



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N°d'enregistrement

Université de Ghardaïa

/...../...../...../...../.....

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم هندسة الطرائق

Département de Génie des Procédés

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Génie des Procédés

Spécialité: Génie Chimique.

Thème

**Valorisation d'un déchet ménager dans le but de produire
l'énergie solaire**

Par

Zadjia HAMEL

Zineb DJELLOUD

jury composé de:

Moulai Kerroumia	MAA	Université de Ghardaïa	Examineur
Trabelsi Amel	MAA	Université de Ghardaïa	Examineur
Khazen souad	MAA	Université de Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2020/2021

Remerciements

Au terme de notre travail : on tient tout d'abord à remercier le bon DIEU le tout puissant pour le courage, la patience et la santé qu'il nous a donné pour suivre nos études.

Nous souhaitons exprimer nos reconnaissances qui sont innombrables. Cependant, ne pouvant pas dresser la liste exhaustive de tout le monde, dans la crainte d'oublier quelqu'un.

Nous commencerons volontiers par rendre hommage à toutes celles et tous ceux, sans exception, qui ont contribué de près ou de loin à favoriser ce travail.

Nous exprimons notre gratitude et tout notre respect à notre encadreur, Mme KHAZEN SOUAD de nous avoir suivi tout au long de notre travail.

Nous remercions vivement le jury d'avoir accepté de juger et de valoriser notre travail.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes parents, et surtout ma mère, qui est la source de
résistance et d'espoir pour toujours.*

*Mes frères: Youssef, Ismail, Ayman, Ayoub, que dieu
les protège.*

Mes chers amis.

Mon fiancé Saddam.

Ma chère binôme Zadjia HAMEL et toute sa famille.

*A tous ceux, qui m'ont soutenue tout au long de la
période de réalisation de ce modeste travail.*

Zineb

DEDICACE

*Avec une profonde gratitude et des mots sincères, je dédie une
humble fin à cette étude à :*

Mes chers parents, pour leurs sacrifices et leurs sages conseils.

*Nous espérons un jour rendre une partie de ce qu'ils ont fait pour
moi, que Dieu les bénisse et prolonge leurs vies.*

*Nous dédions également ce travail à mes frères et à tous les
membres de ma famille.*

Et tous mes amis, surtout mes copines,

*Ma chère amie Zineb DJELLOUD et tous les membres de sa
famille.*

*A tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin tout au long de
mes études*

Zadjia

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : L'ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique	8
Tableau I. 2 : Caractéristiques des cellules PV	15
Tableau I. 3 : Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques	26
Tableau II. 1 : Différentes Couleurs LED	34
Tableau IV. 1 : résultat de comparaison	56

Liste des figures

Figure I. 1 : Source d'énergies	7
Figure I. 2 : Système solaire.....	9
Figure I. 3 : Structure d'une cellule PV	12
Figure I. 4 : Principe de conversion photovoltaïque	13
Figure I. 5 : La jonction p-n	14
Figure I. 6 : L'effet Photovoltaïque.....	15
Figure I. 7 : Raccordement des cellules en série	17
Figure I. 8 : Raccordement des cellules en parallèle	17
Figure I. 9 : Principe De Fonctionnement De Panneau Solaire.	19
Figure I. 10 : Panneau Monocristallin	19
Figure I. 11 : Panneau polycristallin.	20
Figure I. 12 : Panneau silicium amorphe	20
Figure I. 13 : Module photovoltaïque	21
Figure I. 14 : Schéma synoptique d'un système PV autonome avec batterie	23
Figure I. 15 : Schéma synoptique d'un système hybride	24
Figure I. 16 : Schéma de système connecté au réseau	24
Figure I. 17 : Systèmes photovoltaïques relié au réseau avec batterie	25
Figure II. 1 : Diode électroluminescente et à coté droite le symbole Diode Electroluminescente	31
Figure II. 2 : Construction de LED	32
Figure II. 3 : Fonctionnement de la LED	33
Figure II. 4 : Tension et courant des LED	36
Figure III. 1 : D'appareils de contrôle TV	39
Figure III. 2 : Le démontons d'appareils.....	40
Figure III. 3 : Méthode de suppression de la diode.....	41
Figure III. 4 : Diode	42
Figure III. 5 : Voltmètres Et Fils De Connexion.....	42
Figure III. 6 : Test d'électrode de diode	43
Figure III. 8 : Fil De Cheveux En Cuivre.....	44
Figure III. 8 : Un Câble Téléphonique.....	44
Figure III. 10 : Un Câble Téléphonique	44
Figure III. 10 : Une Pince.....	44
Figure III. 12 : Fil D'isolation	45
Figure III. 12 : Déchâtes	45
Figure III. 13 : Enlever L'isolant	45
Figure III. 14 : Un fil de cuivre	46
Figure III. 15 : Méthode de sertissage et de perforation d'un panneau de bois	46

Figure III. 16 : Panneau à noir	47
Figure III. 17 : Modèle final du panneau TRIS.....	48
Figure IV. 1 : Module solaire.....	50
Figure IV. 2 : Représente les variations de tension en fonction de nombre des diodes	51
Figure IV. 3 : Panneau à diodes	52
Figure IV. 4 : Panneau solaire.....	52
Figure IV. 5 : Voltmètre.....	53
Figure IV. 6 : Galvanomètre	53
Figure IV. 7 : Installation de panneau.....	54
Figure IV. 8 : L'évolution de tension en fonction du temps pour la cellule photovoltaïque et la cellule solaire à diode.	55
Figure IV. 9 : Installation de panneau solaire diode	56
Figure IV. 10 : Rayonnement solaire.(26/05/2021)	57
Figure IV. 11 : Influence de tension par de temps	57

Liste des abréviations

PV: Photovoltaïque.

Ns : Nombre des cellules en série

Np : Nombre des en parallèle

DC: Courant Continu (Direct Current)

E : L'éclairement w/m^2

CA : Courant alternatif

LED : Light Emitting Diode

R C : Résistance limite le courant

TV : Télécommandes t : temps (min)

A,B : Deux constant

U : Tension (V) ; U_{max} la tension max

I: Courant (A) ; I_{max} le courant max

S : Surface (m^2)

η X : Rendement

N : Nombre de diode

P_{max} : Puissance maximal (w)

P_{recue} : Puissance reçue (w)

Sommaire

<i>Remerciements</i>	
<i>DÉDICACE</i>	
<i>DÉDICACE</i>	
<i>Liste des tableaux</i>	
<i>Liste des figures</i>	
Liste des abréviations.....	
<i>Sommaire</i>	
Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque	
I.1.Introduction :	4
I.2. Les énergies renouvelables	4
I.2.1.Définition des énergies renouvelables :	4
I.2.2.Avantages et les inconvénients des énergies renouvelables:	5
I.3.Energie solaire :	7
I.3.1.Les applications de l'énergie solaire :	8
I.4. Types d'énergie solaire :	8
I.4.1.L'énergie solaire thermique :	8
I.4.2.L'énergie solaire photovoltaïque :	9
I.5. L'énergie photovoltaïque :	10
I.5.1. Historique de l'énergie photovoltaïque :	10
I.5.2. La cellule photovoltaïque :	11
I.5.2.1.Structure d'une cellule PV :	11
I.5.3 Principe de fonctionnement :	12
I.5.4. La jonction p-n:	13
I.5.5. L'effet photovoltaïque :	14
I.5.6.Types des cellules PV :	15
I.5.6.1. Silicium mono cristallin :	15
I.5.6.2. Silicium polycristallin :	15
I.5.6.3. Silicium amorphe :	15

I.5.7.Regroupement des cellules:	16
I.5.7.1.Regroupement en série:	16
I.5.7.2. Regroupement en parallèle :	17
I.5.7.3. Regroupement (série et parallèle) :	17
I.6. Le panneau solaire :	18
I.6.1. Principe de fonctionnement de panneau solaire:	18
I.6.2. Types de panneaux solaires :	19
I.6.2.1. Le Monocristallin :	19
I.6.2.2. Le Polycristallin :	20
I.6.2.3. Les panneaux Amorphes :	20
I.7. Constitution d'un système photovoltaïque :	21
I.7.1. Le module photovoltaïque :	21
I.7.2. Batterie de stockage :	21
I.7.3. Régulateur de la charge :	21
I.7.4. Les convertisseurs :	22
I.7.5. Différents types de systèmes photovoltaïques :	22
I.7.5.1. Les systèmes autonomes :	22
I.7.5.2. Les systèmes hybrides	23
I.7.5.3. Les systèmes connectés au réseau :	24
I.8. Le choix d'un Panneau solaire:	25
I.9. Comparaison des technologies des cellules photovoltaïques :	26
I.10. Les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques :	27
Chapitre II : Généralités sur les diodes LED	29
II.1. Introduction :	30
II.2. Diode électroluminescente :	30
II.3. Construction de LED :	32
II.4. Fonctionnement de la LED :	33
II.5. Couleurs LED :	34
II.6. Tension et courant des LED:	36
II.7. Avantages et Inconvénients de la LED :	37
Chapitre III : Matériels et méthodes	
III.1 Introduction :	39
III.2. méthode de fabrication d'une cellule solaire :	39
Chapitre IV 49 Résultats et discussion	

IV.1.Introduction	50
IV.2. Efficacités de la cellule solaire à diode	52
IV.3. Rendement	58
Conclusion Générale.....	63
Bibliographie	

Résumé :

Le recyclage est le processus de traitement des déchets industriels et domestiques, et offre des avantages économiques importants et enviables pour la protection des ressources. Le recyclage des déchets électroniques nous permet de récupérer de nombreux métaux précieux et autres matériaux électroniques, tout en économisant les ressources naturelles (énergie) d'autre part leur recyclage nous permet de réduire les déchets de production. La valorisation des déchets possibles permet de se débarrasser de nos déchets.

L'objectif de notre travail est de recycler les déchets électroniques ménagers et de les utiliser dans la fabrication de panneaux solaires pour produire de l'énergie électrique comme alternative aux panneaux solaires coûteux.

Le photovoltaïque est une énergie propre et économique, mais le solaire est une solution d'avenir qui mérite d'être explorée plus avant, d'autant plus qu'il reste encore beaucoup à faire.

Mots clés: Recyclage, déchets électroniques ménagers, valorisation, énergie photovoltaïque, énergie solaire.

Abstract:

Recycling is the process of treating industrial and domestic waste, and offers significant and enviable economic benefits for the protection of resources. Recycling electronic waste allows us to recover many precious metals and other electronic materials, while saving natural resources (energy) on the other hand, their recycling allows us to reduce production waste. The potential recovery of waste allows us to dispose of our waste.

The main of our work to recycle household electronic waste and use it in the manufacture of solar panels to generate electric power as an alternative to expensive solar panels.

Photovoltaic is clean and economical energy, but solar energy is a solution of the future that deserves to be explored further, especially since there is still a lot to do.

Keywords: recycling, household electronic waste, recovery, photovoltaic energy, solar energy.

ملخص :

إعادة التدوير هي عملية معالجة النفايات الصناعية والمنزلية ، وتقدم فوائد اقتصادية كبيرة وتحسد عليها لحماية الموارد. تسمح لنا إعادة تدوير النفايات الإلكترونية باستعادة العديد من المعادن الثمينة والمواد الإلكترونية الأخرى ، مع توفير الموارد الطبيعية (الطاقة) من ناحية أخرى ، فإن إعادة تدويرها يسمح لنا بتقليل نفايات الإنتاج. الاسترداد المحتمل للنفايات يسمح لنا بالتخلص من نفاياتنا

هدف من عملنا هو إعادة تدوير النفايات الإلكترونية المنزلية واستخدامها في تصنيع الألواح الشمسية لتوليد الطاقة الكهربائية كبديل للألواح الشمسية باهظة الثمن

الخلايا الكهروضوئية هي طاقة نظيفة واقتصادية ، لكن الطاقة الشمسية هي حل للمستقبل يستحق المزيد من الاستكشاف ، خاصة أنه لا يزال هناك الكثير للقيام به

الكلمات المفتاحية: إعادة التدوير ، النفايات الإلكترونية المنزلية ، الاسترجاع ، الطاقة الكهروضوئية ، الطاقة الشمسية

Introduction Générale

Introduction Générale

Depuis le début des années 1990, le groupe environnementaliste est devenu une nuisance. En effet, la question des déchets est devenue un sujet de recherche très important, encouragé par les politiques publiques, la gestion des déchets est l'une des priorités approuvées par les pouvoirs publics, en particulier, elle peut pomper directement les déchets dans plusieurs zones. Les déchets sont un vrai problème, ancré dans toute vie biologique et toutes les activités industrielles, agricoles ou urbaines.

Les déchets électroniques, communément appelés déchets électroniques sont les déchets que nous produisons à partir d'appareils électroniques excédentaires, cassés et obsolètes. 50 millions de tonnes des déchets électroniques, dont 50% liés aux appareils électroménager, ce qui représente un grand danger pour la santé de l'Homme et de l'environnement.

Les appareils tels que les téléphones portables, les téléviseurs et les ordinateurs deviennent rapidement obsolètes et finissent dans les décharges, ce qui entraîne une quantité toujours croissante de déchets électroniques. Les appareils électroniques contiennent de nombreux produits chimiques toxiques et dangereux qui sont rejetés dans l'environnement si nous ne les éliminons pas correctement. Le recyclage des déchets électroniques ou des appareils électroniques est le processus de récupération des matériaux des anciens appareils pour les utiliser dans de nouveaux produits.

Aujourd'hui, la valorisation est la pierre angulaire de la politique des déchets. Depuis plusieurs années, elle occupe une place prépondérante dans le domaine de la gestion des déchets. Les réglementations européennes et françaises ont fait un enjeu majeur.

Le recyclage est le processus de traitement des déchets industriels et domestiques, et il offre des avantages économiques et significatifs enviables pour protéger les ressources, minimiser les déchets naturels et utiliser les stocks des réserves. Le recyclage des déchets électroniques nous permet de récupérer de nombreux métaux précieux et autres matériaux de l'électronique, économiser les ressources naturelles (énergie) D'autre part, le recyclage des déchets électroniques permet de réduire les déchets de production.

Pour aider à préserver l'environnement et réduire les déchets, nous nous concentrons sur le recyclage des déchets ménagers, c'est-à-dire la préfabrication et la réutilisation.

L'objectif de ce travail est de faire une valorisation d'un déchet électroménager pour produire une cellule solaire à diode et faire une étude comparative expérimentale entre ce modèle avec une cellule photovoltaïque à des propriétés connues. Les travaux du mémorandum sont divisés en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous décrivons les concepts de base des énergies renouvelables, de l'énergie solaire, de l'énergie photovoltaïque.
- Dans le deuxième chapitre, nous avons donné des concepts de base de la diode électroluminescente et ses propriétés.
- Le troisième chapitre, nous avons présentés les travaux expérimentaux.
- Chapitre quatre : résultats et discussion

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralités sur l'énergie photovoltaïque

I.1.Introduction :

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée. En effet, la terre reçoit plus de 3000 h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement, avec une optimisation des angles de réception, la moyenne annuelle journalière est de 5 à 7 kWh /m²/jour [7]. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique [8].

I.2. Les énergies renouvelables

I.2.1.Définition des énergies renouvelables :

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par Les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le comportement des consommateurs d'énergie est donc un facteur à prendre en compte dans cette définition. Les énergies renouvelables sont également plus « propres » (moins d'émissions de CO₂, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles. Les principales énergies renouvelables sont [9] :

- L'énergie hydraulique.
- L'énergie solaire.
- L'énergie éolienne.
- La géothermie.
- L'énergie de biomasse

I.2.2. Avantages et les inconvénients des énergies renouvelables:

Les énergies fossiles sont souvent très polluantes. Leur combustion produit du CO₂. C'est le cas du pétrole, du gaz naturel et du charbon. L'uranium est considéré comme non renouvelable mais ce n'est pas un combustible fossile. En revanche, son utilisation produit des déchets radioactifs.

Voici les raisons pour lesquelles l'énergie renouvelable est préférable aux combustibles fossiles et à l'uranium :

- ❖ Elle est renouvelable et ne peut pas s'épuiser.
- ❖ Elle est propre et non polluante, à la différence de combustibles fossiles qui émettent des hydrocarbures et du CO₂ dans l'air une fois qu'ils sont brûlés.
- ❖ Elle peut être disponible localement, contrairement aux combustibles fossiles qui ne sont disponibles que dans certains pays, qui ont des réserves pétrolières. Ainsi, le coût de l'énergie n'est pas contrôlé par la situation économique et politique des autres pays qui sont impliqués dans l'approvisionnement en pétrole.
- ❖ Une fois la production d'énergie renouvelable mise en place et les investissements réalisés, le coût de l'énergie sera moins cher que le coût des combustibles fossiles, parce que les sources sont abondantes et gratuites [10].

Les énergies renouvelables permettent de rejeter moins de CO₂ dans l'atmosphère que les énergies fossiles, en apparence seulement. Le principal avantage des énergies renouvelables sont nombreux [11]:

- Énergie propre. Les énergies renouvelables ne libèrent pas ou peu de gaz à effet de serre. Elles ne délivrent pas non plus une quantité énorme de déchets et n'utilisent pas de carburant pour fonctionner. C'est une énergie peu polluante.
- Énergie gratuite. La source des énergies renouvelables fait partie de la nature. Pour la transformer en énergie, il faut certes mettre en place un dispositif

adéquat. Mais par la suite, vous n'avez plus qu'à profiter de la générosité de la nature.

- Énergie illimitée. À l'échelle de l'humanité, le rayonnement du soleil, la force du vent et de l'eau sont des ressources inépuisables. Même si la quantité fournie peut être variable.
- Énergie sûre. Peu d'accidents sont à déplorer avec ces dispositifs liés aux énergies renouvelables.
- Énergie décentralisée. Les systèmes de génération d'énergie renouvelable peuvent être implantés sur tout le territoire. Leur mise en place est souvent génératrice d'emplois pour les territoires receveuses.

Contre toute attente, les inconvénients des énergies renouvelables existent.

- Des impacts sur la vie des habitants tant visuels que sonores. C'est le cas des panneaux solaires sur les toits des maisons, des champs éoliens offshore ou ceux implantés près des habitations.
- Une source d'énergie non constante. L'énergie solaire ou éolienne dépend de la météo. Une journée nuageuse produit moins d'électricité et en l'absence de vent, les éoliennes ne fonctionneraient pas.
- Une installation coûteuse dans certains cas. La mise en place de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes ou encore de barrages hydrauliques engendre des coûts importants. Mais c'est le prix à payer pour disposer d'une énergie propre et illimitée.
- Un impact sur l'écosystème. Oui, vous avez bien lu. L'installation d'un barrage hydroélectrique implique l'inondation de vallées et un bouleversement de la faune et flore locale. C'est le cas de l'immigration de certains poissons par exemple.



Figure I. 1 : Source d'énergie [10]

I.3.Énergie solaire :

Le soleil bien que distant de 150 millions de kilomètres de notre planète est assurément notre plus grande source d'énergie les réactions nucléaires qui ont lieu dans le soleil entretiennent et renouvellent en permanence cette source d'énergie.

Bien sur l'énergie reçue est variable selon les moments. Les nuits, les passages nuageux sont autant de moments où l'énergie solaire est inexistante, ou moindre. En moyenne, la puissance reçue annuellement à la surface du globe peut aller de 85 à 290 W/m². Elle varie donc de 01 à 03 entre les régions les moins ensoleillées et les plus ensoleillées. Cet écart est important mais pas considérable : aucune région du globe n'est dépourvue d'énergie solaire [12].

L'énergie solaire peut, ou bien être convertie en chaleur, ou bien convertie en électricité. L'exploitation de cette énergie peut se faire de manière thermique, thermodynamique ou Photovoltaïque [12].

I.3.1. Les applications de l'énergie solaire :

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien montre que le Sahara occupe une grande superficie du territoire et que l'ensoleillement annuel reçu est très important et atteint 2600 kWh/m²/an, ce qui le classe parmi les plus grands gisements solaires au monde [13], le tableau I.1 ci-dessous présente l'ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique.

Tableau I. 1 : l'ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique [13]

Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique	Région Littoral	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale.

I.4. Types d'énergie solaire :

I.4.1. L'énergie solaire thermique :

Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser :

- ❖ En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
- ❖ En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire.

I.4.2.L'énergie solaire photovoltaïque :

Elle permet de produire de l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire (Fig02) avec une cellule photovoltaïque [15].

Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semi-conductrice. Le silicium est le plus employé cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais reste beaucoup plus onéreux [15].

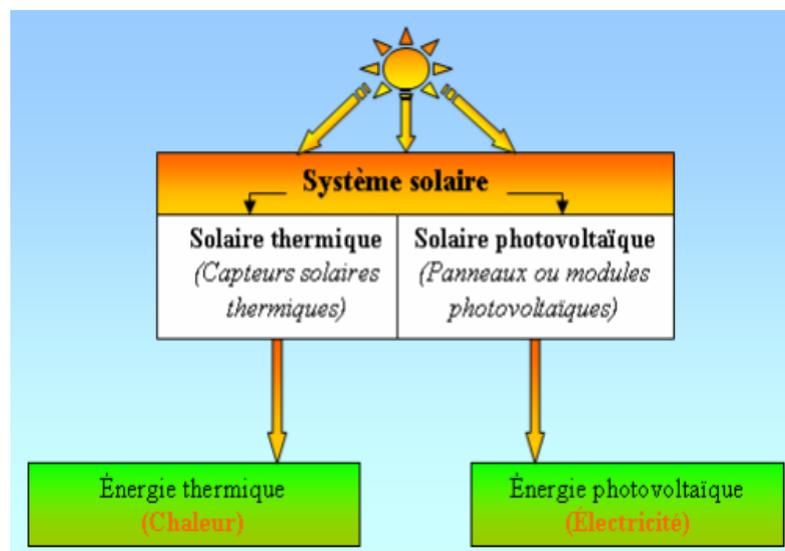


Figure I. 2 : Système solaire [15]

I.5. L'énergie photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

Pour définition le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie 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 électricité [16] [17].

I.5.1. Historique de l'énergie photovoltaïque :

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque :

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 [18].

1954: Trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque [18], [19].

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % ; les premiers satellites alimentés par des cellules Solaires sont envoyés dans l'espace [19].

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware [20].

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie [18].

I.5.2. La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est le plus petit constituant de l'installation photovoltaïque. Elle est généralement constituée de silicium, un matériau semi-conducteur extrait de la silice contenue dans le sable. Son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu [21].

I.5.2.1. Structure d'une cellule PV :

Les cellules PV sont des éléments semi-conducteurs. Elles ne deviennent conductrices que si on leur apporte de la lumière ou de la chaleur.

Le graphique suivant montre la structure schématique d'une cellule PV :

- 1) Contact métallique de la face arrière :

Représente un contact qui permet le prélèvement d'une tension sur la cellule PV.

- 2) Couche semi-conductrice de type p :

Le matériau semi-conducteur contient des atomes externes qui possèdent une quantité inférieure d'électrons libres. On obtient ainsi un excédent positif de porteurs de charge (trous d'électrons) dans le matériau semi-conducteur. Ces couches sont appelées des couches Semi-conductrices à conduction de type p.

- 3) Couche semi-conductrice de type n :

Le matériau semi-conducteur contient des atomes externes qui possèdent une quantité supérieure d'électrons libres. On obtient ainsi un excédent négatif de porteurs de charge (électrons) dans le matériau semi-conducteur. Ces couches sont appelées des couches semi-conductrices à conduction de type n.

- 4) Doigts de contact :

Avec le contact métallique arrière, les doigts de contact constituent les connexions permettant de brancher par exemple un consommateur.

5) Couche anti réflexion :

La couche anti réflexion a pour but de protéger la cellule PV et de réduire les pertes de réflexion à la surface de la cellule [22].

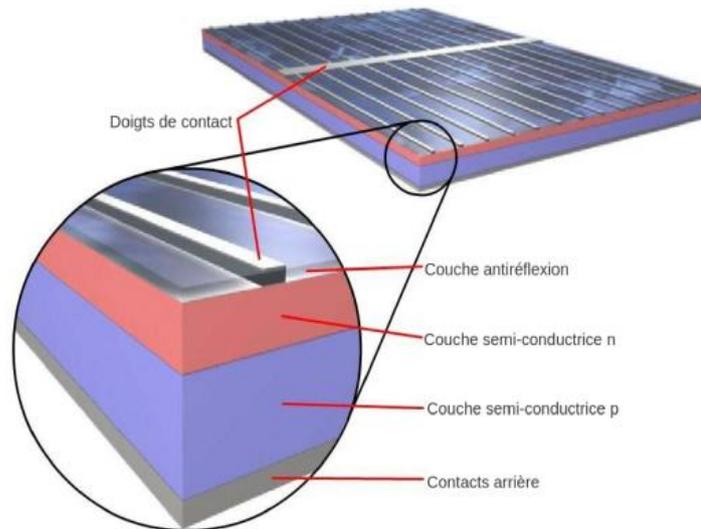


Figure I. 3 : Structure d'une cellule PV [22]

I.5.3 Principe de fonctionnement :

Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction.

Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires «électron-trou ». Les électrons (charges négative) et les trous (charges positive), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant ainsi naissance à une différence de potentiel et un courant électrique qui circule (voir figure I.4) [23].

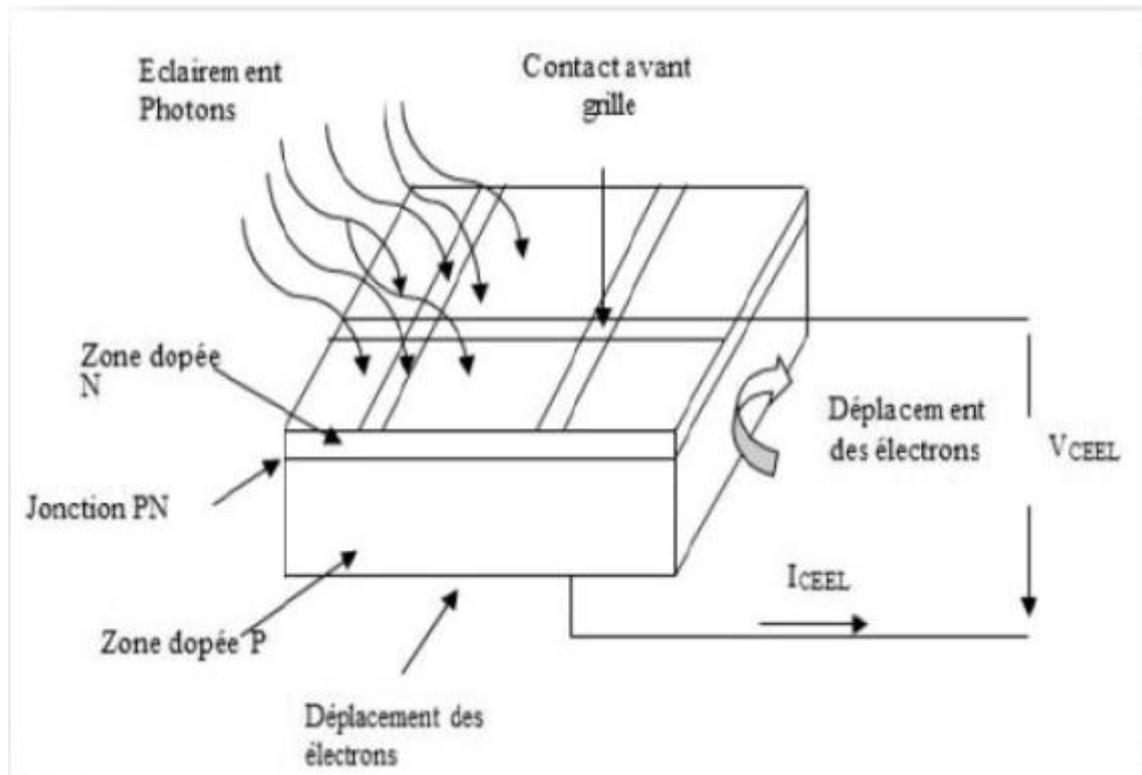


Figure I. 4 : Principe de conversion photovoltaïque [23]

I.5.4. La jonction p-n:

On obtient une jonction p-n en associant des couches semi-conductrices p et n. À la limite entre les deux couches, les électrons se déplacent de la couche n vers la couche p et s'y recombinent avec les trous [22].

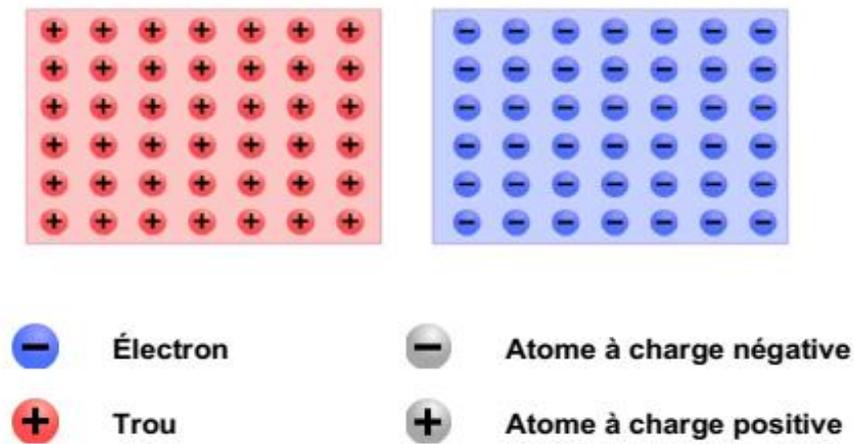


Figure I. 5 : La jonction p-n [22]

Dans la région de la couche n d'où proviennent les électrons, des atomes stationnaires se forment à nouveau, de sorte que cette région devient légèrement positive. Inversement, la région de la couche p, dans laquelle se combinent les électrons et les trous, devient légèrement négative, car le nombre de porteurs de charge augmente.

La séparation des porteurs de charge engendre un champ électrique dans la région limitrophe. Cette zone limite est aussi appelée zone de charge d'espace.

I.5.5. L'effet photovoltaïque :

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photovoltaïque, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charges (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée.

L'énergie des photons absorbée permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électrons-trous, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise [24].

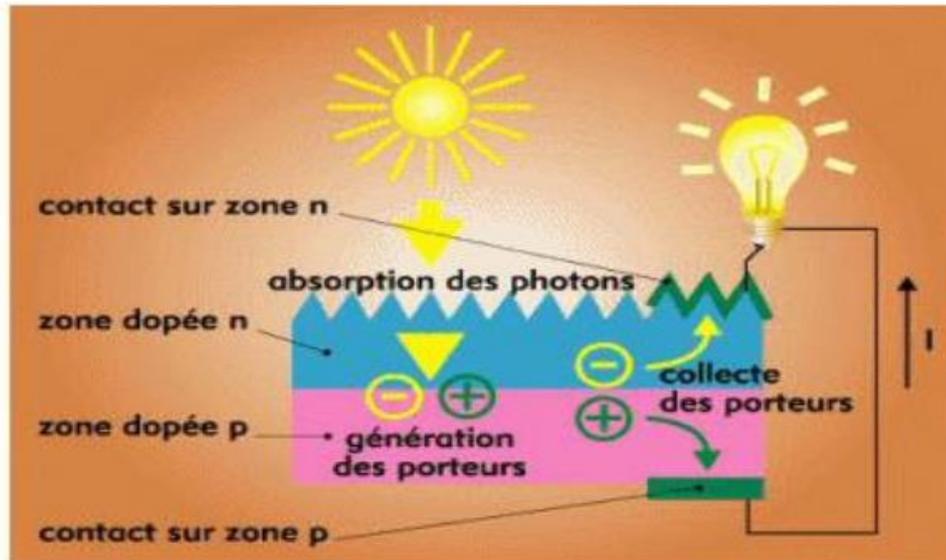


Figure I. 6 : L'effet Photovoltaïque [24]

I.5.6.Types des cellules PV :

I.5.6.1. Silicium mono cristallin :

Les cellules monocristallines sont des photopiles élaborées à partir de silicium cristallisé en un cristal unique. Leur rendement est de 12 à 16 %, mais leur fabrication est complexe et consommatrice d'énergie.

I.5.6.2. Silicium polycristallin :

Les cellules poly cristallines sont fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples. Leur rendement est de 11 à 13% et leur coût de production est un peu moins élevé que celui des cellules monocristallines.

I.5.6.3. Silicium amorphe :

Les cellules amorphes se composent de couches de silicium très minces appliquées sur un support en verre, en plastique souple ou en métal. A l'origine, leur rendement était plus faible (6 à 10%), mais la technologie évolue rapidement. Elle fonctionne avec un éclaircissement

faible ou diffus (même par le temps couvert, y compris sous éclairage artificielle de 20 à 3000 lux) [25]. Le tableau (I.2) fourni une comparaison entre les différentes technologies.

Tableau I. 2 : Caractéristiques des cellules PV [25]

Technologie	Rendement %	Durée de vie	Points forts	Points faibles
Silicium mono cristallins	15 à 18%	35 à 40 ans	Rapport puissance/surface : 130 à 165 Wc/m ² Rendements en forts luminosité	Prix au m ² le + élevé/moins production en faible luminosité perte de productivité lors de fortes températures
Silicium poly cristallins	12 à 15%	30 à 35ans	Rapport puissance /surface : 110 à 144 Wc/m ² Meilleurs rapporte qualité/prix	Moindre production en faible luminosité mais meilleur que le mono , accepte des orientation sud+/-60*et des inclinaisons entre 10 et 45
Silicium Amorphe	6 à 11%	30 à 35 ans	Faible rapport puissance /m ² moins sensible à l'orientation à l'inclinaison productive en faible luminosité	Rapport Pce*/surface : 40à70 Wc/m ²

I.5.7.Regroupement des cellules:

I.5.7.1.Regroupement en série:

Une association de (Ns) cellule en série (figure I.7) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule [26].

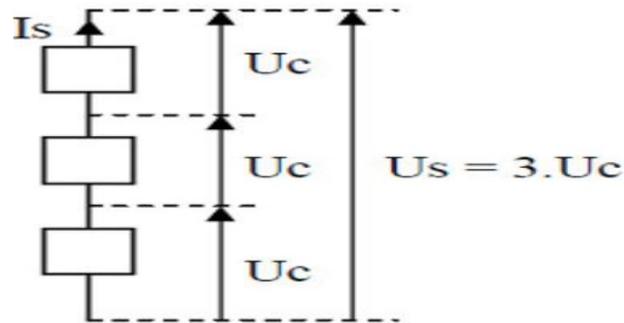


Figure I. 7 : Raccordement des cellules en série [27]

I.5.7.2. Regroupement en parallèle :

Une association parallèle de (NP) cellule est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé (figure I.8). Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [28].

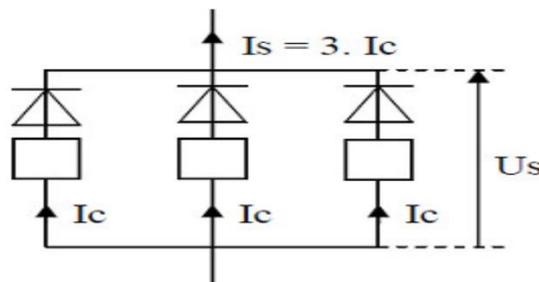


Figure I. 8 : Raccordement des cellules en parallèle [27]

I.5.7.3. Regroupement (série et parallèle) :

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [29].

I.6. Le panneau solaire :

Un panneau solaire est un dispositif énergétique généralement plat et rigide. Les panneaux photovoltaïques standards mesurent 1,7 mètre de long et 1,0 mètre de large. L'épaisseur de leur cadre en aluminium est de 3 à 4 cm. Un panneau classique pèse environ 19 kg, soit 11 kg par m² [30].

Il est composé de cellules de silicium, aussi appelées cellules photovoltaïques, capables de capter la lumière du soleil puis de la transformer en courant continu grâce à l'effet photovoltaïque.

I.6.1. Principe de fonctionnement de panneau solaire:

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N (Fig. I.9).

Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque à la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium [31].

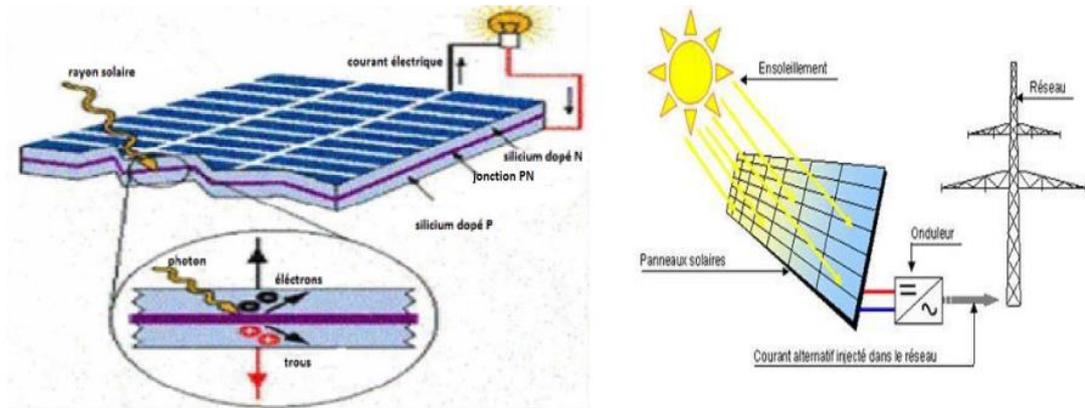


Figure I. 9 : Principe De Fonctionnement De Panneau Solaire [31]

I.6.2. Types de panneaux solaires :

Il existe trois types de panneaux solaires :

I.6.2.1. Le Monocristallin :

Panneaux Monocristallins ils se reconnaissent par une couleur plus uniforme et foncé, Ils résultent de l'assemblage de plusieurs cellules ; il sera donc facile d'en constater L'assemblage pour constituer les panneaux (Fig. I.10) [32].



Figure I. 10 : Panneau Monocristallin [33]

I.6.2.2. Le Polycristallin :

Panneaux Poly-cristallins :

Ils se reconnaissent par une couleur bleutée et non uni forme.

Leur fabrication à partir de copeaux de silicium utilise toute la surface du panneau,

il n'y a donc pas d'espaces d'assemblage comme dans les panneaux monocristallins [32]



Figure I. 11 : Panneau poly-cristallin [33]

I.6.2.3. Les panneaux Amorphes :

Panneaux silicium amorphe ou couche mince : Apparus plus récemment, ces panneaux se reconnaissent par une couleur grise à marron foncé et uniforme avec un grain très fin. Cette uniformité est due à un procédé de fabrication de dépôt du silicium en couches minces [32].



Figure I. 12 : Panneau silicium amorphe [33]

I.7. Constitution d'un système photovoltaïque :

I.7.1. Le module photovoltaïque :

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série ou en parallèle afin d'obtenir des performances électriques désirées, tels que la puissance, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert figure (I.13) [28].

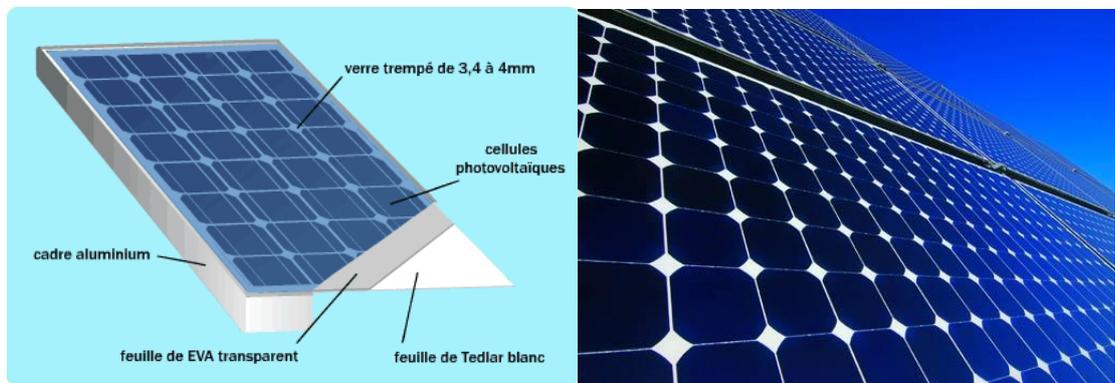


Figure I. 13 : Module photovoltaïque [28]

I.7.2. Batterie de stockage :

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert). Une batterie utilisée avec des panneaux solaires ou une éolienne est une batterie à décharge lente (appelée aussi batterie solaire) [34].

I.7.3. Régulateur de la charge :

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque

entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives [34].

I.7.4. Les convertisseurs :

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, à une tension alternative [6]

❖ Convertisseur DC/AC (Onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé [35].

❖ Convertisseur DC-DC (Hacheur)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [36].

I.7.5. Différents types de systèmes photovoltaïques :

Les trois genres de systèmes PV que l'on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, hybrides et connectés à un réseau.

I.7.5.1. Les systèmes autonomes :

Ce sont les systèmes les plus utilisés dans les cites isolés. Ils sont indépendants de réseau et dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité. Les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. On peut classer ces systèmes en deux catégories [37]:

❖ Systèmes avec accumulateurs:

L'excédent de l'énergie produite est stocké dans des batteries. Le schéma synoptique de la figure (I.14), décrit ce système.

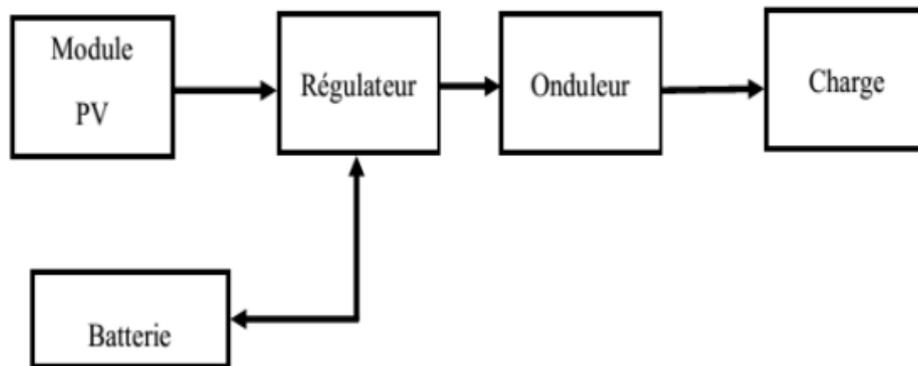


Figure I. 14 : Schéma synoptique d'un système PV autonome avec batterie [37]

❖ Système sans accumulateurs

Dans ces systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à une forme de stockage qui ne soit pas de nature électrochimique. Par exemples [38].

- ✓Pompage: stockage par réservoir d'eau.
- ✓Réfrigération: stockage de froid (stockage de glace ou eutectique).
- ✓Électrolyse de l'eau : stockage d'hydrogène.

I.7.5.2. Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride, figure (I.15), associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue.

Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif [39].

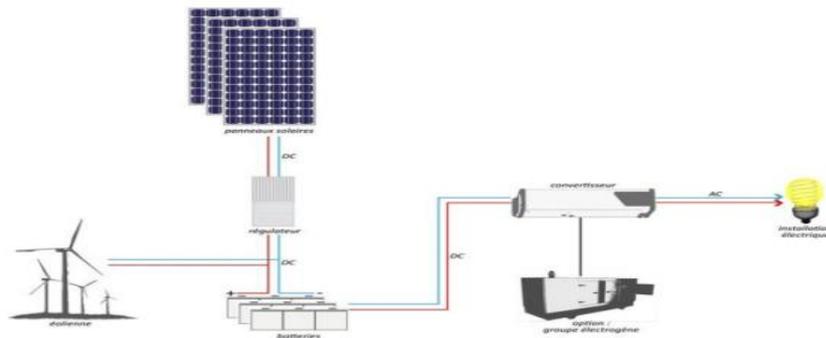


Figure I. 15 : Schéma synoptique d'un système hybride [39]

I.7.5.3. Les systèmes connectés au réseau :

Ces systèmes photovoltaïques convertissent l'électricité en courant alternatif (CA) et transfèrent leur surplus d'électricité au réseau auprès duquel ils s'approvisionnent pendant la nuit ou lorsque le rayonnement solaire est insuffisant voir figure (I.16) [27].

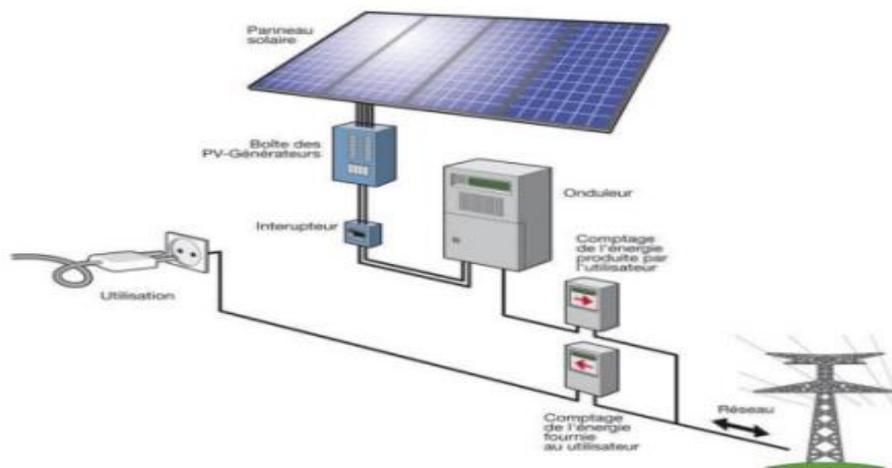


Figure I. 16 : Schéma de système connecté au réseau [27]

Dans ces systèmes on compte :

- Systèmes photovoltaïques directement relié au réseau

- Le système ne peut fournir ou prélever de l'énergie qu'au réseau
- La batterie n'est plus présente.

L'absence des batteries est un point positif, car celle-ci augmente le cout de système photovoltaïque. En plus elle doit être entretenue et changée après quelque année

❖ Systèmes photovoltaïques relié au réseau avec batterie

Le système peut fournir de l'énergie au réseau et prélever l'énergie d'appoint nécessaire au réseau. Le schéma de système photovoltaïque relié au réseau avec batterie est illustré sur la figure(I.17)

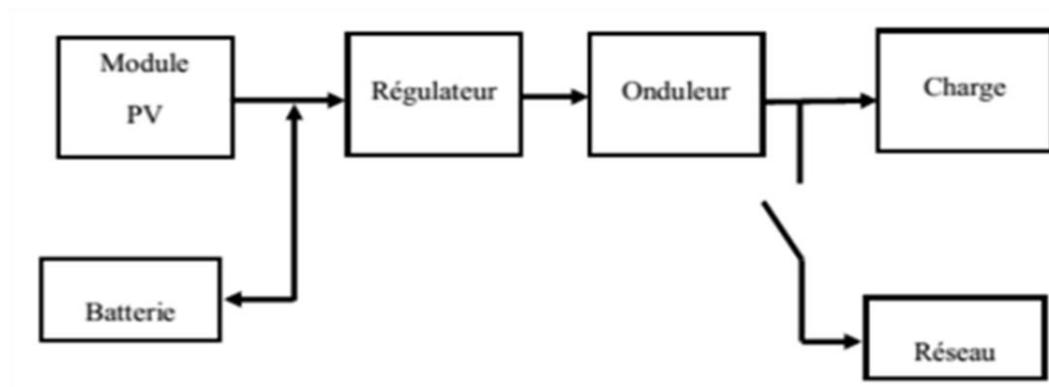


Figure I. 17 : Systèmes photovoltaïques relié au réseau avec batterie [37]

L'énergie est fournie par le module photovoltaïque à la charge, l'excédent est stocké dans les batteries, dans le cas de décharge ou de surcharge de la batterie, on utilisera le réseau pour prélever ou délivrer l'énergie [37].

I.8. Le choix d'un Panneau solaire:

Le choix d'un bon type de panneaux solaires est très important, car il contribue à une production d'énergie efficace, confirme le responsable, soulignant que de nombreux revendeurs économiques locaux ont récemment commencé à produire des panneaux de bonne qualité qui répondent aux normes internationales.

"Ce qu'il faut savoir, c'est que le nombre d'entreprises algériennes produisant actuellement des panneaux solaires est devenu si important qu'elles ont intégré les dernières

technologies orientées vers des usages divers (industrie des pulvérisations agricoles, éclairage public ...) grâce à des investissements massifs de moyens", explique M. Yasaa, ajoutant que "les résultats de ces efforts sont convaincants pourtant compte tenu de la qualité des produits".

Il en va de même pour la National Corporation for Electronic Industries "ENI", qui propose des panneaux solaires en silicium au prix de 95 dinars le watt sans calculer les frais, ce qui signifie qu'elle vend un panneau solaire d'une capacité de 100 watts à un prix de 9500 dinars (hors frais), sachant que la durée de vie moyenne des panneaux varie entre 15 et 20 ans [40].

I.9. Comparaison des technologies des cellules photovoltaïques :

Le tableau I.3 suivant présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque [41].

Tableau I. 2 : Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques [41]

Technologie	Monocristallin	Polychristallin	Amorphe
Cellule et module			
	<ul style="list-style-type: none"> • Très bon rendement : 14 à 20 % • Durée de vie : importante (30 ans) • Coût de fabrication : élevé. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bon rendement : 11 à 15 %. • Durée de vie : importante (30 ans) • Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement faible : 5 à 9 %. • Durée de vie : assez importante (20 ans) • Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies • Puissance :

Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> • Puissance : 100 à 150 Wc/m² / 7 m² /kWc. • Rendement faible sous un faible éclairement. • perte de rendement avec l'élévation de la température. • Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal • Couleur bleue uniforme. 	monocristallins <ul style="list-style-type: none"> • Puissance : 100 Wc/m² . / 8 m² /kWc. • Rendement faible sous un faible éclairement. • perte de rendement avec l'élévation de la température. • Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. • Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux 	50 Wc/m ² 16 m ² /kWc. <ul style="list-style-type: none"> • Fonctionnement correct avec un éclairement faible. • Peu sensible aux températures élevées. • Utilisables en panneaux souples. • Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium. • Rendement faible en plein soleil. • Performances diminuant avec le temps. • Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.
Part de marché	43 %	47 %	10 %

I.10. Les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques :

Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

❖ Les avantages de l'énergie photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages:

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.

- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, Dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans [42].

❖ **Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque:**

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augment [42].

Chapitre II :
Généralités sur les diodes
LED

II.1.Introduction :

L'expression « déchets électroniques » désigne les produits électroniques à la fin de leur durée de vie utile : ordinateurs, téléviseurs, magnétoscopes, appareils stéréo, photocopieuses, fax, téléphones portables.... Bien que beaucoup de ces appareils électroniques puissent être réutilisés, remis en état ou recyclés, en Europe, ils constituent le segment de déchets qui connaît la croissance la plus rapide.

Ces déchets électroniques pourraient avoir des effets de longue durée sur l'environnement. Quand ils sont éliminés de façon inadéquate (incinérés ou jetés dans des décharges au lieu d'être recyclés), des substances toxiques comme le plomb, le cadmium ou le mercure (qui entrent couramment dans la composition des produits électroniques) peuvent contaminer le sol, l'eau et l'air.

Les diodes sont des déchets ménagers, ils sont dans la télécommande du téléviseur...le sujet de ce présent travail étant l'étude de la valorisation énergétique de ces déchets.

II.2. Diode électroluminescente :

Avec le transistor, la diode est la figure emblématique de toute l'électronique. En effet le développement de l'industrie électronique prend son départ avec l'invention des diodes à vide et à galène. C'est grâce à sa fonction de valve électrique que la diode a été utilisée pour détecter et démoduler les ondes radio. Comme son nom l'indique, la diode est un élément actif comportant deux électrodes désignées généralement par anode et cathode. Plusieurs catégories de composants appartiennent à la famille des diodes [43] :

Les diodes de redressement et de détection : jonction PN, diodes Schottky

Les diodes à capacité variable : diodes varicap

- Les diodes de régulation : diodes Zener
- Les diodes électroluminescentes : LED (Light Emitting Diode)
- Les photodiodes (PD)

- Les diodes laser
- Les diodes à effet tunnel

➤ **Diode PN:**

La diode PN résulte de la jonction de deux éléments semi-conducteurs généralement en silicium. L'un des éléments a subi un dopage type P, l'autre un dopage type N [43].

La LED est une diode à jonction PN qui émet de la lumière lorsqu'un courant électrique la traverse dans le sens direct. Dans la LED, la recombinaison du porteur de charge a lieu [44].

L'électron du côté N et le trou du côté P sont combinés et donnent l'énergie sous forme de chaleur et de lumière. La LED est constituée d'un matériau semi - conducteur incolore et la lumière est rayonnée à travers la jonction de la diode.

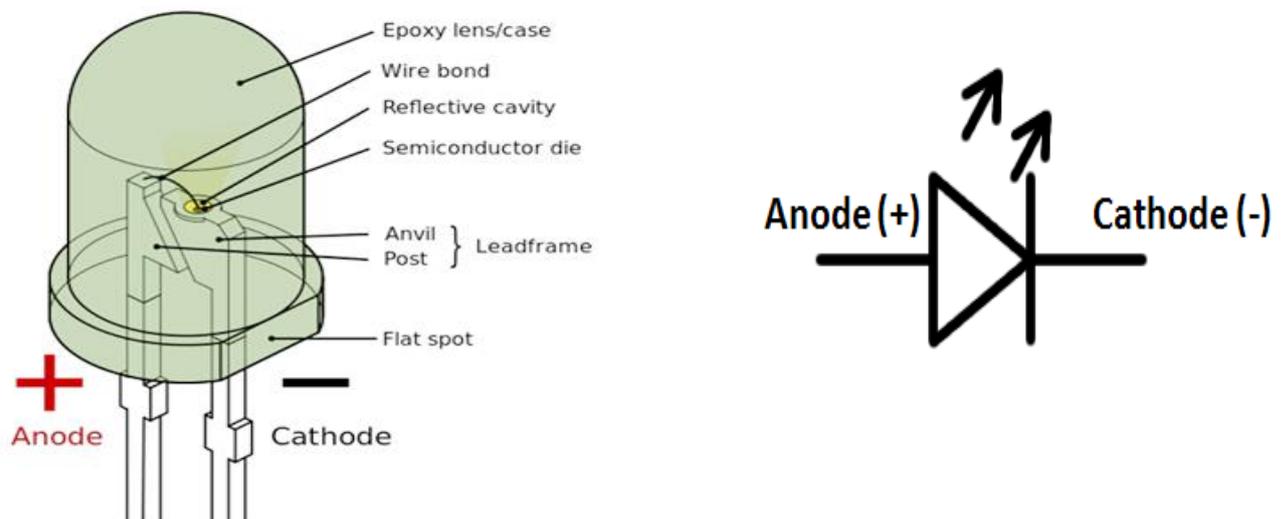


Figure II. 1 : Diode électroluminescente et à coté droite le symbole Diode Electroluminescente [44]

II.3.Construction de LED :

La recombinaison du porteur de charge se produit dans le matériau de type P, et donc le matériau P est la surface de la LED. Pour une émission maximale de lumière, l'anode est déposée au bord du matériau de type P.

La cathode est faite d'un film d'or et elle est généralement placée au bas de la région N. Cette couche d'or de cathode aide à réfléchir la lumière vers la surface [44].

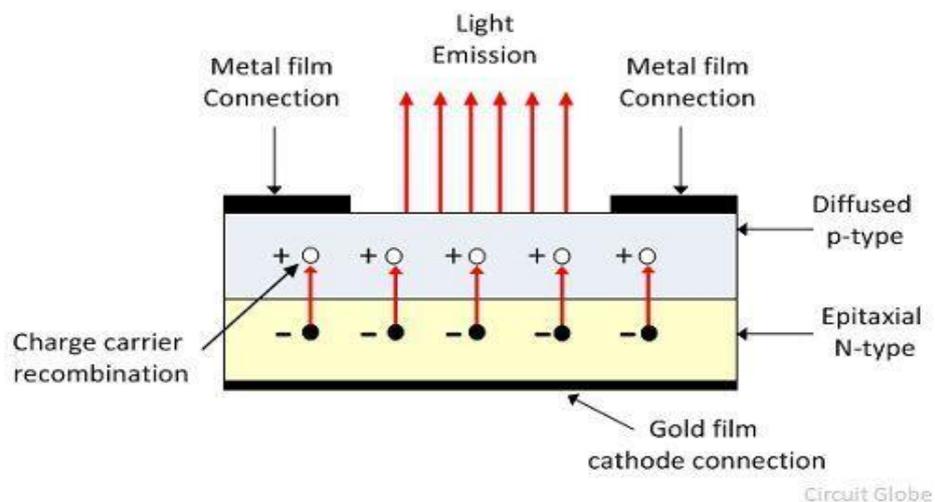


Figure II. 2 : Construction de LED [44]

Le phosphore d'arséniure de gallium est utilisé pour la fabrication de LED qui émet une lumière rouge ou jaune pour l'émission. Les LED sont également disponibles en vert, jaune ambre et rouge.

Le transistor simple peut être utilisé pour éteindre / allumer une LED comme indiqué dans la figure ci-dessus. Le courant de base I_B conduit le transistor et le transistor conduit fortement. La résistance R_C limite le courant de la LED.

II.4.Fonctionnement de la LED :

Le fonctionnement de la LED dépend de la théorie quantique. La théorie quantique stipule que lorsque l'énergie des électrons diminue du niveau supérieur au niveau inférieur, elle émet de l'énergie sous forme de photons. L'énergie des photons est égale à l'écart entre le niveau supérieur et inférieur [44].

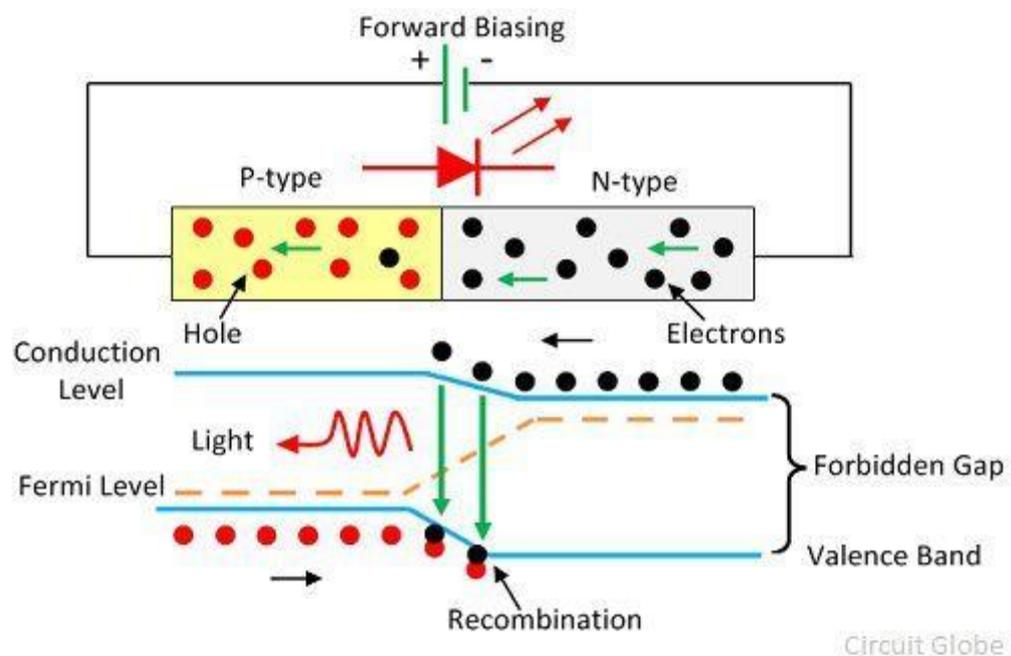


Figure II. 3 : Fonctionnement de la LED [44]

La LED est connectée en polarisation directe, ce qui permet au courant de circuler dans le sens direct. Le flux de courant est dû au mouvement des électrons dans la direction opposée.

La recombinaison montre que les électrons passent de la bande de conduction à la bande de valence et qu'ils émettent de l'énergie électromagnétique sous forme de photons. L'énergie des photons est égale à l'écart entre la valence et la bande de conduction.

II.5. Couleurs LED :

Les diodes électroluminescentes sont disponibles dans une large gamme de couleurs, les plus courantes étant la lumière rouge, verte, jaune, bleue, orange, blanche et infrarouge (invisible).

Contrairement aux diodes ordinaires en germanium ou en silicium, les LED sont constituées d'éléments tels que le gallium, l'arsenic et le phosphore. En mélangeant ces éléments dans différentes proportions, un fabricant peut produire des LED qui rayonnent de différentes couleurs, comme indiqué dans le tableau ci-dessous [45].

Tableau II. 1 : Différentes Couleurs LED [45]

Couleur	Longueur d'onde (nm)	Tension directe (V)	Matériel
Ultra-violet	<400	3.1-4.4	Nitride d'aluminium (ALN) Nitride d'aluminium et de gallium (AlGaN)
Violet	400-450	2.8-4.0	Nitride d'indium et de gallium (InGaN)
Bleu	450-500	2,5-3,7	Nitride d'indium gallium (InGaN) Carbure de silicium (SiC)
Vert	500-570	1.9-4.0	Phosphure de gallium (GaP) Phosphure d'aluminium et de gallium (AlGaP)

Jaune	570-590	2.1-2.2	Phosphure d'arséniure de gallium (GaAsP) phosphure de gallium (GaP)
Orange	590-610	2.0-2.1	Phosphure d'arséniure de gallium (GaAsP) phosphure de gallium (GaP)
Rouge	610-760	1.6-2.0	Arséniure d'aluminium et de gallium (AlGaAs) Phosphure d'arséniure de gallium (GaAsP) Phosphure de gallium (GaP)
Infrarouge	>760	>1.9	Arséniure de gallium (GaAs) Arséniure de gallium et d'aluminium (AlGaAs)

➤ couleur blanche :

- Longueur d'onde (nm): Chaude à froide
- Tension de seuil (V) : $\Delta V = 3,5$

Pour le blanc, on ne parle pas de longueur d'onde mais de température de couleur proximale. Celle des diodes électroluminescentes est assez variable en fonction du modèle. [46].

La couleur réelle d'une LED est déterminée par la longueur d'onde de la lumière émise, qui à son tour est déterminée par le matériau semi-conducteur réel utilisé pour fabriquer la diode.

Par conséquent, la couleur de la lumière émise par une LED n'est PAS déterminée par la couleur du corps de la LED. Il améliore simplement le rendement lumineux et indique sa couleur lorsqu'il n'est pas éclairé.

II.6. Tension et courant des LED:

Pour la plupart des LED de faible puissance, la chute de tension typique est de 1,2 V à 3,6 V pour des courants compris entre 10 mA et 30 mA. La chute de tension exacte dépendra bien sûr du matériau semi-conducteur utilisé, de la couleur, de la tolérance, ainsi que d'autres facteurs.

Comme la LED est essentiellement une diode, ses courbes de caractéristiques IV peuvent être tracées pour chaque couleur comme indiqué ci-dessous [45].

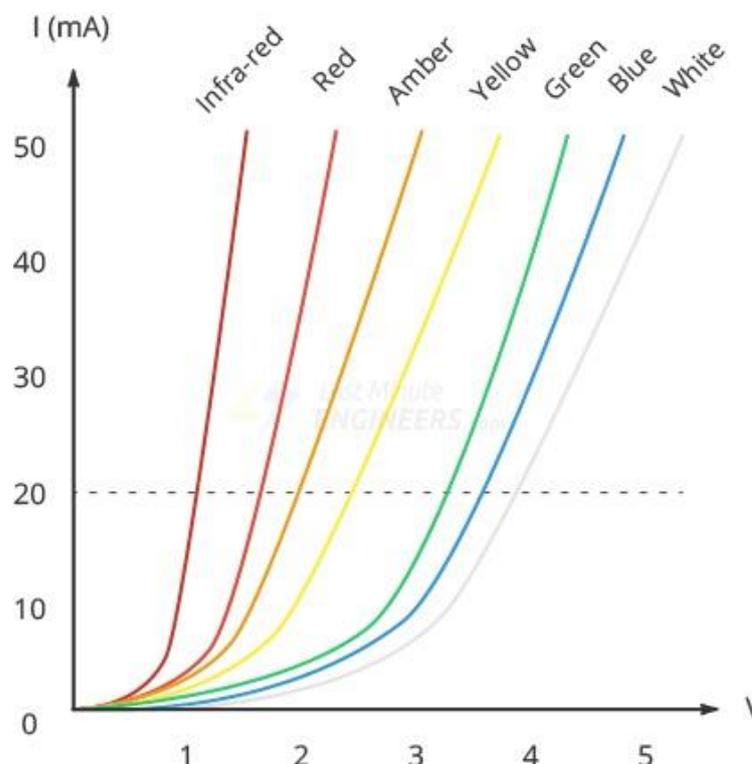


Figure II. 4 : Tension et courant des LED [45]

II.7. Avantages et Inconvénients de la LED :**❖ Avantages de la LED :**

- Les LED sont de plus petite taille et peuvent être regroupées pour former un écran numérique et alphanumérique dans une matrice de haute intensité.
- L'intensité de la lumière émise par une LED dépend du courant qui la traverse. L'intensité lumineuse peut être contrôlée en douceur.
- Les lampes LED sont très économiques et offrent un haut degré de fiabilité car elles sont fabriquées avec la même technologie que la technologie à transistors.
- Les lumières LED fonctionnent sur une large plage de températures, par exemple de 0 degrés à 70 degrés.
- De plus, il est très durable et peut résister aux chocs et aux différences.
- Les LED ont un rendement élevé, mais nécessitent une puissance modérée pour fonctionner.

❖ Inconvénients de la LED :

- Les LED consomment plus d'énergie que les LCD et leur coût est élevé.
- De plus, il n'est pas utilisé pour faire le grand écran [44].

Chapitre III :

Matériels et méthodes

III.1 Introduction :

Les cellules solaires transforment l'énergie solaire en électricité, de la même façon que les plantes transforment cette même énergie en nourriture au travers de la photosynthèse. Le principe de fonctionnement des cellules solaire repose sur une utilisation de l'énergie solaire pour faire bouger des électrons dans des matériaux semi-conducteurs en les déplaçant de leur orbite basse vers une orbite plus haute, ce qui génère de l'électricité. Les cellules solaires sur le marché utilisent de la silicone avec des matériaux plus accessibles.

III.2. méthode de fabrication d'une cellule solaire :

➤ Etape 01 :

Nous apportons un ensemble de télécommandes de télévision inutilisées qui se trouvent dans la maison, environ 20 pièces



Figure III. 1 : D'appareils de contrôle TV

➤ **Etape 02 :**

Nous démontons des télécommandes de la télévision facilement

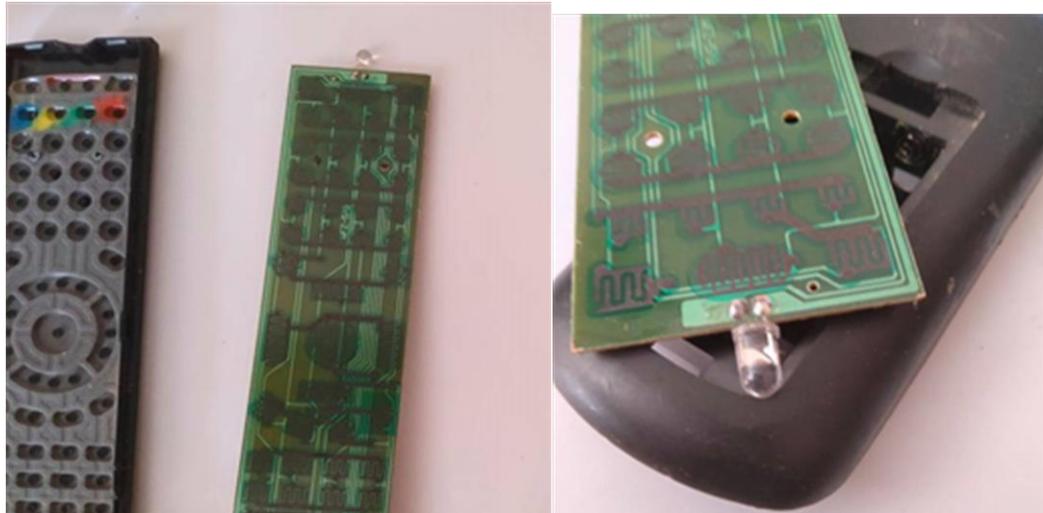


Figure III. 2 : des appareils démontés

➤ **Etape3 :**

Nous prenons une partie qui porte la diode, bloquons un briquet, et chauffons une partie inférieure afin de retirer et séparer la diode.



Figure III. 3 : la suppression de la diode

➤ **Étape 4 :**

On fait le même processus avec le reste des appareils et on prend le groupe de diodes. Nous avons obtenu des diodes de différentes couleurs (blanche et bleue)



Figure III. 4 : Diode

➤ **Etape 5 :**

On prend un voltmètre et ses fils de connexion pour notre travail expérimentale

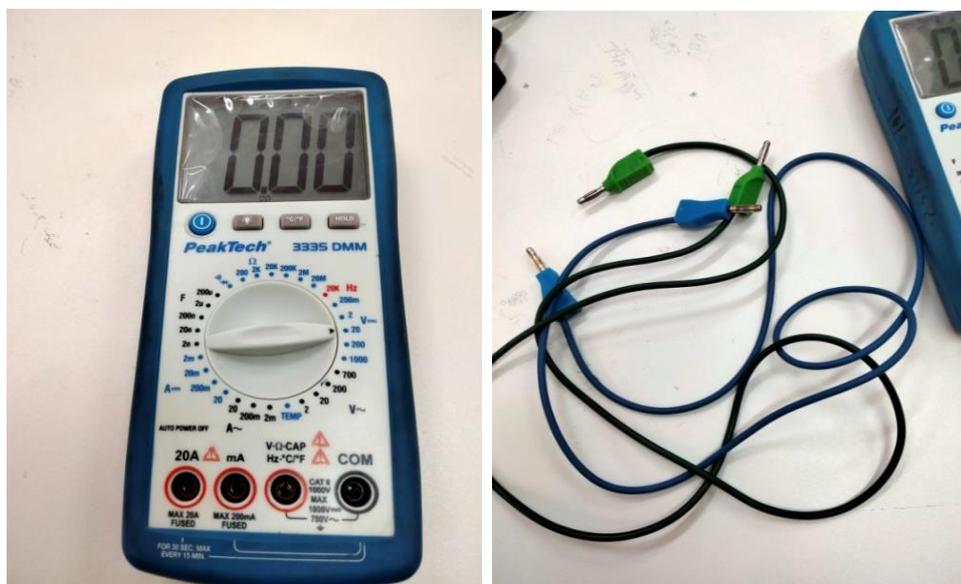


Figure III. 5 : Voltmètres Et Fils De Connexion

➤ **Etape 6 :**

Quand vous manipulez des câbles électriques, il est important de savoir distinguer le fil positif du fil négatif. Nous avons testé les fils avec un multimètre numérique, on regarde les résultats qui s'affichent sur le multimètre. Une fois qu'avons connecté les cordons aux fils de diode, jetez un œil au chiffre sur l'écran du multimètre. Il s'agit de la tension de notre fil de diode et elle peut être positive ou négative.



Figure III. 6 : Test d'électrode de diode

➤ **Etape 7 :**

Nous testons deux types de câbles issus des déchets ménagers, le premier type est un fil de cheveux en cuivre Le deuxième type est un câble téléphonique. Le câble de téléphone donne un bon résultat c.à.d, moins de perte de charge que le câble de cuivre.



Figure III. 7 : Fil De Cheveux En Cuivre

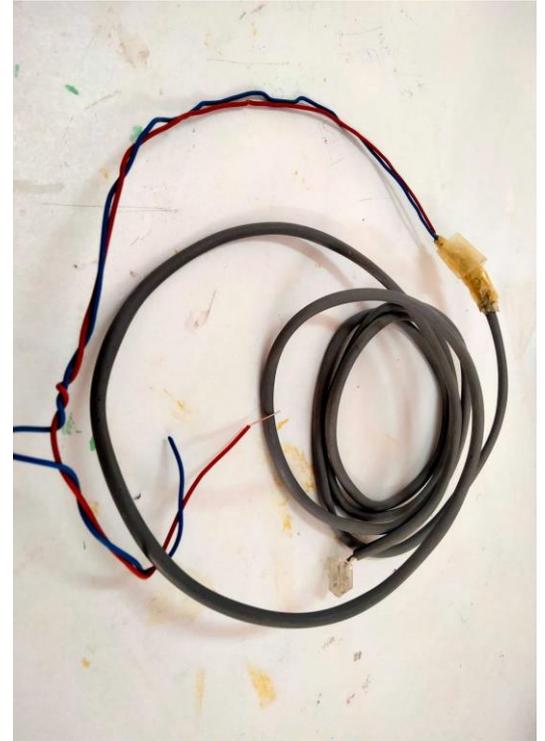


Figure III. 8 : Un Câble Téléphonique

➤ **Etape 8 :**

Dans un câble téléphonique, il y a deux isolants, le premier isolant à l'extérieur et le deuxième isolant à l'intérieur sont fixés sur la surface de fil de cuivre. A l'aide d'une pince, retirons l'isolant.



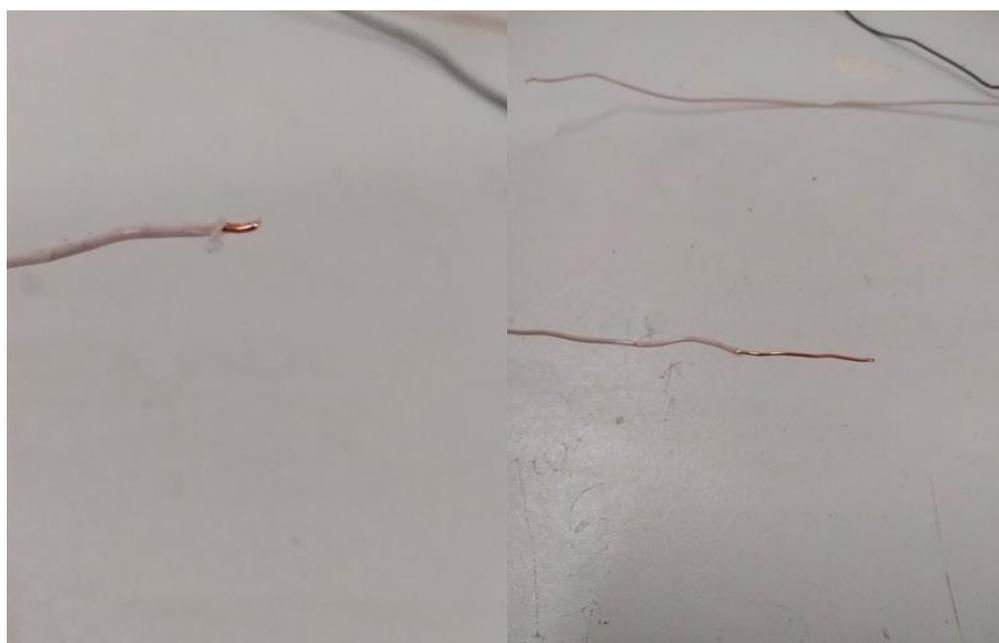
Figure III. 8: Un Câble Téléphonique



Figure III. 9: Une Pince

➤ Etape 9 :

Lors du retrait d'un isolant externe, on trouve deux fils enroulés dans l'isolant blanc et l'isolant noir. On retire l'isolant sur un fil de cuivre à l'aide d'un scalpel de la manière suivante

**Figure III. 10: Fil D'isolation****Figure III. 11 : Déchâtes****Figure III. 12 : Suppression de l'isolant**

➤ **Etape 10 :**

Après avoir retiré chaque isolant, on obtient un fil de cuivre à l'état final



Figure III. 13 : Fil de cuivre

➤ **Etape 11 :**

Nous préparons une planche de bois de 17 cm de long et 11,5 cm de large ; nous dessinons 4 * 4 carrés et perforons les têtes des carrés. On obtient 20 trous, la distance entre deux trous est 4 cm. En fin, nous avons un système de 5 X 4 trous. (fig. III.15)



Figure III. 14 : Méthode de sertissage et de perforation d'un panneau de bois

➤ **Etape12 :**

Dans cette étape, avec deux types de fil de cuivre, le fil capillaire et le fil de cuivre (câble téléphonique), on les connecte les diodes en série, on tenant compte de la polarité, le négatif avec le négatif et le positif avec le positif. Après l'expérience, résultant que le fil à cheveux gaspille plus active que les fils de cuivre ou les câbles téléphoniques, donc dans l'installation finale utilise des câbles téléphoniques.

➤ **Etape 13:**

On fait de colorer la planche de bois avec le noir , après avoir séché, on place des diodes sur le plaquette de notre travail.



Figure III. 15 : Panneau à noir

➤ **Etape 14 :**

En fin, on obtient la cellule solaire de diode.(fig III.14)



Figure III. 16 : Modèle final du panneau TRIS

Chapitre IV :

Résultats et discussion

IV.1.Introduction :

Les tests expérimentaux sont réalisés dans le laboratoire de génie électrique à l'université de Ghardaïa et à l'université d'Ouargla, faculté de médecine et des sciences. Les résultats obtenus sont présentés dans ce chapitre.

Dans le laboratoire de l'Université de Ghardaïa, un laboratoire électronique, existe un montage de système photovoltaïque. Le module solaire avec émulateur solaire CO3208-1B qui permet d'étudier différents scénarios de rayonnement. Un outil logiciel permet de régler partie théorique.



Figure IV. 1 : Module solaire

Nous utilisons une intensité lumineuse typique au plus haut degré dans une position correspondante sans changer de direction de diode, on mesure à chaque fois la tension par le voltmètre.

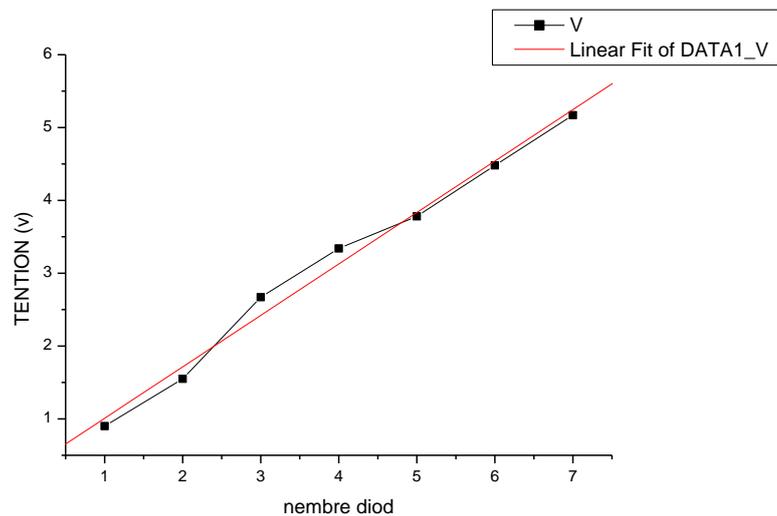


Figure IV. 2 : Variation de la tension en fonction du nombre des diodes

La Figure.IV.2 représente les variations de tension en fonction du nombre de diodes $V = f(N_{diode})$, où l'on enregistre une variation linéaire, qu'on fait d'augmenter nombre des diodes la tension augmente. Au début, une diode est de 0,9 v de tension, puis on ajoute une diode à chaque fois en série et on mesure la tension du système, jusqu'à l'arrivée de 7 diodes, où ça donne 5,17 v.

Cette variation linéaire est de la forme

$$V = AN + B$$

A et B sont des constants

$$A=0.7$$

$$B = 0.3$$

IV.2. Efficacités de la cellule solaire à diode:

Pour étudier l'efficacité de cette cellule à diode, nous avons fait une comparaison avec une cellule photovoltaïque. Cette expérience a été faite à l'Université de Ouargla, Faculté de Médecine et des Sciences, à partir de 23/05/2021 (durant 1 semaine).

Nous avons installé les deux plaques avec la même position et l'installation à l'air ambiant; On a choisi la meilleure inclinaison est 32° qui permet aux capteurs d'être perpendiculaires aux rayons solaires.



Figure IV. 3 : Panneau à diodes



Figure IV. 4 : Panneau solaire

Pour l'installation, on utilise les appareils suivants : un galvanomètre et un voltmètre (fig.IV.5 et fig.IV.6).

**Figure IV. 5 : Galvanomètre****Figure IV. 6 : Voltmètre**

L'expérience fait durant 13 h 15min, on connectant en parallèle la cellule solaire à diode avec un voltmètre et en série avec galvanomètre. Par une journée ensoleillée, le plaque donné une tension $U=14.74$ V et la valeur d'enregistrement du galvanomètre; courant $I=4.49\mu\text{A}$.



Figure IV. 7 : Installation du panneau

Le panneau solaire photovoltaïque et le panneau solaire à diode installent par la même méthode par la comparaison. Les mesures sont prises toutes les 15min.

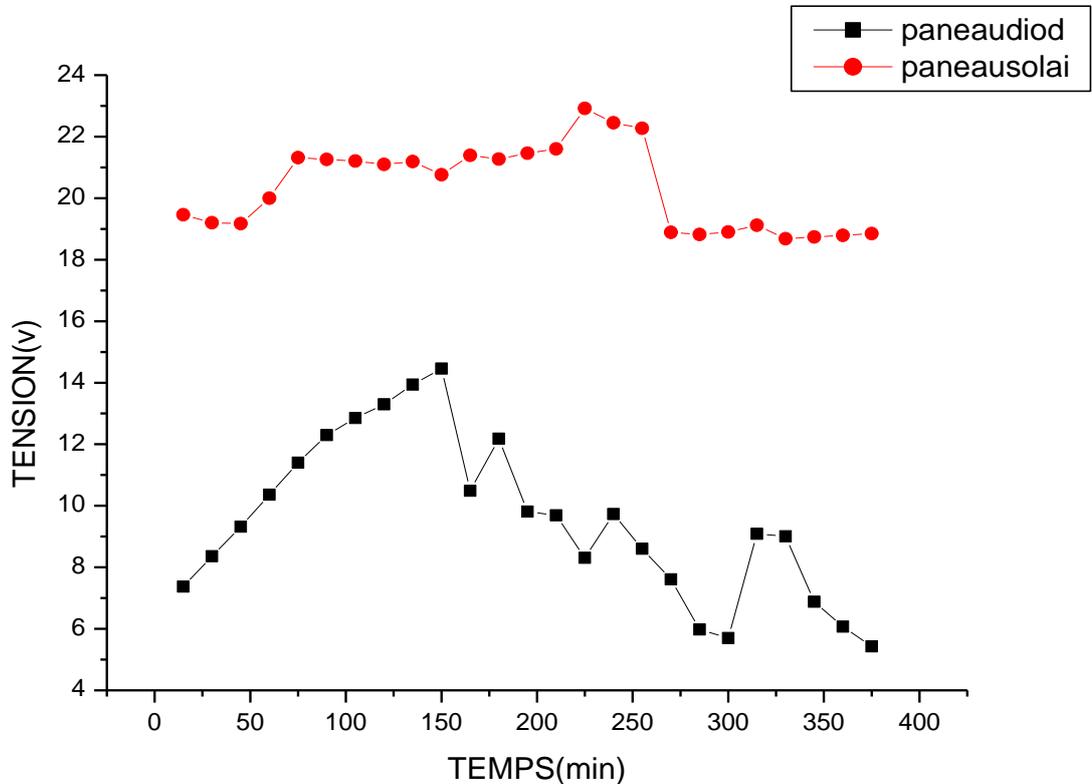


Figure IV. 8 : L'évolution de tension en fonction du temps pour la cellule photovoltaïque et la cellule solaire à diode (25/05/2021)

La Figure. IV.8 : représente la variation de tension en fonction du temps de 9:15 à 13:15, où la tension pour le panneau photovoltaïque les valeurs varie entre 18 à 24V, mais pour la cellule solaire à diode varie entre 5 et 15 V. la tension max prend les deux panneaux est la à $t_9 = 12: 15$ à midi.

Au début la tension de la cellule photovoltaïque égal 19.46 V puis il augment jusqu'à 24.27 V et diminue vers la valeur 18.85 V, mais pour la cellule solaire à diode t_1 égal 7.37 V puis il augment jusqu'à 14.46 V et diminue vers la valeur 5.34 V.

La comparaison entre les deux courbes montre les deux ont la même variation (fig. IV.8). La cellule solaire à diode est la $1/36 \text{ m}^2$ de surface de ce panneau photovoltaïque. A

partir de cet information, on peut la estimer que l'évolution de tension de cellule à diode acceptable.

A un jour nuageux, nous effectuons l'expérience uniquement avec un panneau solaire à diode. (fig IV.9).

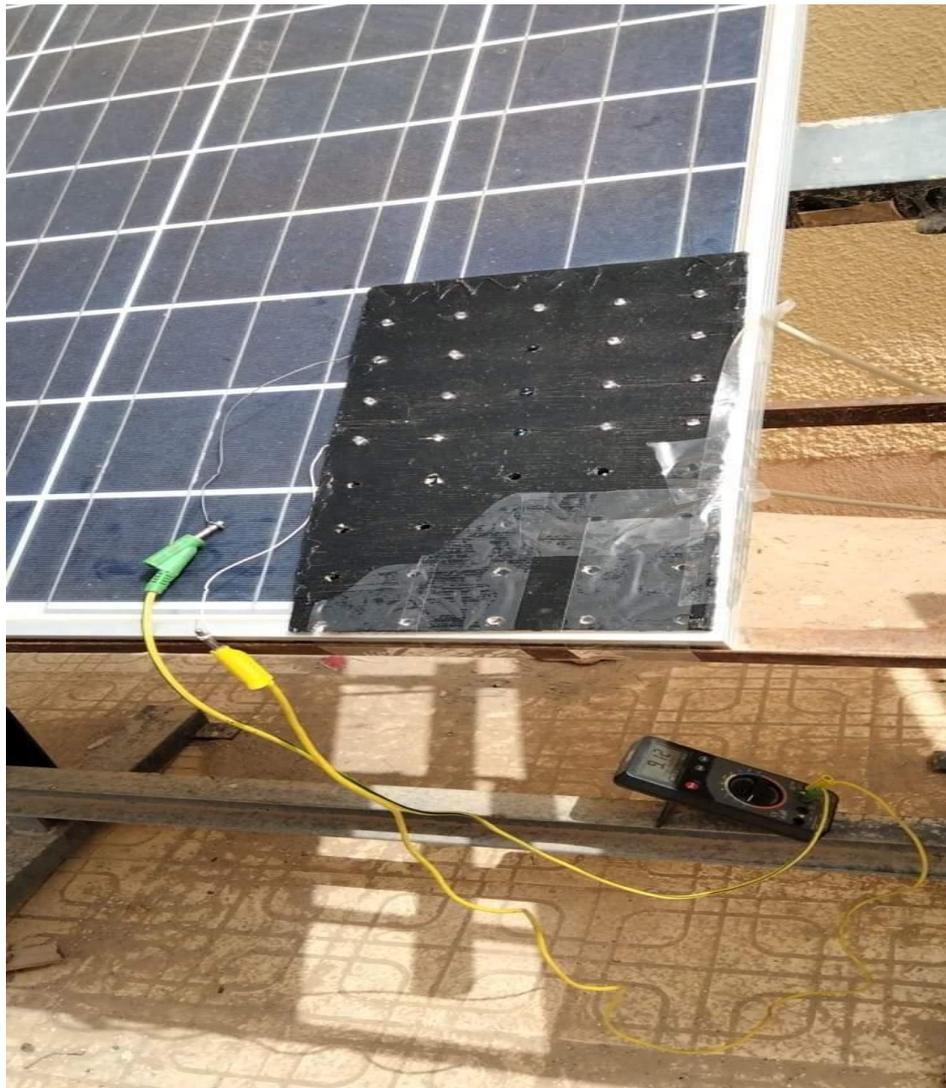


Figure IV. 9 : Installation de panneau solaire diode

- Nous commençons les mesure à 9h45 jusqu'à 13h15 et les mesures sont prises toutes les 15min (fig. IV. 10 et fig. IV.11...).

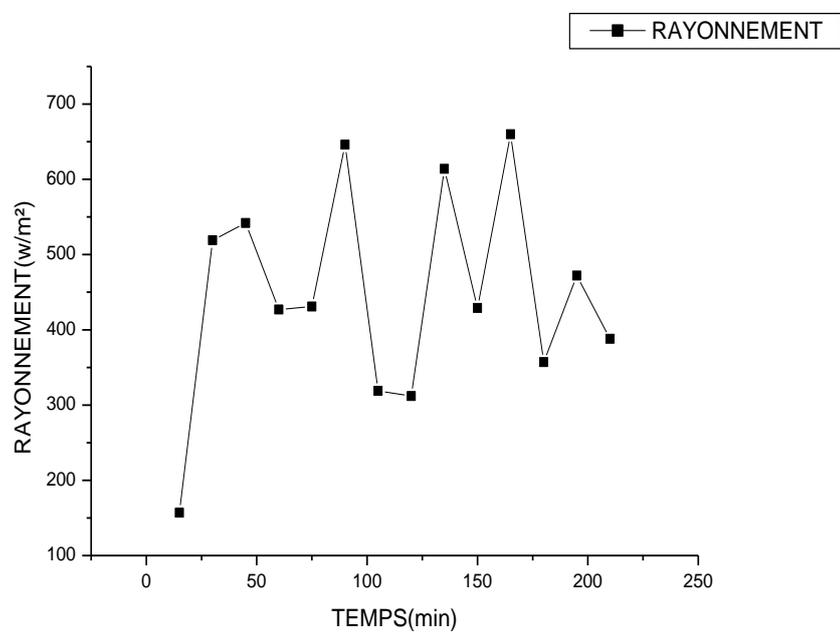


Figure IV. 10 : Rayonnement solaire (26/05/2021)

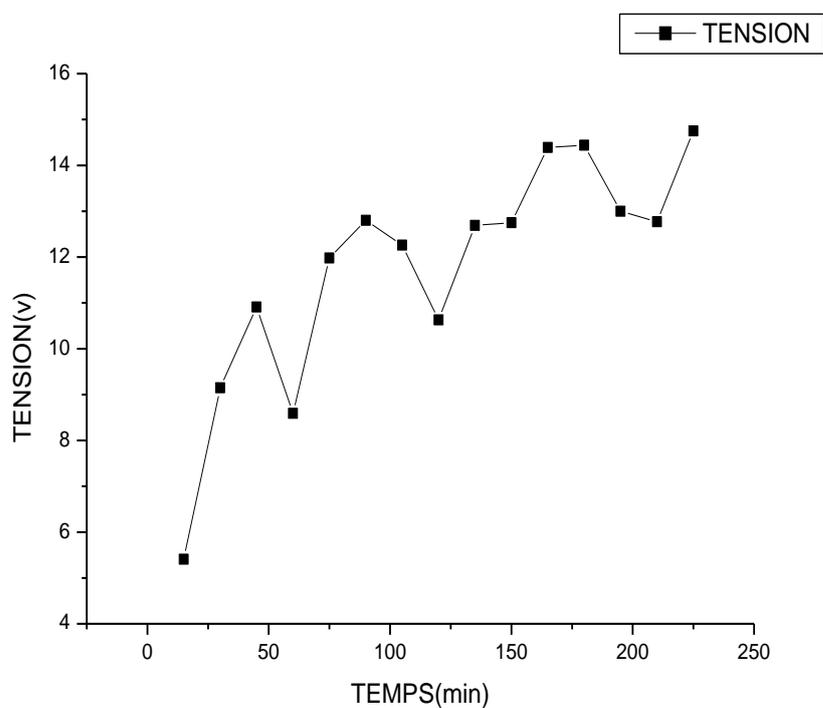


Figure IV. 11 : Variation de tension de la cellule solaire à diode en fonction du temps

La figure IV.10 : donne la variation de rayonnement en fonction du temps et figure IV.11 : donne la tension de plaque à diode en fonction du temps, les deux figures (IV.10 et IV.11), On observe que les rayons du soleil varient entre 110 à 700 W /m², la cellule solaire à diode donne des valeurs de tension qui varient entre 5.5 à 15V.

Au début le rayonnement est égal $E = 157 \text{ w/m}^2$ en parallèle la tension de la plaque est

$V = 5.41 \text{ v}$. 10:45 le rayonnement $E = 312 \text{ w/m}^2$ est et en parallèle la tension de la plaque $V = 10.63 \text{ v}$

A partir de ce résultat on conclut que cette plaque fonctionne même si c'est nuageux ou dans les mauvaises conditions météorologiques (nuages et vents).

IV.3. Rendement :

- 1) En calcul la puissance par pour la tension max U_{max} et le courant max I_{max} tel que

$$P_{max} = I_{max} * U_{max}$$

- Grâce à notre expérience nous devons trouver la valeur du courant et la tension à midi (13 h 15 min) 26/05/2021 :
- Pour mesurer le courant nous avons utilisé un galvanomètre ou la valeur suivie a été enregistrée :

$$I_{max} = 4.49 * 100 \mu A = 4.49 * 100 * 10^{-6} \mu A$$

$$I_{max} = 0.000449 \text{ A}$$

- Pour mesurer la tension nous avons utilisé un appareil voltmètre ou la valeur suivante a été enregistrée :

$$U_{max} = 14.75 V$$

- Alors :

$$P_{max} = I_{max} * U_{max}$$

$$= 0.000449 * 14.75$$

$$P_{max} = 0.00662 275w$$

- On à rendement égal énergie produit sur énergie reçue

$$\eta = P_{max}/P_{recue}$$

$$P_{recue} = \text{eclairement} * \text{surface} (w.m^{-2})$$

- Données 26/05/2021, ils prendront la valeur du rayonnement sur une 13 :15 h :
 $E = 695 w/m^2$

On calcule le surface de place : $S = L * l = 17 * 11.5 = 195.5 cm^2 = 0.01955m^2$

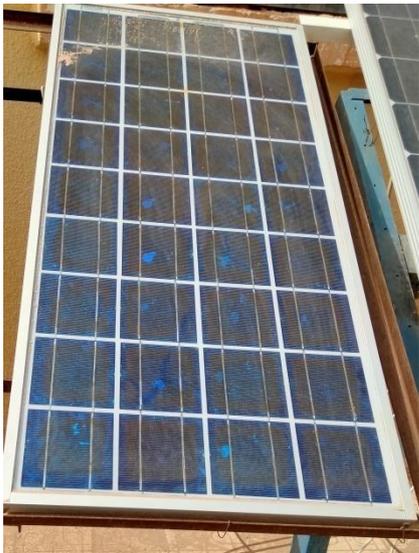
- Alors $P_{recue} = E * S = 695 * 0.01955$

$$P_{recue} = 13.58725 w$$

- Donc $\eta = \frac{P_{max}}{P_{recue}} = \frac{0.00662275}{13.58725} = 0.000487$

$$\eta = 0.0487\%$$

Tableau IV.1 Résultats de comparaison

Technologie	panneau à diodes	Polycristallin [47]
Cellule et module		
	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement : 0.048% • Durée de vie : • Coût de fabrication : coût le plus bas 	<ul style="list-style-type: none"> • Bon rendement : 14 %. • Durée de vie : importante (30 ans) • Coût de fabrication : • meilleur marché que les panneaux monocristallins

Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> • Puissance : 0.00662w/m² 0.01955m²/w • Fabrication : Tout matériel sont déchâtes 	<ul style="list-style-type: none"> • Puissance : 44.785 w/m² 0.46m²/w • Rendement faible sous un faible éclairnement. • perte de rendement avec l'élévation de la température. • Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux.
-------------------------	--	--

D'après le tableau IV.1 de comparaison entre les caractéristiques connues du panneau solaire et du panneau solaire à diode, nous constatons que la valeur de rendement du panneau solaire à diode est de $\eta = 0.048\%$, beaucoup moins que le panneau solaire $\eta = 14\%$

Cela est dû à la différence dans la surface entre eux, tel que la surface de panneau de diodes équivaut à 1/36 de la surface du panneau solaire

Nous pouvons également trouver le nombre de cellules de panneaux solaires grâce à la triple relation

$$\begin{array}{l} 0.38 \longrightarrow 36 \\ 0.048 \longrightarrow N \end{array}$$

$$\text{Donc : } N = \frac{36 \cdot 0.048}{0.38} = 4.547 \approx 5$$

A partir de ce calcul, on peut dire: Pour obtenir le même rendement qu'un panneau solaire photovoltaïque, il faut utiliser 5 cellules solaires à diode qu'on a préparée, cette cellule

donne une efficacité très important par apport à l'origine (déchet électroménager) de cette cellule.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous nous concentrerons sur la fabrication d'un panneau solaire à partir de déchets électroniques ménagers afin de réduire la pollution de l'environnement.

L'objectif est de recycler les consoles de télévision pour produire de l'énergie solaire en utilisant la diode à l'intérieur et de la comparer à un panneau solaire aux caractéristiques connues.

Le panneau solaire à diode donne une valeur de rendement comparative au panneau solaire. Cela est dû à la différence de surface, où la surface du panneau des diodes est une seule cellule du panneau solaire.

Pour recommandations, on propose comme suit :

Il faut étudier dans le futur la possibilité d'utilisation de plusieurs panneaux de diodes, comme une alternative aux panneaux solaires pour générer l'énergie électrique.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Belhadj Mohammed, « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome ». Centre Universitaire De Bechar, Mémoire De Magister.
- [2] Abbassen Lyes, « Etude De La Connexion Au Réseau Electrique D'une Centrale Photovoltaïque » Université Mouloud Mammeri TIZI-OUZOU, Mémoire De Magister Soutenu Le 05/05/2011.
- [3] Stéphane VIGHETTI, « Systèmes Photovoltaïques Raccordés Au Réseau : Choix Et Dimensionnement Des Etages De Conversion », Université De Grenoble, Thèse De Doctorat Soutenu Le 24/09/2010.
- [4] Borni Abdelhalim, « Etude Et Régulation D'un Circuit D'extraction De La Puissance Maximale D'un Panneau Solaire », Université Mentouri De Constantine, mémoire de magister Soutenu le: 05/05/2009
- [5] D. BOUKERS « Optimisation d'un système énergétique photovoltaïque application au pompage » mémoire de magister. Université de Constantine. 2007
- [6] M. BELHADJ « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome » mémoire de magister. Centre universitaire de Béchar. 2009.
- [7] Abdelmalek Bouden, « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de magistère, Université de Constantine, Algérie 2008
- [8] Fellah Boumediene, « Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah » Thèse de Magister, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, Décembre 2012.
- [9] Chabanizeyneb; "La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030", Mémoire de magister; Université M'Hamed Bougara-Boumerdes; 2014.
- [10] <http://ats.energies.free.fr/spip.php?article28>

- [11] <https://blog.exacompare.fr/energie-renouvelable/avantages-et-inconvenients-des-energies-renouvelables>
- [12] Baroud Hinde ,DjekaouaHabiba. Estimation de l'ensoleillement par deux modèles semiempiriques dans la région de Ghardaïa. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master. Université De Ghardaïa 2017
- [13] Magazine Info Ressources Focus N°2/06 deuxième parution de l'an 2006.
- [14] Projet Maghreb – Europe . Production d'Hydrogène Solaire , 2IWH 2007. Ghardaïa – Algeria. 27-29 October 2007.
- [15] Diane Bastien « le potentiel des énergies solaires au Québec» B.Sc. Physique, candidate au doctorat en Génie du bâtiment, Designer Passive House 26 septembre 2013.
- [16] Energie-Renouvelable.tv.htm.
- [17] Yettou F., Serirlazhar "Etude comparative entre deux cuiseurs solaires testés sous conditions climatiques de Ghardaïa", mémoire de fin d'étude de master ; 2018-2019.
- [18] Geo 4 – Mouvements de la Terre
- [19] Ben Guehza Mohammed Lakhdar . Impact De L'espace Entre Les Deux Vitrages Sur Le Rendement D'un Capteur Solaire. MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister. Université De KasdiMerbahOurgla le : 24 - 2 – 2009.
- [20] C.Bernard « station solaire autonome pour l'alimentation station pompage » l'archive ouverte pluridisciplinaire HAL 2006
- [21] I. Bendjamaa, Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque
- [22] Jens Fischbach « Cours ILA Photovoltaïque Advanced EPH2 »
- [23] M.L.Louazane, Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque
- [24] -C. Lerouge « Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) Etats-Unis » Sciences physique états – unis, 2006.

- [25] Livre d'ANNE LABOURET et MICHEL VILOZ « énergie solaire photovoltaïque »
2^{ème}Edition
- [26] CHABANA ABDELKRIM «Control d'un Système photovoltaïque connecte au réseau».
Mémoire de Master, Université Mohamed KHIDER de Biskra 2014.
- [27] HAMDY ABDERRAZEK, «Conception et dimensionnement d'un système
Photovoltaïque pour habitation et pompage» Mémoire de Master, Université Mohamed
KHIDER de Biskra 2018.
- [28] S. PETIBON « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de
l'énergie pour les applications photovoltaïques », université de Toulouse, 2009.
- [29] L. ABBASSEN « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale
photovoltaïque » Mémoire de magister, université mouloud Mammeri TIZI OUZZO,2011.
- [30]- <http://tpe-panneauxphotovoltaïques.e-monsite.com/pages/panneaux-photovoltaïques/>
- [31] BIDI Manel.«Conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures»
.Mémoire Master, Université de M'sila 2018/2019
- [32] <http://www.ohm-easy.com/blog/wp-content/uploads/2013/09/Panneaux-solaires.pdf>
- [33] Fellah Nadia et Sidibe Oumar «Etude et dimensionnement de l'installation
photovoltaïque du DECANAT de la faculté ST ».Mémoire de Master,Université Abdelhamid
Ibn Badis Mostaganem 2018/2019
- [34] BOUCHAKER Amir ABDERAOUF & BENBRINIS MOUAD, « Structure et
Commande d'une installation photovoltaïque en site isolé». Mémoire de Master,
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA 2018.
- [35] Mlle ZERROUKI Zolikha&Mlle BEREKSI REGUIG RYM, «Dimensionnement d'un
système photovoltaïque autonome», Mémoire de Master, UNIVERSITÉABOUBEKR
BELKAID – TLEMCEM 2017.
- [36] MISSOUM MOHAMMED. «Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la
performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie». Mémoire de
Magister, UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF 2011.

- [37] ABDENNEBI Hamida ; OULAD NAOUI Hanane ; Conception et développement d'un programme de dimensionnement des systèmes photovoltaïques avec stockage d'énergie 2018-2019.
- [38] <http://www.creg.gov.dz/pdf/5-Pr%C3%A9sentation%20BELECTRIC%20300718.pdf>
- [39] Mr Bouziane Housseyn Mr Chalabi Med Réda; « Amélioration de rendement des capteurs solaires plans à eau par qualité des matériaux ». mémoire de master en génie mécanique, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen, 2014
- [40] <https://www.aps.dz/ar/economie/42907-2017-05-09-14-40-12>
- [41] LOUZAZNA Brahim & MADI Salim, « Etude et caractérisation d'un panneau photovoltaïque type Condor », Mémoire de Master Université A.MIRA de Bejaïa 2015.
- [42] R. Khezzar et al. « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque ». revue des Energies Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379-388, 2010
- [43] <https://www.electronique-mixte.fr/diode/>
- [44] <https://circuitglobe.com/light-emitting-diode-led.html>
- [45] <https://lastminuteengineers.com/light-emitting-diode-led/>
- [46] https://www.wikiwand.com/fr/Diode_%C3%A9lectroluminescente?fbclid=IwAR0iGwVd54j9wkMtPtK0JiQY05-y4oXY3pKP4qz5bCyvCTHLP0hlZpSdemY
- [47] le laboratoire l'Université de Ouargla, Faculté de Médecine et des Sciences