

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE  
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE DE BLIDA 1**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie mécanique  
Spécialité Installation énergétique et Turbomachines

## **Étude et dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome**

**Promoteur :**

NCB. BENSEDIRA Sidali

**CO-Promoteur :**

Ing. SOUILAMAS Nesrine

**Réalisé par :**

MESSAOUD Ilyes

FARDJALLAH

Mohamed ouail

LAIDI Abdelouahed

**Promotion : 2022/2023**

## ***R**emerciements*

En tout premier lieu, on remercie le Dieu, tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre promoteur **BENSEDIRA SIDALI**, Ses remarques pertinentes, pour sa patience, Il nous a laissé progressivement de plus en plus de liberté pour que nous pouvons avoir la possibilité de développer et mettre en œuvre nous propres idées.

Nos sincères remerciements et notre plus grande reconnaissance à notre encadreur Madame **SOUILAMAS NESRINE**, Votre gentillesse votre modeste et vos qualités humaines n'ont rien d'égales que votre compétence qui mérite toute admiration.

Nos remerciements vont aussi à ceux qui nous avons fait l'honneur de juger notre travail les membres du jury.

Nous tenons aussi à remercier les responsables et tout le personnel du département de Mécanique de l'Université SAAD DAHLEB Blida a nous avoirs facilités la tâche et accordés pour terminer notre travail. Sans oublier de remercier l'Ecole Technique de Sonelgaz à Blida qui nous ont accordé notre stage et les ingénieurs qui nous ont formés grâce à leur expérience

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui nous ont contribués de près ou de loin, directement. Ou indirectement à l'aboutissement de ce travail.

## ***Dédicace***

Je dédie ce modeste travail à :

La mémoire de mon père qui restera gravée dans mon cœur, je ne t'oublierai jamais «reposes en paix».

À ma très chère mère, ma profonde gratitude et mon incontestable reconnaissance, pour tous les sacrifices que vous me contentez, toute la confiance que vous m'accordez et tout l'amour dont vous m'entourez.

À mon frère MOHAMED, et mes sœurs pour leurs soutiens et leurs amours, A toute ma famille, et mes amis.

A tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de citer, A mes très chère camarades OUAIL et ABELOUAHED. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

***MESSAOUD Ilyes***

## ***Dédicace***

Je souhaite dédier ce modeste travail, synonyme de concrétisation de tous mes efforts fournis  
ces dernières années d'études:

A ma mère, symbole d'affection de bienveillance, de bonté, pour sa patience, son sacrifice,  
sa conscience, dont les conseils ont éclairé mon chemin.

A mon père, pour tout ce qu'il a fait pour moi dans sa vie, pour son soutien moral, ses  
encouragements constants et sa compréhension.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds  
sentiments envers eux.

A toute ma famille,

A mon trinôme ILYES et OUAIL pour leur patience et disponibilité

Et mes chers amis qui m'ont encouragé depuis le début.

***Laidi Abdelouahed***

## ***Dédicace***

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes chers frères HAMZA et YAKOUB pour leur appui et leur encouragement.

A ma chère sœur pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

À mes meilleurs collègues ABDELOUAHED et ILYES pour leur discipline et disponibilité.

Spécial dédicace a mon meilleur amis SAMY.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infallible.

Merci d'être toujours là pour moi.

***Fardjallah Mohamed Ouail***

## Nomenclature:

**F:** La densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère

**$\dot{F}$ :** Le rayonnement solaire incident moyen sur la surface totale

**I:** Le rayonnement direct

**H:** Hauteur du soleil

**$\delta$ :** La déclinaison

**$\omega$ :** L'angle horaire en degré

**TSV:** temps solaire vrai

**$\alpha$ :** L'azimut du soleil

**P:** La puissance fournie par la cellule

**I:** Le courant

**U:** La tension

**ICC:** Le courant de court-circuit note

**IMPP:** La tension à vide notée  $U_{co}$  - Le courant de puissance maximale

**UMPP:** La tension de puissance maximale notée

**P<sub>C</sub>:** Puissance crête du générateur PV [Wc]

**$\eta_{\square\square s}$ :** Rendement du système

**E<sub>i</sub>:** Heures d'ensoleillement maximal [h/jour]

**E<sub>c</sub>:** Energie totale de la charge [Wh/j]

**P<sub>N</sub>:** Puissance nominale de l'onduleur

**N :** Nombre de panneaux photovoltaïques

**P<sub>u</sub>:** Puissance unitaire [Wc]

**$I_{max Ré}$ :** Le courant maximal régulateur

**$V_{max Ré}$ :** Le voltage maximum de régulateur

**C:** Capacité de la batterie [Ah]

**$N_{jours d'autonom}$ :** Nombre de jours d'autonomie en Blida

**DOD:** Profondeur de décharge

**$V_{Batterie}$ :** Tension du système [V] [selon la puissance de l'onduleur]

**G:** Rayonnement globale

**B:** Rayonnement direct

**D:** Rayonnement diffus

## Nomenclature

---

**n:** L'indice de réfraction

**c:** La vitesse de la lumière

**v:** La vitesse de la lumière dans le matériau

## Liste des figures :

### Chapitre I :

<b>Figure (I-1) :</b> Analyse spectrale du rayonnement solaire .....	4
<b>Figure (I.2) :</b> Le phénomène de la réflexion .....	6
<b>Figure (I.3) :</b> Le phénomène de la diffusion .....	6
<b>Figure (I.4) :</b> Le phénomène de l'absorption .....	7
<b>Figure (I.5) :</b> Composantes du rayonnement solaire au sol .....	9
<b>Figure (I.6) :</b> Spectromètre SOSP .....	9
<b>Figure (I.7) :</b> Spectres du soleil entre 1 et 2400 nm .....	10
<b>Figure (I.8) :</b> Spectres du soleil entre 300 et 850 .....	10
<b>Figure (I.9) :</b> Spectromètre DOAN .....	10
<b>Figure (I.10) :</b> Pyranomètre .....	11
<b>Figure (I.11) :</b> Variation du lever au coucher du soleil dans le domaine ultraviolet .....	11
<b>Figure (I.12) :</b> Variation du lever au coucher du soleil dans le domaine 300 à 3000 nm .....	11
<b>Figure (I.13) :</b> Une synthèse des mesures effectuées au cours du mois de mars 2001 .....	12
<b>Figure (I.14) :</b> Processus de télédétection .....	13
<b>Figure (I.15) :</b> Coordonnées géographiques .....	14
<b>Figure (I.16) :</b> Coordonnées horizontales .....	15
<b>Figure (I.17) :</b> Cristal de silicium .....	16
<b>Figure (I.18) :</b> Semi-conducteur (silicium) .....	16
<b>Figure (I.19) :</b> Dopage de semi-conducteur de type N .....	17
<b>Figure (I.20) :</b> Dopage de semi-conducteur de type P .....	17
<b>Figure (I.21) :</b> La jonction P-N .....	18
<b>Figure (I.22) :</b> L'effet photovoltaïque .....	19
<b>Figure (I.23) :</b> Cellules cristallines .....	19
<b>Figure (I.24) :</b> La silice .....	20
<b>Figure (I.25) :</b> La fabrication des cellules photovoltaïques .....	21
<b>Figure (I.26) :</b> Le silicium polycristallin .....	22
<b>Figure (I.27) :</b> La méthode de Czochralski .....	23
<b>Figure (I.28) :</b> Obtention des wafers photovoltaïques .....	24
<b>Figure (I.29) :</b> Résumé des étapes de fabrication des cellules cristallines (monocristallines et polycristallines)	

<b>Figure (I.30) :</b> Un modèle PV a couche mince de 365W .....	26
<b>Figure (I.31) :</b> Panneau Photovoltaïque a couche minces .....	26
<b>Figure (I.32) :</b> Silicium amorphe en couche minces .....	26
<b>Chapitre II :</b>	
<b>Figure (II.1) :</b> Système connecté au réseau .....	30
<b>Figure (II.2) :</b> Système solaire hybride .....	31
<b>Figure (II.3) :</b> Systèmes autonome avec stockage .....	32
<b>Figure (II.4) :</b> La composition du panneau solaire .....	33
<b>Figure (II.5) :</b> Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ).....	34
<b>Figure (II.6) :</b> Tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ).....	35
<b>Figure (II.7) :</b> Branchement des modules en série.....	35
<b>Figure (II.8) :</b> Branchement des modules en parallèle.....	36
<b>Figure (II.9) :</b> Coupe d'un module photovoltaïque .....	37
<b>Figure (II.10) :</b> Exemple de Batteries .....	39
<b>Figure (II.11) :</b> l'évolution de la tension.....	40
<b>Figure (II.12) :</b> Batterie au plomb.....	42
<b>Figure (II.13) :</b> Batterie ouverte.....	42
<b>Figure (II.14) :</b> Batterie AGM .....	43
<b>Figure (II.15) :</b> Technologie GEL.....	43
<b>Figure (II.16) :</b> Batterie au Li-ion.....	44
<b>Figure (II.17) :</b> déplacement de l'électrode .....	45
<b>Figure (II.18) :</b> Régulateur Solaire.....	45
<b>Figure (II.19) :</b> Régulateur de charge de batterie.....	46
<b>Figure (II.20) :</b> Les Régulateurs séries.....	46
<b>Figure (II.21) :</b> Régulateur shunt .....	47
<b>Figure (II.22) :</b> Rôle de l'onduleur .....	47
<b>Figure (II.23) :</b> Les boîtiers de raccordements .....	49
<b>Figure (II.24) :</b> Dispositions de boîtier de raccordement .....	50
<b>Chapitre III:</b>	
<b>Figure (III.1):</b> Répartition de la charge dans la journée.....	53
<b>Figure (III.2) :</b> Logiciel PVSYST.....	58
<b>Figure (III.3) :</b> Désignation du projet dans PVSYST .....	59
<b>Figure (III.4) :</b> Détermination des besoins électriques .....	60
<b>Figure (III.5) :</b> Distribution horaire de la charge.....	61

<b>Figure (III.6) : Dimensionnement du parc de batteries .....</b>	<b>62</b>
<b>Figure (III.7) : Dimensionnement du champ PV .....</b>	<b>63</b>
<b>Figure (III.8) : Dimensionnement du convertisseur .....</b>	<b>64</b>
<b>Figure (III.9) : Orientation des panneaux .....</b>	<b>65</b>
<b>Figure (III.10) : Lancement de La simulation.....</b>	<b>66</b>
<b>Chapitre IV :</b>	
<b>Figure (IV.1) : Rapport du résumé des résultats .....</b>	<b>68</b>
<b>Figure (IV.2) : Le rapport des paramètres généraux .....</b>	<b>70</b>
<b>Figure (IV.3) : Rapport sur les besoins énergétiques de l'utilisateur.....</b>	<b>71</b>
<b>Figure (IV.4) : Rapport des résultats principaux.....</b>	<b>72</b>
<b>Figure (IV.5) : Diagramme des pertes.....</b>	<b>74</b>
<b>Figure (IV.6) : Diagramme d'entrée/sortie journalière .....</b>	<b>75</b>

## Liste des Tableaux :

### CHAPITRE I :

**Tableau (I.1) :** Absorption optique de quelques matériaux semi-conducteur ..... 18

**Tableau (I.2) :** Comparatif des différentes technologies photovoltaïques ..... 27

### CHAPITRE II :

**Tableau (II.1) :** Modules reliés en série.....36

**Tableau (II.2) :** Modules reliés en parallèle.....37

**Tableau (II.3) :** Les différentes caractéristiques des batteries courantes.....41

**Tableau (II.4) :** Les différents types d'onduleurs photovoltaïques ..... 48

### CHAPITRE III :

**Tableau (III.1) :** Le bilan énergétique de foyer ..... 52

## Résume :

Le système photovoltaïque est un dispositif qui transforme l'énergie solaire en électricité par des cellules solaires et le principe des cellules solaires est l'utilisation de matériaux semi-conducteurs. Le système PV et son application est un projet de recherche approfondi, face au 21e siècle, qui rassemble l'utilisation de l'énergie verte renouvelable, améliore l'environnement écologique, améliore les conditions de vie des gens car l'ensemble intégral sera de grands avantages pour l'économie, la politique, couplé avec la société, et contient également une riche valeur d'études universitaires et les questions théoriques de base. Ce mémoire expose le champ solaire et la conversion photovoltaïque, aborde les différentes technologies des systèmes photovoltaïques et leurs composantes, et le dimensionnement d'un foyer situé à l'école technique de SONELGAZ Blida.

## Summary :

The photovoltaic system is a device that transforms solar energy into electricity through solar cells and the principle of solar cells is the use of semiconductor materials. The PV system and its application is an in-depth research project, facing the 21st century, that brings together the use of renewable green energy, improves the ecological environment, improves people's living conditions because the entire package will be great benefits for economics, politics, coupled with society, and also contains a rich value of university studies and basic theoretical issues. This thesis exposes the solar field and photovoltaic conversion, discusses the different technologies of photovoltaic systems and their components, and the sizing of a little store located at the SONELGAZ Blida technical school.

## ملخص:

النظام الكهروضوئي هو جهاز يحول الطاقة الشمسية إلى كهرباء بواسطة الخلايا الشمسية ومبدأ الخلايا الشمسية هو استخدام مواد أشباه الموصلات. نظام الكهروضوئية وتطبيقه هو مشروع بحثي شامل ، يواجه القرن الحادي والعشرين ، والذي يجمع استخدام الطاقة الخضراء المتجددة ، ويحسن البيئة، ويحسن الظروف المعيشية للناس لأنه سيكون ذا فائدة كبيرة للاقتصاد والسياسة ، إلى جانب المجتمع ، وكذلك قيمة الدراسة الأكاديمية الغنية والقضايا النظرية الأساسية. تكشف هذه المذكرة المجال الشمسي والتحويل الكهروضوئي، وتقترب من التقنيات المختلفة لأنظمة الكهروضوئية ومكوناتها ، وأبعاد المتجر الموجود في المدرسة التقنية لسونلغاز المتواجدة في البلدة

## Tableau des matières :

Remerciements.....	
Dédicaces .....	
Nomenclature .....	
Listes des figures .....	
Liste des tableaux.....	
Résumé.....	
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Gisement solaire et la conversion photovoltaïques :	
I.1.Introduction.....	3
I.2. Le rayonnement solaire .....	3
I.3. La Constante Solaire .....	4
I.4. Effets du rayonnement solaire sur les matériaux .....	5
I.4.1. La réflexion .....	5
I.4.2. L'indice de réfraction.....	6
I.4.3. L'absorption .....	6
I.5. Composantes du rayonnement solaire au sol.....	7
I.6. Mesure du rayonnement solaire .....	9
I.6.1. Mesure au sol.....	9
I.6.2. Mesure par satellite .....	12
I.6.3. Coordonnées géographiques d'un site .....	13
I.6.3.1. Coordonnées terrestres.....	13
I.6.3.2. Coordonnées équatoriales .....	14
I.6.3.3. Coordonnées horizontales .....	15
I.7. Conversion photovoltaïque .....	15
I.7.1. Semi-conducteur .....	16
I.7.2. Le dopage de semi-conducteur .....	16
I.7.3. La Jonction PN .....	18
I.8. L'effet photovoltaïque .....	18

I.9.	Les différentes technologies photovoltaïques .....	19
I.9.1.	Les cellules cristallines .....	19
I.9.2.	Les cellules monocristalline .....	20
I.9.3.	Les cellules poly cristallines.....	20
I.9.4.	Les étapes de fabrication de cellule .....	20
I.9.4.1.	La silice : matière première d'une cellule photovoltaïque .....	20
I.9.4.2.	Extraction purification du silicium photovoltaïque .....	21
I.9.4.3.	Obtention des lingots de silicium .....	21
I.9.4.4.	Obtention des wafers photovoltaïques.....	23
I.9.4.5.	Dopage du silicium.....	24
I.9.5.	couches minces .....	26
I.9.6.	Comparatif des différentes technologies photovoltaïques .....	27
I.10.	Conclusion .....	28
Chapitre II : Différents systèmes et composants photovoltaïques:		
II.1.	Introduction .....	29
II.2.	Configuration des installations solaires photovoltaïques .....	29
II.2.1.	Alimentation direct .....	29
II.2.2.	Système connecté au réseau .....	29
II.2.3.	Systèmes hybride.....	30
II.2.4.	Systèmes autonome avec stockage.....	31
II.3.	Les différents composants photovoltaïques .....	32
II.3.1.	Panneau photovoltaïques .....	33
II.3.2.	La cellule photovoltaïques .....	34
II.3.3.	Raccordement des modules photovoltaïques .....	35
II.3.3.1.	Introduction.....	35
II.3.4.	Constitution d'un module photovoltaïque.....	37
II.3.5.	Batterie Solaire .....	38
II.3.5.1.	Définition.....	38
II.3.5.2.	Constitution d'une batterie .....	39
II.3.5.3.	Caractéristiques d'une batterie solaire .....	39
II.3.5.4.	schéma d'évolution de la tension et du courant avec le temps .....	41
II.3.6.	Régulateur Solaire .....	45
II.3.6.1.	Définition.....	45

II.3.6.2. Schéma d'installation solaire.....	46
II.3.6.3. Principe de fonctionnement.....	46
II.3.7. L'onduleur Solaire.....	47
II.3.7.1. Définition.....	47
II.3.7.2. Rôle de l'onduleur.....	47
II.3.7.3. Les différents types d'onduleurs photovoltaïques.....	48
II.3.8. Les boîtiers de raccordements.....	49
II.3.8.1. String monitor.....	49
II.4. Conclusion.....	50
Chapitre III : Dimensionnement de l'installation photovoltaïque:	
III.1. Introduction.....	51
III.2. Les étapes de dimensionnement.....	51
III.2.1. Description du local.....	51
III.2.2. Relevé des données météorologiques.....	52
III.2.3. Bilan énergétique.....	52
III.2.4. Calcul de la puissance crête.....	53
III.2.5. Choix de l'onduleur.....	54
III.2.6. Choix du panneau et Nombre utilise dans un seul champ.....	55
III.2.7. Choix de régulateur solaire utilise dans un seul champ.....	56
III.2.8. choix de batteries solaire utilise dans un seul champ.....	57
III.3. Présentation du logiciel PVSYST.....	58
III.4. Les étapes de dimensionnement avec logiciel PVSYST.....	59
III.5. Conclusion.....	67
Chapitre IV : Résultats et discussion:	
IV.1. Introduction.....	68
IV.2. Le rapport de la simulation et interprétation des résultats.....	68
IV.3. Analyse et discussion.....	75
IV.4. Suggestions.....	76
IV.5. Conclusion.....	76
Conclusion générale.....	77
Bibliographie.....	

## *Introduction générale :*

L'énergie est la base de toute activité humaine. De nos jours, une grande partie de la demande mondiale en énergie est assurée à partir de ressources fossiles. Cependant, les réserves de combustibles fossiles sont limitées. En effet, la croissance de la demande énergétique mondiale, l'épuisement inévitable des ressources fossiles et le réchauffement Climatique causé par l'émission des gaz à effet de serre imposent le recours aux énergies propres. Certains pays développés se sont orientés vers l'énergie nucléaire qui présente des risques d'accidents graves. C'est pourquoi on s'intéresse actuellement aux énergies renouvelables. L'énergie solaire photovoltaïque constitue une alternative que beaucoup de pays envisagent à l'horizon 2030.

C'est une énergie électrique produite au moyen de panneaux solaires qui permettent de convertir une partie du rayonnement solaire. L'électricité ainsi produite peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution. Une installation solaire photovoltaïque peut être implantée sur tous les types de bâtiment : maison individuelle, bâtiment d'habitation, etc.

Avant, L'énergie solaire photovoltaïque était limité aux applications rurales pour l'alimentation des sites isolés en électricité comme cela a été le cas en Algérie. Mais depuis quelques années, le solaire photovoltaïque a fait son entrée dans les agglomérations, ce qui a pour effet l'augmentation sensible de la demande en modules photovoltaïques.

Afin de mieux exploiter cette énergie, il est nécessaire de connaître la distribution de l'irradiation solaire sur le lieu de l'implantation prévu pour l'installation photovoltaïque, pour différentes orientations et inclinaisons.

Pour ce faire, nous avons effectué un stage au niveau de l'Ecole Technique de Blida. Ce stage nous a permis de parfaire nos connaissances dans le domaine du photovoltaïque et de constater que l'Ecole Technique de Blida a comme projet de réaliser une installation solaire photovoltaïque autonome pour alimenter le foyer, là où les stagiaires et séminaristes prennent leurs pauses café, c'est une installation qui va servir également comme support pédagogique où des travaux pratiques seront dispensés afin de joindre l'utile à l'agréable, nous avons profité de ce projet pour pouvoir à travers notre mémoire les aider dans la partie étude et dimensionnement de cette installation.

Notre mémoire est structuré comme suit : [1]

- Chapitre I : Le gisement solaire et la conversion photovoltaïques.

La source qui intéresse notre étude est le soleil. Depuis la découverte du français Edmande Becquerel en 1839, les avancées technologiques en énergie photovoltaïque ont permis la réalisation de panneaux solaire producteurs d'électricité.

- Chapitre II : Les différents systèmes et composants photovoltaïques.

Ce présent chapitre a pour but la représentation des différents systèmes photovoltaïques ainsi les composants photovoltaïques qui assureront le contrôle et la gestion du fonctionnement des installations photovoltaïques

- Chapitre III : Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque du local.

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

- Chapitre IV : Résultats et discussions.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation de l'étude d'une installation photovoltaïque autonome à l'aide du logiciel PVSYST 7.2, conçu pour ce type d'étude.

Pour la simulation de notre projet d'étude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome, nous avons choisi le site de Blida où se situe le foyer de l'Ecole Technique de Blida.

---

***Chapitre I : Gisement solaire et la conversion photovoltaïques.***

---

## **I.1. Introduction :**

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 15000 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre ( $Kwc/m^2$ ) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que ne consomme l'humanité en une année.

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et de chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre. Malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité considérable arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur  $1000 W/m^2$  dans les zones tempérées et jusqu'à  $1400 W/m^2$  lorsque l'atmosphère est faiblement chargée en poussière ou en eau. Le flux solaire reçu au niveau du sol terrestre dépend de plusieurs paramètres : [1]

- L'orientation et l'inclinaison.
- La latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude.
- La période de l'année.
- L'instant considéré dans la journée.
- La nature des couches nuageuses.

## **I.2. Le rayonnement solaire :**

Le soleil exerce sur notre planète une action vitale, véritable source de vie, bien qu'il soit le centre du système qui porte son nom (système solaire auquel la terre appartient). Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre  $150.10^6$  Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante  $180.10^6$  GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie. Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de  $0.22$  à  $10 \mu m$ , l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit: [2]

- 9 % dans la bande des ultraviolets (< à 0.4μm).
- 47 % dans la bande visibles (0.4 à 0.8 μm).
- 44 % dans la bande des infrarouges (> à 0.8μm).

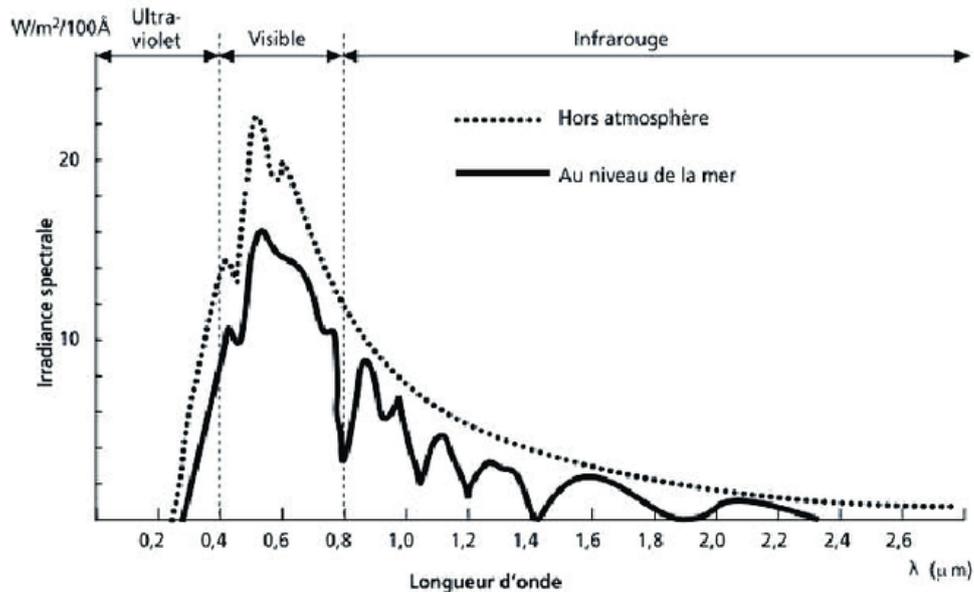


Figure (I-1) : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

### I.3. La Constante Solaire :

La constante solaire, aussi appelée irradiance solaire totale, exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait pendant une seconde (soit la puissance) une surface de 1 m<sup>2</sup> située à une distance d'une unité astronomique (distance moyenne Terre-Soleil), exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence d'atmosphère. Pour la Terre, c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère.

Elle s'exprime en watts par mètre carré (W/m<sup>2</sup> ou W m<sup>-2</sup>).

Pour la Terre (hors atmosphère), elle vaut :

$$F = (1360,8 \pm 0,5) \text{ W.m}^{-2} \quad (\text{I.1})$$

Cette énergie est dissipée sur l'ensemble de la surface terrestre, qui, si elle est modélisée par une sphère, a une aire qui vaut quatre fois l'aire de la surface d'incidence, laquelle est un disque de même rayon.

Le rayonnement solaire incident moyen sur la surface totale est donc :

$$\dot{F} = F/4 \approx 340 \text{ W.m}^{-2} \quad (\text{I.2})$$

#### **I.4. Effets du rayonnement solaire sur les matériaux :**

Les cellules photovoltaïques fonctionnent au mieux à des températures (entre -10 et +85 degrés Celsius), L'augmentation de la température de la cellule photovoltaïque affecte négativement la différence de tension dans la cellule, et donc réduit l'énergie électrique produite par le système.

De plus, la température élevée du groupe de batteries pour stocker l'énergie produite par les cellules du système ou s'il est inférieur à la limite autorisée, cela affecte négativement le fonctionnement des batteries en y stockant de l'énergie, il doit donc être modérée selon les spécifications techniques du système avant la charge et lors de la décharge. Pour ce qui est de pour l'onduleur et les appareils électroniques, il existe un système de refroidissement spécial pour maintenir la stabilité des températures est conforme aux spécifications.

##### **I.4.1. La réflexion :**

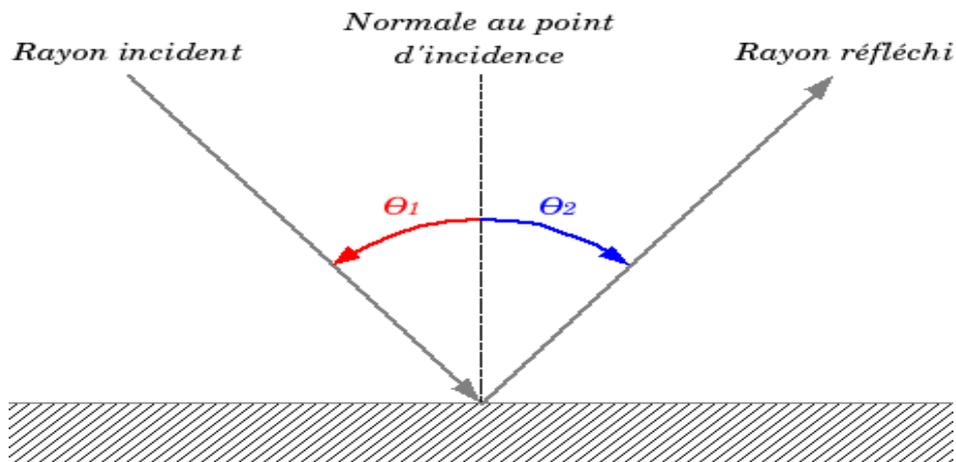
La réflexion en physique est le brusque changement de direction d'une onde à l'interface de deux milieux. Après réflexion, l'onde reste dans son milieu de propagation initial. De multiples types d'ondes peuvent subir une réflexion. Ainsi, les ondes électromagnétiques se réfléchissent sur les diélectriques ou les métaux, créant une réflexion vitreuse ou une réflexion métallique, les ondes acoustiques peuvent se réfléchir, ce qui est à l'origine de l'écho par exemple, les ondes électriques peuvent se réfléchir au raccord entre les câbles, et les ondes mécaniques, telles les vagues ou les ondes sismiques, peuvent aussi subir ce phénomène.

Il est possible dans certains cas d'amoinrir la réflexion des ondes à l'aide de traitements antireflets ou grâce à l'adaptation d'impédances.

Le phénomène de réflexion est connu depuis des siècles, d'abord en optique, puis en acoustique. Il suit des lois, dites lois de la réflexion:

- il y a égalité entre angle d'incidence et angle de réflexion.
- l'onde réfléchie se propage dans le même milieu que l'onde incidente.

La manière dont les ondes sont modifiées par la réflexion dépend largement de leur type, de leur fréquence et des compositions des milieux dans lesquels les ondes évoluent.



**Figure (I.2) :** Le phénomène de la réflexion

#### **I.4.2. L'indice de réfraction :**

est une grandeur sans dimension caractéristique d'un milieu, décrivant le comportement de la lumière dans celui-ci, il dépend de la longueur d'onde de mesure mais aussi des caractéristiques de l'environnement (notamment pression et température). L'indice de réfraction est parfois appelé « constante optique » d'un matériau, ce qui est un abus de langage, puisqu'il est à la fois variable selon des grandeurs qui lui sont extérieures, et non unique pour un milieu donné, car lié aux propriétés optiques, cristallographiques ou encore diélectriques de la matière, qui ne sont pas nécessairement isotropes.

L'indice de réfraction d'un matériau est définie par le rapport de la vitesse de la lumière 'c' dans le vide, sur la vitesse de la lumière dans le matériau 'v' formulè par :

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{(I.3)}$$

#### **I.4.3. L'absorption :**

L'absorption représente le phénomène par lequel l'énergie d'un photon est prise par une autre particule, par exemple un atome dont les électrons de valence effectuent une transition entre 2 niveaux d'énergie électronique. Le photon est alors détruite par l'opération, l'énergie électromagnétique est absorbée et transformée en énergie électronique.

Remarque : L'absorption ne se fait que si l'énergie du photon est égal à la différence d'énergie entre le niveau d'un électron au repos et un de ses états excités.

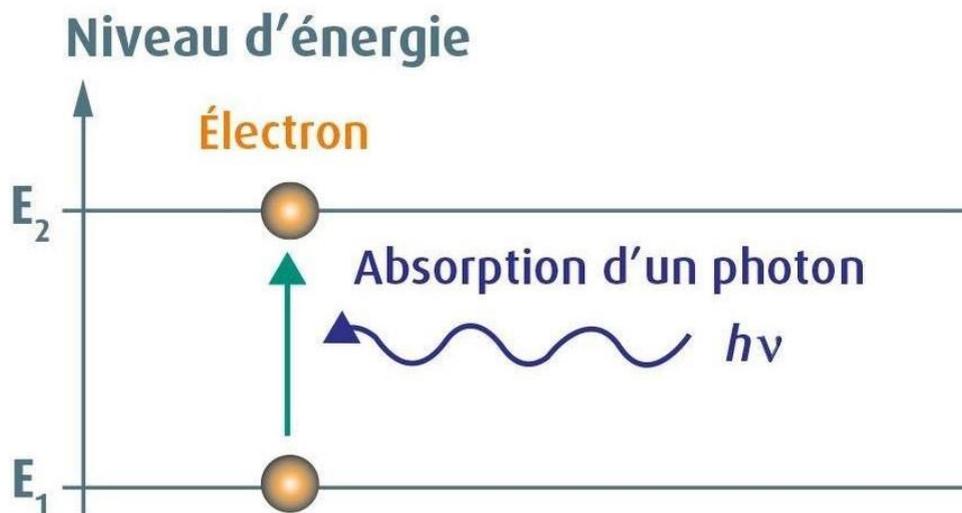


Figure (I.4) : Le phénomène de l'absorption

### I.5. Composantes du rayonnement solaire au sol :

Cette énergie qui descend en ligne droite vers notre planète ne peut pas nous parvenir sur terre en intégralité car elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère par absorption et par diffusion.

En effet, l'atmosphère contient, une majorité d'azote et d'oxygène (respectivement 78 et 21%), mais aussi l'argon, du CO<sub>2</sub>, de la vapeur d'eau, et la couche d'ozone, dont le rôle de filtrage des UV. Les poussières et les fumées provoquent également une variation spectrale, par contre les nuages (formés de minuscules gouttelettes d'eau) ont aussi leur importance dans la diffusion du rayonnement solaire.

le rayonnement solaire sur une surface au sol est composé comme suit : [3]

**a- Rayonnement direct :** C'est la fraction du rayonnement solaire qui arrive directement au sol, dont le trajet est « linéaire » (il y a, en fait, de légères déviations) et unique à un instant donné.

Si I est le rayonnement direct.

$$\text{Dans le cas d'un plan horizontal le rayonnement s'écrit : } I_h = I \times \cos \theta \quad (\text{I.4})$$

Avec : h hauteur du soleil.

**b- Rayonnement diffus :** Le rayonnement diffus est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Ainsi, par ciel serein, il constitue 20% de l'énergie globale. Par ciel couvert, il correspond à la totalité de l'énergie reçue au sol.

**c- Rayonnement réfléchi (L'albédo) :** Le rayonnement solaire réfléchi est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

L'albédo  $ALB = \text{énergie réfléchie} / \text{énergie reçue}$

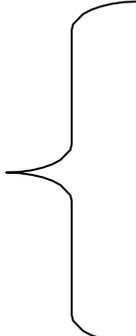
**d- Rayonnement global :**

- Une surface horizontale :

C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus.

- Une surface inclinée :

Rayonnement global sur une surface inclinée est la somme des rayonnements : Direct, Diffus et Réfléchi.

$$\text{Rayonnement globale} = \begin{matrix} \text{Rayonnement direct} \\ + \\ \text{Rayonnement diffus} \\ + \\ \text{Rayonnement réfléchi} \end{matrix}$$


L'équation de rayonnement globale est :  $G=B+D$  (I.5)  
avec :

**G** : Rayonnement globale.

**B** : Rayonnement direct.

**D** : Rayonnement diffus.

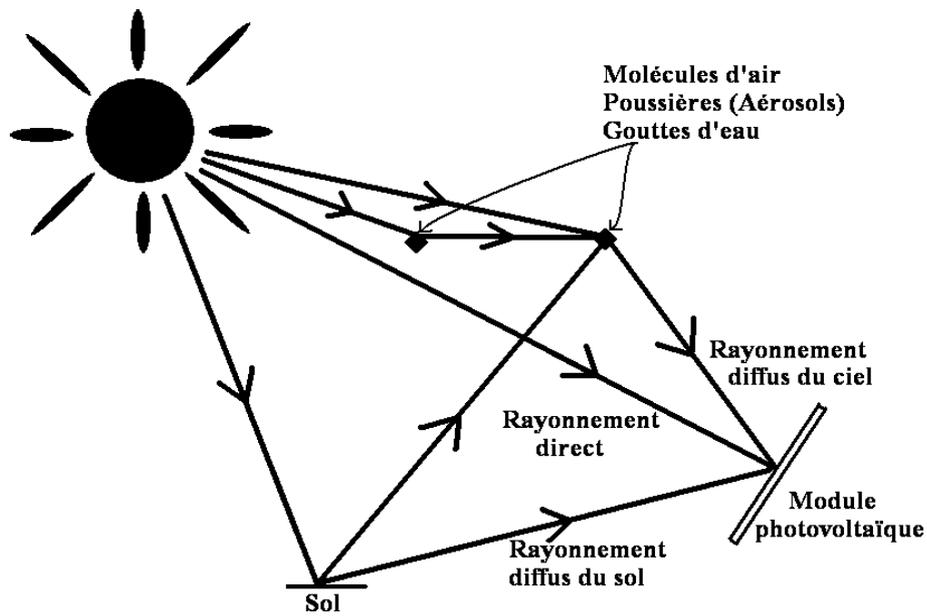


Figure (I.5) : Composantes du rayonnement solaire au sol

## I.6. Mesure du rayonnement solaire :

### I.6.1. Mesure au sol :

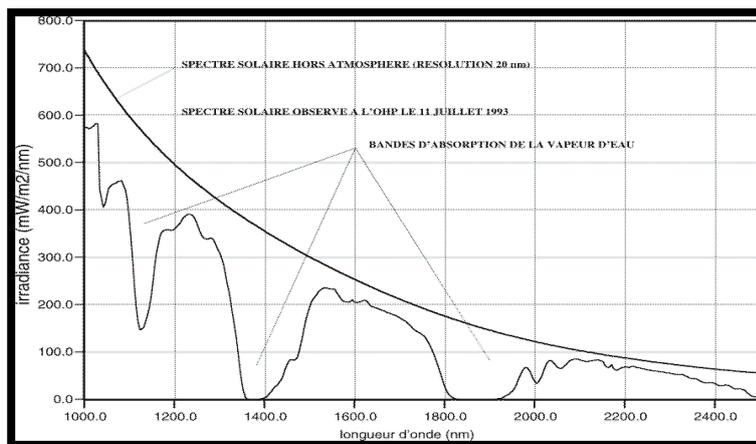
#### -Le spectromètre :

Il mesure au sol la distribution de l'énergie reçue du Soleil en fonction de la longueur d'onde de 300 nm à 2500 nm. L'instrument est placé sur un pointeur solaire de façon à pouvoir observer du lever au coucher.

Les résultats sont visibles sur les figures (I.7) et (I.8).



Figure (I.6) : Spectromètre SOSP

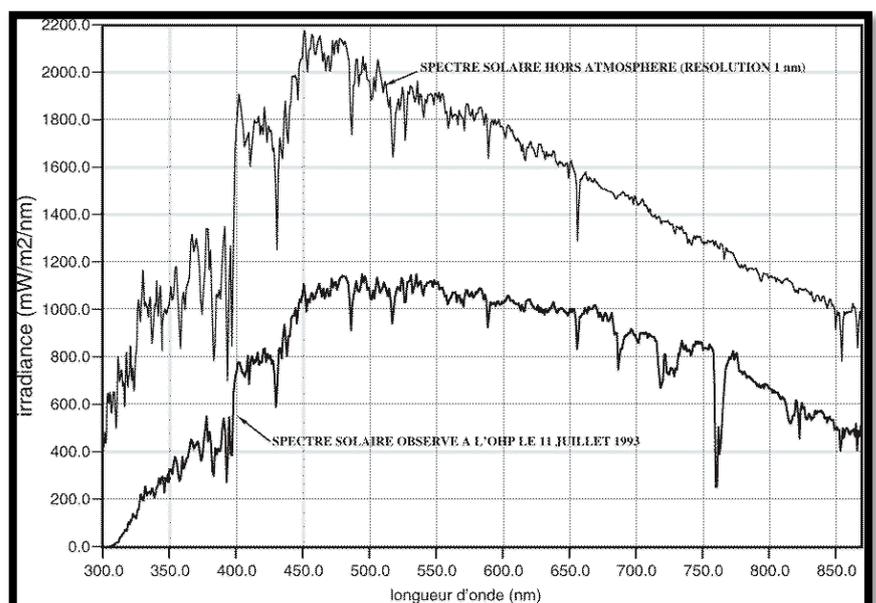


**Figure (I.7) :** Spectres du soleil entre 1 et 2400 nm

Mesurés hors atmosphère et au sol à la résolution de 20 nm. On notera les bandes d'absorption à 1125, 1375 et 1875 nm dues à la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère de la Terre. Spectromètre qui mesure la composante diffuse en fonction de la longueur d'onde de 300 à 850 nm.



**Figure (I.9) :** Spectromètre DOAN



**Figure (I.8) :** Spectres du soleil entre 300 et 850

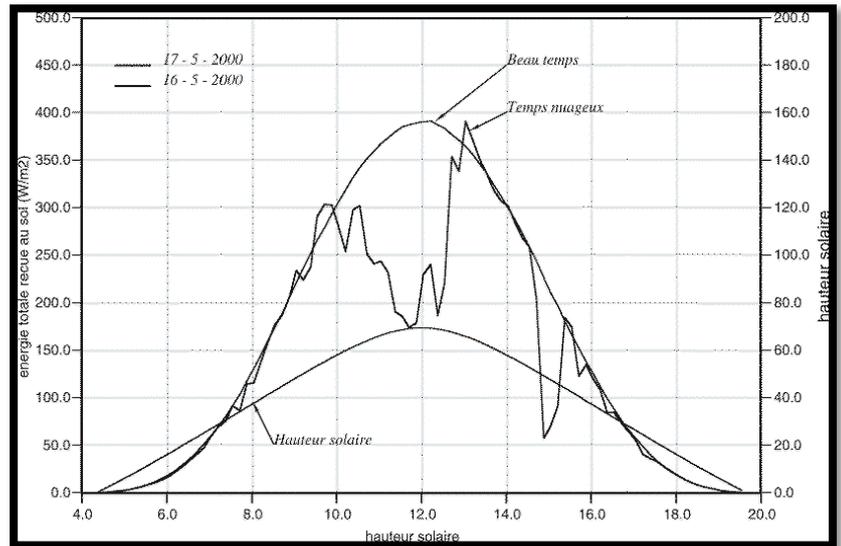
À la résolution de 1 nm. Les diminutions (raies de Fraunhofer) de l'intensité du rayonnement solaire à certaines longueurs d'onde par exemple à 656 nm, sont dues aux éléments chimiques présents dans l'atmosphère solaire. On notera la diminution de l'intensité reçue au sol avec celle mesurée hors atmosphère. L'atmosphère terrestre produit d'autres absorptions, par exemple celle à 760 nm due à l'oxygène moléculaire. [10]

**-Le Pyranomètres :** Le pyranomètre de gauche est destiné à mesurer au sol l'énergie reçue du Soleil dans le domaine de longueur d'onde de 300 (seuil du domaine visible) à 3000 nm. Celui de droite est destiné à mesurer au sol l'énergie reçue du Soleil dans le domaine de longueur d'onde de 300 à 320 nm (domaine de l'ultraviolet).

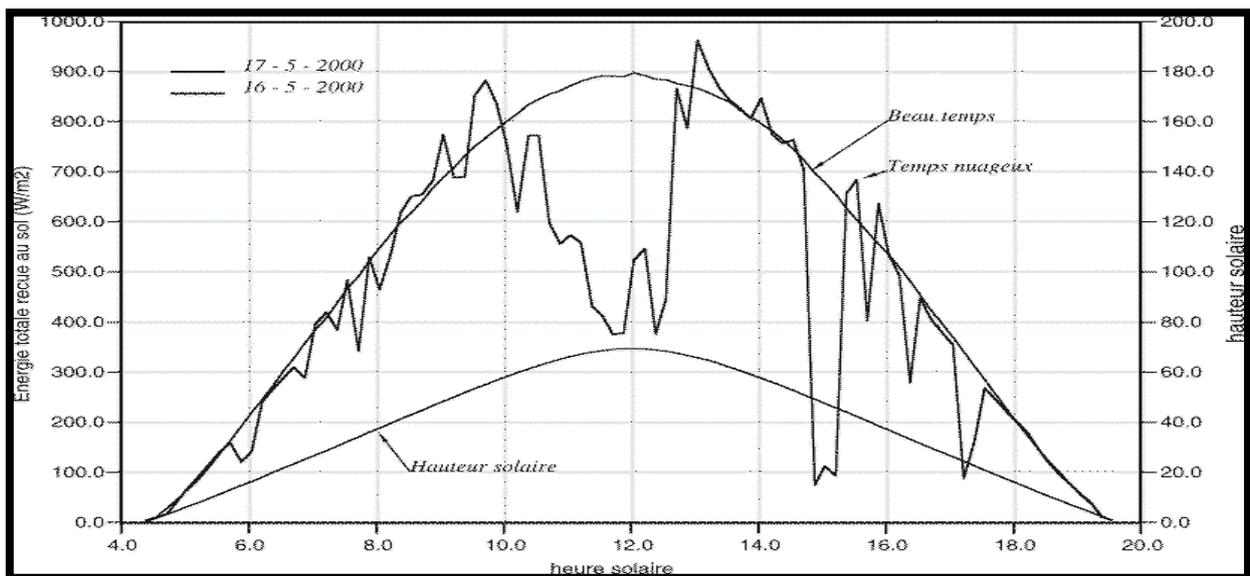
Les résultats sont présentés sur les figures (I.11) et (I.12).



**Figure (I.10) :** Pyranomètre



**Figure (I.11) :** Variation du lever au coucher du  
Dans le domaine ultraviolet



**Figure (I.12) :** Variation du lever au coucher du Soleil dans le domaine 300 à 3000nm

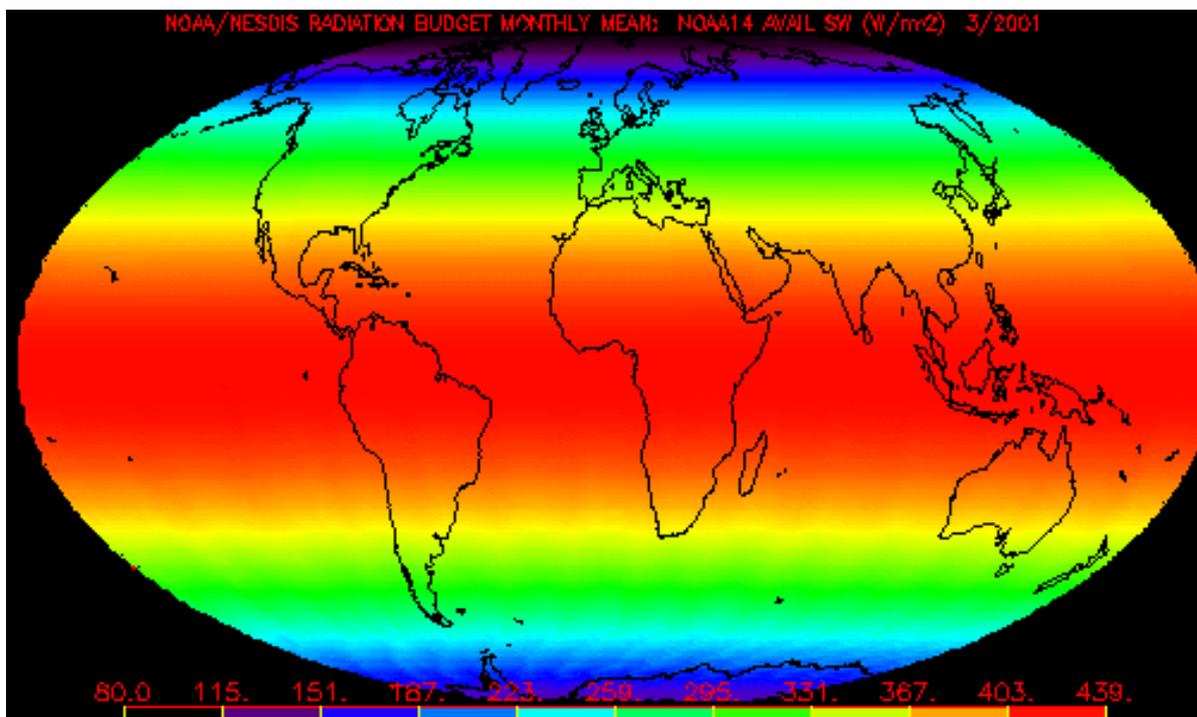
Variation du lever au coucher du Soleil de l'énergie reçue au sol dans le domaine 300 à 3000 nm pour un jour de beau temps et pour un jour nuageux.

### I.6.2. Mesure par satellite :

Les satellites peuvent mesurer le rayonnement solaire incident, c'est-à-dire reçu à la surface de l'atmosphère. Pour cela, ils sont équipés de capteurs sensibles aux rayonnements solaires, dont les longueurs d'ondes sont comprises entre 0,2 et 4 micromètres. Les capteurs sont dirigés vers le Soleil.

MétéoSuisse utilise les données fournies par le satellite METEOSAT de deuxième génération, un satellite géostationnaire d'observation de la Terre. Ce dernier est géré par l'Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques (EUMETSAT). Les données satellitaires sont vérifiées au moyen de mesures ponctuelles au sol. Dans les stations au sol, il est possible de mesurer précisément le rayonnement global, c'est-à-dire le rayonnement solaire total qui atteint la surface horizontale de la Terre. Par ailleurs, les données satellitaires complètent les mesures au sol de manière optimale. En effet, les satellites fournissent des données pour des endroits où aucune mesure au sol n'est disponible. [11]

L'énergie radiative reçue du Soleil est mesurée en  $W/m^2$ .



**Figure (I.13) :** Une synthèse des mesures effectuées au cours du mois de mars 2001

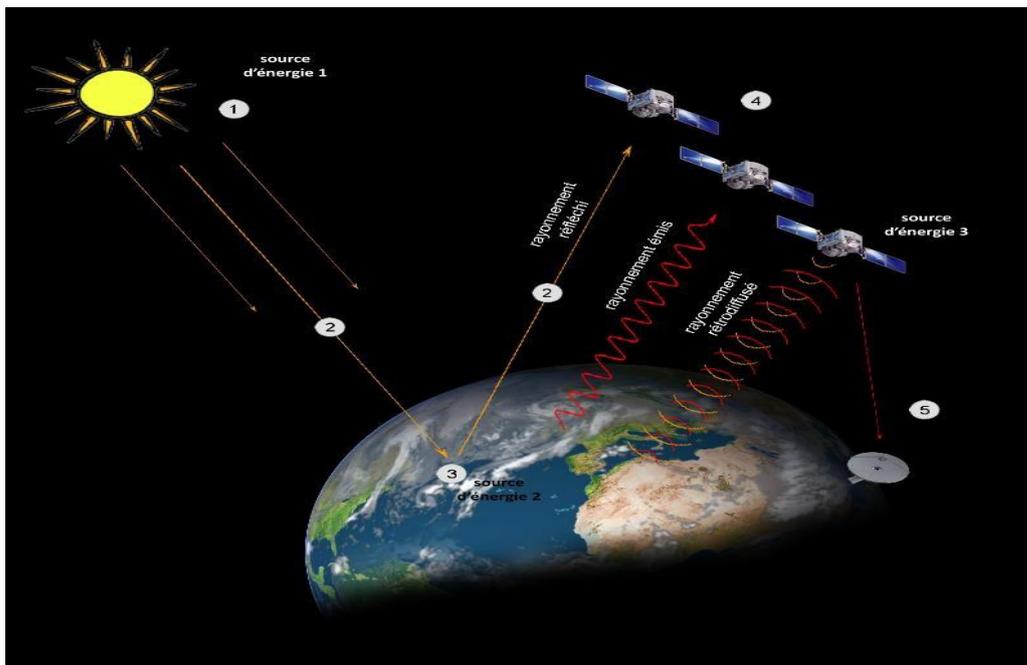


Figure (I.14) : Processus de la télédétection

### I.6.3. Coordonnées géographiques d'un site :

#### I.6.3.1. Coordonnées terrestres :

Tout point de la sphère terrestre peut être repéré par deux coordonnées, appelées coordonnées terrestres, à savoir sa latitude  $\varphi$  (positive dans l'hémisphère nord, négative dans l'hémisphère sud) et sa longitude  $L$  (positive à l'ouest, négative à l'est). [1]

##### a) La latitude $\varphi$ :

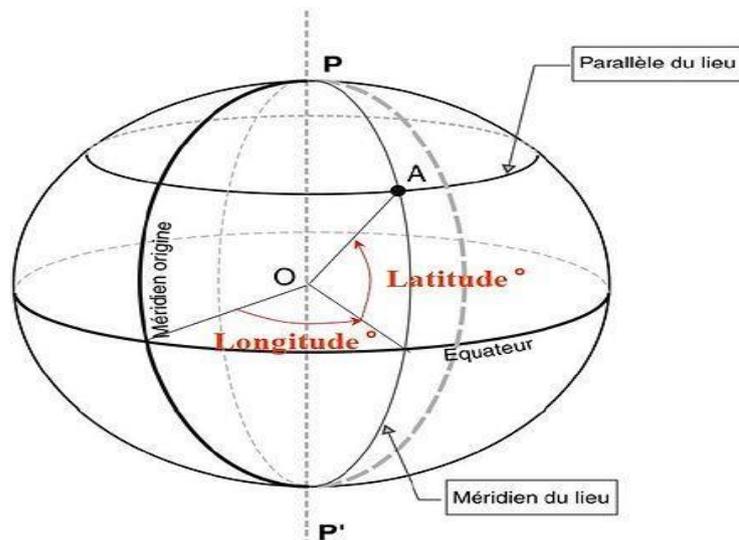
La latitude est une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, expression de la position d'un point sur Terre (ou sur une autre planète), au nord ou au sud de l'équateur qui est le plan de référence. Elle est comptée de  $0^\circ$  à  $+90^\circ$  positivement dans l'hémisphère nord et négativement dans l'hémisphère sud.

##### b) La longitude $L$ :

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich  $0^\circ$ ) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest. La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ , à tout écart de  $1^\circ$  de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps.

**C) Inclinaison  $\square$  :**

C'est l'angle que forme le plan de capteur et l'horizontal du lieu.



**Figure (I.15) :** Coordonnées géographiques

**I.6.3.2. Coordonnées équatoriales :**

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles ( $\delta$ ,  $\omega$ ).

**a) La déclinaison  $\delta$  :**

C'est l'angle que forme la direction du soleil avec le plan équatorial. La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année : elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ces deux valeurs extrêmes au solstice d'hiver ( $-23^{\circ},27'$ ) et au solstice d'été ( $+23^{\circ},27'$ ). Elle est donnée par la relation suivante :

$$\delta = 23,45 \times \sin [0,980 \times (n - 81)] \quad (\text{I.6})$$

n : Numéro du jour de l'année à partir du 1er janvier.

**b) L'angle horaire  $\omega$  :**

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu quand le solaire est au zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi solaire. Sa valeur est nulle à midi solaire, négative le matin et positive en après-midi et elle augmente de  $15^{\circ}$  par heure. Il varie entre  $-180^{\circ}$  et  $+180^{\circ}$ .

$$\omega = 15 \times (\text{TSV}-12) \quad (\text{I.7})$$

Avec :

$\omega$  : en degré

TSV : temps solaire vrai

### I.6.3.3. Coordonnées horizontales :

Dans ce système de coordonnées le soleil est repéré par sa hauteur  $h$ , son azimut  $\alpha$  et l'horizon astronomiques comme plan de référence.

#### a) La hauteur du soleil $H$ :

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante :

$$\sin H = \sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta \times \cos \omega \quad (\text{I.8})$$

#### b) L'azimut du soleil $\alpha$ :

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du Sud. Les azimuts varient de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  de l'ouest vers l'est. Ils sont donnés par la formule suivante :

$$\sin \alpha = \cos \delta \times \sin m / \cos H \quad (\text{I.9})$$

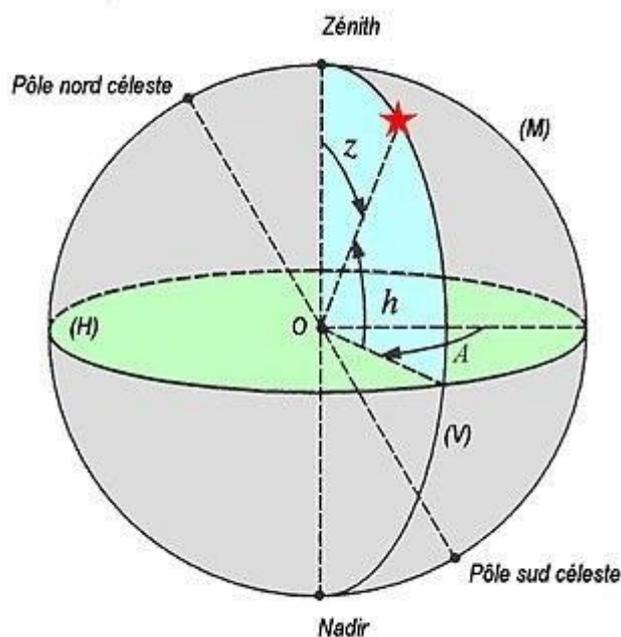


Figure (I.16) : Coordonnées horizontales

## I.7. Conversion photovoltaïque :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0,2 micron) à l'infrarouge lointain. Lorsqu'un photon est absorbé, il éjecte un

électron d'un niveau d'énergie inférieur, vers un niveau d'énergie plus élevé, créant ainsi une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement cette paire électron-trou revient à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique, le matériau chauffe au soleil. Récupérer toute ou partie de cette énergie sous forme électrique est justement l'objectif de la conversion photovoltaïque.

En séparant les paires « électron-trou » créées et en les forçant à passer dans un circuit extérieur. Cela a été rendu possible grâce au fait que les électrons et les trous ont des charges de signes opposés ( $-q$  ;  $+q$ ) et donc que si elles sont soumises à un champ électrique, les forces qui s'exerceront seront de sens opposé et devraient permettre la séparation.

La clé de l'effet photovoltaïque, est là, grâce aux cellules solaires faites en associant un semi-conducteur de type n et un semi-conducteur de type p, comme le silicium dopé phosphore et le silicium dopé bore. Les niveaux d'énergie impliqués pour l'absorption des photons sont le niveau du haut de la bande de valence et le niveau du bas de la bande de conduction. Ils sont séparés par la bande d'énergie interdite  $E_g$ , caractéristique du matériau semi-conducteur, seuls les photons d'énergie supérieure à  $E_g$  sont absorbés. [9]

### I.7.1. Semi-conducteur :

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité électrique est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique. [1]

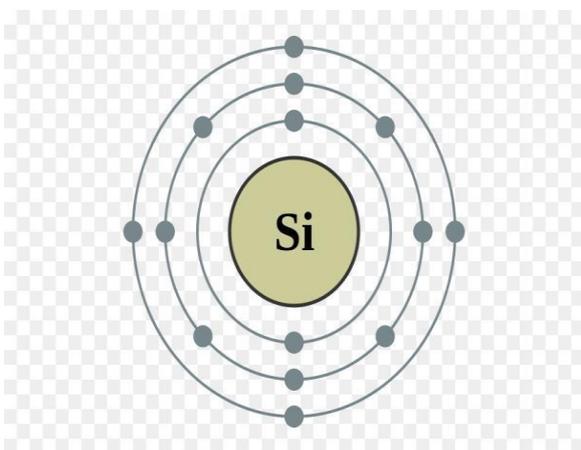


Figure (I.18) : Semi-conducteur (silicium)

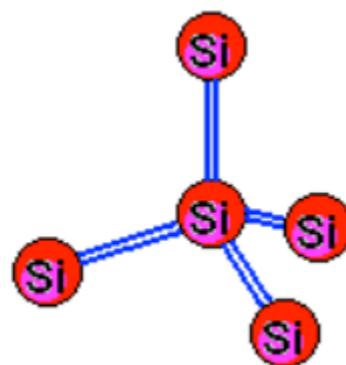


Figure (I.17) : Cristal de silicium

### I.7.2. Le dopage de semi-conducteur :

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

#### a) Dopage de type N :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent (phosphore p). Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième reste disponible, il sera excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif). [1]

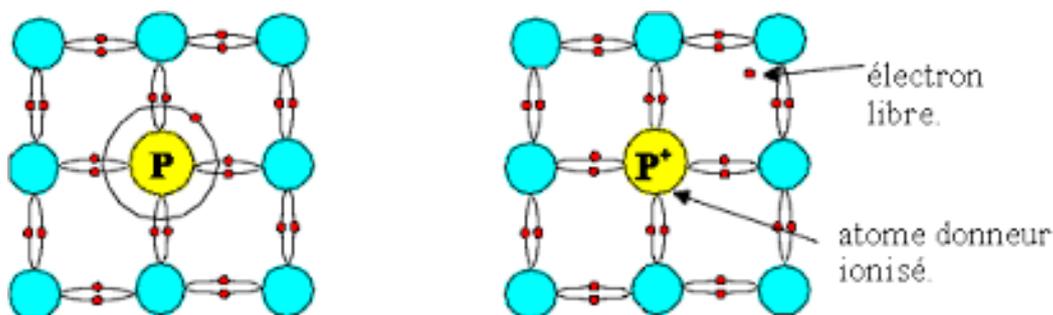


Figure (I.19) : dopage de semi-conducteur de type N

#### b) Dopage de type P :

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant.

Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore B. [1]

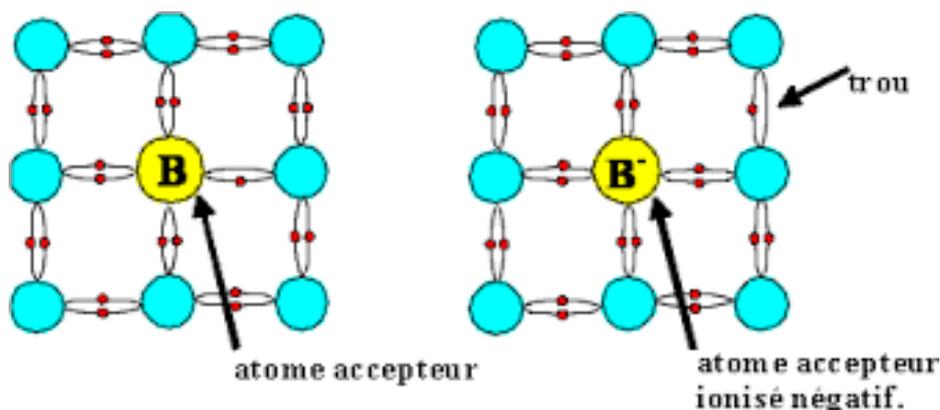


Figure (I.20) : dopage de semi-conducteur de type P

### I.7.3. La Jonction PN :

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopée P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition. Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner.

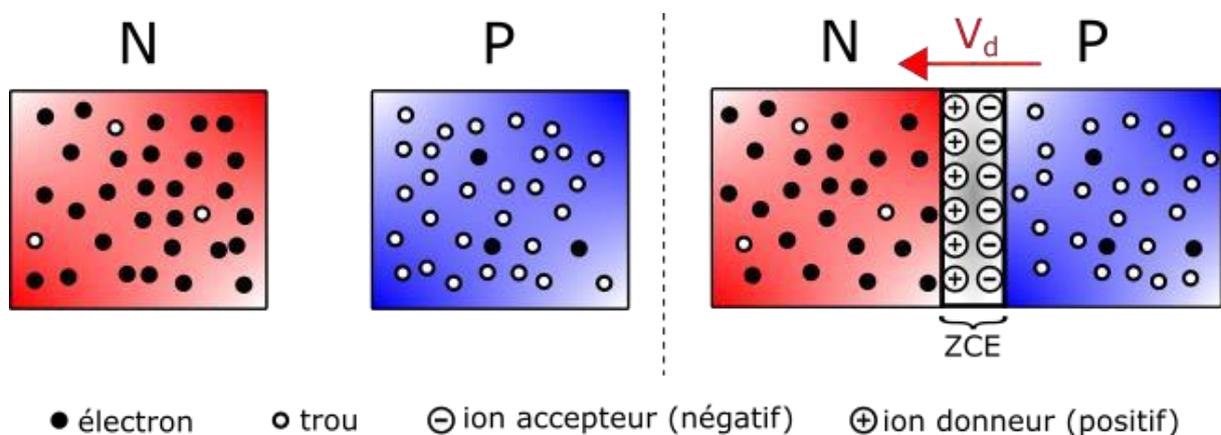


Figure (I.21) : La jonction P-N

### I.8. L'effet photovoltaïque :

Il correspond à l'apparition d'une différence de potentiel entre les deux cotés d'une jonction semi-conductrice sous l'action d'une radiation lumineuse.

En plaçant en série différents semi-conducteurs sensibles à la lumière, il y a apparition d'une polarité dans ce dispositif, en effet pour une longueur d'onde suffisamment courte; un photon ayant une énergie supérieure ou égale au gap du semi-conducteur, il pourra créer la paire électron-trou, une différence de potentiel apparaîtra aux bornes du semi-conducteur.

Les systèmes photovoltaïques, composés de nombreuses cellules élémentaires placées en série utilisent également l'effet photovoltaïque.

Le tableau I.1 représente l'absorption optique de quelques matériaux photovoltaïques à la longueur d'onde  $\lambda = 0,59\mu\text{m}$ , avec  $\alpha$  le coefficient d'absorption dépendant du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente, il s'exprime en  $\text{cm}^{-1}$ . [2]

Matériau	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )
Silicium cristallin	$4,5 \times 10^3$
Silicium amorphe	$2,4 \times 10^4$
Arséniure de gallium	$5,4 \times 10^4$

Tableau (I.1) : Absorption optique de quelques matériaux semi-conducteur

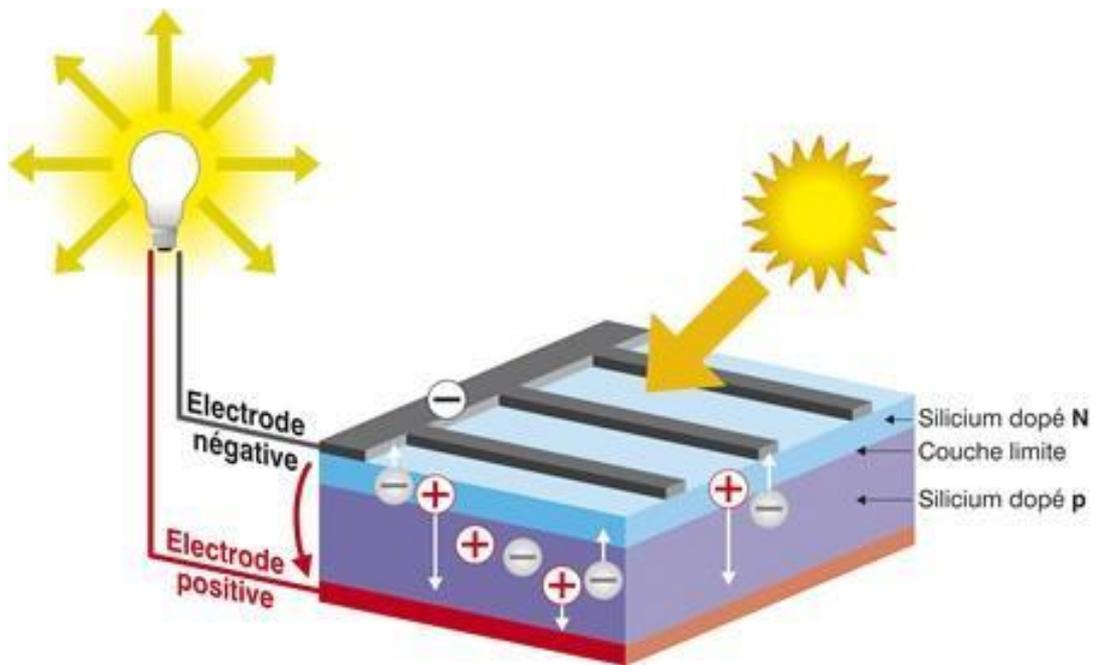


Figure (I.22) : L'effet photovoltaïque

## I.9. Les différentes technologies photovoltaïques :

Il existe de nombreuses familles et sous-famille de cellules qui diffèrent chacune selon la nature du semi-conducteur et du procédé de fabrication. Néanmoins, leurs propriétés électriques sont semblables d'une technologie à une autre.

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont: le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTE) et des alliages de cuivre indium et sélénium(CIS),...

### I.9.1. Les cellules cristallines:

Ces cellules, généralement en silicium, ne contiennent qu'une seule jonction pn. La technique de fabrication de ces cellules, basée sur la production de "plaques" de silicium très pur, reste très énergivore et coûteuse. [4]



Figure (I.23) : Cellules cristallines

On distingue deux types de cellules cristallines:

### **I.9.2. Les cellules monocristalline :**

La fabrication des cellules monocristalline consiste à étirer des barreaux cylindriques à partir du silicium fondu dans un creuser et de scier ensuite ces barreaux en wafers (tranches de silicium). [4]

### **I.9.3. Les cellules poly cristallines :**

Le refroidissement du silicium en fusion est effectué dans des creusets parallélépipédiques à fond plat. Par cette technique, des cristaux orientés de manière irrégulière se forment. Cela donne l'aspect caractéristique de ces cellules bleutées présentant des motifs générés par les cristaux. [4]

### **I.9.4. Les étapes de fabrication de cellule :**

#### **I.9.4.1. La silice : matière première d'une cellule photovoltaïque :**

La silice est un composé chimique nommé aussi dioxyde de silicium, de formule chimique  $\text{SiO}_2$ . La silice est l'élément le plus répandu dans la croûte terrestre après l'oxygène. Il représente 25 % de la masse de la croûte terrestre. La silice se présente sous la forme d'un minéral dur. Dans la nature, on la trouve en grande quantité dans :

- Les roches sédimentaires détritiques (sables, grès).
- Les roches métamorphiques, (schistes, gneiss, quartzites) (Les roches métamorphiques sont formées par la recristallisation (et généralement la déformation) de roches sédimentaires ou de roches magmatiques sous l'action de la température et de la pression qui croissent avec la profondeur dans la croûte terrestre ou au contact d'autres roches.
- Les roches magmatiques.

L'extraction de la silice s'effectue dans des carrières de silice. En 2010, la production annuelle des carrières de silice en France s'élève à environ 8 millions de tonnes. [12]



**Figure (I.24) : La silice**

### I.9.4.2. Extraction purification du silicium photovoltaïque :

#### a. Extraction du silicium à partir de la silice :

Le silicium est un élément chimique de symbole Si. Il n'existe pas à l'état pur dans la nature. Le silicium (Si) est donc extrait de la silice (SiO<sub>2</sub>) grâce à la réaction chimique simplifiée suivante :  $\text{SiO}_2 + 2 \text{C} \rightarrow \text{Si} + \text{CO}$

Cette réaction se réalise dans un four à arc car elle nécessite de faire fondre la silice. La température du four peut atteindre 3 000 °C. La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW, afin d'enclencher les réactions chimiques. En réalité, la réaction de réduction de la silice en silicium résulte d'un grand nombre de réactions chimiques intermédiaires. La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW, afin d'enclencher les réactions chimiques. Après cette opération, le silicium est obtenu sous forme liquide. Sa pureté est de 98 %. Il faut le purifier encore de plusieurs ordres de grandeur afin d'obtenir un matériau adéquate pour les applications photovoltaïques. [12]

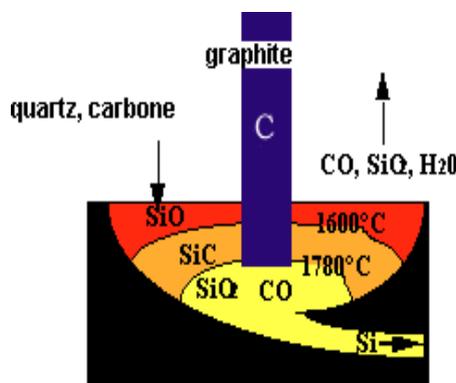


Figure (I.25) : la fabrication des cellules photovoltaïques

#### b. Purification du silicium :

Il s'agit, en partant du silicium métallurgique, de faire une purification chimique. De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium. Au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés à 99.99 %. [12]

### I.9.4.3. Obtention des lingots de silicium :

Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide. Le produit issu de cette étape est un lingot de silicium à l'état solide. Il existe deux grandes méthodes de cristallisation. La première permet d'obtenir du silicium poly cristallin (composé

de plusieurs cristaux). La deuxième permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal). [12]

**a. Le silicium poly cristallin :**

Le silicium poly cristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures. On obtient au final des lingots cubique. Cette forme est recherchée afin d'optimiser l'espace lorsque les plaquettes (obtenues par découpage en lamelles des lingots de silicium) seront placées en série sur un module photovoltaïque.

Le silicium poly cristallin présente une couleur grise. Il est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientation et de tailles différentes. [12]



**Figure (I.26) :** le silicium poly cristallin

**b- Le silicium monocristallin :**

Une des méthodes pour fabriquer du silicium monocristallin est la méthode dite de Czochralski. Le silicium est placé dans un creuset de quartz et maintenu liquide à l'aide d'éléments chauffants. Lorsque la surface est à la température limite de solidification, on y plonge un germe monocristallin. Le silicium se solidifie sur ce germe selon la même orientation cristallographique. On tire lentement le germe vers le haut, avec un mouvement de rotation, tout en contrôlant minutieusement la température et la vitesse. [12]

Le silicium monocristallin ainsi obtenu, sous forme de lingots circulaires, est constitué d'un seul type de cristal et présente une couleur uniforme grise. Le silicium monocristallin, plus élaboré que le silicium poly cristallin, présente un rendement (conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique) supérieure. Sa production demande cependant une plus

grande dépense énergétique. L'équeutage consiste à éliminer les extrémités du lingot soit mal cristallisées soit riches en impuretés. Les extrémités sont ensuite refondues pour le départ d'un nouveau cycle de production. Lors du tirage, le diamètre du lingot varie légèrement ce qui constitue des ondulations à sa surface. Pour obtenir des plaquettes de même diamètre un polissage cylindrique est nécessaire. [12]

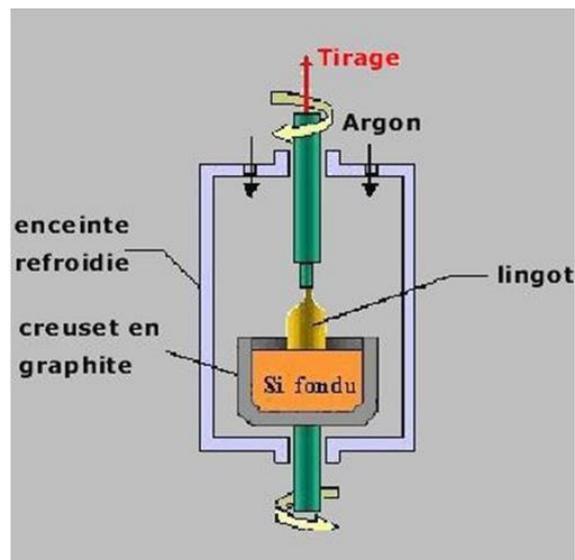
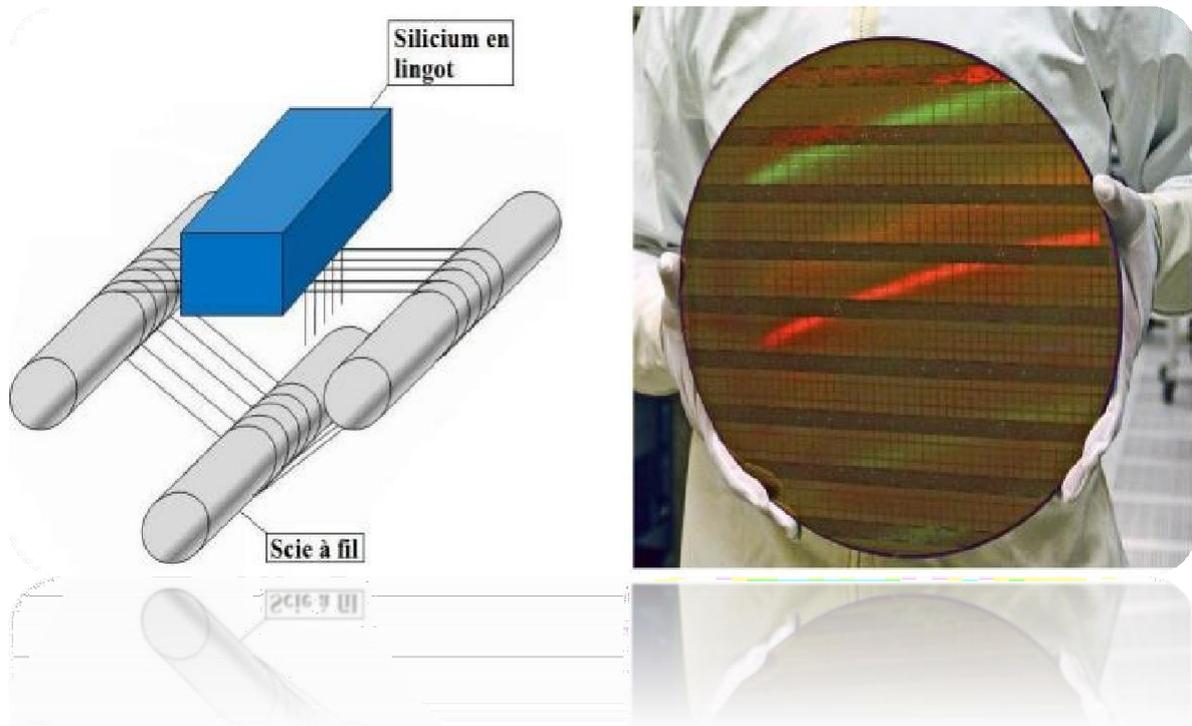


Figure (I.27) : La méthode de Czochralski

#### I.9.4.4. Obtention des wafers photovoltaïques :

Les lingots cylindriques (silicium monocristallin) ou parallélépipédiques (silicium polycristallin) de silicium obtenus à l'issue de l'étape de solidification sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers » (en anglais, "wafer" signifie "galette"). La coupe des lingots est effectuée par une scie à fil. Compte-tenu de la faible épaisseur des tranches à découpées (300  $\mu\text{m}$ ), le principal problème du sciage est la perte de découpe. Afin de minimiser ces pertes, la solution technique retenue est la scie à fil. En effet, la perte de découpe (kerf) typique des scies à fil est de 200  $\mu\text{m}$  à 240  $\mu\text{m}$ , ce qui représente 55% de perte en moins par rapport aux scies à diamètre intérieur (perte de découpe de 310  $\mu\text{m}$  à 350  $\mu\text{m}$ ). Avec une scie à fil, il faut donc 570  $\mu\text{m}$  de silicium pour produire une tranche de 350  $\mu\text{m}$ . L'étape du sciage représente un élément déterminant dans le coût de la production des cellules photovoltaïques. [12]



**Figure (I.28) :** Obtention des wafers photovoltaïques

#### **I.9.4.5. Dopage du silicium :**

Les wafers de silicium obtenus à l'issue de l'étape de sciage sont alors introduits dans un réacteur de croissance dans lequel va se dérouler l'étape de dopage , on obtient alors un semi-conducteur extrinsèque ou dopé. Selon la nature des atomes introduits, soit le nombre d'électrons devient très supérieur au nombre de trous et le semi-conducteur est appelé de type n, soit le nombre de trous devient très supérieur à celui des électrons et le semi-conducteur est appelé de type p. Il existe deux types de dopage : le type N (Négatif) et le type P (Positif). [12]



**Figure (I.29) :** Résumé des étapes de fabrications des cellules cristallines (monocristallines et poly cristallines)

### I.9.5. couches minces :

Dans le cas de "couches minces", le semi-conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple). Le silicium amorphe (a-Si) (silicium non cristallisé de couleur gris foncé), le tellure de cadmium (CdTe), le di-sélénium de cuivre indium (CIS) font notamment partie de cette génération. Ce sont des cellules de cette technologie que l'on retrouve dans les montres, calculatrices,...dite solaires. [4]



**Figure (I.30) :** un module PV à couches minces de 365 W



**Figure (I.31) :** Panneau Photovoltaïque à couche minces



**Figure (I.32) :** Silicium amorphe en couche minces

**I.9.6. Comparatif des différentes technologies photovoltaïques : [4]**

Type de cellules	Silicium Mono Cristallin	Silicium Poly Cristallin	Silicium Amorphe (couche mince)	Cellule CdTe (couche mince)
Rendement Industriel	12-20%	10-15%	5-10%	8-11%
Part de marché	85%	85%	5%	10%
Garantie de puissance	90% de puissance initiale pendant 10 ans 80% pendant 20 ans environ (selon le constructeur)			
Durée de vie	25-30ans	25-30ans	Environ 10 ans	>25ans
Avantages	-Technologie connue et maîtrisée -Bon rendement -Durée de vie	-Technologie connue et maîtrisée -Bon rendement -Durée de vie -Moins cher que la technologie monocristalline	-Meilleur marché -Rendement moins affecté par un faible éclairage -Plus souples -Installation plus facile -Moins énergivore -Meilleure résistance à la température	-Bonne résistance a la température -Plus d'absorption de rayonnement diffus que le cristallin
Inconvénients	-Coûteuse -Rendement faible -un sous faible éclairement	-Rendement faible -un sous faible éclairement	-Rendement -Durée de vie -Processus industriel pas en core optimal -Moins écologique que le cristallin	-Rendement plus faible que le cristallin -Matériau toxique nécessite donc un processus de recyclage complexe -Moins d'absorption que l'amorphe -sensible a l'humidité

**Tableau (I.2) :** Comparatif des différentes technologies photovoltaïques

### **I.10. Conclusion :**

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le rayonnement solaire, sa provenance, sa constante, ses composantes et sa mesure ainsi que tous les paramètres qui peuvent influencer sur ce dernier.

Enfin, nous avons présenté le principe de la conversion photovoltaïque, les différentes technologies photovoltaïques ainsi que leur Avantages et les Inconvénients.



---

***Chapitre II : Différents systèmes et composants photovoltaïques.***

---

## **II.1. Introduction :**

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

Ce présent chapitre a pour but la représentation des différents systèmes photovoltaïques ainsi les composants photovoltaïques qui assureront le contrôle et la gestion du fonctionnement des installations photovoltaïques.

## **II.2. Configuration des installations solaires photovoltaïques :**

Il existe différents systèmes photovoltaïques variant selon le service souhaité et les applications recherchées.

### **II.2.1. Alimentation direct :**

L'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence de la lumière et dès que l'éclairement sera suffisant pour atteindre la puissance demandée.

C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de lumière.

S'il y a de la lumière, ça fonctionne, sinon ça s'arrête, mais l'inconvénient de ce système c'est qu'on ne profite pas toujours des éclaircissements les plus élevés : pas de stockage, donc pas de récupération des surplus d'énergie solaire. [17]

### **II.2.2. Système connecté au réseau :**

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau (Sonelgaz en Algérie). Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement.

Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher).

Il y'a deux formes d'injection du courant photovoltaïque :

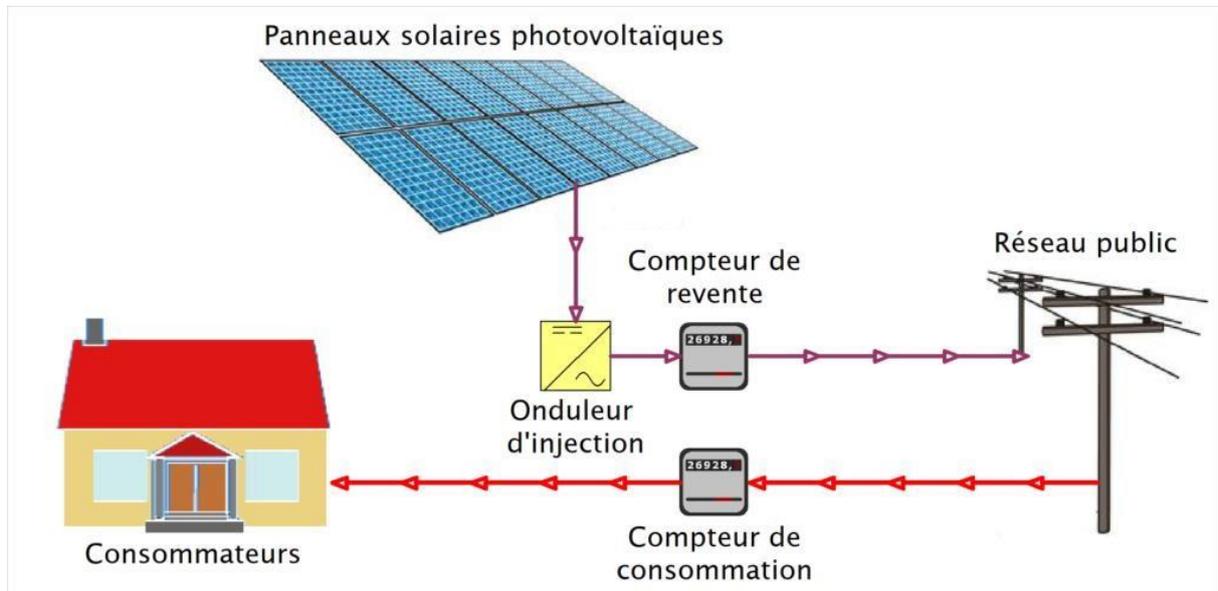
- Soit injecter la totalité de la production photovoltaïque au réseau.
- Soit injecter le surplus de la production photovoltaïque au réseau.

Deux compteurs d'énergie sont nécessaires :

Un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie (consommation) et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation.

Un troisième compteur est ajouté dans le cas où l'énergie produite est injectée en intégralité dans le réseau (compteur de non-consommation).

Un onduleur pour la conversion du courant continu des panneaux en alternatif, et ce dernier doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant. Afin de s'assurer sur sa qualité « sinusoïdale ». [17]



**Figure (II.1) : Système connecté au réseau**

### II.2.3. Systèmes hybride :

Une des limites d'un système autonome purement photovoltaïque, comme on vient de le décrire, est qu'il fournit une puissance donnée, variable selon la saison, mais que l'on ne peut pas dépasser, au risque de détruire la batterie. Or les consommateurs que nous sommes ne sont pas des machines et ont des besoins qui évoluent, et pas forcément en phase avec les saisons.

Avoir un système hybride, c'est disposer d'une autre source d'électricité qui vient compléter l'apport photovoltaïque. Cette autre source peut être un groupe électrogène (appelé aussi « génératrice ») ou une éolienne. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie et donc ils permettent en outre de recharger la batterie lorsque elle est faible.

Un tel système photovoltaïque hybride fournit une grande fiabilité du système et peut représenter la solution adéquate pour les sites isolés; il convient aussi lorsque la demande en énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout au long de l'année). [17]

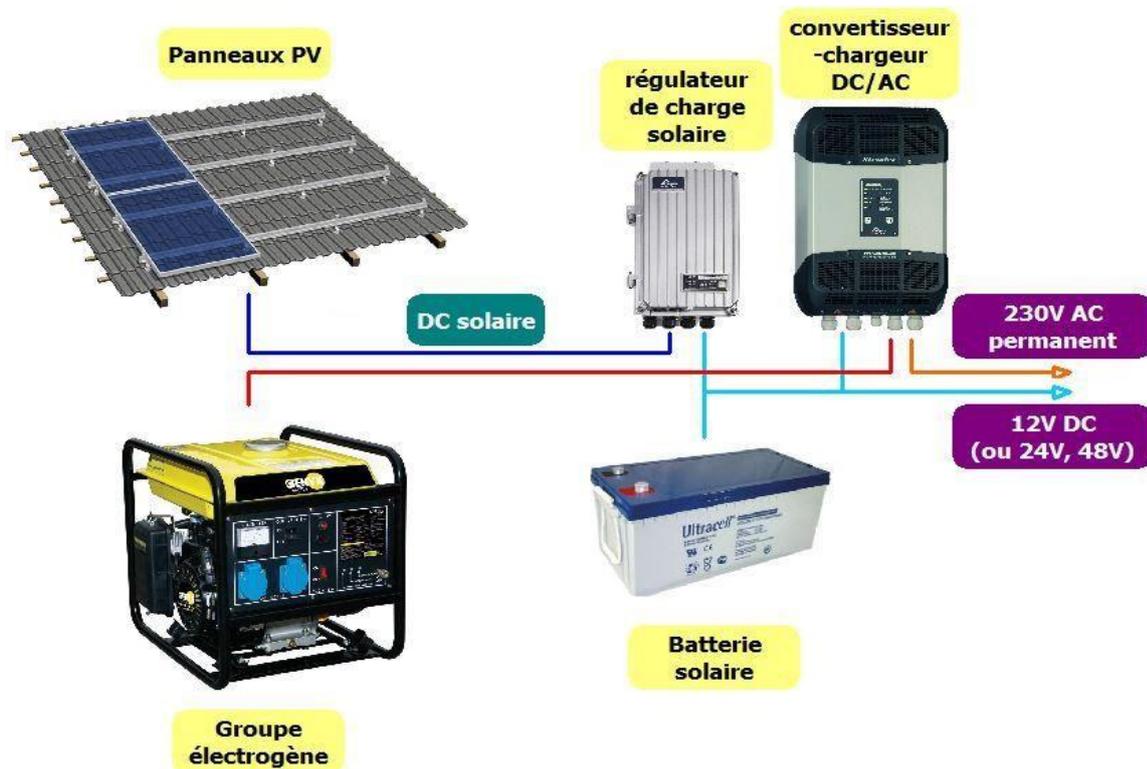


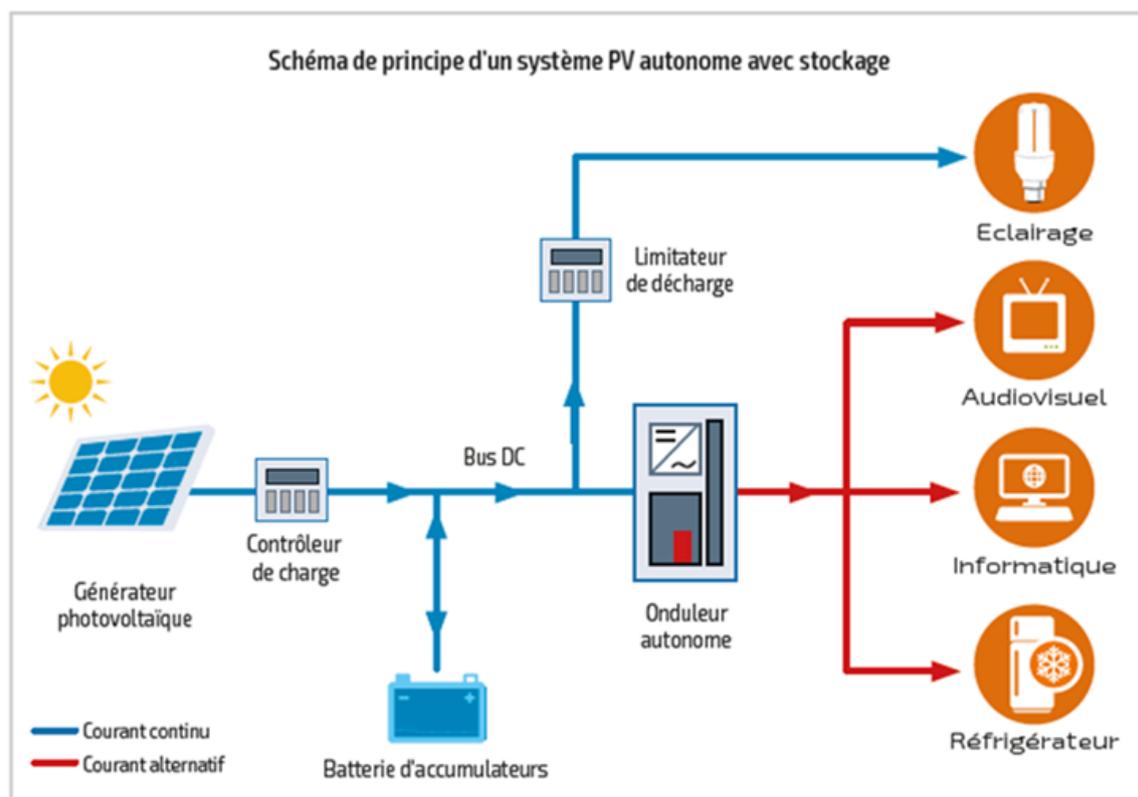
Figure (II.2) : Système solaire hybride

#### II.2.4. Systèmes autonome avec stockage :

Ces installations se composent essentiellement de trois principaux composants : des modules solaires, la batterie, et du régulateur de charge. La batterie d'un tel système se charge le jour, et sert de réservoir d'énergie en permanence. Elle peut sans problème, à un instant donné, recevoir un courant de charge et débiter un courant de décharge de valeur différente.

Les appareils alimentés sont donc câblés sur la batterie au travers du régulateur de charge, cela pour assurer le chargement optimal de l'accumulateur tel que lorsque la batterie est pleine, ce dernier coupe la charge pour éviter qu'elle ne souffre de surcharge.

En journée, le générateur photovoltaïque alimente les récepteurs courant continu en fonctionnement et charge la batterie de stockage. Un contrôleur de charge évite la surcharge de la batterie en cas de surproduction solaire. Durant la nuit et par mauvais temps, les récepteurs sont alimentés par la batterie. Un limiteur de décharge protège la batterie en cas de décharge profonde. En présence de récepteurs fonctionnant en alternatif, un onduleur autonome convertit la tension continue en tension alternative, permettant ainsi leur alimentation. [17]



Figure(II.3) : Systèmes autonome avec stockage

Dans notre mémoire on va traiter le système autonome avec stockage.

### II.3. Les différents composants photovoltaïques :

Les composants d'un système photovoltaïque dépendent du type d'application :

En site isolé les principaux composants sont :

- Panneaux photovoltaïques (+ structure de support)
- chargeur/régulateur DC/DC
- Système de stockage (batteries, condensateurs, ...)
- Eventuellement un onduleur si la consommation est alimentée en courant alternatif.
- Eventuellement un groupe électrogène en appoint
- Facultatif : système de monitoring/supervision pour enregistrer les données et éventuellement y accéder à distance ou via un portail web

En système photovoltaïque connecté au réseau les principaux composants sont :

- Panneaux photovoltaïques (+ structure de support)

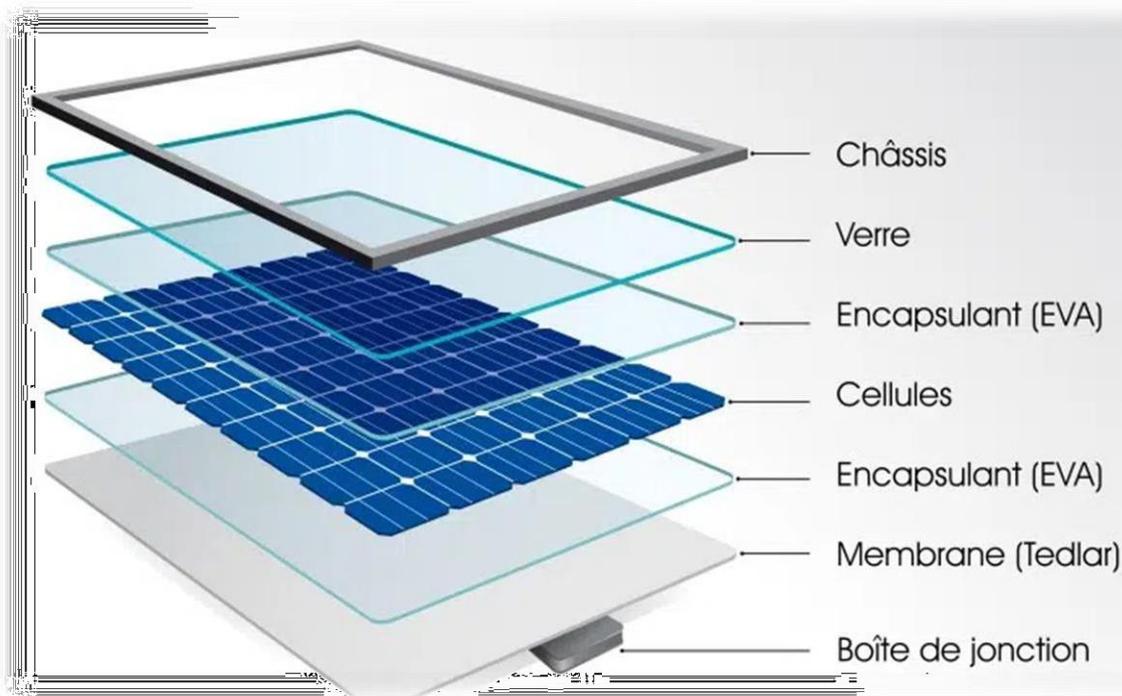
- Coffret de coupure et de protection courant continu DC
- Onduleurs
- Coffret de coupure et de protection courant alternatif AC
- Facultatif : système de monitoring/supervision pour enregistrer les données et éventuellement y accéder à distance ou via un portail web

Remarque : Le coffret de protection peut être de type AC/DC en intégrant les protections continues (entrée onduleur DC) et alternatives (sortie onduleur AC).

La structure de support peut-être un élément très important en cas d'intégration au bâtiment. [13]

### II.3.1. Panneau photovoltaïques :

La composition du panneau solaire comprend plusieurs parties. La partie mécanique est un ensemble de cellules photovoltaïques encapsulées dans de l'EVA, un châssis en aluminium, une coque arrière en Tedlar, une plaque de verre côté soleil. Une partie électrique permet de connecter le panneau solaire à l'installation. [14]



**Figure (II.4) :** La composition du panneau solaire

### II.3.2. La cellule photovoltaïques :

Le fonctionnement des panneaux solaires repose sur un élément principal :

la cellule photovoltaïque.

Les cellules photovoltaïques sont des éléments qui forment les panneaux solaires. Ce sont des composants électroniques qui produisent de l'électricité à partir des rayons du soleil. Elles sont très fines (environ 200  $\mu\text{m}$ ), mais une toute petite quantité suffit pour les fabriquer. Il y a entre 60 et 72 cellules photovoltaïques sur chaque panneau solaire.

#### 1- La caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque :

4 paramètres majeurs permettent de caractériser une cellule photovoltaïque

- Le courant de court-circuit noté  $I_{cc}$
- La tension à vide notée  $U_{co}$
- Le courant de puissance maximale noté  $I_{MPP}$
- La tension de puissance maximale notée  $U_{MPP}$

Ces paramètres dépendent de:

- Niveau d'éclairement
- La température de la cellule

#### 2- Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) :

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuit, c'est à dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle).

La puissance fournie par la cellule  $P = U \times I$  est nulle.

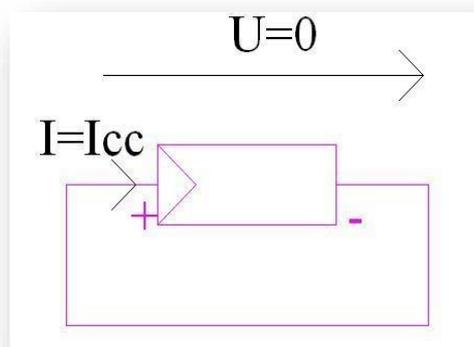


Figure (II.5) : Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

### 3- Tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) :

C'est la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul).

Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule  $P = U \times I$  est nulle. [15]

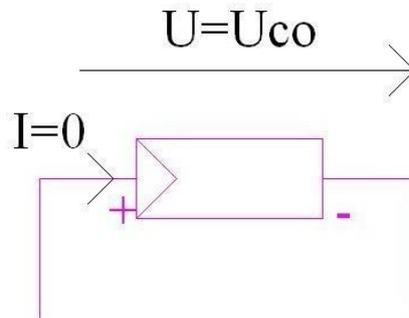


Figure (II.6) : Tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ )

### II.3.3. Raccordement des modules photovoltaïques :

#### II.3.3.1. Introduction :

Pour une installation sur mesure on opte pour un raccordement des panneaux en série ou en parallèle, ou bien une combinaison des deux. [4]

#### 1. Schéma de montage de panneaux photovoltaïques en série :

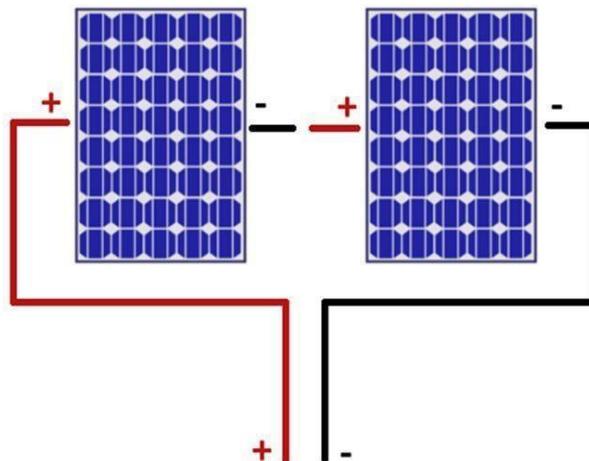


Figure (II.7) : Branchement des modules en série

Le montage de modules photovoltaïques en série est l'option à retenir lorsque l'on souhaite additionner les voltages de chaque panneau en préservant un ampérage identique.

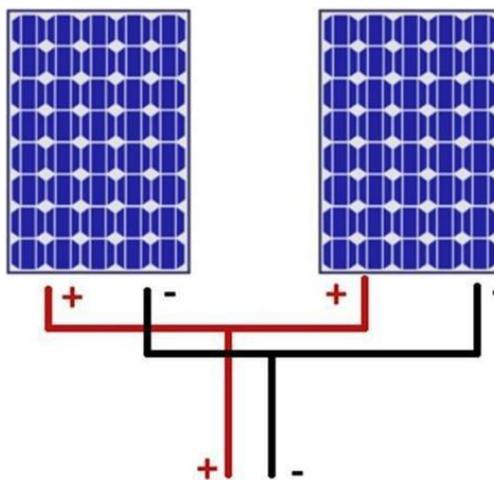
On relie les pôles positifs d'un module aux pôles négatifs d'un autre panneau. Ce type de branchement s'effectue avec des modules de même ampérage. En effet si l'on relie deux modules d'ampérage différent, l'ensemble s'aligne sur l'ampérage le plus faible.

**Exemple :** En prenant l'exemple du module de puissance 240 Wc vu précédemment, nous allons raccorder deux modules de 240 Wc identiques en parallèle.

Paramétrés électriques	Module	02 Modules reliés en série
Courant de court-circuit $I_{cc}$	8,61 A	8.61 A
Tension à vide $V_{co}$	37 V	$37 + 37 = 74$ V
Courant de puissance maximale $I_{MPP}$	8.12 A	8.12 A
Tension de puissance maximale $V_{MPP}$	29.6 V	$29.6 + 29.6 = 59.2$ V

**Tableau (II.1) :** Modules reliés en série

## 2. Schéma de montage de panneaux photovoltaïques en parallèle :



**Figure (II.8) :** Branchement des modules en parallèle

Le montage des modules photovoltaïques en parallèle additionne les intensités tandis que la tension reste identique. Ce type de raccordement influe donc sur l'ampérage et non sur le voltage

Les bornes positives de chaque module sont reliées entre elles, de même que les bornes négatives. On choisit ce type de branchement lorsque l'on souhaite avoir une forte intensité. Afin d'éviter les risques de surtension et de court-circuit, on relie des modules de même voltage. On peut par contre utiliser des modules d'intensité différente afin d'atteindre l'ampérage désiré.

**Exemple :**

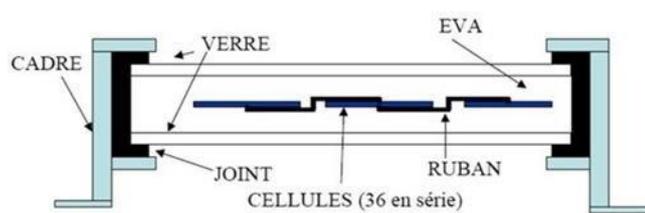
En prenant l'exemple du module de puissance 240 Wc vu précédemment, nous allons raccorder deux modules de 240 Wc identiques en parallèle. [4]

Paramétrés électriques	Module	02 Modules reliés en série
Courant de court-circuit $I_{cc}$	8,61 A	$8.61 + 8.61 = 17.22$ A
Tension à vide $V_{co}$	37 V	37 V
Courant de puissance maximale $I_{MPP}$	8.12 A	$8.12 + 8.12 = 16.24$ A
Tension de puissance maximale $V_{MPP}$	29.6 V	29.6 V

**Tableau(II.2) :** Modules reliés en parallèle

**II.3.4. Constitution d'un module photovoltaïque :**

Un module est constitué de cellules associées en série encapsulées avec d'autres composants comme la montre la figure ci-après :



**Figure (II.9) :** Coupe d'un module photovoltaïque

### - Le cadre :

- Il permet le montage et la fixation mécanique, tout en participant si nécessaire à la rigidité du module. Il doit résister à la corrosion (inox, aluminium...) et la visserie doit être choisie afin d'éviter des problèmes de corrosion.

- Le cadre est généralement en aluminium ou en aluminium anodisé avec une visserie en matériau inoxydable.

### - Le joint périphérique :

-Il évite les pénétrations d'humidité entre la face avant et la face arrière.

### - Le verre :

- La face avant du module doit être en verre ayant les caractéristiques suivantes : Bonne transparence

- Résistance à l'impact et à l'abrasion (grêle, jet de pierres, vent de sable, nettoyage au chiffon).

- Étanchéité à l'humidité.

### - Le support EVA :

-Transparence (à l'avant)

-Souplesse pour «enrober» les cellules et les connexions. Adéquation aux indices optiques du verre et des cellules.

-Le matériau généralement utilisé est de l'Acétate d'Ethylène-Vinyl (EVA).

### - Le film TEDLAR ou verre :

-Protection mécanique contre le poinçonnement et les chocs (risque de mise à nu et de bris des cellules).

-Étanchéité à l'humidité.

-Bonne évacuation de la chaleur.

-La face arrière est généralement réalisée soit en verre (modules dits

-«Bi-verre») soit en composite tedlar/alu/tedlar (plus fragile).

## II.3.5. Batterie Solaire :

### II.3.5.1. Définition :

Une installation photovoltaïque autonome (dite aussi site isolé) comporte une ou plusieurs batteries pour stocker l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques. Ces batteries spécifiques sont appelées "batterie à décharge lente" (ou pour simplifier batterie solaire).

Ces batteries sont conçues pour restituer un courant stable pendant de longues périodes en conservant leurs aptitudes à la recharge, et ceci à un grand nombre de reprises (cycles), on parle de batteries stationnaires ou à décharge lente.

### II.3.5.2. Constitution d'une batterie :

Une batterie solaire comporte des électrodes positives et négatives composées d'alliages dissemblables plongées dans un électrolyte (acide). L'ensemble est encapsulé dans un bac scellé ou muni d'un bouchon de remplissage et d'un évent. Les réactions d'oxydoréduction, qui gouvernent le fonctionnement d'une batterie sont réversibles, dans la mesure où celle-ci n'a pas été longtemps ni complètement déchargée, ni trop surchargée. Un fonctionnement prolongé dans l'un ou l'autre de ces états aboutirait à la destruction des capacités de la batterie.

Il existe des batteries solaires fonctionnant en 2 Volts, 6 Volts ou 12 Volts (tension nominale), dont la capacité (en Ampères heure) est inversement proportionnelle à la tension : les batteries ayant la capacité de stockage la plus élevée sont les batteries 2V.

Ces batteries sont différenciées par la géométrie des plaques positives (planes ou tubulaires) et par la forme de l'électrolyte (liquide, gel).

#### Exemple : Exemples de Batteries



Figure (II.10) : Exemple de Batteries

### II.3.5.3. Caractéristiques d'une batterie solaire :

Les systèmes photovoltaïques exigent habituellement des batteries qui peuvent être chargées pendant le jour et déchargées durant la nuit.

Ces batteries doivent fonctionner ainsi pendant des années, sans marquer d'anomalie ou de dysfonctionnement pour pouvoir satisfaire la demande des jours où il n'y a que peu ou pas de soleil.

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes :

**1- Autonomie** : nombre de jours pendant lesquels la batterie doit fournir la Puissance requise sans être recharger ni subir de dommage.

**2- Courant de surcharge :** une batterie permet de fournir un courant de Surcharge pendant quelques instants; c'est à dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV.

**3- Stabilisation de la tension :** une batterie permet de fournir une tension Constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

**- Les propriétés électriques suivantes sont généralement employées pour caractériser une batterie :**

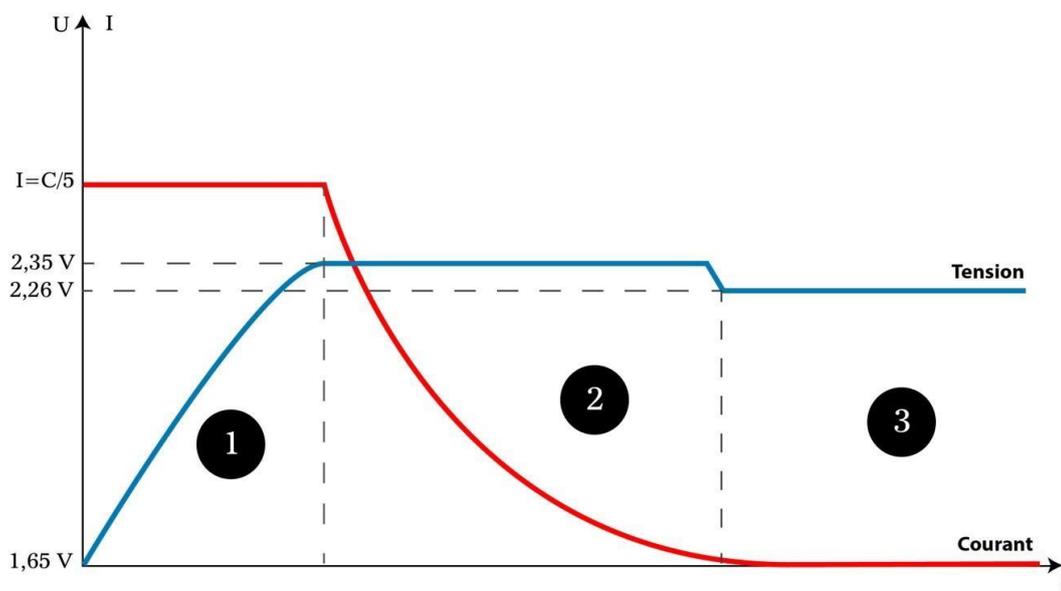
**1- Sa capacité :**

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

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

En pratique, cette capacité dépend du courant, du temps de décharge ainsi que de la température.

**2-Sa tension :** La figure ci-après reprend l'évolution de la tension durant la charge d'un élément de batterie plomb acide. La charge théorique d'une batterie au plomb s'effectue donc en trois phases. [4]



**Figure (II.11) :** l'évolution de la tension

**II.3.5.4. schéma d'évolution de la tension et du courant avec le temps : (durant la charge d'un élément plomb acide) :**

Parmi les technologies des batteries on trouve les batteries : Plomb-acide, nickel cadmium (Ni-Cd), Lithium-ion, Nickel-hydrure métallique ou Ni-MH0.

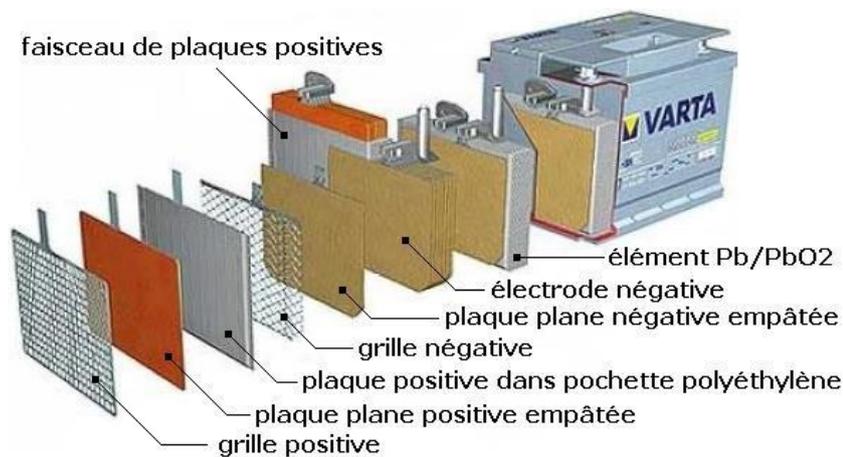
Le tableau ci-dessous résume les différentes caractéristiques des batteries courantes sur le marché.

Type	densité massique en Wh/kg	Densité volumique Wh/L	Tension d'un élément en Volt	Durée de vie (nombre de recharges)	autodécharge par mois
<b>N i c k e l Cadmium (Ni-Cd)</b>	45-80	80-150	1.25	2000	20%
<b>Nickel métal hydrure (Ni-Mh)</b>	60-110	220-330	1.25	1500	30%
<b>Lithium-Ion (Li-ion)</b>	150-190	220-330	3.7	500-1000	10%
<b>Plomb-Acide (Pb-acide)</b>	30-50	75-120	2	400-1200	5%

**Tableau (II.3) :** les différentes caractéristiques des batteries courantes

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

- Faible coût
- Un bon rendement
- Un Meilleur compromis en terme de coût / performance / entretien. Sa durée de vie.
- Caractéristique électrochimique favorable. Une large disponibilité.
- Entretien faible ou nul.
- Bonne tenue aux températures extrêmes



**Figure (II.12) :** Batterie au plomb

### 1-Technologie ouverte :



**Figure (II.13) :** Batterie ouverte

On les reconnaît facilement grâce aux petits bouchons vissés au-dessus de chaque élément. Ces bouchons comportent un très petit orifice permettant à l'hydrogène de s'échapper.

**a-Position:** Afin que les plaques soient toujours recouvertes par l'électrolyte, les batteries à électrolyte liquide doit rester en position à peu près horizontale.

**b-Entretien:** Ces batteries nécessitent un entretien régulier consistant à refaire le niveau de l'électrolyte, à l'aide d'eau distillée ou déminéralisée (eau pour fer à repasser), qui doit recouvrir les plaques de quelques millimètres. A faire tous les mois, selon utilisation et température ambiante.

**c-Appellations :** Ces batteries sont dites ouvertes, ventilées, "vented" ou encore "flooded". Ce sont nécessairement des batteries à électrolyte liquide.

## 2- Technologie AGM :



Figure (II.14) : Batterie AGM

AGM signifie Absorbed Glass Mat. Ceci définit un électrolyte liquide imprégnant un tissu ou buvard en fibre de verre (boro-silicate).

De fait, l'électrolyte est prisonnier du tissu absorbant et ces batteries acceptent des angles prononcés qui permettent, par exemple, de les utiliser dans les bateaux.

Leurs tensions de charge sont proches de celles des batteries ouvertes. Aussi, elles peuvent remplacer ces dernières sans avoir à changer ou ré-paramétrer les appareils de charge (alternateur, régulateur solaire, chargeur).

## 3- Technologie GEL :



Figure (II.15) : Technologie GEL

L'électrolyte est combiné à un gel de silice pour former un gel. Les tensions conseillées sont :

- Charge absorption : 14,2 v
- Charge d'égalisation : 14,1 à 14,3 v Charge d'entretien : 13,4 v
- Seuil de tension basse : 10,8 v
- Tension pour 80% de décharge : 11,5 v
- Intensité maximale en charge ou décharge : C/4

- Autodécharge : 3%/mois

### 4-La batterie au Li-ion :

est la batterie la plus légère qui existe sur le marché, mais avec un coût très cher. Elle est utilisée pour l'alimentation des applications électroniques qui ne demandent pas beaucoup d'énergie mais qui représente le souci du poids ( les téléphones portables par exemple) par contre la batterie de technologie Pb est la batterie la moins chère contrairement a celle au Li-ion, donc c'est la batterie la plus utilisée dans la plus part des application domestique, industrielles et autre sauf si son poids pose problème.

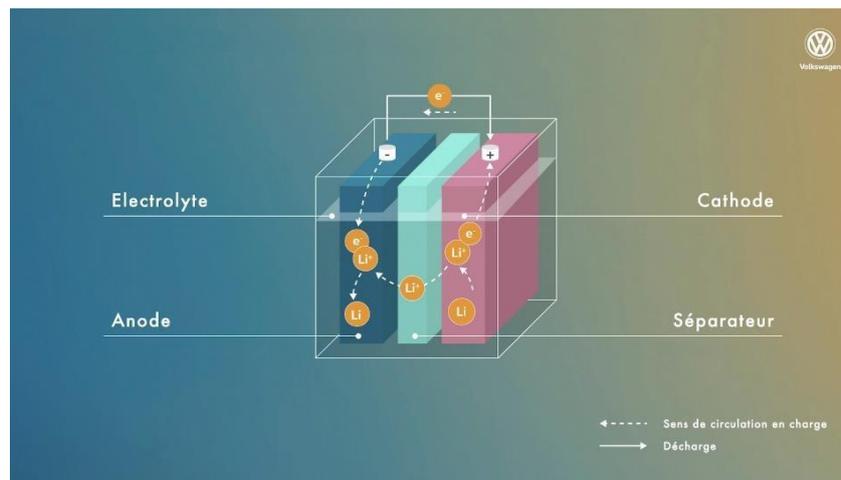


Figure (II.16) : Batterie au Li-ion

### -Principe de fonctionnement :

Dans le cas d'une batterie au plomb, elle se caractérise par deux couples « oxydant-réducteur » qui sont de nature Plomb et Oxyde de plomb qui baignent dans une solution électrolytique (ou électrolyte), liquide ou sous forme de gel.

C'est la réaction entre la solution et les électrodes qui est à l'origine du déplacement des électrons et des ions dans la solution. Ainsi, l'électrolyte a pour fonction d'assurer la conduction ionique et, plus généralement, de participer à la réaction chimique. Un isolant poreux (ou séparateur) permet de séparer les deux électrodes tout en autorisant le passage des ions.

Le courant est créé par un mouvement d'ensemble des électrons qui se déplacent de l'électrode positive à l'électrode négative en passant par un fil de métal (conducteur), pour alimenter un récepteur. Les ions issus de ce transfert d'électrons traversent l'électrolyte partant de la cathode (-) pour rejoindre l'anode (+) : La batterie se décharge. [4]

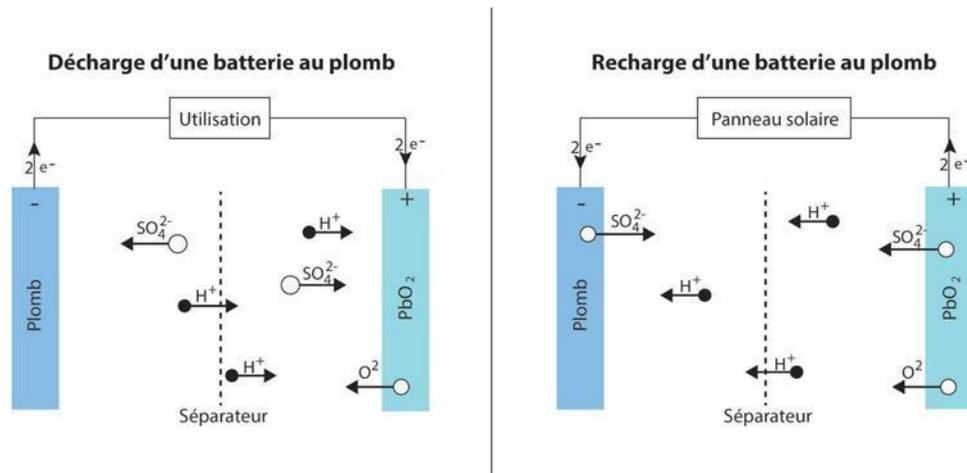


Figure (II.17) : déplacement de l'électrode

### II.3.6. Régulateur Solaire :

#### II.3.6.1. Définition :

Le régulateur de charge/décharge est l'électronique entièrement automatique à laquelle sont reliés le panneau photovoltaïque, la batterie, ainsi que les équipements destinataires de l'électricité solaire.

Sa fonction principale est de contrôler l'état de la batterie. Il autorise la charge complète de celle-ci en éliminant tout risque de surcharge et interrompt l'alimentation des destinataires si l'état de charge de la batterie devient inférieur au seuil de déclenchement de la sécurité anti-décharge profonde, prolongeant ainsi la durée de vie de la batterie qui est le seul composant fragile du générateur photovoltaïque.



Figure (II.18) : Régulateur Solaire

### II.3.6.2. Schéma d'installation solaire :

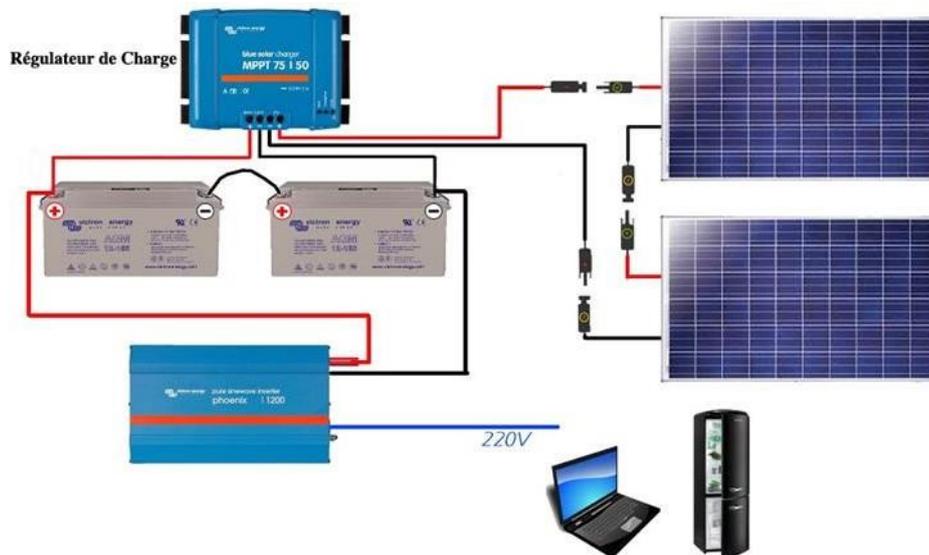


Figure (II.19) : Régulateur de charge de batterie

### II.3.6.3. Principe de fonctionnement :

Généralement il y a deux familles de régulateurs solaires PV : Les Régulateurs séries et les régulateurs shunts :

#### 1. Régulateur série :

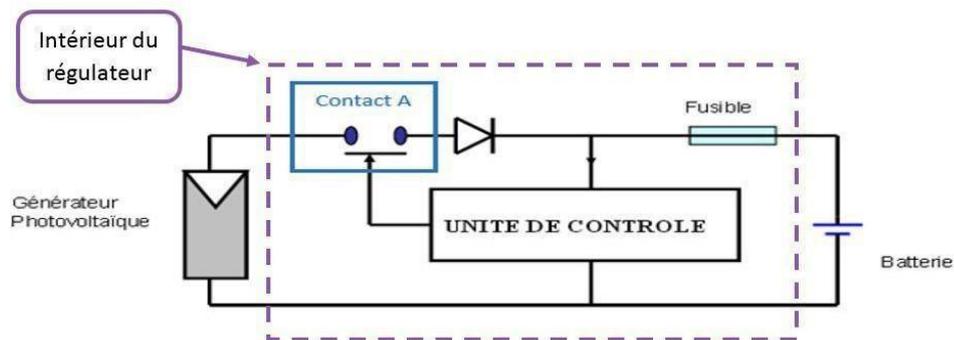


Figure (II.20) : Les Régulateurs séries

Le composant de puissance qui assure la liaison du module et la batterie est placée en série, ce dernier ferme le contact A, lorsque la batterie est déchargée le courant passe sinon il s'ouvre une fois que la batterie est chargée.

## 2. Régulateur shunt :

Le même principe que le régulateur série seulement le contact est situé entre les polarités du panneau. Le contact qui un transistor assure la liaison de puissance entre le module et la batterie, il fonctionne en deux modes :

**a- Mode saturé :** (Rien) le module shunté et l'énergie fournie est dissipée en chaleur.

**b- Mode désamorcé :** (Tous) Toute l'énergie fournie par le module passe à la batterie.

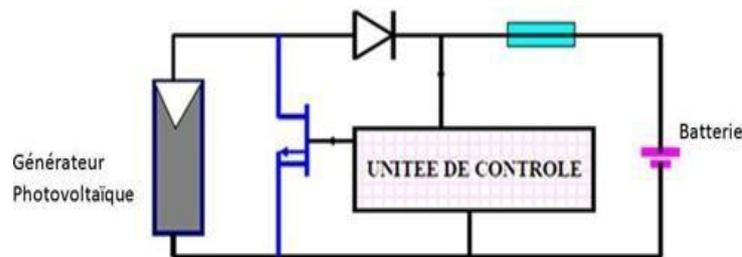


Figure (II.21) : Régulateur shunt

## II.3.7. L'onduleur Solaire :

### II.3.7.1. Définition :

Les fonctions de l'onduleur sont de convertir et d'acheminer l'électricité produite, avec un maximum d'efficacité et en toute sécurité, vers le réseau électrique, dans le cas du raccordé réseau, ou à l'utilisateur, dans le cas des sites isolés. L'onduleur convertit le courant continu des modules photovoltaïques en courant alternatif identique à celui du réseau.

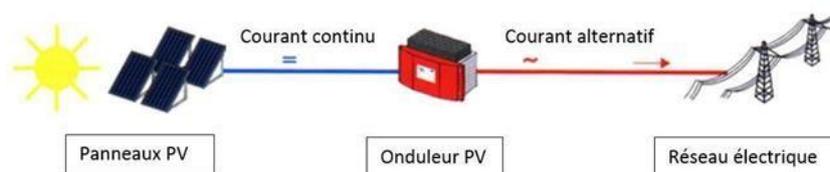


Figure (II.22) : Rôle de l'onduleur

En moyenne, l'onduleur a une durée de vie de 8 à 12 ans. Aujourd'hui, une garantie sur cinq ans est devenue la norme chez les constructeurs. Suivant les constructeurs, il est parfois possible d'étendre la garantie à 10 ans, voire à 20 ans. La durée de vie est appelée à augmenter avec l'utilisation de composants qui sont toujours de meilleure qualité et plus résistants aux hausses de température. On peut classer les onduleurs en fonction de leur différences d'intégration au système photovoltaïque : les micro-onduleurs, les onduleurs string et les onduleurs centraux.

**II.3.7.2. Rôle de l'onduleur :** L'onduleur est l'élément fondamental dans la production de l'électricité et il a deux fonctions principales :

**1. Une fonction pratique :**

Étant donné que le rôle des onduleurs est commun à toutes les applications domestique ou autre, le rôle de l'onduleur photovoltaïque, change d'une configuration a une autre, (c'est-a-dire qu'on opte pour un onduleur autonome dans le cas d'un système autonome, et un onduleur connecté au réseau dans le cas d'un système connecté au réseau ...etc.)

**2. Une fonction sécuritaire :**

Un onduleur doit fournir une tension et une fréquence compatible avec les charges électriques, dans le cas d'un système autonome, ou bien avec le réseau public, dans le cas d'une installation connectée au réseau. Dans ce cas, l'onduleur cesse toujours de fonctionner, lors de la coupure d'électricité du réseau public, pour éviter le risque d'électrocution de l'agent qui travaille dessus.

[4]

**II.3.7.3. Les différents types d'onduleurs photovoltaïques :**

Type	Description	Paramètres	Avantages
Onduleur Centralisé	-Un onduleur pour la totalité du générateur. -Utilisation d'un Boitier de raccordement entre le générateur et l'onduleur.	-Pour les montages combinant branchement en série et en parallèle. -Flux lumineux identique pour tous les modules.	-Faibles tolérances de puissance entre les modules. -Possibilité de grimper a une puissance de plusieurs Mw
Onduleur < String >	-Modules branchés en séries dans un string (rangée). -Un onduleur pour chaque string.	-Flux lumineux différents entre les rangées. -Rangées branchées au réseau via son onduleur.	-MPP tracking <sup>MPPT</sup> personnalisé pour chaque rangée. -Adaptés pour les rangées a degrés d'inclinaison différents. -Tolérance aux intensités différentes de luminosité entre les rangées. -Adaptés aux installations de grande puissance.
Les micro-onduleurs	-Branchement direct des modules sur le réseau. -Onduleur pour chaque module. -Onduleur est directement installé sur le module en usine.	-Pour les installations de petite puissance.	-Pas de câblage de courant continu. -Un module ombragé n'influe pas sur le reste de l'installation.

**Figure (II.4) :** Les différents types d'onduleurs photovoltaïques

### II.3.8. Les boîtiers de raccordements :

- Assure le niveau de raccordement entre branches de modules (string) et le régulateur directement (cas typique d'un petit générateur PV) ou un niveau intermédiaire (2èmeniveau) dans le cas d'un grand générateur PV.
- Est doté des protections nécessaires: diodes anti-retour, varistances, mise à la terre, IP, etc.
- Permet de déconnecter la branche pour intervention (installation & maintenance).



Figure (II.23) : Les boîtiers de raccordements

#### II.3.8.1. String monitor :

Il existe différentes solutions pour suivre la production et le bon fonctionnement des composants des systèmes solaire photovoltaïques. On les appelle indifféremment monitoring ou "monitorage", enregistreurs ou data loggers, et leur fonction est de nous aider à acquérir et analyser les données de production des panneaux solaires et des onduleurs ou autres.

ces boîtiers sert non seulement à raccorder les panneaux entre eux, soit en série soit en parallèle mais aussi à recevoir une carte d'acquisition des données météo ainsi que les caractéristiques des composants de l'installation.

Il existe plusieurs disposition de boîtiers de raccordement, cela dépend de la conception de la centrale, ils peuvent être :

- Sur structure, dans le cas d'une installation sur toiture, qui peuvent t'être a leurs tour raccorder dans des boîtiers muraux éventuellement si la puissance de la centrale est importante, dans ce cas on évite de raccorder l'ensemble des panneaux dans un seul boîtier, on opte beaucoup plus pour un raccordement décentralisé pour la continuité de service.
- Sur socle pour des centrales aux sols.



Montage mural



Montage sur structure



Montage sur socle

**Figure (II.24) :** Dispositions de boîtier de raccordement

#### **II.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté la configuration des différents systèmes photovoltaïques dont le système photovoltaïque autonome que nous allons traiter dans notre projet ainsi que la constitution et le principe de fonctionnement de chaque composant.

---

***Chapitre III : Dimensionnement de l'installation photovoltaïque.***

---

### **III.1. Introduction:**

Pour la réalisation d'une installation photovoltaïque, le dimensionnement reste une étape indispensable. Dimensionner un système PV c'est déterminer en fonction de sollicitations telles que l'ensoleillement et le profil de charge, l'ensemble des éléments de la chaîne PV, à savoir, la taille du générateur, la capacité de stockage, le cas échéant la puissance d'un convertisseur, voire l'inclinaison des modules et la tension d'utilisation. Une installation surdimensionnée veut dire des surcoûts, tandis qu'une installation sous dimensionnée veut dire manque de fiabilité.

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

- la première sur la demande qui dans la plupart des cas est assez grossièrement définie car souvent mal connue et qui subit des fluctuations journalières, hebdomadaires ou saisonnières.
- la seconde sur le gisement solaire au sujet duquel on se heurte à un manque crucial de données représentatives. Ce problème nous amène à calculer l'irradiation selon des données relatives au site de l'installation. Ceci démontre que la fiabilité d'une installation PV est étroitement liée au dimensionnement qui est lié à son tour à la disponibilité de données fiables.

Le mérite d'une installation PV est souvent mesuré par sa capacité à fournir de l'énergie en toute circonstance.

D'une manière générale, les paramètres à prendre en compte pour concevoir et dimensionner un système photovoltaïque sont assez nombreux et concernent : [16]

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

### **III.2. Les étapes de dimensionnement :**

#### **III.2.1. Description du local :**

Le local qu'on a choisi est un foyer situé à l'Ecole Technique de Blida, école de formation de la société Sonelgaz, ce dernier contient :

Quinze Lampes, un TV Condor, un décodeur beine sport, un Congélateur coffre de 500 litres, une Caméra de surveillance, et un Frigo.

#### III.2.2. Relevé des données météorologiques :

Pour le dimensionnement de notre projet de système photovoltaïque autonome, nous avons choisi le site de Blida où se situe l'école, les données géographiques et météorologiques sont déjà importées par le logiciel PVSYST version 7.

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

Les données doivent être connues pour chaque mois de l'année. Elles peuvent être obtenues par des organismes nationaux de météorologie ou par des calculs (outil informatique), Dans notre projet le foyer exige les paramètres d'entrées suivants : [4]

- Site géographique : Blida, Algérie
- Latitude : 36.47 °N
- Longitude : 2.83 °E
- Réflectivité du sol ou Albédo : 0.20
- Gisement du site choisi :  $H = 5.2 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ .
- Time zone : UTC+1

#### III.2.3. Bilan énergétique :

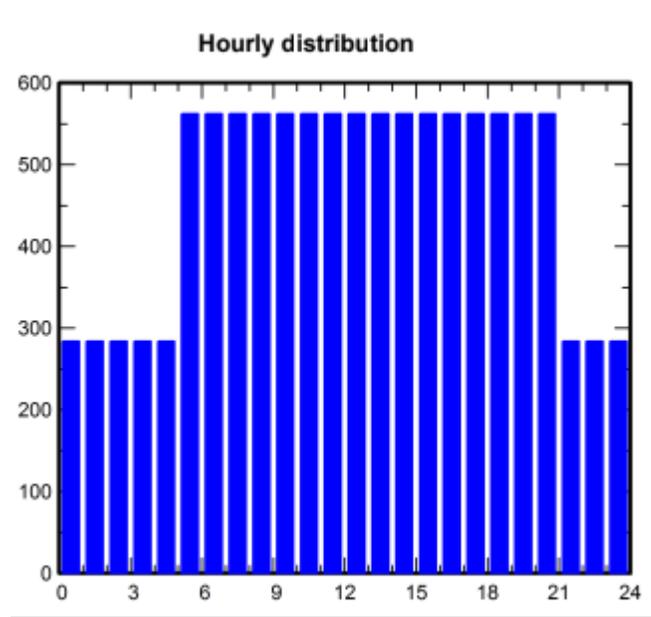
**a- Définition de la charge :** Le tableau, ci-après, représente la puissance et la durée d'utilisation des appareils électriques dont dispose le foyer.

Appareil	Quantité	Durée [Heures]	Puissance [Watts]	Energie journalière [Wh]
TV Condor 49"	1	16	20	320
Congélateur coffre 500 litres	1	24	126	3024
Caméra de surveillance	1	24	6	144
Frigo	1	24	150	3600

Lampes	15	16	15	3600
Dècodeur beine sport	1	16	33	528
<b>TOTAL</b>			<b>350</b>	<b>11216</b>

**Tableau (III.1) :** Le bilan énergétique de foyer.

**b- Répartition de la charge dans la journée :**



**Figure (III.1):** Répartition de la charge dans la journée

**III.2.4. Calcul de la puissance crête :**

Pour dimensionner le générateur PV, trois paramètres sont pris en compte, l'énergie totale de la charge et les heures d'ensoleillement maximale reçue sur le plan des modules et le rendement du Système donné par l'expression suivante: [4]

$$P_c = \frac{Ech}{H \times \eta_{sys}} \quad (III.1)$$

$P_c$  : Puissance crête du générateur PV [Wc]

$\eta_{sys}$ : Rendement du système  $\eta_{sys} = 0.75$

$E_i$ : Heures d'ensoleillement maximal [h/jour]

Exemple Blida :  $E_i = 5.2 \text{ KWh/m}^2/\text{jour}$

$E_{ch}$  : Energie totale de la charge

D'après l'expression (III.1) donc nous avons:

$$P_c = \frac{11216}{5,2 \times 1000 \times 0,75}$$

$$P_c = 2875.8 \text{ WC} \approx 3000 \text{ WC}$$

### III.2.5. Choix de l'onduleur :

Un onduleur pour un site autonome a pour rôle de convertir la tension continue délivrée par le parc de batteries en une tension alternative pour couvrir les besoins de la charge électrique.

Les critères importants pour choisir l'onduleur sont :

- **Profile de charge** : l'onduleur doit assurer la puissance journalière selon les besoins des appareils.
- **Puissance nominale** : l'onduleur doit avoir une puissance nominale supérieure à celle de la charge, avec une marge de 30%.
- **Rendement de l'onduleur** : comme indiqué précédemment, le rendement de l'onduleur doit être de 95%.
- **Consommation en veille** : l'onduleur doit avoir un système de mise en veille ou bien avoir une consommation à vide pratiquement nulle.
- **Stabilité en tension et en fréquence** : l'onduleur doit délivrer une tension secteur de (220V AC) plus au moins approchée.
- **Protection** : l'onduleur doit être muni d'une protection contre les surcharges et les courts circuits ainsi contre les températures élevées.

Nous pouvons calculer la puissance nominale de l'onduleur par la formule suivante : [4]

$$P_N > 1.3 \times P_{ch} \quad (III.2)$$

$P_N$  : Puissance nominale de l'onduleur

$$\text{Si : } P_N \leq 500 \text{ W} \quad \rightarrow \quad V_{Batterie} = 12 \text{ V}$$

$$\text{Si : } 500 \text{ W} \leq P_N \leq 1000 \text{ W} \quad \rightarrow \quad V_{Batterie} = 24 \text{ V}$$

$$\text{Si : } P_N > 1000 \text{ W} \quad \rightarrow \quad V_{Batterie} = 48 \text{ V}$$

D'après la formule (III.2) donc nous avons :

$$P_N > 1.3 \times 350$$

$$P_N > 455 \text{ W}$$

Nous avons choisi un onduleur : 12V/24V/48V.

### III.2.6. Choix du panneau et Nombre utilise dans un seul champ :

Après évaluation des besoins électriques d'une installation PV, le dimensionnement du champ PV qui consiste à calculer la puissance crête nécessaire au bon fonctionnement de l'installation.

Pour calculer le nombre de panneaux utilisé dans un seul champ, nous avons la formule suivante:

[4]

$$N = \frac{P_C}{P_u} \quad (III.3)$$

$N$  : Nombre de panneaux photovoltaïques

$P_C$ : Puissance crête du générateur PV [Wc]

$P_u$  : Puissance unitaire [Wc] [Puissance d'un panneau PV que vous aurez choisi]

D'après la formule (III.3) donc nous avons :

$$N = \frac{3000}{250} = 12 \text{ panneaux}$$

### III.2.7. Choix de régulateur solaire utilise dans un seul champ :

Le régulateur solaire, appelé aussi régulateur de charge, a pour rôle de :

- Il limite la charge quand la batterie est complètement charge.
- Il ralentit la décharge afin d'éviter les décharges profondes.
- Il indique en permanence l'état de fonctionnement du panneau solaire et l'état de charge de la batterie solaire.

Les deux éléments principaux pour choisir un régulateur de charge sont :

- La tension entre les panneaux et les batteries : le régulateur doit pouvoir accepter cette tension (en général 12V, 24V ou 48V).
- L'intensité maximale du régulateur : l'intensité du régulateur (en ampères, A) doit être supérieure à l'intensité de court-circuit des panneaux solaire auquel il est connecté. Une marge de sécurité de 10% à 20% n'est pas inutile.

Le régulateur le plus utilisé dans la technologie du photovoltaïque est le MPPT (Maximum Power Point Tracking), Ils permettent au panneau solaire de fonctionner à son point de puissance maximale, ou plus précisément, à la tension optimale pour une puissance de sortie maximale.

Pour définir le courant maximal et le voltage maximum de régulateur qui nous va aider à choisir le meilleur régulateur pour notre installation on utilise les expressions suivantes : [4]

$$I_{max \text{ Rég}} = I_{CC} \times N_{Branches \text{ en parallèle}} \times 1.3 \quad (\text{III.4})$$

$$V_{max \text{ Rég}} = V_{OC} \times N_{Panneaux \text{ en série}} \times 1.25 \quad (\text{III.5})$$

D'après la formule (III.4) donc nous avons :

$$I_{max \text{ Rég}} = 8,4 \times 10 \times 1,3$$

$$I_{max \text{ Rég}} = 109,2 \text{ A}$$

D'après la formule (III.5) donc nous avons :

$$V_{max\ Rég} = 37,84 \times 2 \times 1,25$$

$$V_{max\ Rég} = 46,75\text{ V}$$

### III.2.8. Choix de batteries solaire utilise dans un seul champ :

Le choix des batteries dans le système photovoltaïque se fait selon les deux critères les plus importants : la tension et la capacité de la batterie.

L'expression pour calculer la capacité de la batterie est : [4]

$$C_{Ah} = \frac{E_{ch} \times N_{jours\ d'autonomie}}{V_{Batterie} \times DOD} \quad (III.6)$$

$C_{Ah}$  : Capacité de la batterie [Ah]

$E_{ch}$  : Energie totale de la charge [Wh/j]

$N_{jours\ d'autonomie}$  : Nombre de jours d'autonomie en Blida = 2 jours

$DOD$  : Profondeur de décharge = 0.8

$V_{Batterie}$  : Tension du système (V) [selon la puissance de l'onduleur] = 12 volt.

D'après la formule (III.6) donc nous avons :

$$C_{Ah} = 2336.66\text{ AH}$$

### III.3. Présentation du logiciel PVSYST:

PVSYST est conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais c'est aussi un outil pédagogique très utile. Il inclut une aide contextuelle approfondie, qui explique en détail la procédure et les modèles utilisés et offre une approche ergonomique avec guide dans le développement d'un projet. PVSYST permet d'importer des données météo d'une dizaine de sources différentes ainsi que des données personnelles.

PVSYST présente les résultats dans un rapport complet, intégrant des graphiques et des tableaux spécifiques. Ces données peuvent être exportées dans un autre logiciel.



Figure (III.2) : Désignation du projet dans PVSYST.

### III.4. Les étapes de dimensionnement avec logiciel PVSYSY :

#### -Etape 1 : Désignation du projet:

Nous avons créé un nouveau projet sur le nom PFE 30-05-2023 et nous avons choisi le site géographique Blida, Algérie.

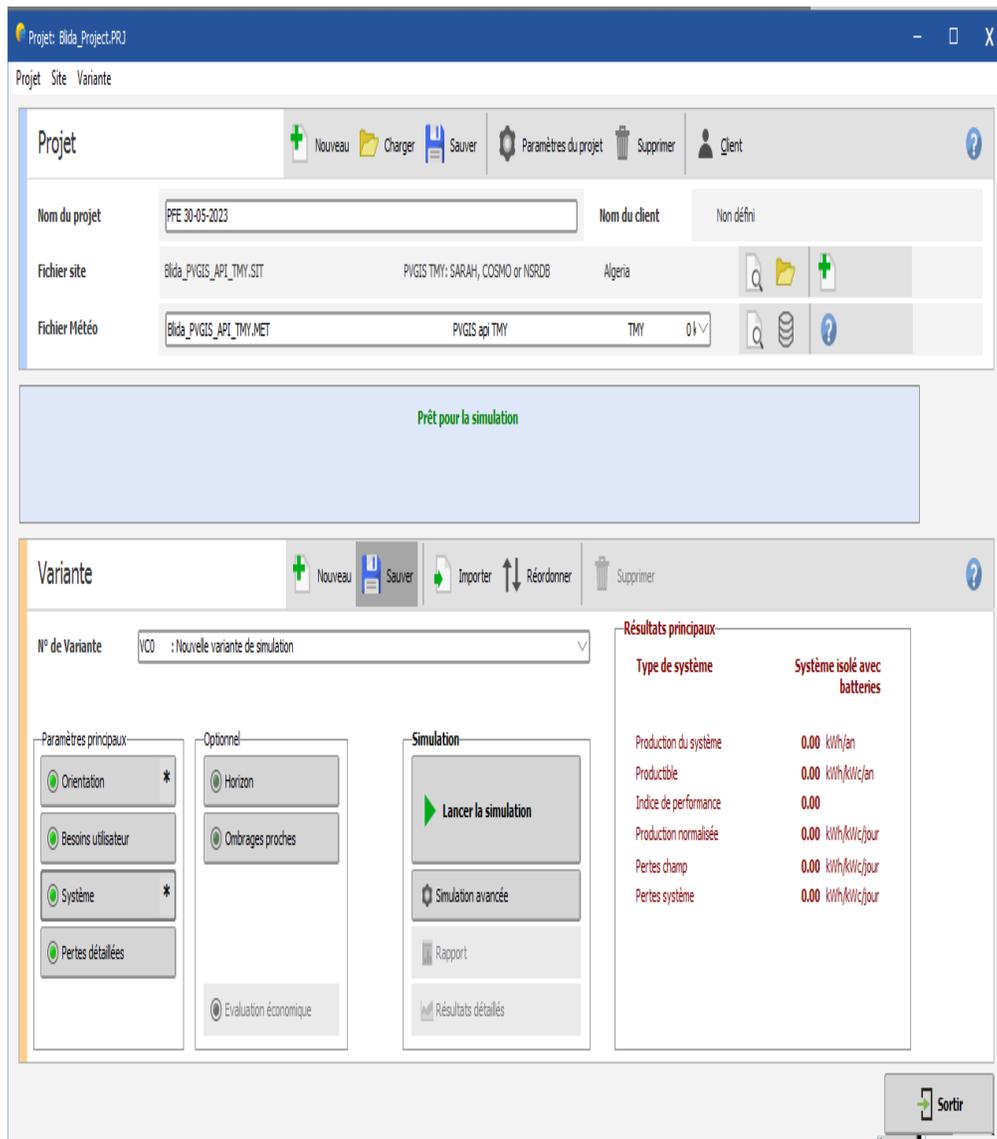
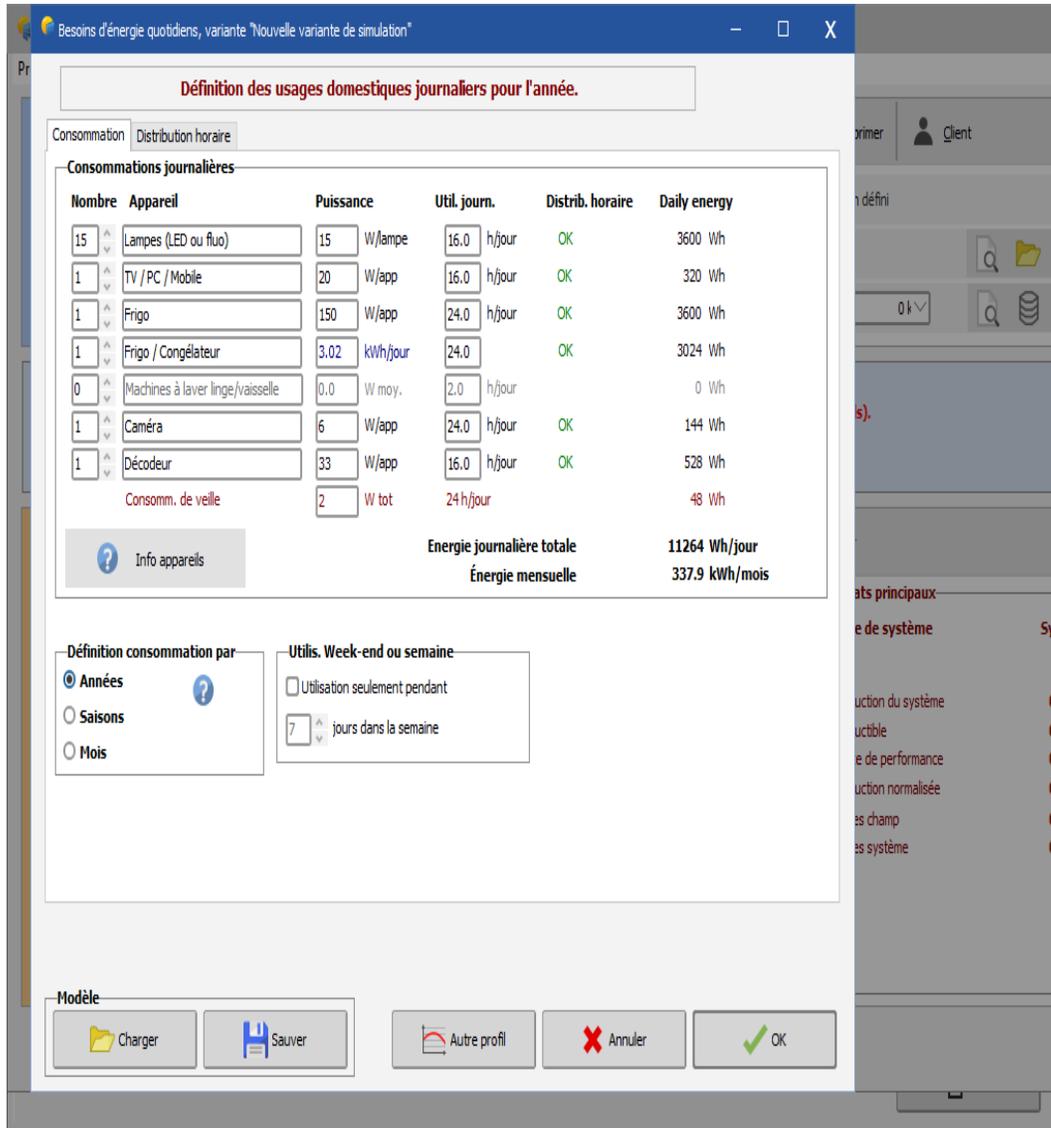


Figure (III.3) : Désignation du projet dans PVSYSY

**Etape 2 : Détermination des besoins électriques:**

En mode « autonome », PVSYST dispose d'une fenêtre où nous choisirons la consommation estimée. La consommation électrique et le temps d'utilisation. PVSYST donne l'estimation de la consommation journalière et mensuelle moyenne. Dans le cadre de notre étude et selon la figure (III.4), les résultats obtenus sont comme suit :



**Figure (III.4) : Détermination des besoins électriques**

**-Etape 3 : Distribution horaire de la charge :**

Nous avons défini les usages domestiques journaliers pour l'année.

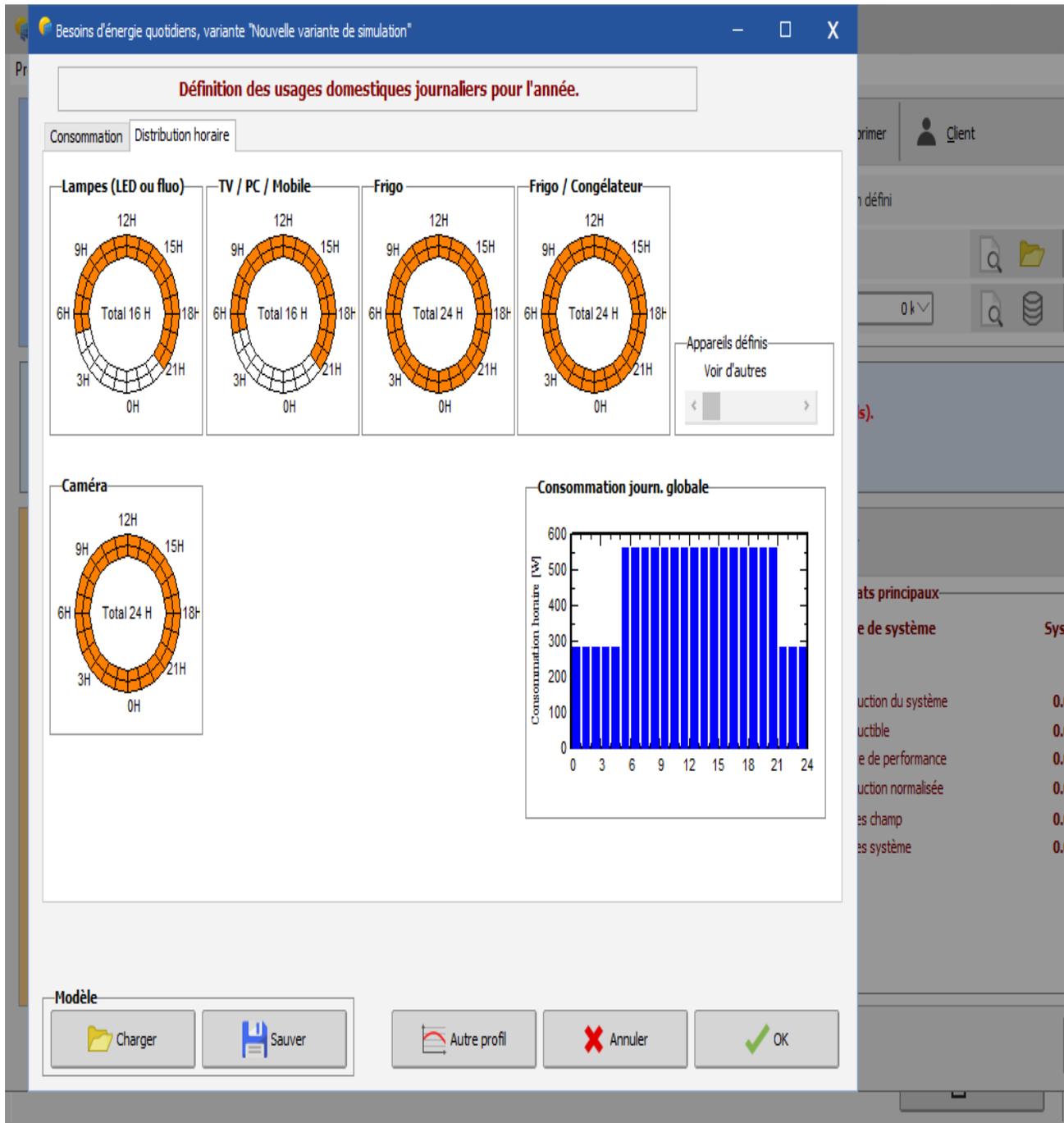


Figure (III.5) : Distribution horaire de la charge.

**-Etape 4 : Dimensionnement du parc de batteries:**

Nous avons choisi des batteries acides au plomb de 2v avec une capacité de 468Ah

Nombre de batteries totale 48, 24 batteries en série et deux on parallèle.

Définition d'un système isolé avec batteries, Variante "Nouvelle variante de simulation", Variant "Nouvelle variante de simulation"

Besoins jour. moyens 11.3 kWh/jour

Déf. la PLOL acceptable 5.0 %

Déf. l'autonomie requise 4.0 jour(s)

Tension batterie (et utilis.) 48 V

Capacité conseillée 1104 Ah

Puissance PV conseillée 5233 Wc (nom.)

Pré-dimens. détaillé

Stockage | Champ PV | Appoint | Schéma simplifié

**Procédure**

Les suggestions de pré-dimensionnement sont basées sur la météo mensuelle, et les besoins de l'utilisateur

1. - Pré-dimensionnement : Définissez les conditions de pré-dimensionnement (PLOL, autonomie, tension batterie)
2. - Stockage : Définissez le pack de batteries (les cases défaut approchent les suggestions du pré-dimensionnement)
3. - Conception champ PV : Définissez le champ PV (Module PV et mode de contrôle). Conseil : commencez avec un régulateur universel !
4. - Appoint : Définissez une éventuelle génératrice d'appoint.

**Définissez le pack de batteries**

Trier les batteries selon  tension  capacité  fabricant

Tous les fabricants

Toutes les techno.

24 batteries en série

2 batteries en parallèle

100.0 % Etat d'usure initial (nb. de cycles)

100.0 % Etat d'usure initial (statique)

Nombre de batteries 48

Nombre d'éléments 48

Tension du pack batteries 48 V

Capacité globale 936 Ah

Energie stockée (80 % DOD) 35.9 kWh

Poids total 1488 kg

Nbre de cycles à 80 % DOD 992

Energie totale stockée durant la vie de la batterie 39586 MWh

**Température batterie en opération**

Mode tempér. Fixée (local tempéré)

Température fixée 20 °C

La température est importante pour la durée de vie de la batterie. Une augmentation de 10 °C diminue la durée de vie "statique" d'un facteur 2.

**Le module PV choisi n'est pas valid  
Son modèle n'est pas calculé.**

**Besoins utilis.** Utilis. domestique

Fraction nuit 49.9 %

**Pack de batteries** 2 en parallèle, 48 V

Autonomie 3.2 jr

**Champ PV** 1 chaînes de 1 modules

PV/PLoad -21.3 Én

**Régulateur** Universel, couplage direct

Courant PV max. A

Annuler

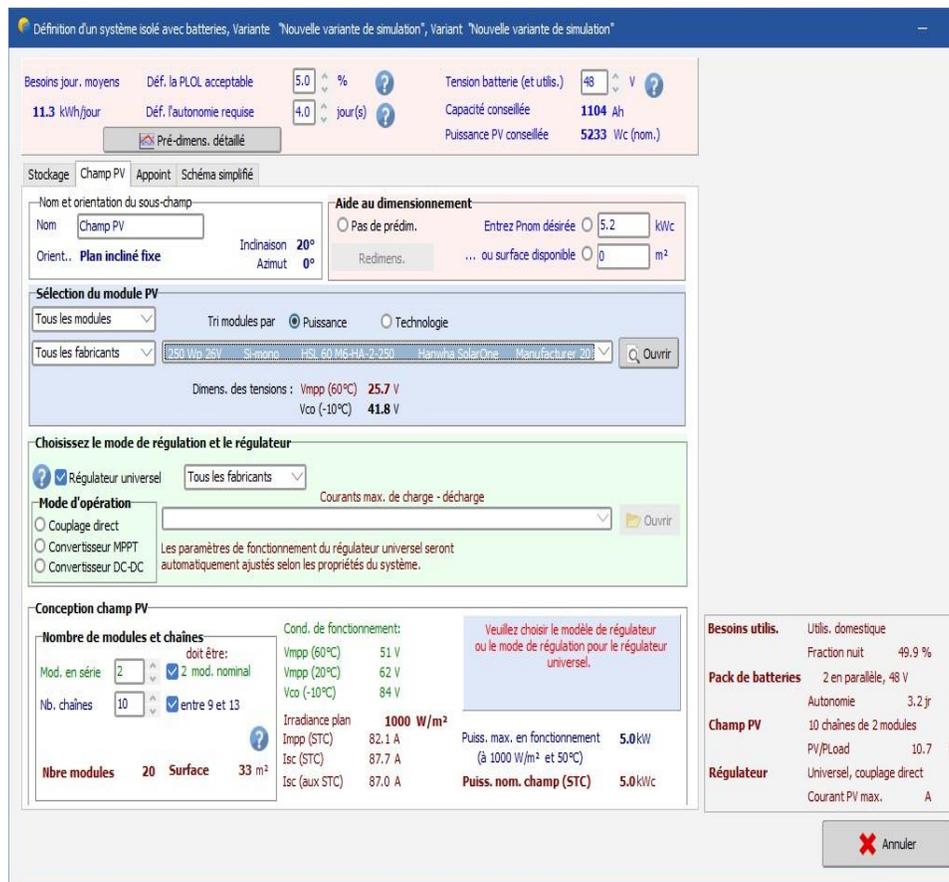
**Figure (III.6) : Dimensionnement du parc de batteries.**

**-Etape 5 : Dimensionnement du champ PV:**

Plusieurs technologies existantes pour les modules PV, pour cela le dimensionnement du module est basé selon plusieurs critères comme les besoins électriques de l'installation et le choix d'une technologie qui réduit au maximum le nombre de batteries sans avoir un manque d'énergie. Ainsi, comme c'est indiqué sur la figure (III.7) le type de module choisi dans le cas de cette présente étude est de type : 250W 26V monocristallin, hanwha solarone.

Avec un champ PV de 20 panneaux (deux en série et 10 en parallèle)

La surface du champ PV est : 33m<sup>2</sup>



**Figure (III.7) : Dimensionnement du champ PV.**

**Etape 6 : Dimensionnement du convertisseur:**

Nous avons choisi un convertisseur MPPT 1000W 48V (115A – 12A)

Les paramètres de fonctionnement du régulateur universel seront automatiquement ajustés selon les propriétés du système.

La figure (III.8) montre les caractéristiques électriques du convertisseur MPPT.

The screenshot shows a software interface for defining a PV system with batteries. The main window title is "Définition d'un système isolé avec batteries, Variante: 'Nouvelle variante de simulation', Variant: 'Nouvelle variante de simulation'".

**Top Panel (System Parameters):**

- Besoins jour. moyens: 11.3 kWh/jour
- Déf. la PLOL acceptable: 5.0 %
- Déf. l'autonomie requise: 4.0 jour(s)
- Tension batterie (et utilis.): 48 V
- Capacité conseillée: 1104 Ah
- Puissance PV conseillée: 5233 Wc (nom.)

**Stocker / Champ PV / Appoint / Schéma simplifié**

**Nom et orientation du sous-champ:**

- Nom: Champ PV
- Orient.: Plan incliné fixe
- Inclinaison: 20°
- Azimut: 0°

**Aide au dimensionnement:**

- Pas de prédim. Entrez Pnom désirée: 5.2 kWc
- ... ou surface disponible: 0 m²

**Sélection du module PV:**

- Tous les modules
- Tri modules par:  Puissance  Technologie
- Tous les fabricants: 250 Wp 26V Si-mono HSL 60 M6-HA-2-250 Hanwha SolarOne Manufacturer 201
- Dimens. des tensions: Vmpp (60°C) 25.7 V, Vco (-10°C) 41.8 V

**Choisissez le mode de régulation et le régulateur:**

- Régulateur universel
- Convertisseur de puissance MPPT
- Mode d'opération:  Couplage direct,  Convertisseur MPPT,  Convertisseur DC-DC
- Courants max. de charge - décharge: MPPT 1000 W 48 V 115 A 12 A Universal controller with MPPT conver G

**Conception champ PV:**

- Nombre de modules et chaînes: Mod. en série 2, Nb. chaînes 10
- Cond. de fonctionnement: Vmpp (60°C) 51 V, Vmpp (20°C) 62 V, Vco (-10°C) 84 V
- Irradiance plan: 1000 W/m²
- Imp (STC) 82.0 A, Isc (STC) 87.7 A, Isc (aux STC) 87.0 A
- Puiss. max. en fonctionnement (à 1000 W/m² et 50°C): 5.5 kW
- Puiss. nom. champ (STC): 5.0 kWc

**Summary Panel (Right):**

- Besoins utilis.: Utilis. domestique, Fraction nuit 49.9 %
- Pack de batteries: 2 en parallèle, 48 V, Autonomie 3.2 jr
- Champ PV: 10 chaînes de 2 modules, PV/PLoad 10.7
- Régulateur: Universel, couplage direct, Courant PV max. A

**Buttons:** Pré-dimens. détaillé, Redimens., Ouvrir, Annuler

**Figure (III.8) : Dimensionnement du convertisseur.**

### Etape 7 : Orientation des panneaux:

Pour estimer les angles optimaux d'inclinaison des modules photovoltaïques dans cette région pour lesquelles le gain énergétique est amélioré, nous avons opté pour une inclinaison de 30°

Et l'azimut 0°.

Optimisation par rapport à l'irradiation annuelle.

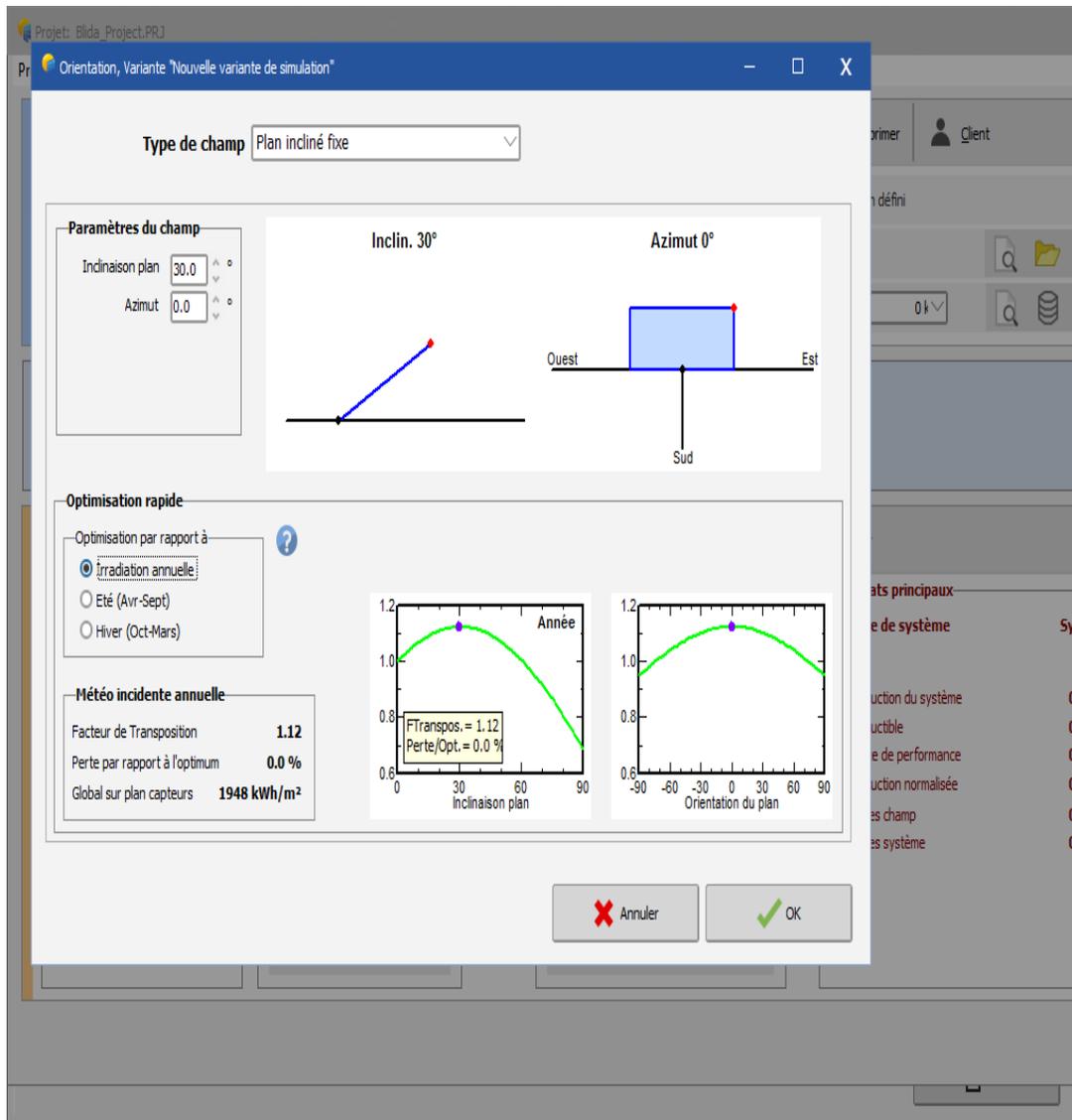


Figure (III.9) : Orientation des panneaux.

**Etape 8 : Lancement de La simulation :**

En fin nous avons lancé la simulation pour avoir le rapport des résultats (on va discuter les résultats dans le chapitre IV).

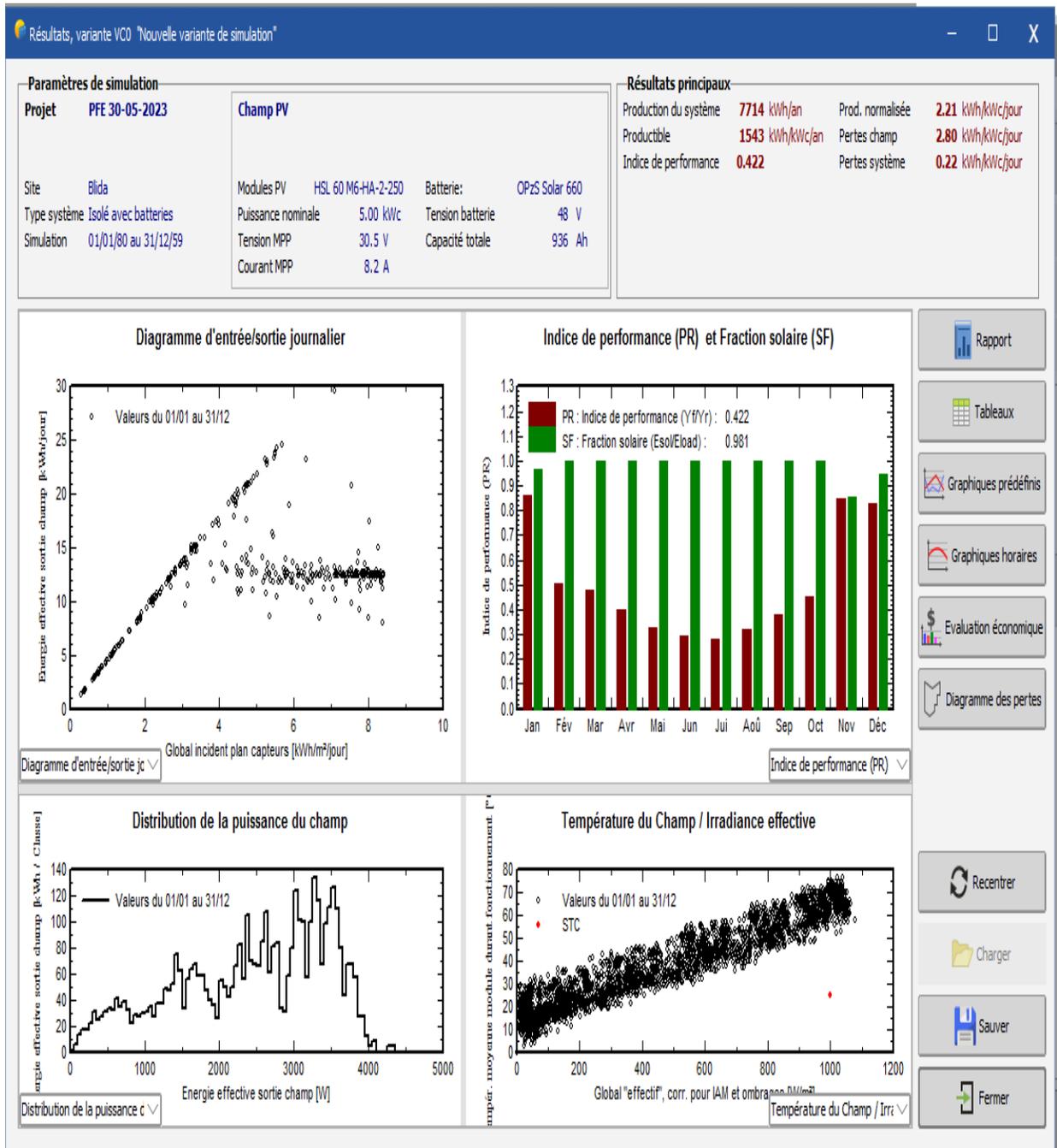


Figure (III.10) : Lancement de La simulation.

### **III.5. Conclusion :**

L'utilisation du logiciel PVSYST nous a permis d'étudier pratiquement tous les éléments de l'installation photovoltaïque autonome, en précisant les caractéristiques électriques de chaque composant.

Le résultat de la simulation est présenté sous un fichier en format PDF automatique. Le chapitre IV sera consacré pour l'interprétation de ces résultats.

---

## ***Chapitre IV : Résultats et discussion***

---

## IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation de l'étude d'une installation photovoltaïque autonome à l'aide du logiciel PVSYST 7.2, conçu pour ce type d'étude.

Pour la simulation de notre projet d'étude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome, nous avons choisi le site de Blida où se situe le foyer de l'Ecole Technique de Blida.

## IV.2. Le rapport de la simulation et interprétation des résultats :

Après la configuration de toutes les étapes de la simulation au niveau du logiciel, un rapport de cette dernière est réalisé automatiquement avec tous les résultats sous forme de tableaux et de figures.

La figure (IV.1) montre le résumé du système, le site géographique, et Table des matières.

Project: PFE 30-05-2023			
Variant: Nouvelle variante de simulation			
 <b>PVsyst V7.2.0</b> VC0: Simulation date: 30/05/23 15:06 with v7.2.0			
Project summary			
<b>Geographical Site</b> Blida Algeria	<b>Situation</b> Latitude 36.47 °N Longitude 2.83 °E Altitude 262 m Time zone UTC+1	<b>Project settings</b> Albedo 0.20	
<b>Meteo data</b> Blida PVGIS api TMY			
System summary			
<b>Stand alone system</b> <b>PV Field Orientation</b> Fixed plane Tilt/Azimuth 20 / 0 °	<b>Stand alone system with batteries</b> <b>User's needs</b> Daily household consumers Constant over the year Average 11.3 kWh/Day		
<b>System information</b> <b>PV Array</b> Nb. of modules 20 units Pnom total 5.00 kWp	<b>Battery pack</b> Technology Lead-acid, vented, tubular Nb. of units 48 units Voltage 48 V Capacity 936 Ah		
Results summary			
Available Energy 7714 kWh/year	Used Energy 4032 kWh/year	Specific production 1543 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR 42.25 % Solar Fraction SF 98.07 %
Table of contents			
Project and results summary			2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses			3
Detailed User's needs			4
Main results			5
Loss diagram			6
Special graphs			7

Figure (IV.1) : Rapport du résumé des résultats.

La figure (IV.2) montre les paramètres généraux de notre installation photovoltaïque autonome qui sont :

- Le type de système photovoltaïque, dans notre cas c'est le système isolé avec batterie.
- Les caractéristiques des modules photovoltaïques dans notre projet c'est le Hanwha SolarOne, module HSL 60 M6-HA-2-250, (20 panneaux en totale). Le nombre des panneaux en série est 2 et 10 en parallèle.
- L'énergie stockée [35.9 Kwh].
- Parc des batteries, voltage (48 volt) et capacité nominale (936 Ah).
- Type de régulateur et convertisseur (MPPT).

Nous pouvons voir aussi les différentes pertes comme :

- Les pertes de câblages.
- Pertes thermiques.
- Pertes d'inadéquation des modules.
- Pertes de qualité des modules.



**PVsyst V7.2.0**  
 VCO. Simulation date:  
 30/05/23 15:06  
 with v7.2.0

Project: PFE 30-05-2023  
 Variant: Nouvelle variante de simulation

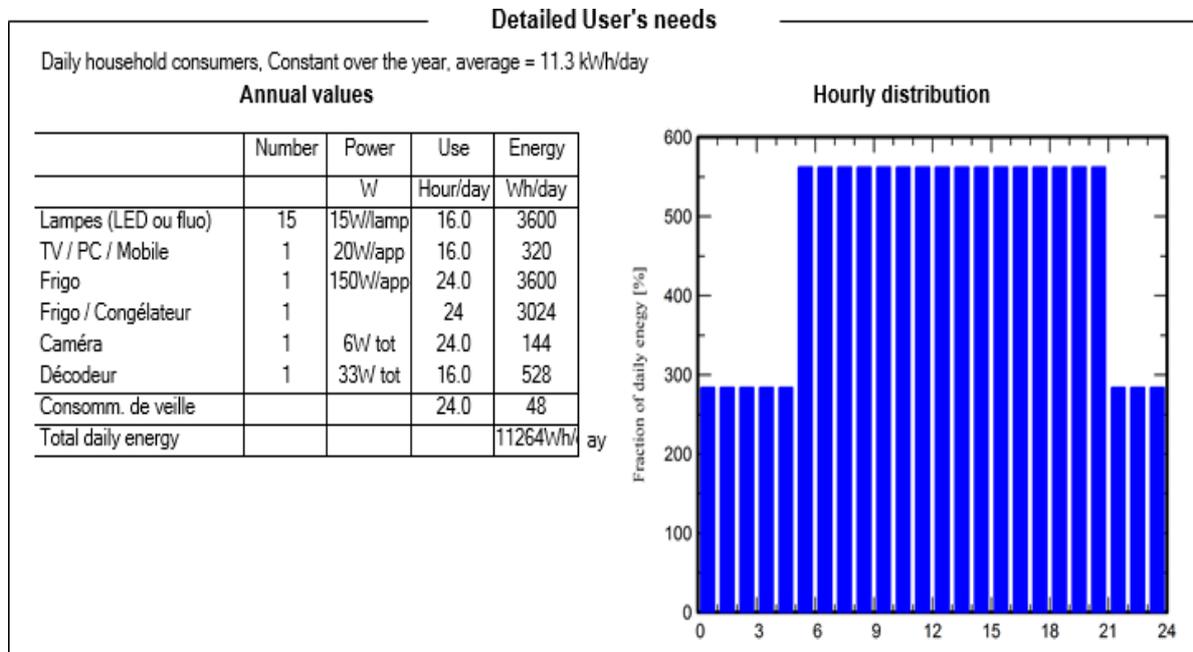
General parameters			
<b>Stand alone system</b>		<b>Stand alone system with batteries</b>	
<b>PV Field Orientation</b>		<b>Sheds configuration</b>	<b>Models used</b>
<b>Orientation</b>		No 3D scene defined	Transposition Perez
Fixed plane			Diffuse Imported
Tilt/Azimuth	20 / 0 °		Circumsolar separate
<b>User's needs</b>			
Daily household consumers			
Constant over the year			
Average	11.3 kWh/Day		

PV Array Characteristics			
<b>PV module</b>		<b>Battery</b>	
Manufacturer	Hanwha SolarOne	Manufacturer	Exide Classic
Model	HSL 60 M6-HA-2-250	Model	OPzS Solar 660
(Original PVsyst database)		Technology	Lead-acid, vented, tubular
Unit Nom. Power	250 Wp	Nb. of units	2 in parallel x 24 in series
Number of PV modules	20 units	Discharging min. SOC	20.0 %
Nominal (STC)	5.00 kWp	Stored energy	35.9 kWh
Modules	10 Strings x 2 In series	<b>Battery Pack Characteristics</b>	
<b>At operating cond. (50°C)</b>		Voltage	48 V
Pmpp	4438 Wp	Nominal Capacity	936 Ah (C10)
U mpp	54 V	Temperature	Fixed 20 °C
I mpp	82 A	<b>Battery Management control</b>	
<b>Controller</b>		Threshold commands as	SOC calculation
Universal controller		Charging	SOC = 0.92 / 0.75
Technology	MPPT converter	approx.	54.6 / 50.1 V
Temp coeff.	-5.0 mV/°C/Elem.	Discharging	SOC = 0.20 / 0.45
<b>Converter</b>		approx.	47.2 / 48.9 V
Maxi and EURO efficiencies	97.0 / 95.0 %		
<b>Total PV power</b>			
Nominal (STC)	5 kWp		
Total	20 modules		
Module area	33.0 m²		
Cell area	28.5 m²		

Array losses					
<b>Thermal Loss factor</b>		<b>DC wiring losses</b>		<b>Serie Diode Loss</b>	
Module temperature according to irradiance		Global array res.	11 mΩ	Voltage drop	0.7 V
Uc (const)	20.0 W/m²K	Loss Fraction	1.5 % at STC	Loss Fraction	1.1 % at STC
Uv (wind)	0.0 W/m²K/m/s				
<b>Module Quality Loss</b>		<b>Module mismatch losses</b>		<b>Strings Mismatch loss</b>	
Loss Fraction	-0.8 %	Loss Fraction	2.0 % at MPP	Loss Fraction	0.1 %
<b>IAM loss factor</b>					
ASHRAE Param: IAM = 1 - bo(1/cosi -1)					
bo Param.	0.05				

Figure (IV.2) : Le rapport des paramètres généraux.

La consommation de chaque appareil électrique de foyer, le bilan énergétique et l'énergie totale journalière de l'installation est de 11.3 kWh/jour, ainsi que d'autres informations relatives au système étudié sont détaillés dans le tableau de la figure (IV.3).



**Figure (IV.3) :** Rapport sur les besoins énergétiques de l'utilisateur.

D'après les résultats du tableau de la figure (IV.4) nous pouvons voir bien que l'énergie produite par le panneau photovoltaïque est proportionnelle à l'énergie incidente, et que le besoin énergétique du foyer est satisfait pendant toute l'année.

- L'énergie produite par le champ PV est estimée à 7714 kWh/an.
- L'énergie totale du besoin est 4111.4 kWh/an.
- L'excès d'énergie est estimé à 3492.4 kWh/an.



**PVsyst V7.2.0**

VC0, Simulation date:  
30/05/23 15:06  
with v7.2.0

Project: PFE 30-05-2023

Variant: Nouvelle variante de simulation

**Main results**

**System Production**

Available Energy 7714 kWh/year  
Used Energy 4032 kWh/year  
Excess (unused) 3492 kWh/year

**Loss of Load**

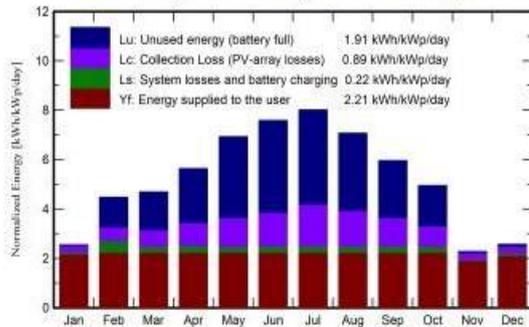
Time Fraction 1.9 %  
Missing Energy 79 kWh/year

Specific production 1543 kWh/kWp/year  
Performance Ratio PR 42.25 %  
Solar Fraction SF 98.07 %

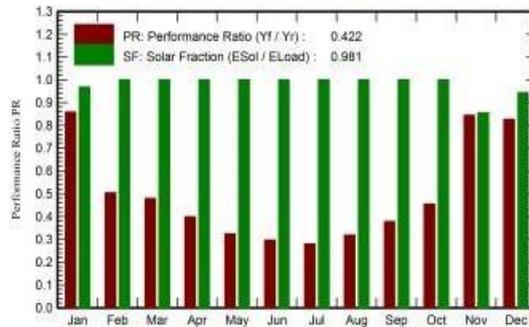
**Battery aging (State of Wear)**

Cycles SOW 92.8 %  
Static SOW 80.0 %

**Normalized productions (per installed kWp)**



**Performance Ratio PR**



**Balances and main results**

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	E_Avail kWh	EUunused kWh	E_Miss kWh	E_User kWh	E_Load kWh	SolFrac ratio
January	59.9	76.2	333.4	0.0	11.13	338.1	349.2	0.968
February	97.1	121.7	529.9	166.3	0.00	315.4	315.4	1.000
March	125.8	141.7	604.1	237.6	0.00	349.2	349.2	1.000
April	157.2	164.7	687.8	328.3	0.00	337.9	337.9	1.000
May	213.0	209.7	875.6	508.3	0.00	349.2	349.2	1.000
June	232.8	221.8	915.4	555.9	0.00	337.9	337.9	1.000
July	249.8	242.8	963.5	592.7	0.00	349.2	349.2	1.000
August	208.7	214.1	854.0	483.6	0.00	349.2	349.2	1.000
September	158.6	174.6	705.3	346.6	0.00	337.9	337.9	1.000
October	122.7	149.6	624.1	254.4	0.00	349.2	349.2	1.000
November	54.3	66.0	282.1	6.7	48.98	288.9	337.9	0.855
December	56.0	77.1	338.2	11.9	19.37	329.8	349.2	0.945
Year	1735.8	1859.9	7713.5	3492.4	79.48	4031.9	4111.4	0.981

**Legends**

GlobHor Global horizontal irradiation  
 GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings  
 E\_Avail Available Solar Energy  
 EUunused Unused energy (battery full)  
 E\_Miss Missing energy  
 E\_User Energy supplied to the user  
 E\_Load Energy need of the user (Load)  
 SolFrac Solar fraction (EUsed / ELoad)

**Figure (IV.4):** Rapport des résultats principaux.

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus le lancement de la simulation nous permet d'accéder aux différents résultats de la conception de notre système photovoltaïque d'une puissance de 05 [kwc].

Ainsi, à partir de la figure (IV.5) nous constatons les différentes pertes d'énergies, résumées sous forme d'un diagramme, elles sont très importantes justifiées par le fait que le système photovoltaïque est dimensionné par rapport aux mois les plus défavorables en termes d'ensoleillement (Novembre, Décembre et Janvier) là où nous pouvons constater qu'il n'y a pas de pertes contrairement au reste des mois de l'année où l'ensoleillement est plus élevé (voir figure IV.5) :

- Pertes champs (Température, qualité des modules, résistance, etc).
- Pertes Onduleur globales.
- Pertes système de stockage
- Le besoin d'utilisation : charge avec système de stockage.

Nous remarquons sur le diagramme des pertes sur l'année entière que l'irradiation globale incidente n'est pas complètement exploitable à cause des facteurs et pertes sur les différentes parties du système, on obtient une énergie totale de 4111 kWh.



**PVsyst V7.2.0**  
 VC0, Simulation date:  
 30/05/23 15:06  
 with v7.2.0

Project: PFE 30-05-2023

Variant: Nouvelle variante de simulation

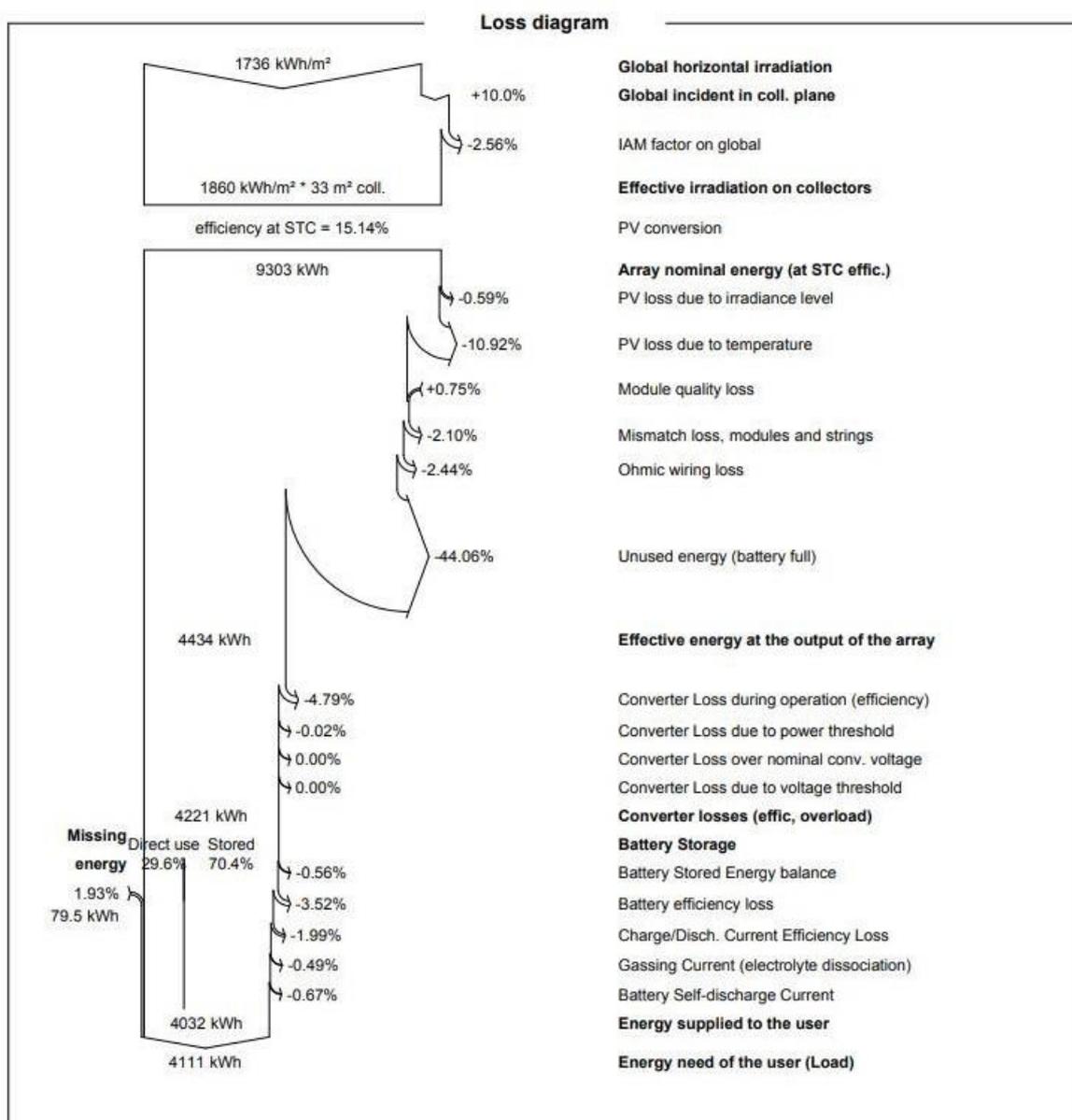


Figure (IV.5): Diagramme des pertes.

La figure ci-dessous représente le diagramme d'entrée/sortie journalière

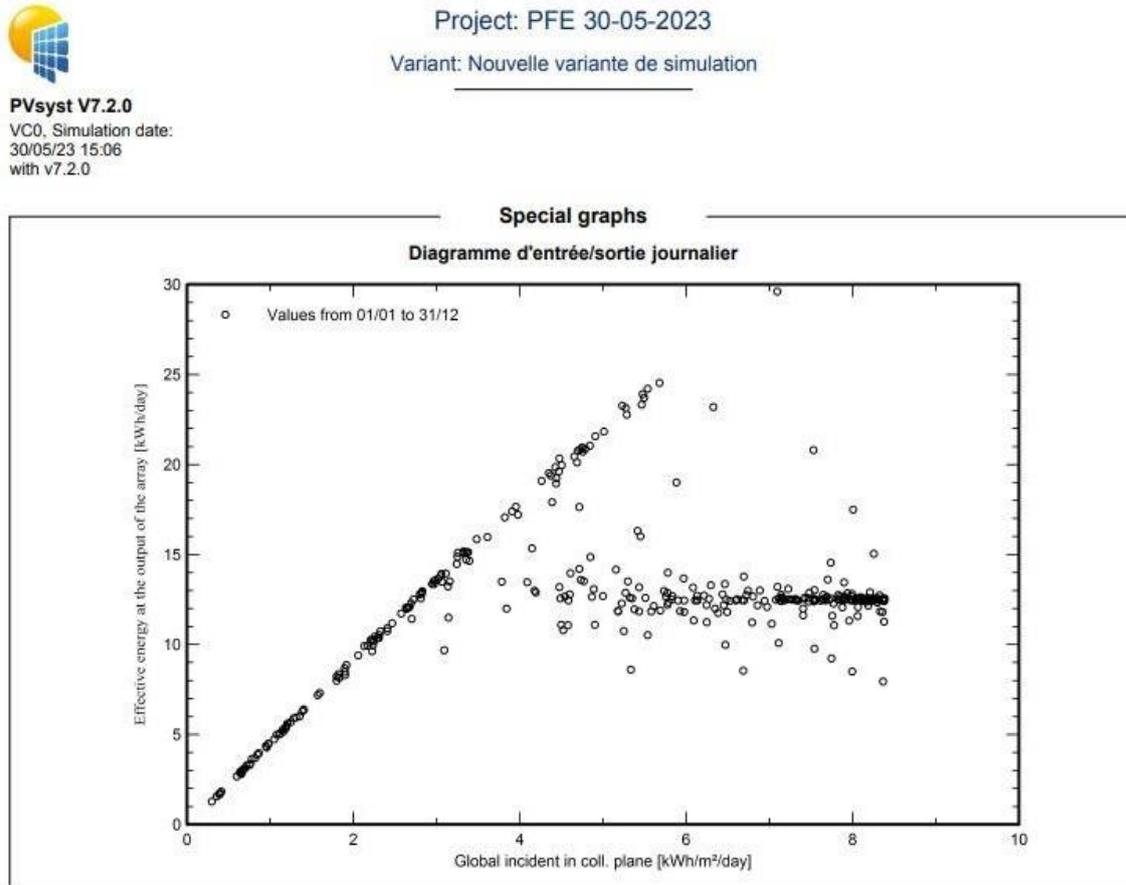


Figure (IV.6) : Diagramme d'entrée/sortie journalière.

### IV.3. Analyse et discussion :

- L'énergie produite couvre le besoin énergétique du foyer sur toute l'année.
- Le surplus d'énergie produite (Unused energy – Battery full) est dû au fait que notre dimensionnement et notre étude a été réalisée par rapport aux mois les plus défavorables (Novembre, Décembre, Janvier).
- En été le rayonnement solaire atteint son maximum, nous nous retrouvons avec un surplus de production d'électricité d'origine photovoltaïque.

#### **IV.4. Suggestions :**

Nous avons suggéré des solutions pour éviter la perte de ce surplus d'énergie, les solutions en questions sont :

- **Solution 01 :** Injecter le surplus d'énergie sur le réseau interne de l'ETB, et ce en utilisant un deuxième onduleur connecté au réseau qui sera chargé de la synchronisation et de l'injection et vendre ce surplus.
- **Solution 02 :** Alimenter un système de pompe à eau qui se trouve au niveau de l'ETB à proximité du foyer et de l'implantation de l'installation photovoltaïque que nous avons dimensionnée.

La solution 02 est la mieux adaptée car l'ETB n'a pas pour vocation de vendre de l'électricité mais plutôt de former les agents, de ce fait, faire profiter l'ETB techniquement d'une application supplémentaire en terme de support pédagogique.

Nous conseillons de mettre les panneaux PV sur la toiture du foyer afin de permettre une aération au niveau de ce foyer et ce en surimposition.

#### **IV.5. Conclusion :**

Les résultats obtenus de la simulation du système photovoltaïque autonome avec le Logiciel PVSYST, nous ont permis de constater que le dimensionnement qui est basé sur les 03 mois en saison d'automne et hiver les plus défavorables en termes d'ensoleillement et les plus énergivores en terme d'énergie (Les mois où la consommation en électricité augmente) pouvaient engendré des pertes (par rapport au surplus de production) sur les 09 mois restant, de ce fait, il serait plus judicieux, de prévoir des solutions qui permettraient d'exploiter ce surplus de production.

Nous pouvons conclure que nous pouvons choisir différentes technologies et systèmes pour satisfaire les besoins électriques d'un utilisateur, surtout dans les sites isolés tout en limitant la consommation (Consommation rationnelle) et protégeant l'environnement.

### **Conclusion générale :**

Un système photovoltaïque (PV) autonome est un système générateur d'électricité destiné à effectuer une tâche bien déterminée. Autrement dit à couvrir les besoins énergétiques des maisons isolées. Ce système se compose de plusieurs éléments principalement les modules PV qui représentent le champ de captage des rayons solaires, les batteries qui constituent le champ de stockage c'est là où nous stockons de l'énergie produite par les modules, le régulateur qui protège la batterie contre la surcharge ainsi il règle la valeur de la tension nominale, l'onduleur qui assure la conversion du courant continu en courant alternatif dont les utilisateurs ont besoin, le câblage qui relie les différents composants du système entre eux.

Afin de réussir une installation photovoltaïque autonome, nous avons mentionné une étude détaillée concernant la méthode de dimensionnement du système PV pour un foyer que nous avons choisi située au site de Blida en tenant compte de sa consommation estimée à partir des appareils électriques disponible aux foyer.

L'énergie produite dépend directement des fluctuations permanentes des conditions météorologiques de notre site d'utilisation et de la charge imposée par l'utilisateur ainsi qu'aux nombre de jours d'autonomie.

Initialement, nous avons présenté d'une façon générale Le rayonnement solaire et les appareils du mesure, Les coordonnées géographiques, Le principe de la conversion PV et les cellules PV.

Après on a étudié les différents systèmes et composants photovoltaïques.

Finalement, on a terminé notre travail par une dimensionnement et simulation de notre système photovoltaïque et nous avons discuté les résultats obtenus.

Notre système autonome, est formé de modules photovoltaïques d'une puissance nominale de 250 [Wc], Avec un champ PV de 20 panneaux deux en série et 10 en parallèle destinées à l'alimentation de nos appareils électriques qui consomment quotidiennement une énergie électrique qui se diffère d'une saison à une autre.

La puissance crête total de notre système est estimée à 5233 [Wc] en tenant compte des pertes. Quand il fait sombre, ou pendant l'insuffisance du rayonnement solaire, l'alimentation électrique des appareils se réalise exclusivement depuis le champ de stockage. Nous avons déterminé une tension nominale de fonctionnement du système : [48 V]

Afin de garantir la protection et le fonctionnement du parc de stockage, nous optons à utiliser 01 régulateurs dans notre installation.

La présence de l'onduleur dans notre application a pour but de convertir le courant continu produit par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif, qui sera distribué via nos appareils électriques.

Pour optimiser son fonctionnement sur le site de Blida, notre installation doit répondre aux critères suivants :

- Généralement, nous devons choisir des équipements confectionnés avec des matériaux développés et disponibles sur le marché, permettant d'augmenter le rendement et de baisser le coût.
- Incliner le champ photovoltaïque de 30° qui représente l'angle optimal permettant de capter une énergie quasi-constante le long de l'année, vérifiant un fonctionnement pratiquement stable, assurant ainsi un bon rendement et une augmentation de la durée de vie du stockage.

Finalement nous avons conclu que les systèmes PV autonomes peuvent jouer un rôle très important en apportant une solution réellement économique pour couvrir les besoins de base en électricité, puisque près d'un tiers de la population mondiale vit sans accès à l'électricité principalement dans les pays en voie de développement. En fait la majorité de cette population ne sera jamais reliée à un réseau national pour des questions de rentabilité liées à l'éloignement, à la faible densité de population, à la pauvreté ou au manque de besoin.

Comme perspective, Nous souhaitons continuer nos études dans les systèmes utilisant aussi bien le soleil que d'autres sources propres d'énergie

# Bibliographie :

- [1] M. Rafik BELABED, «Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque», Mémoire de fin d'études du diplôme de MASTER ACADEMIQUE EN GENIE MECANIQUE OPTION : ENERGETIQUE, 2017.
- [2] HENNOUS Chahrazet, AIT-ALLALA Kahina, «DIMENSIONNEMENT ET INSTALLATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE (APPLICATION A LA F.G.E.I.)», Mémoire de fin d'études du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique 2009.
- [3] TOUMI Nihed, KOUDA Iskandar, «ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE ET SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE AUTONOME», projet de fin d'étude licence 2021.
- [4] OUALAMI Nassim, SOUILAMAS Nesrine, IFEG, ETB, DPF/ laboratoire ENR. (Filiale du groupe SONELGAZ Spa), 2017
- [5] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Constante\\_solaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Constante_solaire) Consulté le 19/02/2023
- [6] [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9flexion\\_\(physique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9flexion_(physique)) Consulté le 19/02/2023
- [7] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Indice\\_de\\_r%C3%A9fraction](https://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_de_r%C3%A9fraction) Consulté le 19/02/2023
- [8] [https://people.mio.osupytheas.fr/~petrenko/TEACHING/OPCB343/OPCB343\\_chap3?fbclid=IwAR38BQ5emmXfeiEIXIp3FgW7uO9LJkiYbeN0gdCLB-VL7VQTxMpDthjGJcE#:~:text=Absorption%20Au%20niveau%20des%20photons,2%20niveaux%20d'%C3%A9nergie%20%C3%A9lectronique](https://people.mio.osupytheas.fr/~petrenko/TEACHING/OPCB343/OPCB343_chap3?fbclid=IwAR38BQ5emmXfeiEIXIp3FgW7uO9LJkiYbeN0gdCLB-VL7VQTxMpDthjGJcE#:~:text=Absorption%20Au%20niveau%20des%20photons,2%20niveaux%20d'%C3%A9nergie%20%C3%A9lectronique) Consulté le 25/02/2023
- [9] [https://www.palais-decouverte.fr/fileadmin/fileadmin\\_Palais/fichiersContribs/ressources-en-ligne/revue-decouverte/complements/344\\_345\\_jan\\_fev\\_07/344\\_345\\_conversion\\_photovoltaique.pdf](https://www.palais-decouverte.fr/fileadmin/fileadmin_Palais/fichiersContribs/ressources-en-ligne/revue-decouverte/complements/344_345_jan_fev_07/344_345_conversion_photovoltaique.pdf) Consulté le 25/02/2023
- [10] <http://www.obs-lp.fr/lumi/lumat.html#:~:text=Le%20spectrom%C3%A8tre%20qui%20mesure%20au,300%20nm%20%C3%A0%202500%20nm>. Consulté le 26/02/2023
- [11] <https://www.meteosuisse.admin.ch/climat/climat-de-la-suisse/surveillance-du-rayonnement/energie-solaire.html>  
<https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/envcal/html/rayonnement/index.html> Consulté le 27/02/2023
- [12] [http://sti2d.patgue.com/SitePV/Ressource\\_PV/Cellule\\_solaire\\_module\\_solaire.pdf](http://sti2d.patgue.com/SitePV/Ressource_PV/Cellule_solaire_module_solaire.pdf) Consulté le 27/02/2023
- [13] <https://photovoltaique-energie.fr/composants-d-un-systeme-photovoltaique.html> Consulté le 27/02/2023

## Bibliographie

---

- [14] <https://www.jade-technologie.com/composition-dun-panneau-solaire> Consulté le 02/03/2023
- [15] GHEZAL Abelkarim, «Aspects techniques des projets solaires PV raccordé au réseau», formation sur les études de faisabilité technico-économique des projets photovoltaïques raccordé au réseau.
- [16] Smaïl SEMAOUI, «Etude de l'électrification d'un village avec de l'énergie solaire photovoltaïque», Mémoire Pour l'obtention du titre de MAGISTER, Spécialité : Science physique Option : Physique énergétique, 2004
- [17] [http://www.solaire-offgrid.com/le-solaire-et-ses-applications/systeme-solaire-site-isole/?fbclid=IwAR3E0U60Byy75MP7b5B\\_3TfcdJdzXVdZQMBGYKNV1cT-faMC3McdhhszRKs](http://www.solaire-offgrid.com/le-solaire-et-ses-applications/systeme-solaire-site-isole/?fbclid=IwAR3E0U60Byy75MP7b5B_3TfcdJdzXVdZQMBGYKNV1cT-faMC3McdhhszRKs) Consulté le 05/03/2023
- [18] <https://6-napse.com/canicule-impact-vieillissement-materiaux/#:~:text=En%20outre%2C%20l'exposition%20directe,les%20additifs%20ou%20les%20impuret%C3%A9s>. Consulté le 20/02/2023