M/530.004

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur

Université de Guelma

**Faculté des mathématiques et de l'informatique et des sciences de la matière**

**Département des sciences de la matière**

Mémoire du projet de fin d'étude

2ème année master

**Spécialité** : Physique de la matière condensée

**Présenté par :** physique de la matière condensée

**BENHAMDI DJAZIRA**

# Contributions à l'étude des propriétés photovoltaïques des cellules solaire texturisées

**Sous la direction de :**

**Dr HAMEL ABDELOUAHAB**

**Juin 2012**

Nous tenons à remercier en premier lieu notre encadreur **hamel abdlwahabe** pour son soutient, ses double efforts et son patient et sa gentillesse durant les trois mois.

Nous tenant à remercier aussi tous les enseignants qui nous

aide dans les moments difficiles.

# Sommaire

Introduction générale……

Chapitre 1

L'énergie solaire

1-1-introduction……1

1-2-les différentes types d'énergie renouvelables……2

1-2-1-énergie solaire……2

1-2-2-énergie solaire thermique……3

1-2-3- Énergie éolienne ……3

1-2-4-énergie hydraulique……4

1-2-5-énergie géothermique……5

1-3-énergie photovoltaïque……6

1-3-1- définition ……7

1-3-2- Les différentes techniques de modules photovoltaïques ……7

1-3-2-1- Les modules solaires monocristallins ……7

1-3-2-2- Les modules solaires poly cristallins……7

1-3-2-3- Les modules solaires amorphes ……7

1-3-3- influence de l'ensoleillement ……8

1-3-4- la ressource solaire ……9

1-3-5- technique pour capter l'énergie solaire ……10

1-3-5-1- énergie solaire passive ……10

1-3-5-2- énergie solaire thermique ……11

1-3-5-3-énergie solaire thermodynamique ……11

1-3-5-4- Énergie solaire pour la cuisine des aliments.....11
1-3-6- Aspect économique.....12
1-3-7- Énergie solaire dans le présent et le futur.....13
1-3-8-Le boom des objets solaires.....14
1-9- Les avantage de l'énergie solaire .....14
1-10- Les limite de l'énergie solaire .....14
1-3-11--Conclusion .....15

## Chapitre 02

## Les cellules photovoltaïques

2-1-introduction.....16
2-2- définition de la cellule photovoltaïque .....17
2-3-Principe de fonctionnement.....17
2-3-1- L'interaction rayonnement / matière.....18
2-3-2- Dopage et silicium.....18
2-3-3- Un générateur photovoltaïque.....19
2-4- Association de cellules .....19
2-5-Rayonnement au soleil .....20
2-5-1-absorption par l'atmosphère .....20
2-5-2-diffusion par l'atmosphère .....20
2-6-Système photovoltaïque .....20
2-7- panneau photovoltaïque .....21
2-8- champ photovoltaïque.....22
2-9- Batterie .....22
2-10-la cellule solaire idéale .....23

2-11-Spectre d'une photopile au silicium cristallin .....23
2-12- Rendement d'une photopile .....24
2-13-La photo conductibilité .....25
2-13-1-le modèle ondulatoire .....26
2-13-2-le modèle corpusculaire .....26
2-14- Technologies de cellules.....26
2-15- construction d'une cellule solaire.....28
2-16-Conclusion.....31

## Chapitre 03

## LES DIFFERENTS TYPE DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES

3-1-introduction.....32
3-2-Types de cellules.....32
3-2-1- 1ère génération.....32
3-2-2- 2eme génération.....33
3-2-3-3 eme générations .....34
3-3- Rendement des cellules .....34
3-4- Les différents types de cellules photovoltaïques .....36
3-4 -1Cellules photovoltaïques de silicium amorphe .....36
3-4-1-1 définition .....36
3-4-1-2-Principe de fonctionnement.....36
3-4-1-3- Technique de fabrication .....37

3-4-1-4-- Avantages/inconvénients d'une cellule photovoltaïque en silicium amorphe ....37

3-4-1-5-Utilisation des panneaux de silicium amorphe .....38

3-4-2-Cellule multi-jonction.....39

3-4-3- Les cellules poly cristallin.....40

3-4-4- Les Cellule en silicium monocristallin .....40

3-4-5- Cellule en silicium multi cristallin .....41

3-4-6-Cellule Tandem .....42

3--4-6-1-Utilisation .....42

3-4-7-Cellule sans silicium en couche mince CIS ou CIGS.....43

3-4-8-Cellule silicium amorphe en couche mince .....45

3-5-Potentiel plus élevé pour le solaire en couches minces .....46

3-6- Conclusion .....48

Chapitre 04

Les SURFACES TEXTURISEES

4-1-Introduction.....49

4-2- les cellules solaires texturisées .....50

4-2-1-Cellule solaire texturisées sous forme de pyramide .....50

4-2-2-Cellule solaire texturisées rayon transmis 2 fois .....51

4-2-3-Cellule solaire texturisées rayon transmis 3 fois .....52

4-2-4-Cellule solaire texturisées rayon transmis plusieurs fois .....53

4-3- propriétés photovoltaïque.....56

4-3-1-Réponse spectrale .....56

4-3-2-coefficient d'absorption et taux de génération .....58

4-4-Conclusion .....61

Conclusion générale .....

## INTRODUCTION GENERALE :

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergies dont la consommation ne diminue pas la ressource à l'échelle humaine.

L'énergie étant une grandeur physique, on parlera en théorie de "sources d'énergie renouvelables" ou d'"énergies d'origine renouvelable" - la forme courte est toutefois consacrée par l'usage.

Le Soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables : son rayonnement est le vecteur de transport de l'énergie utilisable (directement ou indirectement) lors de la photosynthèse, ou lors du cycle de l'eau ,le vent (énergie éolienne), l'énergie des vagues) et des courants sous-marins (énergie hydrolienne), la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans (énergie thermique des mers) ou encore la diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer .

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, est découverte en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

Dans le premier chapitre (l'énergie solaire) donne un rappel sur les différents types d'énergie renouvelables comme l'énergie solaire thermique l'énergie hydraulique ..... et aussi l'énergie solaire photovoltaïque ensuite nous allons parler de les différentes techniques de modules photovoltaïques et l'influence de l'ensoleillement et la ressource solaire.

Nous étudierons ensuite les techniques pour capter l'énergie solaire et l'aspecte économique.

Puis en passe à l'énergie solaire dans le présent et la future et l'avantage et les limite de l'énergie solaire enfin on termine avec une conclusion.

Dans le deuxième chapitre ne présentera une description générale sur les cellules photovoltaïque, Nous pourrons ensuite le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et l'association de cellule. Nous avons présenté le rayonnement au soleil et la cellule idéale. Puis en passe au spectre d'une photopile au silicium cristallin et le rendement d'une photopile et la photo conductibilité ainsi la Technologies des cellules et enfin avec la construction d'une cellule solaire et la conclusion.

Le troisième chapitre est Les différentes types des cellules photovoltaïque nous allons d'abord énoncer sur les types de cellules en trois génération, nous allons parles sur le rendement des cellules. Nous pourrons ensuite caractérises les différentes types des cellules photovoltaïque. Premièrement on a parle sur les cellules photovoltaïque de silicium amorphe nous allons rappeler la définition, le principe de fonctionnement, les technique de fabrication, l'utilisation et les avenages et l'inconvénient.

La deuxième cellule c'est la cellule multi jonction et après la cellule poly cristalline monocristallin ensuite la cellule multi cristallin et la cellule tandem .Nous étudieront ensuite les cellules sans silicium en couche mince et cellule silicium amorphe en couche mince.

Dans le dernier chapitre nous allons d'abord énoncer sur les cellules solaires texturisées et en fin les propriétés photovoltaïques (Réponse spectrale, coefficient d'absorption et taux de génération).

Nous avons élaboré un modèle qui donne la possibilité de récupérer une troisième réflexion.

Ce modèle offre la possibilité aux rayons solaires incidents d'entrer dans le matériau quatre fois successive et de participer encore plus ou phénomène de conversion.

Finalement nous terminerons cette mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude.

## 1-1-Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord nous familiarises avec quelques notions sur la différent type d'énergie renouvelable ainsi l'énergie solaire photovoltaïque, puis en passe à la ressource solaire et voir les technique pour capter l'énergie solaire, par suivre en passe à l'avantage et les limite de l'énergie solaire.

Nous décrirons enfin la conclusion générale de ce chapitre.

## 1-2-Les différents types d'énergies renouvelables :

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables:

### 1-2-1-L'énergie solaire :

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables (même si le Soleil disparaîtra un jour…). [1]

L'énergie solaire peut être utilisée directement par l'homme pour s'éclairer (fenêtres, puits de lumière), se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques

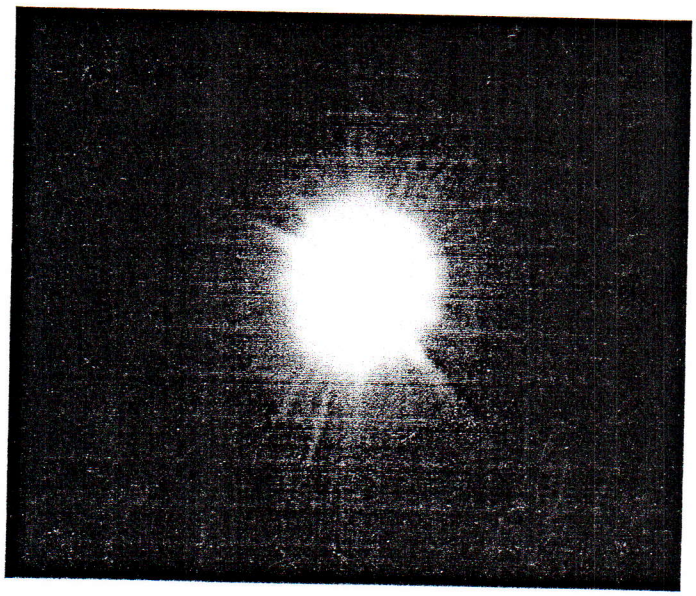


**Figure (1-1) : Rayonnement solaire direct**

Indirectement, l'énergie solaire est aussi la source de la plupart des énergies renouvelables et des hydrocarbures fossiles.

Elle est en effet responsable de la mise en mouvement des masses d'eau (énergies marines) et d'air (énergie éolienne) du cycle de l'eau (energie hydraulique) et la photosynthèse (biomasse et hydrocarbures).

### 1-2-2-L'énergie éolienne

L'activité solaire est la principale cause des phénomènes météorologiques. Ces derniers sont notamment caractérisés par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique.

Jusqu'au milieu du 19ème siècle, l'essentiel des déplacements nautiques à moyenne et longue distance ce sont faits grâce à la force du vent.

Un dérivé terrestre n'ayant d'usage que sportif a été rendu possible par les techniques modernes : le char à voile.

L'énergie éolienne a aussi été vite exploitée à l'aide de moulins à vent équipés de pales en forme de voile. Ces moulins utilisent l'énergie mécanique pour actionner différents équipements. Les meuniers utilisent des moulins pour faire tourner une meule à grains. Aujourd'hui, ce sont les éoliennes qui prennent la place des moulins à vent.

Les éoliennes transforment l'énergie mécanique en énergie électrique soit pour l'injecter dans un réseau de distribution soit pour être utilisé sur place (site isolé de réseau de distribution). [2]

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent figure (1-2).

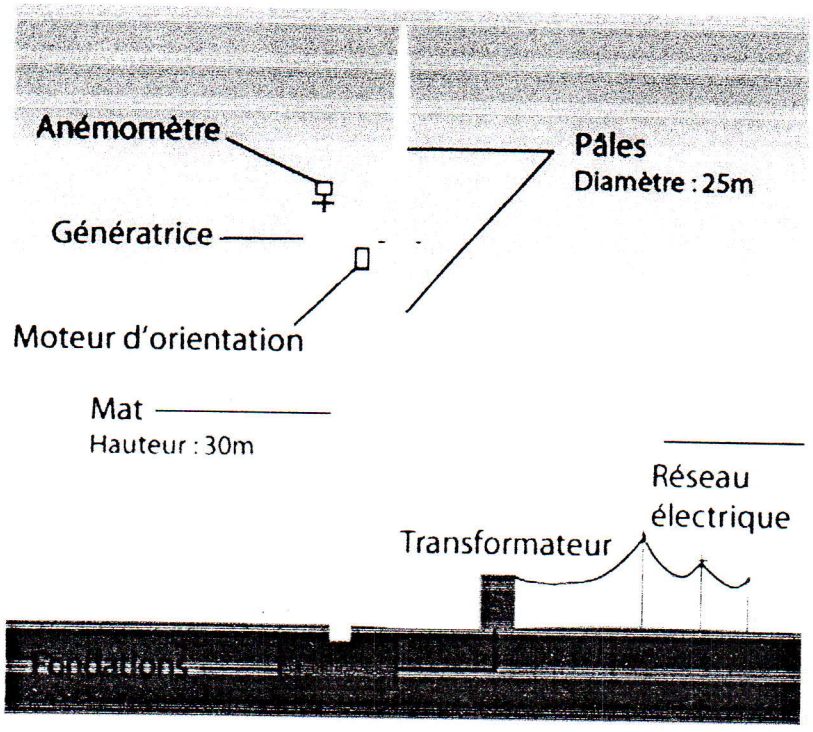


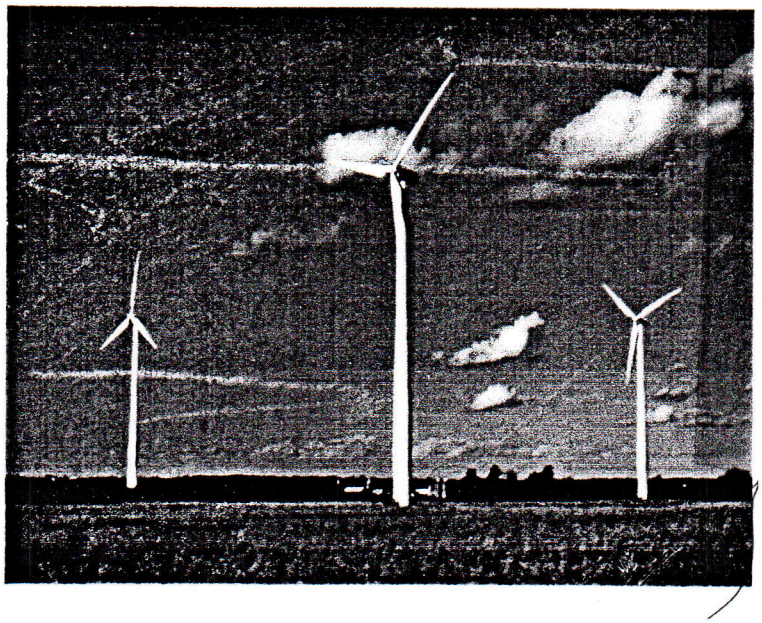

**Figure (1-2) : dispositif aérogénérateur**

L'énergie éolienne figure (1-3) peut être utilisée de plusieurs manières :

– Conservation de l'énergie mécanique: le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (Navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...).

Production d'énergie électrique ; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif.

Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.



**1-2-3-L'énergie hydraulique**

À l'instar de l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique tire son origine dans les phénomènes météorologiques et donc du Soleil. Ces phénomènes prélèvent de l'eau principalement dans les océans et en libèrent une partie sur les continents à des altitudes variables. On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements.

De l'eau en altitude possède une énergie potentielle de pesanteur.

Cette énergie peut être alors captée et transformée, lors des mouvements de l'eau qui retourne vers les océans. [3]

L'énergie hydraulique peut être directement utilisée sous forme d'énergie mécanique, l'eau d'un ruisseau faisant tourner la roue d'un moulin à eau

L'énergie hydraulique peut également être convertie en énergie hydroélectrique pour la production d'électricité, que cela soit via une centrale hydroélectrique ou marémotrice

Figure (1-4)

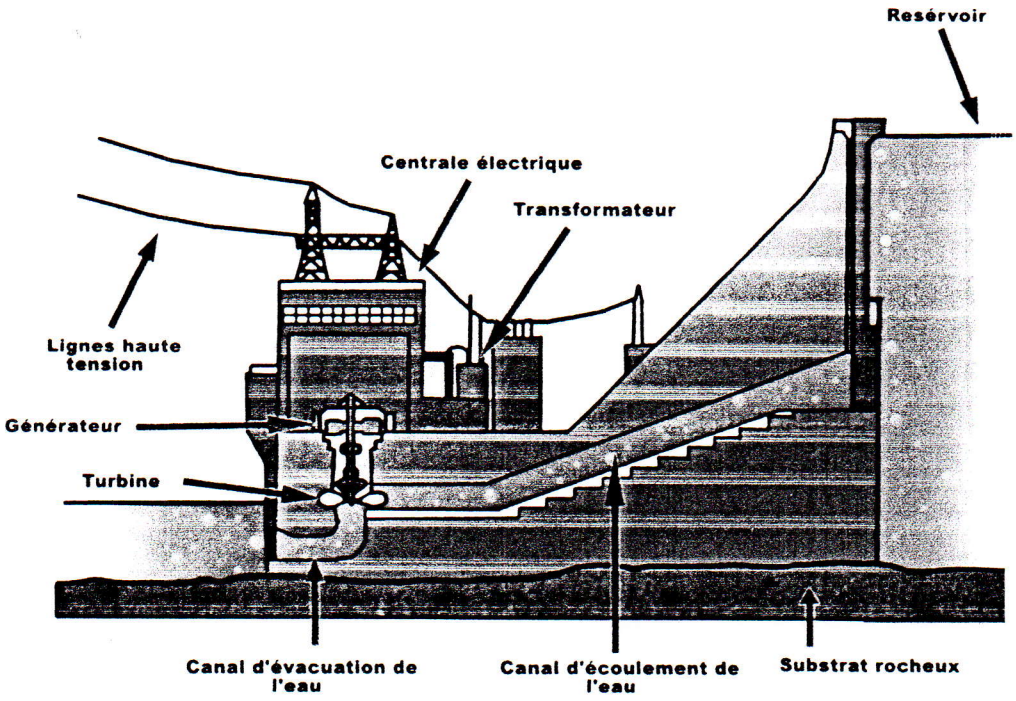



**Figure (1-4) : centrale hydroélectrique ou marémotrice**

L'énergie hydroélectrique est une énergie électrique obtenue par conversion de l'énergie hydraulique figure (1-5) des différents flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins ...).

L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur.

L'énergie hydroélectrique est une énergie renouvelable. Elle est aussi considérée comme une énergie propre, bien qu'elle fasse parfois l'objet de contestations environnementales, soit en raison de son emprise foncière, soit plus récemment sur son bilan carbone.

L'énergie marémotrice est issue des mouvements de l'eau créée par les marées, causées par l'effet conjugué des forces de gravitation de la Lune et du Soleil et récupérées en mer par des turbines marémotrices.

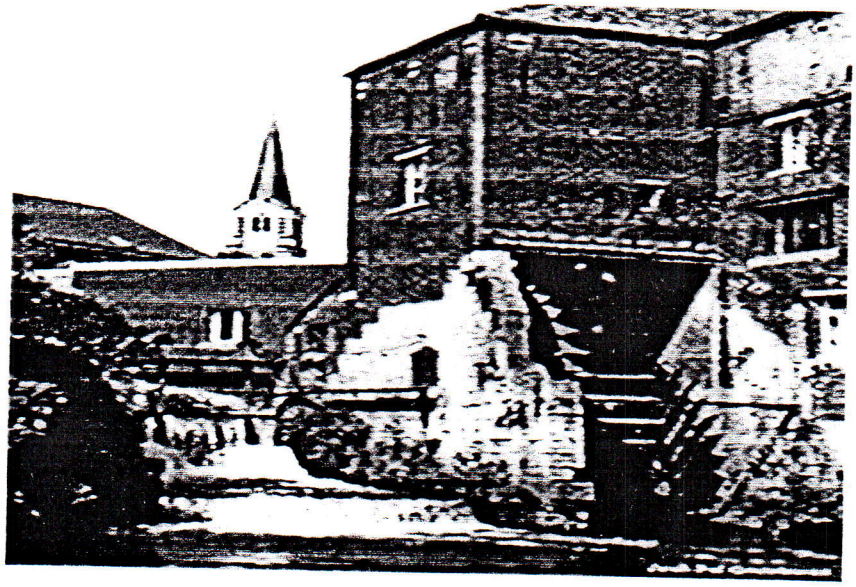


**Figure (1-5) : énergie hydraulique**

**1-2-4-L'énergie géothermique.**

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique figure (1-6) contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Dans les couches profondes, la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre : c'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).

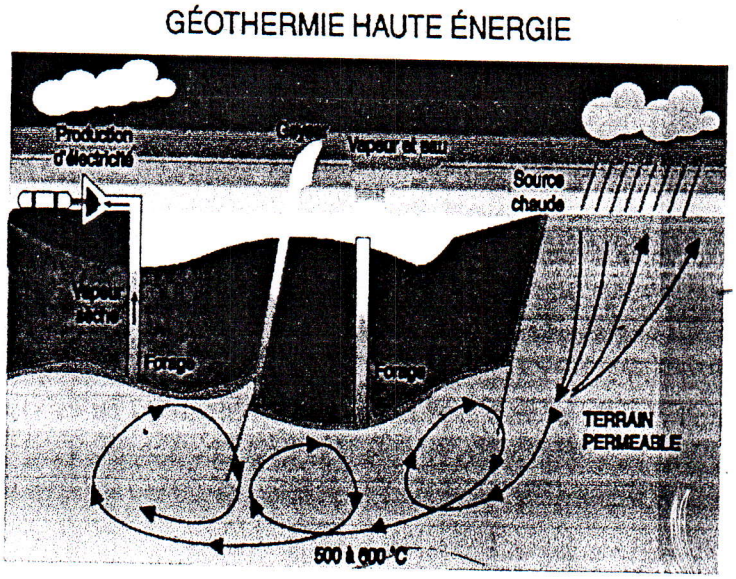



**Figure (1-6) : énergie géothermique**

Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années.

La civilisation moderne est très dépendante de l'énergie et spécialement des énergies non renouvelables, qui s'épuiseront tôt ou tard (et même plus tôt que tard). Passer d'une ressource actuellement non renouvelable à une ressource renouvelable suscite des espoirs, certains justifiés, d'autres moins.

On attribue souvent aux énergies renouvelables des caractéristiques favorables (qu'elles peuvent mériter ou non ), telles que la sureté (faible risque d'accident, faible conséquence d'un éventuel accident, régularité de la fourniture, ...), la propreté (peu voire pas du tout de déchets, peu dangereux et facile à gérer : recyclables, par exemple), la décentralisation (développement local des territoires, réserve d'emplois locaux non décentralisable, etc.) et le respect de l'environnement, lors de la fabrication, pendant le fonctionnement, et enfin de vie (démantèlement).

### 1-2-5-Énergie biomasse:

La biomasse est la matière organique (bois, paille...). Elle peut fournir de l'énergie. Ainsi, elle peut être brûlée pour produire de la chaleur (cheminée, chaudière à bois, cuisine) ou de l'électricité. Pendant des millénaires c'était la source principale d'énergie des hommes et elle est encore très utilisée dans le tiers-monde.Elle peut aussi générer du biogaz (lui-même brûlé) ou des biocarburants pour les véhicules.

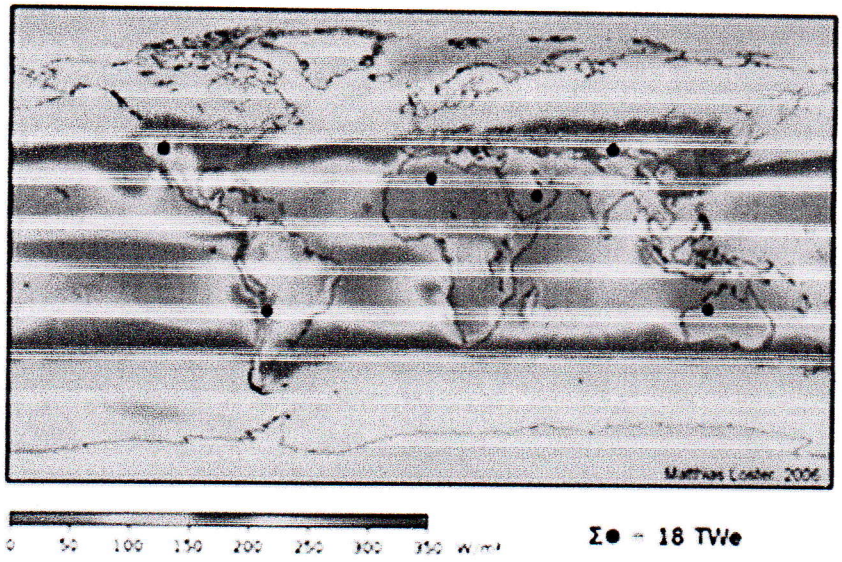



**Figure (1-6) : Répartition de l'énergie solaire reçue au sol.**

Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse réalisée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires.

L'énergie solaire est donc à l'origine de toutes les énergies sur Terre à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice.

L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie alimentaire, énergie cinétique, énergie thermique, électricité ou biomasse.

Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de cette dernière.

Dans l'espace, l'énergie des photons peut être utilisée, par exemple pour propulser une voile solaire.

### 1-3-4- La ressource solaire

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au milieu du Soleil.

Elle se propage dans le système solaire et dans l'Univers sous la forme d'un rayonnement électromagnétique de photons.

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- l'énergie solaire envoyée par le Soleil (fluctuations décennales, saisonnières, et ponctuelles).

- la nébulosité (nuages, brouillards, etc.), qui est importante à l'équateur et plus faible en milieu intertropical.

- la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du soleil et donc l'énergie par unité de surface au sol, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local.

Globalement la terre reçoit en permanence une puissance de 170 millions de gigawatt, dont elle absorbe 122 et réfléchit le reste.

L'énergie totale absorbée sur une année est donc 3 850 zettajoules ($10^{21}$ joules, ZJ) ; par comparaison, la photosynthèse capte 3 ZJ , le vent contient 2,2 ZJ, et l'ensemble des usages humains de l'énergie, 0,5 ZJ dont 0,06 ZJ sous forme d'électricité.

Les zones désertiques, où la nébulosité est faible et qui sont situées sous des latitudes proches de l'équateur, sont les plus favorables à l'énergie solaire.

### 1-3-5- Techniques pour capter l'énergie solaire

Les techniques pour capter directement une partie de cette énergie sont disponibles et sont constamment améliorées.

On peut distinguer l'énergie solaire passive, l'énergie solaire thermique et l'énergie solaire thermodynamique :

#### 1-3-5-1- Énergie solaire passive

La plus ancienne et certainement la plus importante, quoique discrète, utilisation de l'énergie solaire consiste à bénéficier de l'apport direct du rayonnement solaire, c'est-à-dire l'énergie solaire passive.

Pour qu'un bâtiment bénéficie au mieux des rayons du Soleil, on doit tenir compte de l'énergie solaire lors de la conception architecturale (façades doubles, orienté vers le Sud, surfaces vitrées, etc.).

L'isolation thermique joue un rôle important pour optimiser la proportion de l'apport solaire passif dans le chauffage et l'éclairage d'un bâtiment.

Dans une maison solaire passive, l'apport solaire passif permet de faire des économies d'énergie importantes.

Dans les bâtiments dont la conception est dite bioclimatique, l'énergie solaire passive permet aussi de chauffer tout ou partie d'un bâtiment pour un coût proportionnel quasi nul.

### 1-3-11- conclusion:

L'énergie solaire totale absorbée par l'atmosphère terrestre, les océans et les masses continentales est approximativement de 3 850 000 EJ par an; c'est plus d'énergie reçue en une heure que l'humanité n'en a utilisé pendant une année.

L'énergie solaire permet d'obtenir essentiellement de la chaleur et de l'électricité. Nous avons vu qu'à l'aide des nouvelles technologies, les panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques, on peut obtenir de la chaleur grâce aux réactions transformant la lumière en chaleur ainsi que de l'électricité.

## 2-1-Introduction

Nous allons maintenant familiarises avec les cellules photovoltaïque ainsi la structure d'une cellule photovoltaïque Nous pourrons ensuite le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et aussi l'association de cellules ainsi le système et panneau et le champ photovoltaïque [22-23].

Nous décrirons aussi les cellules solaires idéales et le spectre d'une photopile ou silicium cristallin aussi le rendement d'une photopile et la photoconductibilité

Par suivre en passe a la technologie de cellule photovoltaïque et la construction d'une cellule solaire.

En fin la conclusion de ce chapitre.

## 2-2- définition de la cellule photovoltaïque

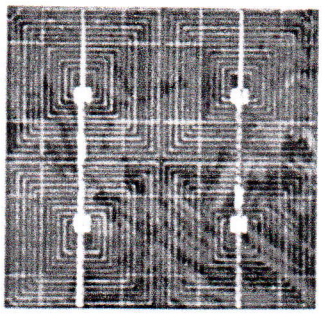


**Figure (2-1) : cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est fonction de la lumière incidente. L'électricité produite est fonction de l'éclairement, la cellule photovoltaïque produit un courant continu.

Une cellule photovoltaïque transforme l'énergie lumineuse du soleil en courant électrique grâce au matériau semi-conducteur qu'elle contient. [24]

La conversion de l'énergie solaire en électricité, appelée "effet photovoltaïque"

## 2-3-Principe de fonctionnement

Les photopiles sont des composants électroniques à semi- conducteur qui, lorsqu'ils sont éclairés par le rayonnement solaire, développent une force électromotrice capable de débiter un courant dans un circuit extérieur.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment d'un même matériau (homojonction p- n) ou entre deux matériaux différents (hétérostructures), la moins épaisse étant soumise au flux lumineux. Chacune des régions est reliée à une électrode métallique au moyen d'un contact ohmique de faible résistance.

Le principe de fonctionnement peut être décomposé en deux parties : l'absorption de photons et la collecte des porteurs de charges créés.

### 2-3-1- L'interaction rayonnement / matière

La première étape de la conversion de la lumière en courant électrique est la génération au sein du semi-conducteur des porteurs de charges que sont les électrons libres et les trous.

### 2-3-2- Dopage et silicium

Dans un semi-conducteur pur le nombre de porteurs étant faible à température ordinaire, la conductivité est médiocre.

### Pourquoi le silicium ?

Le silicium a été choisi pour réaliser les cellules solaires photovoltaïques pour ses propriétés électroniques, il est caractérisé par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique. Dans le silicium solide, chaque atome est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons.

Si un atome de silicium est remplacé par un atome ayant 5 électrons périphériques (phosphore par exemple), un électron ne participe pas aux liaisons, il peut donc se déplacer dans le réseau. Il y a conduction par un électron, et le semiconducteur est dit dopé N.

Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome ayant 3 électrons périphériques (bore par exemple), il manque un électron pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut venir combler ce manque. On dit alors qu'il y a conduction par un trou et le semi- conducteur est dit dopé de type P. [25-26]

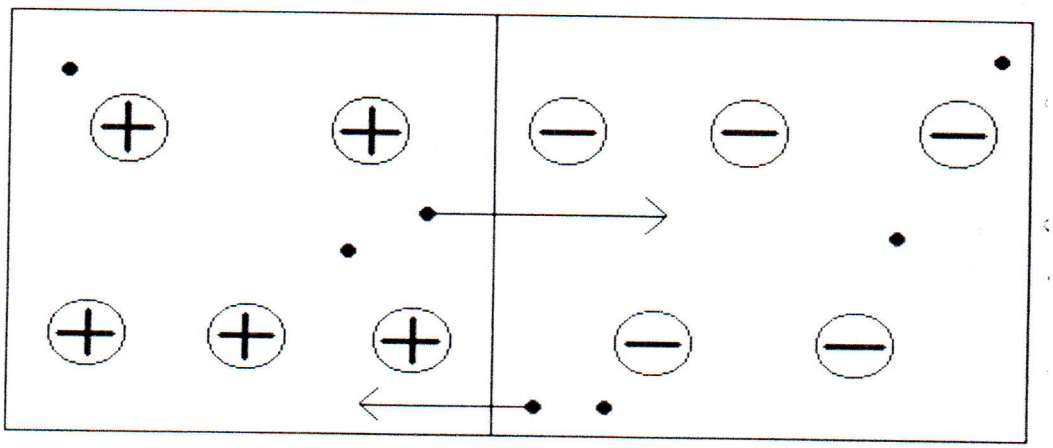


**Figure (2-2) : Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont des dopants du silicium**

### 2-3-3- Un générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est constitué de modules, d'un générateur de charge-décharge et d'une batterie d'accumulateur. Il produit du courant continu qui peut être converti si nécessaire en courant alternatif à l'aide d'un onduleur.

Les modules photovoltaïques, composés d'un ensemble de cellules connectées entre elles, transforment directement la lumière en électricité.

Généralement, une batterie d'accumulateurs stocke l'énergie électrique produite pour pouvoir la restituer à tout moment (jour ou nuit, ensoleillement ou non). Avec la batterie, un régulateur de charge/décharge protège la batterie contre les surcharges et décharges profondes et prolonge ainsi sa durée de vie.

### 2-4- Association de cellules :

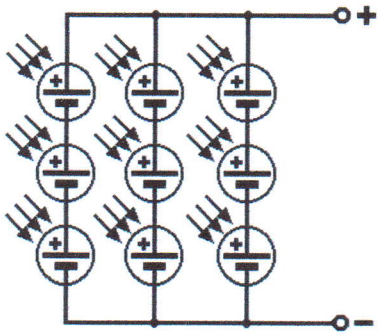



**Figure (2-3) : Association de cellules**

Pour obtenir une force électromotrice supérieure à 12 volts il est nécessaire de mettre en série plusieurs cellules de 0,6 volts.

Par exemple un panneau fournissant 20 volts à vide est constitué de 36 cellules.

Par contre, la mise en parallèle de cellules permet d'obtenir un courant d'intensité plus grande donc une puissance plus élevée.

Le câblage série-parallèle est utilisé pour obtenir un générateur aux caractéristiques souhaitées.

## 2-5-Rayonnement au soleil :

Lorsqu'on s'intéresse principalement aux photopiles à usage terrestre, il est nécessaire de connaître le spectre de rayonnement solaire reçu ou sol, l'atmosphère modifier le spectre énergétique du rayonnement solaire à travers trois mécanismes principaux :

- l'absorption par les différents gaz, chacun ayant des raies caractéristiques ;

- La diffusion moléculaire de Rayleigh ;

- La diffusion par les aérosols, par les poussières et par les nuages

### 2-5-1-absorption par l'atmosphère :

Les rayons UV lointains sont totalement absorbés dans l'ionosphère et dans la stratosphère, dans le gamma de longeur d'ondes qui nous intéresse (0.2 à2 µm) pratiquement seuls l'zone la vapeur d'eau et le gaz carbonique dans une moindre mesure, interviennent de manière sensible dans l'absorption gazeuse, l'zone absorbe l'UV moyen (sur une large bande de 0.2 à 0.7). [27-30]

L'oxygène a deux bandes étroites de faible atténuation dans le visible de 0.69 et .76 µm, la vapeur d'eau à sept bandes d'absorption dont trois fortes dans l'infra rouge moyen, le gaz carbonique absorbe suivant trois raies étroites dans l'infra rouge au-delà de 1.5

### 2-5-2-diffusion par l'atmosphère :

La diffusion de la lumière est une redistribution spatiale du rayonnement par des particules matérielles c'est un phénomène complexe puis qu'il intègre à la fois la diffraction ; la réfraction et la réflexion par les particules, l'indice de réfraction des particules diffusantes, mais aussi et surtout leurs dimensions par rapport à la longueur d'onde de la lumière, modifient sensiblement la répartition spectrale et l'intensité lumineuse

## 2-6-Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est un dispositif électrique permettant de transformer l'énergie solaire captée en énergie électrique utilisable dans des applications industrielles ou domestiques.

Ce système va produire de l'électricité au même titre qu'une compagnie d'électricité. Seulement, l'électricité que fourni le panneau photovoltaïque est de type continu et varie en fonction de la période d'ensoleillement.

Il faut donc quand cela l'exige, stocker cette électricité continue dans des batteries, ou la transformer pour alimenter les appareils électriques de type alternatifs comme la plupart des électroménagers.

**De quoi se compose un système photovoltaïque ?**

Habituellement on trouve dans un système photovoltaïque le matériel suivant :

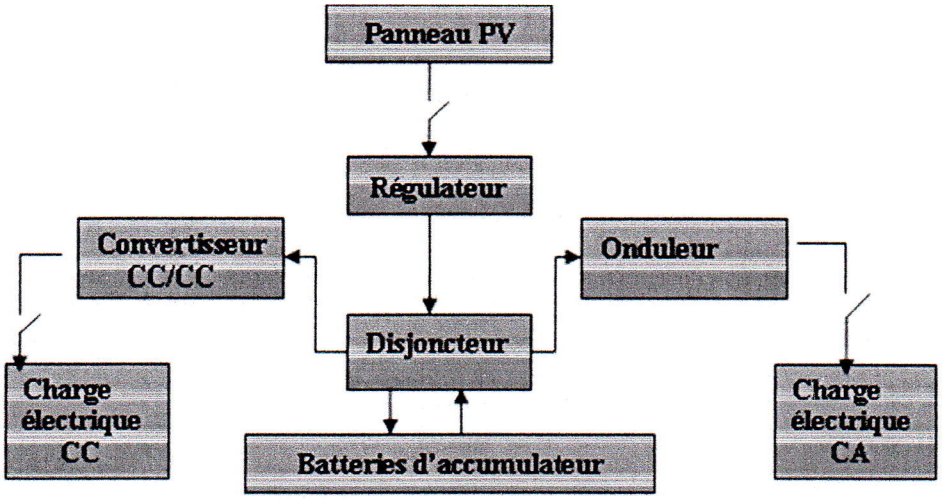



**Figure (2-4) : système photovoltaïque**

**2-7- panneau photovoltaïque** :

Une seule cellule photovoltaïque ne pouvant produire une grande quantité d'électricité vu sa taille et son courant très faible, les fabricants regroupent de façon standard 32 à 44 cellules photovoltaïques en série afin de produire une puissance suffisante pour charger une batterie. 72 cellules pour un panneau de 24 V et plus encore pour les panneaux utilisés dans les systèmes de grandes puissances. [31]

Le tout est encapsulé pour être protégé des agressions extérieures, des risques de chocs électriques, puis encadré pour renforcer la solidité. On obtient ainsi un panneau photovoltaïque.

La puissance du module s'exprime en watt crête (Wc), elle indique la 'taille' du panneau et varie généralement entre 20 et 250 Wc, même plus de nos jours.

Notons qu'il ne faut pas confondre un panneau solaire photovoltaïque avec un capteur solaire thermique qui lui produit de la chaleur. Pour en savoir plus Types de modules PV .

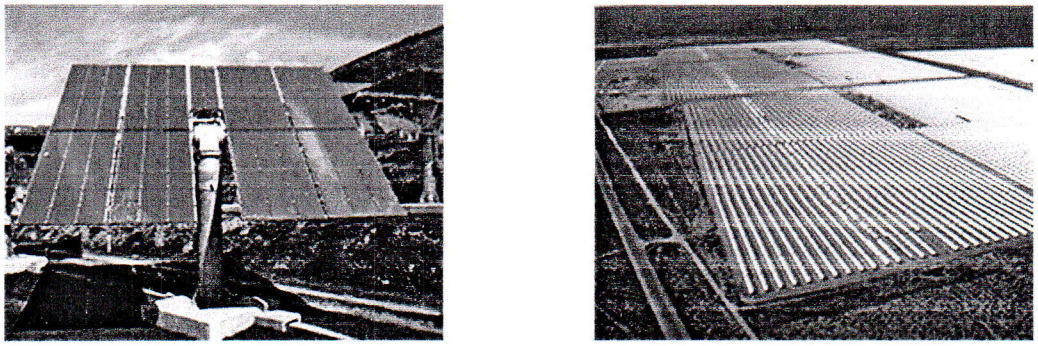


**Figure (2-5) : Panneaux photovoltaïques**

**2-8- champ photovoltaïque** :

Lorsque les panneaux photovoltaïques sont interconnectés entre eux et fixés sur un support, on obtient un champ photovoltaïque fonctionnant comme une seule unité de production d'électricité.

La puissance du champ photovoltaïque est aussi exprimée en watt crête (Wc).

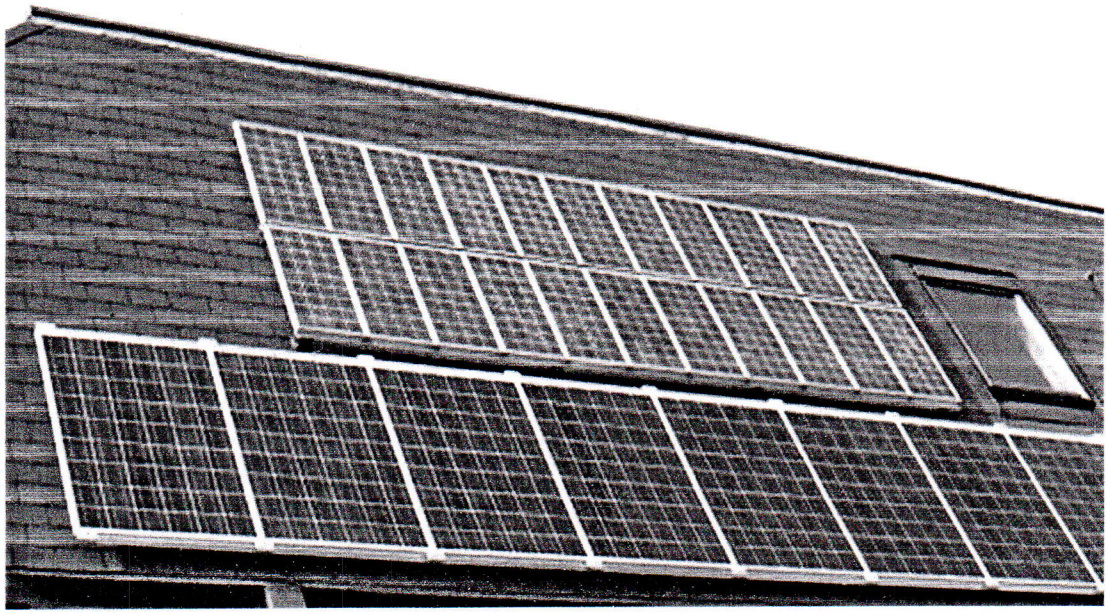


**Figure (2-6) : champ photovoltaïque**

**2-9- Batterie :**

Afin de stocker l'énergie électrique produite en journée par les panneaux PV et pouvoir la réutiliser la nuit ou en période de faible ensoleillement, on utilise un dispositif de stockage de l'énergie électrique, La batterie. Elle est composée d'unités électrochimiques appelées cellules, qui produisent un voltage en transformant l'énergie chimique qu'elles contiennent en énergie électrique. Chaque cellule produit une tension variant entre 1 et 2 V selon le type de

batterie. En assemblant ces cellules en série/parallèle, on obtient des tensions de batteries suivantes: 12, 24 ou 48 Volt.

**2-10-la cellule solaire idéale :**

Mécanisme élémentaire : l'optimisation de la convention de l'énergie solaire en électricité requiert au moins que trois phénomènes physiques de base aient lieu quasi simultanément :

- l'absorption du maximum possible de photons ;

- la transformation de l'énergie ainsi absorbée en charges électriques libres ;

- la collecte sans perte de ces derniers dans un circuit électrique extérieure

Une photopile solaire doit donc être constituée :

_ D'un matériau absorbant dans la bande optique du spectre solaire, possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie, transformant d'énergie lumineuse sous forme potentielle et non thermique ;

_ D'une structure de collecte de faible résistance électrique ;

Le premier phénomène à optimiser est l'absorption par un matériau approprié de la partie la plus intense du spectre solaire, ayant pour résultat la libération d'électron qui deviennent alors des porteurs de charge électrique mobiles laissant derrière eux des vacances, des trous qui à leur tour peuvent se déplacer dans le matériau, en générale à une vitesse différente par le réarrangement des électrons qui les entourent

Le second phénomène à optimiser est la rapide séparation des électrons et trous avant qu'ils se recombinent, et leur entraînement vers les électrons et trous avant qu'ils ne se recombinent, et leur bleu uniforme

Cette dernière solution a été réalisée à un niveau de pilote industriel avec trois photopiles

**2-11-Spectre d'une photopile au silicium cristallin :**

On sait que l'énergie Eg minimum pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction est de 1,1 eV pour le silicium cristallin (pour les isolants Eg est de l'ordre de 5eV).

On peut calculer la fréquence minimum du rayonnement dont le photon de base possèdera une énergie supérieure à cette valeur.[32-33]

Commençons par convertir cette énergie de 1,1eV en joules, sachant que

$1eV = 1{,}6022.10^{-19}$ J

$1{,}1eV = 1{,}7624.10^{-19}$ J

$$f = \frac{W}{h} = \frac{1{,}7624.10^{-19}}{6{,}6262.10^{-34}} = 266 \text{ THz}$$

Ce qui correspond à un rayonnement infrarouge.

**2-12- Rendement d'une photopile :**

La puissance par m² du rayonnement solaire reçu à la surface de la Terre (donc l'éclairement en W/m²) est de l'ordre de 1000 W/m², valeur dépendant de la latitude, de la saison, des conditions météorologiques.

Un générateur photovoltaïque d'une surface utile de 1 m² orienté perpendiculairement aux rayons du soleil et recevant une puissance lumineuse de 1000 W ne produit en réalité que 60 à 200 W "électrique" suivant la technologie avec laquelle il a été fabriqué.

Le rendement d'une cellule fabriquée à partir d'un monocristal est un peu supérieur à 15%, de silicium poly cristallin de l'ordre de 10 à 15% et de silicium amorphe entre 5 et 10% (les coûts de fabrication sont eux aussi dégressifs).

Ces faibles rendements sont dus aux pertes (réflexion, pertes Joule...) et au fait que la sensibilité de la cellule ne couvre pas la totalité du spectre du rayonnement solaire : le seuil de conduction, déterminé par l'énergie Eg de 1,1eV pour le silicium cristallin, correspondant à une fréquence de 266 Hz.

D'autres matériaux sont utilisés : tellurure de cadmium, arséniure de gallium, di séléniure de cuivre et d'indium (CIS).

Ces technologies sont encore très coûteuses mais elles laissent espérer des rendements bien supérieurs au silicium et une durée de vie plus grande.

**2-13-La photo conductibilité :**

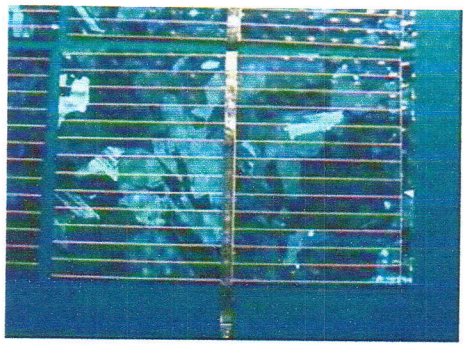


**Figure (2-7) : La photo conductibilité**

Dans l'obscurité un cristal ordinaire de semi-conducteur présente une résistivité élevée.

Lorsqu'il est fortement éclairé par un rayonnement de fréquence assez élevé (lumière visible ou UV) sa résistivité diminue, c'est le phénomène de photo conductibilité.

Les photons qui constituent le rayon lumineux sont des grains d'énergie d'autant plus élevée que la fréquence de l'onde correspondant à ce rayon lumineux est grande (de l'ordre de 500 à 700 térahertz .

Si la fréquence du rayonnement est grande donc l'énergie du photon suffisante, ce photon pourra aider un électron bloqué dans la bande de valence à sauter dans la bande de conduction. [34-44]

Pour le silicium cristallin la largeur de la bande interdite, donc l'énergie Eg minimum nécessaire à l'électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction, est de 1,1 électronvolt. C'est la prolifération d'électrons "libres" (et des "trous" correspondants) qui rend le matériau plus conducteur.

La fréquence du rayonnement et l'énergie du photon considéré de deux manières :

**2-13-1-le modèle ondulatoire :**

Le rayonnement est une onde de fréquence f en hertz et de longueur d'onde "l" en m (ou plus généralement en nanomètres).

Pour la raie D1 f = 509 THz (ter hertz) pour une longueur d'onde de 589,5 nm.

**2-13-2-le modèle corpusculaire :**

Le rayon lumineux est composé de grains de lumière dont l'énergie individuelle (en joule) est égale au produit de la constante de Planck par la fréquence (en hertz) du rayonnement :

**W = h.f** .

Dans notre exemple l'énergie W du photon est de 3,37.10-19 J soit 2,1 eV (électron--volt), unité plus pratique à utiliser pour ces très faibles énergies.

**2-14- Technologies de cellules :**

**Principe :**

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque. [45-47]
En effet, une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur.
Ces deux couches sont dopées différemment :

- Pour la couche N, apport d'électrons périphériques
- Pour la couche P, déficit d'électrons.

Ces deux couches présentent ainsi une différence de potentiel.

L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu.

Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur (figure 2-9).

L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux.

Une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée.

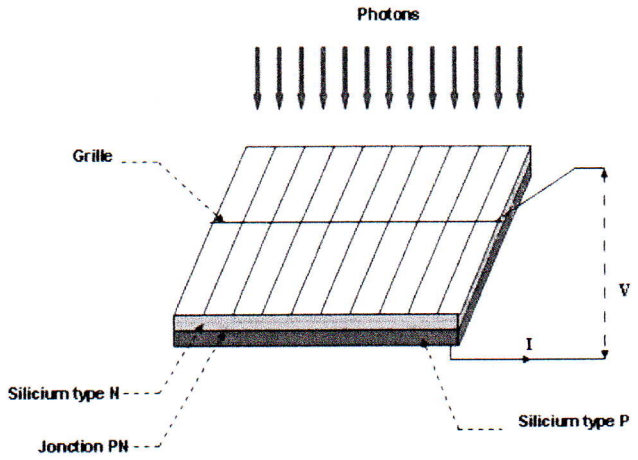



**Figure (2-8): Schéma d'une cellule élémentaire.**

**2-15- construction d'une cellule solaire [48-50] :**

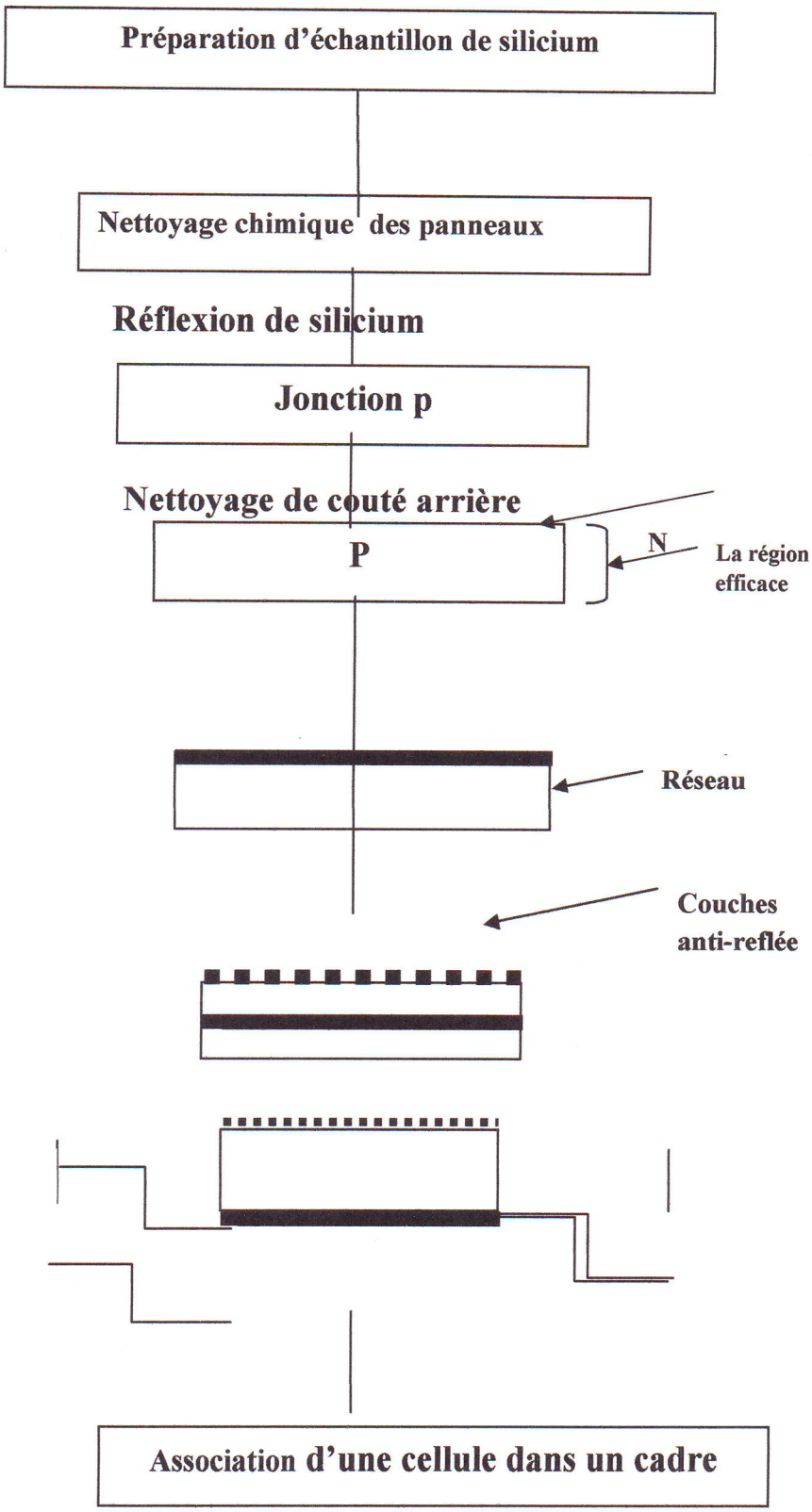



**Figure (2-9): les étapes à suivre pour fabriquer une cellule solaire en silicium**

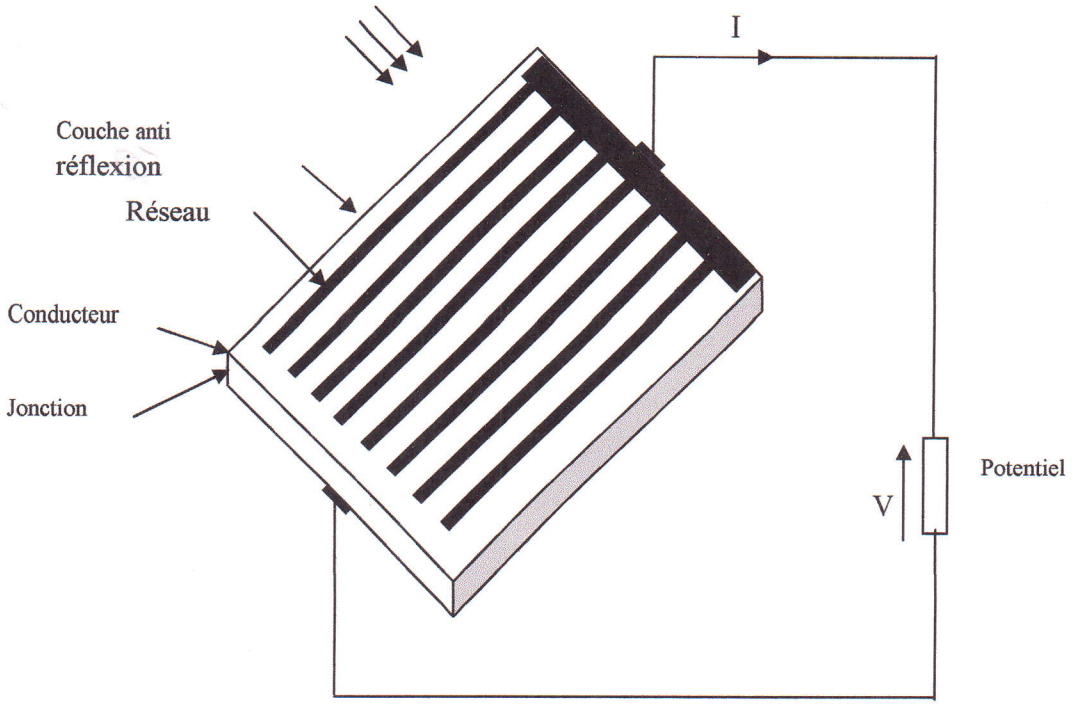



**Figure (2-10) : diagramme d'une cellule solaire**

Et la cellule équivalente à la cellule solaire est :

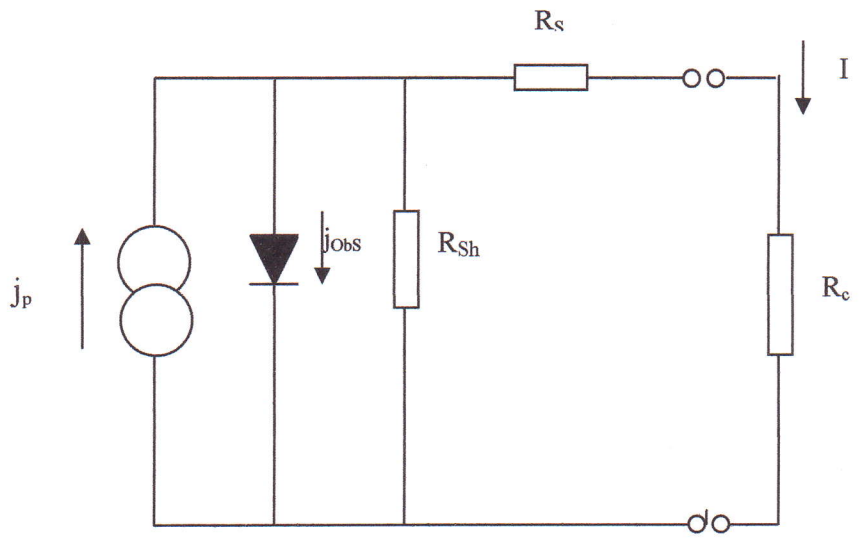



**Figure (2-11) :le circuit équivalent à une cellule**

Tel que :

R : résistance série parallèle interne

$R_{sh}$ : résistance parallèle

$j_{ph}$ : densité de courant.

$I_{Obs}$: densité du courant photovoltaïque

$R_c$: résistance potential

## 2-16-Conclusion

Une cellule photovoltaïque transforme l'énergie lumineuse du soleil en courant électrique grâce au matériau semi-conducteur qu'elle contient.

La majorité des cellules sont actuellement à base de silicium cristallin et ont un rendement de conversion de 12 à 16 %.

## 3-1-Introduction

Le principe de l'effet photoélectrique (transformation directe d'énergie portée par la lumière en électricité) a été appliqué on 1839 qui ont noté qu'une chaîne d'éléments conducteurs d'électricité donnait naissance à un courant électrique spontané quand elle était éclairée.

Plus tard, le sélénium puis le silicium (qui a finalement pour des raisons de coût supplanté le cadmium-tellure ou le cadmium-indium-sélénium également testés) se sont montrés aptes à la production des premières cellules photovoltaïques (posemètres pour la photographie dès 1914, puis 40 ans plus tard (en 1954) pour une production électrique.

La recherche porte également aujourd'hui sur des polymères et matériaux organiques susceptibles (éventuellement souples) qui pourraient remplacer le silicium.

## 3-2-Types de cellules

Généralement on distingue trois générations de cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques. [51-57]

### 3-2-1- 1ère génération

Les cellules de première génération figure (3-1). Sont basées sur une seule jonction p-n et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur.

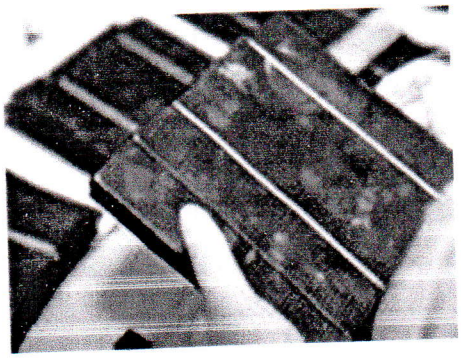


**Figure (3-1) : 1ère génération**

La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère.