

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE DE TISSEMSILT  
INSTITUT DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Visa du chef de département  
des Sciences et de la  
Technologie  
Signature:.....

# ÉTUDE ET DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE POUR L'ALIMENTATION D'UNE FERME PILOTE

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
De master en «**Installations énergétiques et turbomachines**»

Encadreur: BENLEKKAM  
Mohamed Lamine, MCB  
Signature: .....  
Date: .....

Réalisé par : AIT CHALAL M. Amine  
Signature: .....  
Date: .....

## Membres du jury

HAMDI Amine, MCB.	(Président)
ZEBBAR Djallel, Prof.	(Examineur)
BENLEKKAM Mohamed Lamine, MCB.	(Encadreur)

## Dédicace

Avant tous je dis HAMDOULAH

Je dédie ce modeste travail à mes parents qui m'ont toujours soutenu et que Allah les protège.

Ainsi à mes chers frères et sœurs.

Je saisis cette occasion aussi pour dédier ce travail à tous mes enseignants qui ont contribué efficacement dans ma vie académique.

## Remerciement

En préambule à ce mémoire je remercie **ALLAH** qui m'aide et me donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Je tiens à remercier Monsieur **Mohamed Lamine BENLEKKAM**, Docteur à l'institut des sciences et de la technologie du centre universitaire El-Wancharissi de Tissemsilt, pour mener à bien ce mémoire.

Je n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

	<b>Sommaire</b>	<b>Page</b>
Dédicace.....		2
Remerciement.....		3
Liste des figures.....		7
Liste des tableaux.....		8
Nomenclature.....		9
Introduction générale.....		11
Chapitre 1 : Introduction sur l'énergie solaire Photovoltaïque.....		13
1.1 Introduction sur l'énergie solaire.....		13
1.1.1 Historique de l'énergie solaire photovoltaïque.....		13
1.1.2 Etat de l'art.....		14
1.1.3 Le gisement solaire en Algérie.....		16
1.1.4 La distribution du rayonnement solaire.....		17
1.1.4.1 Le rayonnement direct.....		17
1.1.4.2 Le rayonnement diffus.....		17
1.1.4.3 Le rayonnement réfléchi ou « l'albédo » du sol.....		18
1.1.4.4 Le rayonnement global.....		18
1.1.5 Le déclinaison du soleil.....		18
1.1.6 Le repérage d'un point sur la surface de la terre.....		19
1.1.6.1 La longitude.....		19
1.1.6.2 La latitude.....		19
1.1.7 La hauteur du Soleil, angle zénith et angle azimut.....		20
1.1.8 L'orientation optimale du système solaire.....		21
1.1.9 L'orientation et l'ensoleillement.....		21
1.2 Les systèmes photovoltaïques.....		22
1.2.1 Les différentes configurations des systèmes pv.....		22
1.2.1.1 Les système isolé ou autonome.....		22
1.2.1.2 Les système raccordé au réseau.....		23
1.2.1.3 Les système hybride.....		24
1.2.2 Le semi-conducteur.....		24
1.2.3 La jonction (p-n).....		26
1.2.4 L'effet photovoltaïque.....		29
1.2.5 Le rendement des cellules photovoltaïque.....		30
1.2.6 Le rendement électrique.....		30
1.2.7 Les caractéristiques des cellules photovoltaïques.....		31

1.2.7.1 Le courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	32
1.2.7.2 La tension à circuit ouvert $V_{co}$ .....	32
1.2.8 Regroupement des cellules.....	34
1.2.8.1 Regroupement en série .....	34
1.2.8.2 Regroupement en parallèle.....	35
1.2.8.3 Regroupement (série et parallèle) .....	36
1.2.9 Les domaines d'application.....	36
1.3 Conclusion .....	36
Chapitre 2 : Les principales composantes d'une installation photovoltaïque.....	38
2.1 Introduction.....	38
2.2 Modules photovoltaïques .....	38
2.2.1 Le silicium monocristallin.....	38
2.2.2 Le silicium poly cristallin.....	38
2.2.3 Le silicium amorphe (a-si) .....	39
2.3 Avantages et inconvénients de chaque type des cellules photovoltaïques.....	40
2.3.1 Les cellules de type Monocristallin.....	40
2.4 Les contrôleur de charge.....	41
2.4.1 Régulateur PWM.....	41
2.4.2 Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) .....	41
2.5 Les batteries d'accumulation .....	42
2.5.1 Les caractéristiques d'une batterie.....	43
2.5.1.1 La tension .....	43
2.5.1.2 La capacité d'une batterie .....	43
2.5.1.3 Les tensions de charge / décharge .....	43
2.5.1.4 Le taux d'autodécharge .....	43
2.5.1.5 La profondeur de décharge.....	44
2.5.1.6 La durée de vie .....	44
2.5.2 Les batteries au Plomb-acid .....	45
2.5.3 Les Batteries VRLA ' gel, AGM' .....	45
2.5.4 Les batteries au Nickel- cadmium et Nickel-Métal-Hydrure .....	46
2.5.5 Les batterie au lithium.....	47
2.6 Batterie en série et en parallèle .....	47
2.6.1 Branchement en série .....	47
2.6.2 Branchement en parallèle .....	48
2.6.3 Branchement en série et en parallèle.....	48
2.7 Les onduleurs .....	49

2.7.1 Le choix de l'onduleur .....	50
2.7.2 Micro-onduleur.....	51
2.8 Le câblage .....	51
2.9 Protection d'un système photovoltaïque .....	52
2.10 Conclusion .....	53
Chapitre 3 : Dimensionnement de l'installation PV .....	55
3.1 Introduction.....	55
3.2 L'objectif général.....	55
3.3 La collecte des données. (L'emplacement du Ferme, l'ensoleillement, l'angle d'inclinaison, température) .....	55
3.4 Calcul des besoins énergétiques.....	56
3.5 Dimensionnement de l'installation photovoltaïque.....	57
3.5.1 La méthode de dimensionnement.....	57
3.5.1.1 La méthode de la probabilité d'erreur dans la consommation .....	57
3.5.1.2 La méthode du mois le plus défavorable.....	57
3.5.1.3 La méthode de la moyenne annuelle .....	57
3.5.1.4 La méthode retenue .....	57
3.5.2 Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	57
3.5.2.1 L'irradiation solaire (Modèle d'Angstrom, Modèle de Coppelino .. etc).....	57
3.5.2.2 Orientation des panneaux solaire PV .....	58
3.5.2.3 Calcul de la puissance crête totale du champ photovoltaïque.....	58
3.5.2.4 La tension de fonctionnement .....	58
3.5.2.5 Détermination du nombre de modules à installer.....	59
3.5.3 Dimensionnement des batteries.....	61
3.5.4 Dimensionnement du régulateur .....	62
3.5.5 Dimensionnement des onduleurs .....	62
3.5.6 Dimensionnement des câbles .....	63
3.5.7 Détermination des éléments de protection .....	65
3.6 Conclusion .....	66
Conclusion générale .....	67
Bibliographie .....	68
Annexe A .....	71
Résumé .....	72

<b>Liste des figures</b>	<b>Page</b>
Fig. 1 - Carte du monde de l'enseillent moyen annuel. ....	16
Fig. 2 - Rayonnement solaire horizontal global en Algérie. ....	17
Fig. 3 - Les composants du rayonnement solaire. ....	18
Fig. 4 - Déclinaison du soleil en fonction du numéro du jour de l'année N. ....	19
Fig. 5 - Latitude, Longitude.....	20
Fig. 6 - Hauteur du soleil, angle zénith et angle azimut. ....	20
Fig. 7 - Angles définissant la position du soleil et l'orientation d'un plan incliné ....	21
Fig. 8 - Les coordonnées solaires. ....	21
Fig. 9 - Diagramme solaire. ....	22
Fig. 10 - Schéma d'un système photovoltaïque en mode autonome. ....	23
Fig. 11 - Mode d'exploitation d'un système photovoltaïque (connecté au réseau).....	23
Fig. 12 - Mode d'exploitation d'un système photovoltaïque (hybride).....	24
Fig. 13 - Niveaux énergétiques dans un semi-conducteur.....	25
Fig. 14 - La construction interne de la cellule solaire. ....	26
Fig. 15 - Le dopage de phosphore. ....	27
Fig. 16 - Le dopage du bore. ....	28
Fig. 17 - La bande d'énergie de la cellule solaire.....	28
Fig. 18 - Création d'une paire électron-trou.....	29
Fig. 19 - Structure d'une cellule photovoltaïque.....	30
Fig. 20 - Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque. ....	31
Fig. 21 - Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque pour $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ .....	32
Fig. 22 - Caractéristique P(V) d'une cellule photovoltaïque pour $G=1000W/m^2$ , $T=25^{\circ}C$ . ....	33
Fig. 23 - Différentes zones de la caractéristique I (V), $T = 25^{\circ}C$ . ....	33
Fig. 24 - Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule.....	34
Fig. 25 - Caractéristique résultat d'un regroupement de $N_s$ cellules en séries.....	35
Fig. 26 - Caractéristique résultat d'un Regroupement de $N_p$ cellules en parallèle. ....	35
Fig. 27 - Caractéristique Regroupement (série et parallèle). ....	36
Fig. 28 - Panneau photovoltaïque de type 'Silicium monocristallin'.....	38
Fig. 29 - Panneau photovoltaïque de type 'Silicium poly cristallin'.....	39
Fig. 30 - Panneau photovoltaïque de type 'Silicium amorphe'. ....	39
Fig. 31 - Régulateur PWM. ....	41

Fig. 32 - Régulateur MPPT. ....	42
Fig. 33 - La différence de niveau entre les deux pôles. ....	43
Fig. 34 - Nombre de cycles de vie d'une batterie en fonction du taux de PDD. ....	44
Fig. 35 - Batterie au Plomb-Acide.....	45
Fig. 36 - Batterie VRLA de type 'AGM'. ....	46
Fig. 37 - Batterie Nickel-Métal-Hydrure.....	47
Fig. 38 - Batterie au lithium Ion. ....	47
Fig. 39 - Branchement en série.....	48
Fig. 40 - Branchement en parallèle.....	48
Fig. 41 - Branchement en série et en parallèle. ....	49
Fig. 42 - Courant continue (DC) et courant alternatif (AC). ....	49
Fig. 43 - Symbole d'un convertisseur DC-AC.....	49
Fig. 44 - Les types d'onduleur solaires. ....	51
Fig. 45 - Les qualités des câbles. ....	52
Fig. 46 - Les organes de protection. ....	53
Fig. 47 - Schéma de principe pour protéger la partie DC et AC. ....	65
Fig. 48 - Système photovoltaïque raccordé à un groupe électrogène. ....	66

### Liste des tableaux

### Page

Tableau 1 - Inclinaison des panneaux en fonction de la latitude. ....	56
Tableau 2 - Tableau représente l'énergie consommée par la ferme pilote. ....	56
Tableau 3 - Caractéristique de panneau PV. ....	59

## Nomenclature

### Les abréviations

PV	Photovoltaïque
MW	Méga watt
ASA	Agence Spatiale Allemande
Si	Le silicium
GaAs	arséniure de gallium
CdTe	Le tellure de cadmium
eV	électron –volt
ZCE	Charge d'Espace
Wc	Le Watt crête
$I_{cc}$	Le courant de court-circuit
$V_{co}$	La tension du circuit ouvert
PWM	Modulation de la Largeur d'Impulsion
MPPT	Le point de puissance maximum suivi
Ni-Cd	Nickel- cadmium
Ni-MH	Nickel-Métal-Hydrure
PDD	La profondeur de décharge
DC	Courant continu
AC	Courant alternatif
VA	Voltampère

## Symboles

$\Delta$	Déclinaison du soleil
$\theta_A$	L'angle azimutal.
$\theta_Z$	L'angle Zénith.
$\theta_{el}$	Hauteur du soleil.
$\gamma_p$	La surface inclinée
$I_r$	L'enseulement
A	L'angle d'inclinaison des panneaux
$\varphi$	Latitude
S	la durée quotidienne de l'enseulement
$S_0$	la durée quotidienne de l'enseulement naturel (extraterrestre).
H	l'irradiation solaire naturelle.
$H_0$	l'irradiation solaire naturelle (extraterrestre)
$E_{pv}$	L'énergie consommée réelle
$E_C$	L'énergie consommée.
K	Facteur de correction globale.
$P_C$	Puissance crête de la centrale photovoltaïque
$V_{sys}$	La tension du système.
$P_c$	Puissance nominale
U	Tension de service d'un panneau
$I_{MAX}$	Courant de service d'un panneau
$N_m$	Nombre des panneaux
$N_{m,s}$	Les modules connectés en série
$N_{m,p}$	Les modules connectés en parallèle
$S_r$	La surface du champ
(L/I)	Taille de cellule
$I_{tot}$	Le courant total fourni par les panneaux

$C_{bat}$	La capacité des batteries
$N_j$	Le nombre de jour d'autonomie
$P_{ond}$	la puissance de l'onduleur
$P_j$	Les pertes par effet joule
$R$	Résistance du câble.
$S$	la section des câbles.
$\rho$	Résistivité du matériau conducteur (cuivre).
$\varepsilon$	La chute de tension admissible tolérée.

## **Introduction générale**

L'humanité a vécu depuis des siècles selon le rythme du jour et de la nuit. Avec l'évolution de la technologie, l'homme a amélioré son mode de vie, il a essayé de transformer des sources principalement naturelles, gratuites et surtout inépuisables pour la production de l'énergie électrique notamment le soleil. À l'heure actuelle, nous ne pouvons pas vivre sans électricité par ce qu'elle parmi les conditions nécessaires du développement d'un pays.

La production de l'énergie électrique par l'énergie solaire devient un investissement important, actuellement, il faut viser à améliorer les conditions de vie tout en réduisant le choix de mode de production de l'électricité, qui dépend du coût de l'investissement et des coûts d'exploitation. Cela doit être fait en utilisant l'énergie solaire pour produire de l'électricité.

La conversion directe de l'énergie solaire en électrique, appelée «Effet photovoltaïque» a été découverte en 1939 par le physicien français EDMOND BECQUEREL et fut étudiés et approfondie plus tard par les scientifiques.

Ce mémoire a pour but d'étudier une installation photovoltaïque pour alimenter une ferme pilote pour la production végétale en électricité. Il est composé d'une introduction générale, trois chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur les systèmes photovoltaïques, leur histoire, leur caractéristique et son principe de fonctionnement.

Par ailleurs, un exposé détaillé sur les composantes principales du système et les différents modèles des panneaux sont rapporté dans le deuxième chapitre.

Le dernier chapitre est réservé aux calculs de dimensionnement de chaque composant de l'installation photovoltaïque.

Enfin, le mémoire est clôturé par les conclusions les plus importantes.

**CHAPITRE 1**  
**INTRODUCTION SUR L'ENERGIE**  
**SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE**

## **1 Introduction sur l'énergie solaire photovoltaïque**

### **1.1 Introduction sur l'énergie solaire**

Le soleil est une étoile formée de gaz extrêmement chaud, il est constitué de 75% d'hydrogène, 23% d'hélium et 2% d'autres molécules et l'énergie du soleil est transformée sous forme de rayonnement dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsqu'elle a parcouru environ 150 millions de kilomètres du soleil vers la terre. [1]

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. [2]

Cette technologie évolue sans cesse, tout comme celles des autres composantes qui constituent les systèmes photovoltaïques, mais elle est déjà une option privilégiée pour assurer l'approvisionnement en électricité dans de nombreuses situations. [3]

Ce chapitre est consacré à l'énergie solaire et plus précisément sur les systèmes et les cellules photovoltaïques. La première partie est dédiée à l'histoire des systèmes PV et l'état de l'art, suivie par la définition du gisement solaire mondial et le potentiel solaire de l'Algérie. Plus encore, nous avons étalé en détail les systèmes et les caractéristiques des cellules PV, le regroupement de ces derniers, et finalement leur domaine d'application.

#### **1.1.1 Historique de l'énergie solaire photovoltaïque**

Les chercheurs ont travaillé pour tout apprendre sur l'énergie solaire et leurs recherches ont porté les suivants :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque. [4]

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. [5]

1955 : Des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les laboratoires Bell Téléphone (devenus aujourd'hui Alcatel-Lucent Bell Labs) développaient une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6 %. [6]

1958 : Les premiers satellites avec panneaux solaires sont envoyés dans l'espace et au même moment une cellule avec un rendement de 9% est mise au point, l'un des premiers satellites américain, l'Explorer-6 lancé en août 1959 était équipé de panneaux solaires, sa masse était de 40 Kg disposait une caméra sommaire pour voir la terre. [7]

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques a été construite à l'université de Delaware. [8]

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie. [9]

### 1.1.2 Etat de l'art

**M. Besarati et al** (2013) [10] ont évalué l'utilisation potentielle de l'énergie solaire dans différentes zones d'Iran. À cette fin, des cartes de rayonnement solaire pour divers types de surfaces réceptrices ont été établies. Les résultats ont indiqué que les surfaces fixes orientées au sud et est-ouest avec des suiveurs ainsi qu'une surface avec un suiveur d'azimut incliné à l'angle de latitude sont applicables dans les centrales photovoltaïques. Ils ont également évalué la faisabilité d'une centrale PV de 5 MW dans le pays. Les résultats ont montré qu'il existe un grand potentiel de production d'énergie à partir de l'énergie solaire dans les régions centrales et du sud du pays.

**T. Nacer et al** [11] ont analysé la faisabilité d'un système de pompage d'eau photovoltaïque pour l'irrigation dans des régions du Sahara algérien. Ce travail a montré le potentiel de pompage photovoltaïque pour couvrir les besoins en eau et sa contribution au développement durable de l'agriculture locale. Ils ont réalisé une étude de faisabilité d'un système photovoltaïque connecté au réseau de production laitière dans la région de Mitidja (nord de l'Algérie). Ils ont analysé l'apport énergétique du système photovoltaïque d'une exploitation agricole connectée au réseau dans la région de Chlef (Ouest algérien). L'impact techno-économique de l'utilisation d'un système hybride PV/éolien dans une ferme d'élevage de taille moyenne située dans le désert algérien (Sud de l'Algérie) a été évalué à l'aide du logiciel HOMER.

**Mahmood** [13] a étudié un système technologique chinois de production et d'innovation dans le domaine photovoltaïque (PV). Il contribue à une meilleure compréhension de l'émergence et du développement du système en utilisant trois niveaux d'analyse: le cadre institutionnel du système, la dynamique du marché de la composition des activités liées à l'innovation et la composition des activités innovantes des principaux acteurs. Le document a mis en évidence les principaux facteurs influencés les processus de production et d'innovation. Les résultats montrent l'importance du rôle des instruments de politique gouvernementale dans le développement des capacités locales au sein du système et son sauvetage dans les situations difficiles. Au niveau du marché, la Chine est devenue le leader mondial des installations PV depuis 2015. De même, sa part de marché mondiale a grimpé à environ 60% depuis 2013. Cette croissance rapide peut être partiellement liée aux politiques orientées vers l'exportation et implication d'acteurs internationaux au cours de la période 2005-2009.

**Sebastijan, S et al** [14] l'objectif principal de ce document est de passer en revue les systèmes photovoltaïques à la pointe de la technologie en Slovénie (Union européenne). et leur analyse de performance, qui a été comparée à celle d'autres pays du monde. L'analyse de la performance des systèmes photovoltaïques a été réalisée en différentes saisons et conditions météorologiques. Le rapport de performance est le rapport entre le rendement final et le rendement de référence et dépend principalement de l'intensité du rayonnement solaire et la température du module. En raison des conditions météorologiques et de la diversité géographique en Slovénie, le

rapport de performance est plus approprié pour décrire la performance des systèmes photovoltaïques que le rendement, qui décrit la relation entre l'énergie produite et la puissance de pointe maximale d'un système photovoltaïque. Les résultats présentés dans cet article montrent que la performance des systèmes photovoltaïques dépend principalement sur l'inclinaison et l'angle d'azimut appropriés des modules photovoltaïques, des stores et de la barrière de neige. L'analyse des données opérationnelles a été réalisée pour 3326 systèmes photovoltaïques installés entre 2005 et 2018 avec une puissance de pointe totale d'environ 258 MW. Les valeurs annuelles moyennes du rendement final, du rapport de performance, et le facteur d'utilisation de la capacité était de 1038 kWh / kWp, 68,84% et 11,85%, respectivement, pour les systèmes photovoltaïques en Slovénie.

**Maammeur, H et al** [16] ont observé que l'activité agricole a besoin d'électricité et de produits pétroliers. Compte tenu des problèmes économiques et écologiques, il est nécessaire de recourir à des énergies renouvelables qui sont gratuites, non polluantes et efficaces, et aussi des équipements qui consomment moins d'électricité dans les exploitations agricoles. En ce sens, cette étude se concentre sur la réduction des deux types de consommation d'énergie dans les fermes. dont les activités reposent principalement sur l'élevage et l'irrigation en s'alimentant à partir d'un système connecté au réseau et utilisant générateur PV et réseau électrique. Tous les appareils utilisés dans la ferme agricole étudiée et toutes les activités agricoles pratiqués dans cette ferme agricole tels que l'irrigation, l'élevage et la conservation des produits agricoles en été, a guidé notre choix pour cette ferme pilote. De ce point de vue, ce cas peut être généralisé pour le nord algérien et pour les sites mondiaux qui ont les mêmes conditions d'ensoleillement. Ainsi, l'objectif ultime est de rendre le pouvoir des fermes génératrices à Chlef (Algérie).

Ce système offrirait des avantages concrets tels que des économies de carburant et des coûts, la préservation de l'environnement l'énergie disponible (énergie excédentaire injectée dans le réseau). De plus, cette approche assure l'aide à la décision pour améliorer la consommation d'énergie de la ferme.

**Askari et Ameri** (2011) [17] ont montré que si l'Iran ne s'appropriait aucune subvention pour le carburant, avec le prix actuel du carburant diesel sur le marché, même avec le rôle minimum du générateur diesel dans un système hybride (PV/diesel), le coût de ce système devient supérieur par rapport celle du système PV/bat. Cette étude a été réalisée pour examiner l'effet de la suppression des subventions sur les combustibles et de l'adoption des sources d'énergie solaire comme source auxiliaire de l'économie des systèmes de chauffage, de refroidissement et de l'électricité résidentiels en Iran. L'objectif principal était de déterminer les alternatives futures pour la gestion de l'énergie des systèmes énergétiques combinés de refroidissement, de chauffage et d'énergie en Iran.

### 1.1.3 Le gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. La figure suivante montre le gisement solaire dans le monde.

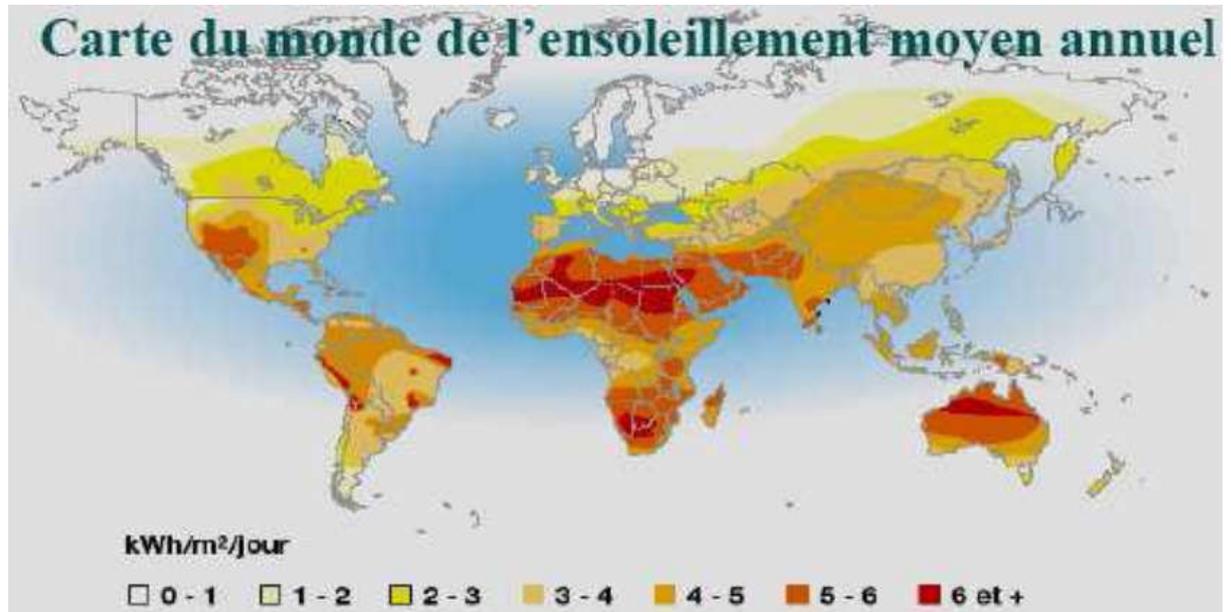


Fig. 1 - Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel. [18]

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure 2.

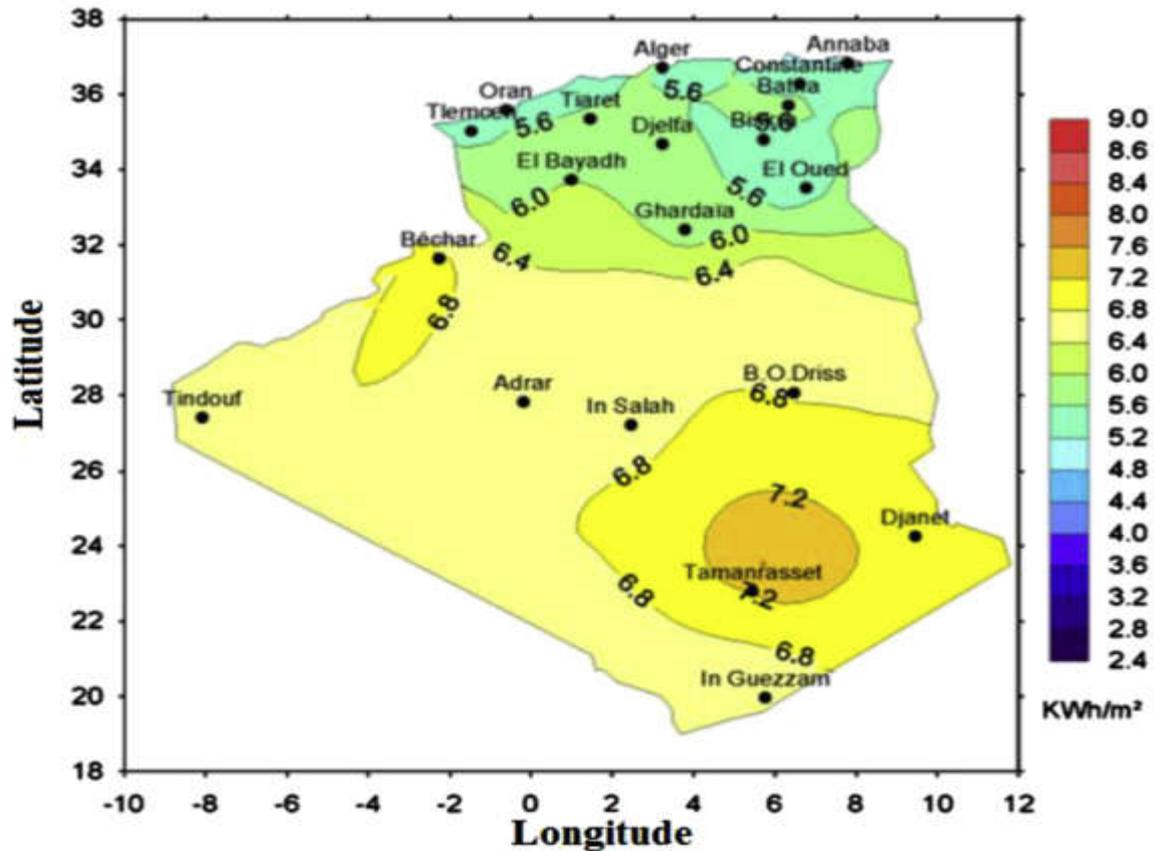


Fig. 2 - Rayonnement solaire horizontal global en Algérie. [11]

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen en, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. [18]

#### 1.1.4 Les distribution du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est une propagation d'ondes de longueur qui varie entre les  $0.2$  et  $4.10^{-6}$  [m]. Il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité. Il existe plusieurs types de rayonnement :

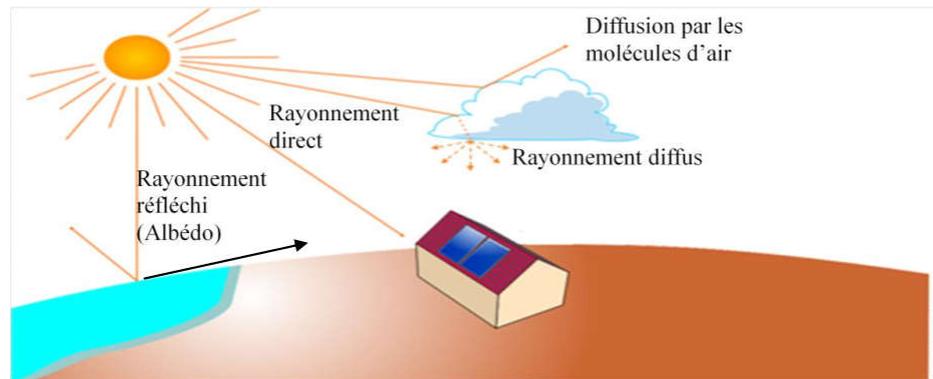
**1.1.4.1 Le rayonnement direct** : est un rayonnement qui est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux et peuvent être mesurés par un pyromètre.

**1.1.4.2 Le rayonnement diffus** : est constitué d'une lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa diffusion engendre un phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet « éclatement » des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

**1.1.4.3 Le rayonnement réfléchi ou « l'albédo » du sol :** est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement réfléchi peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige). [19]

#### 1.1.4.4 Le rayonnement global

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est la somme de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi. [20]



**Fig. 3 - Les composants du rayonnement solaire. [21]**

#### 1.1.5 La déclinaison du soleil

C'est l'angle formé par le vecteur Soleil-Terre avec le plan équatorial. Elle est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestre par rapport au plan écliptique, ce qui est traduit par les différentes saisons. Elle varie au cours de l'année entre  $-23,27^\circ$  et  $+23,27^\circ$ . Elle est nulle aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre), et maximale aux solstices d'été (22 juin) et d'hiver (22 décembre). La variation journalière de la déclinaison est d'environ  $0,5^\circ$ . Elle est calculée par une équation simple approximative :

$$\delta = 23.45 * \sin\left[360 * \frac{284 + N}{365}\right] \quad (01)$$

N : est le nombre de jours de l'année comptés à partir du 1er janvier, il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année. [22]

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la figure suivante

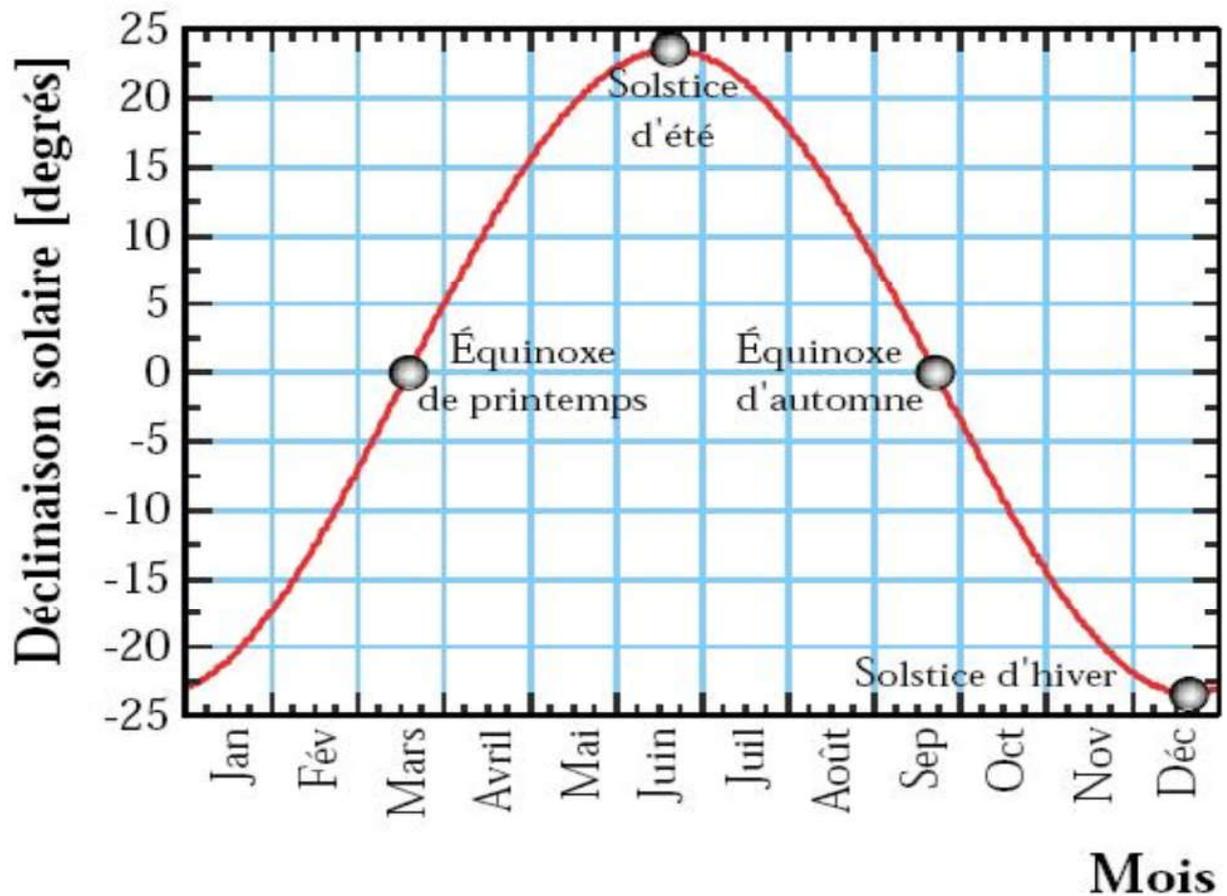


Fig. 4 - Déclinaison du soleil en fonction du numéro du jour de l'année N. [23]

### 1.1.6 Le repérage d'un point sur la surface de la terre

Un point à la surface de la terre est repéré par deux coordonnées angulaires, la latitude et la longitude.

#### 1.1.6.1 La longitude

La longitude mesure de l'angle entre le méridien du lieu et le méridien origine des longitudes (Greenwich). Le méridien de Greenwich est un méridien où la longitude est définie comme égale à 0. Les lieux qui sont situés à l'Est sont comptés avec le signe + (est). Il y a vingt-trois méridiens séparés de  $15^\circ$  donnant naissance aux 24 fuseaux horaires.

#### 1.1.6.2 La latitude

La latitude permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle varie de  $0^\circ$  à l'équateur à  $90^\circ$  au pôle Nord. [24]

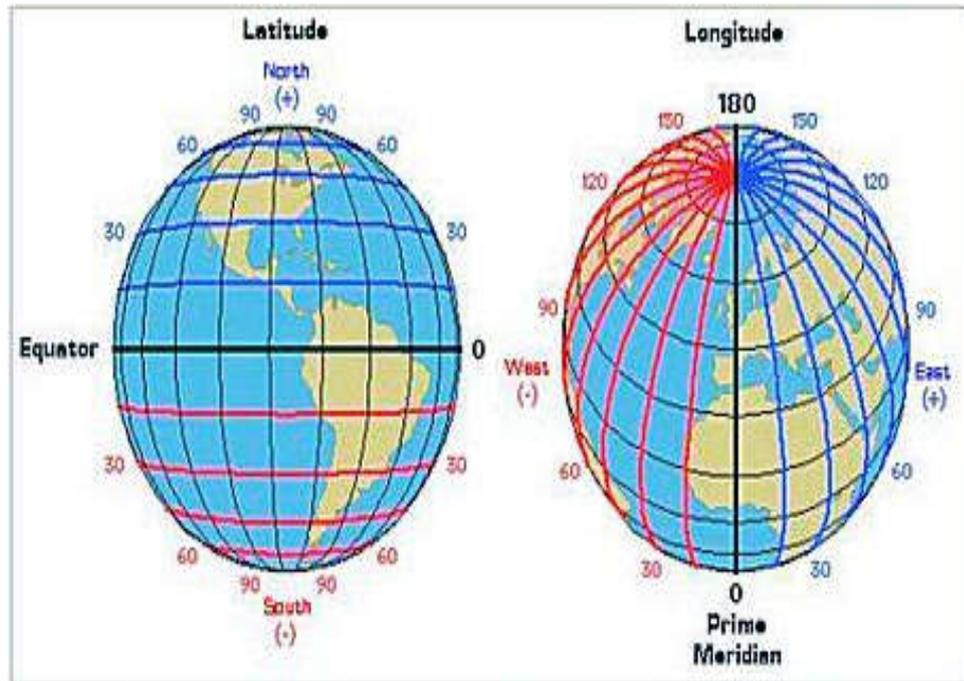


Fig. 5 - Latitude, Longitude.

### 1.1.7 La hauteur du Soleil, angle zénith et angle azimut

La hauteur solaire est l'angle formé entre la position du soleil et l'horizon (du point de vue de l'observateur). Elle est égale à  $0^\circ$  au lever/coucher du soleil et atteint  $90^\circ$  au zénith. L'angle zénithal est l'angle complémentaire de la hauteur solaire. Il se déduit d'une relation trigonométrique et est également compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ . [25]

L'angle du zénith est défini comme l'opposé de la hauteur du soleil, qui est égale à  $90^\circ$

L'angle azimutal ( $\theta_A$ ) est l'angle entre le nord géographique et le point de l'horizon situé sous le soleil. Il est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre. Les angles sont illustrés à la figure 6.[27]

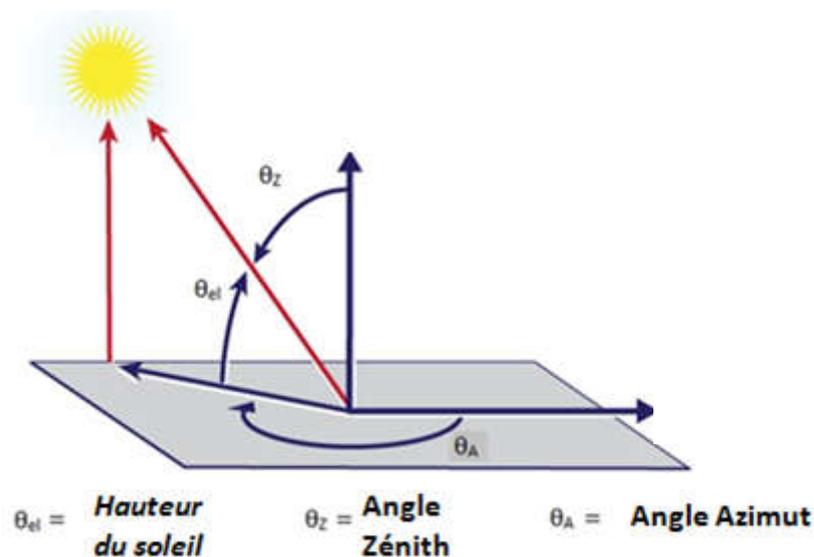


Fig. 6 - Hauteur du soleil, angle Zénith et angle Azimut.

### 1.1.8 L'orientation optimale du système solaire

La figure 7 montre les angles du soleil, l'azimut et l'angle d'inclinaison pour définir l'orientation d'une surface inclinée. Tous ces angles doivent être pris en compte pour définir un angle d'incidence ( $\theta$ ).

La figure 7 illustre les angles du soleil, l'azimut et l'angle d'inclinaison pour définir la position d'une surface inclinée. L'angle d'incidence ( $\theta$ ) dépend de tous ces angles. L'éclairement énergétique maximal peut généralement être obtenu par une surface perpendiculaire au soleil.

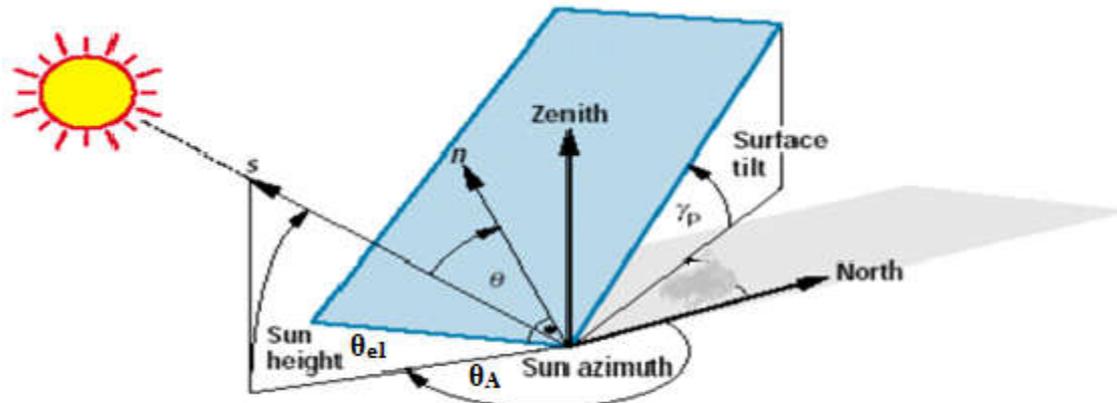


Fig. 7 - Angles définissant la position du soleil et l'orientation d'un plan incliné. [26]

### 1.1.9 L'orientation et l'ensoleillement

L'ensoleillement est caractérisé par la trajectoire du soleil et sa durée. Les conditions géométriques entre le soleil et la terre déterminent la position relative du soleil qui est repéré par son azimut et sa hauteur angulaire.

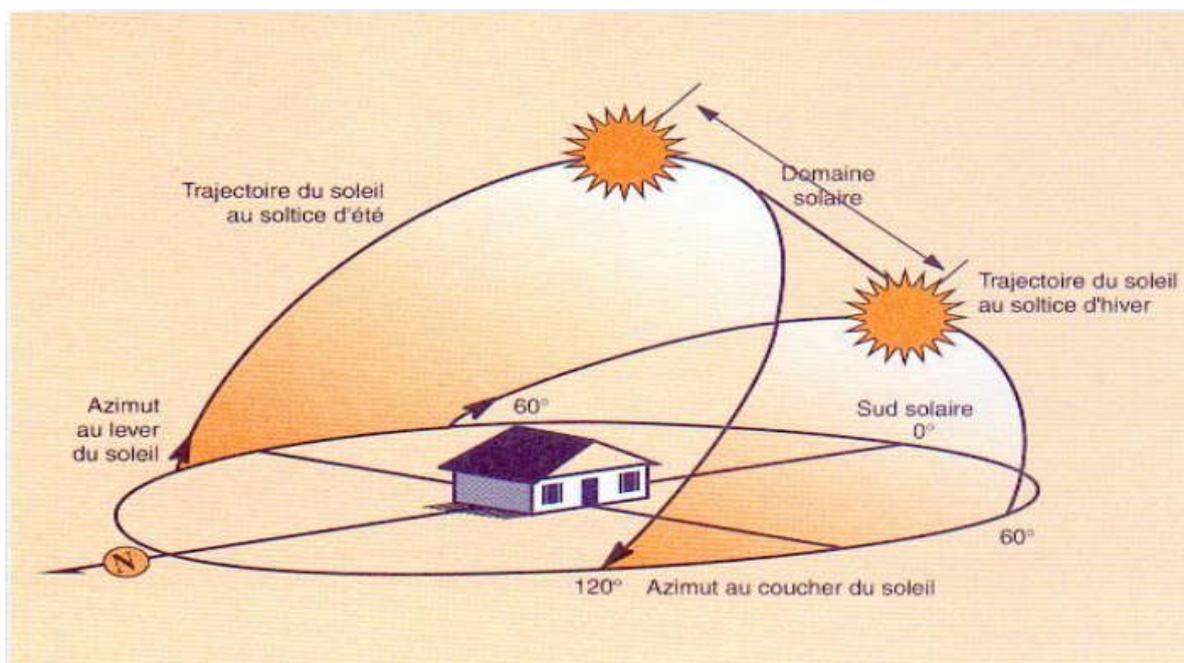


Fig. 8 - Les coordonnées solaires. [19]

Selon la date, l'heure et l'orientation, l'exposition solaire est différente, le diagramme ci-dessous de la figure 9 représente les courses apparentes du soleil dans le ciel et montre la position du soleil à tout moment sous une latitude donnée. Les courbes solaires en un lieu donné pour des dates déterminées généralement le 15 du mois et pour une période de six mois. Ainsi est connue la hauteur et l'azimut du soleil. [19]

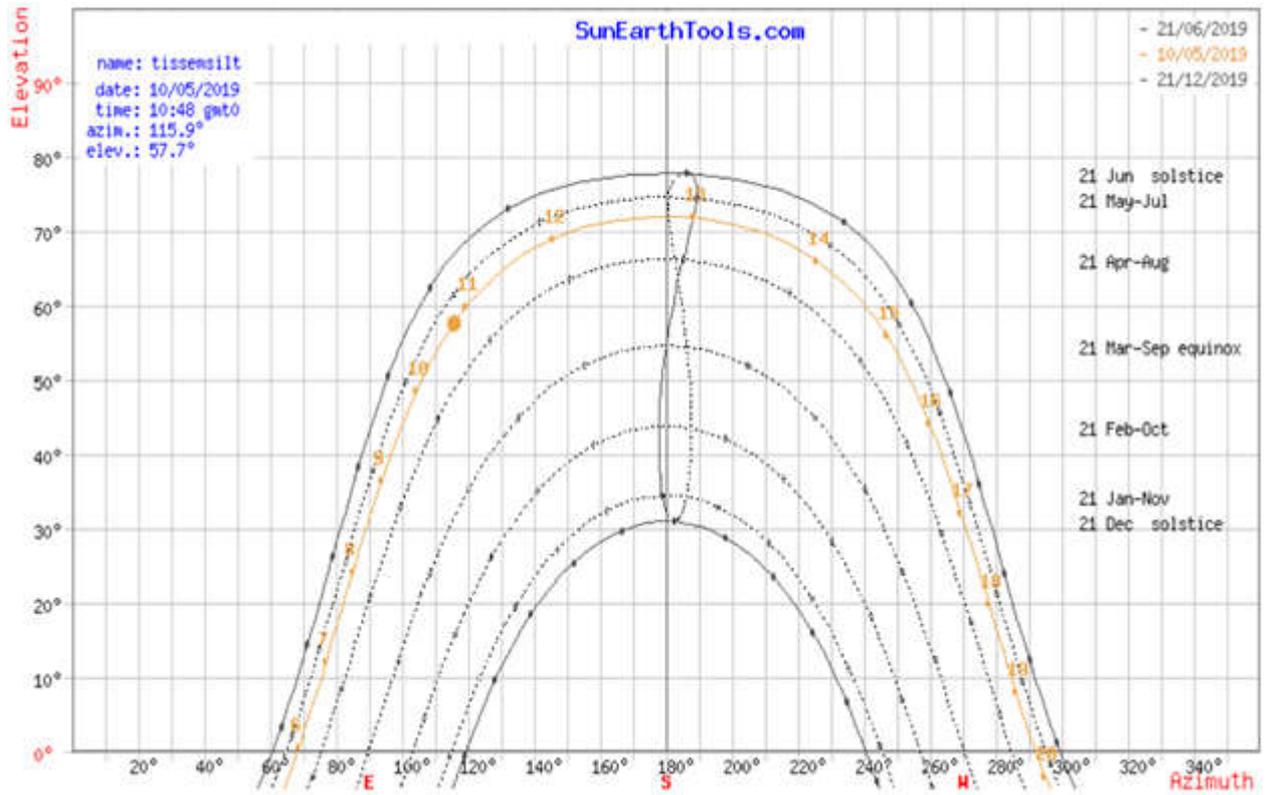


Fig. 9 - Diagramme solaire. [27]

## 1.2 Les systèmes photovoltaïques

### 1.2.1 Les différentes configurations des systèmes PV

#### 1.2.1.1 Le système isolé ou autonome

Ce sont des systèmes qui fonctionnent toute la journée 24 h/24 h avec l'énergie solaire convertie en énergie électrique sans l'aide d'aucune autre source électrique c'est seulement avec l'énergie solaire, mais à l'aide de plusieurs composants et les plus importants c'est bien les batteries qui aident à emmagasiner de l'énergie électrique.

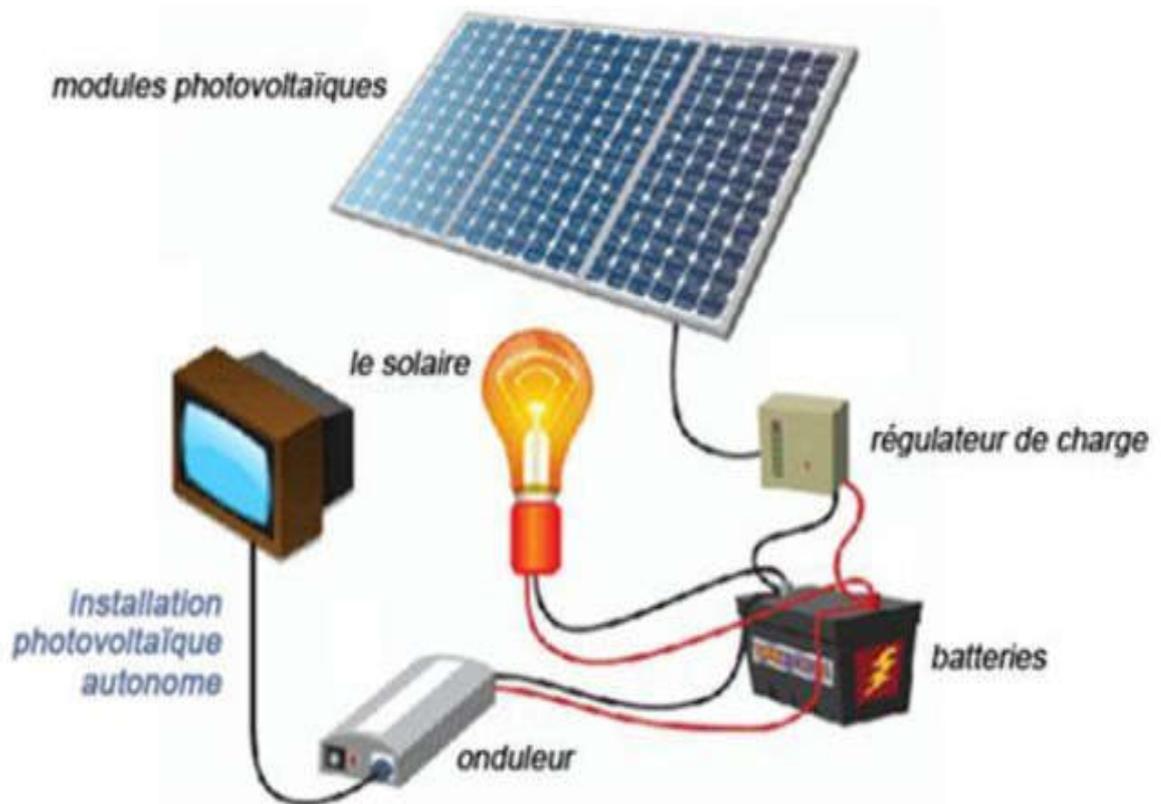


Fig. 10 - Schéma d'un système photovoltaïque en mode autonome.

#### 1.2.1.2 Le système raccordé au réseau

Un système photovoltaïque connecté au réseau, c'est un système couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. [21]

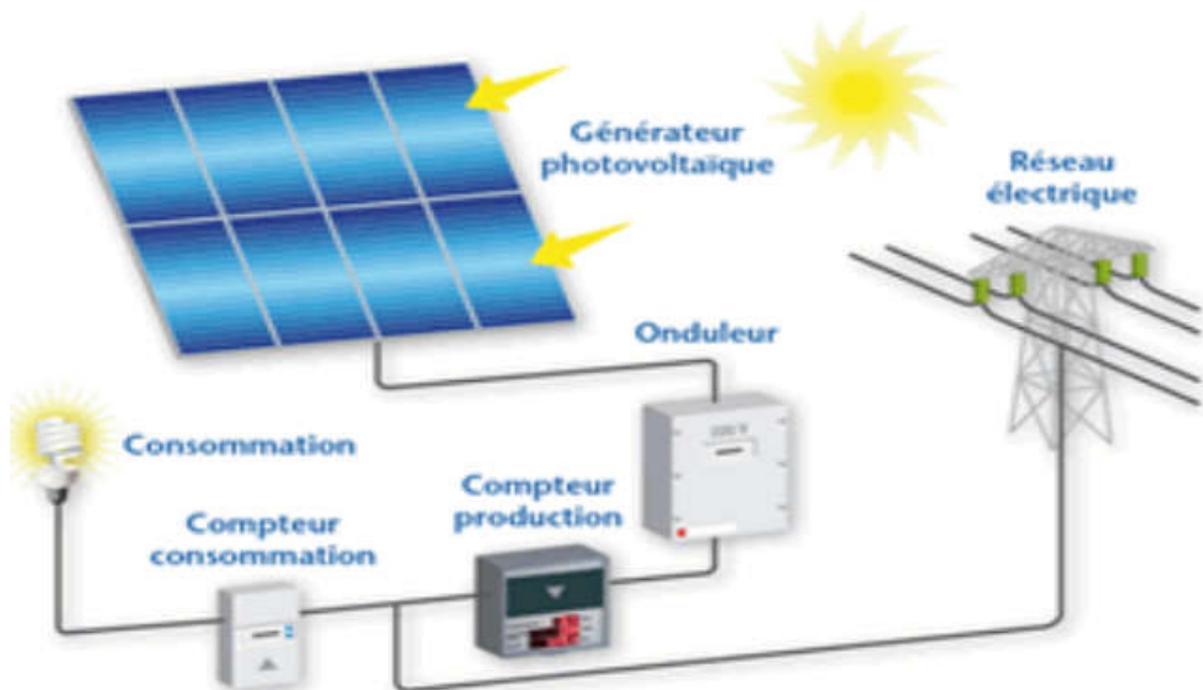


Fig. 11 - Mode d'exploitation d'un système photovoltaïque (connecté au réseau). [28]

### 1.2.1.3 Le système hybride

C'est un système similaire au système autonome mais n'utilise pas l'énergie solaire uniquement pour générer de l'électricité, il utilise d'autres ressources énergétiques telles que des générateurs, les éoliennes.

Il comporte plus qu'une source d'électricité telle que les panneaux photovoltaïques, les générateurs éoliens, les batteries de stockage, les groupes électrogènes...etc. Ce type d'installation est utilisé pour l'électrification des régions loin du réseau. Il existe plusieurs configurations de ces systèmes : PV/thermique, PV/batterie, PV/éolienne/batterie, PV/éolienne, PV/groupe électrogène. Le choix se base essentiellement selon les caractéristiques météorologiques du site d'implantation. Les systèmes hybrides connectés au réseau ont pour but de renforcer la source principale d'électricité alimentant le réseau. Ils sont généralement à base de sources d'énergie renouvelables tel que : les panneaux photovoltaïques, les éoliennes, les piles à combustibles, les batteries de stockage, les groupes électrogènes (figure ci-dessous).

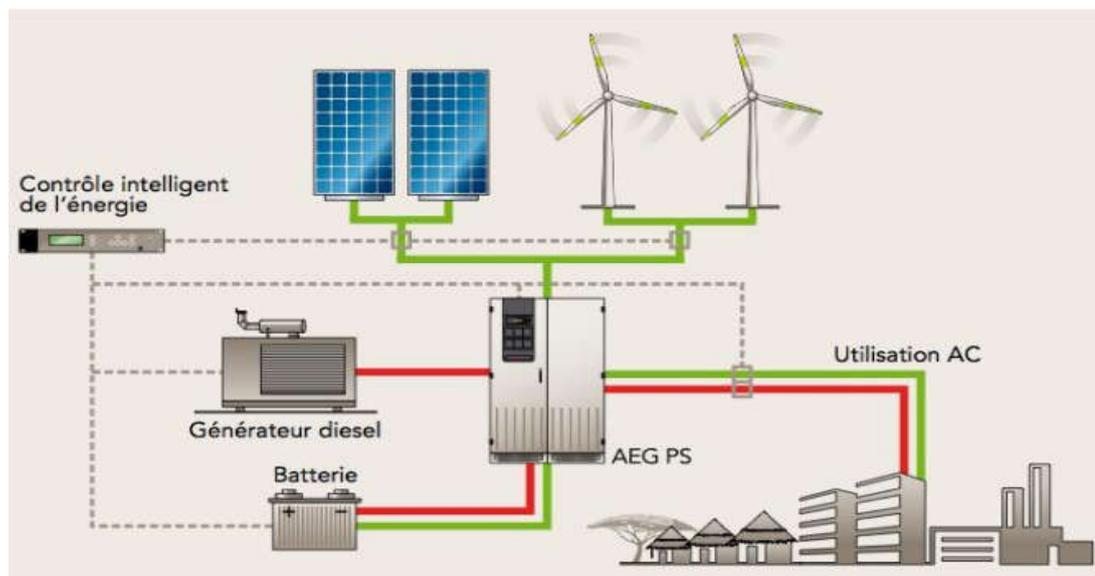


Fig. 12 - Mode d'exploitation d'un système photovoltaïque (hybride). [28]

### 1.2.2 Le semi-conducteur

Les cellules solaires peuvent être fabriquées à partir d'un nombre de matériaux semi-conducteurs. Généralement, les plus utilisés sont le silicium (Si) monocristallin, poly cristallin et amorphe. On trouve aussi les cellules à base de matériaux comme GaAs, GaInP, Cu(InGa) Se<sub>2</sub>, CdTe,... etc.

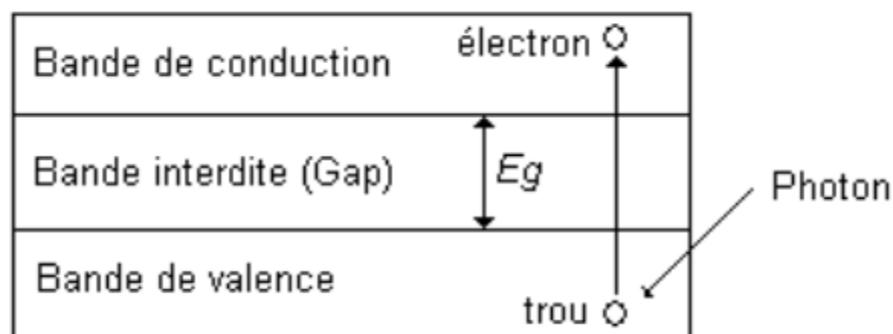
Les matériaux des cellules solaires sont largement choisis sur la base de leurs caractéristiques d'absorption, devant s'adapter avec le spectre solaire et sur la base de leurs coûts de fabrication. Le silicium a été pour longtemps un choix adéquat dû au fait qu'il présente une assez bonne absorption adaptée au spectre solaire et aussi au fait que sa technologie est bien développée en raison de sa dominance dans l'industrie électronique des semi-conducteurs. Les

propriétés chimiques et électriques de l'atome sont liées aux électrons qui gravitent autour du noyau. Les électrons se répartissent en orbites ; la dernière définit en fait, les principales propriétés de l'élément correspondant. L'électron possède par rapport au noyau une certaine énergie  $E$  à laquelle correspond un potentiel  $\phi$  :

$$E = -q * \phi + constant \quad (02)$$

$E$  : est en électron-volt (eV).

Le comportement dynamique de l'électron peut être déduit par la résolution de l'équation de Schrödinger. L'application de la mécanique quantique à l'atome n'a pas modifié fondamentalement les résultats de la théorie de Bohr. Basée sur le principe d'exclusion de Pauli et le principe d'incertitude d'Heisenberg, la mécanique quantique montre que, pour un atome isolé, l'électron ne peut occuper que des niveaux discrets (quantifiés) d'énergie. Les orbites c'est-à-dire les états d'énergie autorisés des électrons dépendent (équation de Schrödinger (fonction en  $1/r$  dans l'atome isolé)). Ainsi pour un monocristal, on peut montrer qu'il existe des domaines d'énergie appelés bandes dont certaines sont permises et d'autres interdites. (Figure 13)



**Fig. 13 - Niveaux énergétiques dans un semi-conducteur.**

En ne considérant que les électrons de la couche périphérique c'est-à-dire les électrons ayant l'énergie la plus élevée et les éléments chimiques peuvent être classés en deux catégories principales:

- Les isolants et les semi-conducteurs : caractérisés par une bande interdite qui sépare deux bandes permises.
- Les conducteurs : il n'y a pas de bande interdite et les bandes permises se recouvrent. La largeur de la bande interdite est appelée gap ( $E_g$ ). Elle est d'autant plus grande que le matériau est isolant.

Dans un semi-conducteur à une température absolue nulle, la bande de valence est complètement pleine et la bande de conduction est vide de telle sorte qu'aucune conduction électrique n'est possible (tous les électrons sont liés à leurs atomes). Cependant, dans un semi-conducteur l'énergie nécessaire pour séparer les électrons externes de leurs atomes est relativement

faible. Cette énergie correspond à l'énergie du gap  $E_g$  de telle sorte que les électrons reçoivent une énergie suffisante pour faire une transition de la bande de valence vers la bande de conduction. Cette énergie peut être une augmentation de la température ou une interaction avec un photon lumineux.

Le gap  $E_g$  et sa structure en fonction du vecteur d'onde sont des caractéristiques clés du matériau semi-conducteur et de l'importance fondamentale de l'opération de la cellule solaire. Les principales caractéristiques sont la variation du gap sous l'effet de la température et la grandeur du vecteur d'onde associé à une faible énergie des transitions. [29]

### 1.2.3 La jonction (p-n)

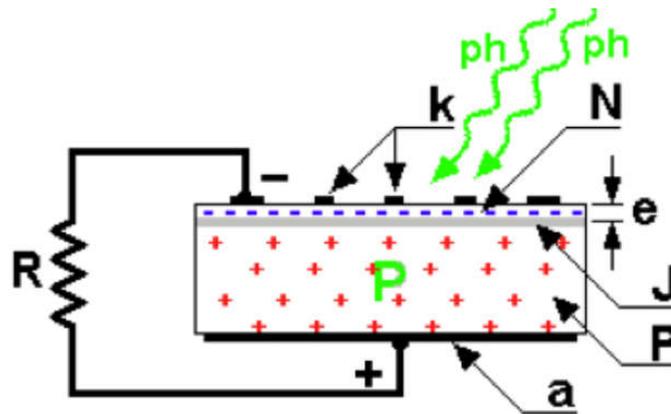


Fig. 14 - La construction interne de la cellule solaire.

**N** : Couche supérieure composée de silicium dopé par un élément contenant plus d'électrons que le silicium. Elle contient donc plus d'électrons qu'une couche de silicium pur. Cette couche appelée semi-conducteur de type N.

**P** : Couche inférieure composée de silicium dopé par un élément contenant moins d'électrons que lui. Contient donc moins d'électrons qu'une couche de silicium pur. Couche appelée semi-conducteur de type P.

**J** : jonction entre les zones N et P. Au milieu de ces deux matériaux, il va se former une zone neutre, appelée Zone de Charge d'Espace (ZCE). Cette zone étant neutre, aucun courant ne peut la traverser.

**K** : la zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (électrode de sortie du courant).

**a** : plaque métallique recouvrant la face du cristal (qui appartient aux cristaux: variété de verre pur, limpide et très résistant. Ici, le silicium), qui sert d'anode (électrode d'entrée du courant).

**e** : épaisseur de N (égale à quelques millièmes de mm).

**R** : résistance de charge.

**ph** : photons : particule élémentaire de la lumière.

La lumière est une onde électromagnétique de fréquence  $\nu$  et un faisceau de particules appelées photons transportant l'énergie  $E$  telle que :

$$E = h \cdot \nu \quad (03)$$

Où -  $h$  est la constante de Planck  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s.

-  $\nu$  : est la fréquence de l'onde électromagnétique associée au photon.

**Le photon** : c'est une particule élémentaire de la lumière. Celle-ci contient de l'énergie électromagnétique. Elle possède donc un potentiel électromagnétique non-nul capable d'être utilisé par un autre corps. Le photon est la particule qui contient cette énergie électrique et magnétique.

**Le dopage** : le dopage consiste à l'introduction d'impuretés dans un matériau (ici le silicium).

Les impuretés introduites dans le silicium sont de deux types :

**-Electronégatif** : des atomes de phosphore dont la couche externe comportent 5 électrons. L'insertion de tels atomes dans le réseau cristallin va libérer un électron qui devient disponible pour le transport du courant. Le silicium devient donc semi-conducteur de type N. [30]

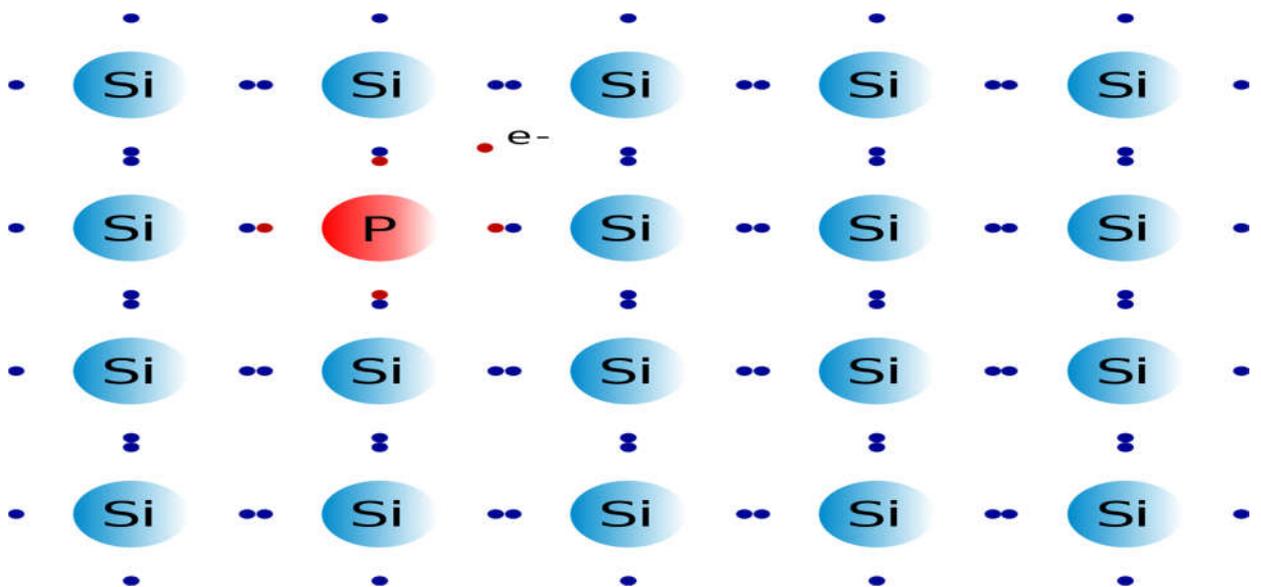


Fig. 15 - Le dopage de phosphore. [31]

**-Electropositif** : soit des atomes de bore dont la couche externe comportent 3 électrons. L'insertion de tels atomes dans le réseau cristallin va créer un trou positif (défaut d'électron) dans la structure cristalline. Le silicium devient donc un semi-conducteur de type P. [30]

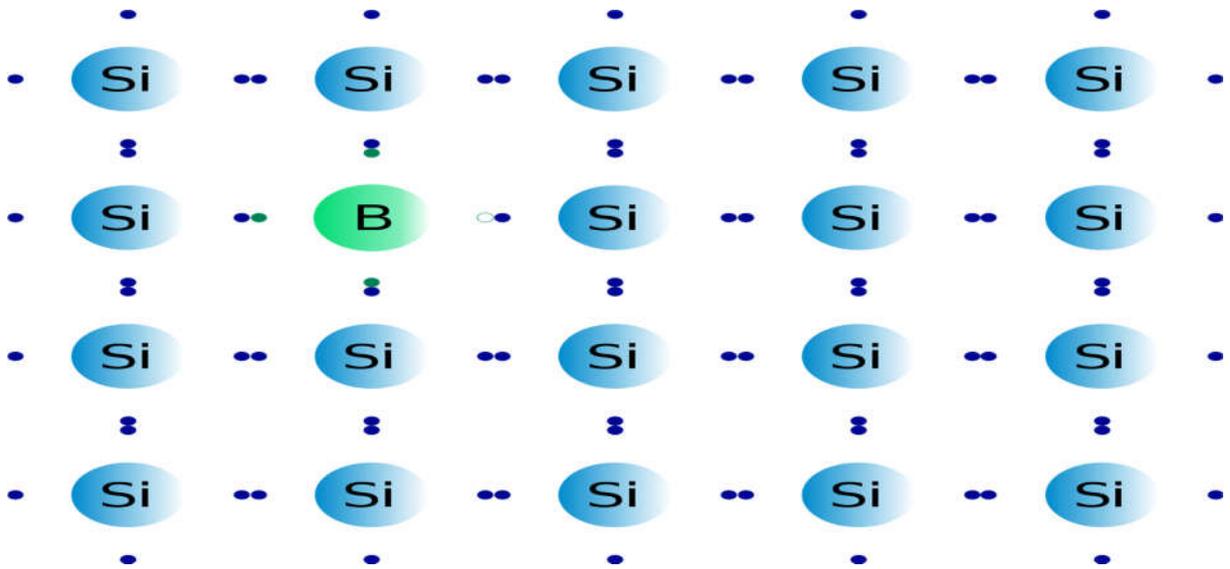


Fig. 16 - Le dopage du bore. [32]

Les niveaux d'énergie impliqués pour l'absorption des photons sont le niveau du haut de la bande de valences 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. [33]

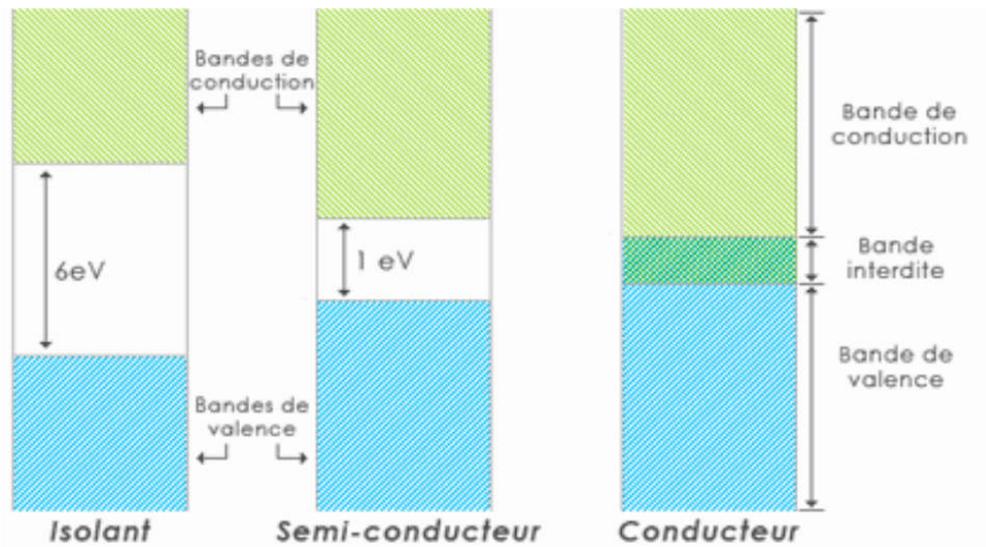
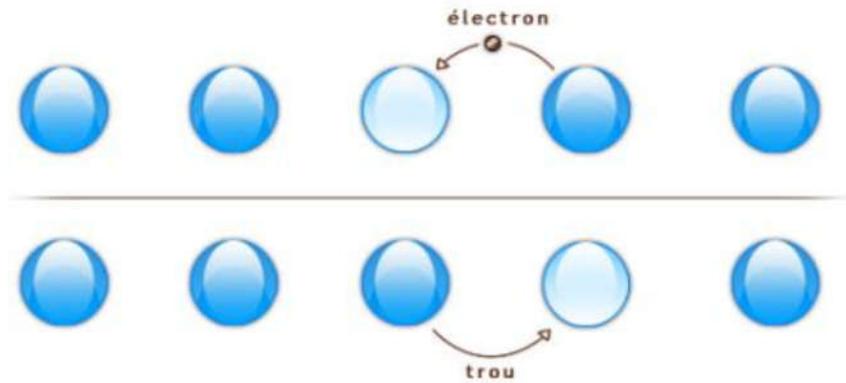


Fig. 17 - La bande d'énergie de la cellule solaire. [34]

Les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension); s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque [35], et la figure suivante montre La libération d'un électron par un apport d'énergie créé un "trou" (ou "défaut d'électron").



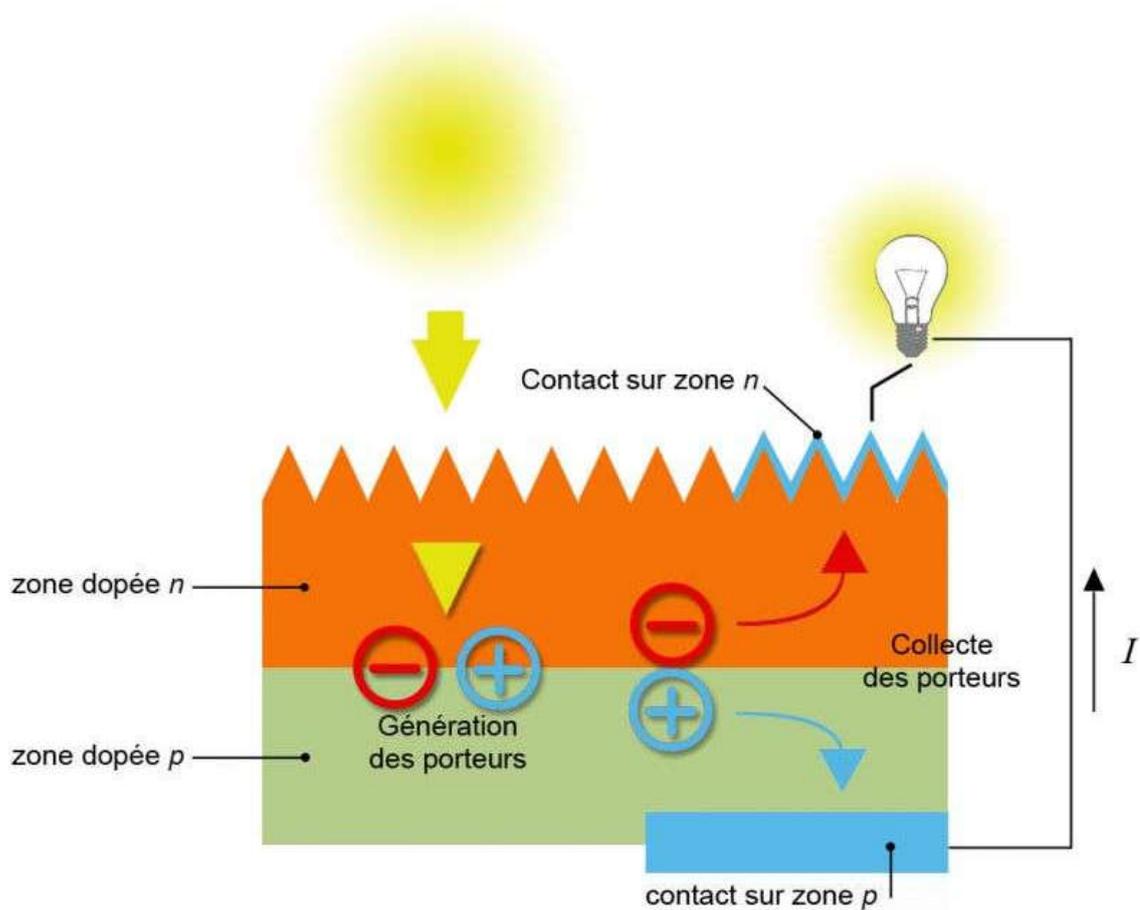
**Fig. 18 - Création d'une paire électron-trou. [30]**

#### **1.2.4 L'effet photovoltaïque [26]**

Le photon qui pénètre dans un matériau photovoltaïque peut être réfléchi, absorbé ou transmis. Si le photon est absorbé par un électron de valence dans le matériau, l'énergie de l'électron augmente. Cet électron de valence peut entrer dans la bande de conduction si l'énergie du photon absorbé est supérieure à la bande interdite du semi-conducteur. Il peut se déplacer librement dans le cristal, ce qui signifie qu'il peut créer un courant en traversant un champ électrique à travers le front et arrière du matériau photovoltaïque. Si l'énergie du photon absorbé est inférieure à l'énergie de la bande interdite, l'électron de valence ne se déplacera pas vers la bande de conduction et l'excès d'énergie sera converti en énergie cinétique. En conséquence, la température augmentera. La faible efficacité des cellules photovoltaïques s'explique par le fait qu'un seul électron peut être libéré, quelle que soit la quantité d'énergie que contient le photon absorbé.

Comme les électrons et les trous diffusent à travers la jonction p-n, ils créent un champ électrique à travers la limite de la jonction. Les électrons libres sont générés du côté n par les photons. Lorsque les photons frappent la surface d'une cellule solaire et sont absorbés par le semi-conducteur, certains d'entre eux créent des paires d'électrons et de trous. Le champ électrique de la jonction p-n sépare la charge si ces paires sont près de la jonction p-n.

Un courant électrique circulera si les deux côtés des cellules solaires sont reliés par une charge. Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est présenté dans la Figure 19.



**Fig. 19 - Structure d'une cellule photovoltaïque.**

### 1.2.5 Le rendement des cellules Photovoltaïque

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques. Il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Le rendement est le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire. Il caractérise ses composants et définit leur performance.

De plus, Il peut être défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$ . [19]

$$\eta = P_m/P_{in} \quad (04)$$

### 1.2.6 Le rendement électrique

L'élévation de la température des cellules photovoltaïques est un problème car leurs performances diminuent lorsqu'elles s'échauffent. Ce problème est encore plus sévère avec la concentration du rayonnement solaire. Les conditions d'utilisation, loin des conditions standards, sont des facteurs prépondérants de l'efficacité énergétique finale du dispositif sur l'ensemble de sa durée de vie. De nombreuses études portent sur le comportement des cellules photovoltaïques en fonction de la température. Cependant elles n'analysent pas l'origine de l'échauffement qu'elles constatent. C'est regrettable car le besoin de comprendre les mécanismes de dégradation des performances instantanées avec l'élévation de température et les dégradations à long terme, qui favorisent les mécanismes de vieillissement activés thermiquement, se fait de plus en plus pressant.

L'équation suivante décrit la dégradation de la température d'une cellule photovoltaïque, cette forme est proposée par Evans :

$$\eta T_c = \eta_{ref}[1 - \beta(T_c - T_{ref})] \quad (05)$$

Où  $\eta T_c$  est le rendement de la cellule à la température de fonctionnement  $T_c$  que l'on obtient grâce au rendement  $\eta_{ref}$  à la température de référence  $T_{ref}$  et au coefficient de température  $\beta$  qui quantifie la dégradation linéaire du rendement avec l'augmentation de la température de fonctionnement. [36]

### 1.2.7 Les caractéristiques des cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque peut être représentée par un générateur de courant  $I_{ph}$  monté en parallèle avec une diode et deux résistances parasites qui sont également introduites. Ces résistances ont une influence sur la caractéristique  $I=f(V)$  de la cellule, à savoir :

- La résistance série  $R_s$  qui est la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- La résistance shunt  $R_{sh}$  qui est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [37]

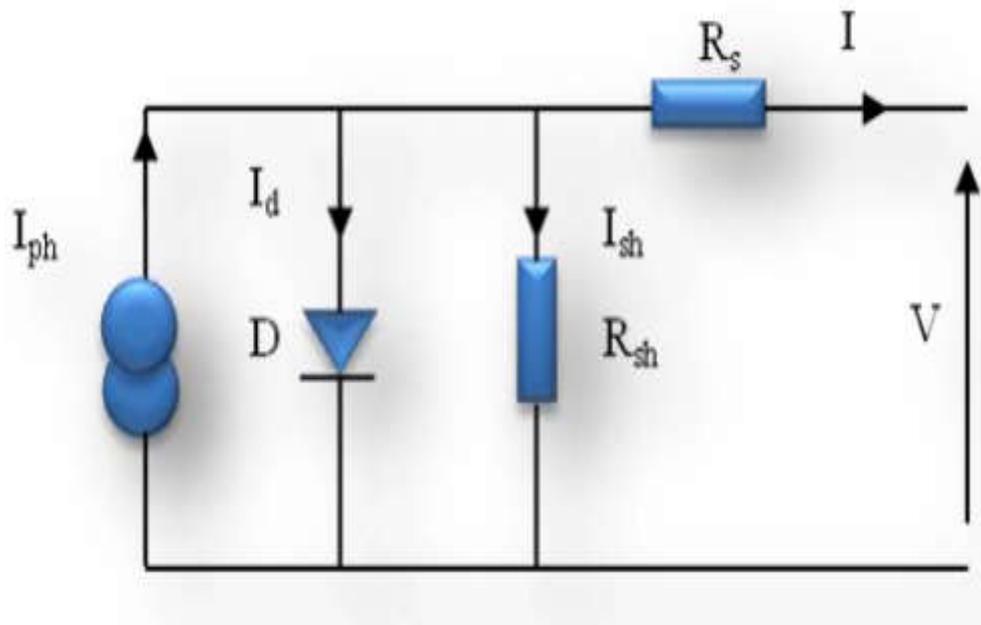


Fig. 20 - Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque. [38]

Comme la résistance de shunt est généralement beaucoup plus grande qu'une résistance de charge, la résistance série est beaucoup plus petite qu'une résistance de charge, moins de puissance est dissipée à l'intérieur de la cellule. Si ces deux résistances sont ignorées, la différence entre le photo-courant  $I_{ph}$  et le courant de diode normal est le courant net donné par la formule (06)

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{eV}{k * T_C}\right) - 1 \right) \quad (06)$$

$k$  = Constante de gaz de Boltzmann =  $1.381 \times 10^{-23}$  J/K.

$T_C$  = température absolue de la cellule (K).

$e$  = charge électronique =  $1.602 \times 10^{-19}$  J/V.

$V$  = tension imposée à travers la cellule (V).

$I_0$  = courant de saturation sombre, qui dépend fortement de la température (A). [39]

### 1.2.7.1 Le courant de court-circuit $I_{cc}$

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant  $V=0$  dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. On peut écrire: [41]

$$I_{cc} = I_{PH} \quad (07)$$

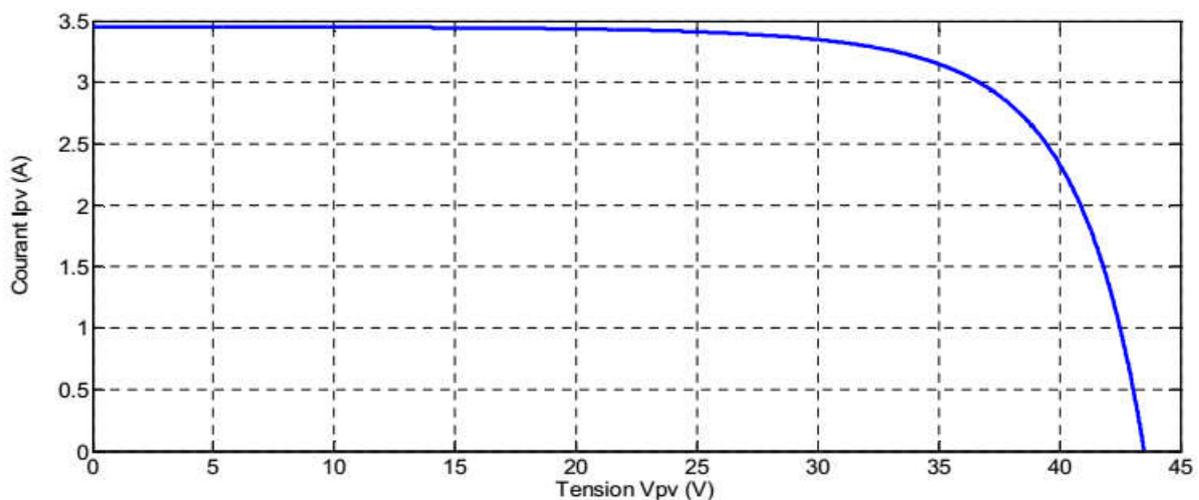


Fig. 21 - Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque pour  $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

### 1.2.7.2 La tension à circuit ouvert $V_{co}$

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse. Nous pouvons décomposer la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque en zones. [21]

$$V_{co}(I = 0) = V_t \log^* \left( 1 + \frac{I_{cc}}{I_0} \right) \quad (08)$$

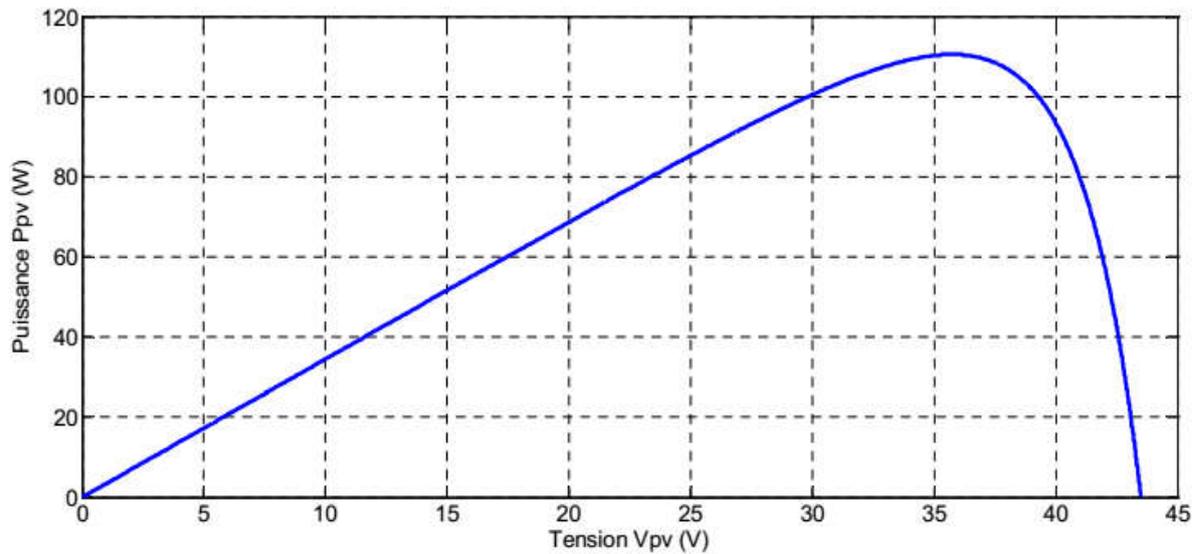


Fig. 22 - Caractéristique  $P(V)$  d'une cellule photovoltaïque pour  $G=1000\text{W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ . [41]

La caractéristique  $I(V)$  se divise en trois zones

- (Zone 1) : Une zone assimilable à un générateur de courant  $I_{CC}$  proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par  $1/R_{SH}$ ,
- (Zone 2) : Une zone assimilable à un générateur de tension  $V_{CO}$  d'impédance interne équivalente à  $R_s$
- (Zone 3) : Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de  $R_s$  à  $R_{SH}$ . [42]

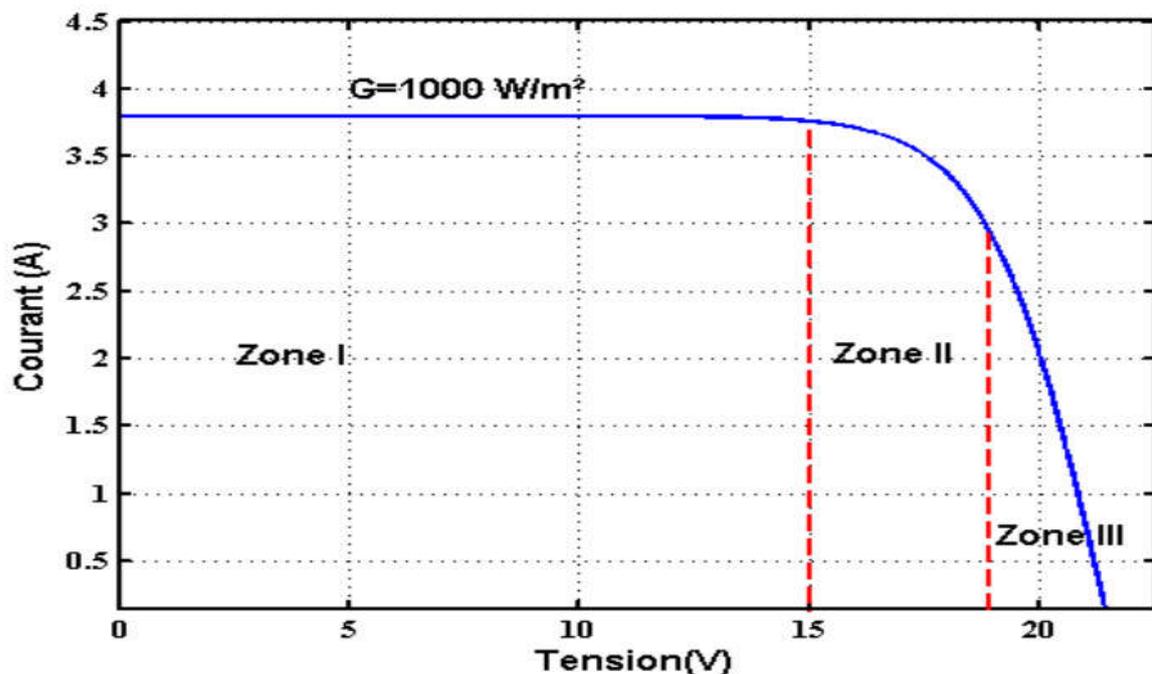


Fig. 23 - Différentes zones de la caractéristique  $I(V)$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ . [21]

C'est dans la Zone 3 qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance maximale, caractérisé par le couple  $(I_{MP}, V_{MP})$ , et seule une charge dont la caractéristique passe par ce

point, permet d'extraire la puissance maximale ( $P_{MAX}$ ) disponible dans les conditions considérées (fig. 23).

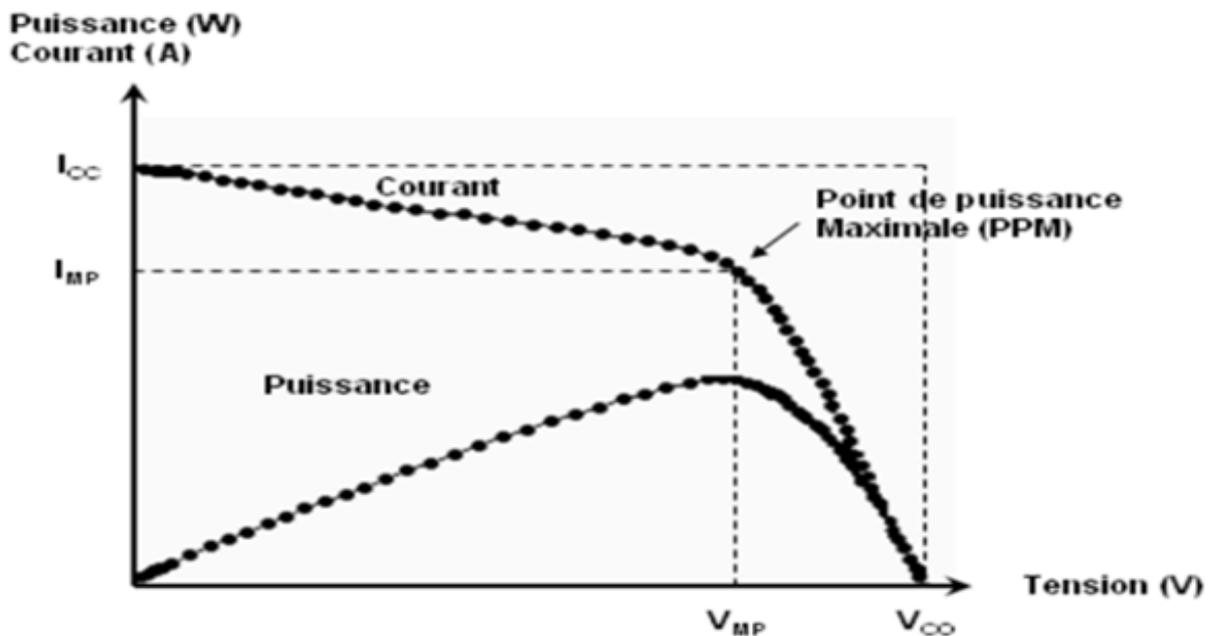


Fig. 24 - Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule.

Le Watt crête ( $W_c$ ) caractérise la puissance d'un panneau photovoltaïque. La puissance crête représente la puissance délivrée par le panneau au point de puissance maximum. Cette unité est utilisée généralement pour la comparaison du rendement et du prix des produits photovoltaïques. Elle est généralement donnée dans les documents constructeurs dans les conditions de test standard STC ( $1000 \text{ w/m}^2$  et  $25^\circ\text{C}$ ). [35]

## 1.2.8 Regroupement des cellules

### 1.2.8.1 Regroupement en série

Si les cellules se connectent en série. Les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur et le courant est le même que celui d'une seule cellule. [43], L'équation (09) résume les caractéristiques électriques d'une association de  $N_s$  cellules en séries.

$$V'_{co} = N_s \cdot V_{CO} \quad (09)$$

Avec :

$V_{co}$  : La tension du circuit ouvert.

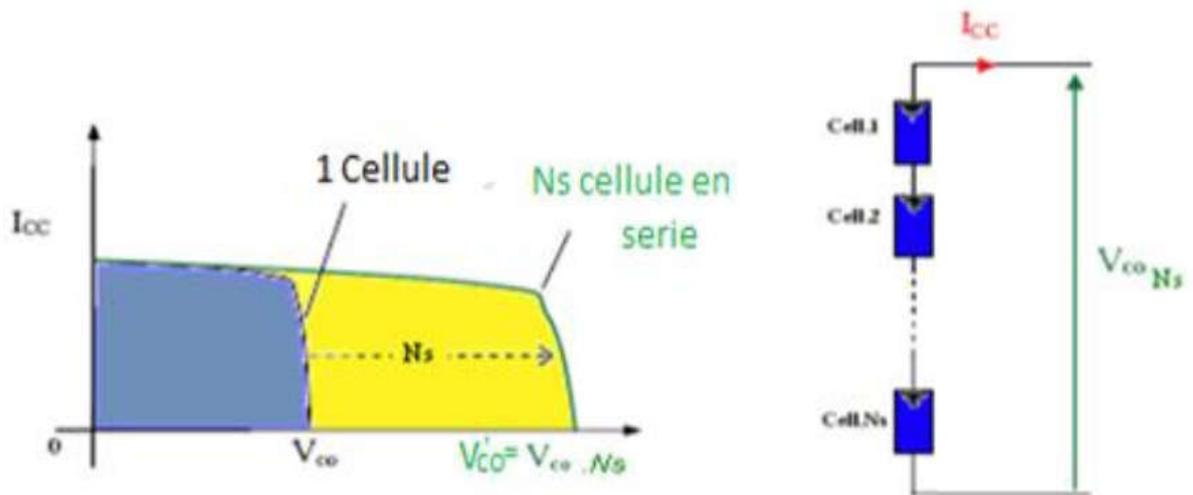


Fig. 25 - Caractéristique résultat d'un regroupement de  $N_s$  cellules en séries. [28]

### 1.2.8.2 Regroupement en parallèle

Si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera et la tension qui restera constante [43]. L'équation (10) résume les caractéristiques électriques d'une association de  $N_p$ .

$$I'_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (10)$$

Avec :

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit.

Comme montre la fig.26

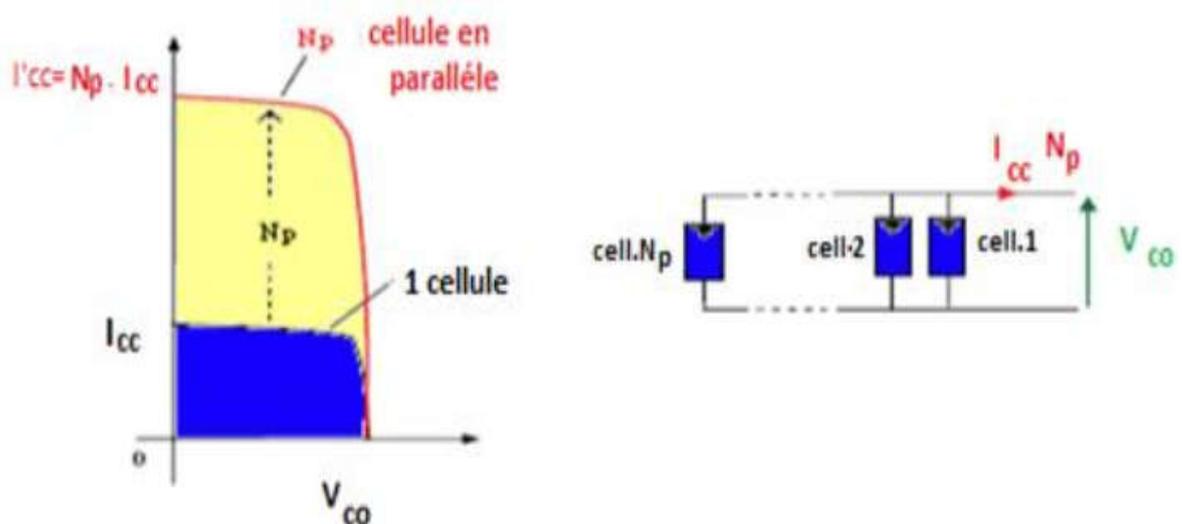


Fig. 26 - Caractéristique résultat d'un Regroupement de  $N_p$  cellules en parallèle.

### 1.2.8.3 Regroupement (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous figure. (27), ce qui peut être généralisé sur une gamme de  $N_s$  modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

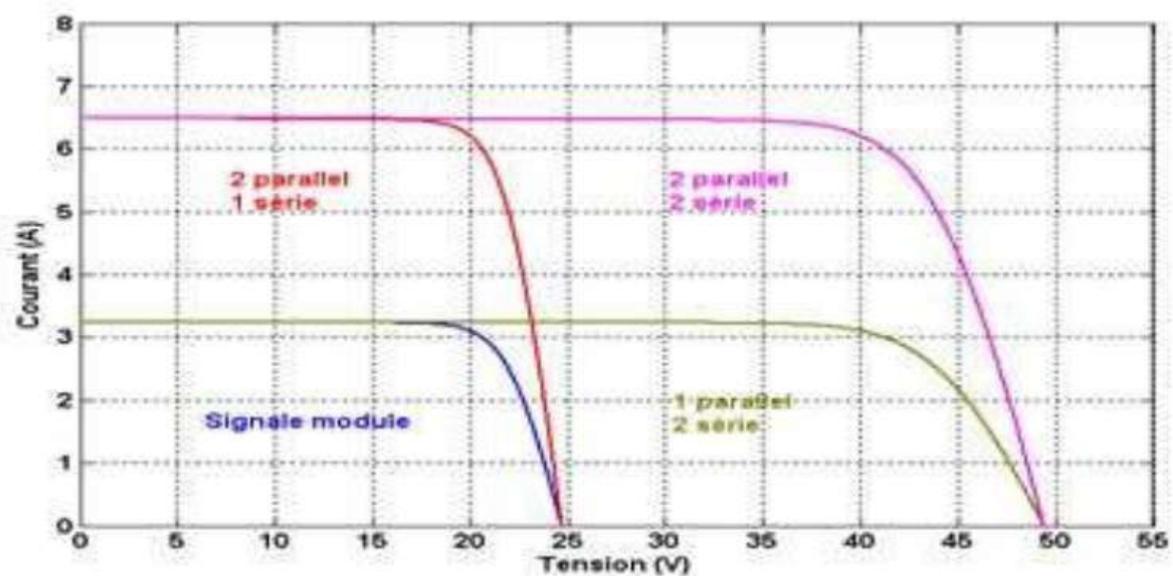


Fig. 27 - Caractéristique Regroupement (série et parallèle). [28]

### 1.2.9 Les domaines d'application

L'énergie photovoltaïque est exploitée dans une large gamme d'applications :

- 1) -Électrification rurale (éclairage, réfrigération...).
- 2)-Télécommunications (relais hertzien, relais T.V., relais radiotéléphone...).
- 3)-Pompage.
- 4)-signalisation (routière, aérienne, maritime...), détection.
- 5)-Protection (commandes de vannes de sécurité, système d'alarme...).
- 6)-Stations de mesures (stations automatiques météorologiques, mesures de débit, de Niveau, comptage de trafic), ...etc [28]

### 1.3 Conclusion

Après une brève introduction sur le rayonnement solaire suivi par le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Nous avons présenté une description de fonctionnement des cellules photovoltaïques, en précisant leurs processus de fabrication. Finalement, nous avons cité leurs applications.

**CHAPITRE 2**

**LES PRINCIPALES COMPOSANTES**

**D'UNE INSTALLATION**

**PHOTOVOLTAÏQUE**

## 2 Les principales composantes d'une installation photovoltaïque.

### 2.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à l'examen des principales composantes d'une installation photovoltaïque. En commençant par les cellules PV qui sont les éléments de base dans la conversion du rayonnement solaire en électricité. Ensuite nous avons décortiquer tous les éléments d'une installation PV en détaillant leur rôle et leur principe de fonctionnement.

### 2.2 Les modules photovoltaïques

#### 2.2.1 Le silicium monocristallin

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes [44]

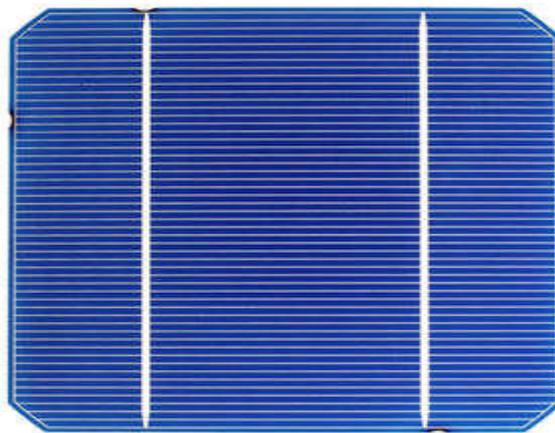
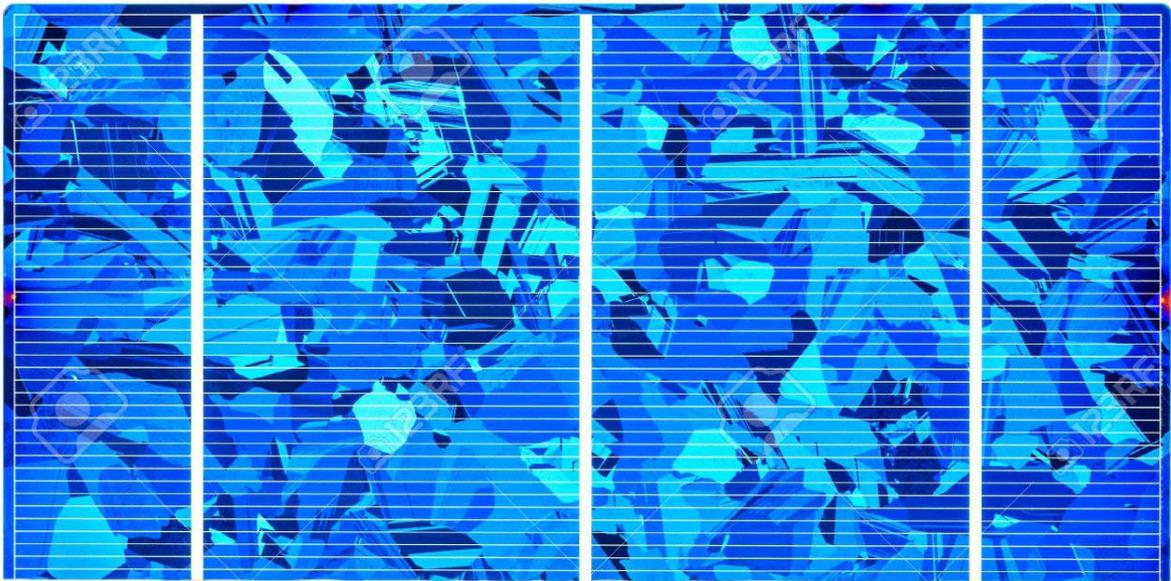


Fig. 28 - Panneau photovoltaïque de type 'Silicium monocristallin'.

#### 2.2.2 Le silicium poly cristallin

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commerciale s'étend entre 10 et 14 %. [45]



**Fig. 29 - Panneau photovoltaïque de type 'Silicium poly cristallin'.**

### **2.2.3 Le silicium amorphe (a-si)**

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi-conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre, son rendement de conversion est faible (de 7 à 10%) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière. [46]



**Fig. 30 - Panneau photovoltaïque de type 'Silicium amorphe'.**

## 2.3 Avantages et inconvénients de chaque type des cellules photovoltaïques

### 2.3.1 Les cellules de type Monocristallin

#### Avantage

- Bon rendement entre 13% et 15%.
- Il faut environ 7m<sup>2</sup> pour obtenir 1 kilowatt-crête.
- Nombre de fabricants élevé.

#### Inconvénient

- Coût élevé.
- Un faible éclaircissement.

### 2.3.2 Les cellules de type poly-cristallines

#### Avantage

- Rendement compris entre 12% et 14%.
- Ces cellules sont plus simples à fabriquer.
- Cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Silicium monocristallin).
- Permettant un meilleur foisonnement dans un module.
- Moins chère qu'une cellule monocristalline.

#### Inconvénient

- Ratio Wc/m<sup>2</sup> moins bon que pour le monocristallin,
- Rendement faible sous un faible éclaircissement.

### 2.3.3 Les cellules de type amorphe

#### Avantage

- Les cellules au silicium amorphes sont beaucoup utilisées pour l'alimentation de petits appareils solaires (montre, calculatrice, ...).
- Fonctionne avec un éclaircissement faible ou diffus (même par temps couvert).
- Un peu moins chère que les autres technologies.
- Intégration sur supports souples ou rigides.

#### Inconvénient

- L'épaisseur de silicium utilisée est beaucoup plus faible.
- Rendements limité de 5% à 7%.
- Soit environ de 15 m<sup>2</sup> pour obtenir 1KWc.
- Nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium.
- Performances qui diminuent avec le temps (environ 7%). [22][47]

## 2.4 Contrôleur de charge.

Le contrôleur de charge ou le régulateur électronique dans un système photovoltaïque gère la charge et la décharge de la batterie. Il limite la tension de la batterie afin d'éviter une surcharge, en déconnectant la batterie trop chargée des modules PV. Quand la batterie est trop déchargée, il la déconnecte de l'utilisation, par un disjoncteur automatique pour la protéger contre la décharge profonde.

Dans un système PV, en l'absence d'un régulateur, les accumulateurs seront exposés à une perte d'eau donc un vieillissement prématuré et à la sulfatation des plaques.

Le régulateur dans un système photovoltaïque peut assurer aussi le rôle de la compensation thermique. Il est situé entre le champ de modules et les batteries accumulateurs. [48]

### 2.4.1 Régulateur PWM

Le régulateur MLI (Modulation de la Largeur d'impulsion ou PWM : Pulse Width Modulation) gère de façon optimale les connexions et les déconnexions du module au reste du système. Selon l'état de charge de la batterie, il effectue des coupures plus ou moins longues et plus ou moins fréquentes. Cette technologie permet de charger la batterie à 100 % de sa capacité. [49]

Il limite le courant de charge de la batterie à un ampérage constant. Plus la batterie se recharge, plus la tension à ses bornes augmente. A partir d'un certain niveau, le régulateur PWM va alors maintenir une tension constante et produire des impulsions de courant. [50] Ce type de régulateur devient le plus utilisé dans les installations photovoltaïques autonomes. [49]

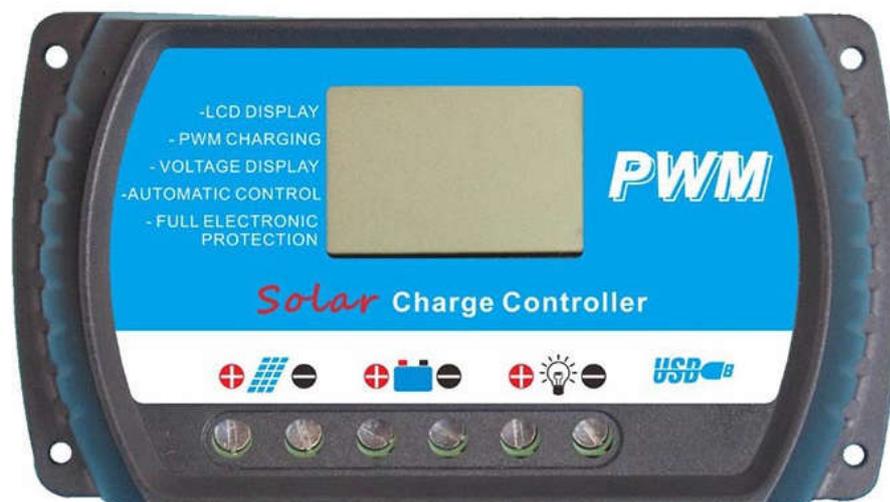


Fig. 31 - Régulateur PWM.

### 2.4.2 Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Le régulateur MPPT : c'est l'élément permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Dans ce régulateur, un circuit mesure en permanence la tension et le courant du panneau pour tirer de l'énergie au point de puissance maximale. Ceci permet de garantir une récupération maximum d'énergie, quelque soient

la température et l'ensoleillement. Ces régulateurs fonctionnent soit en élevant, soit en réduisant la tension.

Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale de l'ensemble des panneaux et le deuxième circuit transforme le courant et la tension pour les adapter au type de batterie. Le régulateur MPPT coûte en général beaucoup plus cher qu'un régulateur standard. C'est pour cette raison que son utilisation n'est pas généralisée, et qu'il n'est pas recommandé pour les petites installations (les pertes ne sont pas assez importantes). [50]



Fig. 32 - Régulateur MPPT.

## 2.5 Les batteries d'accumulation

Dans un système photovoltaïque, la ressource solaire ne pouvant être disponible à tout moment, il est indispensable de stocker de manière journalière ou saisonnière de l'énergie électrique produite par les panneaux solaires. [51]

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances. Une batterie utilisée avec des panneaux solaires est une batterie à décharge lente (appelée aussi batterie solaire). Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires. Elles n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une batterie de voiture par exemple, elles se déchargent plus progressivement et supportent mieux les décharges fréquentes peu profondes. [48]

Les batteries sont connectées au régulateur parce qu'elles sont chargées à travers le régulateur et elles alimentent les charges par le biais du même régulateur.

On associe plusieurs batteries en série pour obtenir une tension adaptée à l'utilisation une tension globale égale à la somme des batteries individuelles et dans une configuration en parallèle,

le groupe des batteries a la même tension qu'une batterie unique, pour avoir la capacité et la puissance égale à la somme des batteries individuelles nécessaire à l'autonomie désirée. [51]

## 2.5.1 Les caractéristiques d'une batterie

### 2.5.1.1 La tension

Est l'une des spécifications les plus importantes des batteries. La tension électrique est la différence de potentielle électrique (Bornes électriques) entre les deux pôles de la batterie, elle est également connue sous le nom de force motrice des électrons du pôle négatif au pôle positif. L'unité utilisée pour mesurer la tension est le volt et la meilleure façon de comprendre l'électricité est similaire à l'eau. L'électricité peut être représentée par les différents niveaux d'eau, comme indiqué dans la figure suivante:

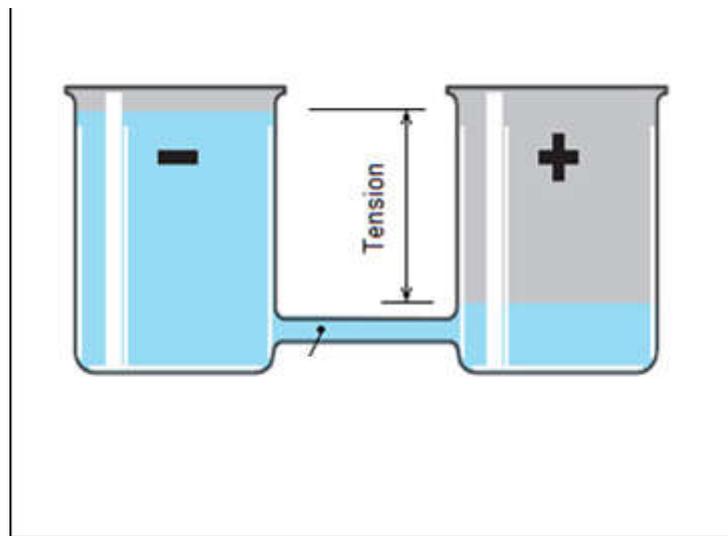


Fig. 33 - La différence de niveau entre les deux pôles. [52]

### 2.5.1.2 La capacité d'une batterie

La capacité d'une batterie s'exprime en ampères heures (Ah), c'est la quantité de courant qu'elle peut fournir au cours d'un nombre d'heures précis, à une température de référence. Cette capacité nominale varie dans le même sens que la température de service de la batterie. [53]

### 2.5.1.3 Les tensions de charge / décharge

Les tensions de charge / décharge (C / D) d'une cellule de batterie diffèrent selon le type de batterie, mais pour tous les types de batterie, la tension dépend de l'état de charge. Une batterie complètement chargée a une tension plus élevée qu'une batterie vide.. Pendant la recharge, la tension est supérieure à celle de la décharge. [54]

### 2.5.1.4 Le taux d'autodécharge

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

Une batterie inutilisée se décharge d'elle-même. Ceci est dû à des phénomènes électrochimiques. Les valeurs courantes d'autodécharge sont de l'ordre de 1% à 10% de la capacité par mois. [55]

### 2.5.1.5 La profondeur de décharge

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.

Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25% de leur capacité totale dans chaque cycle.

La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications photovoltaïques sont conçues pour des décharges jusqu'à 80% de leur capacité, sans les endommager. [56]

Quand la profondeur de décharge augmente, le cycle de vie diminue comme la figure suivante montre

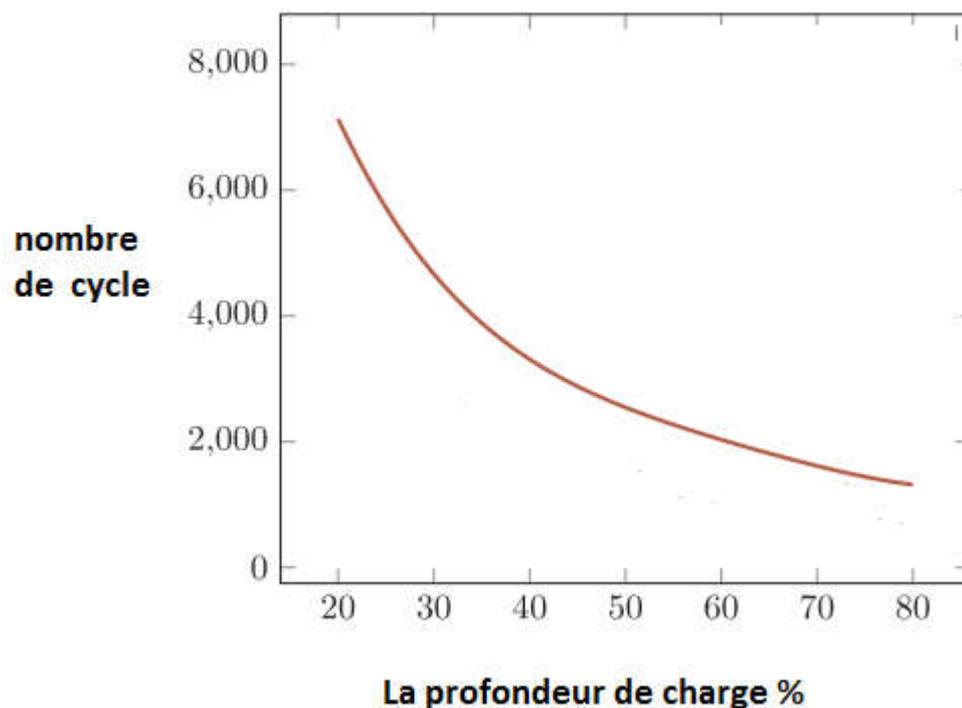


Fig. 34 - Nombre de cycles de vie d'une batterie en fonction du taux de PDD. [57]

### 2.5.1.6 La durée de vie

Les durées de vie exprimées en années sont données pour un fonctionnement en floating à 25°C .

Elle varie de 2 à 7 ans pour les batteries au Pb et de 10 à 25 ans pour les Ni-Cd. Elle diminue de moitié pour chaque élévation de 10°C de la température d'utilisation. [58]

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent.

Par ailleurs, quel que soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles). [59]

### 2.5.2 Les batteries au Plomb-Acid

Nom Plomb-Acid vient du fait qu'il contient un liquide qui doit être changé à chaque période (comme les batteries de voiture). Ce type de batterie est le plus ancien et le plus utilisé.

Le coût des accumulateurs au plomb est raisonnable, il est un des plus faibles parmi les systèmes de stockage. C'est l'une des principales raisons pour lesquelles la batterie au plomb est très utilisée. Ce coût est quasiment incompressible, du fait de la très grande maturité de la technologie. La capacité des batteries ouvertes pour l'énergie solaire varie entre 100 et 500 Ah et leur durée de vie peut atteindre 10 ans.

Le taux de recyclabilité de la batterie au plomb atteint pratiquement 100 % ce qui participe aux avantages de ce type d'accumulateur malgré la haute toxicité de son principal matériau, le plomb. [60]



Fig. 35 - Batterie au Plomb-Acide.

### 2.5.3 Les Batteries VRLA 'gel, AGM'

Ces types de batteries est similaire au premier type, mais ils ne méritent pas de changer les liquides qui ne méritent pas d'être entretenus.

Ce type est divisé en deux types différents: gel et AGM et caractérisé par :  
Les batteries VRLA-AGM sont susceptibles d'être endommagées par la chaleur générée pendant la recombinaison de l'oxygène. [61]



**Fig. 36 - Batterie VRLA de type 'AGM'.**

Par rapport aux batteries à plomb-acide classique, la batterie VRLA présente l'avantage d'avoir une longue durée de vie, une autodécharge faible, pouvant fonctionner à des températures basses et utiliser pour la profondeur de décharge, les VRLA's sont utilisées pour des instruments portables et en télécommunication sous une forme de cellule cylindrique ou un ensemble de deux à six cellules assemblées en mono-bloque. [62]

#### **2.5.4 Les batteries utilisent au Nickel- cadmium et Nickel-Métal-Hydrure**

Ces deux types de batteries sont similaires et partagent certains avantages et inconvénients.

La tension de ces types d'accumulateurs varie entre 1,15 et 1,17 Volts, par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%. En dépit d'un prix encore prohibitif, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- Très bonne résistance mécanique.
- Possibilité de supporter des décharges profondes.
- Sa capacité varie de 30 mAh à 2000 mAh.
- Sa taille est inférieure à celle des batteries au plomb (par rapport à une capacité standard).
- Disponible en différentes valeurs de tension: 2,4 V, 3,6 V, 4,8 V, 12 V.
- Pas d'émanations toxiques à partir de l'électrolyte. [59]

Mais les inconvénients de ce type de piles à énergie solaire comprennent:

- Décharge automatique.
- Il est difficile de charger à des températures inférieures à 0°.

Son utilisation reste complexe et coûteuse du fait du stockage de l'hydrogène. Bien que la technologie du Ni-MH est devenue maîtrisable d'où par son utilisation dans divers applications portables. [62]



Fig. 37 - Batterie Nickel-Métal-Hydrure.

### 2.5.5 Batterie au lithium

Les Batteries au lithium sont utilisées dans de nombreux appareils, tels que les ordinateurs portables, en raison de leur petite taille et de leur poids léger par rapport à leur capacité.

Les bonnes performances en termes de cycles et de plage de régime de décharge font des batteries au lithium un candidat potentiel pour des stockages court terme. Mais leurs nombreux inconvénients (recyclage, coût, performances à hautes températures, sécurité...) n'autorisent son utilisation qu'à très long terme

Il existe trois grandes familles de batteries au lithium : Lithium métallique, Lithium-Ion et Lithium-polymère. [60]



Fig. 38 - Batterie au lithium Ion.

## 2.6 Batterie en série et en parallèle

### 2.6.1 Branchement en série

En cas de montage en série de batteries, le pôle plus de la première batterie est relié au pôle moins de la deuxième batterie. La tension des différentes batteries s'ajoute. La tension totale peut être relevée sur les pôles restés libres. La capacité totale est égale à la capacité des différentes batteries.

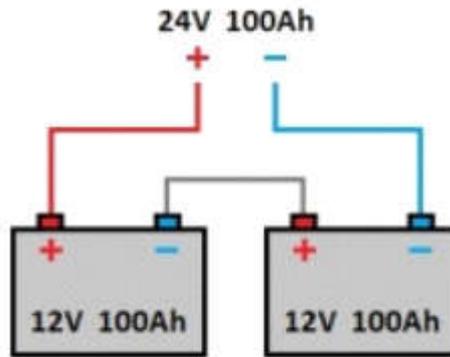


Fig. 39 - Branchement en série.

### 2.6.2 Branchement en parallèle

En cas de montage en parallèle d'accumulateurs, le pôle plus est relié au pôle plus et le pôle moins au pôle moins par une liaison conductrice.

Les capacités des différentes batteries sont alors additionnées. La tension totale [V] est égale à la tension des différentes batteries.

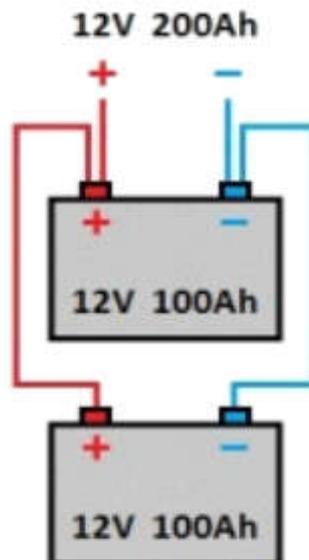


Fig. 40 - Branchement en parallèle.

### 2.6.3 Branchement en série et en parallèle

Dans ce cas on joue sur les deux grandeurs tension et capacité selon les besoins alors on va raccorder un ensemble en série pour avoir une telle tension et le même autre ensemble en parallèle pour augmenter la capacité. [28][61]

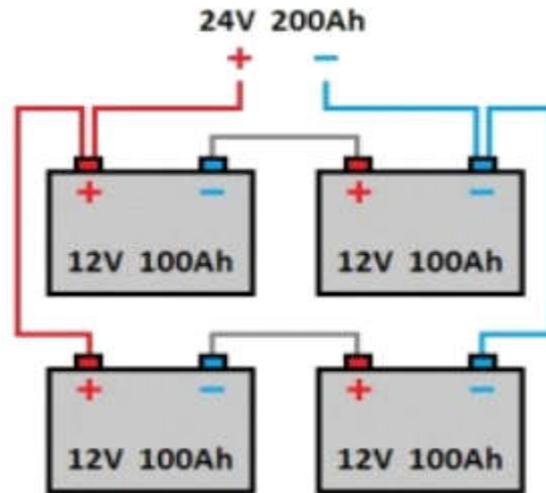


Fig. 41 - Branchement en série et en parallèle.

## 2.7 Les onduleurs

La tension produite par les modules photovoltaïques est continue et celle fournie par les batteries pour l'alimentation des charges est aussi de nature continue. Dans ces conditions, il faudra intégrer obligatoirement un onduleur au système PV destiné à alimenter des charges alternatives. L'onduleur est un convertisseur DC/AC, c'est-à-dire convertir la sortie continue (DC) du champ de module ou des batteries en électricité alternative (AC) standards comme celle fournie par SONEGAS. [8]

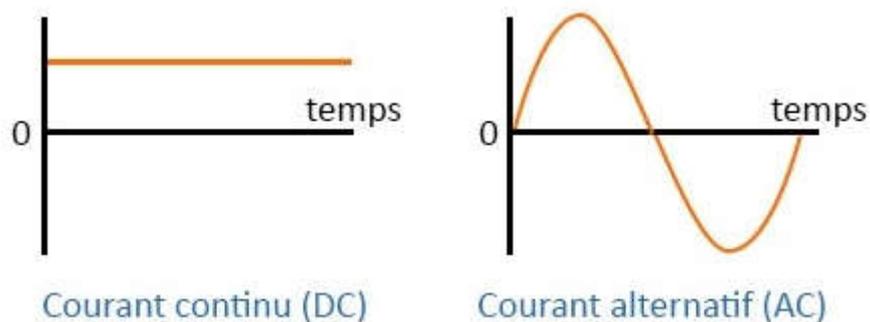


Fig. 42 - Courant continue (DC) et courant alternatif (AC).

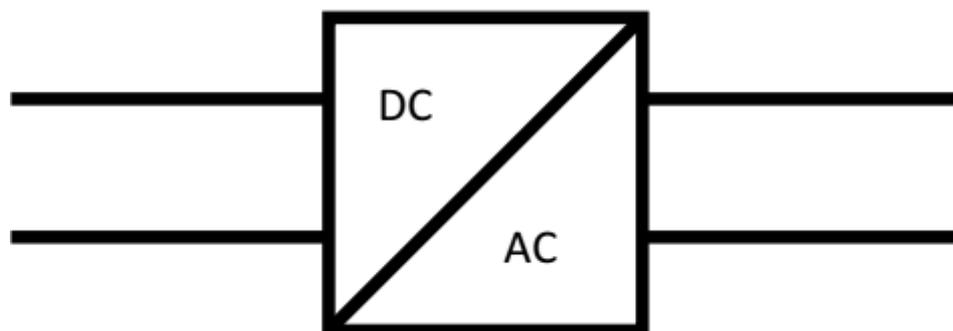


Fig. 43 - Symbole d'un convertisseur DC-AC. [19]

### 2.7.1 Le choix de l'onduleur

Le signal généré est une onde carrée, ou sinusoïdale, le dimensionnement d'un onduleur ses puissances maximales de chaque équipement à connecter au courant alternatif.

La puissance apparente de l'onduleur s'exprime en voltampère (VA) et sera supérieur à cette somme pour tenir compte des éventuels courants de pointe élevés et de facteur de puissance des appareils. Un bon onduleur aura un rendement élevé (supérieur à 90<sup>o</sup>), le rendement de l'onduleur sera meilleur que la tension continue à l'entrée est élevée.

- **Tension d'entrée** : elle est égale à celle du bus continu.
- **Puissance conseillée** : c'est la puissance nominale de l'onduleur (VA) définit d'après les besoins exprimés. Tient en compte le nombre d'équipements et leur puissance ainsi que de leur nature.
- **Tension de distribution** : elle est généralement de 220V alternatif si l'onduleur est monophasé et de 380 V si l'onduleur est triphasé. [41]

Avant de choisir un onduleur il faut donc assurer que:

- Les variations de la tension de sortie sont acceptées par la charge
- L'onduleur est protégé contre les surcharges côté DC et AC, et contre la surchauffe
- L'onduleur coupe les utilisateurs en cas de trop basse tension DC.
- Son rendement est suffisant au point de fonctionnement de la charge.
- Le courant d'entrée admissible de l'onduleur soit supérieur au courant maximum délivré par le champ de modules.

#### Type d'onduleur solaire

On peut distinguer deux types d'onduleurs utilisés dans les énergies renouvelables, onduleurs autonomes et les onduleurs connectés au réseau, Il existe aussi les onduleurs hybrides ou intelligents.

##### 1) Onduleurs autonomes

Un onduleur autonome détermine lui-même sa propre fréquence et sa propre tension alternative. Il dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté. Cela conduit à distinguer :

- Onduleur de tension alimenté par une source de tension continue.
- Onduleur de courant alimenté par une source de courant continu. [63]

L'onduleur autonome fournit une tension alternative à partir d'une source continue (batterie ou panneau) Fig. 45 (a).

##### 2) Onduleurs non autonomes (connecté au réseau)

Il doit être connecté au réseau et à la source continue pour délivrer une tension alternative et possibilité de l'injecter au réseau électrique. Fig.45 (b).

### 3) Onduleurs hybrides ou intelligents (onduleur solaire)

Est une nouvelle génération dédiée aux applications d'énergie renouvelable pour l'autoconsommation et en particulier pour les panneaux solaires photovoltaïques (onduleur solaire). L'énergie des panneaux solaires photovoltaïques est active seulement pendant la journée et essentiellement lorsque le Soleil est au zénith, Ce type est conseillé pour le pompage. Fig. 45 (c)

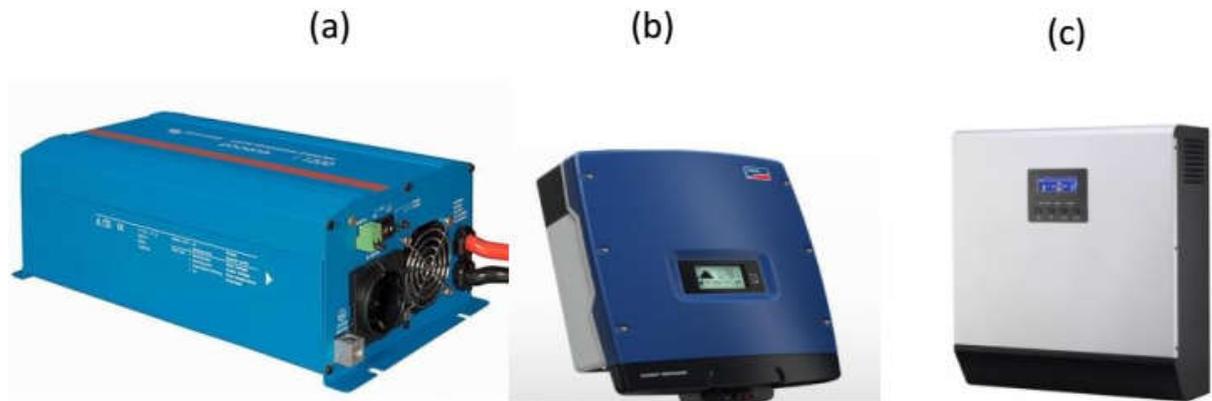


Fig. 44 - Les types d'onduleur solaires. [28]

#### 2.7.2 Micro-onduleur

Dans les systèmes à énergie solaire conventionnels, il existe des onduleurs dans l'ensemble du système, mais au fil du temps, un nouveau concept appelé micro-onduleur, il suffit simplement de changer l'onduleur de grande capacité avec plusieurs micro-onduleurs plus petits, elle repose sur le principe de réinjection directe sur le réseau de l'énergie produite individuellement par chaque panneau, est caractérisé par :

- Les panneaux sont câblés en parallèle, ce qui rend l'installation modulaire et évolutive.
- L'optimisation par MPPT (le point de puissance maximum suivi) de chaque panneau individuellement.
- La tension élevée en sortie de panneau permet une diminution notable de la section des conducteurs à puissance identique
- Aucune propagation de défaut : Une baisse de performances sur un panneau n'affecte pas les autres. Chacun fournit son maximum de puissance (MPPT individuel). [64]

#### 2.8 Le câblage

Les câbles relient électriquement tous les composants du système PV, le câblage est un point critique de toute installation PV. Il est très important de bien dimensionner les conducteurs afin d'éviter la circulation d'un courant très fort dans les câbles même pour de petites puissances dans le cas d'utilisation de faibles tensions. Le choix des câbles dont l'enveloppe est adaptée aux conditions d'utilisation est nécessaire. [8]

La première tâche, est d'effectuer le branchement par un câble électrique qui sera un câble de qualité par exemple, il devra subir les agressions du vent, de la pluie, du soleil et d'autres. La section sera d'au moins  $1.5 \text{ mm}^2$ ,  $2.5 \text{ mm}^2$  dès que la longueur excède 25 m ou que la puissance du module soit supérieure à 100 W. [22]

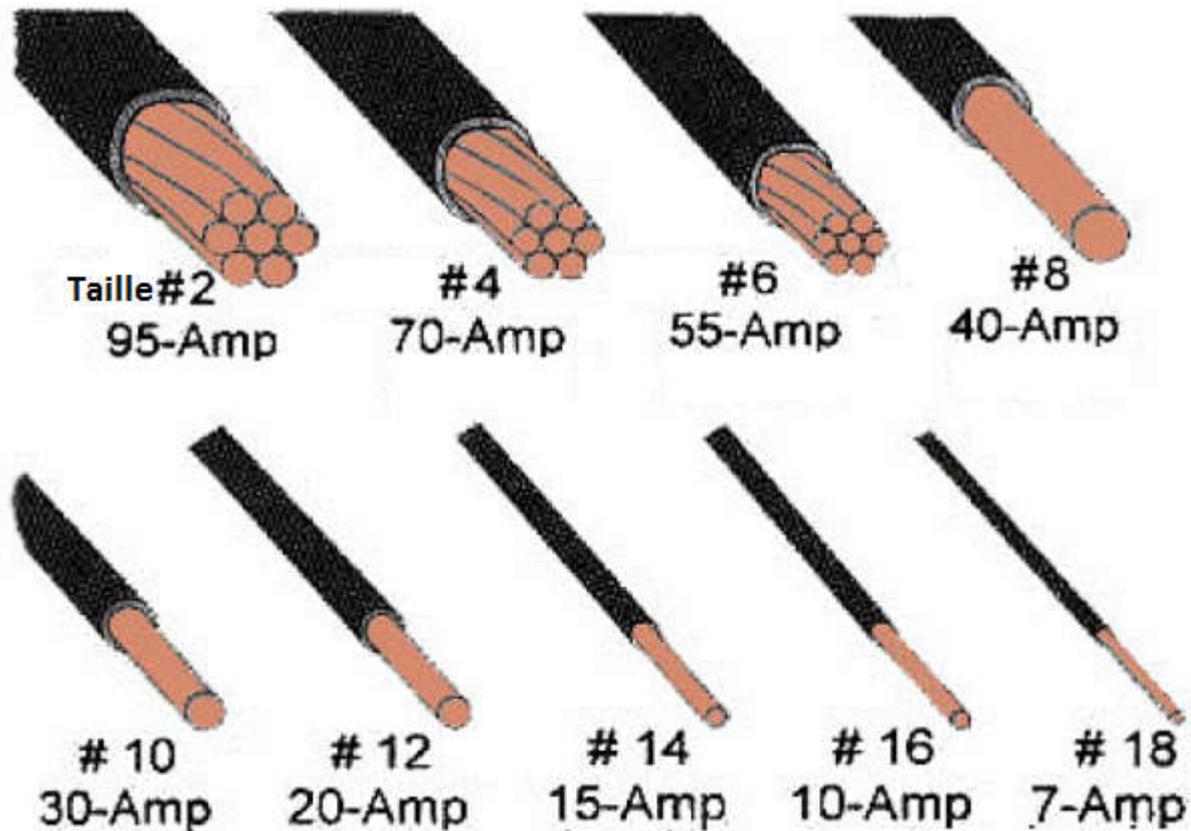


Fig. 45 - Les qualités des câbles. [65]

### 2.9 Protection d'un système photovoltaïque

Chaque élément de ce système doit être protégé par des organes convenables à sa nature et principe de fonctionnement sans oublier le raccordement de cet élément avec des câbles qui remplissent les conditions d'utilisation de point de vue section ou construction et pour cela on va mettre chaque élément avec la protection qui correspond :

**Les panneaux solaires** : on met des disjoncteurs DC ou fusible plus la mise à la terre. ainsi que le parafoudre.

**Les batteries** : il faut les protéger contre la surcharge ou le court-circuit dans les deux cotés (coté batteries –régulateur) et (coté batteries-onduleur) avec des disjoncteurs DC ou fusibles.

**Le régulateur de charge** : il est déjà équipé d'une protection interne représentée par les deux éléments qui sont raccordés avec lui (les panneaux et les batteries) et qui sont équipés avec cette propre protection indiquée.

**L'onduleur** : généralement les onduleurs solaires sont protégés eux-mêmes contre les surcharges, court-circuit ou autre défaut mais malgré ça il est indispensable de mettre un disjoncteur

différentiel à la sortie de l'onduleur pour éviter les défauts de la charge tel que court-circuit ou surcharge sans oublier la mise à la terre de tout le système afin d'obtenir une bonne protection.

**Le câblage dans les deux cas (DC et AC) :** on choisit la section et le chemin de câble convenable compte tenu de la température ambiante, chute de tension.



**Fig. 46 - Les organes de protection. [28]**

### **2.10 Conclusion**

L'objectif de ce chapitre est d'exposer et expliquer en détail les caractéristiques des cellules PV, les éléments de base de l'installation photovoltaïques et les organes de protection de ces systèmes.

**CHAPITRE 3**  
**DIMENSIONNEMENT DE**  
**L'INSTALLATION PV**

### 3 Dimensionnement de l'installation PV

#### 3.1 Introduction

Ce chapitre présente en premier lieu l'objectif général de ce travail suivi par la collecte des données (l'emplacement de la Ferme, l'ensoleillement et l'angle d'inclinaison).

D'abord, nous avons calculé la consommation journalière des équipements utilisées. Puis, nous avons abordé le dimensionnement des différentes compositions de notre installation. En commençant par la méthode de dimensionnement ainsi le nombre de panneaux nécessaires, les batteries, régulateur, onduleur ainsi les câbles choisis.

#### 3.2 L'objectif général

L'objectif général de cette étude est l'alimentation de la ferme pilote en énergie électrique d'une façon économique et rentable d'une manière autonome à l'aide de l'énergie solaire en utilisant un système photovoltaïques qui contribué à la protection de l'environnement.

#### 3.3 La collecte des données. (L'emplacement du Ferme, l'ensoleillement, l'angle d'inclinaison).

##### L'emplacement du Ferme

Le site concerné par notre étude d'alimentation en énergie solaire photovoltaïques est situés dans la wilaya de Tissemsilt (à côté de l'institut des sciences et technologies). (**Annexe A**) aux coordonnées géographiques suivantes :

Une latitude de  $35^{\circ}.62828$  Nord et longitude égale  $1.906815^{\circ}$  est et une altitude de 932 m.

##### L'ensoleillement

$$I_r = 5.047 \text{ kwh}/m^2/\text{jr}$$

$$I_r = 1842 \text{ kwh}/m^2/\text{an} \quad [66]$$

##### L'angle d'inclinaison

L'inclinaison exprime l'angle que fait le panneau avec l'horizontale il est en degrés. Pour des modules produisent un maximum d'énergie, il faut que leur surface frontale soit perpendiculaire aux rayons solaires et selon les saisons. À midi, il est le point le plus haut du soleil dans le ciel.

**Tableau 1 - Inclinaison des panneaux en fonction de la latitude. [41]**

Latitude	Inclinaison
$\varphi < 10^\circ$	$\alpha = 10^\circ$
$10^\circ < \varphi < 30^\circ$	$\alpha = \varphi$
$30^\circ < \varphi < 40^\circ$	$\alpha = \varphi + 10^\circ$
$40^\circ > \varphi$	$\alpha = \varphi + 15^\circ$

Notre latitude  $\varphi = 35.62828^\circ$  et d'après le tableau l'inclinaison des panneaux est de :  
( $30^\circ < \varphi < 40^\circ$ ).

Donc  $\alpha = 45.62$

### 3.4 Calcul des besoins énergétiques

**Tableau 2 - Tableau représente l'énergie consommée par la ferme pilote.**

Equipement	Nombre	Puissance unitaire (w)	puissance totale	durée d'utilisation h/jour	énergie consommé (wh)
Lampes	20	10	110	7	770
Machine à laver	1	360	360	0,5	180
Cuisinière	1	60	60	0,5	30
Climatiseur	1	894	894	2,5	2235
Chaudière à gaz	1	120	120	10	1200
four-micro- onde	1	700	700	0,5	350
ordinateur bureau	1	140	140	5	700
Micro portable	2	45	90	8	720
Télévision	3	50	150	10	1500
Réfrigérateur	1	150	150	24	3600
Projecteur	5	50	250	5	1250
la pompe d'irrigation	1	1470	1470	6	8820
Pompe immergée	1	1800	1800	2	3600
Chargeur de téléphone	3	50	150	4	600
			<b>6534 W</b>	85 heures	
				L'énergie consommée par jour	26,185 Kwh/jr
				énergie annuelle	9557,525 Kwh/an

### 3.5 Dimensionnement de l'installation photovoltaïque

#### 3.5.1 La méthode de dimensionnement

##### 3.5.1.1 La méthode de la probabilité d'erreur dans la consommation

Elle permet d'optimiser le dimensionnement d'un système dans des conditions complexes (ciel nuageux pour plusieurs jours, fluctuation saisonnières de l'irradiation,...etc) grâce à un logiciel bien adapté. L'inconvénient de cette méthode est qu'il faut connaître les radiations qui correspondent aux données horaires sur le site d'installation pour un nombre d'années trop grand (10 à 20 ans). [56]

##### 3.5.1.2 La méthode du mois le plus défavorable

Le mois le plus défavorable basé sur l'estimation de l'énergie récupérable pour une période critique d'un mois, [22] Ce dernier correspond au mois pendant lequel la quantité de l'irradiation moyenne mensuelle est la plus faible de l'année ou dans certains pays la période d'hivers est rude (le mois de décembre est le mois le plus défavorable en Algérie). [67]

##### 3.5.1.3 La méthode de la moyenne annuelle

Elle est très proche de la méthode du mois le plus défavorable, cette méthode elle utilise l'irradiation journalière en (KWh/m<sup>2</sup>/jr) [22], mais pour une moyenne qui s'étend pour toute une année au lieu d'un seul mois. Donc on calcule la moyenne mensuelle de l'irradiation récupérable sur notre lieu pour les 12 mois de l'année et on fait la moyenne annuelle de celle-ci. [67]

##### 3.5.1.4 La méthode retenue

La méthode de la moyenne annuelle est celle qui convient le mieux pour notre installation, elle nous donne une bonne précision que l'autre méthode c'est bien que la méthode de la moyenne annuelle.

#### 3.5.2 Dimensionnement du champ photovoltaïque

##### 3.5.2.1 L'irradiation solaire (Modèle d'Angstrom, Modèle de Coppolino .. etc)

###### a) Modèle d'Angstrom

$$H/H_0 = (A + B * \frac{S}{S_0}) \quad (11)$$

S : représente la durée quotidienne de l'ensoleillement naturel.

S<sub>0</sub> : représente la durée quotidienne de l'ensoleillement naturel (extraterrestre).

H : la mesure de l'irradiation solaire naturelle. [kwh/m<sup>2</sup>]

H<sub>0</sub> : la mesure de l'irradiation solaire naturelle (extraterrestre).

A et B sont des coefficients de régression. [69]

## b) Modèle de Coppolino

$$C = 7.8 * S^{0.5} \left( \sin \left( \omega^{1.15} * \frac{10^6}{3600} \right) \right) \quad (12)$$

S : représente la durée quotidienne de l'ensoleillement naturel

### 3.5.2.2 Orientation des panneaux solaire PV

Elles doivent assurer le maintien de l'orientation, les panneaux sont toujours orientés vers l'équateur :

- Orientation vers le sud dans l'hémisphère Nord ;
- Orientation vers nord dans l'hémisphère Sud ; [56]

En conséquence, l'orientation optimale d'un panneau solaire est bien le sud, là où le soleil sera à son zénith (la position la plus haute dans le ciel) au milieu de la journée. [69]

L'orientation pour notre situation géographique (nord-ouest) sera vers le sud.

### 3.5.2.3 Calcul de la puissance crête totale du champ photovoltaïque. [70]

La puissance crête du champ photovoltaïque dépend de l'irradiation du lieu. On la calcule de façon à satisfaire les besoins pendant un jour sélectionné d'après la moyenne annuelle, en appliquant la formule suivante :

$$K=0.65$$

$$E_{pv} = E_c / K \quad (13)$$

$$E_{pv} = \frac{25555}{0.65}$$

$$E_{pv} = 4.028 * 10^4 \text{ wh/jr}$$

$E_{pv}$  : L'énergie consommée réelle.

$E_c$  : L'énergie consommée.

K : Facteur de correction globale. [71]

$$P_C = E_{pv} / R \quad (14)$$

$$P_C = 3.932 * 10^4 / 5.5$$

$$P_C = 7324.74 \text{ W}_C$$

$P_C$  : Puissance crête de la centrale photovoltaïque ( $W_C$ ).

Ir : Irradiation moyenne journalière reçue par le capteur photovoltaïque correspondant. ( $Wh.m^{-2}.jour^{-1}$ ).

R : durée de soleil.

### 3.5.2.4 La tension de fonctionnement

La tension dépend toujours à la puissance crête.

Le Choix de la tension de fonctionnement en fonction de la puissance crête du champ Photovoltaïque en watt. De façon générale :

- Moins de 500 watts crête : elle est de 12 V.
- De 501 à 2000 watts crête : elle est de 24 V.
- De 2001 à 10000 watts crêtes : elle est de 48 V.
- Plus de 10000 watts crête : elle est supérieure à 48 V. [56]

D'après le tableau, la puissance totale de la charge (7324.47 Wc) nécessite une tension du système  $V_{sys} = 48v$

### 3.5.2.5 Détermination du nombre de modules à installer

Caractéristique des panneaux solaires :

**Tableau 3 - Caractéristique de panneau PV. [72]**

Technologie de cellule	Monocristallin
<b>Puissance nominale (<math>P_{Cellule}</math>)</b>	<b>250 w</b>
<b>Tension de service (U)</b>	<b>30.59 V</b>
<b>Courant de service (<math>I_{MAX}</math>)</b>	<b>8.17 A</b>
<b>Tension en circuit ouvert (<math>V_{CO}</math>)</b>	<b>37.59 V</b>
<b>Courant de court-circuit (<math>I_{CC}</math>)</b>	<b>8.79 A</b>
<b>Taille de cellule (L/I)</b>	<b>156*156 cm</b>

Le nombre des modules photovoltaïques est déterminé en fonction de la puissance crête unitaire du module choisi et de la puissance crête du générateur par l'équation suivante [70]

$$N_m = P_c / P_{cellule} \quad (15)$$

$$N_m = 7324.47 / 250$$

$$N_m = 29.29$$

$$N_m = 32$$

On prend 32 panneaux pour éviter la chute de tension

Avec :

$P_c$  : puissance crête de l'installation.

$P_{cellule}$  : puissance crête unitaire.

#### Les modules connectés en série

$$N_{m,s} = V_{pv} / U \quad (16)$$

$$N_{m,s} = 48 / 30.59$$

$$N_{m,s} = 1.569$$

$$N_{m,s} = 2$$

$V_{pv}$  : Tension du générateur PV.

**U** : Tension nominale unitaire.

### Les modules connectés en parallèle

$$N_{m,p} = N_m / N_{m,s} \quad (17)$$

$$N_{m,p} = 32 / 2$$

$$N_{m,p} = 16$$

### La surface du champ [28]

La surface du champ PV utile est donnée par les dimensions réelles des panneaux et le nombre de panneaux.

$$\text{La surface d'un panneau} = 1.56 * 1.56 \text{ m}^2$$

La surface du champ :

$$S_r = L * I * N_m \quad (18)$$

$$S_r = 1.56 * 1.56 * 32$$

$$S_r = 77.87 \text{ m}^2$$

Le courant total fourni par les panneaux est :

$$I_{tot} = N_{m,p} * I_{max} \quad (19)$$

$$I_{tot} = 16 * 8.17$$

$$I_{tot} = 130.72 \text{ A}$$

$I_{max}$  : le courant de service.

Ce courant est très élevé, donc pour adapter ce courant aux équipements existant, on va les diviser en deux sous-systèmes de 3662 Wc. Le nombre de modules pour chaque sous-générateur sera alors ; 16 modules.

$$I = I_{tot} / 2$$

$$I = 130.72 / 2$$

$$I = 65.36 \text{ A}$$

Les nouvelles valeurs pour deux sous-systèmes :

$$\text{Energie consommée} \quad E_{C1} = \frac{E_C}{2} = 1.309 * 10^4 \text{ wh/jr}$$

$$\text{L'énergie consommée réelle} \quad E_{pv1} = \frac{E_{C1}}{K} = 2.014 * 10^4 \text{ wh/jr}$$

$$\text{La puissance crête} \quad P_{c1} = \frac{E_{pv1}}{R} = 3.662 * 10^3 \text{ Wc}$$

$$\text{Nombre de panneaux} \quad N1 = \frac{P_{c1}}{P_U} = 14.64$$

$$N1 = 16$$

$$\text{Les modules connectés en série} \quad N_{m,s1} = \frac{48}{30.59} = 1.569$$

$$N_{m,s1} = 2$$

Les modules connectés en parallèle

$$N_{m,p1} = \frac{16}{2}$$

$$N_{m,s} = 8$$

Alors chaque sous-système contient de 02 panneaux placé en série et 08 panneaux placé en parallèles

### 3.5.3 Dimensionnement des batteries [73]

Caractérisé par :  $N_j = 4$

$PDD = 0.8$

$\eta_{bat} = 0.9$

$$C_{bat} = E_c * N_j / (PDD * V_{bat} * \eta_{bat}) \quad (20)$$

$$C_{bat} = \frac{25555 * 4}{0.9 * 0.8 * 24}$$

$$C_{bat} = 3031 Ah$$

$E_c$  : L'énergie consommé Wh/jr.

$N_j$  : nombre de jour d'autonomie.

$PDD$  : la profondeur de décharge.

$V_{bat}$  : la tension de la batterie.

$\eta_{bat}$  : rendement de la batterie.

#### Les batteries connectées en parallèle

$$N, B_p = C_{bat} / C_{bat,u}$$

$C_{bat,u} = 300 Ah$

$$N, B_p = 3031 / 300$$

$$N, B_p = 10.102$$

$$N, B_p = 11$$

#### Les batteries connectées en série

$V_{bat,u} = 24 V$

$$N, B_s = V_{pv} / V_{bat,u}$$

$$N, B_s = 48 / 24$$

$$N, B_s = 2$$

Le nombre des batteries :

$$N = N, B_p * N, B_s$$

$$N = 11 * 2$$

$$N = 22$$

Pour notre type de batterie et selon l'équipement disponible ont choisi les Batteries solaires 24 V 300ah lifepo4 de batterie d'ion de lithium pour le stockage solaire, leur temps de cycle c'est 2000 fois et garantie de 5 ans. [74]

Lorsqu'on a deux sous-systèmes donc chacun contient de 11 batteries.

### 3.5.4 Dimensionnement du régulateur

Le dimensionnement de la régulation de charge (à l'entrée) est fonction de la puissance du générateur. Tandis que le dimensionnement de la régulation de décharge (à la sortie) est fonction de la puissance totale des récepteurs. Ainsi, il faut tenir compte du courant de charge maximale que les modules sont susceptibles de débiter (on prend 1,5 fois le courant de court-circuit total des modules qui est de 8.79A). [75]

Parmi les différents types de régulateurs qu'on a cités dans le deuxième chapitre, on a choisi le mieux adapté à notre installation. C'est le régulateur MPPT (pour des puissances optimales), avec une tension d'alimentation :  $V_{pv} = 48 \text{ V}$ .

$$I_e = I_{cc} * N_{m,p1} * 1.5 \quad (21)$$

$$I_e = 8.79 * 8 * 1.5$$

$$I_e = 105.48 \text{ A}$$

$I_e$  : courant à l'entrée (A).

$V_{co}$  : tension de circuit ouvert (V).

$$I_s = \frac{P * 1.5}{V * N_{m,p1}} \quad (22)$$

$$I_s = \frac{6444 * 1.5}{48 * 8}$$

$$I_s = 25.17 \text{ A}$$

$I_s$  : le courant à la sortie (A).

NP : le nombre des cellules en parallèles. [22]

Pour notre type de régulateur et selon l'équipement disponible ont choisi un Régulateur Haute Efficacité MPPT Contrôleur de Charge Solaire (12 V 24 V 48 V 60A 80A 100A 120A). [76]

Dans ce cas le régulateur le plus adaptera c'est du 48V.

### 3.5.5 Dimensionnement des onduleurs

Le dimensionnement d'un onduleur se base sur la somme des puissances des équipements à connecter au courant alternatif et se fait avec :

- ✓ Tension d'entrée : elle est égale à celle de la batterie ou du régulateur.
- ✓ Tension de sortie: les charges de notre installation fonctionnent avec 220 VAC.
- ✓ Puissance nominale : Puissance nominale de l'onduleur (VA), définie d'après les besoins.

L'exprimés elle tient compte du nombre d'équipements, et de leurs puissances. [56]

Le choix de l'onduleur se fait d'après la tension de fonctionnement du système solaire et la puissance totale correspondante aux gammes industrielles existantes.

$$P_{ond} = P_t * 1.3 \quad (23)$$

$$P_{ond} = 6534 * 1.3$$

$$P_{ond} = 8494 \text{ W}$$

$P_{ond}$  : la puissance de l'onduleur (W). [28]

On doit sélectionner un onduleur ayant les caractéristiques suivantes : Puissance supérieure à  $P_t$ .

$P_t = 6534 \text{ W}$ .

Donc un onduleur de  $P_{ond \text{ réelle}} = 10 \text{ kW}$ .

Pour notre type d'onduleur et selon l'équipement disponible ont choisi l'onduleur Fronius Symo 10.0-3-M (2 MPPT) Tri leur Courant max de court-circuit est 24.8 A et le Courant de sortie max est 20 A. [77]

### 3.5.6 Dimensionnement des câbles [22] [56] [28]

$$p_j = \Delta V * I = R * I^2 \quad (24)$$

$$\Delta V = R * I \quad (25)$$

**P<sub>j</sub>** : les pertes par effet joule.

**ΔV**: Chute de tension (V).

**R** : résistance du câble.

**I** : Courant de circulation.

On calcul les sections des câbles.

D'après les formules suivantes :

$$S = (\rho * L) / R \quad (26)$$

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

$$\Delta V = e * V$$

$$S = \frac{\rho * L * I}{e * V}$$

-  $\rho$ : Résistivité du matériau conducteur (cuivre).

- L : Longueur de la canalisation (m).

- S : Section des conducteurs (mm<sup>2</sup>).

### Entre les panneaux

La chute de tension admissible tolérée est :  $\varepsilon = 0.003$ , la longueur du câble est  $L_0 = 1.56 \text{ m}$  et la tension d'alimentation  $V = 48 \text{ V}$ .

$$S_0 = \frac{\rho * I * L_0}{e * V} = 1.204 \text{ mm}^2$$

Donc on le relie avec le câble de 2.5 mm<sup>2</sup>.

### Entre le boîtier de raccordement et le régulateur

La chute de tension admissible tolérée  $\varepsilon=0.003$ ,  $\rho=0,017 \Omega.\text{mm}^2/\text{m}$  (câbles en cuivre).  
 $V=48\text{V}$ .

$L = 20 \text{ m}$  selon la position de panneaux, pour le générateur le plus éloigné des régulateurs

$$S = \frac{\rho * I * L}{e * V} = 15.432 \text{ mm}^2$$

Donc on le relie avec le câble de 16 mm<sup>2</sup>.

### Entre le régulateur et les batteries

La chute de tension admissible tolérée est :  $\varepsilon=0.003$ , la longueur du câble est  $L_1 = 5\text{m}$  et la tension d'alimentation  $V=48\text{V}$ .

$$S_1 = \frac{\rho * I_s * L_1}{e * V} = 1.50 \text{ mm}^2$$

Donc on le relie avec le câble de 2.5 mm<sup>2</sup>.

### Entre les batteries

La chute de tension admissible tolérée est :  $\varepsilon=0.003$ , la longueur du câble est  $L_2 = 2\text{m}$  et la tension d'alimentation  $V=48\text{V}$ .

$$S_2 = \frac{\rho * I_s * L_2}{e * V} = 0.63 \text{ mm}^2$$

Donc on le relie avec le câble de 2.5 mm<sup>2</sup>.

### Entre les batteries et l'onduleur

La chute de tension admissible tolérée à l'entrée d'onduleur  $\varepsilon = 0.003$ .  $L_3 = 10 \text{ m}$ ,  $V=48\text{V}$

$$S_3 = \frac{\rho * I_s * L_3}{e * V} = 3.01 \text{ mm}^2$$

Donc on le relie avec le câble de 4 mm<sup>2</sup>.

### Entre l'onduleur et le disjoncteur

#### Le courant de l'onduleur

$$I_{ond} = P_{ond}/V_{pv}$$

$$I_{ond} = 8494/48$$

$$I_{ond} = 176.96 \text{ A}$$

La tension de fonctionnement :  $V_f=220 \text{ V}$ .

La chute de tension admissible tolérée à l'entrée d'onduleur  $\varepsilon = 0.003$ .  $L_4 = 3 \text{ m}$ ,  $V_f=220 \text{ V}$ .

$$S_4 = \frac{\rho * I_{ond} * L_4}{e * V_f} = 2.73 \text{ mm}^2$$

Donc on le relie avec le câble de 4 mm<sup>2</sup>.

### 3.5.7 Détermination des éléments de protection

#### a) Protection des régulateurs par les disjoncteurs de courant continu :

Le courant extérieur des panneaux solaires 65.36 A.

Donc il faut choisir un disjoncteur de courant continu supérieur à 65.36 A.

#### b) protection de l'onduleur par le disjoncteur:

$$I = P / U$$

$$I = 8494 / 48 = 176.56 \text{ A.}$$

Donc il faut choisir un disjoncteur de courant continu supérieur à 176.56 A.

#### c) Protection de la batterie par le disjoncteur :

Le courant extérieur du régulateur 25.17 A.

Donc il faut choisir un disjoncteur de courant continu supérieur à 25.17 A.

#### d) Protection de la charge par le disjoncteur différentielle :

Le courant maximal de la charge (A) = (la puissance max (VA) / la tension du système (V)).

$$I(\text{VA}) = 0.8(\text{W}).$$

La puissance max 8377 W = 10620. VA.

Le courant maximal de la charge (A) = 10620 / 220 = 48.27 A

Donc il faut choisir un disjoncteur différentiel de courant alternatif supérieur 48.27 A.

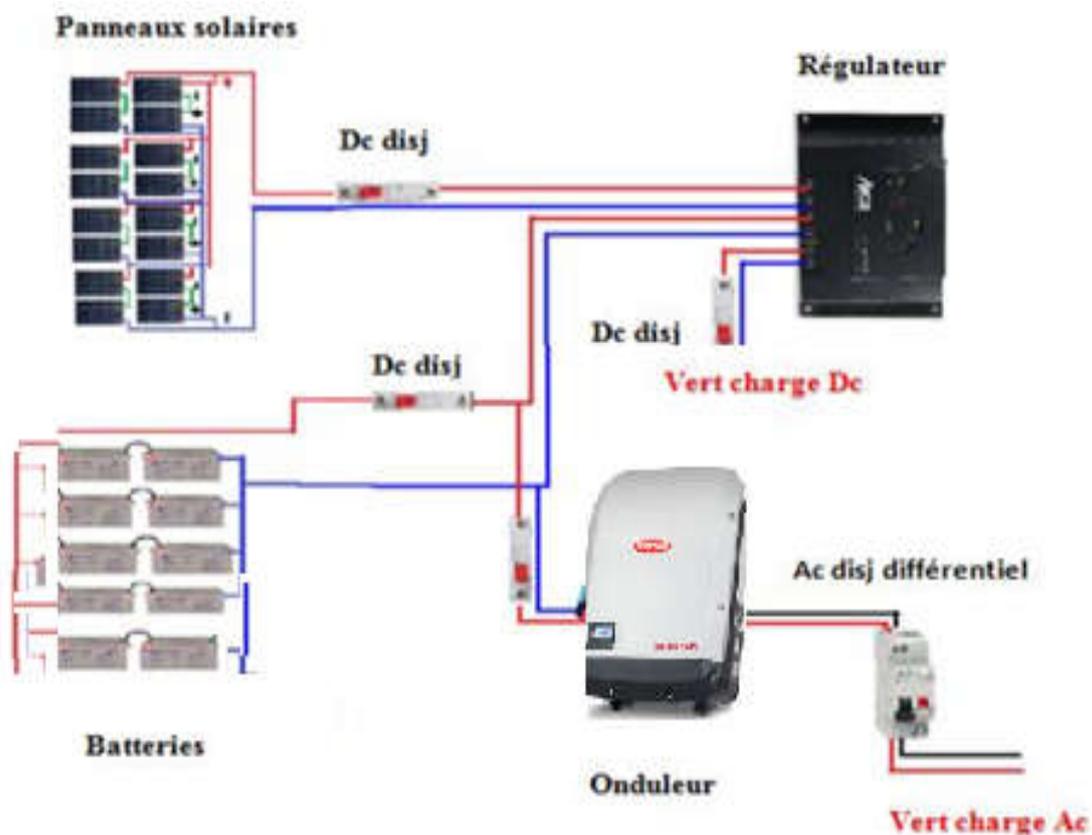


Fig. 47 - Schéma de principe pour protéger la partie DC et AC.

Nous pouvons sécuriser notre système en ajoutant un groupe électrogène qui fonctionne à son tour en cas de panne des panneaux ou de problème, ou même si l'électricité provenant de l'énergie solaire insuffisante.

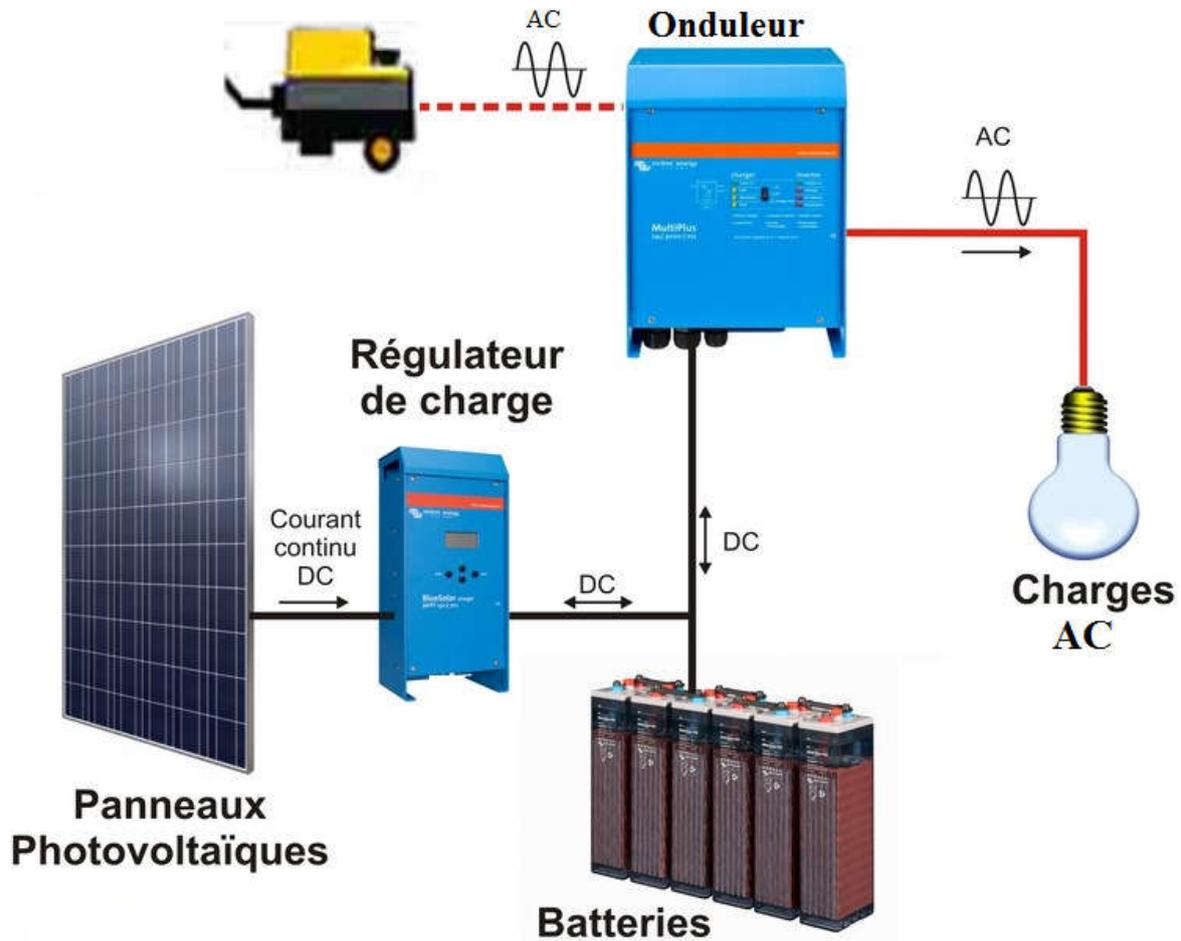


Fig. 48 - Système photovoltaïque raccordé à un groupe électrogène. [78]

### 3.6 Conclusion

Ce chapitre consacré à voir l'emplacement géographique de la ferme pilote, l'irradiation et l'angle d'inclinaison des panneaux PV, Cela nous a permis de choisir la méthode de la moyenne annuelle car le climat à Tissemsilt n'est pas vraiment perturbé le long de toute l'année. Ensuite, nous avons abordé les différentes étapes de dimensionnement de notre installation afin de couvrir intégralement les besoins en électricité de notre ferme et pour la production végétale.

## Conclusion générale

Ce travail de mémoire a permis d'examiner de plus près la technologie des systèmes photovoltaïques. Cette technologie présente les qualités sur le plan écologique car le système photovoltaïque est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu ce n'est que l'occupation de l'espace pour l'installation de grande dimension.

Nous avons traité un procédé de dimensionnement d'un système photovoltaïque dans une ferme pilote pour la production végétale se compose d'une maison et un terrain agricole d'un hectare, dont la consommation journalière moyenne est de 2634 watt heure par jour.

Le climat à Tissemsilt n'est pas stable, ce qui nous oblige à choisir la méthode de la moyenne annuelle.

Ainsi pour ce qui concerne notre lieu pour lequel, l'alimentation devra être permanente, les résultats suivants ont été trouvés après le calcul de dimensionnement. Pour un besoin énergétique de 2634 Watts heure par jour, on aura à installer :

- Un champ photovoltaïque de puissance égale à 7324.47 Watts Crête constitué de 32 modules de 250 Watt chacun, dont 2 panneaux en série pour 16 panneaux en parallèle.
- Le courant total fourni par les panneaux est 130.72 A, c'est ce qui nous a obligés de faire deux sous-systèmes de 3662.23 Wc chacun.
- Le nombre de modules pour chaque sous-générateur sera alors 16 modules, dont 2 panneaux en série pour 8 panneaux en parallèle.
- Un ensemble constitué de 22 batteries d'ion de lithium de 300 Ampères heure ayant une garantie de 5 ans sous 24 Volt chacune.
- Deux régulateurs de 120 Ampères comme courant d'entrée et montés en parallèle sous 48 volts.
- Un onduleur et remplissant les caractéristiques suivantes : la tension d'entrée max de 200 V, celle de sortie 260/150 V, la fréquence de 50 Hz et une puissance de 10 KVA
- Les organes de protection du système photovoltaïque.

Le but général de notre étude est de produire de l'énergie électrique de manière autonome à Tissemsilt à partir de l'énergie solaire pour la production végétale. En utilisant une installation des systèmes photovoltaïques et l'en relier avec un groupe électrogène comme un secoure.

## Bibliographie

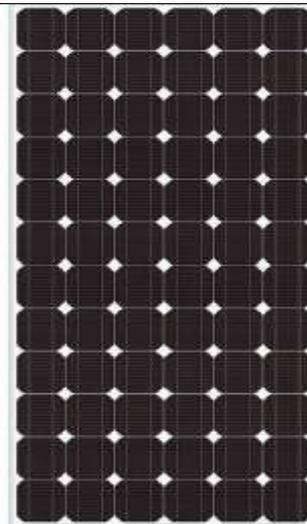
- [1] Benotmane, S., Moualek, F., 2016. Etude et simulation des systèmes photovoltaïques connectés à un microgrid, p 8 ;
- [2] Zazna, b., Madi, S., 2015. Etude et caractérisation d'un panneau photovoltaïque type condor, pp 6 ;
- [3] Jelali, A., 2012. Interconnexion d'un système photovoltaïque sur le réseau électrique, p 4 ;
- [4] Jérôme, F., 2005. Les recherches d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière entre 1839 et 1843, histoire d'une interaction réussie entre science et photographie ;
- [5] <http://notresolairephotovoltaïque.e-monsite.com/album-photos/>. Date de la dernière consultation du site: 21/03/2019.
- [6] Boudehouche, M., Ouennoughi, M., 2016. Gestion d'un système photovoltaïque avec stockage, P4 ;
- [7] <http://tpeenergi photovoltaïque.e-monsite.com/pages/la-cellule photovoltaïque/historique-de-la cellule-photovoltaïque.html>. Date de la dernière consultation du site: 02/04/2013.
- [8] Boukhlifa, H., 2017. Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque De 300kw ;
- [9] Kalaidji, F., Chekrouni, N., Commande d'un générateur photovoltaïque débitant sur une pompe (MPPT), P 9 ;
- [10] Besarati, S., Padilla, R., Goswami, D., Stefanakos, E., 2013. The potential of harnessing solar radiation in Iran: generating solar maps and viability study of PV power plants ;
- [11] Nacer, T., Hamidat, A., Nadjemi, O., Bey, M., 2016. Feasibility study of grid connected photovoltaic system in family farms for electricity generation in rural areas ;
- [12] Anabela, B., Lina, L., Lígia, P., Sara, S., Marieta, V., 2017. Accounting for local impacts of photovoltaic farms: The application of two stated preferences approaches to a case-study in Portugal ;
- [13] Mahmood, H., 2018. The technological system of production and innovation: The case of photovoltaic technology in China ;
- [14] Sebastijan, S., Klemen, S., Bojan, Š., Miralem, H., 2019. Analysis of the performance of photovoltaic systems in Slovenia ;
- [15] Benjamin, B., Patrick, M., Heiko, T., Adela, M., 2018. The German experience with integrating photovoltaic systems into the low-voltage grids ;
- [16] Maammeur, H., Hamidat, A., Loukarfi, L., 2013. Energy intake of a PV system from grid-connected agricultural farm in CHLEF (ALGERIA) ;
- [17] Baniasad, A., Ameri, M., 2011. The effect of fuel price on the economic analysis of hybrid (photovoltaic/diesel/battery) systems in Iran. Energy Sources ;
- [18] Hadj, B., 2011. Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé, pp 15 ;
- [19] Tahraoui, I., Halil, A., 2017. Dimensionnement et Etude d'une installation photovoltaïque pour une habitation domestique ;
- [20] Belhadj, M., 2008. Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome, p 28 ;
- [21] Debili, N., 2015. Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque ;
- [22] Zidane, A., 2012. Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque au niveau d'un puits de gaz;
- [23] Naim, H., 2016. Etude de gestion d'une mini –centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique. p.11 ;
- [24] Mouhous-chaouchi, S., 2012. Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné, p.16 ;
- [25] Thomas, M., 2014. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies, p 24 ;
- [26] Utku, D., 2014. Grid-connected photovoltaic system design for a shopping center in tartu ;

- [27] [https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=fr](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=fr). Le dernier jour de consultation : le 08/05/2019.
- [28] Merabet, A., 2018. Dimensionnement d'un système d'alimentation en énergie électrique par voie photovoltaïque pour l'alimentation d'une habitation ;
- [29] sadok, M., 2011. Détermination des Paramètres, Performances et Etude de la Dégradation des Modules Photovoltaïques en milieu saharien, p 16,17 ;
- [30] Bouayed, A., 204. Commande a deux axes d'un panneau photovoltaïque, p 15-17 ;
- [31] <https://couleur-science.eu/?d=10d2d2--cest-quoi-un-semi-conducteur>. Le dernier jour de consultation : le 07/04/2019.
- [32] <https://www.encyclopedie-energie.org/les-fours-de-cristallisation-du-silicium-photovoltaïque/>. Date de la dernière consultation du site:: le 07/04/2019.
- [33] Mustapha, B., 2015. Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome, p 31 ;
- [34] [http://www.futura-sciences.com/uploads/tx\\_oxcsfutura/schema-theorie-bandes.gif](http://www.futura-sciences.com/uploads/tx_oxcsfutura/schema-theorie-bandes.gif) . Le dernier jour de consultation : le 018/04/2019.
- [35] Dariga, M., 2010. Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique, p 33-38 ;
- [36] Romain, C., 2015. Etude du comportement thermique et électrique des cellules photovoltaïques en silicium cristallin sous concentration, p.34 ;
- [37] Alain, B., 2006. Réalisation de commandes MPPT Numériques ;
- [38] Khenfer, R., Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques, P 28 ;
- [39] Soteris, A., 2013. Solar energy engineering: processes and systems Academic Press.s.l:Academic Press, p 469 ;
- [40] Bendjamâa, I., 2012. Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque, p 36 ;
- [41] Mouassane, S., 2014. Gestion d'énergie d'un système photovoltaïque avec batteries ;
- [42] Corinne, A., 2006. Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie, p 12 ;
- [43] Angel-Cid, P., 2007. Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques, p 8-9 ;
- [44] ATek, M., 2013 Effets du taux d'ombrage sur les performances des cellules solaires à base de CIGS, p29 ;
- [45] Benmachiche, S., 2009. Etude des paramètres limitant le rendement d'une photopile à base d'une structure MIS, p 12-13 ;
- [46] Abada, S., 2011. Etude et optimisation d'un generateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic, p14 ;
- [47] <https://energie-developpement.blogspot.com/2012/01/cellules-photovoltaïque-technologies.html>. Le dernier jour de consultation : le 30/04/2019.
- [48] Yotto, H., 2011. Etude et conception d'une mini-centrale Photovoltaïque pour l'alimentation d'une partie de l'installation électrique de la residence de la republique du benin, p 10-11 ;
- [49] Mustapha, B., 2015. Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome, p 115 ;
- [50] Amara, K., 2015. Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension, p 30-31 ;
- [51] Kininger, F., Energiewandlung, R., 2003. Photovoltaic systems technology, p 81;
- [52] <https://www.sesat-formations.fr/2017/06/05/comprendre-leelectricite-la-tension/>. Date de la dernière consultation du site: 29/04/2013.
- [53] Azzoug, Y., 2008. Commande de la charge d'une batterie dans une Installation photovoltaïque, p 21 ;
- [54] Jonas, B., 2011. Design and feasibility study of PV systems in Kenya, p 20 ;

- [55] Ais, B., 2012. Topologie des onduleurs solaire : etude et syntese, p 24 ;
- [56] Iamarene, S., 2012. Dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour un site (BTS, BSC) du réseau télécom watania ;
- [57] Nishant, N., Thekla, P., Victor, V., 2018. Estimating battery lifetimes in Solar Home System design using a practical modelling methodology, p 1633 ;
- [58] MAZOUZ, K., 2012. Etude D'une Batterie De stockage dans un système photovolataique, p28 ;
- [59] Bencherif, M., 2015. Modélisation des paramètres d'une batterie Plomb-Acide, et son intégration dans un système photovoltaïque autonome, p 11-16 ;
- [60] Julien, L., 2007. L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés, p 25 ;
- [61] Jeremy, L., 2018. Accumulateurs hautes performances de type plomb-étanche-AGM avec collecteurs de courant à base de titane et de carbone flexibles, p 26,27 ;
- [62] Boutte, A., 2015. Identification des paramètres internes d'une batterie pour des applications photovoltaïques,p24;
- [63] Brahami, I., 2018. Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires, p 46 ;
- [64] Pierre, P., 2011. Optimisation du transfert d'énergie dans les systèmes photovoltaïques, p 36 ;
- [65] [https://wordpresshostingsignals.com/168042\\_circuit\\_breaker\\_size\\_chart\\_beautiful\\_circuit/](https://wordpresshostingsignals.com/168042_circuit_breaker_size_chart_beautiful_circuit/). 25/05/2019.
- [66] <https://globalsolaratlas.info/?c=35.78607,1.785278,10&s=35.62828,1.906815>.le dernier jour de consultation 14/05/2019.
- [67] Boudehouche, M., Ouennoughi, M., 2016. Gestion d'un système photovoltaïque avec stockage, P 53 ;
- [68] Yavuz, S., Mehmet, O., Ismail, D., Eyüp, S., 2014. Solar irradiation estimations and comparisons by ANFIS, Angstro m–Prescott and dependency models , p 119 ;
- [69] <http://www.lepanneausolaire.net/principes-base-l-orientation-panneaux-photovoltaïques.php>. Date de la dernière consultation du site: 25/05/2019.
- [70] Mekki, A., Beddiaf, A., 2016. Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome pour l'alimentation d'une ferme, p58 ;
- [71] Matallah, S., 2015 Dimensionnement et simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter un habitat dans la wilaya d'Ouargla, p 41 ;
- [72] Entreprise d'installation et réparation de matériel et équipement lies au domaine de l'énergie solaire et électrique, Mohammadia-Mascara-Algérie ;
- [73] Zerrouki, Z., BEREKSI, R., 2017 Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome, p 68 ;
- [74] <https://french.alibaba.com/product-detail/solar-batteries-24v-300ah-lifepo4-lithium-ion-battery-for-solar-storage-62108007195.html>. Date de la dernière consultation du site:08/06/2013.
- [75] Guettari, A., 2018. Etude et dimensionnement d'un système d'énergie électrique mixte: photovoltaïque et éolien, p 64 ;
- [76] [https://french.alibaba.com/product-detail/12V-24V-48V-60A-80A-100A60674959044.html?spm=a2700\\_galleryofferlist.normalList.71.35f01086oxLsxi](https://french.alibaba.com/product-detail/12V-24V-48V-60A-80A-100A60674959044.html?spm=a2700_galleryofferlist.normalList.71.35f01086oxLsxi).Date de la dernière consultation du site: 25/06/2013.
- [77] <https://www.wattneed.com/fr/onduleurs-et-convertisseurs/1659-onduleur-fronius-symo-100-3-m-0712971130074.html>. Date de la dernière consultation du site: 11/06/2013.
- [78] <http://www.lumensol.fr/sites-isoles-et-installation-photovoltaïque-autonome.html>. Date de la dernière consultation du site:29/06/2013.

### Caractéristique du panneau solaire Hareon HR-250 mono

Panneau solaire Hareon HR-250 mono



<b>Technologie de cellule</b>	<b>Monocristallin</b>
<b>Puissance nominale (<math>P_C</math>)</b>	<b>250 w</b>
<b>Tension de système max</b>	<b>1000 V</b>
<b>Tension de service (U)</b>	<b>30.59 V</b>
<b>Courant de service (<math>I_{MAX}</math>)</b>	<b>8.17 A</b>
<b>Tension en circuit ouvert (<math>V_{CO}</math>)</b>	<b>37.59 V</b>
<b>Courant de court-circuit (<math>I_{CC}</math>)</b>	<b>8.79 A</b>
<b>Taille de cellule (L/I)</b>	<b>156*156 cm</b>
<b>Poids</b>	<b>19.5 Kg</b>



## Abstract

Nowadays, solar energy has the ability to overcome the electrical energy demand. Autonomous photovoltaic energy systems is a feasible alternative to a grid connection in certain case. In addition, solar power can also be used as a complement to a weak grid, for facilities that requires a higher reliability of power.

The main objective of this report are to present the sizing of an autonomous electrical energy system, based on photovoltaic solar panels, with a good reliability, in order to supply electricity to a pilot vegetal production farm.

The conclusion is that already today solar power is a cost-effective energy source, for countries with much insolation like Algeria and a weak grid for the far places. However, it is very important that the system is designed for the specific facility and the required maintenance must be respected in order to get a reliable system that will be in operation during its expected lifetime.

**Key words:** solar energy; photovoltaic cell; Silicon; electric energy;.

## Résumé

De nos jours, l'énergie solaire a la capacité de répondre à la demande en énergie électrique. Où, les systèmes d'énergie photovoltaïque autonome constituent une alternative envisageable par rapport celle connecté au réseau dans certains cas. En outre, l'énergie solaire peut également être utilisée en complément d'un réseau faible, pour les installations nécessitant une plus grande fiabilité énergétique.

L'objectif principal de ce mémoire est de présenter le dimensionnement d'un système d'énergie électrique autonome, basé sur des panneaux solaires photovoltaïques, afin de fournir de l'électricité à une ferme pilote pour la production végétale à la région de Tissemsilt.

La conclusion est qu'actuellement, l'énergie solaire est une source d'énergie importante pour les pays qui ont un grand ensoleillement comme l'Algérie et un réseau faible pour les régions éloignées. Cependant, il est très important que le système soit conçu pour une installation spécifique et que la maintenance requise doit être respectée afin d'obtenir un système fiable qui fonctionnera pendant sa durée de vie prévue.

**Les mots clés :** énergie solaire; cellule photovoltaïque; silicium ; énergie électrique;.

## ملخص

في الوقت الحاضر، الطاقة الشمسية لديها القدرة على التغلب على الطلب الكثيف على الطاقة الكهربائية. حيث تعد أنظمة الطاقة الضوئية ذاتية الحكم بديلاً ممكناً للآخرى المتصلة بالشبكة في حالة معينة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أيضاً استخدام الطاقة الشمسية كمكمل للشبكات الضعيفة، أي للمرافق التي تتطلب امداد نوعي للطاقة.

الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو عرض تحجيم نظام الطاقة الكهربائية المستقل، القائم على الألواح الشمسية الكهروضوئية، مع كفاءة جيدة، من أجل توفير الكهرباء لمزرعة نموذجية للإنتاج النباتي.

الاستنتاج هو أن الطاقة الشمسية اليوم هي بالفعل مصدر للطاقة الفعالة من حيث التكلفة، بالنسبة للبلدان التي لديها الكثير من الإشعاع الشمسي مثل الجزائر وشبكة ضعيفة في الأماكن البعيدة. ومع ذلك، من المهم جداً أن يتم تصميم النظام لمنشأة محددة ويجب احترام الصيانة المطلوبة من أجل الحصول على نظام يمكن الاعتماد عليه خلال فترة العمر المتوقعة.

**كلمات البحث:** الطاقة الشمسية. الخلايا الضوئية. السيليكون. طاقة كهربائية;.