

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Technologie

## *Mémoire de fin d'études*

En Vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : sciences et technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

### *Thème*

## **Conception et réalisation d'un dispositif mobile de l'énergie solaire photovoltaïque**

### **Présenté par les étudiants :**

- ✚ ARBOUZ Brahim
- ✚ BENHAMADA Ali

*Soutenu publiquement le:* 07/07/2019

### **Devant le jury :**

Dr. KHELIDJ Benyoucef	Maitre de Conférences B / UDBKM	Président du jury
Dr. MAZOUZI Redha	Maitre de Conférences A / UDBKM	Examineur
Mr. ABDEREZZAK Bilal	Maitre de Conférences A / UDBKM	Encadreur

Année Universitaire 2018/2019



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana

Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Technologie

# ***Mémoire de fin d'études***

En Vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : sciences et technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

## ***Thème***

### **Conception et réalisation d'un dispositif mobile de l'énergie solaire photovoltaïque**

#### **Présenté par les étudiants :**

- ✓ ARBOUZ Brahim
- ✓ BENHAMADA Ali

*Soutenu publiquement le: 07/07/2019*

#### **Devant le jury :**

Dr. KHELIDJ Benyoucef	Maitre de Conférences B / UDBKM	Président du jury
Dr. MAZOUZI Redha	Maitre de Conférences A / UDBKM	Examineur
Mr. ABDEREZZAK Bilal	Maitre de Conférences A / UDBKM	Encadreur

Année Universitaire 2018/2019

# *Dédicace*

*Avant tout, je tiens à remercier Allah l'unique qui m'offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes difficultés de la vie,*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes parents*

*A mes frères et sœurs*

*A toute ma famille*

*A toute les Moh's de "Da Belaid"*

*A Tous mes chers amis, tous ceux que j'aime et me sont très chers.*

*ALI...*

# *Dédicace*

*J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail :*

*A Mes parents pour leurs amour, leur bonté, leur*

*Sacrifice, leurs encouragements perpétuels, leur soutien.*

*Puisse Dieu prolonger leur vie dans le bonheur.*

*A mes chères frères et sœurs*

*A tout ma famille*

*A tous mes proches*

*A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près durant les moments difficiles*

*Pendant les études et pendant ce travail.*

*Brahim...*

# Remerciements

Tout d'abord nous tenons à remercier Monsieur **Bilal ABDEREZZAK** Enseignant chercheur à l'université de 'Djilali Bounaama' Khemis Miliana pour l'encadrement qu'il nous a assuré et ses précieux et judicieux conseils qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de ce projet, sa confiance témoignée, sans oublier sa qualité humaine. Il trouve ici notre gratitude et notre reconnaissance profonde.

Nous remercions vivement tous les membres de notre jury, qui nous ont fait l'honneur d'examiner le mémoire.

Nous tenons également à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, nous adressons nos vives reconnaissances à nos familles qui nous ont soutenus.

## Résumé

Le travail effectué dans ce mémoire porte sur la réalisation d'un dispositif mobile de l'énergie solaire photovoltaïque équipé d'un système embarqué d'acquisition de données pour l'analyse et le diagnostic du banc d'essai. Pour le dimensionnement nous avons pris en considération les caractéristiques du panneau PV et de la batterie et aussi le régulateur de charge, ainsi que l'aspect mobile et léger du kit. Nous avons conçu un système d'acquisition de données en temps réel. Durant les essais, plusieurs appareils électriques ont été testés pour des autonomies et charges différentes (éclairage DC, éclairage AC, pompe immerisible 220V/60W, ventilateur 220V/50W et un mini réfrigérateur Samsung mini bar 220V/60W). Les résultats obtenus sont très encourageant, le kit pourrait être utilisé dans plusieurs applications en courant continu et/ou en courant alternatif. En perspectives, nous souhaitons proposer des améliorations sur ce kit en gardant toujours l'aspect léger et mobile de ce dispositif.

**Mots clés :** Kit solaire, technologie photovoltaïque, batterie de stockage, régulateur de charge, arduino, capteurs

## Abstract

This master thesis work is a design and realization of a solar photovoltaic PV energy generation system with a real time data acquisition system. This data system is used to analyse and test the PV system. During the design phase, we took into consideration the characteristics of the PV panel and the batteries and even the solar charge controller, as well as the light aspect of the kit. We've use the designed acquisition system to test several electrical devices and for different autonomies such as DC lights, AC lights, immersible pumps 220V/60W, a blower 220V/50W and a mini bar Samsung fridge 220V/60W, the results obtained are very encouraging and the kit could be used in several applications; in direct current and/or alternating current. In perspective we want to propose improvements on this kit while always keeping the light and mobile aspect of this device.

**Keywords:** Solar Kit, PV technology, storage battery, solar charge controller, arduino, sensors

## ملخص

في هذه المذكرة نعرض تصميم و انجاز جهاز للطاقة الشمسية الضوئية مجهز بنظام لتحليل واقتناء البيانات مباشرة خلال الاختبارات، أخذنا في الاعتبار خصائص اللوحة الكهروضوئية و البطارية وأيضاً منظم الشحن ، بالإضافة إلى المظهر المتحرك والخفيف، تم اختبار العديد من الأجهزة الكهربائية التي تعمل بالتيار المستمر والأجهزة التي تعمل بالتيار المتناوب (مصابيح تشتغل بالتيار المستمر وأخرى بالتيار المتناوب، مضخة غاطسة 220 فولت / 60 واط ، مروحة 220 فولت/50 واط ، ثلاجة صغيرة 200 فولت/60 واط) ، النتائج التي تم الحصول عليها مشجعة جداً، ويمكن استخدام هذا الجهاز في العديد من التطبيقات. في المنظور، نريد اقتراح تحسينات على هذه المجموعة مع الحفاظ دائماً على الجانب الضوء والمحمول من هذا الجهاز.

**الكلمات المفتاحية :** مجموعة الطاقة الشمسية ، تكنولوجيا الطاقة الشمسية ، بطارية تخزين ، جهاز التحكم بالشحن ، اردوينو ، أجهزة الاستشعار.

## Table des Matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>I. LA CONVERSION SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE</b> .....	2
1.La source Soleil.....	2
1.1 Introduction.....	2
1.2.Le soleil .....	2
1.3.La constante solaire .....	2
1.4.Les coordonnées célestes .....	3
a)Les coordonnées géographiques .....	3
a-1) La longitude (L) .....	3
a-2) La latitude ( $\varphi$ ) .....	3
b)Les coordonnées horaires .....	3
b-1) La déclinaison ( $\delta$ ) : .....	4
b-2) L'angle horaire ( $\omega$ ) .....	4
c)Les coordonnées horizontales .....	4
c-1) La hauteur du soleil (h) : .....	4
c-2) L'azimut (a) .....	4
1.5.Les temps solaires .....	5
a)Le Temps Solaire Vrai (T.S.V).....	5
b)Le Temps Solaire Moyen (T.S.M).....	5
1.6.Rayonnement solaire.....	5
a) Rayonnement direct .....	6
b)Le rayonnement diffus .....	6
c)L'albédo .....	6
d)Le rayonnement global .....	6
1.7. Mouvement de la terre autour du soleil : .....	6
1.8.Mouvement journalier de la terre :.....	8
2.Conversion photovoltaïque .....	9
2.1.L'absorption de la lumière .....	9
2.2.Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques .....	10
2.3.La collecte des charges.....	11



3.Le rendement de la cellule photovoltaïque .....	12
3.1.Rendement.....	12
3.2.Influence de l'éclairement.....	13
3.3.Influence de la température.....	14
4.Types de systèmes photovoltaïques .....	16
4.1.Systèmes autonomes .....	12
4.2.Systèmes hybrides .....	17
4.3.Systèmes photovoltaïques connectés au réseau .....	18
5.Les applications du solaire photovoltaïque .....	18
5.1.Les structures ou habitats isolés .....	18
a)Applications agricoles .....	18
b)Applications pour l'élevage .....	18
c)Éclairage .....	18
d)Signalisation .....	19
5.2.Les appareils portables .....	19
5.3.Le domaine spatial .....	20
5.4.Le transport .....	21
5.5.Les centrales photovoltaïques .....	21
6.Les avantages et les inconvénients d'une installation PV .....	22
6.1.Les avantages .....	22
6.2.Les inconvénients .....	22
<b>II. LES ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE.....</b>	<b>23</b>
1.Introduction .....	23
2.Les technologies photovoltaïques .....	23
2.1.Les composants du panneau solaire photovoltaïque .....	23
a)La cellule solaire .....	23
b)Film EVA .....	23
c)Le verre trempé .....	23
d)La plaque arrière .....	23
e)Le cadre en aluminium .....	23
f)La boîte de jonction photovoltaïque .....	24

2.2.Les types de cellules photovoltaïques .....	24
a)Le silicium cristallin.....	25
a-1)Le silicium mono cristallin .....	25
a-2) Le silicium multi cristallin .....	26
b)Les couches minces .....	26
c)Cellules organiques et plastiques .....	27
3.Les régulateurs de charge solaire .....	28
3.1.Les fonctions du régulateur de charge .....	28
3.2.Les différents types de régulateur de charge .....	28
a)les régulateurs de charge shunt .....	28
b)les régulateurs de charge série .....	29
c)les régulateurs à recherche de point de puissance maximum.....	29
3.3.Le choix de régulateur charge .....	29
4.Le Stockage de l'énergie .....	30
4.1.Caractéristiques de la batterie .....	30
5.Les convertisseurs .....	33
5.1.Le convertisseur DC– DC .....	33
5.2.Le convertisseur DC– AC .....	33
6.Le câblage et éléments de sécurité .....	33
6.1.Types de câbles solaires .....	33
6.2.Connecteurs MC4.....	34
6.3.Montages série et parallèle.....	34
7.Elément de sécurité .....	37
7.1.Disjoncteur différentiel .....	37
7.2.Interrupteur différentiel .....	38
7.3.Fusible .....	38
7.4.Parafoudre .....	39
8.Dimensionnement d'une installation photovoltaïque.....	39

### **III. LA CONCEPTION DU KIT PV MOBILE .....**

1.L'utilité du Kit .....	42
a)Camping et application similaires.....	42

b)Eclairage de voisinage .....	42
c)Loge de garde .....	42
d)Dépannage d'un système classique existant .....	42
2.La conception générale.....	43
2.1.Composition du kit solaire .....	43
2.2.Guide de montage .....	43
2.3.La conception du kit avec logiciel SketchUp.....	44
2.4.Vue d'ensemble du kit solaire.....	45
3.Le choix des éléments .....	46
3.1.Panneau solaire photovoltaïque monocristallin 36 cellules 100 W .....	46
3.2.Régulateur de charge.....	47
3.3.Batterie ACID 12v 7Ah .....	48
3.4.Convertisseurs Phoenix 24v 350VA .....	48
4.La mise en œuvre du système d'acquisition des données.....	49
4.1.Introduction aux systèmes d'acquisition de données .....	49
4.2.Présentation de la carte arduino .....	50
<b>IV. EXPLOITATION EXPÉRIMENTALE DU BANC D'ESSAI.....</b>	<b>60</b>
1.Introduction .....	60
2.Conditions d'essais.....	60
3.Résultats et interprétations .....	61
4.Conclusion .....	66
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>67</b>
<b>References bibliographiques.....</b>	<b>68</b>

## Liste des figures

Figure	Description	Page
Figure (I-1)	Les coordonnées géographiques	3
Figure (I-2)	Coordonnées horizontales	5
Figure (I-3)	Composantes du rayonnement solaire au sol	6
Figure (I-4)	Mouvement de la terre autour du soleil	9
Figure (I-5)	Mouvement de la terre sur elle-même	8
Figure (I-6)	Les trois évènements optiques d'un rayon lumineux	9
Figure (I-7)	Représentation d'un atome de silicium et ses quatre électrons de valence sur la couche périphérique	10
Figure (I-8)	Représentation d'une photopile en silicium	11
Figure (I-9)	Schéma de principe du champ électrique interne	12
Figure (I-10)	Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement	14
Figure (I-11)	Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température	15
Figure (I-12)	Schéma d'une installation solaire autonome	
Figure (I-13)	Schéma physique de la chaîne de conversion d'énergie électrique hybride	16
Figure (I-14)	Calculatrice photovoltaïque	17
Figure (I-15)	Vanguard 1, premier satellite doté de cellules solaires	21
Figure (II-1)	Les composants du panneau solaire photovoltaïque	24
Figure (II-2)	Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules pv.	25
Figure (II-3)	Photos de cellules monocristallin et multi cristallin.	26
Figure (II-4)	Deux exemples de modules utilisant le sia (silicium amorphe)	27

Figure (II-5)	Cellule pv organique (cea)	28
Figure (II-6)	Connecteur mc4	34
Figure (II-7)	Branchement en parallèle	35
Figure (II-8)	Branchement en série	36
Figure (II-9)	Branchement mixte	37
Figure (II-10)	Disjoncteur différentiel	38
Figure (II-11)	Cartouche fusible	39
Figure (II-12)	Parafoudre	39
Figure (III-1)	La conception du kit avec logiciel sketchup	44
Figure (III-2)	L'installation finale du banc d'essai photovoltaïque	45
Figure (III-3)	Panneau solaire monocristalline 100 watt	46
Figure (III-4)	Régulateur de charge	47
Figure (III-5)	Batterie acid 12 v 7ah	48
Figure (III-6)	Convertisseurs phoenix 24v 350va	48
Figure (III-7)	La mise en œuvre d'un système d'acquisition de données	49
Figure (III-8)	La structure de la carte arduino	50
Figure (III-9)	Interface ide arduino	51
Figure (III-10)	Câblage d'arduino avec acs712	53
Figure (III-11)	Code du capteur de courant acs712 30 a	53
Figure (III-12)	Câblage d'arduino avec b25	54
Figure (III-13)	Code du capteur de tension b25	55
Figure (III-14)	Figure câblage d'arduino avec dht11	56
Figure (III-15)	Code du capteur de température dht11	56

Figure (III-16)	Écran lcd 16x2 i2c	57
Figure (III-17)	Câblage de l'écran lcd avec la carte arduino	57
Figure (III-18)	Code des trois capteurs (courant, tension, température) + code plx-daq	58
Figure (III-19)	Système d'acquisition de données	59
Figure (III-20)	Exemple de transfert donné de l'arduino a plx-daq	59
Figure (IV-1)	Expérience de la décharge des batteries	61
Figure (IV-2)	L'évolution de l'intensité du panneau pv varie en fonction du temps et de différentes températures	61
Figure (IV-3)	L'évolution de la tension du panneau photovoltaïque varie en fonction du temps et de différentes températures	62
Figure (IV-4)	L'évolution de la puissance de panneau varie en fonction de différentes températures	62
Figure (IV-5)	L'évolution de la tension du panneau pv en fonction du temps pour un éclairement différents et une température fixe	63
Figure (IV-6)	L'évolution de l'intensité du panneau en fonction du temps pour un éclairement différent et une température fixe	63
Figure (IV-7)	L'évolution de la puissance en fonction de temps pour un éclairement différent et une température fixe	64
Figure (IV-8)	La variation de la tension dans le processus de décharge des batteries en fonction du temps	65
Figure (IV-9)	L'évolution de l'intensité du courant dans le processus de la décharge des batteries en fonction du temps	66
Figure (IV-10)	L'évolution de la tension dans le processus de la charge des batteries en fonction du temps	67

## Nomenclature

Variable	Désignation	Unité
a	L'azimut	Degré [°]
AM	La masse d'air (air mass)	-
Bej	besoin journalier en énergie	Watt heure par Jour $\left[ \frac{Wh}{Jr} \right]$
C <sub>Ah</sub>	Capacité de la batterie	Ampère heur [Ah]
C <sub>ombr</sub>	Coefficient d'ombrage	-
C <sub>rég</sub>	Coefficient régional	-
DoD	profondeur de décharge	[%]
E	L'éclairement	Watt par mètre carré $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
$E_m$	Éclairement moyen	Watt par mètre carré $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
Et	l'équation du temps exprimée en minutes	Minutes [min]
I	L'intensité du courant	Ampère [A]
I <sub>c</sub>	La constante solaire	Watt par mètre carré $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
Impp	Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum ( Iopt ).	Ampère [A]
L	Longueur	Mètre [m]
N <sub>j</sub>	Nombre du jour de l'année	Jour [Jr]
P	La puissance	Watt [W]
P <sub>m</sub>	puissance maximale	Watt [W]
P <sub>PV</sub>	Champ photovoltaïque	Kilowatt [Kw]
S	La surface active de la cellule	Mètre carré [m <sup>2</sup> ]
T <sub>a</sub>	Température ambiante	Degré Celsius [°C]
T <sub>i</sub>	Temps de fonctionnement journalier	Heure [h]
TUC	Température d'utilisation de la cellule	Degré Celsius [°C]

TSV	Le Temps Solaire Vrai	Degré	[°]
$U$	La tension	Volt	[V]
$V$	La tension	Volt	[V]
$V_{nominal}$	Voltage de la batterie	Volt	[V]
$V_{mpp}$	Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimale ( $V_{opt}$ ).	Volt	[V]
$\rho$	Résistivité du matériau	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ .	
$\eta_{PV}$	Rendement du panneau photovoltaïque		[%]
$\eta_t$	Rendement de la température		[%]

### Variable grecques

$\eta$	Rendement énergétique	[%]
$\delta$	la déclinaison	[°]
$\omega$	l'angle horaire	[°]
$\varepsilon$	chute de tension	[-]

### Liste des tableaux

**Tableau II-1** Les avantages et les inconvénients des différents types de batterie.....page 32

**Tableau IV- 1** : les jours de mesures.....page 60



## Abréviations

(CA) : Continu alternatif

(CAO) : Conception assistée par ordinateur

(CC) : Continu-continu

(CdTe) : Tellure de Cadmium

(CIGS), Copper indium gallium selenide (séléniure de cuivre, d'indium et de gallium)

(KWC) : Kwatt crête

(Li) : Lithium

(MPPT): Maximum Power Point Tracker

(Ni-Cd) : Nickel Cadmium

(NiMH) : Nickel Métal Hydride

(Pb) : Plomb

(PDD) : Profondeur de décharge

(Pm) : Puissance maximal

(PV) : Panneau photovoltaïque

(PWM): Pulse With Modulation

(sct) : Condition test standard

(Sia) : Silicium amorphe

(T.S.M) : Temps Solaire Moyen

(TUC) : Température d'utilisation de la cellule

# Introduction générale

### **Introduction générale :**

Les besoins mondiaux en électricité ne cessent d'augmenter, alors que les ressources fossiles qui permettent de la produire se raréfient, Le pétrole et le gaz naturel seront pratiquement épuisés dans les quarante années à venir, sans oublier que cette consommation accrue d'énergie contribue au réchauffement de la planète et aux catastrophes climatiques qui en résulte. L'être humain fait face à un double défi : satisfaire les besoins en énergie tout en limitant l'impact de sa consommation sur l'environnement.

Le soleil est une source d'énergie inépuisable, qui émet chaque jour sous forme de lumière l'équivalent de 27 années de consommation électrique. Il existe plusieurs moyens d'utiliser l'énergie du soleil, l'une d'entre elles est de transformer sa lumière en électricité grâce à des cellules photosensibles ; c'est ce que l'on appelle l'énergie solaire photovoltaïque.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à la réalisation d'un dispositif mobile de l'énergie solaire photovoltaïque équipé d'un système embarqué d'acquisition de données pour l'analyse et le diagnostic des données récoltées au fil de son utilisation. Ce mémoire est partagé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons les généralités sur la technologie photovoltaïque en commençant par des notions sur le rayonnement solaire, Dans un deuxième temps nous montrons le principe de l'effet photovoltaïque et l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement de la cellule. Et nous clôturons ce chapitre par la citation des différents types des systèmes PV ainsi que les avantages et les inconvénients de ce dernier.

Le deuxième chapitre présente les éléments d'une installation photovoltaïque, avec plus de détails sur l'aspect technique et opérationnel de chaque composante.

Le troisième chapitre est consacré à la conception du Kit PV mobile et la mise en œuvre du système d'acquisition des données.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats que nous avons obtenus.

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

# **CHAPITRE I**

## **LA CONVERSION SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE**

## 1. La source Soleil

### 1.1. Introduction

L'énergie la plus répandue et la plus facile à exploiter parmi les énergies renouvelables est l'énergie solaire. Il est nécessaire de connaître la position du soleil dans le ciel à n'importe quel moment et en n'importe quel lieu pour pouvoir étudier l'énergie solaire interceptée. La connaissance de la trajectoire du soleil ainsi que les mouvements de son lever et de son coucher au cours d'une même journée est très important afin de pouvoir évaluer la durée maximale d'insolation, l'irradiation globale. [1]

### 1.2. Le soleil :

Le soleil est l'étoile centrale du système solaire, sa lumière met environ 8 minutes et 17 secondes pour atteindre la terre. Il est presque sphérique d'une masse d'environ  $2 \times 10^{30}$  kg, Son diamètre est d'environ  $1,4 \cdot 10^5$  Km. Il est constitué principalement d'hydrogène 75% de la masse ou 92 % du volume et d'hélium 25 % de la masse ou 8 % du volume. La distance entre le soleil et la terre est d'environ 150 millions de km. Il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint  $10^7$  K. [1], [2], [3]

### 1.3. La constante solaire :

C'est La valeur du rayonnement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " $I_0$ " appelée constante solaire est de l'ordre de  $1354 \text{ W.m}^{-2}$ . [4]

$$I_c = I_0 [1 + 0.033 \times \cos(0.984 \times N_j)] \quad (I-1)$$

$N_j$  : Nombre du jour de l'année

### 1.4. Les coordonnées célestes

#### a) Les coordonnées géographiques :

Chaque point de la terre est caractérisé par sa longitude, altitude et sa latitude. Ces trois grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point.

##### a-1) La longitude (L) :

La longitude est comprise entre  $+180^\circ$  vers l'est et  $-180^\circ$  vers l'ouest, Chaque  $15^\circ$  de différence de longitude représente une heure, c'est à dire un degré de longitude représente 4 minutes. [5]

##### a-2) La latitude ( $\varphi$ ) :

La latitude c'est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passant par le lieu considéré. Elle est comptée négativement de  $0$  à  $-90^\circ$  au sud et positivement de  $0$  à  $+90^\circ$  au nord. [5]

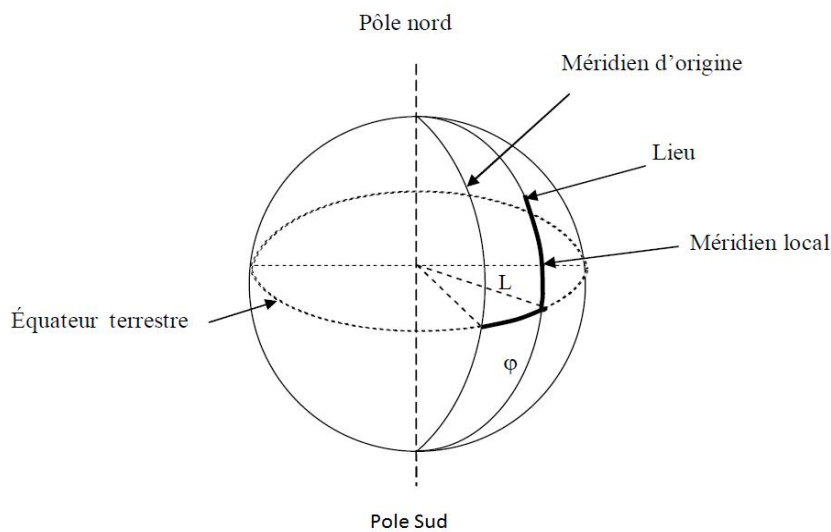


Figure I- 1 : les coordonnées géographiques. [5]

#### b) Les coordonnées horaires :

Chaque point de l'espace est repéré par sa déclinaison  $\delta$  et son angle horaire  $\omega$ . [6]

**b-1) La déclinaison ( $\delta$ ) :**

La déclinaison c'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de  $-23^{\circ}27'$  à  $+23^{\circ}27'$  elle vaut 0 aux équinoxes. La déclinaison est donnée par la relation suivante : [7]

$$\delta = 23.45^{\circ} \sin \left( \frac{360}{365} \times (284 + j) \right) \quad (I- 2)$$

j : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du premier janvier.

**b-2) L'angle horaire ( $\omega$ ) :**

Il est donné par la relation suivante : [7]

$$\omega = 15 (\text{TSV} - 12) \quad (I- 3)$$

**c) Les coordonnées horizontales**

Dans ce repère les coordonnées du soleil sont :

**c-1) La hauteur du soleil ( $h$ ) :**

Elle est donnée par la relation suivante : [8]

$$\sin (h) = \sin (\varphi) . \sin (\delta) + \cos (\varphi) . \cos (\delta) \cos (\omega) \quad (I- 4)$$

$\varphi$  : Latitude du lieu.

$\delta$  : La déclinaison du soleil.

$\omega$  : L'angle horaire.

**c-2) L'azimut ( $a$ ) :**

L'azimut c'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le sud. L'azimut est compté négativement vers l'est et positivement vers l'ouest. Il est donné par la relation suivante : [9]

$$\sin (a) = \frac{\cos(\delta) . \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (I- 5)$$

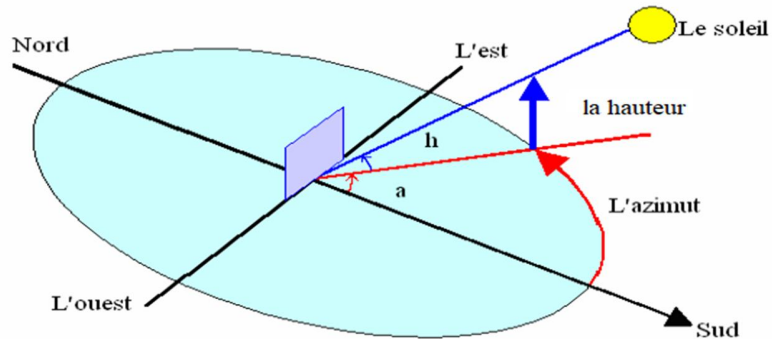


Figure I- 2 : Les coordonnées horizontales. [9]

## 1.5. Les temps solaires

### a) Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)

Le temps solaire vrai, est l'angle horaire du soleil( $\omega$ ). [10]

Il est donné par la formule suivante :

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (I- 6)$$

### b) Le Temps Solaire Moyen (T.S.M)

Le temps solaire moyen est donné par la relation suivante [10]:

$$TSM = TSV - Et \quad (I- 7)$$

$$Et = 9.87 \sin\left[2 \cdot \frac{360}{365} (N - 81)\right] - 7.53 \cos\left[\frac{360}{365} (N - 81)\right] - 1.5 \sin\left[\frac{360}{365} (N - 81)\right] \quad (I- 8)$$

Et : est l'équation du temps exprimée en minutes.

N : est le numéro du jour dans l'année.

## 1.6. Rayonnement solaire

L'atmosphère terrestre absorbe le rayonnement solaire et le diffuse .ce qui permet de distinguer plusieurs composantes au sol :



**a) Rayonnement direct :**

Le rayonnement direct est reçu du Soleil en ligne droite, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux. [11]

**b) Le rayonnement diffus :**

Le rayonnement diffus est un rayonnement qui ne suit pas une direction définie par le soleil en direction du point d'observation à la surface de la terre. la lumière diffusée par l'atmosphère (nébulosité, air, aérosols) constitue le rayonnement diffus. [11]

**c) L'albédo :**

La partie réfléchié par le sol s'appelle l'albédo. Il dépend de l'environnement du site par exemple un site enneigé envoi beaucoup de rayonnement lumineux alors qu'il n'y a presque pas de renvoi de rayons lumineux dans un site asphalté. [11]

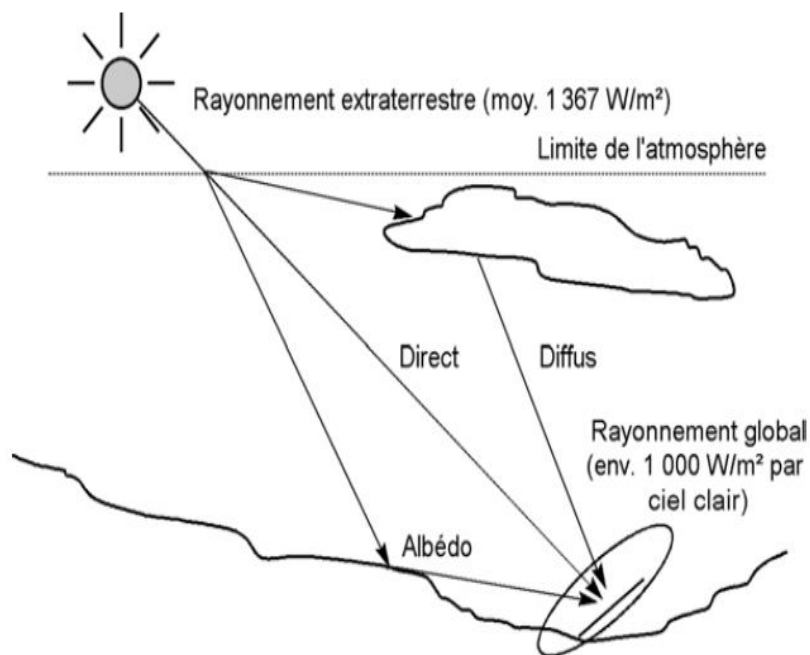


Figure I- 3 : Composantes du rayonnement solaire au sol. [11]

**d) Le rayonnement global :**

Le rayonnement global est tout simplement la somme des trois rayonnements précédents. [1]

### 1.7. Mouvement de la terre autour du soleil :

La terre tourne autour du soleil en une année, Son axe de rotation se dirige toujours dans le même sens (vers l'étoile polaire dans l'hémisphère nord), Ce qui fait que l'axe de rotation de la terre pointe vers le soleil 6 mois de l'année et dans le sens opposée les 6 autres mois ce qui explique l'alternance des saisons et le changement dans la durée de la longueur des jours et des nuits durant l'année.

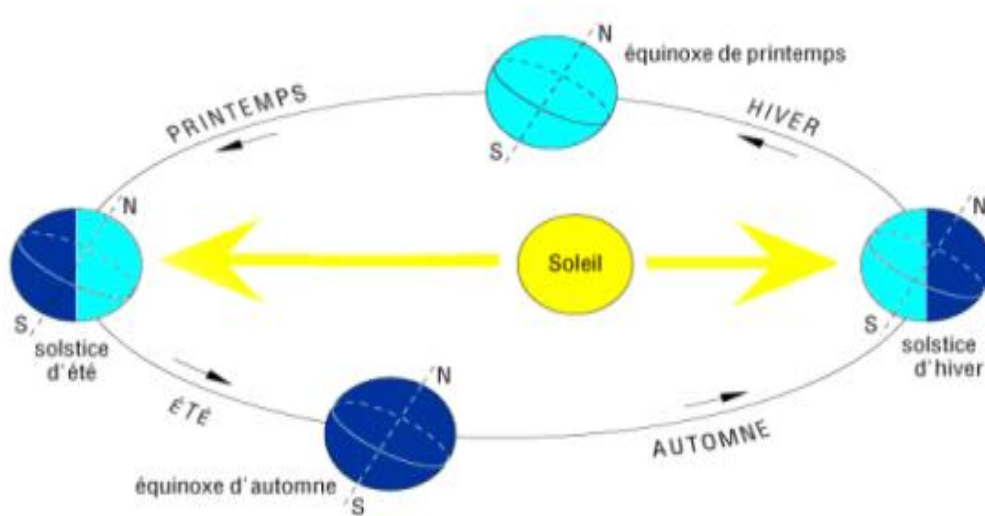


Figure I- 4 : Mouvement de la terre autour du soleil. [13]

Ce mouvement de révolution se fait dans un plan appelé le plan de l'écliptique. L'axe des pôles nord et sud, autour duquel s'effectue le mouvement de rotation de la Terre. [13]

La déclinaison change au cours de l'année, de  $-23^{\circ}27'$  à  $+23^{\circ}27'$ . Le centre de gravité de la terre décrit une ellipse dont le soleil occupe l'un des foyers. Le sens des variations de la déclinaison peut être appréhendé à travers de 4 positions clés suivantes :

Au solstice d'hiver (21 décembre) : les rayons solaires touchent la terre avec un angle de déclinaison de  $-23^{\circ}27'$  ; c'est la valeur minimum de la déclinaison.

A l'équinoxe de printemps (21 mars) : l'ensemble des deux hémisphères sont éclairés de la même manière 12 heures de jours et 12 heures de nuit et la déclinaison vaut alors  $0^{\circ}$ .

Au solstice d'été (23 juin) : la position de la terre est opposée à celle du 21 décembre et le soleil frappe l'hémisphère Nord avec l'angle maximum de déclinaison de  $23^{\circ}27'$ .

A l'équinoxe d'automne (22 septembre) : la situation est identique à celle du 21 mars et la déclinaison repasse à  $0^{\circ}$ . [14]

### 1.8. Mouvement journalier de la terre :

C'est le mouvement de rotation sur elle-même .Cette rotation se fait de l'ouest vers l'est en 24 heure. L'axe des pôles géographiques relie le pôle nord au pôle sud et il est perpendiculaire au plan équatorial. [5], [15]

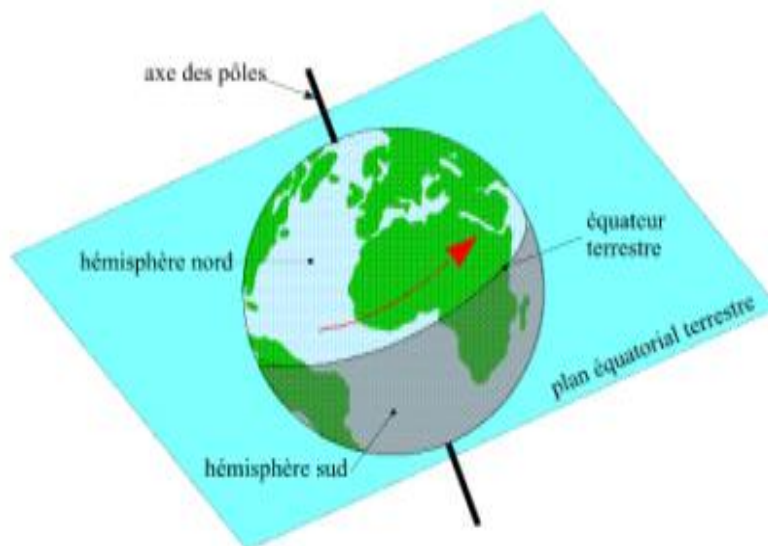


Figure I- 5 : Mouvement de la terre sur elle-même. [5]

## 2. Conversion photovoltaïque

L'énergie lumineuse est convertit directement en énergie électrique sous un effet photovoltaïque, Une fois la lumière percute un matériau comme le silicium, la conversion d'énergie fait intervenir trois phénomènes physiques liés et simultanés :

- l'absorption de la lumière dans le matériau ;
- le transfert d'énergie des photons aux champs électriques ;
- la collecte des charges.

Le silicium constitue un matériau photovoltaïque performant : il présente des propriétés optiques et électriques spécifiques dans le but d'assurer la conversion photovoltaïque. [16]

### 2.1. L'absorption de la lumière

La lumière se compose de photons, « grains de lumière », chacun d'eux est porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde (ou couleur du rayon). Ces photons peuvent entrer profondément dans certaines matières, et même capable de passer au travers : les objets qui apparaissent transparents à l'œil nu laissent passer la lumière visible.

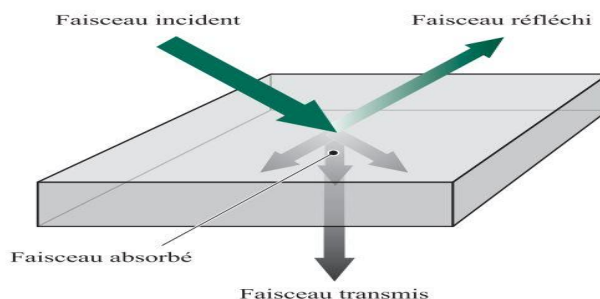


Figure I- 6 : Les trois évènements optiques d'un rayon lumineux. [16]

Plus généralement, Un rayon lumineux formé de photons entrant en contact sur un matériau solide subit trois manifestations optiques concomitantes.

- La réflexion : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet ;
- La transmission : la lumière traverse l'objet ;
- L'absorption : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme. [1], [16]

## 2.2. Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques

Le silicium est caractérisé par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique.

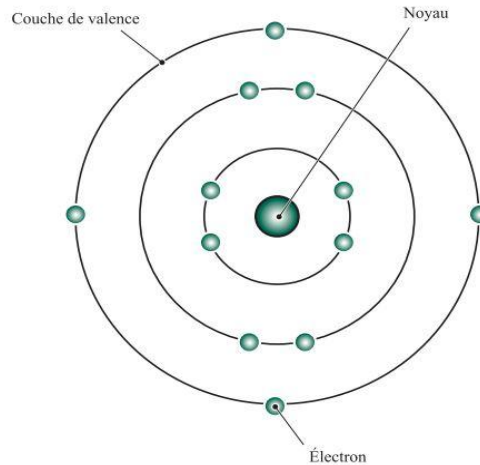


Figure I- 7 : Représentation d'un atome de silicium et ses quatre électrons de valence sur la couche périphérique. [16]

- Le silicium présente toutes les propriétés électriques d'un semi-conducteur qui permet de convertir la lumière absorbée en électricité.
- Ce transfert d'énergie des photons en électricité s'appelle la photoconductivité : cela s'explique par la propriété que présente le silicium à renfermer quatre électrons relativement mobiles munis d'une faible énergie de liaison.
- Dans l'obscurité, les électrons sont peu mobiles par contre en présence de la lumière, les photons absorbés par le silicium amènent une énergie que la mobilité des électrons du matériau s'en trouve fortement accrue, ce qui se traduit par une augmentation de la conductivité du matériau.
- Le principe de ce photo courant est définie par : les électrons tournent autour du noyau sous l'effet de la lumière ; les électrons de la couche périphérique des atomes sont « arrachés » sous l'action du choc d'un photon. Les électrons « décrochés » des atomes créent ainsi un courant continu qui va être directement utilisé aux bornes de la cellule photovoltaïque, sous une tension électrique continue. [1]

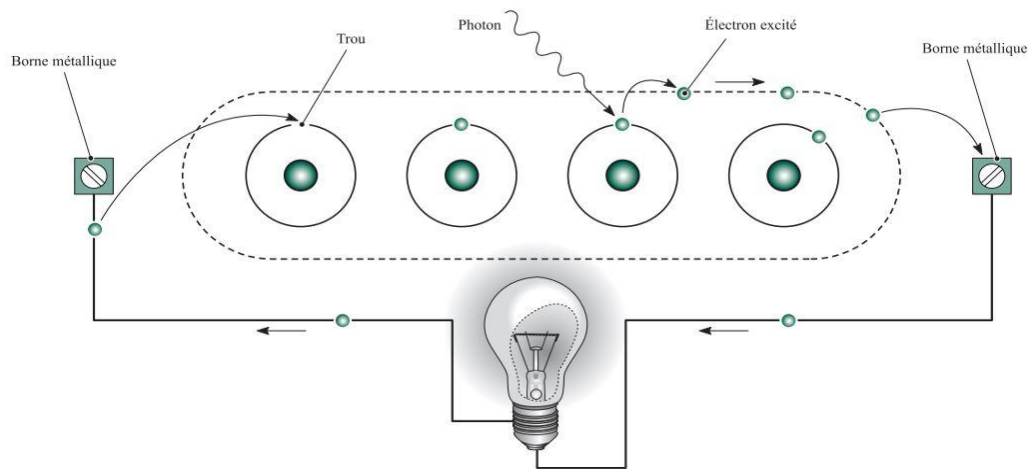


Figure I- 8 : Représentation d'une photopile en silicium. [16]

### 2.3. La collecte des charges

Dès que les charges électriques est libérées (électrons chargés négativement et trous chargés positivement), il faut les séparer et les retirer hors du matériau semi-conducteur (silicium) dans le circuit électrique.

La méthode de référence appliquée pour créer ce champ électrique est celle du «dopage » au moyen d'impuretés ; le dopage d'un matériau pur permet d'apporter des charges électriques excédentaires qui améliorent sa conductivité.

Il existe deux types de dopage :

- Le dopage de type n (négatif) consiste à introduire dans la matrice de silicium des atomes d'impuretés pentavalentes tels que le phosphore P, ces atomes ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative) libre de se mouvoir dans le cristal. Le matériau est alors potentiellement « donneur » d'électron disponible pour la conduction : le silicium est appelé silicium de type n ;
- Le dopage de type p (positif) utilise des atomes d'impuretés trivalentes tels que le bore B, dont l'insertion dans la structure cristalline du silicium donne un excédent de trous (charge positive). À l'inverse du dopage de type n, le matériau est « accepteur » d'électron : le silicium est appelé silicium de type p.

Dès que les deux semi-conducteurs sont mis en contact, une jonction p-n se crée, auprès de laquelle apparaît un champ électrique interne engendré par le déséquilibre des charges. Ce champ électrique va ainsi participer à collecter les électrons détachés par l'énergie des photons. La collecte du courant se fait par des contacts métalliques en forme de grilles sur chaque face. Un courant peut circuler si les électrodes sont reliées à un circuit extérieur.

Sous l'effet de la lumière le dispositif devient générateur électrique. La jonction p-n a donc les caractéristiques électriques d'une diode au silicium classique. [16]

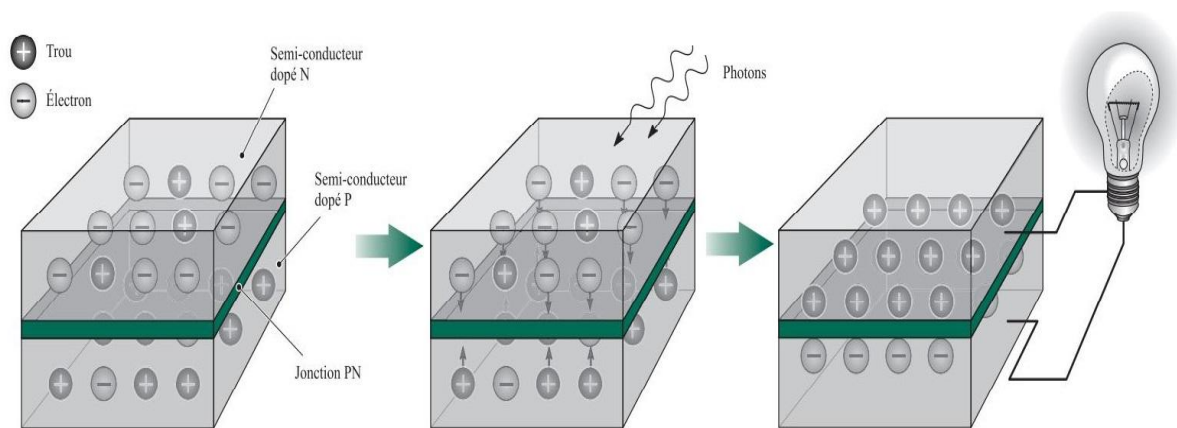


Figure I- 9 : Schéma de principe du champ électrique interne. [16]

### 3. Le rendement de la cellule photovoltaïque

#### 3.1. Rendement

Le rendement énergétique d'une cellule photovoltaïque est défini par le rapport entre la puissance maximale et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule photovoltaïque:[16]

$$\eta = \frac{P_m}{E.S} \quad (I- 9)$$

Avec :

–  $\eta$  : rendement énergétique.

- E : éclairement ( $W/m^2$ ).
- S : surface active de la cellule ( $m^2$ ).
- Pm : puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC : Standard Test Condition), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de  $1000 W/m^2$ , à la température de  $25^\circ C$  sous un spectre AM 1,5.

Type de rayonnement, quantité d'énergie, température, la surface de la cellule et de ses caractéristiques dimensionnelles, la forme de la cellule et conditions ambiantes de fonctionnement de la cellule (température extérieure, vitesse du vent, etc...). Détermine L'énergie électrique disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est généralement faible (10 à 20 %). Les meilleurs rendements peuvent être obtenus avec des techniques expérimentales (technologie multicouches) qui sont coûteuses et difficiles à mettre en œuvre ou avec de nouveaux matériaux comme l'arséniure de gallium qui donne des rendements supérieurs à 25 % en laboratoire).

Actuellement le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le silicium qui représente une solution économique.

### 3.2. Influence de l'éclairement

L'éclairement reçu sur la surface de la cellule photovoltaïque parmi les facteurs qui déterminent l'énergie produite, la figure représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement avec une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes, le courant est directement proportionnel au rayonnement solaire par contre la tension ne varie que très peu en fonction de l'éclairement. [11], [16]



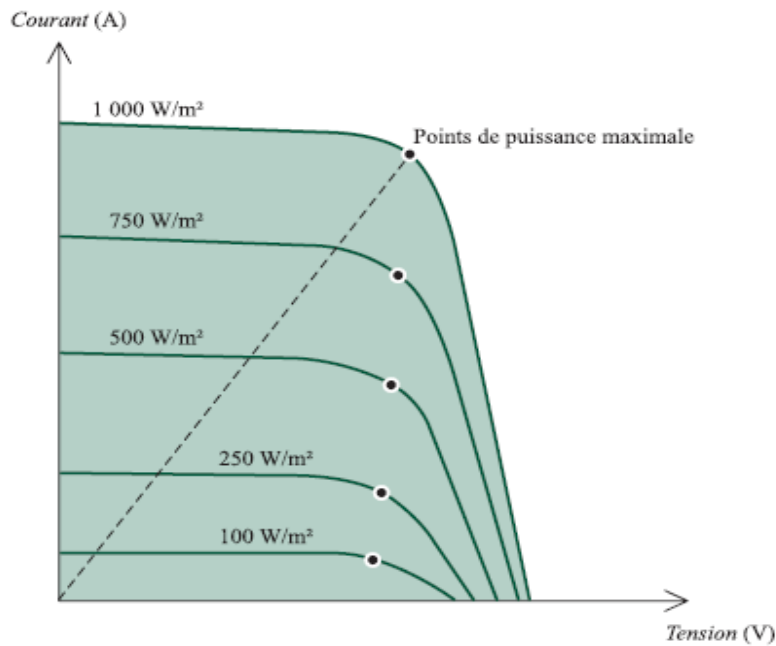


Figure I- 10 : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement. [16]

### 3.3. Influence de la température

L'influence de la température ambiante est très importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques .La température est un paramètre essentiel puisque les cellules qui sont exposées aux rayonnements solaires susceptible de l'échauffer d'autre part, le rayonnement solaire absorbé n'est pas convertie totalement en énergie électrique une partie se dissipe sous forme de chaleur c'est pour cela la température de la cellule photovoltaïque est toujours plus élevée que la température ambiante. [11], [16]

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (TUC - 20) \quad (I- 10)$$

Avec :

$T_c$  : Température de la cellule (°C)

$T_a$  : Température ambiante (°C)

$E_m$  : Éclairement moyen ( $W/m^2$ )

TUC : Température d'utilisation de la cellule (°C)

Le graphe de la figure (I-11) montre que la tension d'une cellule baisse fortement avec l'augmentation de la température, plus la température augmente et moins la cellule est performante. D'autre part, le courant augmente légèrement en intensité : cette augmentation reste néanmoins négligeable au point de puissance maximale. [16]

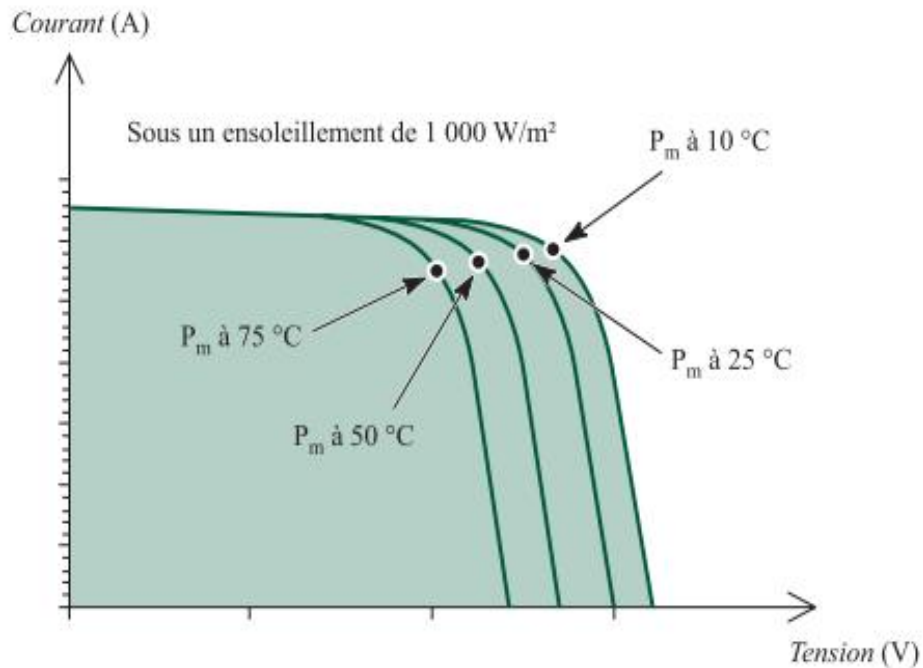


Figure I- 11 : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température. [16]

Le comportement global de la cellule en température est une perte de 0,4 à 0,5 %/° C. [16]

## 4. Types de systèmes photovoltaïques

Les systèmes PV sont trois types : autonomes, hybrides et reliés au réseau :

### 4.1. Système autonomes :

C'est un système photovoltaïque totalement indépendant des autres sources d'énergie et qui fournit à l'utilisateur de l'électricité sans être connecté au réseau électrique.

L'utilisation de ce type d'installation consiste à utiliser l'électricité produite directement ou en la stockant dans des batteries. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme le pompage de l'eau. [1]

L'installation autonome comprend les éléments suivants :

- un ou plusieurs panneaux photovoltaïques (s).
- un régulateur solaire.
- une ou plusieurs batteries d'accumulation.
- un onduleur (seulement pour obtenir du courant alternatif).

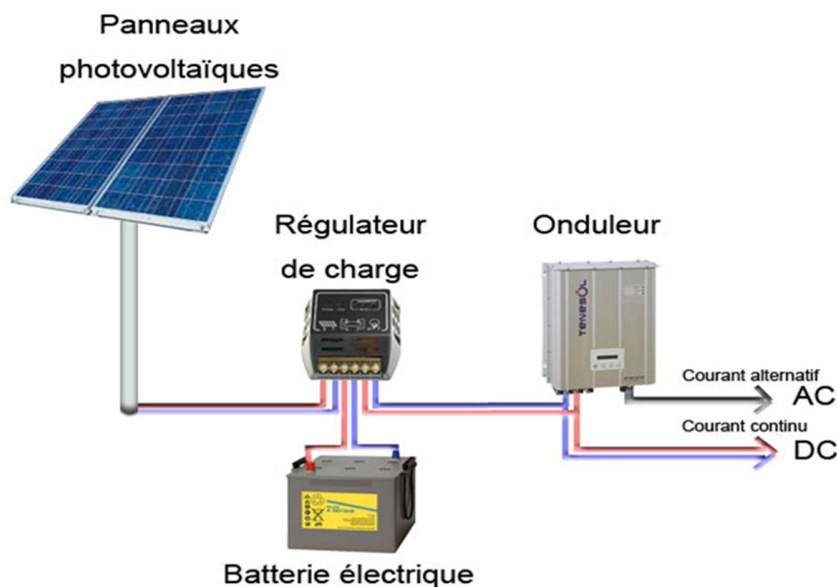


Figure I- 12 : Schéma d'une installation solaire autonome.

## 4.2. Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. Le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des batteries de stockage de l'énergie. Un tel système est un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance élevée. Ces systèmes photovoltaïques optimisent l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés. [17]

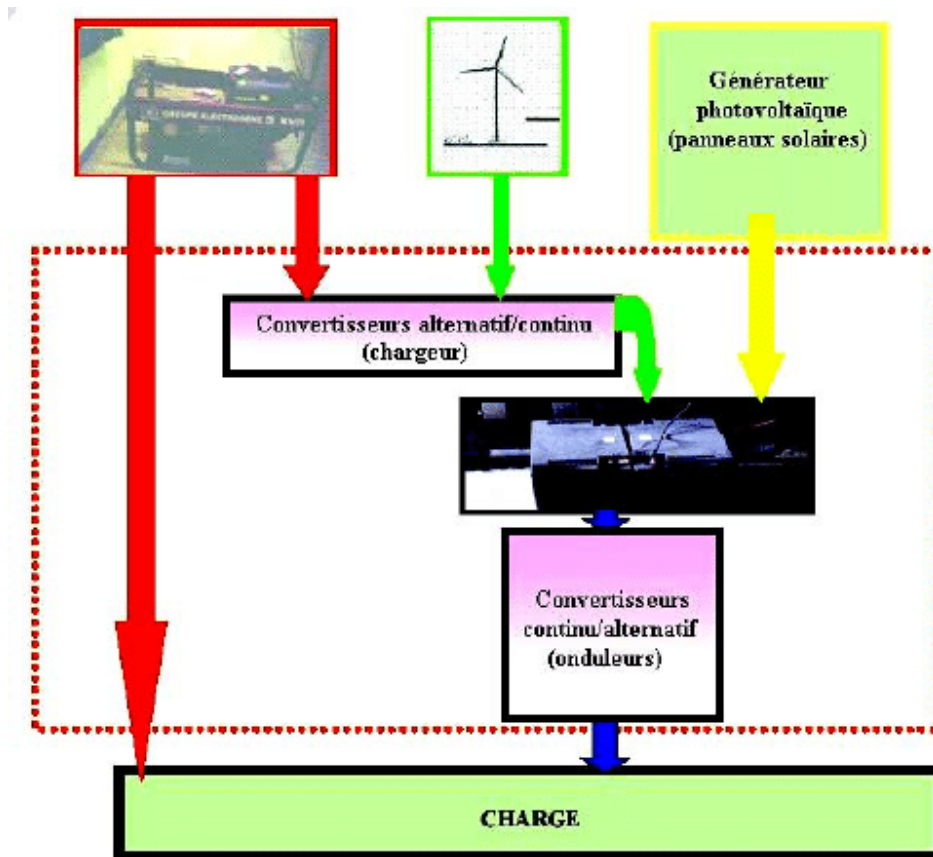


Figure I- 13 : Schéma physique de la chaîne de conversion d'énergie électrique hybride (photovoltaïque- éolienne- groupe électrogène). [17]

### 4.3. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

À l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif, le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique. L'énergie est stocké dans le réseau lui-même donc les batteries de stockage ne sont pas nécessaires à moins que l'on veuille une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité.

L'énergie produite est consommée sur place et le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil. [1]

## 5. Les applications du solaire photovoltaïque :

### 5.1. Les structures ou habitats isolés :

L'utilisation de ce type d'installation consiste à utiliser l'électricité produite directement ou en la stockant dans des batteries. Dans certains cas ces systèmes sont moins onéreux qu'un raccordement électrique, voici quelques exemples d'application : [18]

#### a) Applications agricoles :

- Pompage d'eau, en CC ou en CA, (avec batterie)
- Pompage d'eau à entraînement direct (sans batterie)
- Électrification de bâtiments industriels
- Contrôle de l'irrigation
- Serres (Automatisation des fenêtres et de l'éclairage)

#### b) Applications pour l'élevage :

- Électrification de fermes
- Électrification de clôtures
- dans les systèmes de traite et de refroidissement du lait
- pompages d'eau qui utilisent pour l'abreuvement du bétail

#### c) Éclairage :

- Panneaux publicitaires
- Lampadaires pour l'éclairage public
- Arrêts de bus
- Éclairage de tunnels, grottes, etc.

**d) Signalisation :**

- Phares et bouées de signalisation maritime
- Radiophares et radiobalises à usage aéronautique
- Signalisation routière
- Indicateurs de l'heure et la température sur la voie publique

**5.2. Les appareils portables :**

L'avantage de l'énergie photovoltaïque réside dans le fait de produire de l'électricité n'importe où sur Terre, tant qu'il y a du soleil. Même le soleil est nuageux les appareils portable doivent fonctionner. La plupart du temps, les cellules photovoltaïques ne fournissent pas directement l'électricité à l'appareil portable, mais chargent des batteries qui alimentent l'appareil par la suite.

Ainsi un appareil portable est généralement constitué :

- d'une ou plusieurs cellules
- d'un système de régulation de charge/décharge (selon la qualité du produit)
- d'une batterie

**Les technologies utilisées**

Pour les cellules solaires sont généralement celles en "couche mince" (tellurure de cadmium, silicium amorphe ...) car elle doit résister à toute manipulation, contrairement aux cellules à base de silicium cristallin qui sont très fragiles.

**Parmi ces appareils portables solaires, nous trouvons :**

- la calculatrice solaire.
- la montre solaire.
- la radio solaire.
- l'ordinateur portable solaire (Sol).
- les jouets ou gadgets solaires.
- les chargeurs solaires.



Figure I- 14 : Calculatrice photovoltaïque. [19]

### 5.3. Le domaine spatial

L'acteur principal dans le développement de la technologie photovoltaïque comme nous la connaissons aujourd'hui est peut-être le domaine spatial. [19]

Lors de la création des premières cellules photovoltaïques, personne ne les voulait parce qu'elles étaient trop chères. Cependant, le domaine spatial a vu dans ces cellules une solution adaptée à l'alimentation des satellites et a ainsi contribué à la recherche et à l'émergence de cette technologie.

En dehors de l'atmosphère, le rayonnement solaire est en moyenne 45% plus important que la surface de la Terre. Cela correspond à celui de la constante solaire qui est d'environ  $1367 \text{ W/m}^2$ .

Le premier satellite envoyé dans l'espace avec des panneaux solaires est Vanguard 1, Il a été mis en orbite le 17 mars 1958.



Figure I- 15 : Vanguard 1, premier satellite doté de cellules solaires. [19]

Actuellement, la puissance des satellites a été considérablement augmentée pour atteindre des puissances allant de kilowatts à plusieurs dizaines de kilowatts selon leur mission. Les satellites de communication nécessitant plus d'énergie que les satellites de type télescope à instruments passifs.

#### **5.4. Le transport**

Parmi les véhicules qui utilisent l'énergie solaire photovoltaïques, nous trouvons :

- Le transport ferroviaire (Le TER Solaire,...)
- Le transport aérien (Solar Impulse,...)
- Le transport maritime (PlanetSolar,...)

#### **5.5. Les centrales photovoltaïques :**

Les centrales solaires sont de plus en plus puissantes (plus de 100 MWc en 2012), contrairement aux systèmes solaires photovoltaïques autonomes destinés à l'alimentation en électricité de bâtiments ou d'installations isolées (autoconsommation) dont la puissance dépasse rarement 100 kWc.

Ces centrales solaires photovoltaïques sont constituées d'un générateur photovoltaïque branché avec un ou plusieurs onduleur(s). Ce sont de grandes puissances, à l'inverse des systèmes solaires photovoltaïques autonomes ou des systèmes solaires décentralisé raccordé au réseau, Ce système produit de l'électricité qui est envoyée sur le réseau.



Les centrales solaires photovoltaïques ont l'avantage d'être construites n'importe où tant qu'il y a un réseau électrique à proximité. Ainsi, ils peuvent être construits sur des zones non habitables, telles que des zones désertiques, et disposent, par exemple, de dispositifs pour suivre la course du soleil. [19]

## **6. Les avantages et les inconvénients d'une installation PV :**

### **6.1. Les avantages :**

- L'énergie solaire est inépuisable et non polluante
- Sa structure fixe.
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- Son coup de maintenance bas.
- L'installation ne produit aucun bruit.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière. [20]

### **6.2. Les inconvénients :**

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- pour une installation autonome le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire
- Durée de vie limitée
- pour assurer une bonne production d'énergie une grande superficie de panneaux photovoltaïques est exigée. Ce système est donc moins rentable que le nucléaire pour une production importante. [20]

## **CHAPITRE II**

# **LES ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAIQUE**

### **1. Introduction**

Dans ce chapitre nous présentons les éléments d'une installation photovoltaïque, en commençant par les composants du panneau solaire et les différentes technologies utilisées, avec plus de détails sur l'aspect technique et opérationnel de chaque composant de ce système, et nous clôturons ce chapitre par le dimensionnement de ce dernier.

### **2. Les technologies photovoltaïques**

#### **2.1. Les composants du panneau solaire photovoltaïque :**

Le panneau solaire est composé des éléments suivants : [21]

##### **a) La cellule solaire :**

Elle est l'élément le plus important dans un module PV parce qu'elle génère la puissance électrique suite à l'excitation des irradiations solaires.

##### **b) Film EVA :**

C'est une résine transparente, thermosensible, formée d'Éthylène Vinyle Acétate traité thermiquement entre 150 et 160 °, les quatre caractéristiques qui ont fait de L'EVA un matériau de choix pour l'encapsulation est :

- Sa résistivité électrique très élevée le classant comme un très bon isolant électrique
- Ses températures de fusion et de polymérisation relativement faible
- Sa très faible absorption d'eau, Sa bonne transmission optique

##### **c) Le verre trempé :**

Ce verre est de 3.2 à 4 mm d'épaisseur avec un faible teneur en fer pour permettre une meilleure transmission optique.

##### **d) La plaque arrière :**

(Back sheet) la face arrière du module est constituée d'un film multicouches appelé tedlar, pour améliorer les performances électriques et mécaniques du module.

##### **e) Le cadre en aluminium :**

Est un profilé en aluminium anodisé sert à :

- protéger les bords du verre

## **CHAPITRE II LES ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE**

- Améliorer la résistance mécanique globale du module.
- Améliorer le degré d'étanchéité avec injection de gel de silicone
- Faciliter l'installation et le transport.

### **f) La boîte de jonction photovoltaïque :**

La boîte est considérée comme une armoire électrique qui abrite toutes les parties porteuses de courant afin de réduire les risques d'incendie, de choc électrique et des blessures de personnes par sa robustesse.

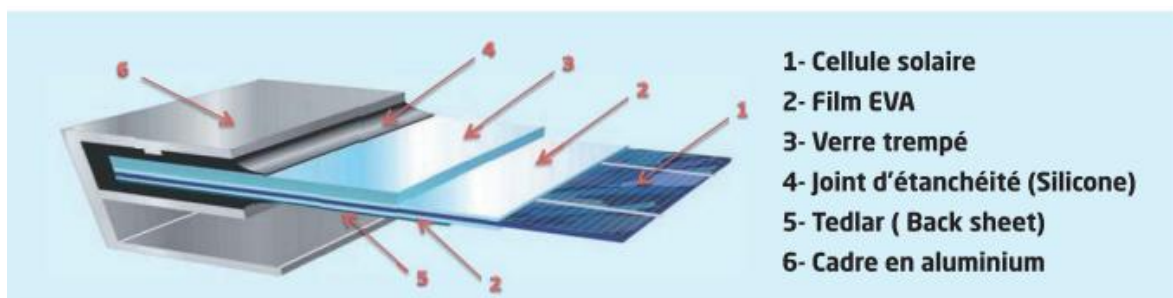


Figure II- 1 : les composants du panneau solaire photovoltaïque. [21]

### **2.2. Les types de cellule photovoltaïques**

La réalisation d'une cellule photovoltaïque peut être faite avec beaucoup de semi-conducteur. Actuellement il y'a 3 principales filières technologiques : les cellules organiques, le silicium cristallin et les couches minces, Ces filières se partagent inégalement le marché comme le montre Figure (II- 1). [13]

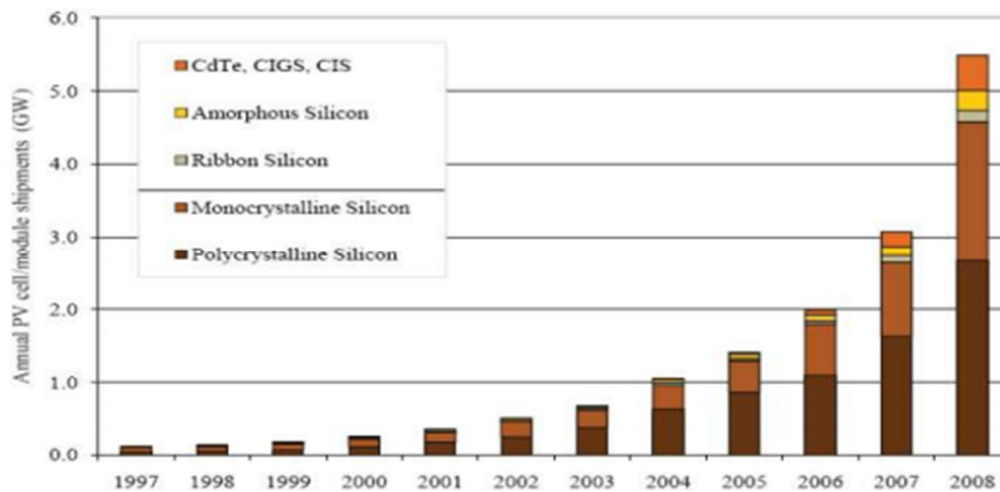


Figure II- 2 : Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules photovoltaïques. [13]

Malgré des prix et des rendements différents ces technologies monopolisent le marché d'une manière plus ou moins équivalente, Ce qui pousse les chercheurs à se focaliser sur l'augmentation des rendements. [14]

### a) Le silicium cristallin

Le marché est dominé à plus de 80 % par le silicium cristallin. la filière du silicium cristallin connaît un très fort développement malgré sa grande consommation en matière première et lui permet de dominer encore le marché. Cette filière est basée sur deux technologies le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin. [22]

#### a-1) Le silicium mono cristallin :

Le silicium mono cristallin n'est pas facile à obtenir. il exige plusieurs étapes de purification car il nécessite un taux de pureté très élevé, ce qui rend ces étapes très coûteuses. son rendement est plus élevé il se situe entre 12 et 20 % pour les cellules industrielles mais son coût élevé pose problème et laisse la place au silicium multi cristallin. [22]

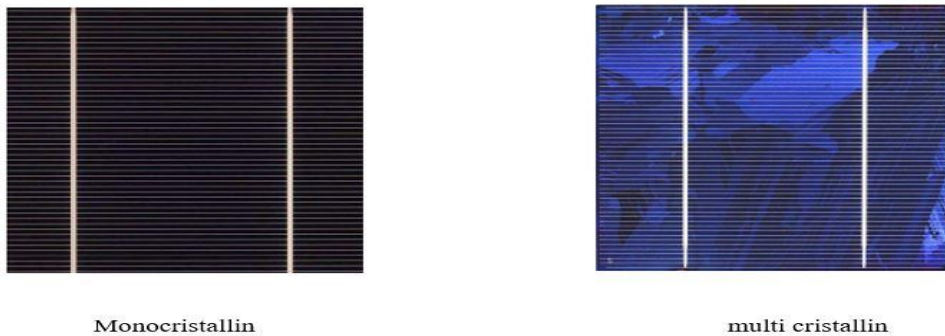


Figure II- 3 : Photos de cellules monocristalline et multi cristallin. [22]

### a-2) Le silicium multi cristallin :

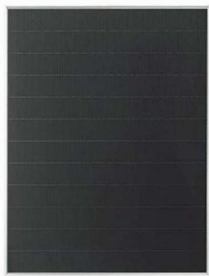
Le silicium multi cristallin est actuellement la technologie la plus utilisée car elle représente 50 % du marché. Sa structure hétérogène est obtenue par coulage de cristaux de silicium. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants, mais la simplicité de sa fabrication rend les coûts de production plus bas que le silicium monocristallin.

Ces deux technologies utilisent une grande quantité de matière première même si actuellement la taille des lingots et des cellules augmentent d'une façon continue. Des sciés à fils permettent de scier des lingots de silicium mono ou multi cristallin en tranches de 150 à 300 microns. [22]

### b) Les couches minces

Le prix trop élevé de Kwc est le principal obstacle au développement du photovoltaïque à très grande échelle. Le kilowatt crête (kwc) est l'unité qui définit la puissance d'un générateur PV aux conditions de test standard (stc) ( $1000 \text{ W/m}^2$  et  $25^\circ\text{C}$ ). Le prix d'un générateur photovoltaïque est en grande partie lié au prix du silicium et du procédé de purification. Plusieurs types de cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matières nécessaires à leur fabrication sont maintenant développés et commencent à être fabriqués industriellement. Ces nouvelles technologies sont appelées les couches minces, font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant à diminuer l'épaisseur des cellules. [22]

## CHAPITRE II LES ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAIQUE



Module rigide Sharp (115Wc, 1,42 m<sup>2</sup>)



Module souple Unisolar (68Wc, 1,12 m<sup>2</sup>)

Figure II- 4 : Deux exemples de modules utilisant le Sia (Silicium amorphe). [22]

Le silicium amorphe (sia) représentait en 2008 plus de 7 % du marché mondial. Cette technologie à couche mince à l'avantage d'utiliser des substrats à bas coût. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat (support) en verre. Ces cellules sont déposées sur des supports souples pour pouvoir fabriquer des cellules souples ce qui permet de réduire le prix par rapport aux cellules cristallines mais le rendement d'une cellule sia reste inférieur à celui des cellules cristallines, il est de 7 %. L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau.

L'utilisation de l'isolation galvanique permet aux cellules amorphes de ne pas se dégrader rapidement. Les cellules amorphes captent convenablement le rayonnement diffus et donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct. Ces cellules représentent une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombres sévères.

D'autres matériaux sont utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le sélénium de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19% mais elle reste au niveau de laboratoire car elle cause des problèmes de toxicité sur l'environnement et l'approvisionnement en matières premières. [22]

### **c) Cellules organiques et plastiques**

Un autre sujet d'étude est en cours dans le laboratoire, c'est celui des cellules organiques qui comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques ou cellules plastiques. Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le problème qui se pose

## CHAPITRE II LES ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

actuellement pour ces technologies est la stabilité de leur performance ainsi que durée de vie (environ 1000 heures). [22]

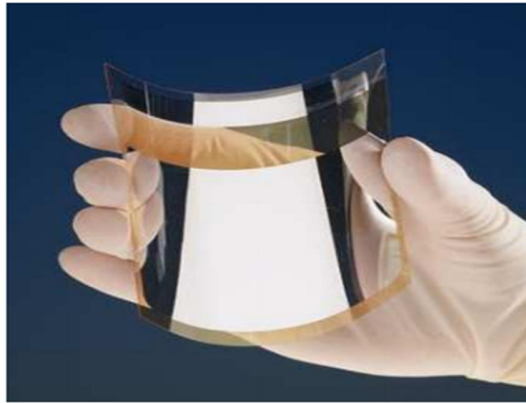


Figure II- 5 : cellule PV organique (CEA). [22]

### **3. Les régulateurs de charge solaire**

Le régulateur de charge solaire est un composant essentiel d'un système solaire photovoltaïque. Il est mis en place dans le système solaire entre les panneaux solaires et batterie son rôle est de délivrer une tension normalisé (12 ,24ou48v) à la batterie de stockage. [23]

#### **3.1. Les fonctions du régulateur de charge :**

Un régulateur de charge solaire remplit 2 fonctions :

il protège la batterie contre la surcharge en coupant le courant électrique allant du panneau solaire vers la batterie quand la batterie est pleinement chargée , Il est donc limiteur de charge.

Sa deuxième fonction est qu'il protège la batterie contre la décharge profonde, quand les utilisations sont branchées sur la sortie du régulateur de charge, il déconnecte les utilisations quand la batterie descend en dessous d'un seuil critique d'état de charge de la batterie, Il est donc limiteur de décharge. [23]

#### **3.2. Les différents types de régulateur de charge :**

Les régulateurs de charge de systèmes PV peuvent se caractériser en trois groupes principaux :

**a) les régulateurs de charge shunt :** Ce sont des régulateurs solaire basique, en fonction de la tension de la batterie le régulateur met ou non le panneau solaire en contact avec celle-ci.



**b) les régulateurs de charge série :** qui intègrent un interrupteur entre le panneau solaire et la batterie pour l'arrêt de la charge. La majorité des régulateurs de charge à impulsions de largeurs variables (PWM, Pulse With Modulation) utilise cette technique.

**c) les régulateurs à recherche de point de puissance maximum (MPPT, Maximum Power Point Tracker) :** qui utilisent un circuit électronique spécial permettant de toujours capter la puissance maximale produite par les panneaux solaires. [23]

### **3.3. Le choix de régulateur charge :**

- Selon le type de la batterie (système 12, 24 ou 48 V)
- Selon la technologie
  - PWM :            rendement plus faible  
                          Moins cher à l'achat
  - MPPT :            Meilleur rendement  
                          Plus cher  
                          Pour les grosses installations
- Selon les modes de fonctionnement
  - Charge-décharge les plus répandus
  - Décharge
  - Charge
- Selon l'ajustement en fonction de la température
- Selon le système à gérer
  - Maison
  - Petite installation
- Selon la puissance de panneau. [24], [25]

### **4. Le Stockage de l'énergie**

Dans les systèmes de production d'électricité à partir d'énergies intermittentes tel que les systèmes photovoltaïques , il est essentiel de stocker de l'énergie pour ajuster la production à la consommation.

## **CHAPITRE II LES ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE**

Ceci est particulièrement vrai pour les systèmes autonomes (non connectés à un réseau électrique). Même dans le cas où le réseau électrique est présent, l'utilisation d'un moyen de stockage permet de lisser les productions intermittentes et d'injecter l'énergie pendant les périodes les plus pertinentes (la nuit et les jours "sans soleil").

Le système de stockage est un élément indispensable de l'installation photovoltaïque du point de vue technique pour le stockage d'énergie électrique produite par les panneaux photovoltaïque dans la période nocturne mais aussi du point de vue économique Parce qu'il représente 40 à 50 % du coût total de l'installation photovoltaïque. [26]

### **4.1. Caractéristiques de la batterie : [24]**

- Capacité nominale : représente la quantité d'énergie maximum qui contient la batterie de stockage (sous température idéale de 25°). Elle s'exprime en Ampère heure (Ah).
- Etat de charge : C'est le pourcentage de la quantité d'énergie disponible dans la batterie à un instant t.
- Profondeur de décharge (PDD) : C'est le pourcentage d'énergie maximum que l'on peut retirer d'une batterie. Elle ne doit pas être déchargée au-delà de cette valeur, afin de prolonger sa durée de vie.
- Température : La variation de température influence le rendement de la batterie. Celle-ci a un fonctionnement idéal à température ambiante de 25°C ; Il faut donc prévoir si possible une régulation thermique pour maintenir sa durée de vie.
- Tension nominale : C'est la tension type de la batterie. Elle correspond aussi à la tension de fonctionnement du système autonome. Ex : Tension 12V, 24V, 48V...
- Taux de décharge : C'est le temps nécessaire pour décharger entièrement la batterie. Supposons une batterie de capacité de 100Ah et de courant de décharge de 5 A :  
Le taux de décharge sera  $100\text{Ah} / 5\text{A}$  soit 20 heures ; Il est noté C/20.
- Taux de recharge : C'est la quantité de courant qu'il faut pour recharger une batterie en un temps donné (temps du taux de décharge). Supposons une batterie de 100Ah et de taux de décharge C/20 : Le taux de recharge sera  $100\text{Ah} / 20\text{h}$  soit 5 A.

## **CHAPITRE II LES ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAIQUE**

- Cycle et durée de vie : C'est le nombre de séquences de charge/décharge, que peut subir une batterie à sa profondeur de décharge. Il détermine les performances de la batterie et sa durée de vie.
- Nombres de jours d'autonomie : C'est la durée pendant laquelle la batterie peut alimenter toute seule l'installation en courant, sans être rechargée ni endommagée.

Cependant, il existe plusieurs types de batterie classes selon le principe d'accumulation ou selon la capacité de stockage (Ah), une autre classification tenant compte le temps de charge et de décharge de la batterie .par principe on choisit toujours une batterie qui se charge rapidement mais qui se décharge très lentement.

## CHAPITRE II LES ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAIQUE

**Tableau II-1** Les avantages et les inconvénients des différents types de batterie. [27]

Type de la batterie	Avantages	Inconvénients
Plomb (Pb)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prix bas –Solides</li> <li>- Capables de fournir des courants élevés</li> <li>- Eléments standards se trouvent n'importe où dans le commerce</li> <li>- Facilité de mise en œuvre</li> <li>- Sans effet mémoire (c'est-à-dire qu'on peut les recharger quand on veut, à n'importe quel niveau de décharge)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poids</li> <li>- Autodécharge (1%par jour environ).</li> <li>- Sensibles aux températures négatives (perte d'autonomie jusqu'à -25% à -10°C)</li> <li>- Risque de cristallisation de sulfate de Pb si laissée trop longtemps déchargée</li> </ul>
Nickel Cadmium (Ni-Cd)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aptes à supporter de grands courants décharge et recharge grâce à leurs faibles résistances internes.</li> <li>- Faible coût</li> <li>- Solidité mécanique et électrique</li> <li>- Recharge facile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Densité énergétique moyenne</li> <li>- Recyclage compliqué à cause du cadmium qui est un métal lourd et polluant</li> </ul>
Nickel Métal Hydride (NiMH)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bonne densité d'énergie</li> <li>- Supporte des courants importants car résistance interne faible (les Ni-cd gardent cependant l'avantage dans ce domaine).</li> <li>- Simples à stocker et à transporter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fragile car ne supportent pas la surcharge, nécessitant par conséquent l'usage de chargeurs automatiques performants et coûteux</li> <li>- Détection de fin de charge difficile</li> <li>- Durée de vie faible</li> </ul>

## **CHAPITRE II LES ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE**

Lithium (Li)	- Densité énergétique très élevée grâce aux propriétés physiques du lithium - Autodécharge très faible (5%par mois)	- Prix très élevé
--------------	--	-------------------

### **5. Les convertisseurs :**

Les convertisseurs sont des dispositifs utilisés pour transformer la tension continue obtenue par les panneaux ou les batteries afin de l'adapter aux récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative. [1]

les convertisseurs sont disposé généralement soit entre le PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (dans ce cas il sera appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif). [28]

#### **5.1. Le convertisseur DC– DC**

est un dispositif utilisé pour fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. [22]

#### **5.2. Le convertisseur DC– AC**

Pour alimenter des appareils qui fonctionnent en courant alternatif, le convertisseur doit être interposé entre la batterie et ces appareils. Les convertisseurs les plus utilisés transforment le courant continu issu de la batterie en courant alternatif 220 V/50 Hz ou 380 V/50 Hz . [7]

### **6. Le câblage et éléments de sécurité**

#### **6.1. Types de câbles solaires :**

Une installation photovoltaïque demande de faire un choix très rigoureux concernant le diamètre du câble car un câble sous-dimensionné peut provoquer des incendies (surchauffe du câble) sans oublier les pertes en ligne, une section de câble surdimensionnée est cause de surcoûts.

L'intensité du courant et la distance à parcourir sont des paramètres essentiels dans le choix du diamètre des câbles .Il est nécessaire de procéder à une étude détaillée concernant le coût, la faisabilité de la section à acheter avant l'installation de la centrale photovoltaïque. [29]

## CHAPITRE II LES ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAIQUE

L'augmentation du voltage nominal de l'installation permet de diminuer le diamètre des câbles nécessaires ainsi le cout de l'installation.

**La section du câble entre la boîte de jonction et régulateur donnée par la relation suivante :**

$$S = \frac{\rho \times L \times I}{\varepsilon \cdot VA} \quad (II-1)$$

**La section du câble entre la batterie et le convertisseur donné par la relation suivante :**

$$S = \frac{\rho \times 2 \times L \times I}{\varepsilon \cdot VA} \quad (II-2)$$

$\rho$  : Résistivité du matériau conducteur (cuivre ou aluminium) en service normal,  $\rho = 0.02314$  ohm/m.

L : Longueur du câble (m)

S : Section du câble (mm<sup>2</sup>)

I : Courant circulant dans le câble (A)

$\varepsilon$  : chute de tension,  $\varepsilon = 0.03$ .

VA : Tension à l'origine du câble (V)

### **6.2. Connecteurs MC4**

Connecteurs MC4 sont fournis avec le manchon de verrouillage. Fournir un câblage sûr et très facile à assembler série de modules photovoltaïques dans les installations de plein air ou dans des bâtiments. [30]



Figure II- 6 : Connecteur MC4. [30]

### **6.3. Montages série et parallèle**

Les panneaux photovoltaïques et les batteries de stockage d'énergie peuvent être câblés en série et/ou en parallèle en fonction des résultats attendus : branchement en série pour une tension

## CHAPITRE II LES ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAIQUE

(V) plus élevée, branchement en parallèle pour une intensité (A) plus importante, en série et en parallèle pour augmenter simultanément la tension et l'intensité du système. [31]

- **En parallèle**

Les tensions des différentes « branches » sont les mêmes et les courants s'additionnent c'est à dire les panneaux et les batteries cumulent leur intensité mais ne cumulent pas leur voltage.

$$U_1 = U_2 \quad (II-3)$$

$$I = I_1 + I_2 \quad (II-4)$$

### Exemple

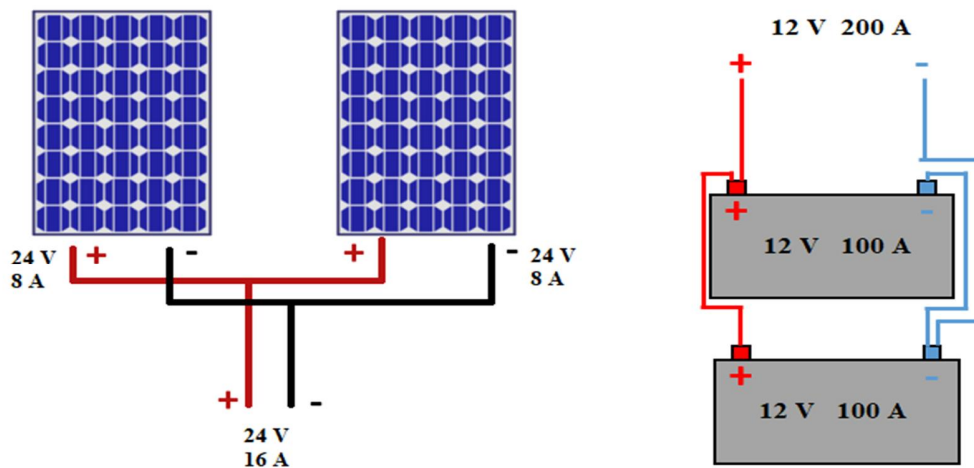


Figure II- 7 : Branchement en parallèle. [31]

Les deux panneaux forment un circuit produisant une intensité de **16 A** tout en restant en **24 v**

Les deux batteries forment un circuit produisant une intensité de **200 A** tout en restant en **12 v**

- **En série**

Les courants sont les mêmes et les tensions s'additionnent c'est-à-dire les panneaux et les batteries cumulent leur voltage mais ne cumulent pas leur intensité.

$$I_1 = I_2 \quad (II-5)$$

$$U = U_1 + U_2 \quad (II-6)$$

**Exemple**

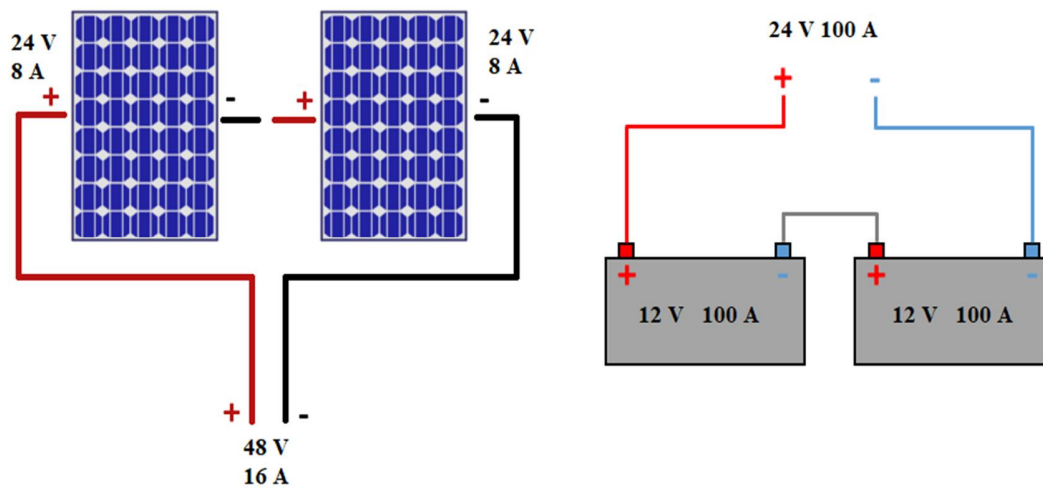


Figure II- 8 : Branchement en série. [31]

Les deux panneaux forment un circuit produisant une tension de **48V** tout en restant à **16A**

Les deux batteries forment un circuit produisant une tension de **12V** tout en restant à **100A**

Les batteries mises en série ou en parallèle doivent être de la même marque, du même type, et avoir la même capacité et état de charge. Et le branchement d'anciennes batteries avec de nouvelles batteries doivent être évité.

Par contre au branchement en série, il n'est pas possible d'avoir des panneaux de 24 V et un autre de 18 V par exemple (C'est théoriquement possible avec la tension la plus faible qui prime, mais il y a un risque de surtension et court-circuit), par contre il est possible d'avoir des panneaux d'intensités différentes.



### 6.4. Branchement en série et en parallèle

Branchement mixte : en série et en parallèle. C'est le branchement nécessaire lorsque l'on a besoin d'une certaine puissance à la tension désirée en V, Dans le montage mixte les règles du branchement en série et en parallèle s'appliquent. [8], [31]

Il est indispensable d'avoir des produits avec la même tension et la même intensité / capacité.

#### Exemple

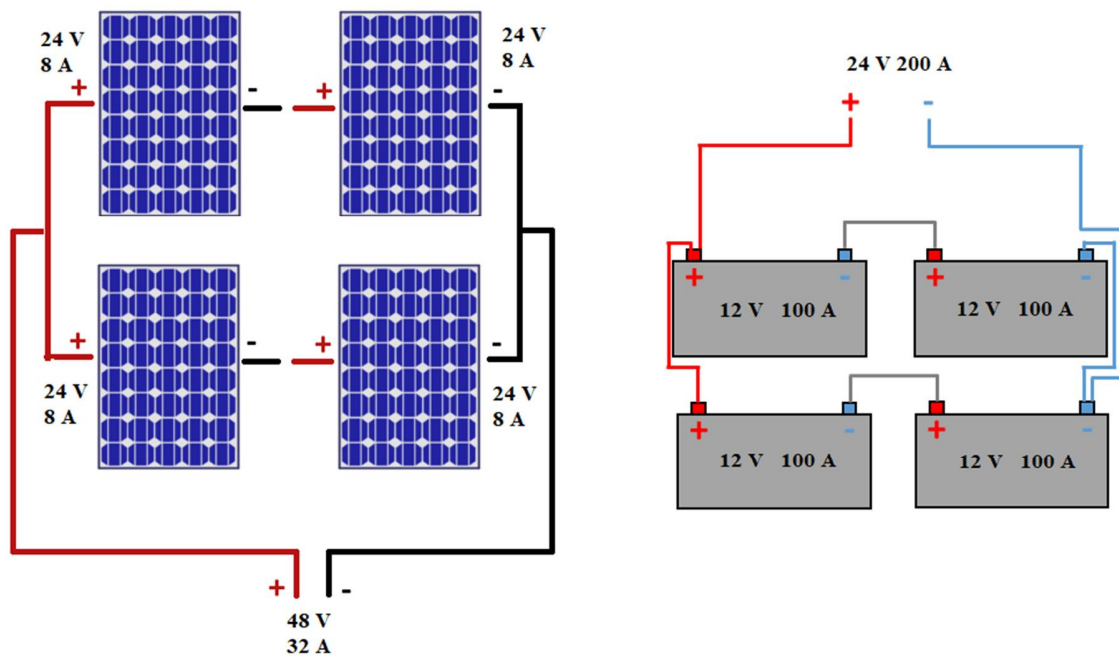


Figure II- 9 : Branchement mixte. [31]

## 7. Elément de sécurité

### 7.1. Disjoncteur différentiel :

Un disjoncteur différentiel est un dispositif de sécurité permet d'interrompre le courant électrique lorsqu'il y a un risque d'incident sur le circuit électrique. Son rôle est d'assurer la protection des circuits contre les surintensités en cas de surcharge ou de court-circuit et la protection les personnes.

## CHAPITRE II LES ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAIQUE

Quand il détecte une différence d'intensité entre les deux conducteurs du circuit (une perte de courant signalant un défaut d'isolement) le disjoncteur coupe le courant automatiquement.

Donc ce dispositif permet de limiter les risques d'électrocution en détectant les fuites de courant à la terre dans votre installation électrique. [32]



Figure II- 10 : Disjoncteur différentiel. [32]

### **7.2. Interrupteur différentiel :**

Ce dispositif fonctionne sur le même principe que le disjoncteur différentiel qui est la seule qui assure la protection contre le court-circuit et l'échauffement excessif des conducteurs en cas de surcharge. Son rôle est de protéger contre les défauts d'isolement. [32]

### **7.3. Fusible :**

Coupe-circuit à fusible ou le fusible est un dispositif de protection son rôle est de couper le courant électrique lors d'une surcharge ou d'un court-circuit

Le composant principal de cet appareil est un petit isolant enveloppant un fil conducteur qui fond lorsqu'il est traversé par un courant d'intensité supérieure au calibre supporté.

Les fusibles ont le désavantage de ne servir qu'une fois. Ainsi, si le fusible saute, il doit être remplacé par un neuf. [33]



Figure II- 11 : cartouche fusible. [33]

#### **7.4. Parafoudre :**

Le parafoudre (ou parasurtenseur) est un dispositif de sécurité qui protège l'installation électrique contre les surtensions d'origine atmosphérique.

La foudre peut provoquer des surtensions parfois plusieurs milliers de volts dans les installations ce qui provoque le risque d'endommager les appareils tels que la télévision, climatiseur, pc portable etc..., Le rôle du parafoudre d'écouler vers la terre le maximum de ces surtensions. [34]



Figure II- 12 : parafoudre. [34]

### **8. Dimensionnement d'une installation photovoltaïque [23]**

- **Étape 1** : calcul du besoin journalier en énergie

Le Wh (watt heure) est l'unité qui reflète les besoins quotidiens en énergie.

Le besoin journalier (en AC et en DC) :

$$Be_{jAC} = P_i \cdot T_i \quad \left[ w \frac{h}{j_r} \right] \quad (II- 7)$$

## CHAPITRE II LES ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAIQUE

$$Bej_{DC} = P_i \cdot T_i \quad \left[ \frac{W \cdot h}{J_r} \right] \quad (II-8)$$

Avec :

$P_i$ : La puissance indicative (W)

$T_i$  : Temps de fonctionnement journalier (h)

- **Étape 2** : calcul du besoin journalier total.

$$Bej_{totale} = \left[ \frac{Bej_{AC}}{\eta_{cnv}} + Bej_{DC} \right] \quad \left[ \frac{Kwh}{J_r} \right] \quad (II-9)$$

$\eta_{cnv}$  : Rendement du convertisseur

- **Étape 3** : la multiplication de la valeur énergétique de l'étape 2 par les jours souhaités d'autonomie.

Cela vous indique la quantité d'énergie que la Banque de batterie doit stocker (deux ou trois jours est une valeur assez typique). Par exemple trois jours d'autonomie,

Ce qui rend la nouvelle valeur énergétique

Le besoin journalier total  $\times$  Nombre de jours = [kWh].

Le besoin journalier total  $\times$  3 jours = [kWh].

- **Étape 4** : la division de la valeur calculée à l'étape 3 par la valeur de compensation de température fournie par le fabricant de la batterie.

$$\frac{\text{la valeur énergétique de l'étape 3}}{0.9} = [\text{kWh}]. \quad (II-10)$$

- **Étape 5** : la division de la valeur de l'étape 4 par la profondeur de décharge permise.

$$\frac{\text{la valeur énergétique de l'étape 4}}{0.75} = [\text{kWh}] \quad (II-11)$$

- **Étape 6** : la division de la valeur de l'étape 5 par la tension nominale souhaitée de la batterie.

La capacité des batteries [Ah] :

Les batteries sont classées en ampères-heures, et non en watts-heures.

## CHAPITRE II LES ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

$$C_{Ah} = \frac{\text{la valeur de l'étape 5}}{V_{nominal}} \quad (II-12)$$

Ou bien :

$$C_{Ah} = \frac{Bej_{total} \cdot N_{jours}}{\eta_t \cdot DoD \cdot V_{nominal}} \quad (II-13)$$

DoD : profondeur de décharge

$\eta_t$  : Rendement de la température

$V_{nominal}$  : Voltage de la batterie

- **Étape 7** : Calcul du champ PV :

$$P_{Pv} = \frac{Bej_{totale}}{\eta_{Pv} \cdot DoD \cdot \eta_{omb} \cdot C} \quad (II-14)$$

$\eta_{Pv}$  : Rendement du panneau photovoltaïque.

$\eta_{amb}$  : Coefficient d'ombrage.

C : Coefficient régional.

## **CHAPITRE III**

# **LA CONCEPTION DU KIT PV MOBILE**

**1. L'utilité du Kit :**

Il s'agit là d'un kit opérationnel qui peut alimenter n'importe quel appareil électrique fonctionnant avec un courant continu ou un courant alternatif. La puissance installée des panneaux photovoltaïques est modulable entre 100 et 400 Wc. Le convertisseur installé délivre une puissance de 350 V.A (280 W). Parmi les applications de ce kit :

**a) Camping et applications similaires :**

Ce kit solaire est la meilleure solution pour les campings. Il a les particularités de la facilité de déplacement, de montage et de démontage. Ce dispositif est écologique et ne fait aucun bruit. Il permet d'allumer 3 lampes LED de 12 watt pendant 4 heures, de recharger les batteries de trois smartphone de 2600mAh et aussi d'utiliser une cafetière électrique.

**b) Eclairage de voisinage :**

Ce kit permet aussi de mettre d'allumer un projecteur LED de 30 watt pendant 11 heures ;

- son installation est très simple, il suffit de le fixer sur le poteau ou sur le mur au moyen des vis fournies.
- Il n'est pas nécessaire d'utiliser un câble électrique pour raccorder cet utilisateur car il est incorporer dans le système.
- Ce système permet une autonomie de fonctionnement tout une nuit sans frais.

**c) Loge de garde**

Ce dispositif photovoltaïque est très utile dans les endroits où il n'y a pas de réseaux électriques ; comme par exemple loge de garde dans une ferme où on peut faire fonctionner :

- 2 lampes LED 12 watt pendant 4 heures
- TV 60 watt pendant 3 heures
- La batterie d'un smartphone

**d) Dépannage d'un système classique existant**

Il remplacera ce système en cas de défaillance de ce dernier et sera considéré comme moyen de secours.

## **2. La conception générale :**

### **2.1. Composition du kit solaire :**

L'objectif de ce projet permet la réalisation d'un dispositif mobile, utile et fiable de l'énergie solaire photovoltaïque.

Ce dispositif se compose d'un panneau solaire qui transforme l'énergie solaire en énergie électrique à travers la technologie des semi-conducteurs, de quatre batteries a plomb 12V-7Ah, un régulateur de charge pour une production de tension réglée aux les batteries de stockage et un convertisseur pour l'obtention de courant alternatif vu que le panneau photovoltaïque produit un courant continu.

### **2.2. Guide de montage :**

#### **Étape 1 : fixation du régulateur**

Les bornes de puissance dirigées vers le bas et doivent être à proximité de la batterie, mais jamais directement dessus afin d'éviter des dommages dus au dégagement gazeux de la batterie

#### **Étape 2 : connexion des batteries**

- Raccordement de la borne positive de la batterie avec la borne positive du régulateur.
- Raccordement de la borne négative de la batterie avec la borne négative du régulateur.

#### **Étape 3 : branchement du panneau solaire**

- Un premier câble serti avec un embout MC4 male connecté sur la borne négative (-) du régulateur.
- Un deuxième câble serti avec un embout MC4 femelle connecté sur la borne positive (+) du régulateur.

#### **Étape 4 : branchement du convertisseur**

- Raccordement de la borne positive de la batterie avec la borne positive du convertisseur.
- Raccordement de la borne négative de la batterie avec la borne négative du convertisseur.

#### **Étape 5 : vérification du bon fonctionnement**



### 2.3. La conception du kit avec logiciel SketchUp :

Sketchup est un logiciel (à usage libre sans licence) de CAO et modélisation 3D simple d'utilisation et intuitif permet d'obtenir un rendu visuel d'un projet. [35]

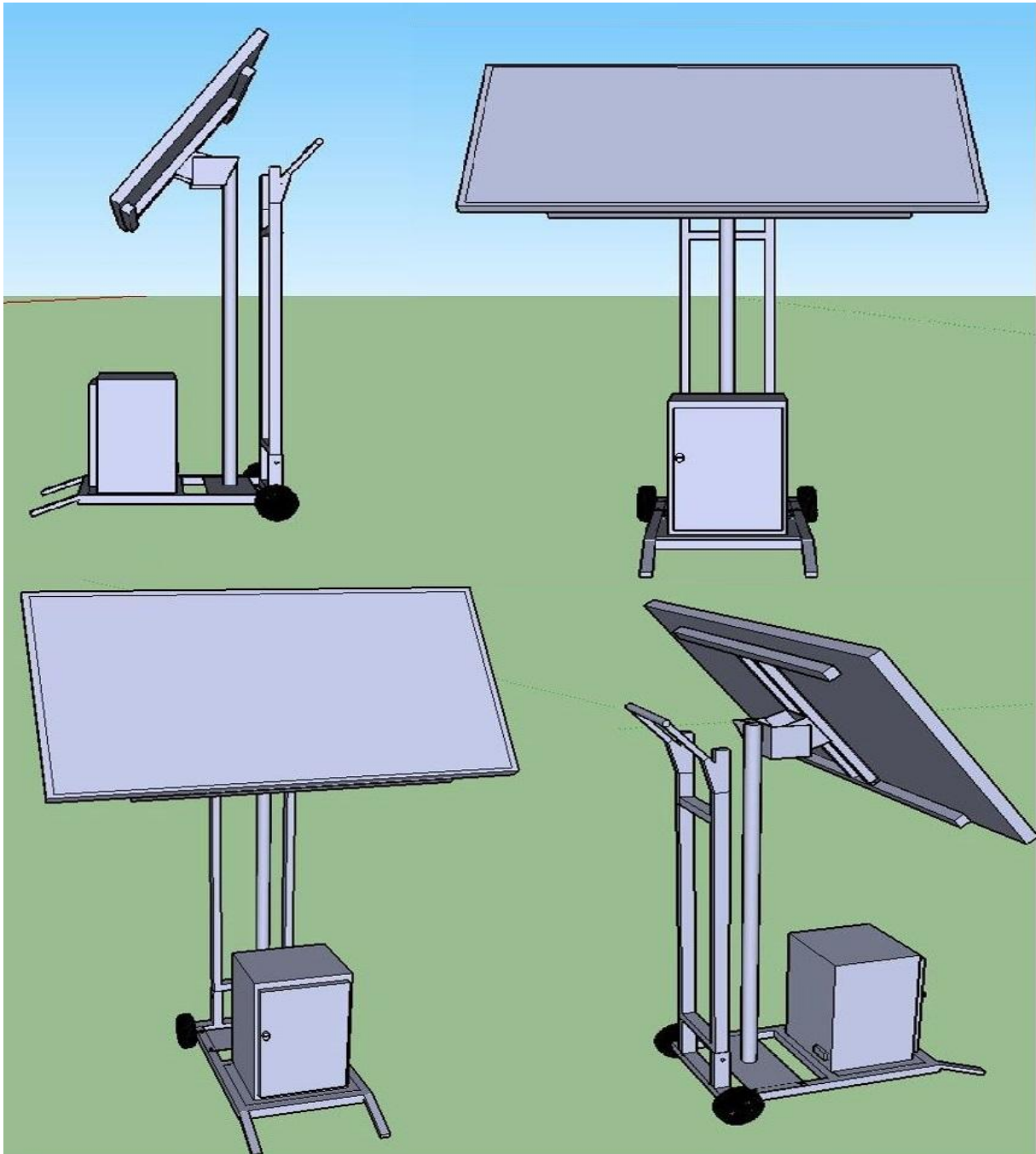


Figure III- 1: La conception du kit avec logiciel SketchUp.

2.4. Vue d'ensemble du kit solaire



Figure III- 2 : L'installation finale du banc d'essai photovoltaïque.

### 3. Le choix des éléments

#### 3.1. Panneau solaire photovoltaïque monocristallin 36 cellules 100 W :

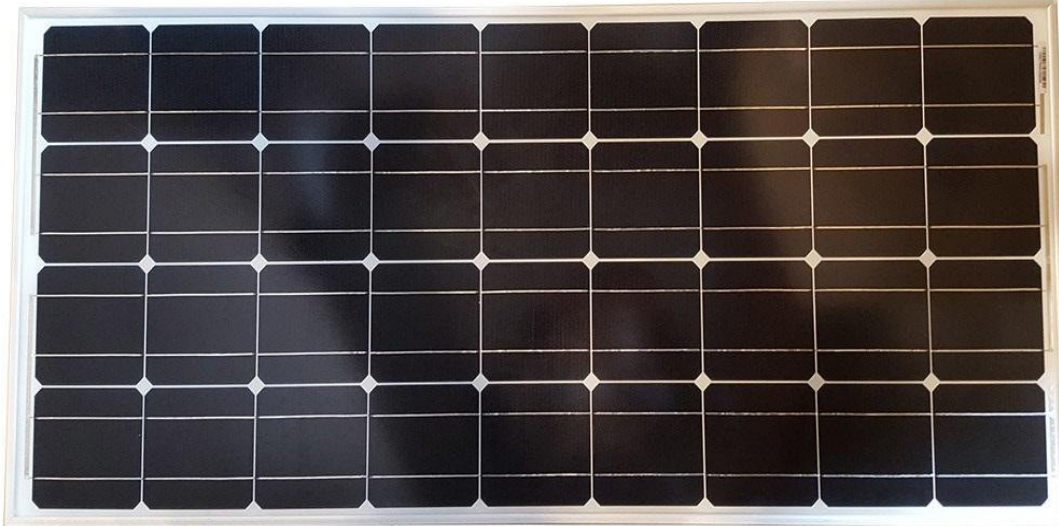


Figure III- 3 : panneau solaire monocristalline 100 watt.

##### Caractéristique mécanique :

- Type de cellule : Cellule monocristalline avec anti-réflexion
- Nombre de cellules : 36cellule (4×9)
- Dimensions de la cellule : 125×125 mm
- Dimensions du module : 1200×553×35mm
- Poids du module : 8kg
- Cadre : Alliage en aluminium anodisé
- Type de verre : Verre trempé, 3.2mm d'épaisseur
- Boite de jonction et connecteur : IP65 : 3 diodes By-pass et câble compatible avec un connecteur mc4

**Caractéristique électrique :**

- Puissance nominale : 100 W
- Tension en circuit ouvert : 22.30 V
- Courant de court-circuit : 5.84 A
- Tension mpp  $V_{mpp}$  : 18.50 V
- Courant mpp  $I_{mpp}$  : 8.41 A
- Tension maximale du système VDC : 1000 V
- Charge maximale de fusible : 10 A
- Température nominale de fonctionnement :  $45 \pm 2^\circ\text{C}$
- Coefficient de température de puissance :  $-0.41 \text{ \%}/^\circ\text{C}$
- Coefficient de température de courant :  $+0.06 \text{ \%}/^\circ\text{C}$
- Coefficient de température de voltage :  $+0.32 \text{ \%}/^\circ\text{C}$

**3.2. Régulateur de charge**

Figure III- 4 : régulateur de charge.

**Fiche technique :**

- Tension nominale : 12V/24V/Auto
- Application : Contrôleur de système solaire
- Courant : 10A / 20A / 30A
- Seulement pour le système solaire PV hors réseau.
- Dimensions : (133 x 70 x 32 mm)

### 3.3. Batterie ACID 12v 7Ah :



Figure III- 5 : batterie Acid 12 v 7Ah.

#### Fiche technique :

- Capacité de la batterie : 7Ah
- Technologie de la batterie : acide au plomb
- Bornes de batterie : Connexion rapide
- Tension de la batterie : 12V
- Dimensions : (65 x 94 x 151 mm)
- Poids : 2,65 kg

### 3.4. Convertisseurs Phoenix 24v 350VA :



Figure III- 6 : convertisseurs Phoenix 24v 350VA.



**Fiche technique :**

- Puissance Nominale : 350 W
- Puissance Maximale : 700 W
- Tension : Entrée : 24V Sortie : 230V / - 50 Hz ( $\pm 0.1\%$ )
- Propriétés : Interrupteur Marche/Arrêt À Distance
- Dimensions : (72 x 155 x 237 mm)

**4. La mise en œuvre du système d'acquisition des données :****4.1. Introductions aux systèmes d'acquisition de donnée :**

Le système d'acquisition de donnée est un ensemble d'appareils interconnectés de manière à permettre l'obtention automatique d'une série de mesures sur un objet. L'analyse et le choix des caractéristiques d'un système d'acquisition est fortement liés à l'application.

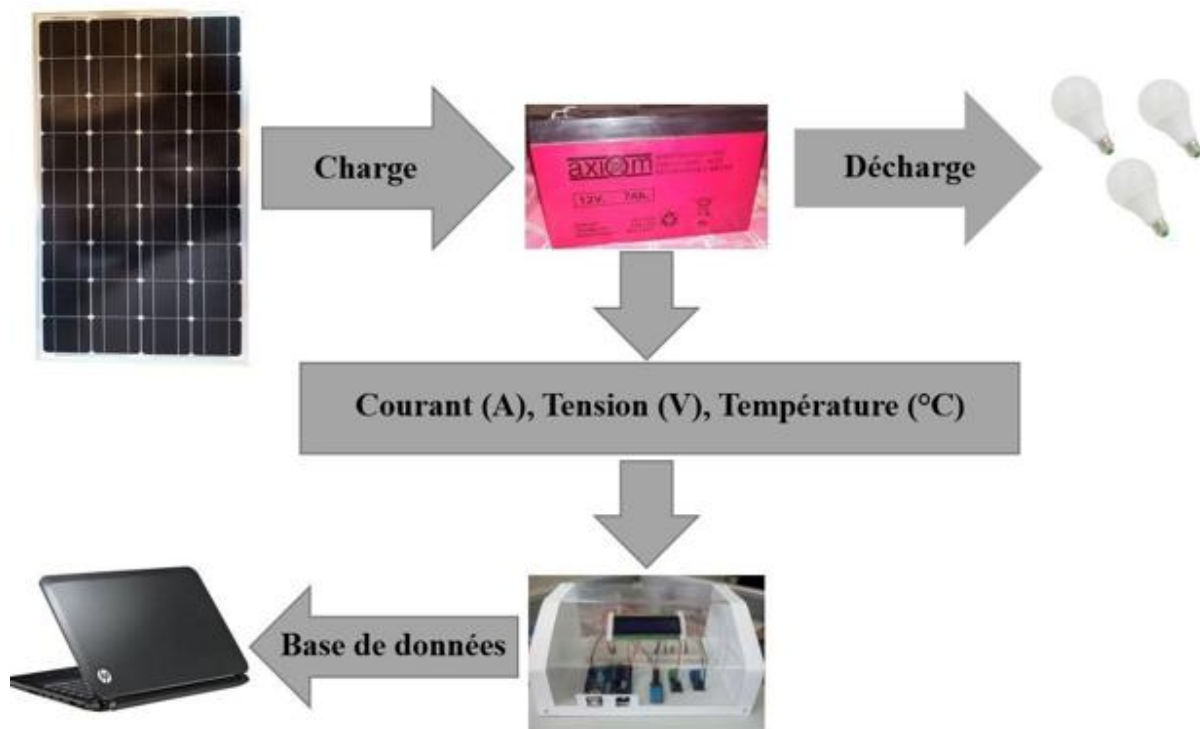


Figure III- 7 : la mise en œuvre d'un système d'acquisition de donnée.

## 4.2. Présentation de la carte Arduino :

Une carte Arduino est une petite carte électronique équipée d'un microcontrôleur qui permet à partir d'événements détectés par des capteurs, de programmer et commander des actionneurs. [36]

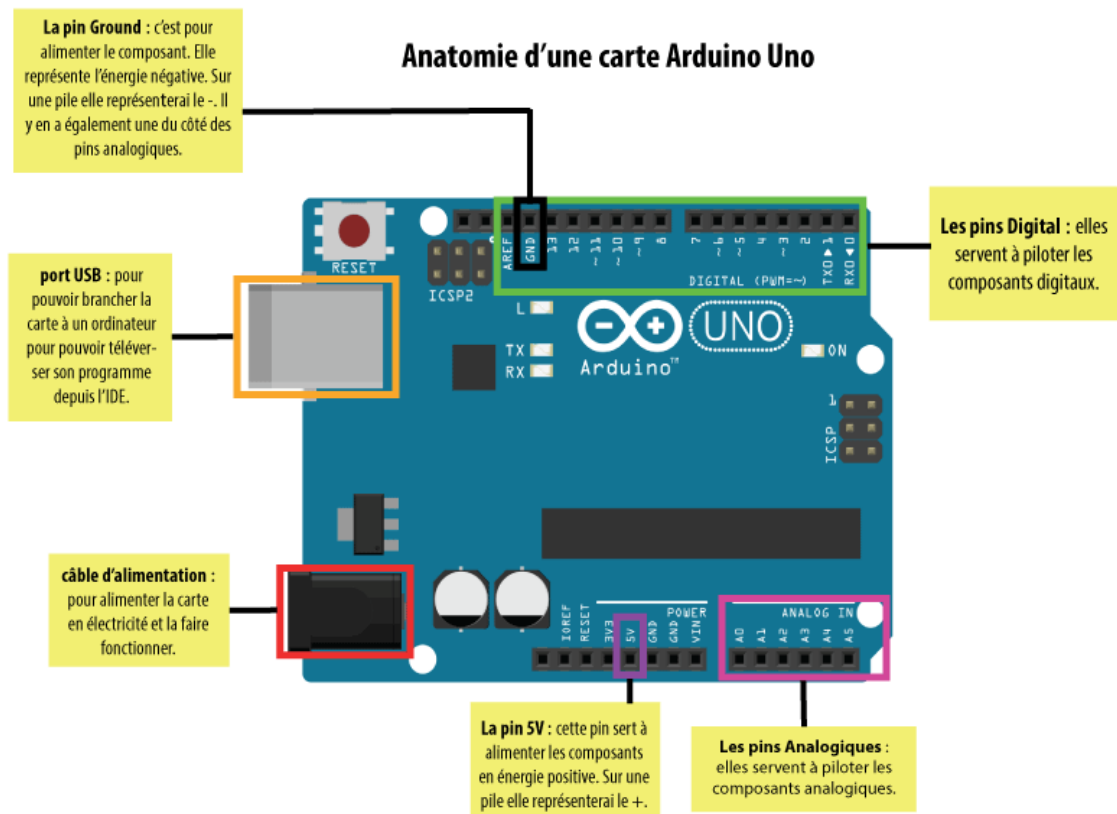


Figure III- 8 : la structure de la carte Arduino. [36]

### a) La programmation

La carte arduino possède un microcontrôleur, L'ensemble des cartes Arduino se programment en C++ à l'aide d'un logiciel de programmation gratuit et open-source fourni par Arduino. Le logiciel de programmation sert d'éditeur de code une fois, le programme tapé ou modifié au clavier, il sera transféré et mémorisé dans la carte à travers de la liaison USB qui alimente à la fois en énergie la carte et transporte aussi l'information. [36]

### b) Structure générale du programme :

L'IDE Arduino possède une interface simple compatible aux différents systèmes d'exploitation.

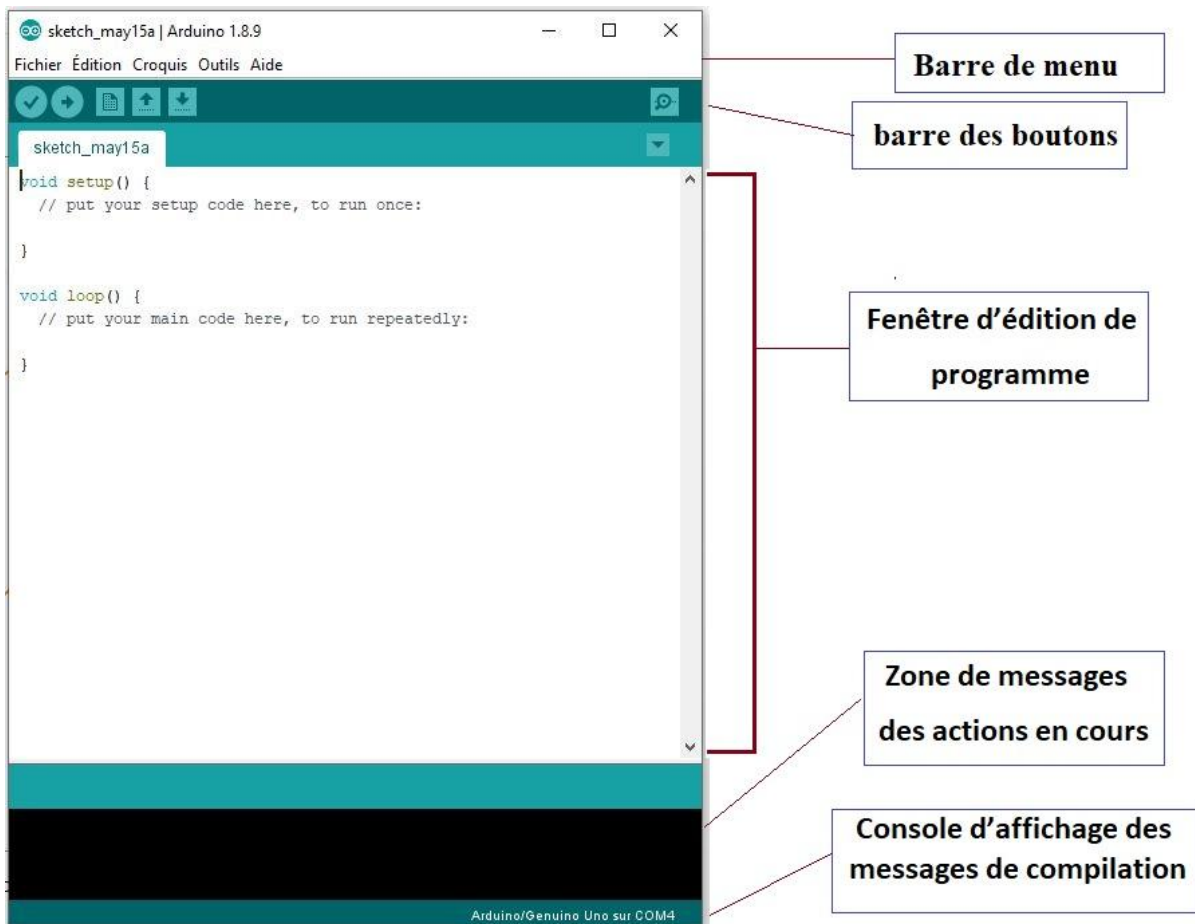


Figure III- 9 : interface IDE Arduino. [36]

Avant d'envoyer le programme dans la carte, il est nécessaire de sélectionner le type de la carte (Arduino UNO) et le numéro de port USB (COM 3).

### c) Description du programme :

Le programme de l'arduino Uno est une suite d'instructions élémentaires sous forme textuelle (ligne par ligne). La carte lit puis effectue les instructions les unes après les autres dans l'ordre défini par les lignes de code.

### d) Les étapes d'utilisation du programme

- Concevoir ou ouvrir un programme existant avec le logiciel IDE Arduino.



- la vérification du programme avec le logiciel Arduino (compilation).
- la modification du programme si les erreurs sont signalées
- On charge le programme sur la carte.
- câblage du montage électronique.
- L'exécution du programme est automatique après quelques secondes.
- l'alimentation de la carte soit par le port USB, soit par une source d'alimentation autonome.
- la vérification du montage si il fonctionne. [36]

### **e) Les capteurs de mesures**

#### **e-1) Capteur de courant ACS712 30 A :**

Le capteur de courant ACS712 30 A permet de mesurer le courant électrique jusqu'à 30 A. Il délivre une tension analogique en fonction du courant mesuré, il permet de détecter avec précision les signaux de courant alternatif ou courant continue. Les courants maximale qui peut être détectée peuvent atteindre 30A et le signal de courant actuelle peut être lue via un port analogue ce module peut mesurer les positifs et négatifs 30 ampères.

#### **Caractéristiques :**

Alimentation : 5 Vcc

Plage de mesure :  $\pm 30A$

Sortie analogique : 66 mA/V

Réponse rapide et haute sensibilité

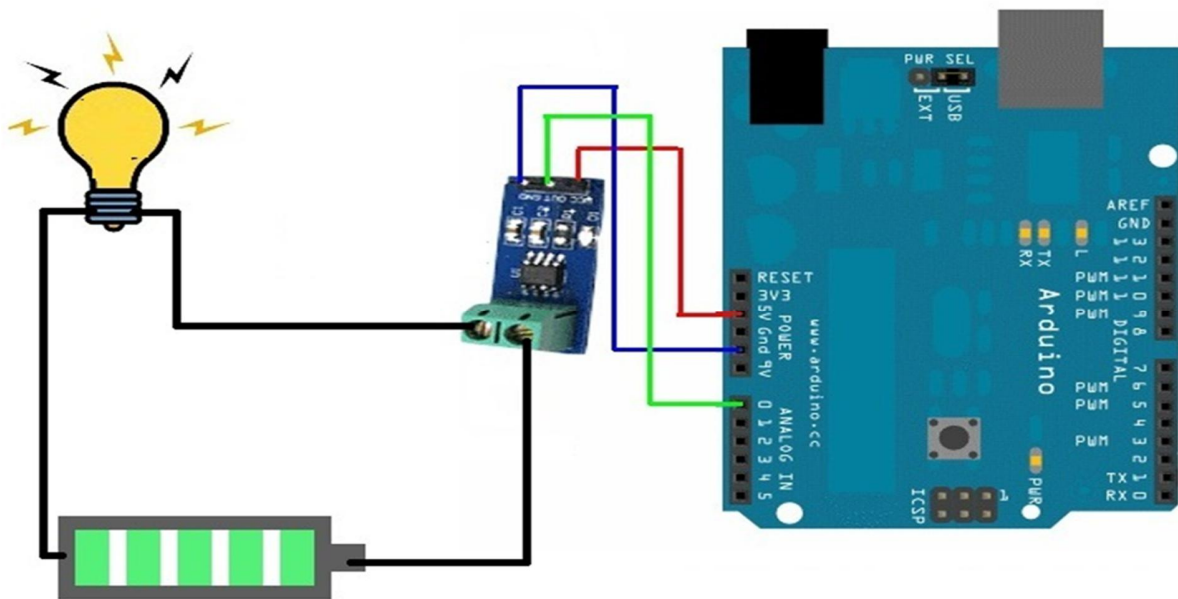


Figure III- 10 : Câblage d'arduino avec acs712.

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  Serial.println( CurrentRead());
  delay(1000);
}

float CurrentRead(){
  unsigned int x=0;
  float AcsValue=0.0,Samples=0.0,AvgAcs=0.0,AcsValueF=0.0;

  for (int x = 0; x < 150; x++){
    AcsValue = analogRead(A1);
    Samples = Samples + AcsValue;
  }
  AvgAcs=Samples/150.0;
  AcsValueF = (2.5 - (AvgAcs * (30.020 / 1024.0)) )/0.66;

  return abs(AcsValueF);
}

```

Figure III- 11 : Code du capteur de courant acs712 30 A

**e-2) Capteur de tension b25 :**

Le capteur de tension b25 est un module simple et très utile permet de mesurer la tension électrique

Paramètre :

Plage d'entrée de tension : DC0-25V

Plage de détection de tension : DC0.02445V-25V

Résolution analogique de tension : 0.00489 V

Interface d'entrée cc : terminal positif à VCC, négatif à GND

Interface de sortie : "+" se connecter à 5/3.3 V, "-" se connecter à GND, "s" se connecter à la broche AD d'arduino

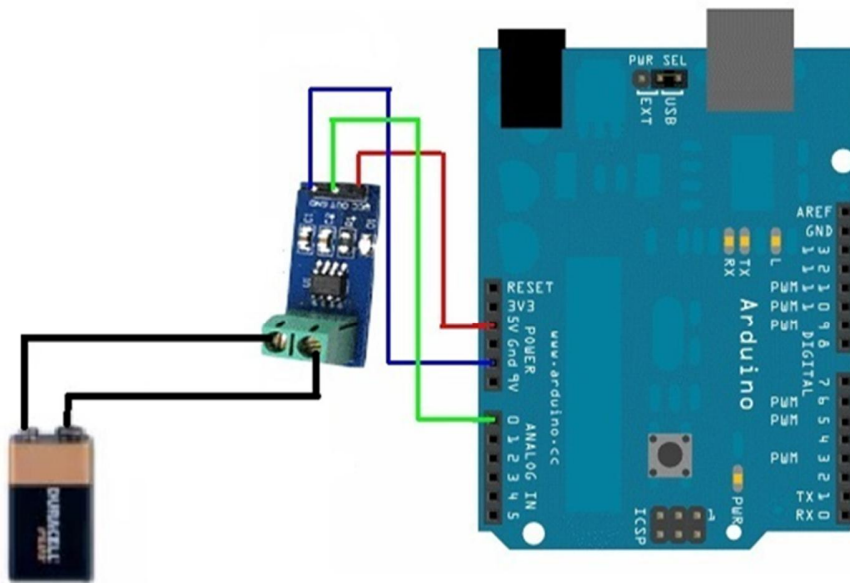


Figure III- 12 : Câblage d'arduino avec B25.

```
int offset =20;// set the correction offset value
void setup() {
  // Robojax.com voltage sensor
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // Robojax.com voltage sensor
  int volt = analogRead(A0);// read the input
  double voltage = map(volt,0,1023, 0, 2500) + offset;// map 0-1023 to 0-2500

  voltage /=100;// divide by 100 to get the decimal values
  Serial.print("Voltage: ");
  Serial.print(voltage);//print the voltage
  Serial.println("V");

  delay(500);

},
```

Figure III- 13 : Code du capteur de tension b25

### e-3) Capteur de température et d'humidité DHT11 :

Le DHT11 est un capteur avec étalonnage de signal numérique capable de fournir des informations sur la température et l'humidité. Ce capteur est classé comme un composant ayant un très bon niveau de stabilité. Capteurs de la plus haute qualité, réponse de lecture rapide et capacités anti-interférences.

Le module dht11 est un capteur de température et d'humidité qui a les paramètres suivant :

Humidité (relative %) : 20 ~ 80%

Précision (humidité) : +/- 5%

Température : 0 ~ +50°C

Précision (température) : +/- 2°C

Fréquence mesure max : 1Hz (1 mesure par seconde)

Tension d'alimentation : 3-5 volts

Stabilité à long terme : +/- 1% par an

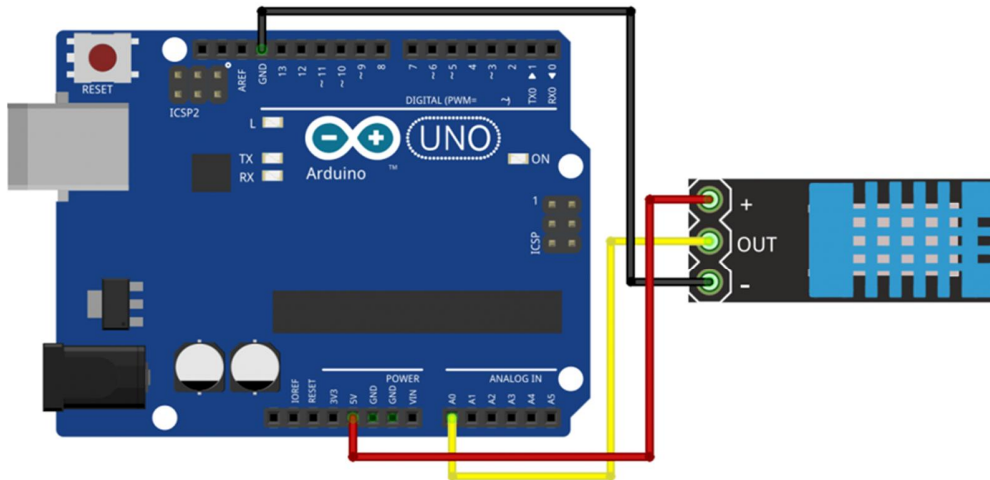


Figure III- 14 : Figure Câblage d'arduino avec DHT11.

```

#include "dht.h"
#define dht_apin A0 // Analog Pin sensor is connected to

dht DHT;

void setup(){

  Serial.begin(9600);
  delay(500); //Delay to let system boot
  Serial.println("DHT11 Humidity & temperature Sensor\n\n");
  delay(1000); //Wait before accessing Sensor

} //end "setup()"

void loop(){
  //Start of Program

  DHT.read11(dht_apin);

  Serial.print("Current humidity = ");
  Serial.print(DHT.humidity);
  Serial.print("% ");
  Serial.print("temperature = ");
  Serial.print(DHT.temperature);
  Serial.println("C ");

  delay(5000); //Wait 5 seconds before accessing sensor again.

  //Fastest should be once every two seconds.

```

Figure III- 15 : code du capteur de température dht11.

e-4) Écran LCD 16x2 i2c :

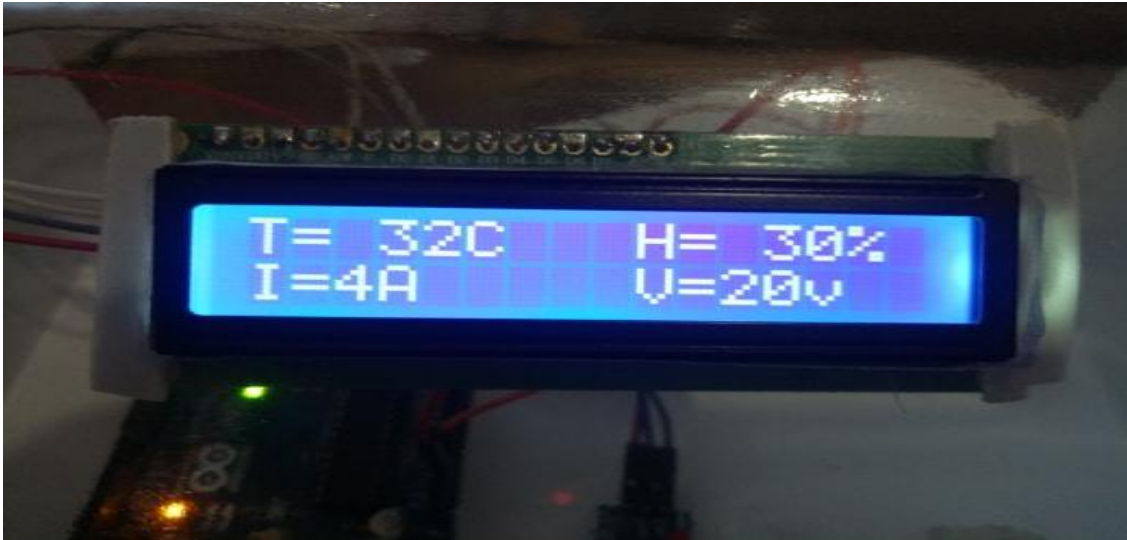


Figure III- 16 : Écran LCD 16x2 i2c.

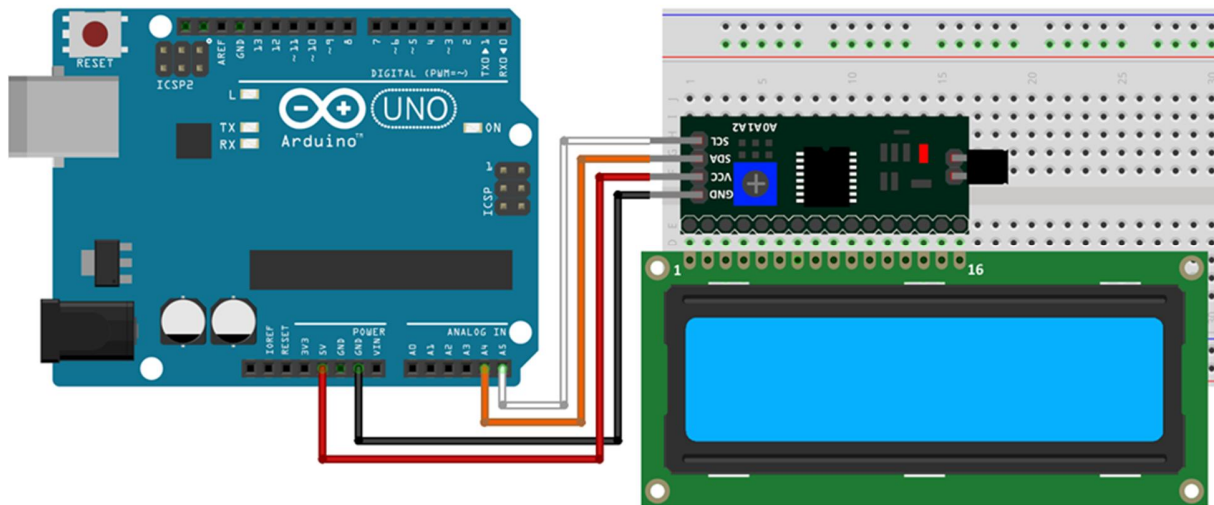


Figure III- 17 : Câblage de l'écran LCD avec la carte arduino.

```

#include "DHT.h"

#define DHTPIN 2
int offset =0;//
float in=0.0;
float out=0.0;

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

void setup() {
pinMode      (A1,INPUT);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Time,Humidity,Temperature,Voltage,Courant,");
  Serial.println("RESETTIMER"); // resets timer to 0

//Serial.println("DHTxx test!");

  dht.begin();
}

void loop() {

  dht.begin();
}

void loop() {
  delay(2000);
  int      reading=analogRead(A1);
out=in/30;
int volt = analogRead(A0);// read the input
double voltage = map(volt,0,1023, 0, 2500) + offset;// map 0-1023 to 0-2500 and add correction offset
voltage /=100;// divide by 100 to get the decimal values
  // Reading temperature or humidity takes about 250 milliseconds!
  // Sensor readings may also be up to 2 seconds 'old' (its a very slow sensor)
  float h = dht.readHumidity();
  // Read temperature as Celsius
  float t = dht.readTemperature();
  // Read temperature as Fahrenheit
  float f = dht.readTemperature(true);

  // Check if any reads failed and exit early (to try again).
  if (isnan(h) || isnan(t) || isnan(f)) {
    Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
    return;
  }

  // Compute heat index
  // Must send in temp in Fahrenheit!
  float hi = dht.computeHeatIndex(f, h);

```

Figure III- 18 : Code des trois capteurs (courant, tension, température) + code PLX-DAQ.



Figure III- 19 : système d’acquisition de données.

**f) Logiciel PLQ-DAQ**

PLX-DAQ est un logiciel permettre aux microcontrôleurs d'envoyer des données vers Excel. C'est gratuit, et ça fonctionne avec n'importe quel microcontrôleur capable de communication série, ce qui inclut bien sûr l'Arduino.

A	B	C	D	E	F	G	H	I
Time	Humidity	Température	Voltage	Courant				
15:29:45	36	25	25	0	Open PLX DAQ UI			
15:30:00	35	25	25	1,1				
15:30:16	35	25	25	1,07				
15:30:31	36	25	25	1,07				
15:30:46	35	25	25	1,07				
15:31:02	35	25	25	1,03				
15:31:17	35	25	25	1,07				
15:31:32	36	25	25	1,07				
15:31:47	36	25	25	1,13				
15:32:03	35	25	25	1,1				
15:32:18	35	25	25	1,1				
15:32:33	35	25	25	1,1				

PLX-DAQ for Excel "Version 2" by Net^Devil

**Control** v. 2.2

Download Data  
 Clear Stored Data  
 User1  
 User2

**Settings**

Port: 3  
 Baud: 9600

Reset on Connect

Sheet name to post to: Simple Data

**Controller Messages:**

Accepting data for Row 12

Figure III- 20 : exemple de transfert donné de l’ARDUINO a PLX-DAQ.



## **CHAPITRE IV**

# **EXPLOITATION EXPERIMENTALE DU BANC D'ESSAI**

## 1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats des tests réalisées avec le kit photovoltaïque conçu. Comme déjà décrit, ce kit solaire photovoltaïque est équipé d'un système de mesure et d'acquisition de données réalisé à l'aide d'une carte Arduino (UNO) équipé de différents types de capteurs. Les différents résultats obtenus sont présentés et interprétés scientifiquement dans ce qui suit.

Pour le choix de la charge à alimenter nous avons le choix entre trois systèmes : (i) une charge constante linéaire telle qu'une lampe (ou ensemble de lampes), (ii) une charge avec un mode marche-arrêt comme le réfrigérateur, ou (iii) un appareil électrique abritant un moteur électrique tel qu'un ventilateur. Pour des raisons techniques, nous avons opté pour le premier choix.

## 2. Conditions d'essais :

Pour une première expérience, nous cherchons à voir l'influence de la température et l'éclairement sur la puissance fournie par le panneau PV. Pour avoir des résultats fiables, il faut avoir des conditions climatiques propices pour différents cas des conditions climatiques (ciel, vent, température). Sur la base de ce principe, nous avons opté au choix des journées types récapitulées dans le tableau suivant :

**Tableau IV- 1** : les jours de mesures

La date	La température ambiante	Les conditions météorologiques
04/05/2019	30°C	ciel clair et pas de vent
15/04/2019	26°C	ciel clair et pas de vent
20/04/2019	20°C	ciel clair et pas de vent
10/06/2019	23°C	ciel nuageux et pas de vent
11/06/2019	23°C	ciel clair et pas de vent

**Remarque :** On a pris toutes les mesures avec un même angle d'inclinaison du panneau et durant la même période journalière.

Pour une seconde expérience, nous cherchons à faire l'étude du système de stockage. Pour ce fait, nous avons effectué une décharge complète des batteries en utilisant trois lampes LED 12 watts chacune.



Figure IV- 1 : Expérience de la décharge des batteries.

### 3. Résultats et interprétations

Après avoir lancé les différents tests nécessaires sur le dispositif expérimental, nous avons pu avoir les résultats présentés dans les différentes figures suivantes.

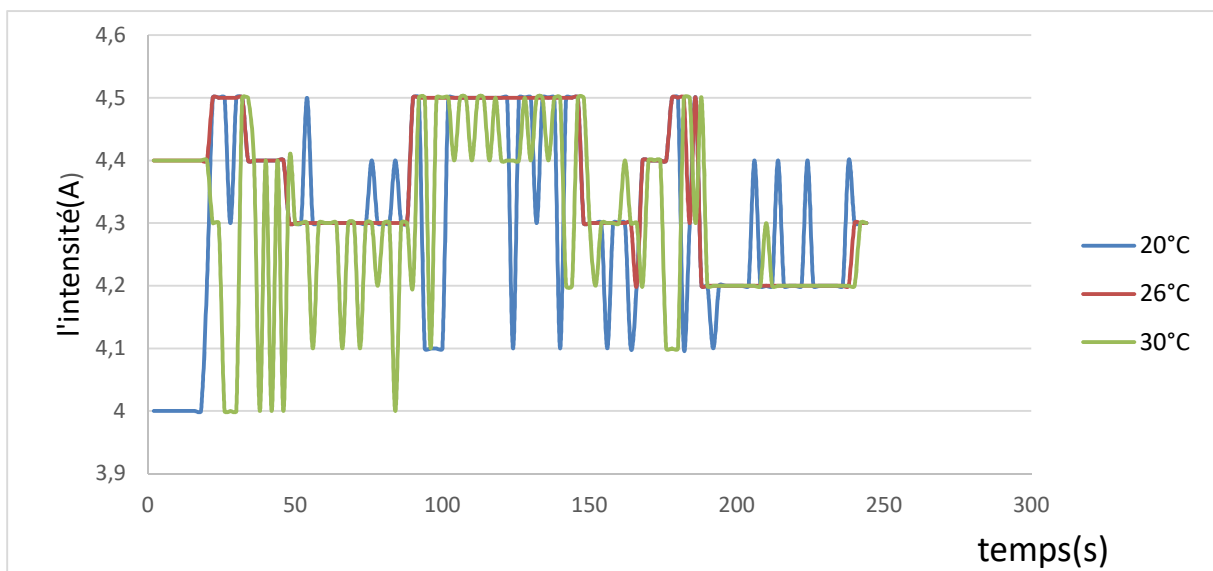


Figure IV- 2 : l'évolution de L'intensité du panneau PV en fonction du temps et de différentes températures.

Le graphique de la (Figure IV- 2) montre que l'intensité du panneau PV ne varie que très peu en fonction de la température sous un éclairage fixe, les trois essais varient entre 4 et 4,5 ampères. Nous déduisons un bon accord entre les résultats expérimentaux et ceux de la partie théorique.

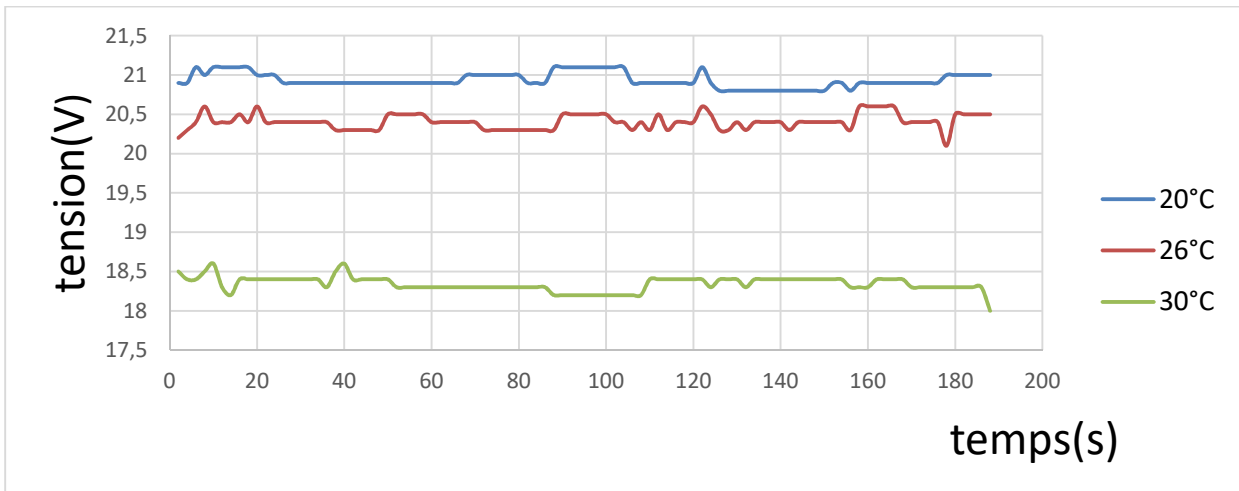


Figure IV- 3 : l'évolution de la tension du panneau photovoltaïque en fonction du temps et de différentes températures.

On observe que la tension du panneau PV baisse fortement avec l'augmentation de la température, plus la température augmente plus la tension est diminuée et vice versa.

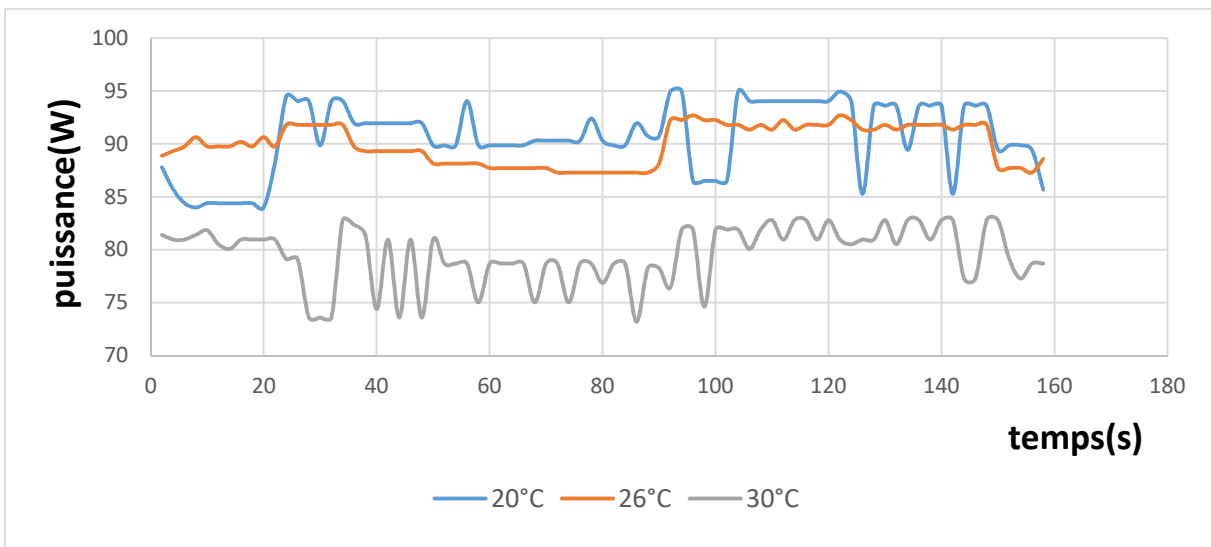


Figure IV- 4 : l'évolution de la puissance de panneau en fonction de différentes températures.

On observe qu'il y a une relation inverse entre la température et la puissance, lorsque la température augmente au-dessus du 25 degré Celsius la tension et la puissance vont diminuer, avec moins d'influence sur le courant.

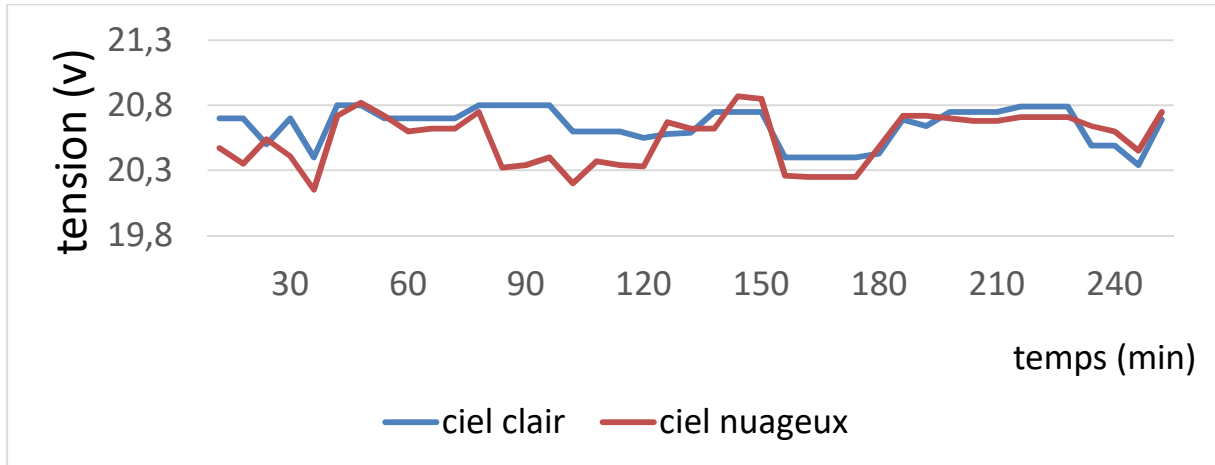


Figure IV- 5 : l'évolution de la tension du panneau PV en fonction du temps pour un éclairement différents et une température fixe.

Le graphique de la Figure (IV- 1) montre que la tension du panneau PV ne varie que très peu en fonction de l'éclairement avec une température constante (23 degré Celsius), elle varie entre 20 et 20,9 volts.

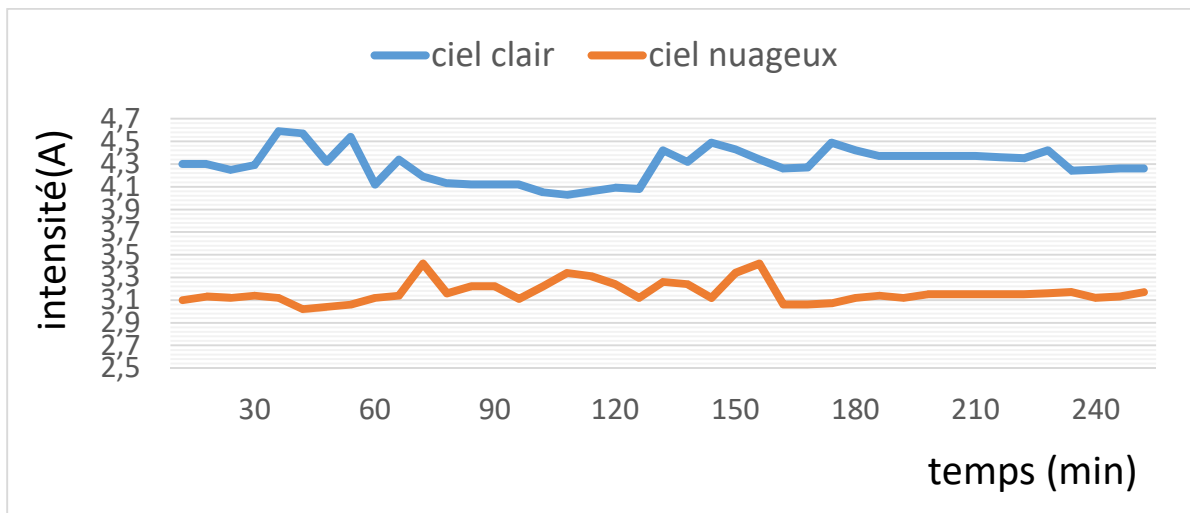


Figure IV- 6 : l'évolution de l'intensité du panneau en fonction du temps pour un éclairement différent et une température fixe.

D'après la Figure (IV- 6) on observe que le courant est directement proportionnel au rayonnement solaire, sous un ciel clair le courant fourni par le panneau PV est plus intense que le courant sous ciel nuageux.

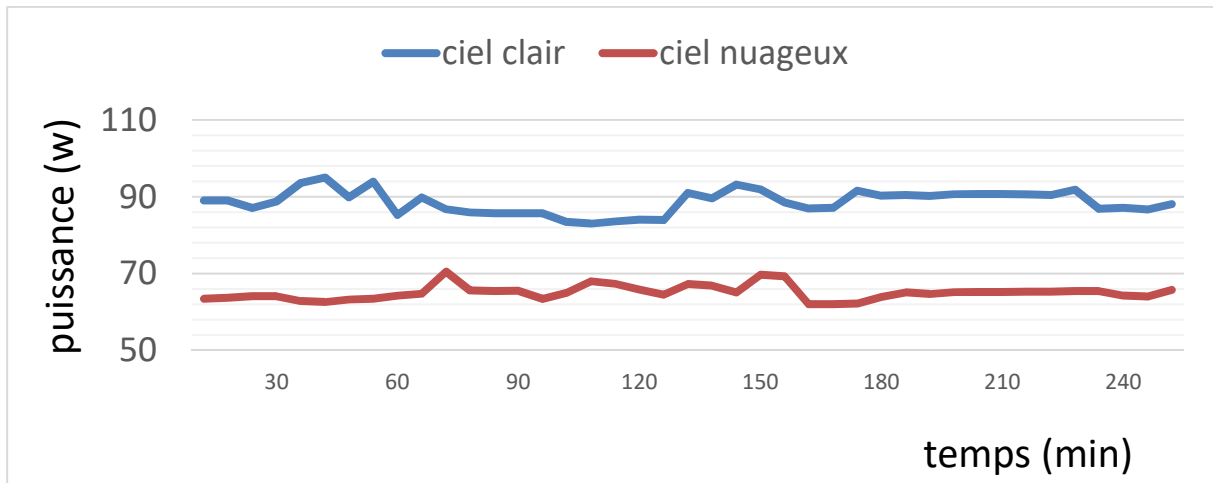


Figure IV- 7: L'évolution de la puissance en fonction de temps pour un éclairage différent et une température fixe.

La puissance fournie par le panneau photovoltaïque est aussi directement proportionnelle au rayonnement solaire, lorsque le ciel est clair la puissance fournie par le panneau est supérieure par rapport à la puissance sous un ciel nuageux.

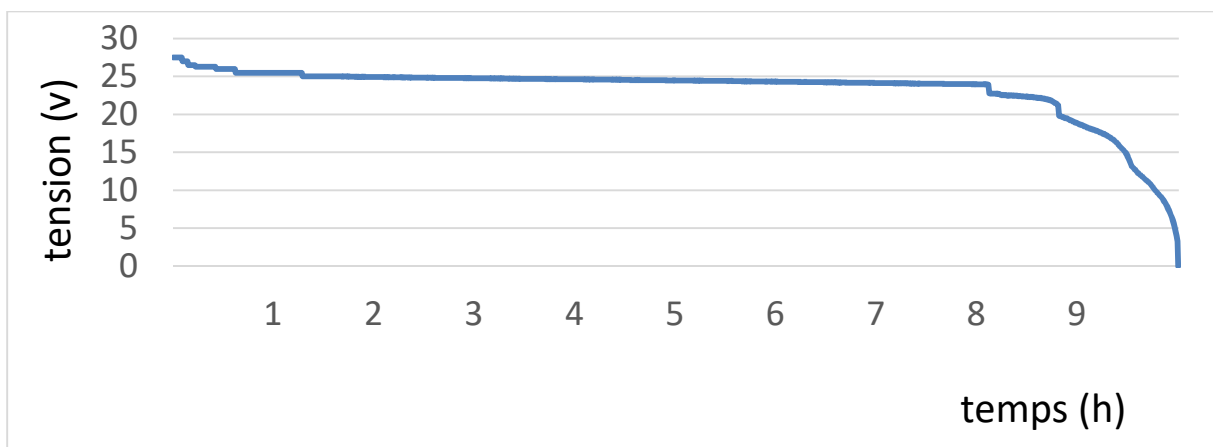


Figure IV- 8 : la variation de la tension dans le processus de décharge des batteries en fonction du temps

La Figure (IV-8) présente l'évolution de la tension dans le processus de décharge qui a duré 10 heures. On observe que la tension maximale des batteries à charge pleine (100 %) 27.5V.

Par la suite, entre un taux de charge entre 70 % et 90 %, la tension diminue légèrement dans les premières heures.

A taux de charge presque vide, la tension des batteries commencera à chuter significativement. Donc on constate que la tension dénote bien l'état de charge ou décharge d'une batterie, mais elle ne peut pas être utilisée pour donner le taux de charge exact de la batterie.

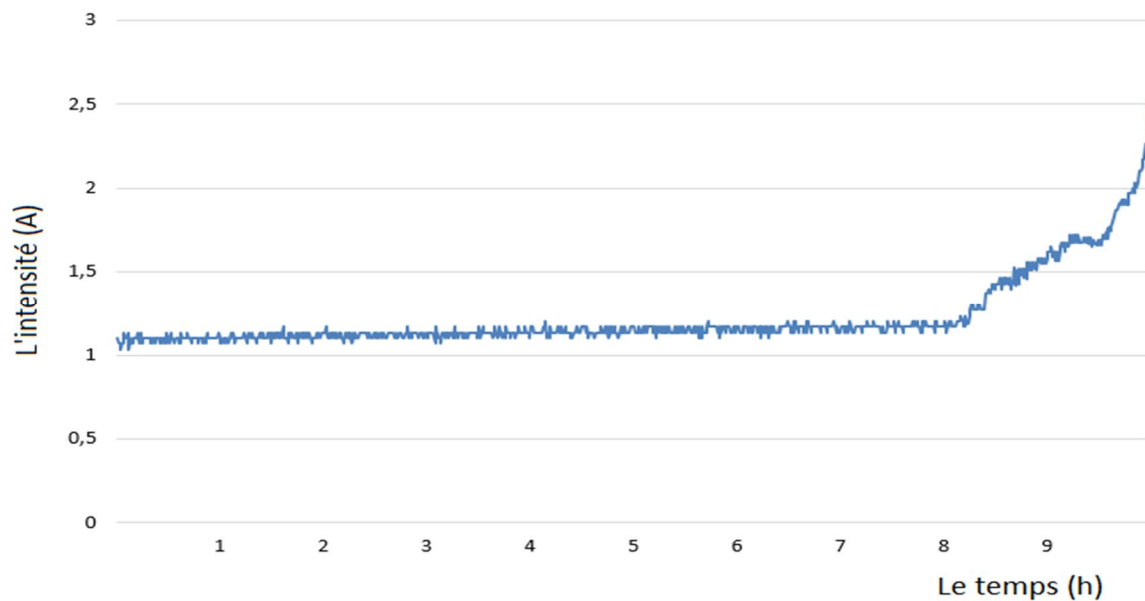


Figure IV- 9 : l'évolution de l'intensité du courant dans le processus de la décharge des batteries en fonction du temps.

À l'inverse de la tension, On remarque que la valeur du courant augmente légèrement en fonction du temps lors de la décharge des batteries. D'après ce graphique on constate que le courant d'une batterie est une bonne indication de son niveau de décharge.

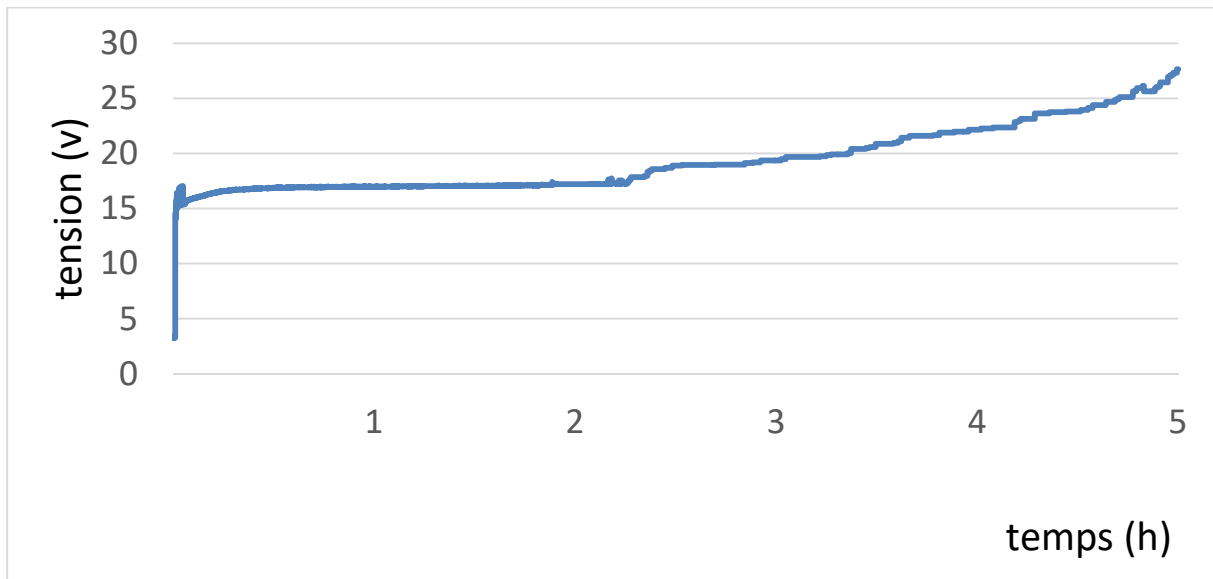


Figure IV- 10 : L'évolution de la tension dans le processus de la charge des batteries en fonction du temps.

La Figure (IV- 10) présente l'évolution de la tension dans le processus de la charge qui a duré 6 heures. Dans les dix premières minutes on observe une montée significative de la tension jusqu'à 17 volts, après ça la tension commence à augmenter légèrement jusqu'à 27,5 volts ce qui dénote la charge complète des batteries.

#### 4. Conclusion :

Les résultats obtenus, qui sont présentés et discutés dans ce chapitre montrent que l'éclairement reçu sur la surface de la cellule photovoltaïque et la température ambiante parmi les principaux facteurs qui déterminent l'énergie électrique disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque. À partir de l'analyse énergétique qui a été effectuée dans ce chapitre on peut déduire l'application désiré pour ce kit.



# Conclusion générale

### Conclusion générale :

Le travail effectué dans ce mémoire porte sur la réalisation d'un dispositif mobile de l'énergie solaire photovoltaïque équipé d'un système embarqué d'acquisition de données pour l'analyse et diagnostic du banc d'essai.

Pour le dimensionnement nous avons pris en considération les caractéristiques du panneau PV et de la batterie et aussi le régulateur de charge, ainsi que l'aspect mobile et léger du kit.

Nous avons conçu un système d'acquisition de données en temps réel basée sur une carte Arduino (UNO), connectée par les éléments suivants : capteur de température dht11, capteur de tension b25, capteur de courant acs712 et un écran LCD (16x2).

Notre objectif est donc de mesurer cinq grandeurs (la température ambiante, la tension et l'intensité du panneau et de la batterie) et les transmettre de la carte Arduino à un PC, tout cela dans le but d'évaluer les performances de ce kit solaire.

Les résultats obtenus sont très encourageant, le kit pourrait être utilisé dans plusieurs applications en courant continue et/ou en courant alternatif. En effet, durant les essais, plusieurs appareils électriques en été testés pour des autonomies différentes (éclairage DC, éclairage AC, pompe immerisible 220V/60W, ventilateur 220V/50W et un mini réfrigérateur Samsung mini bar 220V/60W).

Ces équipements ne peuvent, dans certain cas techniques, être reliés tous ensembles, car le respect du taux de décharge admissible des batteries devrait être respecté en vigueur.

En perspectives, nous souhaitons proposer des améliorations sur ce kit en gardant toujours l'aspect léger et mobile de ce dispositif.

## Reference bibliographique

- [1]. Labouret, A. and M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque. 4<sup>e</sup> edition. 2006 : Dunod.
- [2]. Bernard, R., G. Menguy, and M. Schwartz, Le rayonnement solaire : conversion thermique et applications. 1980 : Technique et documentation.
- [3]. Chassériaux, J.-M., Conversion thermique du rayonnement solaire. 1984 : Dunod.
- [4]. Chauliaguet, C., L'énergie solaire dans le bâtiment. 1977.
- [5]. Benharra, H., Impact de l'orientation sur la consommation énergétique dans le bâtiment.-Cas des zones arides et chaudes. 2016, Université Mohamed Khider-Biskra.
- [6]. Capderou, M., Atlas solaire de l'Algérie. 1988.
- [7]. B. Mamri, M.Z., "contribution de système photovoltaïque avec pompage". 2006, Mémoire d'ingénieur en électronique, Université de Constantine,.
- [8]. Labouret, A., et al., Cellules solaires-5e éd.: Les bases de l'énergie photovoltaïque. 2010: Dunod.
- [9]. Bilal, B.O., et al., Etude et Modélisation du potentiel solaire du site de Nouakchott et de Dakar.
- [10]. Duffie, J.A. and W.A. Beckman, Solar energy thermal processes. 1974, University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, Madison, WI.
- [11]. Labouret, A. and M. Viloz, Installations photovoltaïques-5e éd. : Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau. 2012 : Dunod.
- [12]. Benson, D., Le ballet des planètes : de l'élégance mathématique des orbites planétaires. 2014 : De Boeck Superieur.
- [13]. Tyson, K., Energy Efficiency and Renewable Energy. US Departement of Energy. 2004.
- [14]. Comins, N., À la découverte de l'Univers : Les bases de l'astronomie et de l'astrophysique. 2016 : De Boeck Superieur.
- [15]. Pierrard, V., L'environnement spatial de la Terre. 2010 : Presses univ. De Louvain.
- [16]. Brigand, S.J.c.t., Techniques de construction, Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque. 2008.
- [17]. Mesri-Merad, M., et al., Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques. 2012. 15(3): p. 451-463.

- [18]. [http://www.atersa.com/fr/nous-connaître/applications-energie-solaire-photovoltaïque/?fbclid=IwAR0SHmY421\\_wOqYGiPOjs7GbVd0ak5GojBAZcjdibic-SSuk4AyWVoWcBZ3o](http://www.atersa.com/fr/nous-connaître/applications-energie-solaire-photovoltaïque/?fbclid=IwAR0SHmY421_wOqYGiPOjs7GbVd0ak5GojBAZcjdibic-SSuk4AyWVoWcBZ3o).
- [19].[http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=L%27%C3%A9nergie\\_photovolta%C3%AFque&fbclid=IwAR1lrq8yFDjWz1PNvhGr-3RBDJkE1bLQNVASDmq1SN2XhAQMsvB4mwzoeIU](http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=L%27%C3%A9nergie_photovolta%C3%AFque&fbclid=IwAR1lrq8yFDjWz1PNvhGr-3RBDJkE1bLQNVASDmq1SN2XhAQMsvB4mwzoeIU).
- [20]. Helali, K., Modélisation d'une cellule photovoltaïque: Etude comparative. 2012, Université Mouloud Mammeri.
- [21]. [http://www.condor.dz/fr/les-panneaux-solaires?fbclid=IwAR37Dgyn7w-eHwuytBdXhpo0V8c8J-HYpodKINUtW\\_7n-rmXF2\\_C-OWOSeI](http://www.condor.dz/fr/les-panneaux-solaires?fbclid=IwAR37Dgyn7w-eHwuytBdXhpo0V8c8J-HYpodKINUtW_7n-rmXF2_C-OWOSeI)
- [22]. Vighetti, S., Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion. 2010, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [23]. Mayfield, R., Photovoltaic design & installation for dummies. 2019 : For Dummies.
- [24]. Naim, H., Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique. 2015, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [25]. Labbé, J., L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés. 2006, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [26]. Linden, D. and T.B. Reddy, Handbook of batteries. 2002 : McGraw-Hill Professional.
- [27]. Théodore , W., Electrotechnique 2. Édition ESKA ed. 1991, presses de l'Université de Laval.
- [28]. Belarbi, M., "Modélisation et Simulation d'un Système de pompage photovoltaïque". 2006, Mémoire de magister en électronique Université des sciences et de la technologie d'oran.
- [29]. <http://www.photovoltaïque.guidenr.fr/cours-photovoltaïque-autonome-1/calculer-section-cable.php>
- [30].[http://www.zaapii.com/zaapii/product/details.jsp?curren=1&la=2&person\\_id=0&session=1F46278840DE4B3F66645351B8BC5F16&type=detail&menu2\\_id=13&product\\_id=1532&product\\_type\\_id=14&brand\\_id=34](http://www.zaapii.com/zaapii/product/details.jsp?curren=1&la=2&person_id=0&session=1F46278840DE4B3F66645351B8BC5F16&type=detail&menu2_id=13&product_id=1532&product_type_id=14&brand_id=34) .
- [31]. [https://www.ecolodis-solaire.com/conseils/cablage-et-securite-d-une-installation-photovoltaïque-en-site-isole-cablage-en-serie-et-cablage-en-parallele-47?fbclid=IwAR0bBoTZD8j7ZPCP5htPDbr5qcMb4zu8uUnL9RLCQ-SYIbsTi\\_h-3y01kIU](https://www.ecolodis-solaire.com/conseils/cablage-et-securite-d-une-installation-photovoltaïque-en-site-isole-cablage-en-serie-et-cablage-en-parallele-47?fbclid=IwAR0bBoTZD8j7ZPCP5htPDbr5qcMb4zu8uUnL9RLCQ-SYIbsTi_h-3y01kIU)

- [32]. <https://www.gralon.net/articles/maison-et-jardin/bricolage/article-le-disjoncteur-differentiel---comment-ca-marche--3635.htm>.
- [33]. [https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-fusible-10701/?fbclid=IwAR0\\_qmM7JiS7shpYVI5C-nSliKa\\_8BSpMbMz7W-K9V9wczXLKEfPV22AZEs](https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-fusible-10701/?fbclid=IwAR0_qmM7JiS7shpYVI5C-nSliKa_8BSpMbMz7W-K9V9wczXLKEfPV22AZEs)
- [34]. <https://installation-electrique.ooreka.fr/comprendre/parafoudre>.
- [35]. <https://www.sketchup.com/>
- [36]. <https://www.arduino.cc/>.