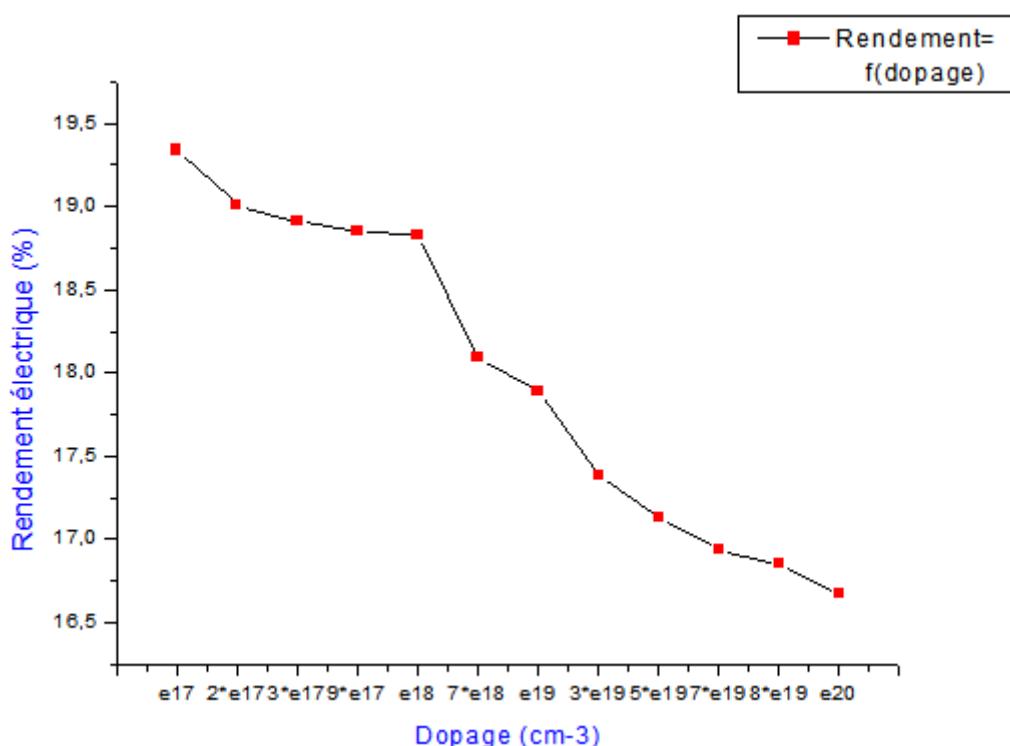


Figure (I.22) : Variation du rendement électrique en fonction du dopage de l'émetteur d' InP.

I.7.1.2. Interprétation du graphe

Contrairement au Silicium, les meilleurs rendements d'**InP** sont obtenus pour des émetteurs à faible dopage. Nous avons un dopage de **10^{17}** donne un rendement maximale de **19.34%**.

I.7.2. L'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique, nous avons de même varie cette dernière entre **[0.1-1] µm** en fixant les autres paramètres.

I.7.2.1.Graphe

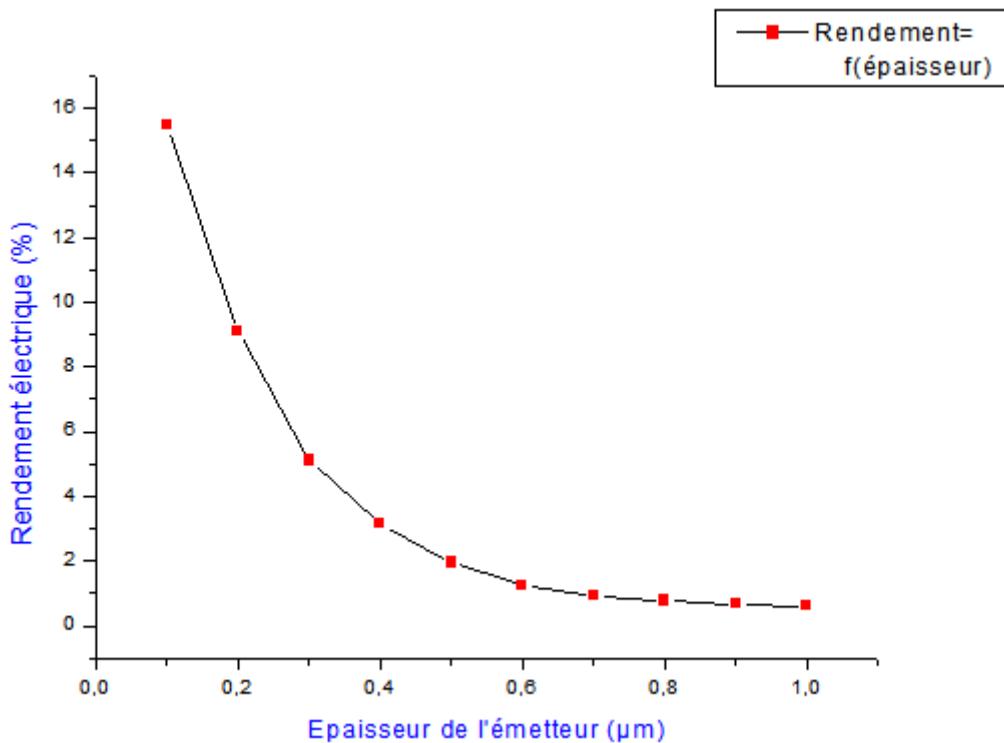


Figure (I.23) : variation du rendement électrique en fonction de l'épaisseur de l'émetteur d'InP.

I.7.2.2. Interprétation du graphe

Les meilleures valeurs du rendement électrique sont obtenues dans le sens décroissant de l'épaisseur : une épaisseur de **0.1 μm** donne un rendement maximal de **15.47%**, ce qui implique l'importance de ce dernier facteur dans l'absorption des photons.

I.8.Evolution du rendement quantique en fonction de la longueur d'onde pour différents dopage

I.8.1. Le cas de la cellule du silicium

➤ Pour $N_d = 2 \times 10^{17}$:

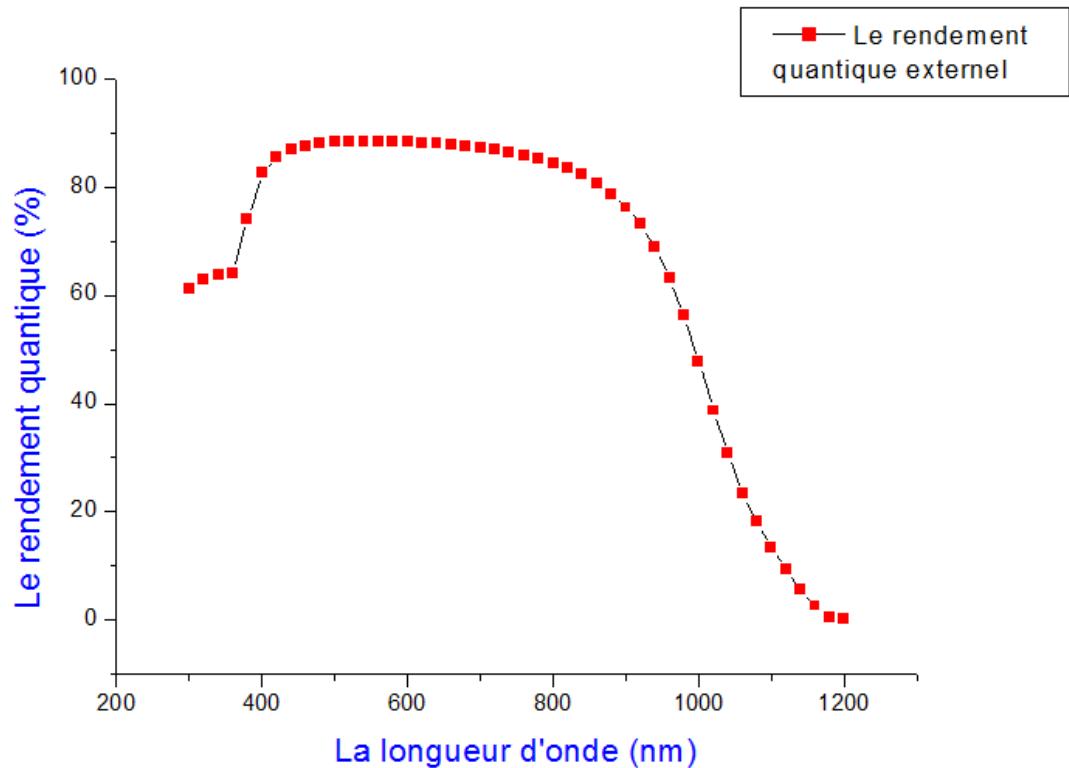


Figure (I.24) : Variation du rendement quantique en fonction de la longueur d'onde pour le Si.

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

➤ Pour $N_d = 9 \times 10^{18}$:

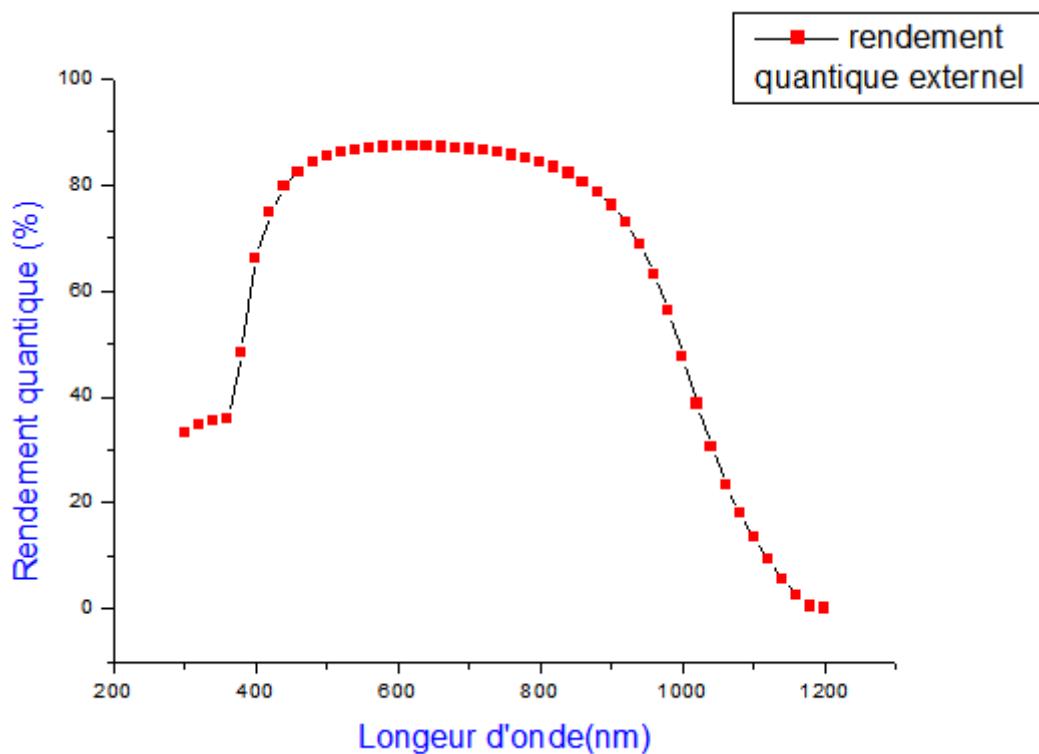


Figure (I.25) : Variation du rendement quantique en fonction de la longueur d'onde pour le Si.

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

- Pour $N_d = 5 \times 10^{19}$:

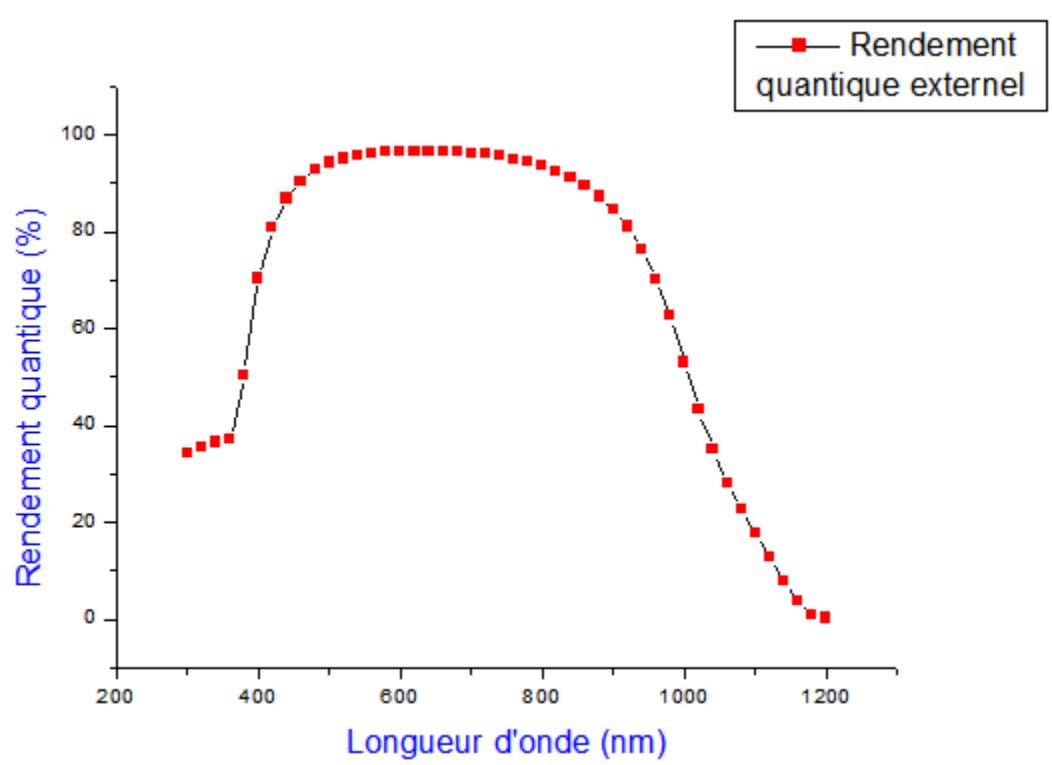


Figure (I.26) : Variation du rendement quantique en fonction de la longueur d'onde pour le Si.

- Interprétation

I.8.2. Le cas de la cellule d'INP

➤ Pour $N_d = 2 \times 10^{17}$:

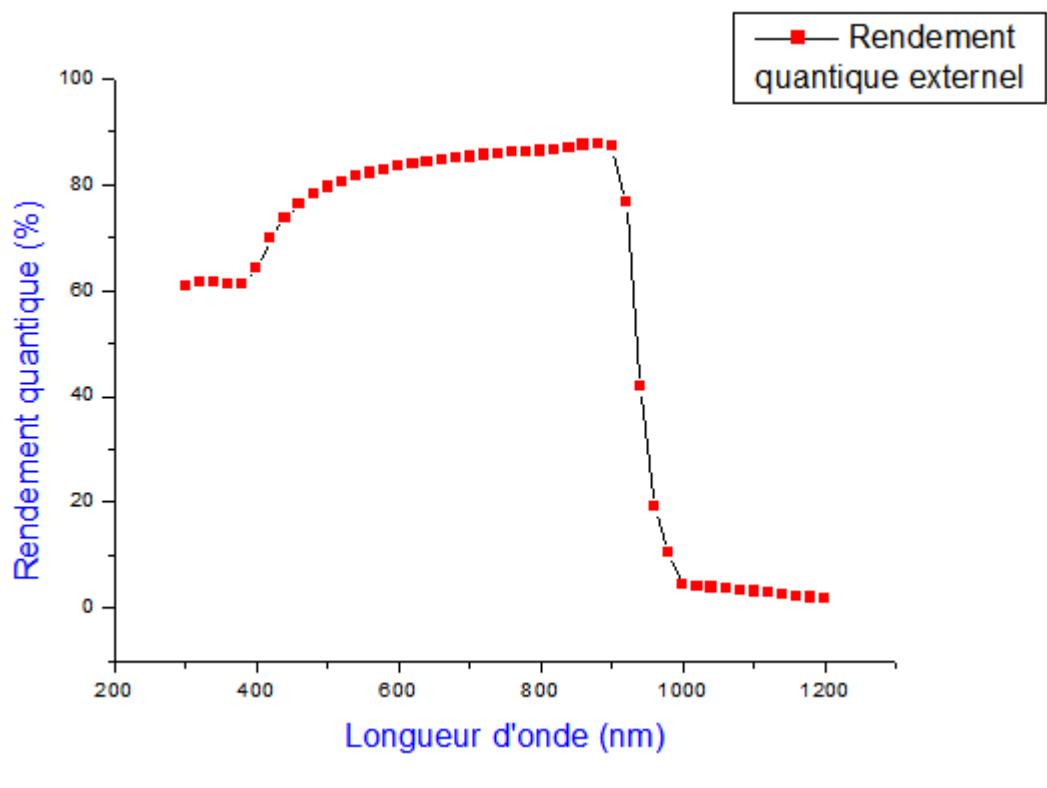


Figure (I.27) : Variation du rendement quantique en fonction de la longueur d'onde pour l'INP.

➤ Pour $N_d = 9 \times 10^{18}$:

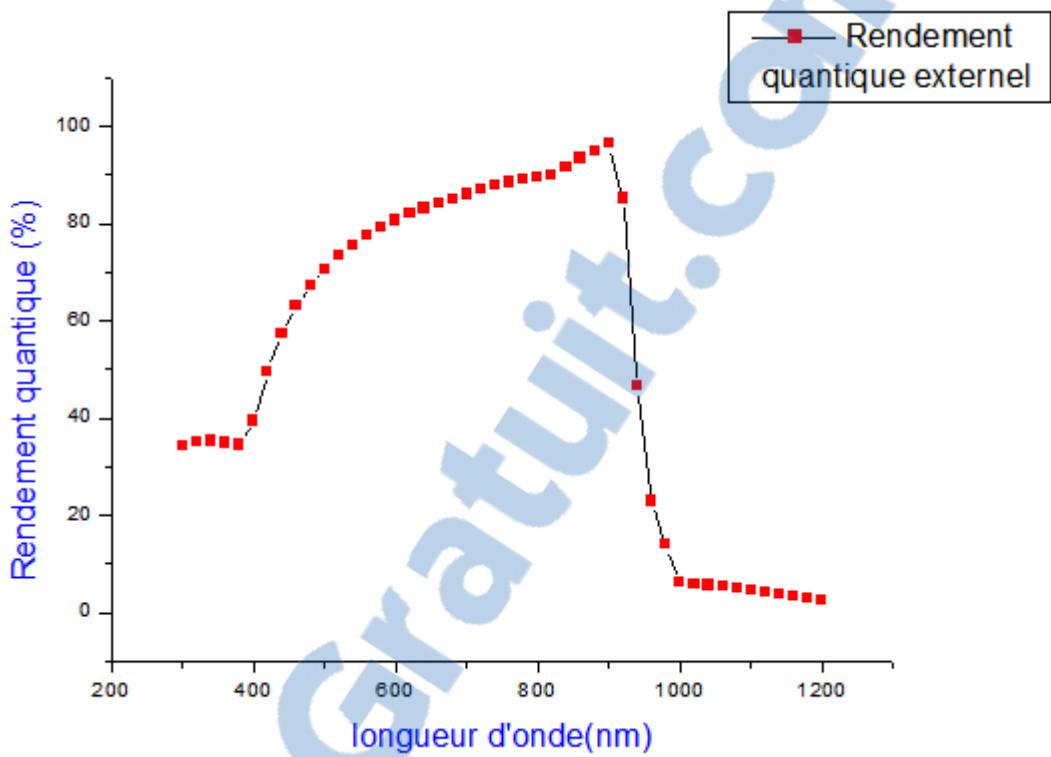
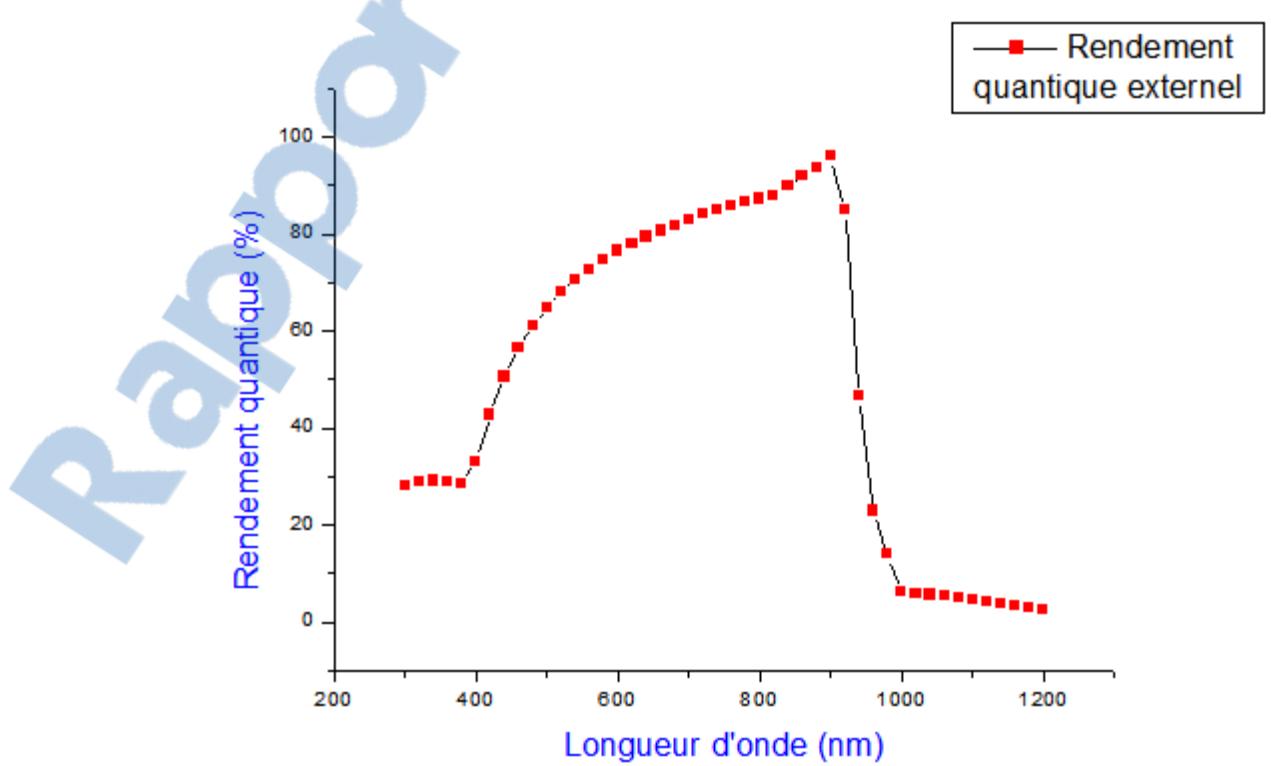


Figure (1.29) : Variation du rendement quantique en fonction de la longueur d'onde pour l'INP.

➤ Pour $N_d = 5 \times 10^{19}$:



CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

Figure (I.28) : Variation du rendement quantique en fonction de la longueur d'onde pour l'INP.

I.9. Avantages et inconvénients de la technologie PV

I.9.1. Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milli Watt au Méga Watt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.9.2. Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologique et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.

La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

I.10. Différents domaines d'applications

- Domaine spatial
- Habitation isolée
- Industrie isolée
- Centrale de puissance
- Résidence urbaine
- Biens de consommation

De nombreuses organisations internationales d'aide aux pays en voie de développement ont choisi la technologie photovoltaïque comme outil de

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

développement social et économique pour fournir des services de base à la population, tels que:

-le pompage de l'eau pour la consommation du village ou pour l'irrigation.-la réfrigération pour la production de glace et la conservation de vaccins, sang, produits agricoles,...

-l'éclairage (lampe portative, éclairage public, électrification villageoise, ...).

- **Industrie isolée :**

La technologie photovoltaïque est de plus en plus couramment intégrée dans les programmes nationaux d'électrification rurale (habitations domestiques, écoles, centres de santé, télécommunication, ...). Beaucoup d'applications professionnelles exigent une source d'électricité hautement fiable, autonome, sans entretien et sans combustible. Le générateur photovoltaïque est de loin l'option la plus séduisante; on l'utilise avec succès dans les télécommunications (stations-relais pour TV, radio, téléphonie, émetteur-récepteur,...).

- **Centrale de puissance :**

Avec les applications photovoltaïques connectées au réseau d'électricité national, une nouvelle tendance se dégage; elle est caractérisée par un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés. Des centrales de production photovoltaïque sont expérimentées depuis quelques années en Europe, aux Etats-Unis et au Japon, mais elles n'ont pas encore dépassé le stade pilote.

- **Résidence urbaine :**

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est aussi envisagé en zone urbaine avec l'installation de modules sur les toits et façades de bâtiments.

- **Biens de consommation :**

L'électronique moderne requiert de très petites puissances - du milli Watt à la dizaine de Watt - de sorte que beaucoup de petits appareils peuvent être alimentés par une petite surface de cellules photovoltaïques. Les calculatrices et les montres sont de loin les applications les plus connues. Les chargeurs de batteries, radios, lampes de poche, luminaires de jardin, systèmes d'alarme, jouets, fontaines, tondeuses à gazon, etc., sont d'autres exemples et cette liste n'est pas limitative.

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales. Nous avons présentés aussi les différents composants d'un système PV.

Enfin nous avons étudiés l'influence du dopage du substrat et l'épaisseur de l'émetteur sur le rendement électrique de la cellule PV à l'aide du simulateur PC1D.

Chapitre II :

Etat de l'art de l'énergie photovoltaïque

II.1.Introduction

Plusieurs technologies sont actuellement développées pour la réalisation des cellules photovoltaïque. Les degrés de maturité, de performance et de vie sont très différents d'une technologie à l'autre. Les efforts de recherche et développement actuels entraînent des progrès rapides, faisant de la filière photovoltaïque une filière en constante évolution. (14)

II.2.Etat de l'art d'une cellule photovoltaïque

Le secteur des composants optoélectronique qui se développe le plus rapidement est sans conteste, celui du Photovoltaïque(PV) pour une production d'électricité basée sur la conversion de la lumière du soleil.

Pour le moment, plus de 90% des cellules sont à base de silicium cristallin, qui est la voie la plus avancée sur le plan technologique et industriel. En effet, le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre, parfaitement stable et non toxique. A l'avenir d'autres matériaux, au stade préindustriel ou encore au niveau de la recherche et même au niveau de la validation des concepts viendront contribuer à la stimulation de ce marché très prometteur.

II.3.Les différentes filières photovoltaïques

Trois technologies principales sont aujourd'hui mises en œuvre dans la filière photovoltaïque : la plus importante, et de loin, utilise un matériau très abondant, le silicium.

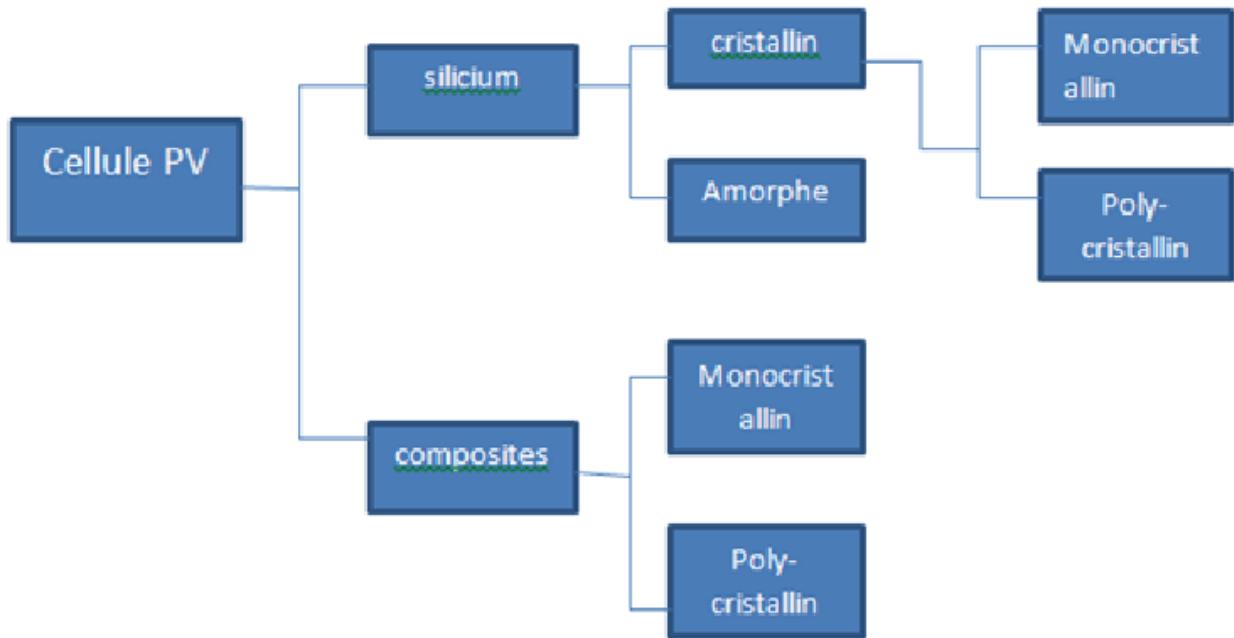


Figure (II.1): Les différentes technologies des cellules PV.(15)

II.3.1. La filière silicium

Elle s'appuie sur un matériau semi-conducteur, le silicium qui a l'avantage de pouvoir être produit à partir d'une ressource naturelle quasi inépuisable, le quartz, un composant des granites, des sables et des grès. Les panneaux solaires constitués à partir des cellules présentent aussi l'intérêt

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

majeur de pouvoir être utilisés aussi bien dans de grandes fermes solaires que sur de petites installations autonomes. Les technologies mises en œuvre sont bien maîtrisées, depuis plusieurs années. Il n'est donc pas surprenant que la « filière silicium » représente aujourd'hui 90% du marché mondial.

II.3.1. 1.Cellules au silicium monocristallin

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique, mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable proche du MWh. Les siliciums obtenus sont appelés Cz (méthode Czochralski) et FZ (« Float Zone »), et permettent d'obtenir des rendements de conversion records en laboratoire de l'ordre de 25 % pour des cellules de 4 cm^2 , soit supérieurs de huit points à ceux de l'industrie. Les inconvénients de cette technologie sont les rendements faibles obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux.

Avantage :

- Très bon rendement (23% en théorie et environ 17% dans la pratique).

Inconvénients :

- Coût élevé.
- Rendement faible sous un faible éclairement.

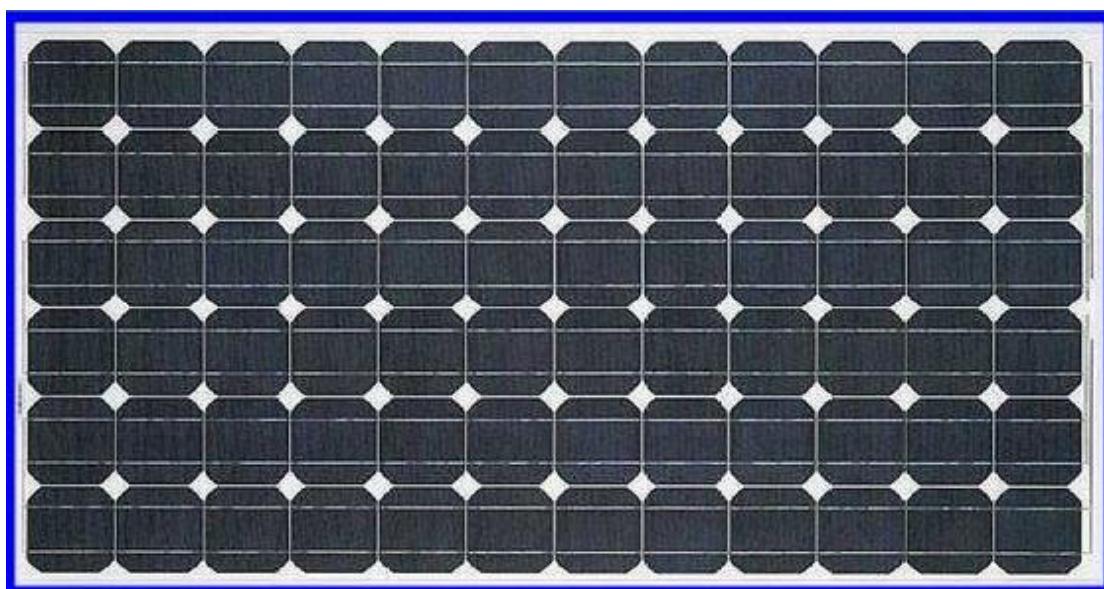


Figure (II.2):photo d'une cellule monocristalline.

II.3.1. 2.Cellules au silicium poly-cristallines (ou multi cristalline)

Le silicium poly-cristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé silicium multi - cristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Cependant, le matériau multicristallin est d'une part contraint et disloqué, et d'autre part contaminé par des impuretés résiduelles de la matière première de silicium. Cette dernière est en partie constituée par des rebuts de l'industrie de la microélectronique, c'est-à-dire le silicium monocristallin Cz ou FZ. Les rendements de conversion industriels, qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980, sont actuellement de 16 à 17 % pour des grandes plaquettes de 200 m^2 . Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché

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

du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.

Avantage :

- Bon rendement 13%, mais cependant moins bon que le monocristallin.
- Moins cher que le monocristallin.
- Meilleur rapport qualité/prix.

Inconvénient :

- Rendement faible sous un faible éclairement.

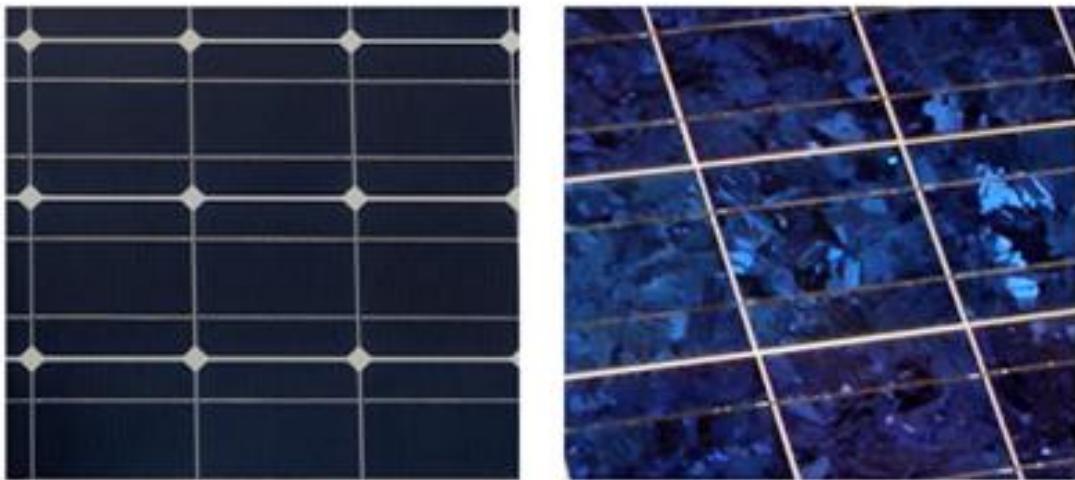


Figure (II.3): Photographies de cellules poly-cristallines.

II.3.1. 3.Cellules au silicium amorphe

Depuis les années 1970, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres dites « solaires ».

Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclairement contrairement Au silicium cristallin, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces (de l'ordre de $1m^2$). Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements (inférieurs à 10 % au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au cours du temps. L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement, par un mariage avec le silicium cristallin. En effet, les hétéro -structures à base de silicium amorphe/silicium cristallin (structure HIT de Sanyo) présentent des rendements de laboratoire de plus de 21 % et de 16 % en production industrielle.

Avantage :

- Fonctionnent avec un éclairement faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).
- Moins chères que celles que nous avons citées précédemment.

Inconvénients :

- Rendement faible en plein soleil (environ 6%).
- Performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

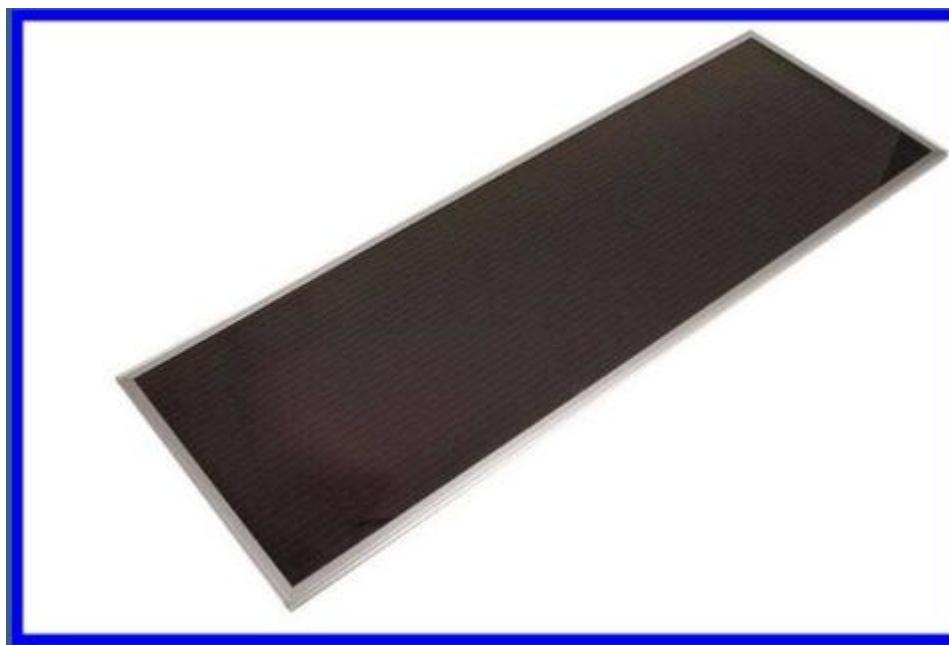


Figure (II.4): Photographie de cellule amorphe.

II.3.1. 4.Cellule au silicium en ruban auto- supporté

Les techniques de production de silicium cristallin en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. La plus connue est basée sur l'effet de capillarité entre deux lèvres de carbone. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et, pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles. Cependant, la vitesse de croissance linéaire extrêmement lente (quelques cm/min) pousse les industriels à abandonner progressivement cette technologie. Les meilleurs rendements obtenus sont néanmoins de l'ordre de 15 %.

II.3.2. Cellules en couche mince

Les recherches actuelles sur les matériaux PV portent également sur d'autres matériaux que le silicium, mieux adaptés à une utilisation en couches minces et délivrant de hauts rendements à des coûts relativement bas. Deux filières semblent s'imposer progressivement, l'une basée sur le tellurure de cadmium (notée CdTe) et l'autre sur les alliages Cuivre-indium/gallium-Sélénium (noté CIGS).

II.3.2. 1.Matériaux à base de tellure de cadmium(CdTe)

Il s'agit d'une technologie extrêmement prometteuse, permettant d'obtenir des rendements tout à fait convenables (16,5% en laboratoire). De part une bande interdite de 1,14eV parfaitement adaptée au spectre solaire et un très fort coefficient d'absorption, seule une couche de 2µm est nécessaire pour obtenir un matériau très opaque et absorbant une grande partie du spectre solaire.

La simplicité chimique du matériau à base de tellure de cadmium - (CdTe) et sa stabilité en font un matériau attractif. Ses propriétés thermo-physiques et ses caractéristiques chimiques permettent de fabriquer des cellules simplement et à faible coût. Le rendement des cellules en CdTe

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

dépend fortement de la manière dont les couches actives sont déposées (température de dépôt, vitesse et nature du substrat). Comparé aux autres technologies couche mince, le CdTe est plus facile à déposer et donc plus approprié à la production de module PV de surface importante. L'inconvénient majeur actuel repose sur la toxicité reconnue du Cadmium bien qu'il a été démontré que les risques environnementaux liés aux cellules PV en CdTe sont minimes. En effet, les modules en CdTe ne présenteraient pas de risques sanitaires et environnementaux, et un simple recyclage des modules en fin de vie résoudrait définitivement le problème de pollution. L'utilisation de CdTe dans les modules photovoltaïques est en fait beaucoup moins inquiétante que d'autres utilisations du cadmium, comme par exemple dans les batteries Ni-Cd. D'un point de vue rendement énergétique, la filière CdTe, présente des rendements de cellules record de 16.5% en laboratoire et des modules commerciaux à près de 10.7%. L'Europe et les USA produisent déjà des panneaux en couches minces CdTe. Leurs rendements avoisinent les 9%.

II.3.2.2.Matériaux CIS,CIGS

Les cellules CIGS sont constituées par empilement. Tout d'abord, une couche métallique de molybdène de 0.5 µm d'épaisseur est déposée sur du verre de vitre pour réaliser le contact arrière. Puis on vient déposer une couche CIGS de type P, d'environ 1.5 µm. Suit une couche de CdS ou de ZnS (pour Sulfure de Cadmium et Zinc Sulfuré) d'environ 50 nm, et enfin une couche de ZnO (Oxyde de Zinc) de type N, de 1 µm, servant de contact avant, conducteur et transparent. Finalement, la cellule est encapsulée par couverture par une vitre.

La technologie CIGS exhibe actuellement le meilleur rendement de production pour une cellule et pour des modules par rapport à toutes les technologies couches minces inorganiques avec des cellules pouvant atteindre 19.9% en laboratoire et des modules commerciaux de 12%. Cependant, il reste un grand nombre de points à améliorer afin de réduire le prix de ces cellules. Le principal challenge de la technologie CIGS couche mince est la réduction du prix des matériaux. Diverses pistes existent pour essayer de remplacer les matériaux chers. De plus, il est nécessaire également de trouver des solutions pour moins gaspiller la matière première active pendant la fabrication. Une dernière piste consiste à réduire tout simplement l'épaisseur de la couche active.

II.3.3. Les cellules III-V multi jonction

Il est parfois difficile de trouver un matériau absorbant l'ensemble du spectre solaire avec un fort coefficient d'absorption. Les cellules multi jonction dites «de troisième génération» répondent à cette problématique. En effet il s'agit de l'empilement de divers composés III-V, chacun optimisés pour absorber une partie du spectre solaire avec efficacité. L'empilement, obtenu par croissance épit axiale, permet donc de capter une grande partie du spectre solaire, et mène à une cellule unique composée en réalité de plusieurs cellules en série.

De part le domaine de spectre solaire dont les photons sont récoltés et la minimisation des pertes dues à la thermalisation, ces cellules permettent d'atteindre les records connus à ce jour en matière de conversion photovoltaïque.

Des rendements de plus de 40% ont ainsi été obtenus sous lumière concentrée.

Le procédé de fabrication et les matériaux utilisés pour la fabrication de ces cellules entraînent un coût extrêmement élevé qui cantonne ces matériaux à des applications spatiales.

II.3.4. Les cellules colorant ou « Grätzel »

Inspirée par la photosynthèse, l'équipe de Michael Grätzel a développé au début des années 1990 des cellules solaires fonctionnant selon un principe différent de celui décrit dans les paragraphes précédents. Ces cellules sont composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié reporté est de 10,4 % pour une cellule de 1 cm² et est à mettre au profit de la société Sharp. Des tests de stabilité effectués montrent que la durée de vie des cellules est de 20 ans en fonctionnement. Cependant, à cause de fuites possibles de l'électrolyte liquide, celui-ci est remplacé par des électrolytes solides pour lesquels les rendements chutent alors à 6,7 %.

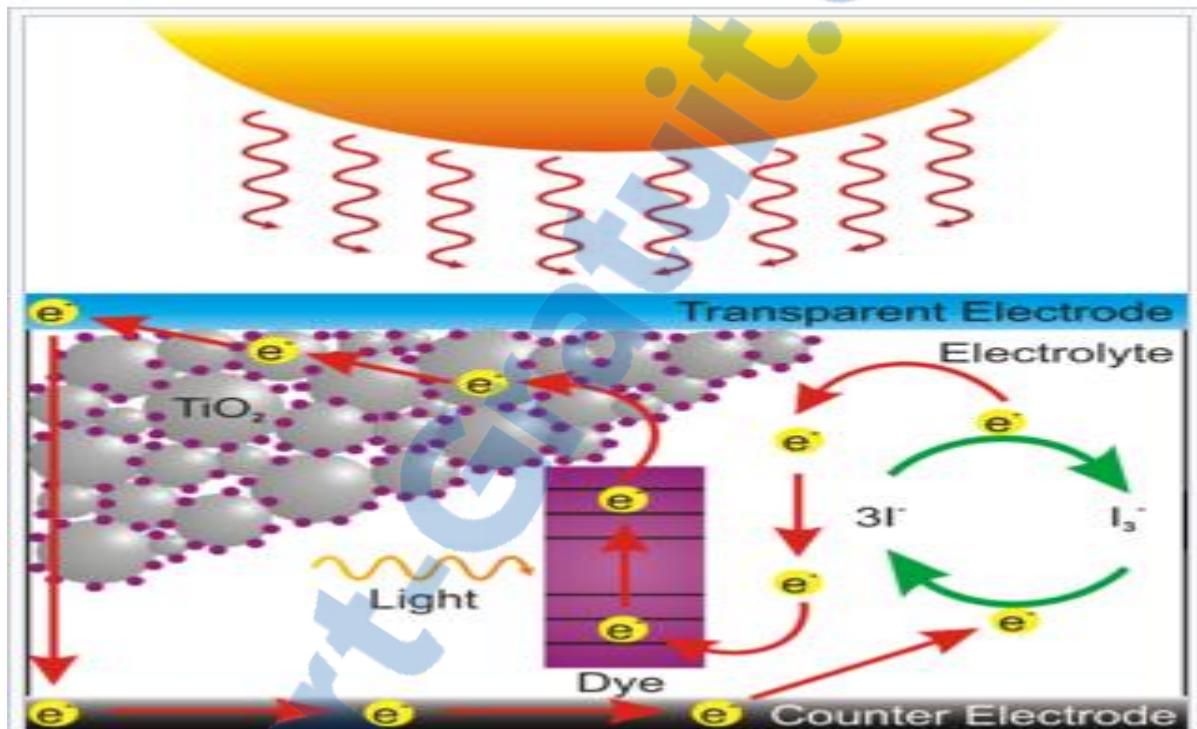


Figure (II.5): Schéma de principe d'une cellule à colorant.

II.3.5. Les cellules photovoltaïques organiques

Les recherches n'en sont qu'à leur début et l'utilisation élargie des cellules solaires organiques semblent encore assez lointaine. Il n'en reste pas moins que les matériaux organiques présentent de réelles perspectives d'avenir dans le domaine des énergies renouvelables.

Si jusqu'à présent le silicium, monocristallin, polycristallin ou amorphe, reste le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques, les cellules solaires organiques présentent de nombreux avantages potentiels.

En effet, contrairement au silicium dont la production nécessite de très hautes températures, leur fabrication implique un faible coût financier et énergétique et un faible impact environnemental. De plus, leur mise en forme à l'aide de procédés en solution (par exemple à partir d'encre ou de peintures) permet de couvrir de grandes surfaces et des substrats flexibles (films, textiles etc.).

Si aujourd'hui les rendements obtenus avec les cellules organiques (5 %) sont loin de concurrencer les cellules solaires à base de silicium cristallin (15 %), l'accélération des recherches et des innovations pourrait rapidement rendre cette filière viable. La course au rendement est lancée entre différentes équipes de chercheurs du monde entier.

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

Récemment, les chercheurs de l'équipe de Jean Roncali au laboratoire d'Ingénierie moléculaire d'Angers (Université d'Angers), ont réalisé une avancée importante avec une approche originale basée sur l'utilisation de molécules en remplacement des polymères traditionnellement utilisés dans les cellules solaires organiques. *Cela va extrêmement vite*, explique Jean Roncali. *Les recherches s'intensifient et les progrès sont très rapides. Les matériaux organiques offrent un gros potentiel mais il faut beaucoup de travail.*

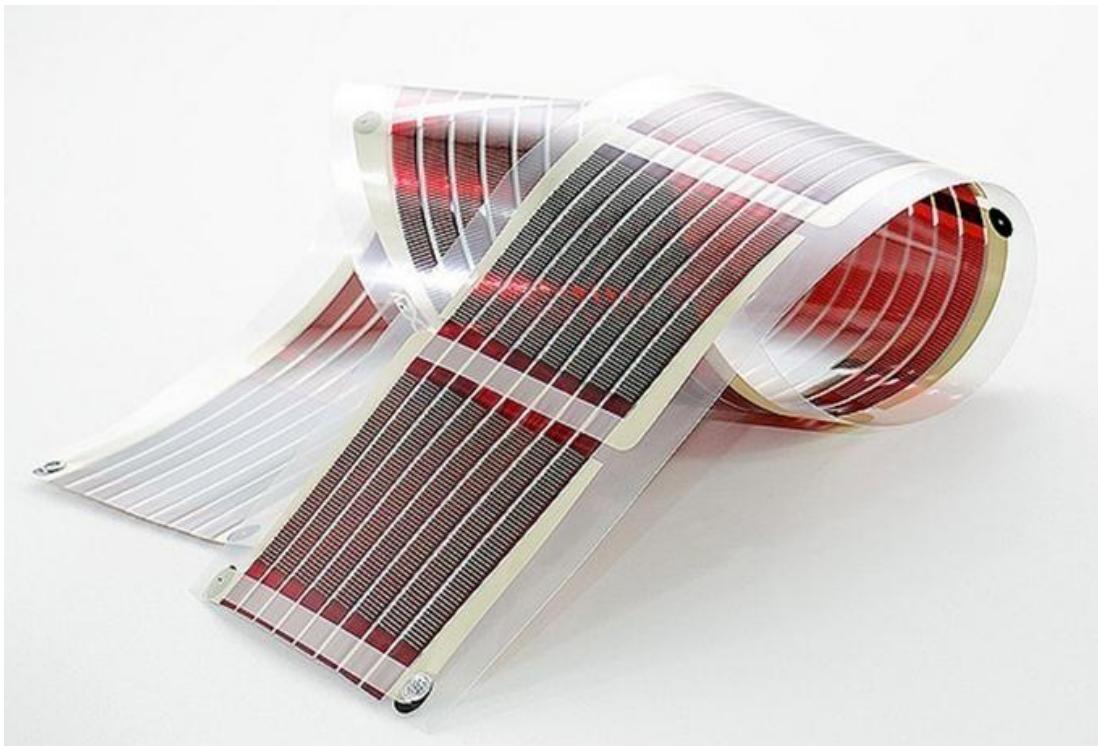


Figure (II.6): Bande imprimée de cellule organique photovoltaïque.

On rappellera que le développement des cellules organiques solaires peut représenter un vrai « Game-changer » dans les problématiques énergétiques et écologiques globales. Les avantages de ces cellules organiques sont, en effet, nombreux. Fines, résistantes, flexibles, peu couteuses, elles peuvent se monter sur des structures flexibles, plus fines et facilement remplaçables et recyclables. Ainsi, on peut, par exemple, placer ces cellules photovoltaïques sur de grandes toiles à coller sur les murs où les toitures, un peu comme du papier-peint, pour générer de l'électricité. Ces cellules, une fois maîtrisées, pourraient éventuellement s'intégrer dans divers matériaux pour les rendre générateurs d'électricité et recharger nos appareils en toute facilité.

II.4. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque

Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentes dans chaque composant. La structure d'une cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces est présentée sur la figure II.7.

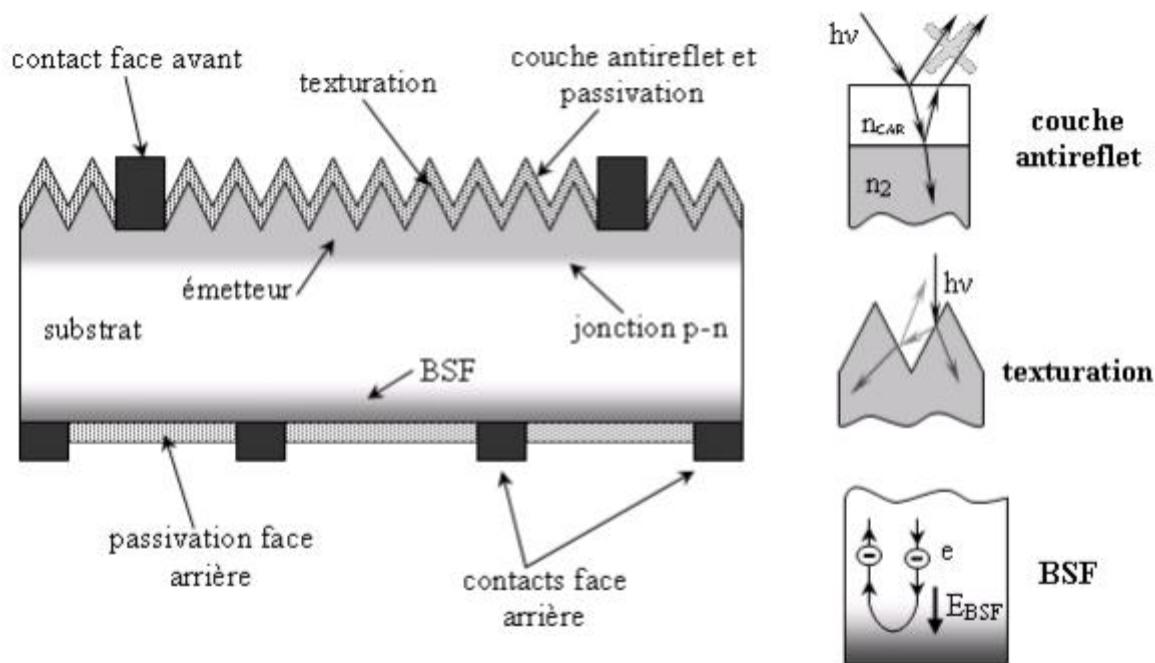


Figure (II.7) : Composition d'une cellule PV.

II.4.1. Passivation des faces avant et arrière

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrate de silicium hydrogéné.

II.4.2. Texturation de la surface

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Le relief créé permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides. La texturisation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturisation : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturisation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 40% à moins de 10%.

II.4.3. Couche antireflet

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces.

L'indice et l'épaisseur de cette couche sont ajustés pour obtenir une lame quarte d'onde, l'objectif étant de minimiser le coefficient de réflexion de la cellule en créant des interférences destructives.

II.4.4. Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique $I=f(V)$ du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement.

Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multicristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées.

II.4.5. BSF

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction p+-p) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation.

La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée.

II.5. De la cellule au panneau

II.5.1. Introduction

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module.

II.5.2. Définition d'un panneau

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

Les panneaux sont tout simplement un assemblage de cellules photovoltaïque, 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.



Figure (II.8): Photographie des panneaux PV.

Un module constitué de 20 cellules photovoltaïques va donc délivrer une tension U de 12v, et cela quel que soit l'ensoleillement. Mais pour faire fonctionner des appareils électriques, c'est la puissance P (en watt) qui détermine l'énergie électrique. $P=U*I$, c'est donc l'intensité du panneau qui va déterminer l'énergie électrique. C'est l'intensité qui varie en fonction de l'ensoleillement.

Nous rappellerons que l'association de plusieurs cellules nous donne un module, et l'association de plusieurs modules nous donne un panneau et l'ensemble des panneaux nous donne le champ photovoltaïque.

II.5.2.1. La mise en série des cellules

Le montage en série consiste à relier le pôle (+) d'un élément au pôle (-) d'un autre. Les voltages s'additionnent et l'ampérage reste identique.



Figure (II.9): Schéma de 4 cellules PV branchées en série.

Montage des cellules PV en série

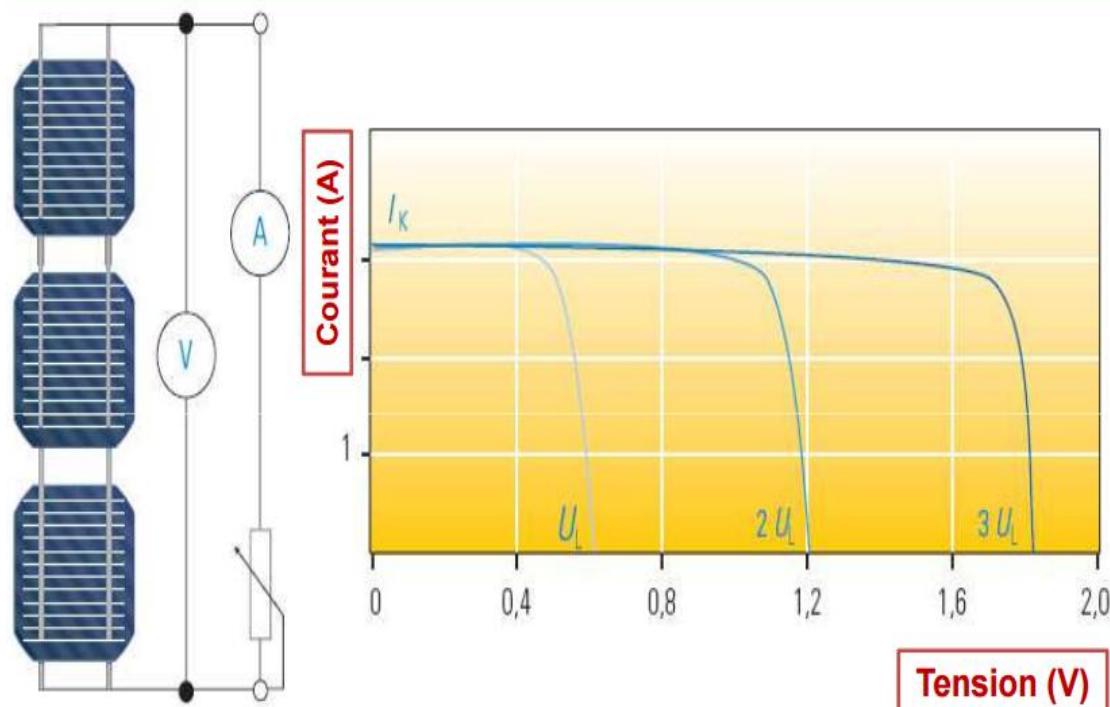


Figure (II.10): Montage des cellules PV associées en série.

II.5.2.2. La mise en parallèle des cellules

Le montage en parallèle consiste à relier les pôles plus (+) ensemble et les pôles moins (-) ensemble. Le voltage reste identique et les ampérages s'additionnent.

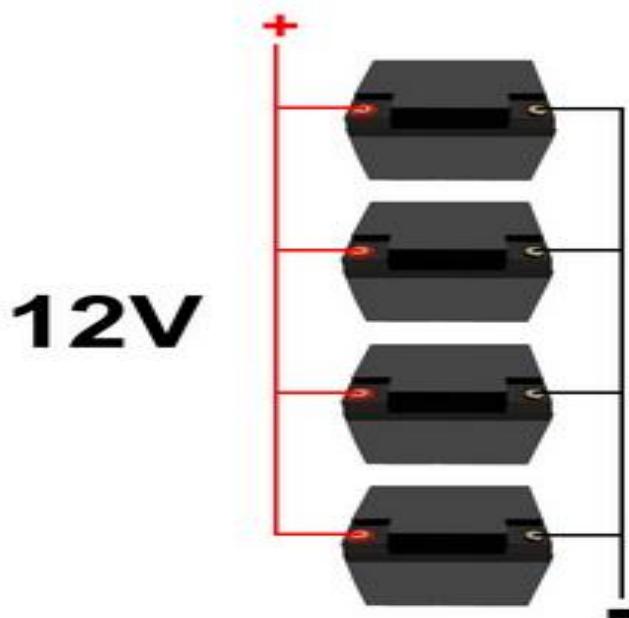


Figure (II.11): Schéma de 4 cellules PV branchées en parallèle.

Montage des cellules PV en parallèle

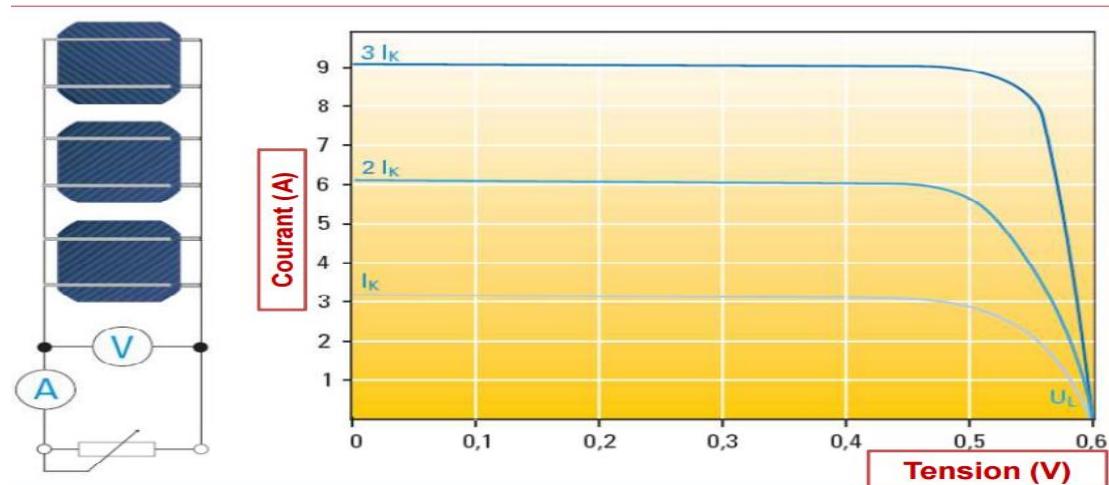


Figure (II.12): Montage des cellules PV associées en parallèle.

II.5.3. Le module photovoltaïque

Les modules photovoltaïques ont pour rôle de convertir l'énergie solaire incidente en électricité. Quand elles reçoivent une certaine quantité de lumière, les surfaces photovoltaïques (cellules ou films minces) intégrées dans un module (appelé aussi capteur) se mettent à produire de l'électricité sous forme de courant continu. Pour ce faire, les technologies usitées sont diverses et en évolution rapide. Depuis quelques années, la percée des applications en intégration aux bâtiments fait en plus assumer aux modules photovoltaïques des fonctions architecturales en tant que couverture, brise-soleil, allège, bardage ou verrière.

L'interconnexion de modules entre eux - en série ou en parallèle - pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de champ photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif.

Le système photovoltaïque est alors l'ensemble du générateur photovoltaïque et des équipements de consommations.

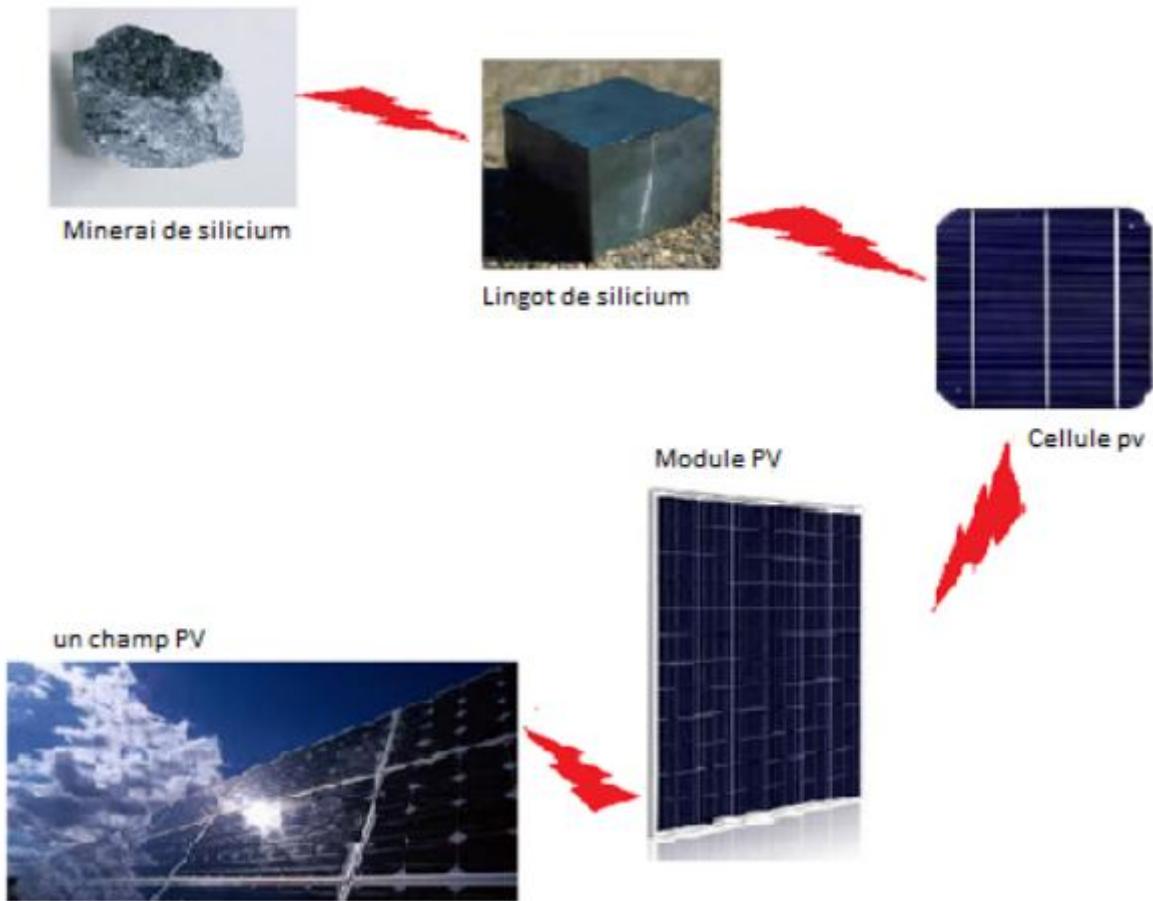


Figure (II.13): le passage d'une cellule à un champ photovoltaïque

II.5.3.1. Rendement d'un module

Le rendement du module est le rendement d'une cellule diminué par les pertes dues aux connexions des cellules entre elles, à la transparence des matériaux d'encapsulation, et éventuellement à la chute de tension dans la diode « anti-retour » lorsqu'il faut protéger la batterie d'une éventuelle décharge nocturne.

$$\eta_{\text{module}} = \eta_{\text{cellule}} \times \eta_{\text{connexion}} \times \eta_{\text{encapsulation}} \times \eta_{\text{diode}}$$

II.5.3.2. Nombre de cellule par module

Une cellule au silicium cristallin présente une tension de circuit ouvert de 0.58 à 0.60 et un point de puissance maximale situé à 0.46-0.47 V. Considérant que le module doit pouvoir charger une batterie 12V jusqu'à sa tension maximale d'environ 14V et que l'on va perdre 2 à 3 V en câblage et du fait des élévations de température il faudra disposer d'un module fournissant au minimum 16-17 V à sa puissance maximale. Si l'on divise 16.5 par 0.46, on trouve le nombre arrondi de 36, valeur extrêmement courante comme nombre de cellules en séries des modules usuels du marché. De plus, cela permet de disposer les photopiles d'un module en 4 rangées de 9 cellules. En

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

pratique, les modules les plus courants en 12 V comportent 32 à 34 cellules : cela dépend de la valeur exacte de la tension de chaque cellule et de la température d'utilisation.

II.5.3.3. Encapsulation et encadrement

Le but principal de l'encapsulation d'un ensemble de cellules solaires et des raccordés électriquement est de protéger leurs fils de l'interconnexion de l'environnement hostile dans lequel elles sont utilisées. Par exemple, les cellules solaires sont relativement minces et sujettes à des dommages mécaniques. En plus de ça la grille métallique sur la surface supérieure de la cellule solaire et le fil de l'interconnexion des cellules solaires peut être corrodée par l'eau ou la vapeur d'eau. Les deux principales fonctions de l'encapsulation est de prévenir les dommages mécanique des cellules solaires et d'empêcher l'eau ou la vapeur d'eau de la corrosion des contacts électriques.

II.6. Conclusion

Certes l'énergie solaire est une énergie propre mais cela présente des limites.

Ainsi, les panneaux solaires 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'installations 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 avantageuses telles 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.

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou polycristallin (plus de 80% de la production mondiale).

Chapitre III :

Application d'un système énergétique autonome

Calcul PV*SOL

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

III.1.Introduction :

Valentin Software développe des logiciels intelligents pour la planification, la conception, la simulation dynamique et le calcul de rendement de l'approvisionnement en énergie dans les bâtiments depuis plus de 25 ans.

Le programme **PV*SOL®** fournit aux concepteurs, aux installateurs, aux monteurs spécialisés et aux architectes des logiciels pratiques et conviviaux leur permettant de dimensionner et de concevoir des systèmes photovoltaïques, de réaliser des simulations dynamiques et d'analyser le rendement des systèmes.

Les logiciels PV*SOL® et PV*SOL® Premium sont adaptés aux systèmes raccordés au réseau et aux systèmes autonomes.

PV*SOL® et PV*SOL® Premium 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, avec types de toit librement configurable.
- Analyse simple ou détaillée de l'ombrage (**PV*SOL® Premium** avec 3D).
- Synthèse des résultats dans un rapport simplifié et un rapport détaillé avec visualisation du toit et calcul du rendement.

III.2. Fonctions de logiciel :

➤ Optimisation du câblage des modules

Pour tout nouveau projet, une pré-étude permettant de visualiser les possibilités de câblage du champ photovoltaïque suivant l'onduleur choisi vous sera proposée et vous permettra de choisir la combinaison la mieux adaptée. Les possibilités de câblage sont classées d'après les données des facteurs de dimensionnement. Ainsi, le nombre de strings, le nombre de modules par string ainsi que le type d'onduleur (un seul centralisé ou plusieurs) sont affichés.

➤ Base de données des composants

Actuellement environ 13 000 références de modules et 3 100 références d'onduleurs sont disponibles dans la vaste base de données des composants solaires qui s'actualisent continuellement par une fonction de mise à jour automatique. Les composants sont mis à jour on line par les fabricants eux-mêmes, puis contrôlés par Valentin Software avant d'être mis à disposition dans la base. Vous pouvez accélérer la sélection des composants en ajoutant des listes de favoris.

➤ Le générateur de données météorologiques MeteoSyn

Le module MeteoSyn, intégré dans le logiciel propose 8000 sites répartis dans le monde entier et peut de plus générer les valeurs uni horaires de ces sites à partir des valeurs mensuelles. Les données peuvent être facilement sélectionnées sur une carte interactive ou dans une liste. Vous pouvez aussi créer de nouvelles données météorologiques par interpolation à partir de valeurs existantes.

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

➤ Photo Plan

Le logiciel Photo Plan intégré dans PV*SOL Premium est un outil de visualisation rapide et simple permettant de fabriquer à partir des photos du bâtiment fournies par le client une image ortho rectifiée de la toiture avec les futurs panneaux photovoltaïques avec la même précision qu'un relevé de plan traditionnel. Quelques minutes suffisent pour présenter au client le projet personnalisé de sa toiture. Photo Plan contribue à aider les maîtres d'ouvrage à prendre une décision.

➤ Schéma détaillé des circuits

Le système PV est représenté sous forme de schéma avec les symboles de circuit standardisés. Le schéma peut être exporté au format DXF.

➤ Dimensionnement de tous les câbles AC et DC

Pour produire des résultats exacts, le programme calcule à la fois les pertes des câblages des strings ainsi que les pertes de puissance des câblages en courant continu (DC) et alternatif (AC) par onduleur. Vous pouvez entrer des longueurs de câble et des coupes transversales, le programme calculera la perte totale résultant de la sortie du réseau (sous conditions STC). En outre, vous pouvez dimensionner les dispositifs de protection électrique et la topologie DC par différents distributeurs. Au cours de la conception, vous pouvez entrer la perte totale (sous conditions STC).

➤ La simulation

Les calculs sont effectués à partir d'un bilan horaire. Le rendement de l'installation photovoltaïque déterminé par une simulation annuelle repose sur un modèle mathématique permettant une modélisation exacte des caractéristiques de chacun des modules photovoltaïques disponibles dans la base de données. Les rendements des modules à couche mince peuvent également être calculés avec exactitude. En présence de différents types de modules ou de modules ayant une orientation différente au sein d'une installation photovoltaïque, certains modules peuvent être regroupés pour former des générateurs photovoltaïques partiels.

➤ Calcul du rendement

Cette fonction permet d'entrer, de façon plus ou moins détaillée, les coûts des modules, des onduleurs ou du montage. Le logiciel prend également en compte les crédits d'impôts, et dans ce cas les amortissements, les déductions, les impôts acquittés et le mois de mise en service d'une installation sont pris en considération. Les différents prix de revente prévus dans la loi allemande sur les énergies renouvelables pour les installations développant une puissance allant jusqu'à 30 kW sont déjà intégrés mais peuvent être modifiés. Outre la valeur du capital, PV*SOL détermine aussi les coûts de production d'électricité et la durée d'amortissement.

➤ Représentation graphique des résultats et rapport de projet détaillé

- Rendement annuel spécifique prévu.
- facteur de rendement global.
- Ratio de performance.
- Rendement énergétique du système.
- Rendement du générateur photovoltaïque.
- Taux de couverture solaire.
- Courbes de flux d'énergie et d'autres paramètres.
- Calcul de rentabilité.

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

III.3. Les besoins énergétiques :

Avant de calculer l'énergie nécessaire pour une application, il faut bien rappeler la différence entre la puissance et l'énergie. La puissance est défini par ($P=U*I$).

Ces deux grandeurs (énergie et puissance) sont donc reliées par le temps. L'énergie est le produit de la puissance par le temps $E(kWh)=P(KW)*t(h)$.

Pratiquement, on peut se servir du tableau suivant :

Appareils	Nombre	Puissances	Durées d'utilisation par jours	Consommations journalières
Lampe	01	17watts	06 heures	140Wh
.....			

Tableau(III.1) : Grille de calcul des consommations en énergie.

III.4. Energie solaire :

La position des modules photovoltaïques par rapport au soleil influe directement sur leur production énergétique. Il est très important de bien les placer pour capter le maximum d'irradiation solaire.

Quant à l'inclinaison, elle indique l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal, elle se compte en degrés.

III.5. dimensionnement d'onduleur :

Avant de dimensionner un onduleur, on devra décider quel modèle doit être installé.

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en courant alternatif une énergie électrique de type continue comme celle produite par les panneaux photovoltaïques.

III.6. Définition de la capacité de la batterie :

Capacité des batteries (Cs) en ampère heure (Ah).

La capacité d'une batterie est la quantité d'énergie électrique qu'elle est capable de restituer après avoir reçu une charge complète, pour un régime de courant de décharge donné, une tension d'arrêt et une température définies.

III.7. rendement avec consommation :

A partir des données fournies par l'utilisateur, on détermine l'énergie PV utilisable, consommation avec délestage, déchargement des batteries, couverture de la consommation via le système de batterie, Pertes de système.

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

III.8.Etude d'un cas (avec le logiciel PVSOL) :

- Dans un premier temps, on crée un nouveau projet, cette fenêtre ci-dessous va apparaître :

Le logiciel nous demande d'entrer les données du projet à savoir les responsables, référence d'offre, info client, prise en service, titre de projet, image du projet qu'on peut importer... .

Ce sont des données facile à introduire.

The screenshot shows the PVSOL premium 2017 software interface. The main window is titled "PV*SOL premium 2017 (R8) Version d'essai - [simulation2.pvsol.pvprj]". The menu bar includes "Fichier", "Base de données", "Options", "Langue", and "Aide". The toolbar contains icons for file operations like Open, Save, Print, and Project Management. The left panel is titled "Données du projet" and contains fields for "Référence d'offre" (Offer reference), "Prise en service" (Service date) set to "01/06/2017", "Responsable" (Responsible) set to "yahi_gharedine", "Titre de projet" (Project title), "Image du projet" (Project image), and sections for "Infos client" (Client info) with fields for Réf. client, Interlocuteur, Société, Téléphone, Fax, E-mail, and Adresse. The right panel displays project details in a tree view:

- Données du projet**
 - Titre de projet: 01/06/2017
 - Référence offre: yahi_gharedine
 - Responsable: yahi_gharedine
 - Prise en service: 01/06/2017
- Type d'installation, météo et réseau**
 - Type d'installation: Installations PV autonomes (systèmes S...)
 - Données climatiques: TLEMCEN/ZENATA
 - Résolution des données: 1h
 - Réseau CA: 230 V, 3-phasé, cos φ = 0,99
- Consommation**
 - Consommation totale: 1832 kWh
 - Crête charge: 1,8 kW
 - Résolution des données: 1h
- Modules PV**
 - Superficie de module 1
 - Données module: Example poly 200 W
 - Fabricant: PV*SOL
 - Nombre de modules: 18
 - Puissance du générateur PV: 3,6 kWc
 - Inclinaison: 30°
 - Orientation: 180°
 - Type de montage: Parallèle au toit
- Onduleurs**
 - Superficie de module 1
 - 2x Onduleur1
 - Example
 - Fabricant: PV*SOL
 - Raccordement: MPP 1: 1 x 9
- Câbles**
 - Perte totale: 0 % (0 W)

At the bottom left, there are three warning icons:

- A yellow triangle: Au moins 2 kWh d'énergie de batterie sont nécessaires par kW de puissance d'onduleur à batterie.
- A yellow triangle: Au moins 4,8 kWh d'énergie de batterie sont nécessaires par kWc de puissance PV.
- A blue circle: Une copie de sauvegarde automatique est disponible. (Fichier > Protections Autosave).

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

- Ensuite, en cliquant sur l'icône suivante, la fenêtre ci-dessous va apparaître, le logiciel nous demande de spécifier les fichiers : type d'installation, type de planification, données climatiques et réseau courant alternatif CA.

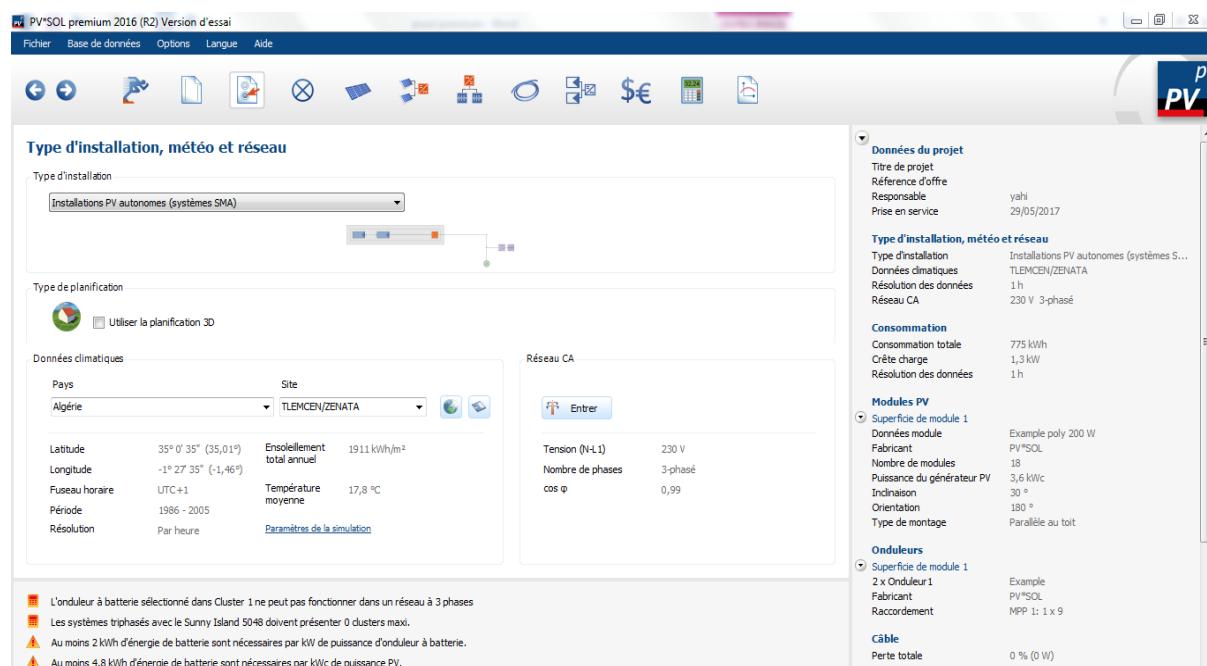
Pour le fichier ‘données climatiques’, il suffit de choisir le pays et la ville où on s’intéresse à installer les panneaux photovoltaïques. Il existe pas mal de villes dans la base des données, et on peut même ajouter des villes qui ne figurent pas dans la liste.

Nous avons possibilité de travailler en mode 3D en cochant la case correspondante, sinon, on la décochant pour travailler dans la partie dimensionnement sans planification 3D tel que nous avons travaillé dans notre exemple.

Les PV* SOL premiums présentent plusieurs possibilités de dimensionnement :

- Système PV raccordé au réseau.
- Installation PV raccordée au réseau avec consommateurs électriques.
- Installation PV raccordée au réseau avec consommateurs électriques et installation batterie.
- Installation PV raccordée au réseau avec consommateurs électriques et véhicule électrique.
- Installation PV raccordée au réseau avec consommateurs électriques, véhicule électrique et système de batterie.
- Installations PV autonomes (systèmes SMA).
- Installation PV autonome avec générateur d’appoint (système SMA).

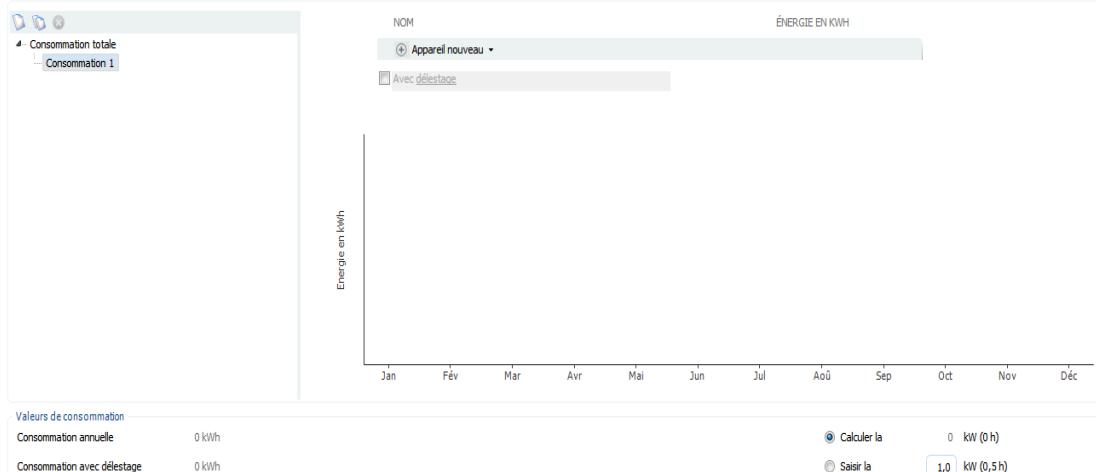
Dans cet exemple, nous allons s’intéresser à une installation PV autonome (système SMA).



CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

- En cliquant sur suivant, logiciel nous demande d'entrer la consommation ou bien les besoins énergétiques du bâtiment.

Consommation



Nous avons trois possibilités à faire cette étape :

- **Charger et importer un profil de charge** : dont la base de donnée du logiciel nous permet d'avoir quelques profil de consommation selon l'étude du bâtiment par exemple un foyer d'une seul personne, il consomme 2287KWh par an.
- **Définir le profil de charge** : en précisant un appareil quelconque avec une consommation annuelle de cet appareil, et définir s'il consomme une certaine énergie pendant le weekend ou pas, et bien sûre, on peut visualiser les profils de consommation selon les saisons de l'année.
- **Définir les consommations individuelles** : c'est faire rentrer appareil par appareil en spécifiant le nom de l'appareil, logiciel nous permet d'avoir le type de l'appareil, à utilisation continu ou bien discontinu. On peut charger la puissance directement à partir de la base des données du logiciel, il y a la période de service dont on peut modifier, on peut aussi modifier l'heure du fonctionnement.

Nos besoins énergétiques utilisés dans notre exemple sont illustrés dans la figure (III.2).

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

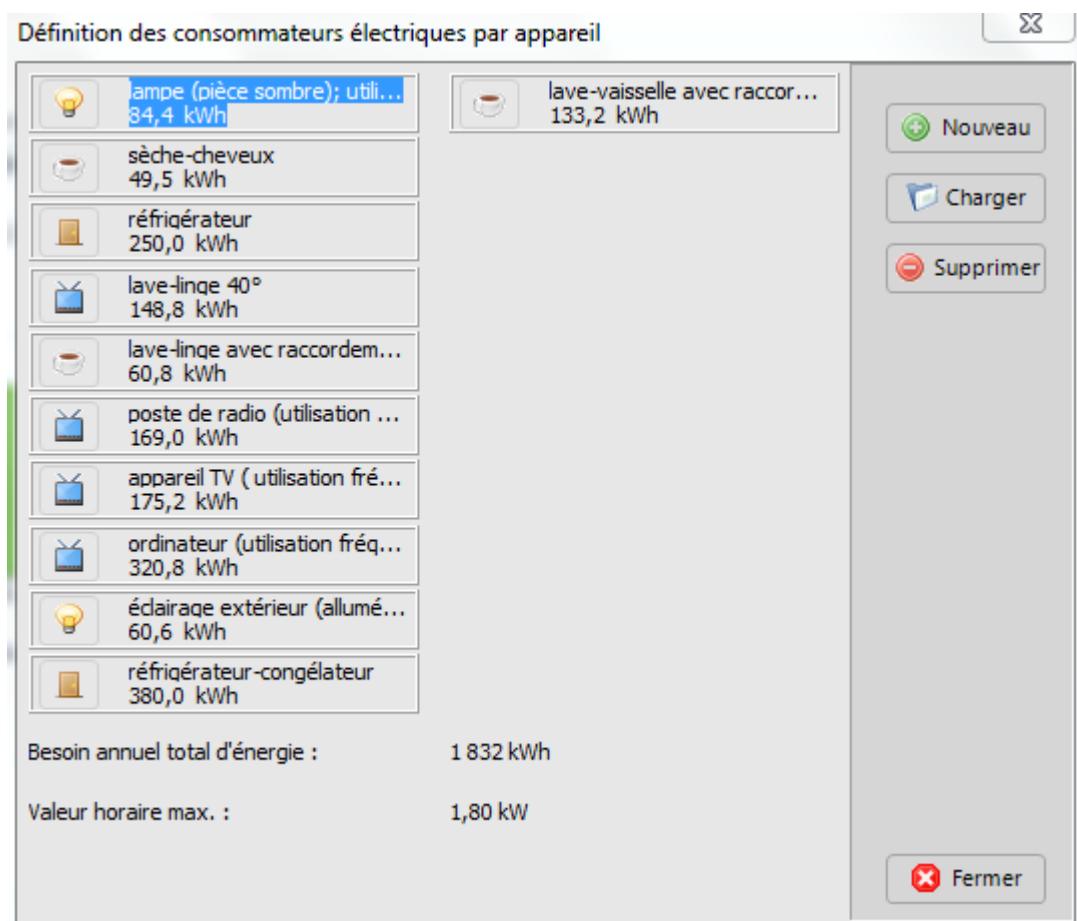
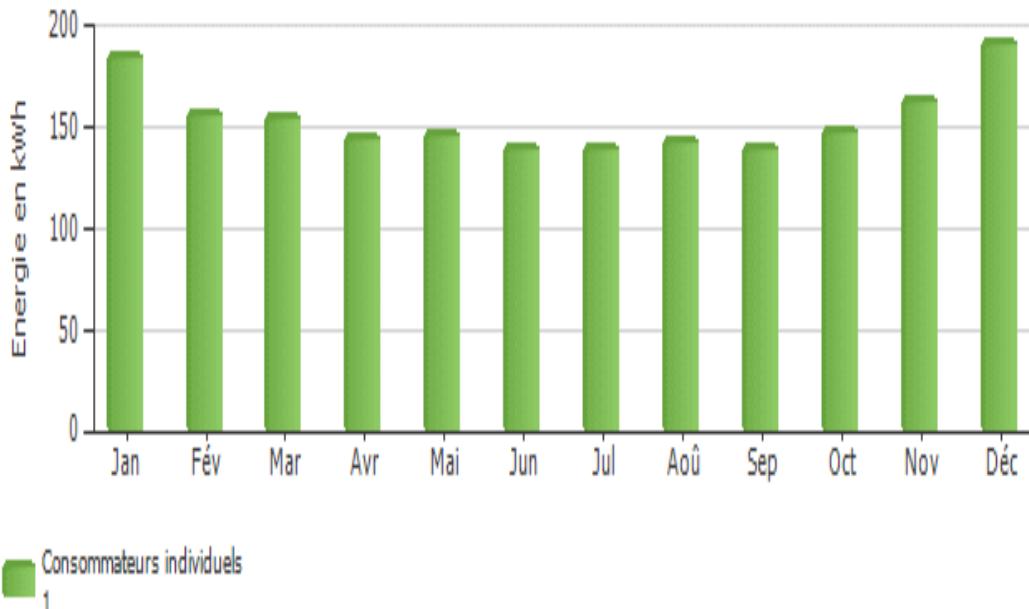


Figure (III.2) : Les consommations électriques par appareil utilisées.

La valeur horaire max désigne le kilowatt crête à installer.

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

➤ Résultats obtenus de la consommation individuelle:



- Nous avons par la suite choisir le model du module PV, fixer le nombre de module et le type de montage :

The screenshot shows the 'Modules PV' configuration window in the PV*SOL software. The left sidebar lists 'Superficie de module 1', 'Ombrage', and 'Degradation des modules'. The main panel includes fields for 'Société' (PV*SOL), 'Modèle' (Example poly 200 W), and various mounting options like 'Parallèle au toit'. It also shows 'Nombre de modules' (18), 'Puissance du générateur PV' (3,6 kWc), and 'Surface génératrice PV' (30,2 m²). A compass rose indicates orientation with 'Azimut 0°'.

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

- Le choix automatique des onduleurs :

Onduleurs

Raccorder les surfaces des modules ensemble

Suggérer le raccordement (d'après Sélection) Sélectionner raccordement

VÉRIFICATION VALEURS MODIFIER

✓ RACCORDEMENT: Superficie de module 1

ONDULEUR 1:

✓ 2 x PV*SOL Example

✓ MPP 1: 1 String x 9 Modules en série

Nouvel onduleur

Superficie de module:

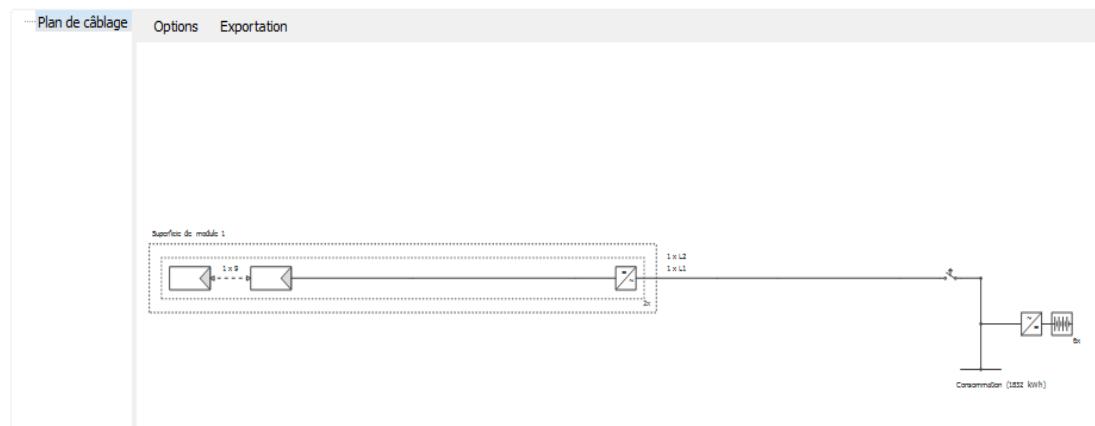
Superficie de module 1 18 x Example poly 200 W = 3,6 kWc

Options: Vérifier l'installation Limites de raccordement

Onduleur seulement à partir de Sélectionner les favoris

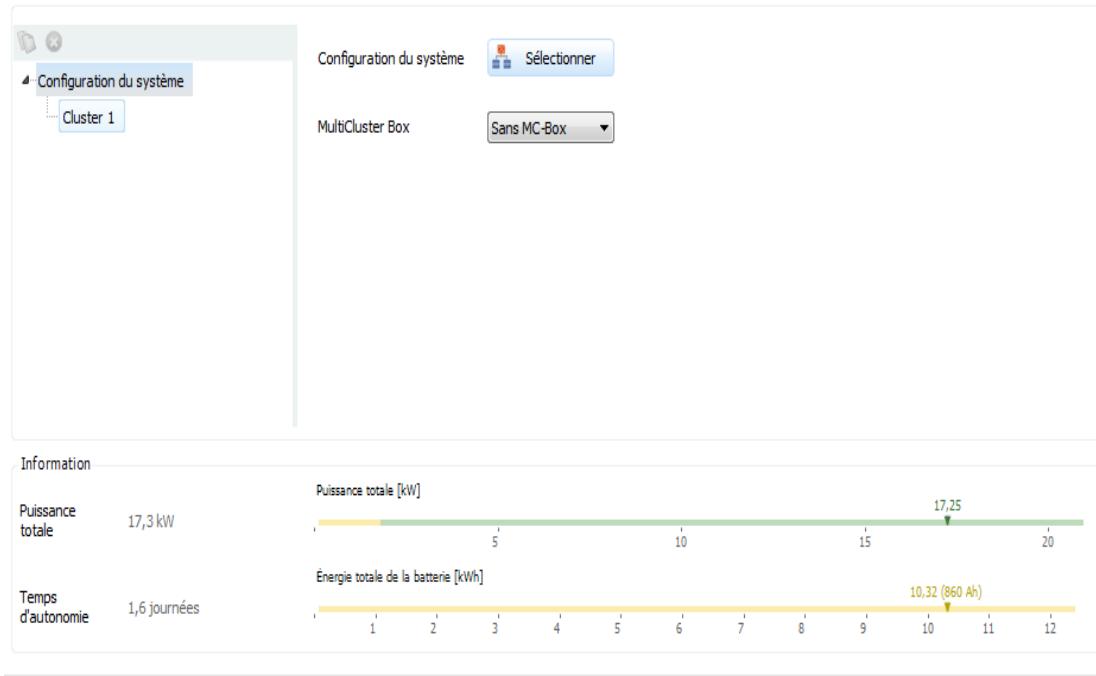
- En cliquant toujours sur suivant, notre plan de système va apparaître :

Plan



CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

Onduleur à batteries et batterie



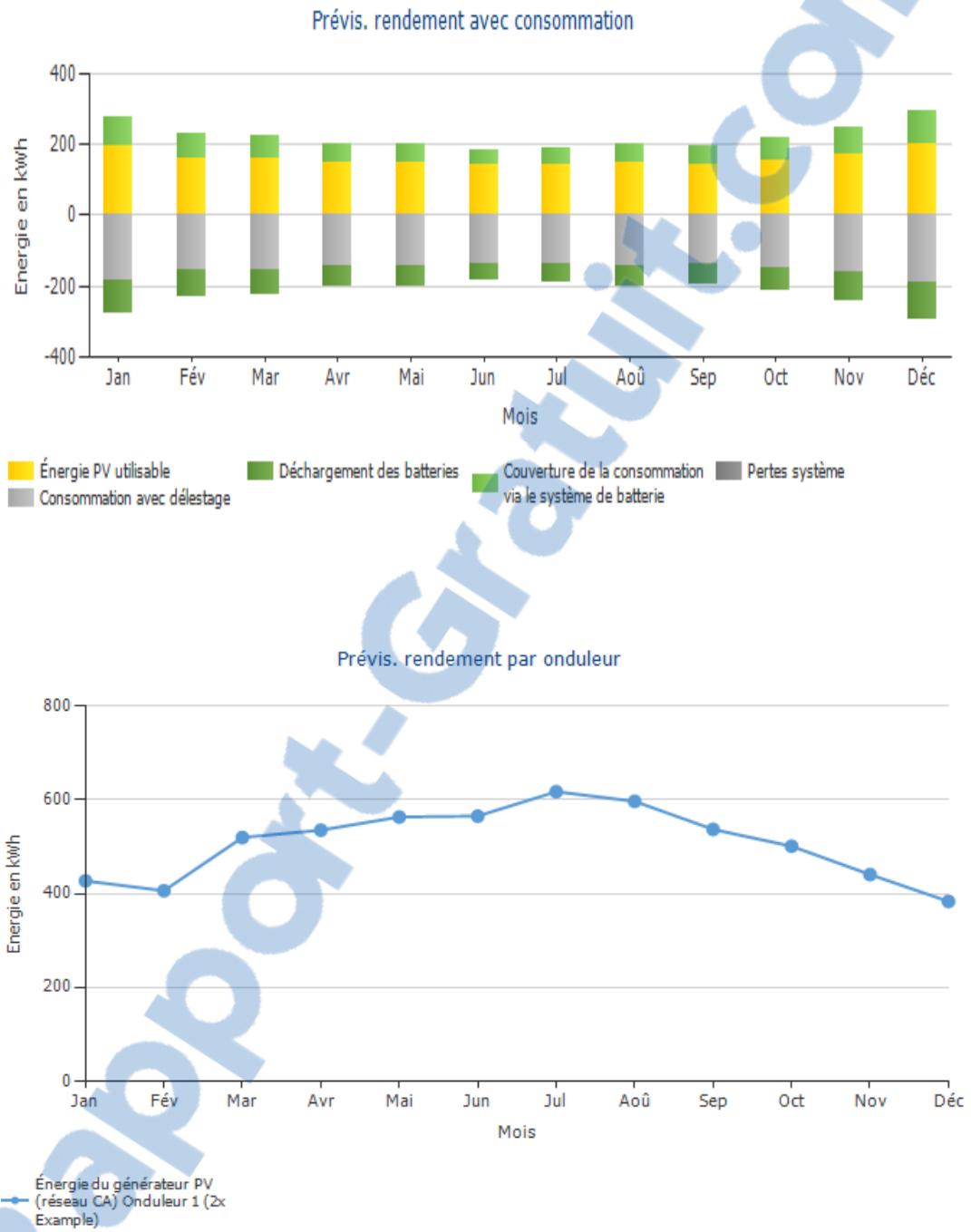
➤ Un tableau de rentabilité sera dressé :

Rentabilité

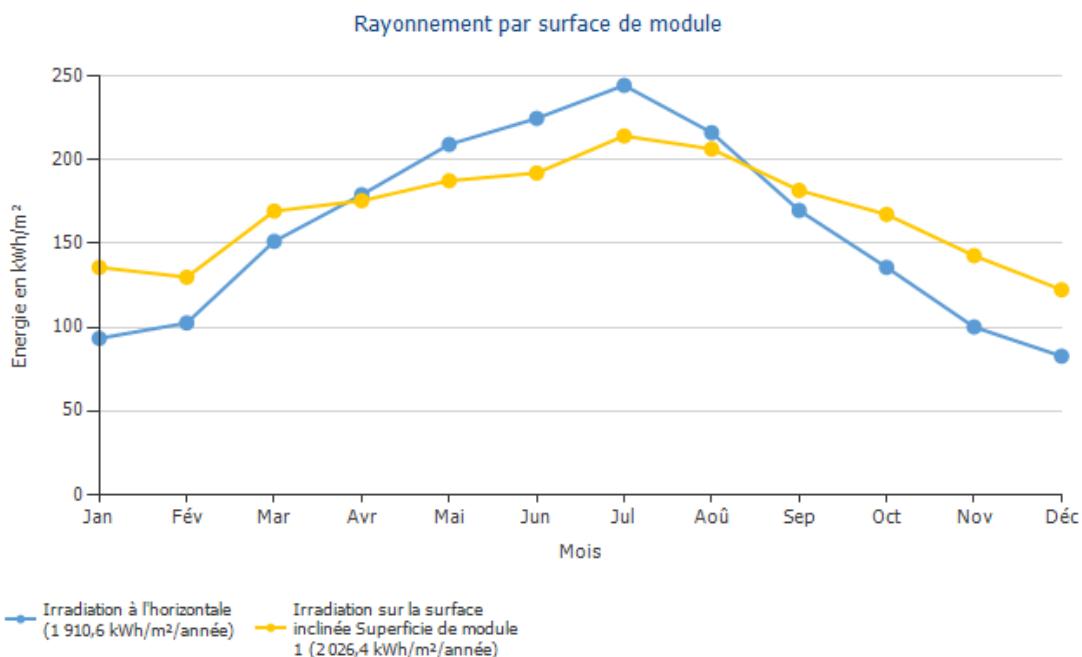
période considérée	20	Années	Taux d'intérêt du capital	1,00	%		
Composants	Type	Eléments installés	Prix unitaire	Coûts d'installation	Durée de vie	Nombre	Coûts pendant la péri
Modules	Example poly 200 W	18	0,00 €	0,00 €	20,00	18	0,00 €
Onduleurs	Example	2	0,00 €	0,00 €	20,00	2	0,00 €
Onduleur à batteries	Sunny Island 5048	3	0,00 €	0,00 €	20,00	3	0,00 €
Batteries	2V 1050 Ah valve re...	6	0,00 €	0,00 €	20,00	6	0,00 €

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

III.8.1.Résultat de simulation :



CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL



III.8.conclusion :

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque est essentiel pour son bon fonctionnement et pour la satisfaction de l'utilisateur.

Les méthodes de dimensionnement diffèrent essentiellement selon le type de raccordement, c'est à dire si le système est connecté au réseau électrique ou s'il en est indépendant ou "isolé".

Dans tous les cas il est nécessaire de connaître :

1. le besoin, la démarche.
2. Le gisement d'énergie solaire du lieu concerné.
3. le choix des modules photovoltaïques, leur implantation et la structure support.
4. le choix des composants électriques assurant la régulation et la protection du système et des usagers.
5. la mise en œuvre : câblage, maintenance.

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

Chapitre IV : Dimensionnement d'une station PV autonome

Pompage

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

III.1.Introduction :

Valentin Software développe des logiciels intelligents pour la planification, la conception, la simulation dynamique et le calcul de rendement de l'approvisionnement en énergie dans les bâtiments depuis plus de 25 ans.

Le programme **PV*SOL®** fournit aux concepteurs, aux installateurs, aux monteurs spécialisés et aux architectes des logiciels pratiques et conviviaux leur permettant de dimensionner et de concevoir des systèmes photovoltaïques, de réaliser des simulations dynamiques et d'analyser le rendement des systèmes.

Les logiciels PV*SOL® et PV*SOL® Premium sont adaptés aux systèmes raccordés au réseau et aux systèmes autonomes.

PV*SOL® et PV*SOL® Premium 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, avec types de toit librement configurable.
- Analyse simple ou détaillée de l'ombrage (**PV*SOL® Premium** avec 3D).
- Synthèse des résultats dans un rapport simplifié et un rapport détaillé avec visualisation du toit et calcul du rendement.

III.2. Fonctions de logiciel :

➤ Optimisation du câblage des modules

Pour tout nouveau projet, une pré-étude permettant de visualiser les possibilités de câblage du champ photovoltaïque suivant l'onduleur choisi vous sera proposée et vous permettra de choisir la combinaison la mieux adaptée. Les possibilités de câblage sont classées d'après les données des facteurs de dimensionnement. Ainsi, le nombre de strings, le nombre de modules par string ainsi que le type d'onduleur (un seul centralisé ou plusieurs) sont affichés.

➤ Base de données des composants

Actuellement environ 13 000 références de modules et 3 100 références d'onduleurs sont disponibles dans la vaste base de données des composants solaires qui s'actualisent continuellement par une fonction de mise à jour automatique. Les composants sont mis à jour on line par les fabricants eux-mêmes, puis contrôlés par Valentin Software avant d'être mis à disposition dans la base. Vous pouvez accélérer la sélection des composants en ajoutant des listes de favoris.

➤ Le générateur de données météorologiques MeteoSyn

Le module MeteoSyn, intégré dans le logiciel propose 8000 sites répartis dans le monde entier et peut de plus générer les valeurs uni horaires de ces sites à partir des valeurs mensuelles. Les données peuvent être facilement sélectionnées sur une carte interactive ou dans une liste. Vous pouvez aussi créer de nouvelles données météorologiques par interpolation à partir de valeurs existantes.

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

➤ Photo Plan

Le logiciel Photo Plan intégré dans PV*SOL Premium est un outil de visualisation rapide et simple permettant de fabriquer à partir des photos du bâtiment fournies par le client une image ortho rectifiée de la toiture avec les futurs panneaux photovoltaïques avec la même précision qu'un relevé de plan traditionnel. Quelques minutes suffisent pour présenter au client le projet personnalisé de sa toiture. Photo Plan contribue à aider les maîtres d'ouvrage à prendre une décision.

➤ Schéma détaillé des circuits

Le système PV est représenté sous forme de schéma avec les symboles de circuit standardisés. Le schéma peut être exporté au format DXF.

➤ Dimensionnement de tous les câbles AC et DC

Pour produire des résultats exacts, le programme calcule à la fois les pertes des câblages des strings ainsi que les pertes de puissance des câblages en courant continu (DC) et alternatif (AC) par onduleur. Vous pouvez entrer des longueurs de câble et des coupes transversales, le programme calculera la perte totale résultant de la sortie du réseau (sous conditions STC). En outre, vous pouvez dimensionner les dispositifs de protection électrique et la topologie DC par différents distributeurs. Au cours de la conception, vous pouvez entrer la perte totale (sous conditions STC).

➤ La simulation

Les calculs sont effectués à partir d'un bilan horaire. Le rendement de l'installation photovoltaïque déterminé par une simulation annuelle repose sur un modèle mathématique permettant une modélisation exacte des caractéristiques de chacun des modules photovoltaïques disponibles dans la base de données. Les rendements des modules à couche mince peuvent également être calculés avec exactitude. En présence de différents types de modules ou de modules ayant une orientation différente au sein d'une installation photovoltaïque, certains modules peuvent être regroupés pour former des générateurs photovoltaïques partiels.

➤ Calcul du rendement

Cette fonction permet d'entrer, de façon plus ou moins détaillée, les coûts des modules, des onduleurs ou du montage. Le logiciel prend également en compte les crédits d'impôts, et dans ce cas les amortissements, les déductions, les impôts acquittés et le mois de mise en service d'une installation sont pris en considération. Les différents prix de revente prévus dans la loi allemande sur les énergies renouvelables pour les installations développant une puissance allant jusqu'à 30 kW sont déjà intégrés mais peuvent être modifiés. Outre la valeur du capital, PV*SOL détermine aussi les coûts de production d'électricité et la durée d'amortissement.

➤ Représentation graphique des résultats et rapport de projet détaillé

- Rendement annuel spécifique prévu.
- facteur de rendement global.
- Ratio de performance.
- Rendement énergétique du système.
- Rendement du générateur photovoltaïque.
- Taux de couverture solaire.
- Courbes de flux d'énergie et d'autres paramètres.
- Calcul de rentabilité.

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

III.3. Les besoins énergétiques :

Avant de calculer l'énergie nécessaire pour une application, il faut bien rappeler la différence entre la puissance et l'énergie. La puissance est défini par ($P=U*I$).

Ces deux grandeurs (énergie et puissance) sont donc reliées par le temps. L'énergie est le produit de la puissance par le temps $E(kWh)=P(KW)*t(h)$.

Pratiquement, on peut se servir du tableau suivant :

Appareils	Nombre	Puissances	Durées d'utilisation par jours	Consommations journalières
Lampe	01	17watts	06 heures	140Wh
.....			

Tableau(III.1) : Grille de calcul des consommations en énergie.

III.4. Energie solaire :

La position des modules photovoltaïques par rapport au soleil influe directement sur leur production énergétique. Il est très important de bien les placer pour capter le maximum d'irradiation solaire.

Quant à l'inclinaison, elle indique l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal, elle se compte en degrés.

III.5. dimensionnement d'onduleur :

Avant de dimensionner un onduleur, on devra décider quel modèle doit être installé.

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en courant alternatif une énergie électrique de type continue comme celle produite par les panneaux photovoltaïques.

III.6. Définition de la capacité de la batterie :

Capacité des batteries (Cs) en ampère heure (Ah).

La capacité d'une batterie est la quantité d'énergie électrique qu'elle est capable de restituer après avoir reçu une charge complète, pour un régime de courant de décharge donné, une tension d'arrêt et une température définies.

III.7. rendement avec consommation :

A partir des données fournies par l'utilisateur, on détermine l'énergie PV utilisable, consommation avec délestage, déchargement des batteries, couverture de la consommation via le système de batterie, Pertes de système.

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

III.8.Etude d'un cas (avec le logiciel PVSOL) :

- Dans un premier temps, on crée un nouveau projet, cette fenêtre ci-dessous va apparaître :

Le logiciel nous demande d'entrer les données du projet à savoir les responsables, référence d'offre, info client, prise en service, titre de projet, image du projet qu'on peut importer... .

Ce sont des données facile à introduire.

The screenshot shows the PVSOL software interface with the title bar "PVSOL premium 2017 (R8) Version d'essai - [simulation2.pvprj]". The menu bar includes Fichier, Base de données, Options, Langue, and Aide. The toolbar contains icons for project creation, opening, saving, and various system functions. The main window is divided into several sections:

- Données du projet**:
 - Reference d'offre: []
 - Prise en service: 01/06/2017 []
 - Responsable: yahi_gharedine
 - Titre de projet: []
 - Image du projet: []
 - Buttons: Charger (Load), Supprimer (Delete)
 - Description du projet: []
 - Adresse de l'installation: []
- Données du projet** (right panel):
 - Titre de projet: 01/06/2017
 - Reference d'offre: yahi_gharedine
 - Prise en service: 01/06/2017
 - Type d'installation, météo et réseau:
 - Type d'installation: Installations PV autonomes (systèmes S...)
 - Données climatiques: TLEMCEN/ZENATA
 - Résolution des données: 1h
 - Réseau CA: 230 V, 3-phasé, cos φ = 0,99
 - Consommation:
 - Consommation totale: 1832 kWh
 - Crête charge: 1,8 kW
 - Résolution des données: 1h
 - Modules PV:
 - Superficie de module 1:
 - Données module: Example poly 200 W
 - Fabricant: PV*SOL
 - Nombre de modules: 18
 - Puissance du générateur PV: 3,6 kWc
 - Inclinaison: 30°
 - Orientation: 180°
 - Type de montage: Parallèle au toit
 - Onduleurs:
 - Superficie de module 1:
 - 2x Onduleur1: Example
 - Fabricant: PV*SOL
 - Raccordement: MPP 1: 1 x 9
 - Câbles:
 - Perte totale: 0 % (0 W)

- ⚠ Au moins 2 kWh d'énergie de batterie sont nécessaires par kW de puissance d'onduleur à batterie.
- ⚠ Au moins 4,8 kWh d'énergie de batterie sont nécessaires par kWc de puissance PV.
- ⓘ Une copie de sauvegarde automatique est disponible. (Fichier > Protections Autosave)

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

- Ensuite, en cliquant sur l'icône suivante, la fenêtre ci-dessous va apparaître, le logiciel nous demande de spécifier les fichiers : type d'installation, type de planification, données climatiques et réseau courant alternatif CA.

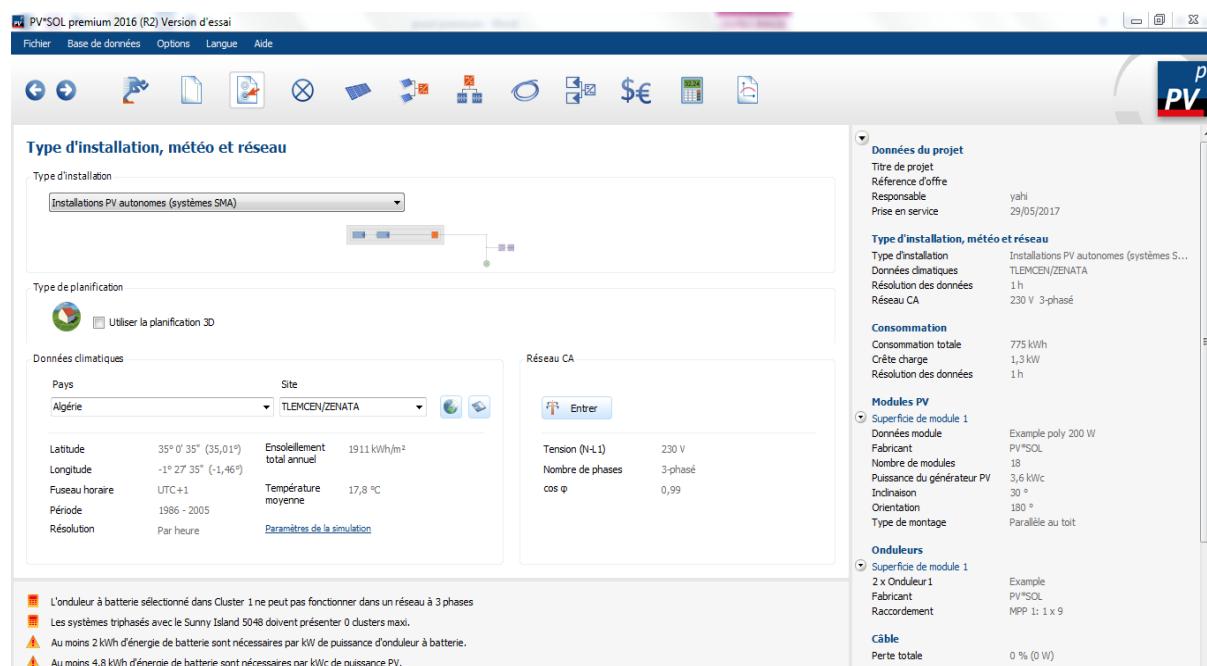
Pour le fichier ‘données climatiques’, il suffit de choisir le pays et la ville où on s’intéresse à installer les panneaux photovoltaïques. Il existe pas mal de villes dans la base des données, et on peut même ajouter des villes qui ne figurent pas dans la liste.

Nous avons possibilité de travailler en mode 3D en cochant la case correspondante, sinon, on la décochant pour travailler dans la partie dimensionnement sans planification 3D tel que nous avons travaillé dans notre exemple.

Les PV* SOL premiums présentent plusieurs possibilités de dimensionnement :

- Système PV raccordé au réseau.
- Installation PV raccordée au réseau avec consommateurs électriques.
- Installation PV raccordée au réseau avec consommateurs électriques et installation batterie.
- Installation PV raccordée au réseau avec consommateurs électriques et véhicule électrique.
- Installation PV raccordée au réseau avec consommateurs électriques, véhicule électrique et système de batterie.
- Installations PV autonomes (systèmes SMA).
- Installation PV autonome avec générateur d’appoint (système SMA).

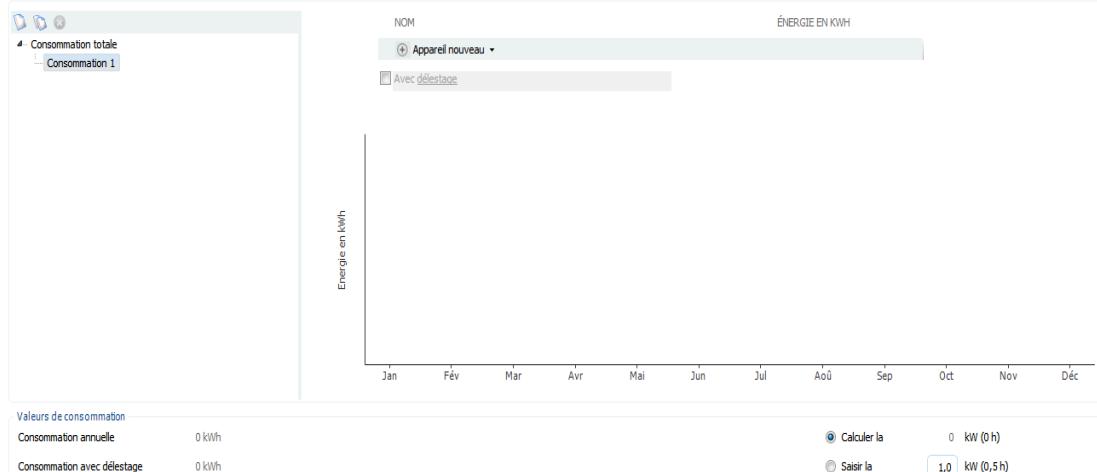
Dans cet exemple, nous allons s’intéresser à une installation PV autonome (système SMA).



CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

- En cliquant sur suivant, logiciel nous demande d'entrer la consommation ou bien les besoins énergétiques du bâtiment.

Consommation



Nous avons trois possibilités à faire cette étape :

- **Charger et importer un profil de charge** : dont la base de donnée du logiciel nous permet d'avoir quelques profil de consommation selon l'étude du bâtiment par exemple un foyer d'une seul personne, il consomme 2287KWh par an.
- **Définir le profil de charge** : en précisant un appareil quelconque avec une consommation annuelle de cet appareil, et définir s'il consomme une certaine énergie pendant le weekend ou pas, et bien sûre, on peut visualiser les profils de consommation selon les saisons de l'année.
- **Définir les consommations individuelles** : c'est faire rentrer appareil par appareil en spécifiant le nom de l'appareil, logiciel nous permet d'avoir le type de l'appareil, à utilisation continu ou bien discontinu. On peut charger la puissance directement à partir de la base des données du logiciel, il y a la période de service dont on peut modifier, on peut aussi modifier l'heure du fonctionnement.

Nos besoins énergétiques utilisés dans notre exemple sont illustrés dans la figure (III.2).

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

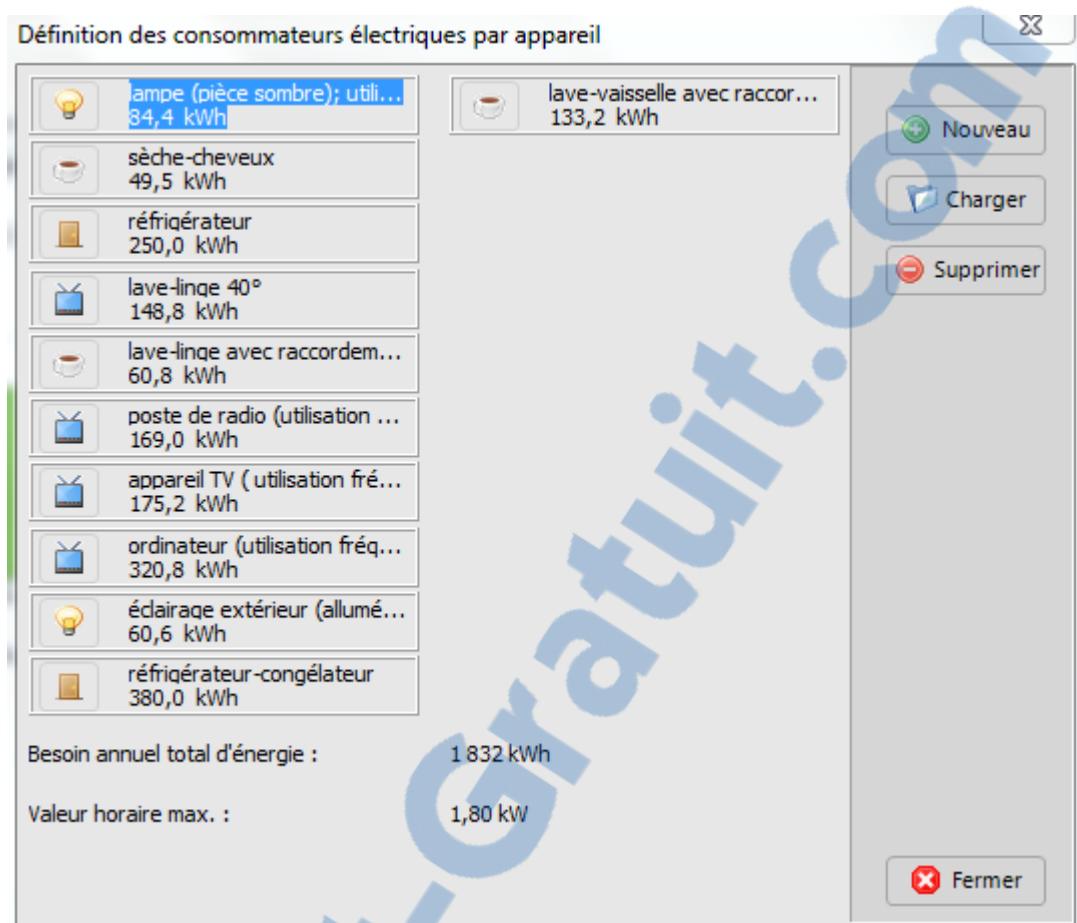
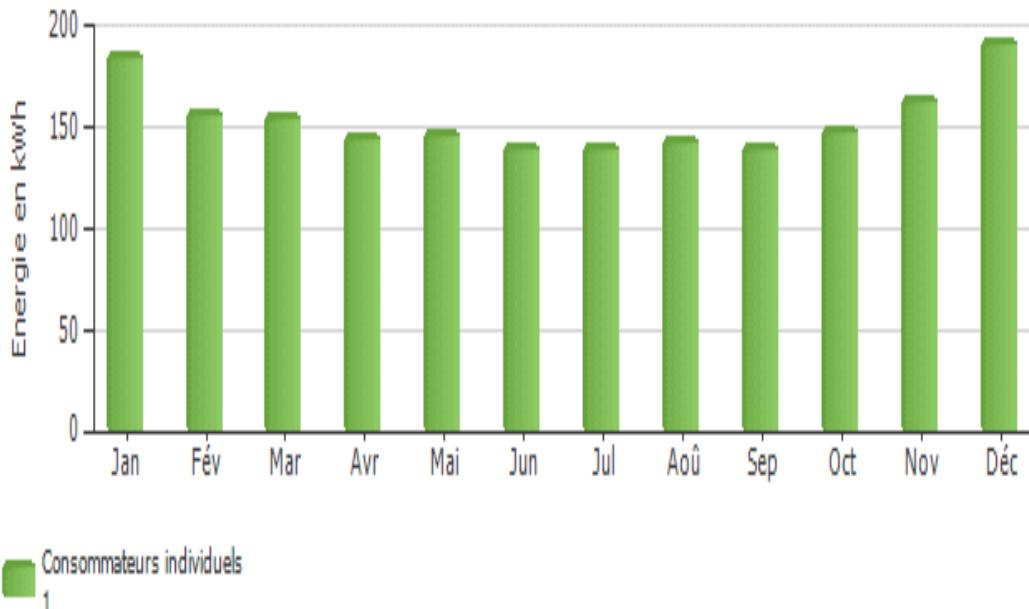


Figure (III.2) : Les consommations électriques par appareil utilisées.

La valeur horaire max désigne le kilowatt crête à installer.

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

➤ Résultats obtenus de la consommation individuelle:



- Nous avons par la suite choisir le modèle du module PV, fixer le nombre de module et le type de montage :

The screenshot shows the 'Modules PV' configuration window in the PV*SOL software. The left sidebar lists 'Superficie de module 1', 'Ombrage', and 'Degradation des modules'. The main panel includes fields for 'Société' (PV*SOL), 'Modèle' (Example poly 200 W), and various mounting options like 'Parallèle au toit'. It also shows 'Nombre de modules' (18), 'Puissance du générateur PV' (3,6 kWc), and 'Surface génératrice PV' (30,2 m²). A compass rose indicates orientation with 'Azimut 0°'.

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

- Le choix automatique des onduleurs :

Onduleurs

Raccorder les surfaces des modules ensemble

Suggérer le raccordement (d'après Sélection)

Sélectionner raccordement

VÉRIFICATION VALEURS ✓ RACCORDEMENT: Superficie de module 1 MODIFIER

ONDULEUR 1:

- ✓ 2 x PV*SOL Example
- ✓ MPP 1: 1 String x 9 Modules en série

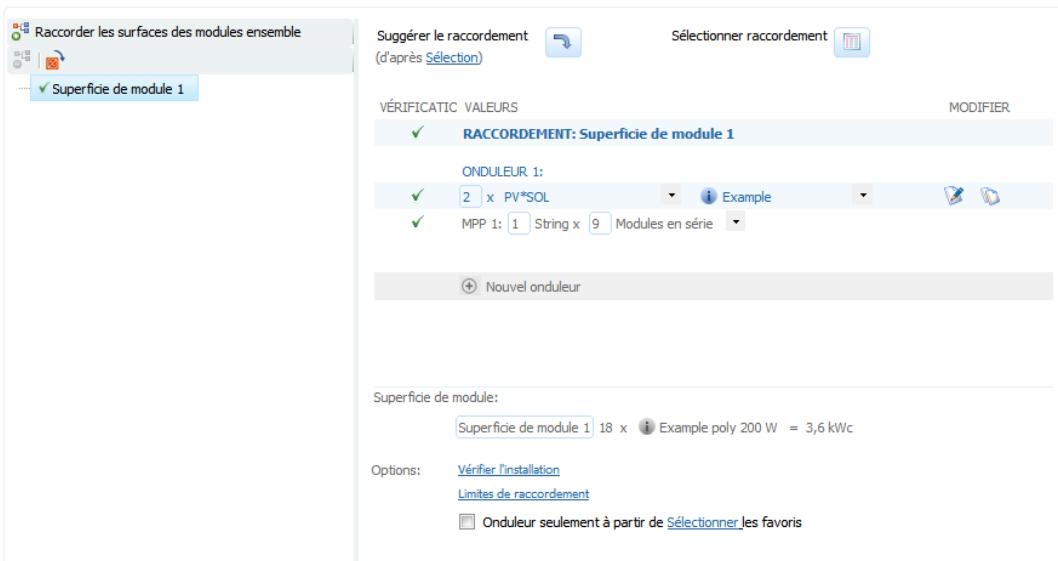
Nouvel onduleur

Superficie de module:

Superficie de module 1 18 x Example poly 200 W = 3,6 kWc

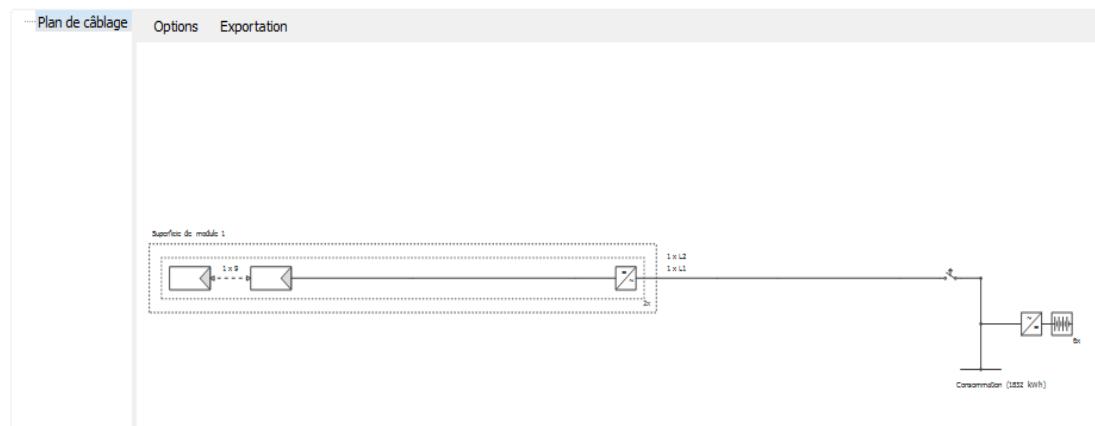
Options: Vérifier l'installation Limites de raccordement

Onduleur seulement à partir de Sélectionner les favoris



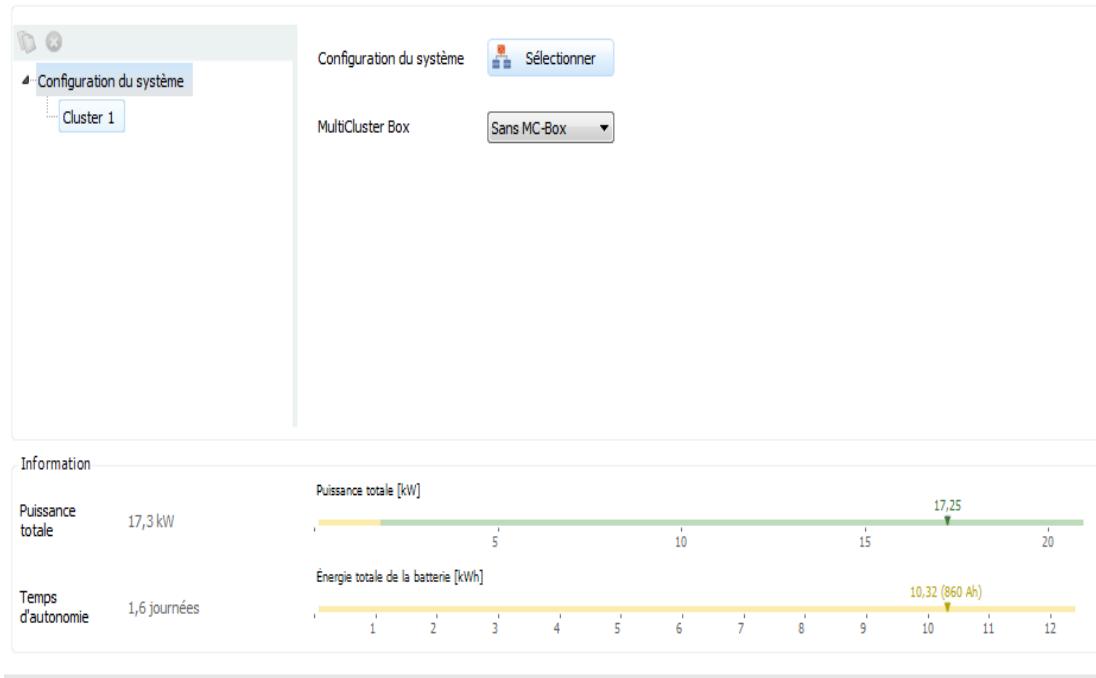
- En cliquant toujours sur suivant, notre plan de système va apparaître :

Plan



CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

Onduleur à batteries et batterie



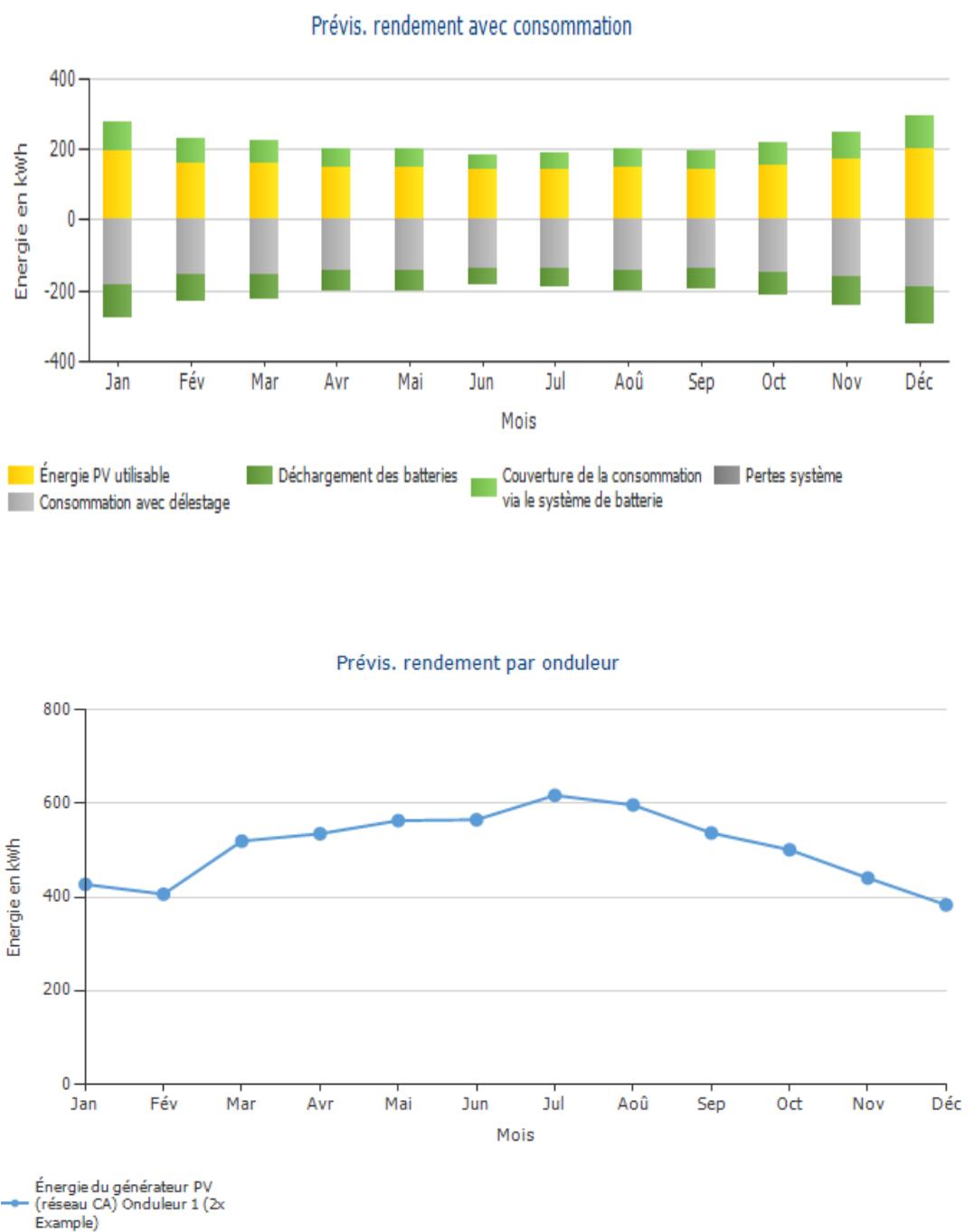
➤ Un tableau de rentabilité sera dressé :

Rentabilité

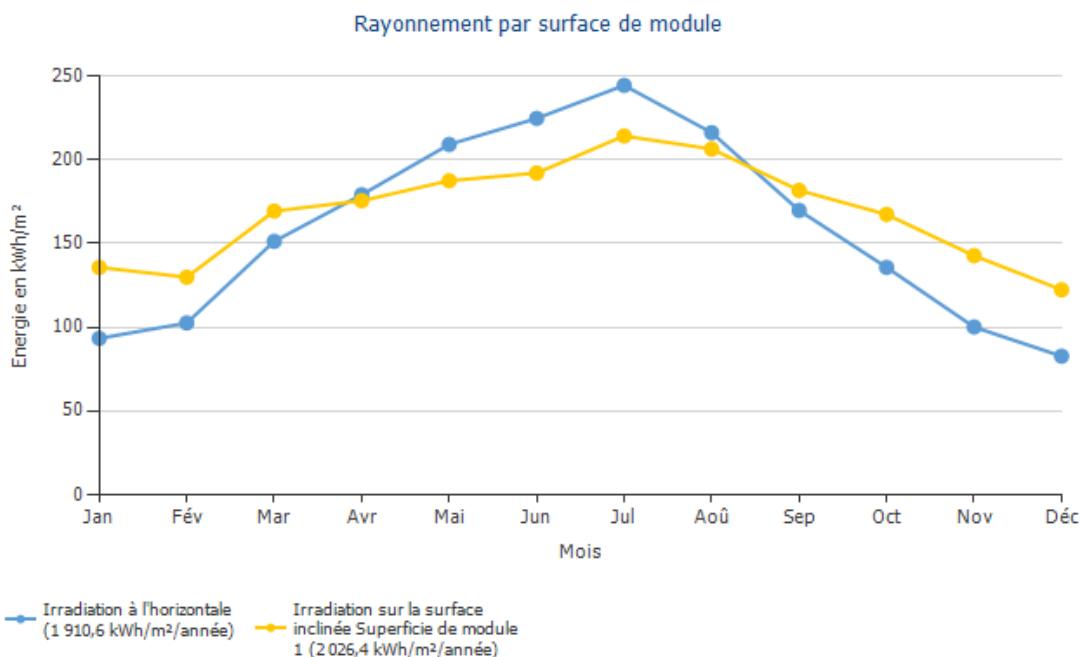
période considérée	20	Années	Taux d'intérêt du capital	1,00	%		
Composants	Type	Eléments installés	Prix unitaire	Coûts d'installation	Durée de vie	Nombre	Coûts pendant la péri
Modules	Example poly 200 W	18	0,00 €	0,00 €	20,00	18	0,00 €
Onduleurs	Example	2	0,00 €	0,00 €	20,00	2	0,00 €
Onduleur à batteries	Sunny Island 5048	3	0,00 €	0,00 €	20,00	3	0,00 €
Batteries	2V 1050 Ah valve re...	6	0,00 €	0,00 €	20,00	6	0,00 €

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

III.8.1.Résultat de simulation :



CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL



III.8.conclusion :

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque est essentiel pour son bon fonctionnement et pour la satisfaction de l'utilisateur.

Les méthodes de dimensionnement diffèrent essentiellement selon le type de raccordement, c'est à dire si le système est connecté au réseau électrique ou s'il en est indépendant ou "isolé".

Dans tous les cas il est nécessaire de connaître :

1. le besoin, la démarche.
2. Le gisement d'énergie solaire du lieu concerné.
3. le choix des modules photovoltaïques, leur implantation et la structure support.
4. le choix des composants électriques assurant la régulation et la protection du système et des usagers.
5. la mise en œuvre : câblage, maintenance.

CHAPITRE III : Application d'un système énergétique autonome calcul PV*SOL

Conclusion générale

Les systèmes photovoltaïques ont au cours des dix dernières années évolué sous plusieurs aspects. Grace à la recherche destinée à améliorer les taux de conversion des cellules photovoltaïques (PV), les services rendus par ces systèmes ne se limitent pas au seuil pompage mais aussi à la pré électrification rurale en général, c'est-à-dire le chauffage de l'eau, les communications, l'éclairage et la réfrigération. Ces services couvrent des puissances s'échelonnant d'une dizaine de Wc et plusieurs KWc.

Les principales composantes des systèmes de pompage PV, le générateur et le groupe moto-pompe (GMP), ont été grandement améliorés. Les cellules au silicium monocristallin utilisées dans les générateurs PV plus anciens, offrent de très bon taux de conversion (15 à 18%) – ratio entre l'énergie solaire reçue et l'énergie électrique produite – mais à un cout élevé. Ce type de cellule représentait 75% de la production. Les cellules au silicium polycristallin offrent des rendements moindres, près de 12%, mais sont moins couteuses car les procédés de fabrication emploient un silicium de départ moins pur. Depuis 1988, des procédés utilisent avec succès les propriétés PV du silicium amorphe et nécessitent beaucoup moins de matériel lors de la fabrication. Ces cellules offrent des rendements de l'ordre de 5%. Aujourd'hui, la technologie des photopiles au silicium polycristallin est la plus utilisée pour les applications en pompage.

L'expérience dans certains pays africains avec des groupes moto-pompe composés d'un arbre de transmission couplant un moteur à la surface et une pompe immergée s'est avéré un échec, surtout dans les forages profonds, où il est difficile d'obtenir un forage parfaitement rectiligne. C'est à partir de 1983 qu'on retrouve des systèmes qui couplent un moteur à courant alternatif à une pompe centrifuge multicellulaire, le tout immergé. Ces GMP, qui requièrent un onduleur, offrent une excellente fiabilité et sont couramment employés dans les systèmes de pompage sur forage. L'entretien du GMP est facilité si la conduite de refoulement est un tuyau flexible plutôt que plusieurs sections rigides de quelques mètres.

Lorsque l'on compare les systèmes de pompage PV au fil du soleil, c'est-à-dire sans batteries, avec d'autres systèmes de pompage utilisant des sources d'énergie dite conventionnelle, le photovoltaïque se situe dans un créneau d'utilisation qui s'intercale entre le pompage employant la motricité humaine (débit de 1 à 5 m³/j) et celui qui emploie le diesel (débit de plus de 200 m³/jour), dans des conditions d'opération similaires.

On voit donc que le photovoltaïque peut engendrer ses propres applications et marchés grâce à ses caractéristiques particulières et originales : la simplicité, la modularité, la fiabilité, l'autonomie et l'absence de pollution.

Les étapes de logiciel « PVSOL »

Données de projet

PVSOL premium 2017 (R8) Version d'essai - [simulation2.pvsol.pvpr]

Fichier Base de données Options Langue Aide

Données du projet		Données du projet	
Référence d'offre		Prise en service	01/06/2017
Responsable	yahi_gharedine	Titre de projet	
		Image du projet	
Infos client			
Réf. client		Description du projet	
Interlocuteur			
Société		<input type="button" value="Charger"/> <input type="button" value="Supprimer"/>	
Téléphone			
Fax			
E-mail			
Adresse		Adresse de l'installation	
<p>⚠️ Au moins 2 kWh d'énergie de batterie sont nécessaires par kW de puissance d'onduleur à batterie.</p> <p>⚠️ Au moins 4,8 kWh d'énergie de batterie sont nécessaires par kWc de puissance PV.</p> <p> ⓘ Une copie de sauvegarde automatique est disponible. (Fichier > Protections Autosave)</p>			
Type d'installation, météo et réseau			
Consommation			
Modules PV			
Onduleurs			
Câbles			
Onduleurs à batterie et batterie			

Type d'installation, météo et réseau

Annexe

PV*SOL premium 2016 (R2) Version d'essai

Fichier Base de données Options Langue Aide

Type d'installation, météo et réseau

Type d'installation
Installations PV autonomes (systèmes SMA)

Type de planification
 Utiliser la planification 3D

Données climatiques

Pays	Site
Algérie	TLEMCEN/ZENATA

Latitude 35° 0' 35" (35,01°) Ensoleillement total annuel 1911 kWh/m²

Longitude -1° 27' 35" (-1,46°)

Fuseau horaire UTC+1 Température moyenne 17,8 °C

Période 1986 - 2005

Résolution Par heure [Paramètres de la simulation](#)

Réseau CA

Entrer

L'onduleur à batterie sélectionné dans Cluster 1 ne peut pas fonctionner dans un réseau à 3 phases.

Les systèmes triphasés avec le Sunny Island 50/48 doivent présenter 0 clusters maxi.

Au moins 2 kWh d'énergie de batterie sont nécessaires par kW de puissance d'onduleur à batterie.

Au moins 4,8 kWh d'énergie de batterie sont nécessaires par kWc de puissance PV.

Données du projet

Titre de projet
Référence d'offre
Responsable yahi
Prise en service 29/05/2017

Type d'installation, météo et réseau

Type d'installation Installations PV autonomes (systèmes S...
Données climatiques TLEMCEN/ZENATA
Résolution des données 1 h
Réseau CA 230 V 3-phasé

Consommation

Consommation totale 775 kWh
Crête charge 1,3 kW
Résolution des données 1 h

Modules PV

Superficie de module 1

Données module	Exemple poly 200 W
Fabricant	PV*SOL
Nombre de modules	18
Puissance du générateur PV	3,6 kWc
Indication	30 °
Orientation	180 °
Type de montage	Parallèle au toit

Onduleurs

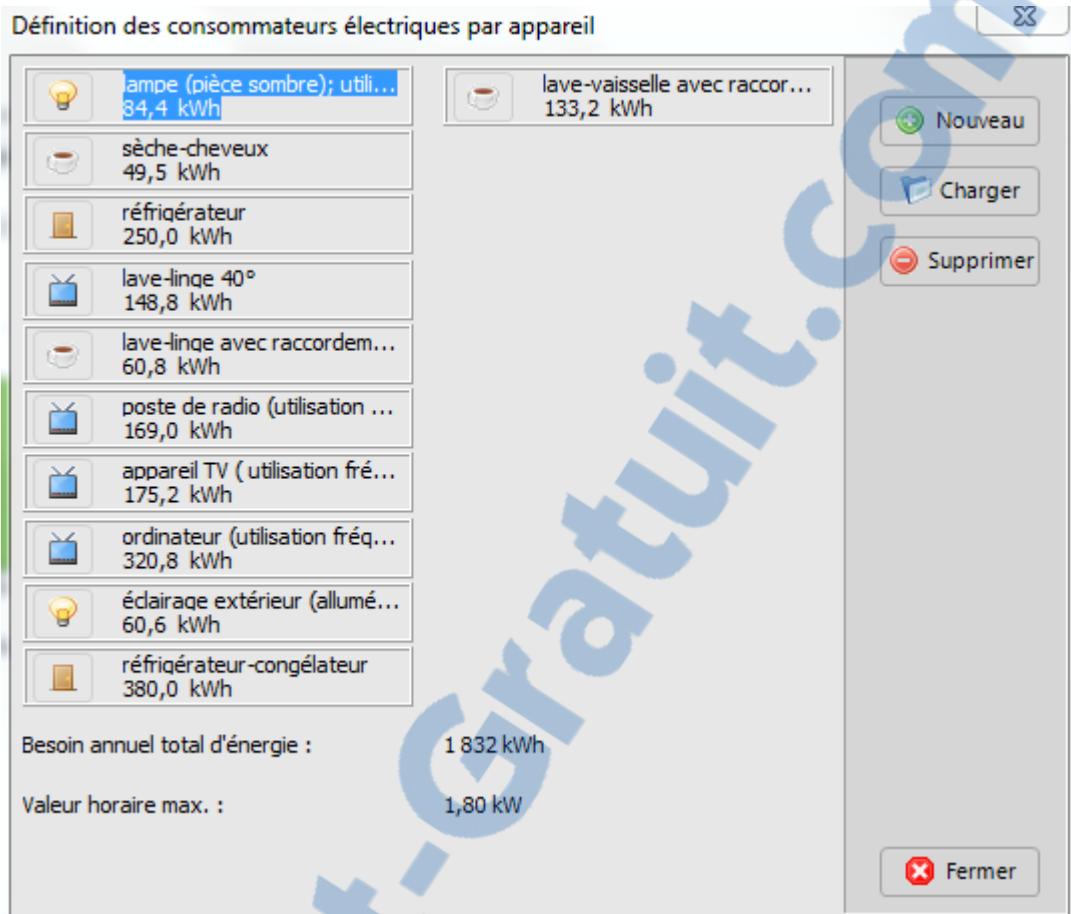
Superficie de module 1

2x Onduleur 1	Exemple
Fabricant	PV*SOL
Raccordement	MPP 1: 1x 9

Câble

Perte totale 0 % (0 W)

Consommation :



Modules PV :

Société	Modèle	
PV*SOL	Example poly 200 W	
<input type="checkbox"/> Sélection seulement à partir de Favoris ;		
<input type="checkbox"/> Photo Plan - Aperçu photo de l'emplacement du toit		
<input type="checkbox"/> Emplacement graphique		
Nombre de modules	18 3,60 kWc	Rapport souhaité par rapport à la consommation
Type de montage	Parallèle au toit	
Guidage	Aucune	
Indinaison	30 °	
Orientation	180 °	
 Azimut 0°		
Puissance du générateur PV Surface générateur PV		
3,6 kWc 30,2 m²		

Onduleurs :

Suggérer le raccordement  Sélectionner raccordement 

VÉRIFICATION VALEURS MODIFIER

RACCORDEMENT: Superficie de module 1

ONDULEUR 1:

- 2 x PV*SOL  Example
- MPP 1: 1 String x 9 Modules en série

 Neuer Wechselrichter

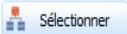
Superficie de module:

Superficie de module 1 18 x  Example poly 200 W = 3,6 kWc

Options:

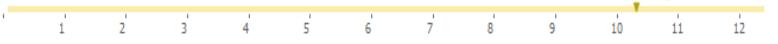
Onduleur à batteries et batterie :

Onduleur à batteries et batterie

 Configuration du système  Sélectionner

Cluster 1 MultiCluster Box Sans MC-Box

Information

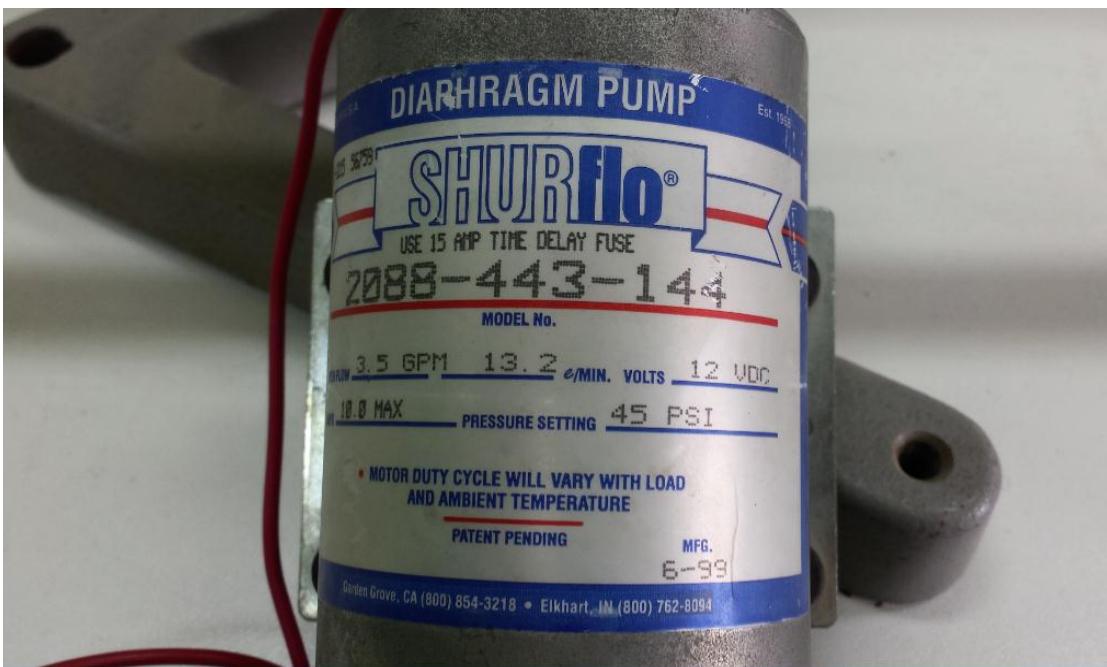
Puissance totale	17,3 kW	Puissance totale [kW]
		
Temps d'autonomie	1,6 journées	Energie totale de la batterie [kWh]
		

Résultats :

Résultats



Type de la pompe utilisée



Bibliographie

- [1] http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_FRENCH.pdf
- [2] <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/15e-inventaire-Chap03-3.9.1-Algerie.pdf>
- [3] <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/15e-inventaire-Chap02.pdf>
- [4] http://www.cder.dz/download/jnv_9.pdf
- [5] <http://users.polytech.unice.fr/~pmasson/Enseignement/Cours%20de%20physique%20des%20SC%20-%20Poly%20-%20BAC+3.pdf>
- [6] <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-differents-types-de-technologies-photovoltaïques>
- [7] http://www.photovoltaique.guidenr.fr/III_1_caracteristique-courant-tension-module-photovoltaique.php
- [8] <http://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/photovoltaique/comment-fonctionne-le-panneau-solaire-photovoltaïque/fonctionnement-cellule-photovoltaïque/>
- [9] <http://dspace.univ-biskra.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/4967/1/Etude%20classique%20et%20quantiq%20de%20l%20E%2080%99h%C3%A9t%C3%A9rojonction%20AlGaAsGaAs.pdf>
- [10] https://www.ac-clermont.fr/disciplines/fileadmin/user_upload/STI2D/Sequences/ETT/CI9_1/These_Production_photovoltaïque.pdf
- [11] <http://docplayer.fr/1102687-Republique-algerienne-democratique-et-populaire-ministere-de-l-enseignement-superieur-et-de-la-recherche-scientifique.html>
- [12] http://www.memoireonline.com/08/09/2558/m_Réalisation-d'un-régulateur-solaire--base-de-microcontrôleur-pour-le-contrôle-de-l'état-de-ch2.html
- (13) <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-differents-types-de-technologies-photovoltaïques>
- (14) <https://mrmondialisation.org/le-photovoltaïque-organique-fait-un-bon-de-géant-grâce-a-une-découverte/>
- (15) <https://sites.google.com/site/tpeepv/structure-et-fonctionnement>

Bibliographie

- (16) <https://fr.solar-energia.net/definitions/cellule-photovoltaïque.html>
- (17) KHEDIM BELHADJ ABDELKRIM "Etude de fonctionnement électrique des panneaux photovoltaïques" Mémoire de master Université de Tlemcen 2014
- (18) <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-25206-pompage-solaire.pdf>
- (19) <http://www.enp-oran.dz/wp-content/uploads/2016/09/cost17-09.pdf>
- (20) http://www.mediachimie.org/sites/default/files/chimie_habitat_127.pdf
- (21) https://elearning.univ-bejaia.dz/pluginfile.php/206995/mod_resource/content/0/Polyclope%20cours.pdf
- (22) <http://www.photovoltaïque.info/Site-isole.html>
- (23) <http://www.sitiosolar.com/fr/le-pompage-solaire-photovoltaïque/>
- (24) file:///C:/Users/Home/Downloads/out222%20(1).pdf
- (25) http://www.snecorep.fr/pdf/snecorep_installations_pompage_eau_guide_technique_2010.pdf
- (26) file:///C:/Users/Home/Downloads/out11111.pdf
- (27) http://www.pseau.org/ouils/ouvrages/ardepi_le_pompage_2013.pdf
- (28) http://www.wilo.be/fileadmin/be/Downloads/pdfs_documentaties/Informatiebrochures/Principes_fondamentaux_de_la_technologie_des_pompes.pdf
- (29) <http://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/evaluer-le-potentiel-de-fourniture-d-energie-electrique-renouvelable.html?IDC=7360>
- (30) www.BP.solar.fr.

RESUME

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications, tel que le pompage d'eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie de développement qui n'a pas d'accès sûr à l'eau potable. Mais les générateurs Photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible et un coup élevé.

Les pompes sont des éléments essentiels dans la vie et le confort des êtres humains. Les pompes déplacent les fluides qu'ils soient chauds ou froids, propres ou sales. Elles effectuent cette opération de manière extrêmement efficace et préservent l'environnement.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la conception, la réalisation, la commande et l'optimisation d'un système de pompage solaire.

Ce système est constitué d'un ensemble d'éléments se trouvant en interaction ; à savoir les panneaux photovoltaïques, l'onduleur de tension, le moteur à courant continu, la pompe de surface et le système hydraulique.

Mots-clés :

Energie solaire, Photovoltaïque, Conception et Simulation, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Optimisation, Pompe de surface.