

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad DAHLAB BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE MECANIQUE

Spécialité : Installation Energétique et Turbomachine

Intitulé du mémoire

**Etude et Dimensionnement d'une Installation Énergétique
Photovoltaïque pour l'incubateur de Blida 1**

Présenté par :

YAGOUBI Med Rafik

ARAFI Zakaria

Encadré par :

Dr. BOUZAKI MOUSTAFA

Année Universitaire 2023/2024

Remerciement :

Nous remercions DIEU Tout-Puissant de nous avoir donné le courage et la volonté de mener à bien cet humble travail.

Nous tenons également à remercier nos parents bien-aimés pour leurs sacrifices, leur patience et leur soutien.

Un merci spécial à notre promoteurs **Dr. Bouzaki, Dr. Guaguadj Mohamed**, ils sont des professeurs à l'**Université Saad Dahleb Blida 01**, qui nous ont beaucoup aidés et soutenus dans la rédaction de nos essais ce mémoire ainsi que nous ont guidés avec leurs conseils et plus encore Merci pour votre patience.

Merci pour votre bienveillance et votre soutien de tous les instants, soyez assuré de notre profonde gratitude et de notre respectueuse attention, vos qualités scientifiques seront à jamais un exemple pour nous.

Je crois que sans vous, avoir nos diplômes n'aurait pas été possible tant vos cours, aussi bien que votre aide, nous ont été précieux et nous ont permis de progresser dans le domaine d'Installation Energétique et Turbomachines.

J'adresse nos sincères remerciements à tous les professeurs intervenants et toutes les personnes qui, par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidés nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à l'élaboration de ce travail.

Sommaire

Remerciement :	1
Liste des figures :	5
INTRODUCTION GENERALE :	1
Introduction :	1
Les énergies renouvelables :	1
L'énergie hydraulique :	1
L'énergie de la biomasse :	1
L'énergie géothermique :	2
L'énergie éolienne :	2
CHAPITRE 1	3
1.1 Introduction :	4
1.2 Positionnement de la terre par rapport au soleil :	4
1.2.1 Mouvement de la terre autour du soleil :	4
1.2.2 System de coordonnée :	5
1.3.1 Généralité sur le soleil :	7
1.3.2 Constante solaire :	8
1.3.3 Les catégories du rayonnement solaire :	9
1.4 L'utilité d'énergie solaire ;	9
1.5 Energie solaire thermodynamique :	10
1.6 L'énergie solaire photovoltaïque :	12
1.7 Les différents types des systèmes photovoltaïques :	13
1.7.1 Alimentations électriques faibles puissances :	13
1.7.2 Installations électriques photovoltaïques autonomes :	13
1.7.3 Installations ou centrales électriques photovoltaïques couplée au réseau :	14
1.7.4 Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride :	15
1.8 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	15
1.8.1 Les avantage de l'énergie photovoltaïque :	15
1.8.2 Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	16
1.9 Conclusion :	16
CHAPITRE 2	17
2.1 Introduction :	18
2.2 Le générateur photovoltaïque :	18
2.2.1 La cellule photovoltaïque :	18
2.2.2 Le principe de fonctionnement :	18

2.2.3 Les différentes technologies des cellules solaires :	20
2.2.4 La caractéristique électrique d'une cellule PV :	23
2.3 Modèle électrique de module photovoltaïque	25
2.3.1 Modèle à une diode :	25
2.3.2 Modèle à deux diodes :	26
2.3.3 Modèle explicite du module photovoltaïque :	27
2.4 Caractéristiques de module photovoltaïque :	29
2.5 La batterie solaire :	31
2.5.1 Durée de vie d'une batterie :	31
2.5.2 Les caractéristiques d'une batterie :	32
2.5.3 Température :	33
2.5.4 Courant de court-circuit :	33
2.5.5 Résistance interne :	33
2.5.6 Montage parallèle :	33
2.6 Générateur :	35
2.7 Fonctions et branchement du régulateur :	36
2.7.1 La décharge excessive de la batterie :	37
2.7.2 La recharge excessive de la batterie :	38
2.7.3 Mesures préventives et solutions :	39
2.7.4 Régulateur MPPT :	39
2.8 Les équipements de protection	40
2.8.1 Fusible pour protection des branches :	40
2.8.2 Fusible pour protection générale :	41
2.8.3 Interrupteur –sectionneur :	41
2.8.4 Parafoudre :	41
2.8.5 Mise à la terre :	42
2.8.6 Protection contre la foudre :	43
2.9 Conclusion :	45
CHAPITRE 3	46
3.1Présentation du site :	47
3.1.1 Introduction :	47
3.1.2 Incubateur :	47
3.1.3 Equipements :	48
3.2 Alimentation de l'incubateur par énergie photovoltaïque :	50
3.2.1 Consommation électrique :	50

3.3 LE DIMENSIONNEMENT :	52
3.3.1 Introduction :	52
3.3.2 Les étapes de dimensionnement :	52
3.3.3 L'angle d'inclinaison des panneaux :	52
3.3.4 Détermination du nombre des panneaux :	53
3.3.5 Détermination du nombre d'onduleur et sa puissance correspondante :	53
3.4 Modélisation 3D :	54
3.4.1 Introduction :	54
CHAPITRE 4	56
4.1 Introduction sur le programme Homer Pro :	57
4.2. Introduction et Objectifs de l'Étude :	57
4.3 Caractéristiques et Coûts des Composants :	57
4.3 Analyse de la Consommation Énergétique :	58
4.4 Résultats de la Simulation :	59
4.5 Comparaison des Coûts et de la Rentabilité :	59
4.7 Proportions de Production d'Énergie :	62
4.8 Limites du Système Autonome :	63
4.9 Conclusion	64
Résumé	65
Summary:	67

Liste des figures :

Figure 1.1:résume le mouvement de la terre autour du soleil	5
Figure 1.2 : Coordonnées au sol d'un emplacement donné	5
Figure 1.3 : coordonnées horizontales (ou locales) d'une étoile	6
Figure 1.4 : coordonnées horaires (ou semi-locales) d'une étoile	7
Figure 1.5 : de conversion thermodynamique de l'énergie solaire	11
Figure 1.6 : Différent champ solaire thermique	12
Figure 1.7 : Schéma d'une installation photovoltaïque autonome.....	14
Figure 2.1 : Schéma structurel d'une cellule solaire.....	19
Figure 2.2 : Rouleaux de cellules amorphes.....	20
Figure 2.3 : Cellule au silicium monocristallin.....	21
Figure 2.4 : Cellule au silicium multi-cristallin.....	22
Figure 2.5 Le courant de court-circuit I_{cc}	23
Figure 2.6 : La tension en circuit ouvert noté U_{co}	23
Figure 2.7 : Le point de puissance maximale MPP (Maximum Power Point).....	24
Figure 2.8 : Montage en série des cellules photovoltaïques	24
Figure 2.9 : schéma d'un modèle a une diode.....	25
Figure 2.10 : schéma d'un modèle a deux diodes	27
Figure 2.11 : Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque varient en fonction de la température et de l'irradiation.....	29
Figure 2.12 : Les caractéristiques puissances-tension.....	29
Figure 2.13 : Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du module photovoltaïque.....	30
Figure 2.14 : Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du module photovoltaïque.....	30
Figure 2.15 : schéma électrique de l'essai expérimentale.....	30
Figure 2.16 : Capacité en pourcentage en fonction du cycle de vie.....	33
Figure 2.17 : montage de batterie en série et en parallèle.....	34
Figure 2.18 : schéma de branchement dunregulateur et deux batterie en serie.....	35
Figure 2.19 : décharge d'une batterie solaire.....	35
Figure 2.20 : la charge d'une batterie solaire.....	36
Figure 2.21 : la décharge d'une batterie solaire.....	36
Figure 2.22 : le régulateur protège la batterie de la décharge profonde et la surcharge	37
Figure 2.23 : le courant débite et la tension d'une cellule.....	38
Figure 2.24 : la fonction Dun régulateur.....	38
Figure 2.25 : Le courant en fonction du temps a travers d'un régulateur.....	39
Figure 2.26 : détecteur de point de puissance maximum.....	39
Figure 2.27 : Interrupteur –sectionneur.....	41
Figure 2.28 : Parafoudre.....	42
Figure 2.29 : schéma qui montre la mise a la terre.....	42
Figure 2.30 : la déférence entre mauvais câblage et bon câblage.....	43
Figure 2.31 : Principe de protection par coffrets suivant UTEC 15-712	44
Figure 2.32 : schéma détaillé de Protection contre la foudre.....	45
Figure 3.1 : une vue globale sur le département.....	53
Figure 3.2 : modélisation des panneau photovoltaïque.....	54
Figure 3.3 : L'orientation des panneaux vers le sud	54
Figure 4.1 : architecture du micro-réseau sous Homer.....	56
Figure 4.2 : la consommation énergétique au long de la journée.....	58
Figure 4.3 : le résultat de la simulation.....	58

Figure 4.4 : le retour sur l'investissement.....	59
Figure 4.5 production d'énergie.....	60
Figure 4.6 : Analyse détaillée d'un dimensionnement.....	60

INTRODUCTION GENERALE :

Introduction :

L'énergie est dite renouvelable quand il s'agit de sources reconstituées naturellement, plutôt que de l'énergie non renouvelable qui épuise ses stocks.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont fortement augmenté ces dernières années. Au cours des 20 prochaines années, tout système énergétique durable dépendra d'une utilisation rationnelle des sources traditionnelles et d'une utilisation accrue de l'énergie. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sécurité aux consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, les sources aléatoires imposent certaines règles en termes de dimensions et d'utilisation des systèmes de récupération d'énergie.

Les énergies renouvelables :

L'énergie hydraulique :

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique.

La production d'électricité hydraulique exploite l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau. Le principe utilisé pour produire de l'électricité avec la force de l'eau est le même que pour les moulins à eau de l'Antiquité. Au lieu d'activer une roue, la force de l'eau active une turbine qui entraîne un alternateur et produit de l'électricité [1].

L'énergie de la biomasse :

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets domestiques renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...) En 2010, La biomasse représentait 7,5% des énergies produites. On devrait atteindre une part de 10% d'ici 2020. La chaleur produite par la combustion va chauffer un réservoir d'eau qui va alors produire de la vapeur un peu à la manière d'une cocotte minute. Cette vapeur d'eau va alors être dégagée à haute pression, ce qui va permettre de faire tourner une turbine reliée à un alternateur. C'est cet alternateur qui va permettre de produire l'électricité. Ce qui est intéressant dans les centrales à biomasse, c'est

surtout celles qui permettent de produire de l'électricité à partir des éléments dont nous n'avons plus besoin [2].

L'énergie géothermique :

La géothermie désigne l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- **La géothermie à haute énergie**
- **La géothermie de basse énergie.**
- **La géothermie de très basse énergie**

Pour utiliser cette énergie souterraine, on envoie de l'eau froide sous la Terre. Cette eau froide se réchauffe. Elle est alors pompée et ramenée à la surface où elle est utilisée soit pour produire de l'électricité dans une centrale, soit directement en tant qu'eau chaude dans les logements (eau chaude pour la douche, les radiateurs...) [3,4].

L'énergie éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. La machine se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales seront grandes, moins elles tourneront rapidement [5].

CHAPITRE 1

1.1 Introduction :

Le soleil est la planète centrale du système solaire très chaud et constitue la principale source d'énergie à la surface de la Terre émise sous forme de rayonnement, notamment d'ondes électromagnétiques (lumière).

1.2 Positionnement de la terre par rapport au solaire :

1.2.1 Mouvement de la terre autour du soleil :

La Terre est sur une orbite elliptique quasi-circulaire autour du Soleil qui dure 365 jours, 5 heures, 48 minutes et 46 secondes et se déplace à environ 108 000 km/h. Ce plan orbital est appelé le plan écliptique.

Les équinoxes sont les deux dates de l'année où les rayons du soleil traversent le plan équatorial. Dans ce cas, sa déclinaison sera nulle et la durée du jour et de la nuit sera égale.

La terre coupe le petit axe de son orbite à l'équinoxe. Dans l'hémisphère nord, le printemps se situe autour du 21 mars et l'automne vers le 21 septembre.

Le solstice d'été (autour du 21 juin) est le moment où le temps entre le lever et le coucher du soleil n'est pas long. Pendant ce temps, la Terre sera la plus proche du soleil. 147 millions de kilomètres.

C'est au solstice d'hiver (vers le 21 décembre) que cette période ne raccourcit plus et que la Terre est la plus éloignée du Soleil. 152 millions de km, Les saisons sont inversées dans l'hémisphère sud.

La Terre tourne sur son axe toutes les 24 heures et son axe de rotation (l'axe polaire) à une orientation constante dans l'espace. Forme les normales et les angles du plan de l'écliptique.

Voir l'illustration ci-dessous [6].

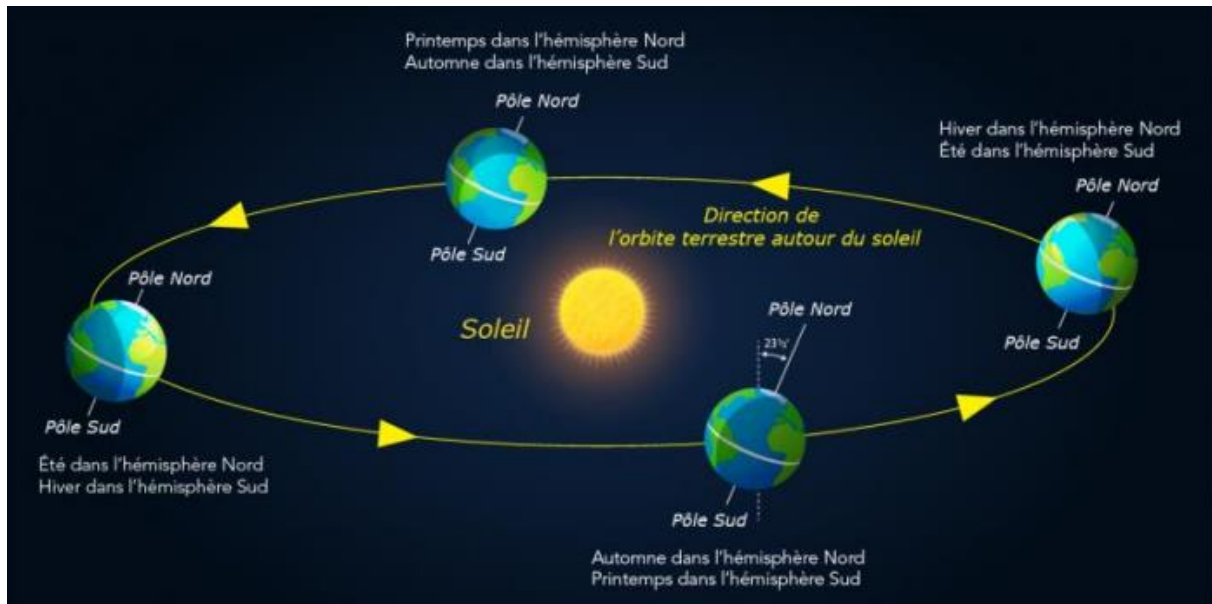


Figure 1.1 : Résumé le mouvement de la terre autour du soleil

1.2.2 System de coordonnée :

1.2.2.1Coordonnéeterrestres :

Tout point de la terre peut être localisé par deux coordonnées appelées coordonnées terrestres.

- Sa latitude φ : C'est l'angle que fait le plan équatorial avec la direction joignant le centre de la Terre et le point considéré, et sa valeur est positive dans l'hémisphère nord et négatif dans l'hémisphère sud.
- Sa longitude L : C'est l'angle que fait le méridien local qui passe par le point considéré avec le premier méridien qui traverse la ville de Greenwich, et sa valeur est positive à l'est du premier méridien et négative à l'ouest de celui-ci [7].

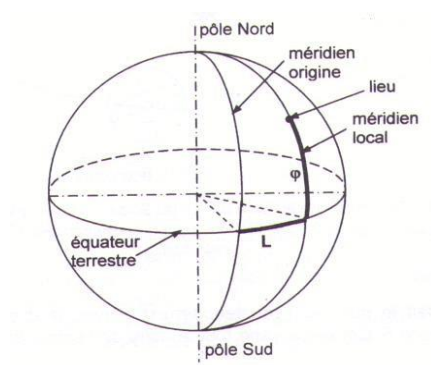


Figure 1.2 : Coordonnées au sol d'un emplacement donné

1.2.2.2 Coordonnée horizontales :

La position d'une étoile dans l'espace peut être identifiée par ses coordonnées horizontales définies dans la sphère céleste (le soleil).

- Altitude angulaire. C'est l'angle que fait la direction de l'étoile avec l'horizontale (c'est-à-dire tangente au sol).
- Son angle d'azimut a correspondu à l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan vertical passant par l'étoile. L'azimut compte l'est comme négatif et l'ouest comme positif [8].

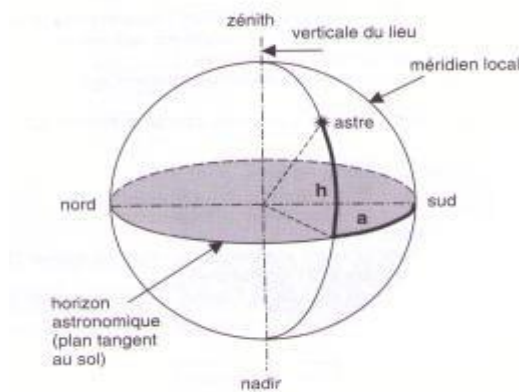


Figure 1. 3 : coordonnées horizontales (ou locales) d'une étoile

1.2.2.3 Coordonnée horaire :

A partir de l'argument δ et de l'angle horaire ω , nous pouvons définir les coordonnées temporelles.

- Angle horaire ω : L'angle formé par le plan contenant le cercle temporel (passant par l'étoile étudiée et contenant l'axe sur lequel ce plan relie les pôles célestes nord et sud).
- La déclinaison δ : c'est l'angle que fait le plan de l'équatorial de la Terre et au Soleil. δ varie symétriquement de $23^\circ.26'$ à $-23^\circ.26'$ tout au long de l'année [9].

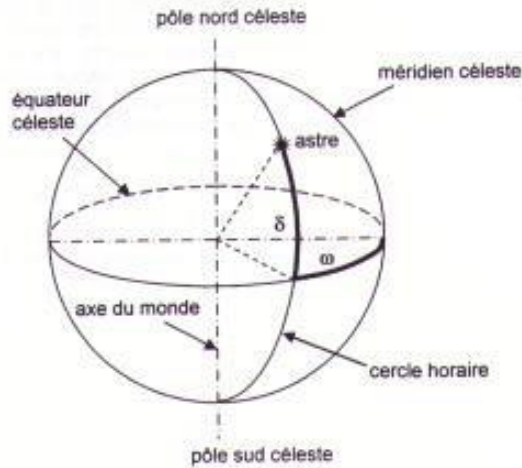
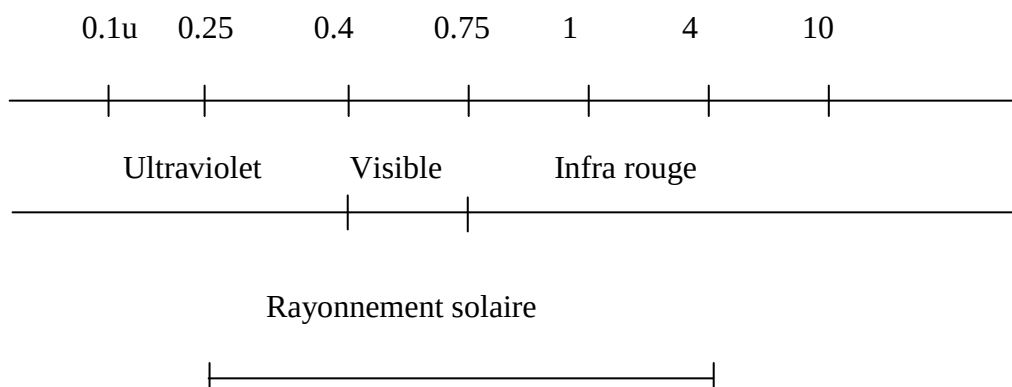


Figure 1. 4 : coordonnées horaires (ou semi-locales) d'une étoile

1.3.1 Généralité sur le soleil :

Le Soleil est une étoile de 10^9 fois le diamètre de la Terre et à une distance moyenne de la Terre de 149,45 millions de km. Il a une densité de seulement 1,41 ou un quart de la masse de la Terre, et sa masse est de 3300 fois la masse de la Terre. La lumière nous parvient de cette étoile et voyages-en un peu plus de huit minutes. Cette sphère gazeuse est un réacteur thermonucléaire géant dans lequel l'hydrogène est continuellement converti en hélium. Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène sont converties en 560 millions de tonnes d'hélium, et 4 millions de tonnes de masse sont perdues du soleil, qui est libéré sous forme de rayonnement. Cette réaction a lieu au cœur de l'étoile, où les températures atteignent des millions de degrés, mais seulement environ 5800°k à la surface. L'âge du Soleil est estimé à 5 10⁹ ans. Tout au long de sa vie, il n'a utilisé que 14 livres de ses réserves d'énergie.

Le rayonnement solaire est une superposition d'ondes dont la longueur varie de 0,25 à 4 microns, comme indiqué par l'échelle suivante.



- La Terre reçoit 18.10^{10} MW de flux solaire, soit seulement 5.10^{10} du rayonnement solaire total. A titre de comparaison, notez que la production d'une grande centrale électrique est d'environ 1000 MW. Nous recevons 10 000 fois plus d'énergie du soleil que le monde n'en consomme chaque année et 1 000 fois plus d'énergie que toutes les réserves de pétrole connues. La quantité d'énergie que la Terre reçoit permet de maintenir la surface de la Terre à une température moyenne d'environ 17°C , et produit des courants océaniques, des vents, des pluies, des tempêtes, des tempêtes...
- L'utilisation de l'énergie solaire est très ancienne. Afin de profiter de la chaleur du soleil, l'homme a construit pendant des siècles ses espaces de vie de manière à ce qu'ils interceptent bien des rayons de soleil. Il servait principalement à chauffer l'eau et les maisons (climatisation), générant du froid air et séchage. Développer l'utilisation de l'énergie solaire est donc un concept stratégique pour les pays développés comme pour les pays en développement [9].

1.3.2 Constante solaire :

La constante solaire est la quantité d'énergie rayonnante supposée complètement convertie en chaleur que le soleil transmet en une minute sur une surface de 1 cm^2 perpendiculaire aux rayons du soleil à une distance du soleil égale à la distance moyenne. La Terre au Soleil correspond au Soleil.

En tenant compte de la variation de la distance entre la Terre et le Soleil au cours de l'année, elle atteint environ 3,34 %, et le rayonnement solaire varie également d'environ 6,8 %.

Le soleil est un rayonnement thermique qui se propage sous forme d'ondes électromagnétique. Générer un éclairage en dehors de l'atmosphère terrestre mais sur les bords quasi constants, égale à $1\,370\text{ W/m}^2$.

Pour atteindre chaque point de la surface éclairable du globe terrestre, les rayons solaires traversent l'atmosphère qui absorbe une partie de l'énergie provenant du soleil par :

- Diffusion moléculaire (en particulier pour les radiations U.V.)
- Réflexion diffuse sur les aérosols atmosphériques (gouttelettes d'eau, poussières...)
- Absorption sélective par les gaz de l'atmosphère.

Le rayonnement solaire représente plus de 90% de l'énergie consommée. Soit les humains utilisent les cycles énergétiques naturels (hydroélectricité, biomasse) selon leurs besoins, soit ils brûlent de la biomasse fossile (charbon, gaz, pétrole) produite il y a longtemps très rapidement aujourd'hui. Les problèmes causés par l'utilisation des combustibles fossiles sont bien connus.

Pollution de l'air, effet de serre, génération d'aérosols, épuisement au fil des générations.

Dans ce contexte, les deux dernières décennies sont vues des efforts croissants pour développer des applications directes de l'énergie solaire, la convertissant en énergie thermique, électrique ou plus facilement stockée d'énergie chimique [10].

1.3.3 Les catégories du rayonnement solaire :

L'énergie du soleil reçue de la terre nous parvient sous forme de rayonnement électromagnétique.

1.3.3.1 Rayonnement direct :

Après Être Arrivé du Soleil et avoir traversé l'atmosphère dans une certaine direction en fonction de la position actuelle du Soleil.

1.3.3.2 Rayonnement diffus :

Une partie du rayonnement direct est diffusée lors de son passage dans l'atmosphère. Dévié dans toutes les directions, une partie de ce rayonnement revient vers la Terre, mais cette fois il provient de toute la sphère céleste et n'a pas de direction privilégiée. Cette partie forme un rayonnement diffus. Le rayonnement diffus est le résultat de processus de diffusion dans l'atmosphère. Elle dépend aussi de l'albédo de surface, qui augmente avec la quantité d'aérosols par temps clair. Les nuages augmentent encore le rayonnement diffus et le degré de diffusion multiple dépend des propriétés des nuages.

1.3.3.3 Rayonnement global :

Le rayonnement total est constitué de l'addition du rayonnement direct et du rayonnement diffus. Le rayonnement direct doit être multiplié par le cosinus de l'angle d'élévation solaire pour calculer le rayonnement sur une surface horizontale [11] [12].

1.4 L'utilité d'énergie solaire ;

Le soleil constitue une source d'énergie gratuite et non polluante. On peut utiliser cette énergie solaire d'une manière directe ou la stockée pour chauffer ou refroidir un bâtiment est

une idée qui paraît d'une logique implacable comme avant. Le principe est simple et la technique est aujourd'hui fiable et éprouvée.

L'énergie solaire se divise en deux parties, l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie solaire thermique [13].

1.5 Energie solaire thermodynamique :

L'énergie solaire thermodynamique ou énergie solaire concentrée (CSP : « Solar Concentrates Power ») est une technologie qui génère de l'électricité en concentrant l'énergie solaire dans une habitation à l'aide de systèmes optiques de concentration connectés à des systèmes optiques de concentration connectés à des systèmes récepteurs.

Cet ensemble est appelé capteur solaire et convertit l'énergie rayonnante en énergie thermique avec un rendement supérieur à 70%

En fonction du niveau de concentration moyen atteint (rapport entre la surface collectrice des miroirs et la surface absorbante, exprimé en soleils), différentes applications sont envisagées, correspondant à différentes plages de température :

Production de chaleur industrielle à basse température (de 200°C à 300°C)

Applications sont envisagées, correspondant à différentes plages de température :

Production de chaleur industrielle à basse température (de 200°C à 400°C),

Production d'électricité par cycle thermodynamique couplé à un générateur électrique pour moyennes et hautes températures (de 250 °C à 1000 °C), Production de vecteurs énergétiques tels que l'hydrogène ou le gaz de synthèse par des procédés thermochimiques à haute et très haute température (de 850 °C à 1000 °C).

À l'heure actuelle, la production d'électricité solaire thermodynamique (ou électricité solaire thermique) suscite l'intérêt de nombreuses industries et contre de recherche, car le potentiel de ce secteur est élevé. La transition du rayonnement solaire à la production d'électricité nécessite trois composantes principales :

Le système de capteur solaire est constitué d'un collecteur/concentrateur qui capte le rayonnement solaire direct (DNI : Direct Normal Irradiation) et le concentre sur le récepteur à travers lequel circule le fluide caloporteur (rayonnement solaire direct/conversion d'énergie thermique) ; le système convertisseur thermodynamique convertit l'énergie thermique du

caloporteur en travail mécanique en électricité qui peut être injectée dans le réseau électrique [14].

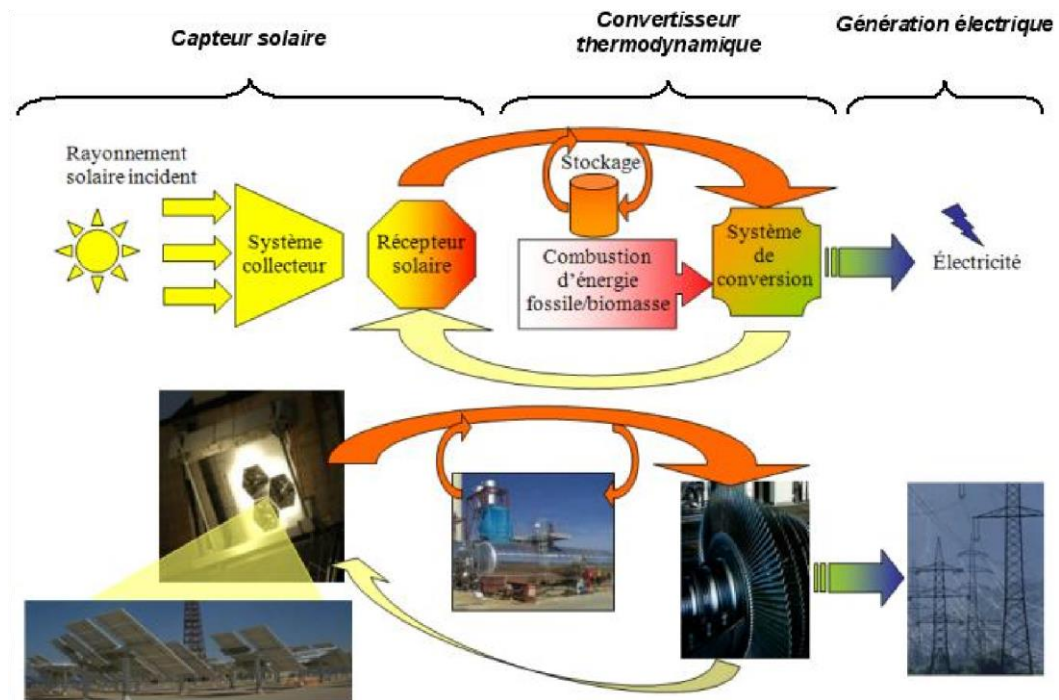


Figure 1. 5 : de conversion thermodynamique de l'énergie solaire

La figure montre un mode de stockage thermique ou système de combustion de biomasse ou d'énergie fossile intégrable au niveau de la conversion thermodynamique. La production d'électricité devient ainsi plus indépendante, voir dans certain cas indépendante, de la ressource solaire. Ce processus offre une valeur ajoutée par rapport à l'électricité qui peut être produite à partir d'autre sources d'énergie renouvelables.

Il existe deux systèmes de concentration optique dans ce secteur, d'où la dérivation de quatre grandes familles de technologies solaires, dont le schéma principal est présenté dans la figure suivante :

Concentration linéaire, souvent rencontrée dans les miroirs paraboliques cylindriques (PT : « Parabolic Trough ») et les collecteur Fresnel linéaires (LFC : « Linear Fresnel Collector »). Une concentration ponctuelle ou surfacique représentant une tache solaire condensée utilisée par les concentrateurs cylindro-paraboliques (DS : « Dish Stirling ») et les concentrateurs tour (CRS : « Central Receiver Systems »).

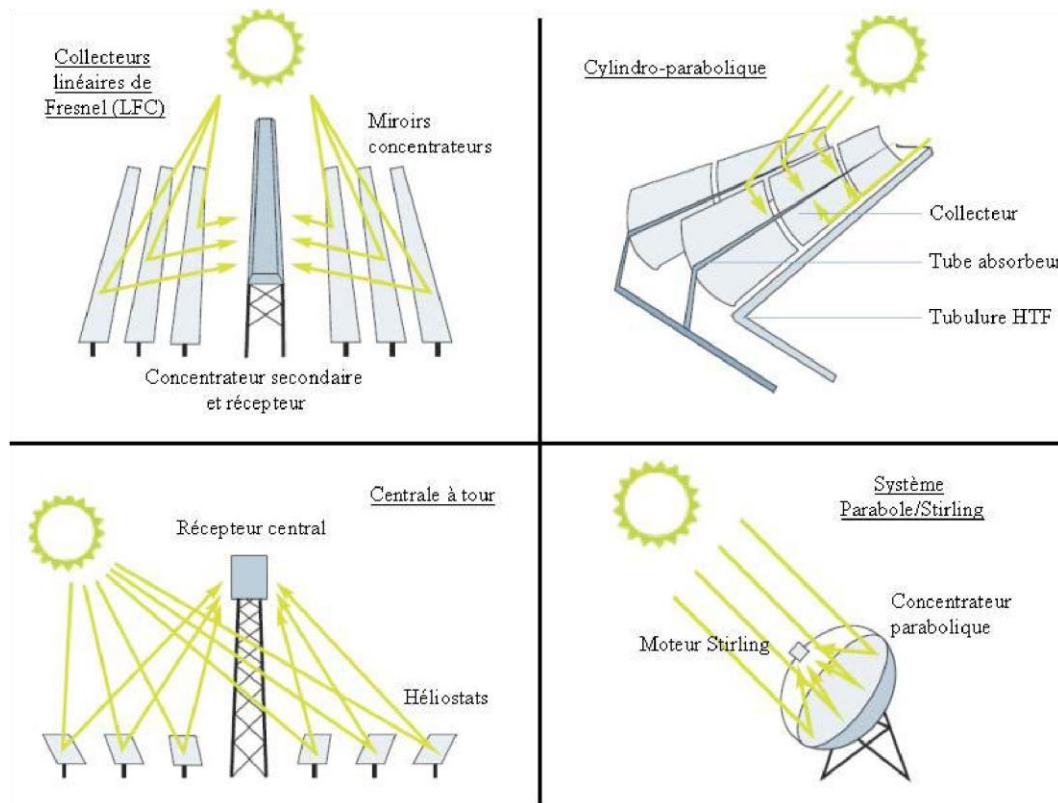


Figure 1. 6 : Différent champ solaire thermique

La concentration linéaire (LFC et PT) atteint des facteurs de concentration avec un facteur de concentration géométrique idéal de 100 (100 soleils), atteignant généralement des températures de 500°C. Cependant, les capteurs ponctuels (DS et CRS) ont un coefficient de concentration géométrique idéal beaucoup plus élevé (entre 200 et 1000 soleils) et permettent à des températures de 1000°C.

En 2010 Vrinat a reconstitué l'histoire de l'énergie solaire concentrée et a fourni une liste exhaustive des technologies solaires thermiques existantes dans le monde dans son article intitulé « Contribution au développement d'un absorbeur d'air comprimé monté en surface à haute température pour l'énergie solaire du système de tour ». Une autre étude a été menée pour comparer les technologies solaires avec d'autres technologies utilisant des sources d'énergie renouvelables, c'est-à-dire Éolien ou photovoltaïque.

1.6 L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en convertissant l'énergie des photons atteignant la surface de la Terre en électricité. La lumière du soleil (photons) transfère son énergie aux électrons contenus dans les semi-conducteurs (qui constituent les cellules photovoltaïques). Cette transformation (effet photoélectrique) n'a pas

d'impact mécanique, de bruit, de pollution et de carburant. L'effet photo électrique a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le mot "photoélectrique" vient du mot "photo" (du grec "phos" signifiant " lumière") et du mot "Volt" (le nom de famille du physicien Alessandro Volta, qui a apporté une contribution très importante à la recherche électrique [17].

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont « bombardés » par les photons qui composent la lumière ; sous l'effet de ce bombardement, les électrons de l'accouche électronique supérieure (appelés électrons de la couche de valence) ont tendance à être "cassés» : Si l'électron revient à son état d'origine, l'excitation de l'électron conduit à l'échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est convertie en chaleur. Par contre, dans la cellule photovoltaïque, certains électrons ne reviennent pas à leur état d'origine. Les électrons "dénudés" produisent une faible tension continue. Par conséquent, une partie de l'énergie cinétique des photons est convertie directement en énergie électrique.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique par des cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir suffisamment de puissance, les cellules sont connectées entre elles et forment un module solaire [16].

1.7 Les différents types des systèmes photovoltaïques :

1.7.1 Alimentations électriques faibles puissances :

Il s'agit des alimentations électriques faibles telles que les calculettes ou les chargeurs de piles.

Les modules photovoltaïques (PV) peuvent faire fonctionner n'importe quel appareil alimenté par des piles.

1.7.2 Installations électriques photovoltaïques autonomes :

Dans un endroit isolé, le champ photoélectrique (1) (figure I.4) peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du récepteur (appareils d'éclairage et appareils électroménagers). Le système régulateur de l'accumulateur (2) et la batterie (3) permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du Soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous forme chimique. Ils restituent l'énergie électrique selon les besoins en fonction de ses caractéristiques.

Le régulateur de charge (2) a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est essentiel pour la durée de vie de la batterie. Dans un endroit isolé, des récepteurs alimentés en courant alternatif peuvent également être utilisés (6). Dans ce cas, l'installation comportera un onduleur (4). On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes, comme les balises en mer, les lampadaires, les pompes solaires, et les habitations en zones isolées.

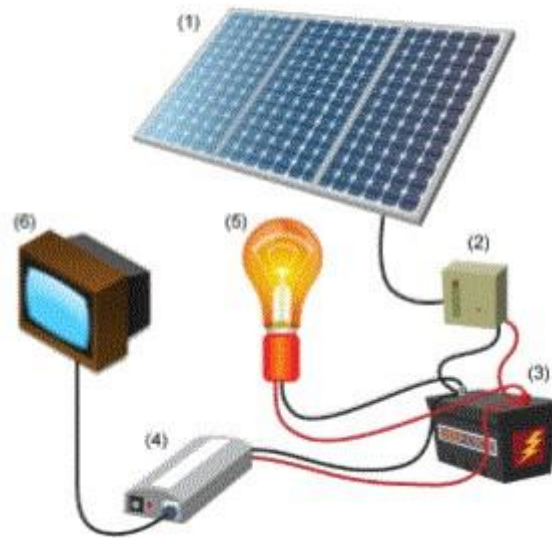


Figure 1. 7 : Schéma d'une installation photovoltaïque autonome

La majorité de la population hors réseau électrique vit en milieu rural, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou des moyens, les systèmes photovoltaïques sont alors une option intéressante, ils permettent à tous d'accéder à un coût réduit difficile à entretenir et à déployer [18].

1.7.3 Installations ou centrales électriques photovoltaïques couplée au réseau :

Les générateurs photovoltaïques connectés au réseau n'ont pas besoin de stockage d'énergie et éliminent ainsi le lien le plus problématique (et le plus coûteux) dans les installations autonomes (figure I.5). En fait, l'ensemble du réseau agit comme un réservoir d'énergie. Deux compteurs d'énergie sont nécessaires :

Un compteur mesure l'énergie achetée auprès d'un fournisseur d'énergie, et un autre, mesure l'énergie renvoyée au réseau lorsque la production dépasse la consommation. Une troisième horloge est ajoutée dans le cas où la puissance générée est entièrement injectée dans le réseau (horloge de non-consommation) [19].

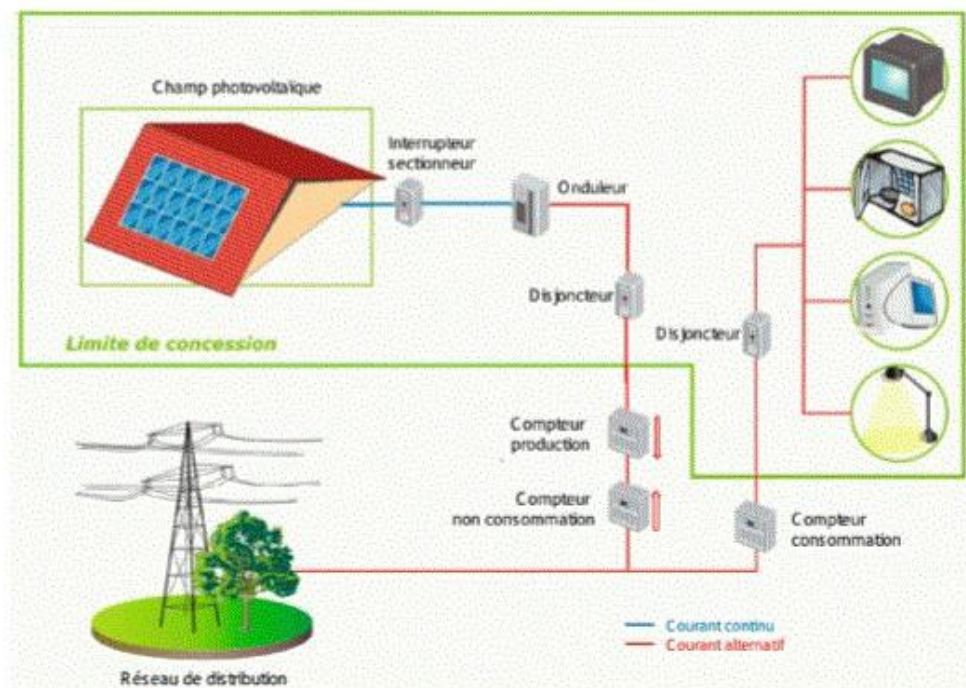


Figure 1.8 : Centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau.

1.7.4 Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride :

Ce sont des systèmes qui combinent des sources d'énergie de nature différente, telles que des éoliennes, des générateurs diesel ou des centrales de cogénération, en plus des générateurs photovoltaïques. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne comprend pas toute l'énergie nécessaire [20].

1.8 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

1.8.1 Les avantages de l'énergie photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque offre de nombreux avantages :

Cette production d'électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.

Le système photovoltaïque est fiable.

L'énergie photovoltaïque est particulièrement parfaite pour les zones urbaines en raison de sa petite taille et de son fonctionnement silencieux. La lumière du soleil étant partout, l'énergie photovoltaïque peut être utilisée aussi bien en montagne dans un village isolé qu'au centre d'une

grande ville. L'électricité photovoltaïque est produite au plus près du point de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.

Les matériaux utilisés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques, notamment la grêle).

Il s'agit d'une forme modulable de production d'énergie que l'on peut adapter en fonction de nos besoins.

La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains fabricants garantissent les panneaux solaires pour une période de 25 ans [21].

1.8.2 Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

Malgré tous ces avantages il y a des inconvénients comme :

Le cout est très élevé.

Faible rendement de conversion.

La production d'énergie dépend de l'ensoleillement et il est variable.

Si l'énergie doit être stockée par des batteries, le cout d'installation et de la maintenance augmente.

Pollution à la production.

Malgré ces limitations, le marché du photovoltaïque continue de trouver des applications et de se développer. De plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation, dans lequel les inconvénients, notamment en ce qui concerne les coûts de production, pourraient être compensés [21].

1.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts de base indispensables à la compréhension des énergies renouvelables et de l'énergie solaire en particulier. Nous rappelons quelques idées sur les différentes technologies solaires, les types de stockage utilisé dans ce domaine et quelques notions sur le rayonnement.

CHAPITRE 2

2.1 Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque (ou énergie photovoltaïque ou EPV) est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des capteurs ou à des centrales solaires photovoltaïques

2.2 Le générateur photovoltaïque :

2.2.1 La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est le plus petit composant du système photovoltaïque.

Elle se compose d'un matériau semi-conducteur de type P-N génère un courant électrique sous l'action des photons légers :

Cette transformation repose sur les trois mécanismes suivant :

- Absorption des photons des matériaux constitutifs du dispositif
- La conversion de l'énergie photonique en énergie électrique, correspondant à créer des paires électron/trou dans des matériaux semi-conducteurs.
- Collecte des particules générées dans l'appareil [22].

2.2.2 Le principe de fonctionnement :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique basé sur un matériau semi-conducteur qui génère des porteurs de charge (trous électroniques) en absorbant des photons. Le matériau est alors photoconducteur.

Pour fabriquer des cellules photovoltaïques, il est nécessaire de fabriquer une jonction PN ou diode de surface sur la surface du semi-conducteur, les photons incidents forment des paires électron-trou.

Dans la région de charge d'espace, les paires électron-trou créées par les photons sont séparées par le champ électrique dirigé de la région n vers la région p et une différence de potentiel apparaît.

La tension interne de la diode constitue la source de tension et les cellules photovoltaïques générées par le rayonnement solaire constituent la source de courant.

Ce courant photoélectrique est dirigé de la région n vers la région p, il est proportionnel à l'intensité de l'éclairement et doit être collecté en réalisant des contacts avant et arrière [23].

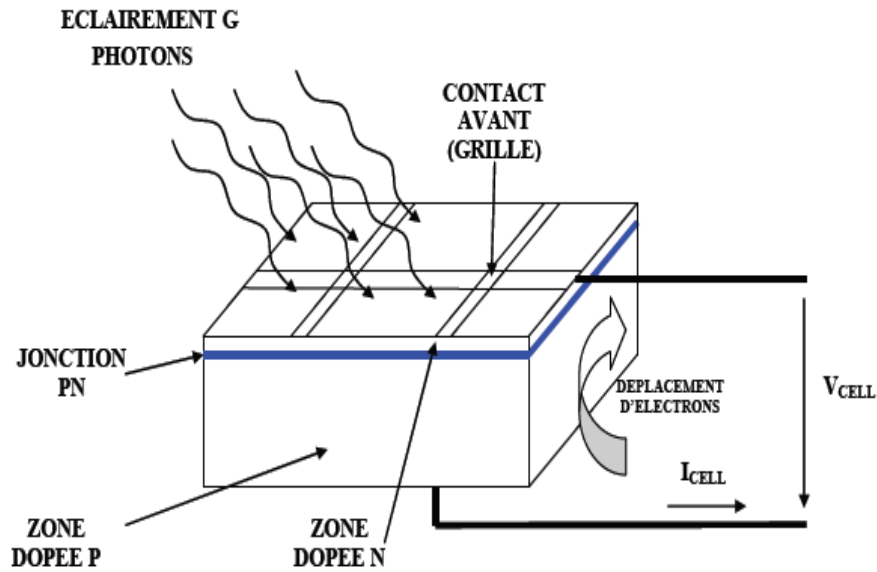


Figure 2.1 : Schéma structurel d'une cellule solaire

Constituées de semi-conducteurs, les cellules photovoltaïques absorbent l'énergie lumineuse et la convertissent directement en électricité.

Une cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, généralement de 1 à 3W à une tension inférieure à un volt, pour générer plus d'énergie, les cellules sont assemblées pour former un module (panneau).

La connexion en série de plusieurs cellules augmentera la tension pour le même courant, tandis que la connexion en parallèle augmentera le courant tout en préservant la tension. Le courant de sortie et donc la puissance seront proportionnels à la surface du module [24].

2.2.3 Les différentes technologies des cellules solaires :

2.2.3.1 La cellule au silicium amorphe :



Figure 2.2 : Rouleaux de cellules amorphes

Les cellules de silicium amorphe sont constituées de silicium dont la structure atomique est désordonnée, ce qui signifie qu'il n'est pas cristallin. Ce matériau absorbe plus de lumière que le silicium cristallin.

Elle fait partie de la technologie « couche mince » qui consiste à déposer sous vide sur un substrat (verre, métal, plastique.) une couche fine constituée d'un et souvent de plusieurs matériaux étant réduits en poudre.

Les cellules sont grises foncé et ses avantages sont comme suivant :

Peut être appliquée sur une surface importante (4 voire 6 m²), et peut être ensuite découpées ;

Peut être utilisée sur des modules courbes ou souples ;

Peu sensible à l'échauffement autour de 60°C ;

Fonctionne à un très faible niveau de luminosité (à partir de 20 lux) ;

Fabrication en principe moins onéreuse.

Bien sûr comme cette cellule a des avantages, elle a aussi des inconvénients :

Rendement bien inférieur à celui du silicium cristallin (entre 5% et 7% dans le commerce).

Industrialisation encore peu développée par rapport aux technologies cristallines ;

Baisse de rendement dès les premières semaines d'exposition [25].

2.2.3.2 La cellule au silicium monocristallin :



Figure 2.3 : Cellule au silicium monocristallin

Les cellules de silicium monocristallin sont constituées de silicium formé à partir d'un seul cristal ordonné. Ce matériau est obtenu directement à partir du grain ou recristallisé à haute température sous forme de lingots. Il est ensuite coupé en fines tranches pour créer des cellules. Ces cellules sont généralement uniformément bleues.

Ces avantages sont comme suite :

- Son rendement est très bon (15 à 20% dans le commerce, 25% en laboratoire) ;

- Bon ratio Wc/m^2 ($\sim 150 Wc/m^2$) ce qui permet un gain de place si nécessaire ;

- Nombre de fabricant plus élevé.

Malgré tous ces avantages il y a des inconvénients comme :

- Fabrication plus délicate et donc plus couteuse ;

- Rendement faible sous un faible éclaircissement (plage d'utilisation : 100 à 1000 W/m^2

- Sensible à l'échauffement, forte baisse de rendement autour de 60°C) [25].

2.2.3.3 La cellule au silicium multi-cristallin :

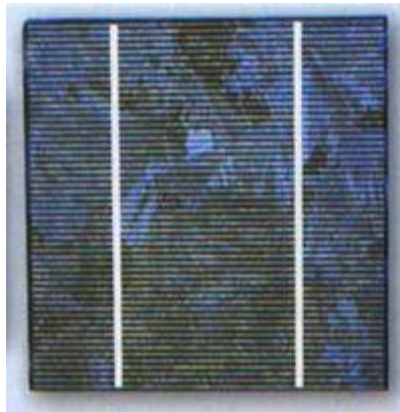


Figure 2.4 : Cellule au silicium multi-cristallin

Les cellules de silicium multi cristallin (poly cristallin) sont constituées de cristaux assemblés de 1 mm à environ 2cm, appelés « grain ». La multitude de cristaux se forme pendant que le silicium dans le moule refroidit.

La cellule photovoltaïque a un aspect bleuté mais n'est pas uniforme, on peut voir des motifs créés par différents cristaux.

Ses avantages :

- Les cellules peuvent être de forme carrée (à coins arrondis pour le monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module ;
- Bon rendement de conversion (12-16% dans le commerce, 20% en laboratoire).
- Lingot moins cher à produire que le monocristallin.
- Nombre de fabricants élevé.
- Ces inconvénients sont :
 - Rendement faible sous un faible éclairement (plage d'utilisation : 200 à 1000 W/m²)
 - Sensible à l'échauffement, forte baisse de rendement autour de 60°C [26].

Tableau 1: tableau comparatif des trois types de panneaux solaires, avec les informations sur leur durée de vie

Type	Silicium mono Cristallin	Silicium poly Cristallin	Amorphe
Durée de vie	35 ans	35 ans	< 10 ans
Avantage	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse, prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en diffus

Tableau 2: Inconvénients des Technologies de Panneaux Solaires

Inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) prix élevé	Mauvais rendement en plein soleil.
--------------	---	--	------------------------------------

[27][28].

2.2.4 La caractéristique électrique d'une cellule PV :

Les propriétés électriques de la cellule photovoltaïque sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle : Caractéristique courant- tension.

Trois points sont importants sur cette courbe :

Le point de puissance maximale MPP (Maximum Power Point).

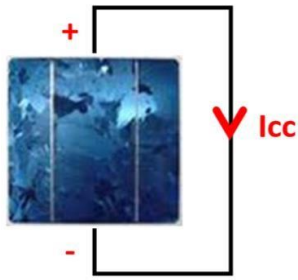


Figure 2.5 Le courant de court-circuit I_{cc}

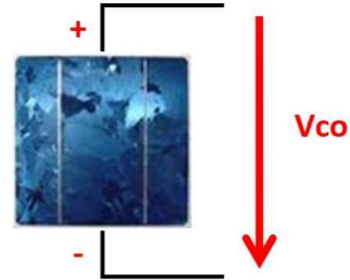


Figure 2.6 : La tension en circuit ouvert noté U_{co}

Selon les conditions standard : STC (1000W/m^2 , AM1.5 et 25°C)

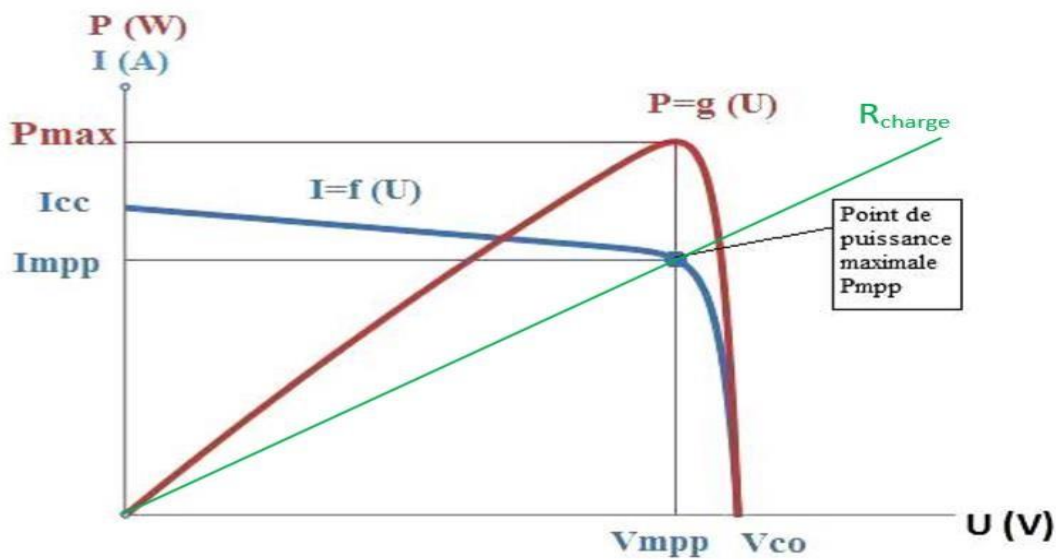


Figure 2.7 : Le point de puissance maximale MPP (Maximum Power Point).

① Montage en série des cellules photovoltaïques

- La mise en série des cellules permet d'augmenter la puissance (nécessité d'appairage)
- Le courant reste identique tandis que la tension est multipliée par le nombre de cellules en série

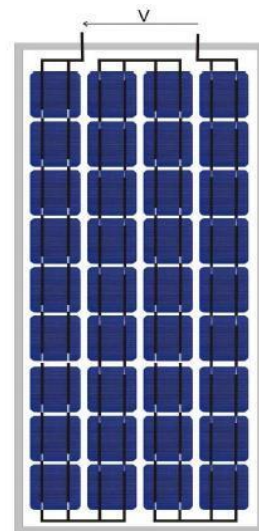
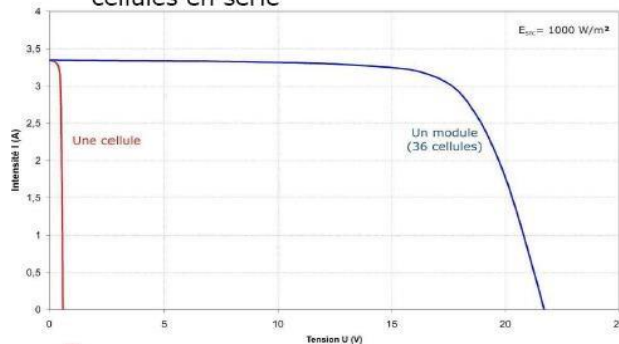


Figure 2.8 : Montage en série des cellules photovoltaïques

2.3 Modèle électrique de module photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant -tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques.

Ces modèles diffèrent entre eux par et le nombre de paramètres pris en compte.

2.3.1 Modèle à une diode :

Le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent qui se compose d'une source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt R_{sh} est une conséquence de l'état de la longueur de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contact et de connexion, une diode en parallèle qui modélise jonction PN.

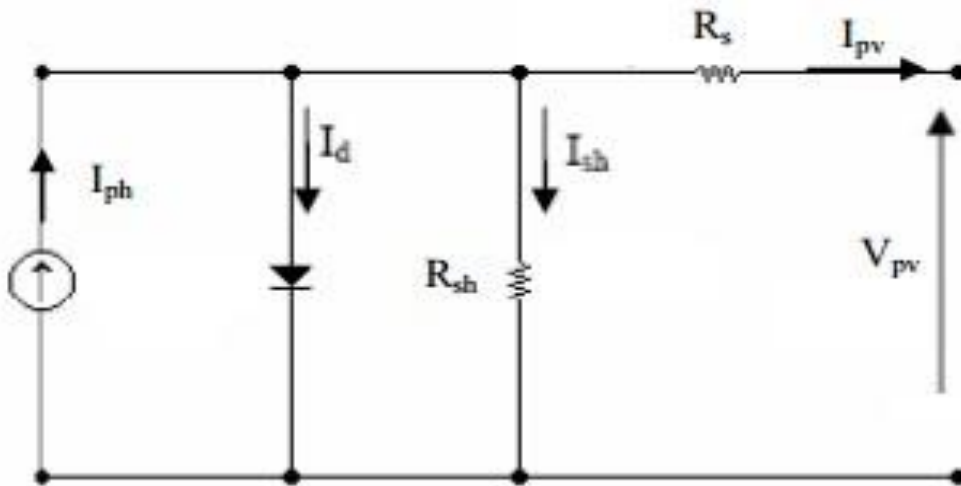


Figure 2.9 : schéma d'un modèle a une diode

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh}$$

Avec :

$$I_{ph} = P_1 G \cdot [1 + P_2 (G - G_{ref}) + P_3 (T_j - T_{ref})]$$

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{A \cdot n_s k \cdot T_j}\right) - 1 \right]$$

$$I_{Rsh} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}}$$

La température du module peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suit :

$$T_j = T + G \left(\frac{N_{oct} - 20}{800} \right)$$

Avec :

G_{ref}, T_{jref} : l'éclairement et la température de jonction sous conditions STC.

G, T_j : l'éclairement et la température de jonction dans les conditions de fonctionnement.

P1, P2, P3 : paramètres constants.

NOCT : température nominale de fonctionnement du module, donnée par le constructeur.

A : Facteur d'idéalité de la jonction.

n_s : nombre de cellule en série dans un module.

K : Constant de Boltzmann.

$$x = P_4 \cdot T_j^3 \exp\left(\frac{-E_g}{k \cdot T_j}\right)$$

I₀ : le courant de saturation il est fortement dépendant de la température ; il est donné par :

La détermination des paramètres du modèle se fait par résolution numérique (moindres carrés) sous Matlab-Simulink

2.3.2 Modèle à deux diodes :

Le module photovoltaïque est représenté par son schéma électrique équivalent (Figure II.6) Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau.

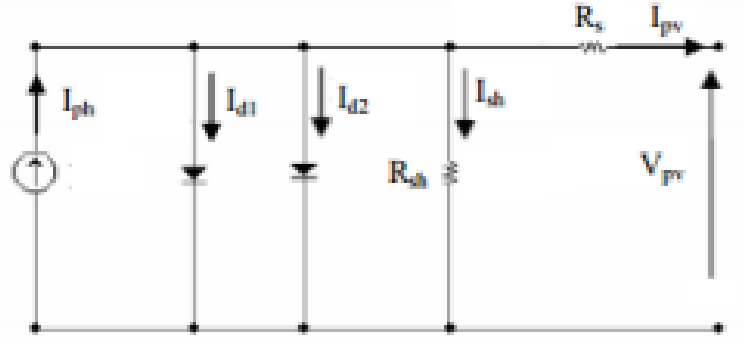


Figure 2. 10 : schéma d'un modèle a deux diodes

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirschoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{Rsh}$$

I_{ph} et I_{sh} garderont les mêmes expressions que celles du modèle à une diode. Le courant traversant les diodes est donné par les équations suivantes :

$$I_{d1} = I_{01} \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V_{pv} + I_{pv} R_s)}{A \cdot n_s \cdot k \cdot T_j} \right) - 1 \right]$$

$$I_{d2} = I_{02} \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V_{pv} + I_{pv} R_s)}{2A \cdot n_s \cdot k \cdot T_j} \right) - 1 \right]$$

Où : I_{01} , I_{02} : les courants de saturation des diodes, ils sont donnés par ces deux équations :

$$I_{01} = P_4 T_j^3 \cdot \exp \left(\frac{-E_g}{k \cdot T_j} \right)$$

$$I_{02} = P_5 T_j^3 \cdot \exp \left(\frac{-E_g}{2k \cdot T_j} \right)$$

2.3.3 Modèle explicite du module photovoltaïque :

C'est un modèle à cinq paramètres (I_{sc} , V_{oc} , I_{mpp} , V_{mpp} , R_s) qui tient compte de la variation du courant et de la tension du module photovoltaïque en fonction des conditions climatiques.

L'expression du courant du module photovoltaïque est donnée par :

$$I_{pv} = I_{sc} \{ 1 - K_1 [\exp K_2 V_{pv}^m - 1] \}$$

Où les coefficients k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , et m sont donnés par :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{oc}^m}$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{sc}(1 + K_1) - I_{mpp}}{K_1 I_{sc}} \right]$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1 + K_1}{K_1} \right]$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \right]}$$

Il est à noter que l'équation (II.5) donnant le courant photovoltaïque est applicable que pour un niveau d'insolation G et de température particuliers ($G_{stc}=1000 \text{ W/m}^2$, $T_{stc}=25 \text{ °C}$), relatif aux conditions standard de fonctionnement. Quand l'insolation et la température varient, le courant I_{pv} et la tension V_{pv} changent suivant les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \Delta T_c &= T_c - T_{stc} \\ \Delta I_{pv} &= \alpha_{sc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{sc,stc} \\ \Delta V_{pv} &= -\beta_{oc} \Delta T_c - R_s \Delta I_{pv} \end{aligned}$$

Avec :

G_{stc} et G : Représentent respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement (STC) et dans des conditions quelconques.

T_{stc} et T_c : Représentent respectivement, la température dans les conditions STC et dans des conditions quelconques.

ΔT_c : Représente la variation de la température.

ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.

ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.

α_{sc} : Représente un coefficient de température, d'incrément de courant I_{sc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($A/°C$) (sous les conditions STC).

β_{oc} : Représente un coefficient de température, d'incrément de tension V_{oc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($V/°C$) (sous les conditions STC).

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont donnés par :

$$\begin{aligned} V_{pv,nouv} &= V_{pv} + \Delta V_{pv} \\ I_{pv,nouv} &= I_{pv} + \Delta I_{pv} \end{aligned}$$

2.4 Caractéristiques de module photovoltaïque :

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque varient en fonction de la température et de l'irradiation. Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du module SIEMENS SM 110-24 sont présentées dans les conditions standards de fonctionnement.

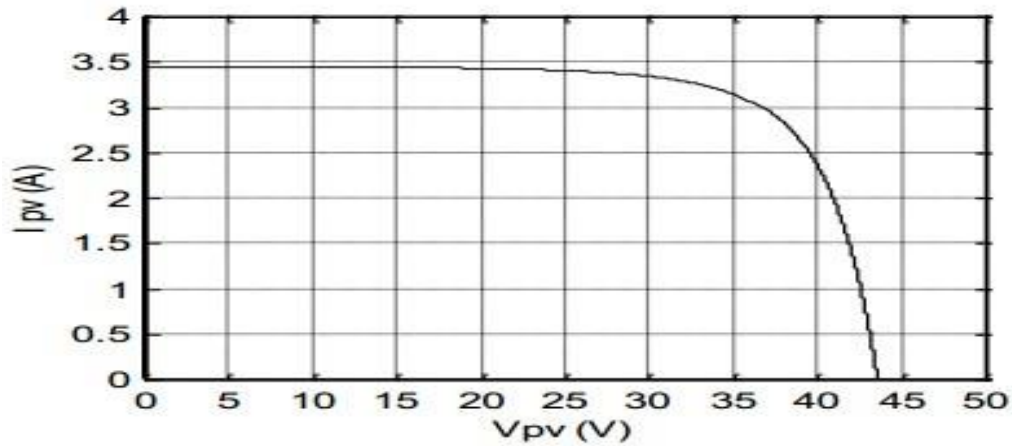


Figure 2.11 : Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque varient en fonction de la température et de l'irradiation

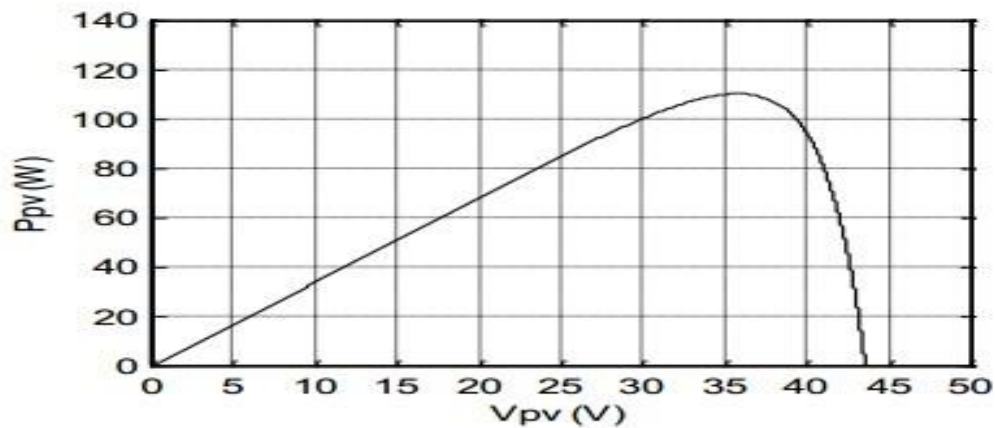


Figure 2.12 : Les caractéristiques puissance-tension

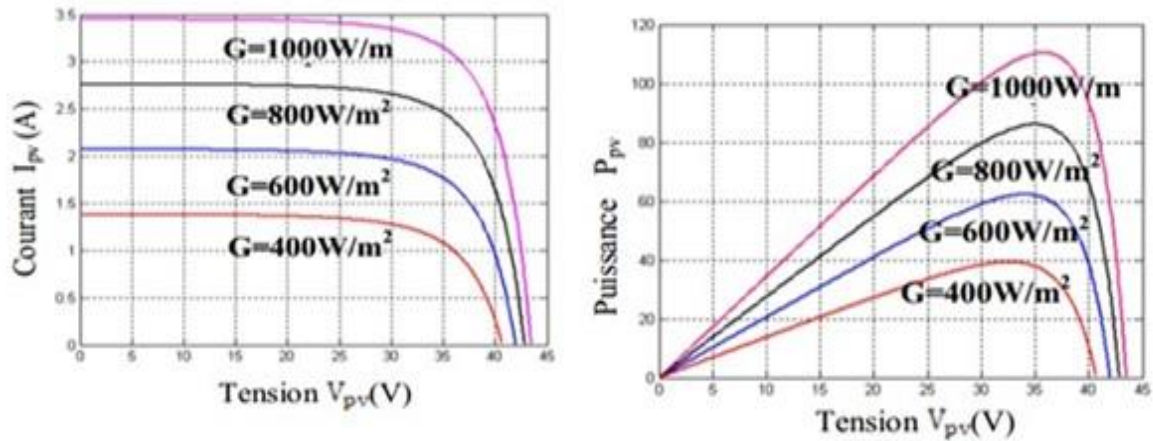


Figure 2.13 : Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du module photovoltaïque

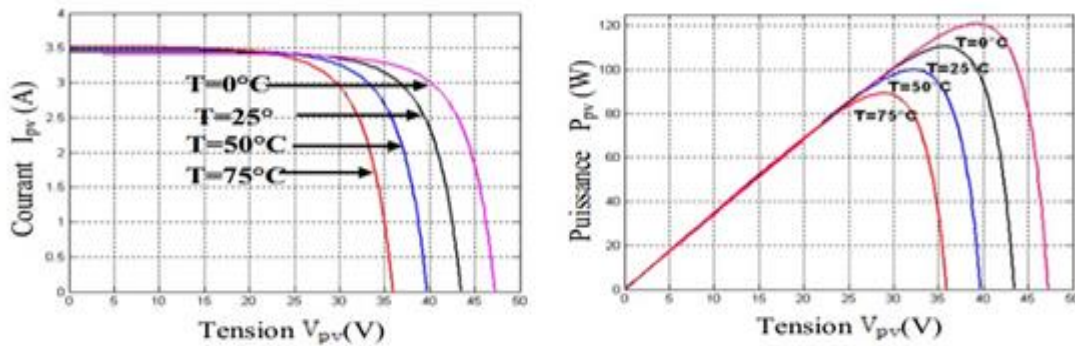


Figure 2.14 : Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du module photovoltaïque

Détermination expérimentale des caractéristiques d'un module photovoltaïque :

Essai expérimental permet de déterminer les caractéristiques courant - tension $L_{pv}(V_{pv})$ et puissance –tension P_{pv} d'un module photovoltaïque.

En faisant varier une résistance de charge en à l'aide d'un ampèremètre et d'un voltmètre le courant et la tension photovoltaïque pour un niveau d'éclairement et de température donné.

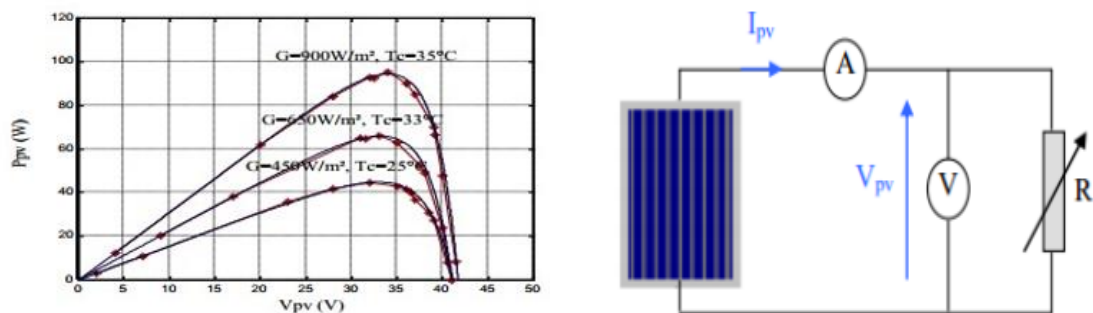


Figure 2.15 : schéma électrique de l'essai expérimentale

2.5 La batterie solaire :

Une fois l'électricité produite par le panneau solaire, si vous ne l'utilisez pas tout de suite, vous devez la stocker pour l'utiliser plus tard.

Le stockage de l'électricité se fait dans des batteries spécifiques, appelées batteries à décharge lente ou batteries solaires.

Contrairement à une batterie de voiture prévue pour livrer rapidement une grande quantité d'énergie, la batterie solaire doit livrer sur une longue période un courant stable. Cette batterie doit également pouvoir être rechargée un grand nombre de fois. **Une décharge et une charge de la batterie constitue un cycle**, les batteries solaires sont prévues pour fonctionner un certain nombre de cycles.

Comme vous le verrez ci-dessous, les batteries solaires GEL ont une durée de vie plus longue : - Batterie solaire au plomb ouvert : 400 à 500 cycles - Batterie solaire AGM : 600 à 700 cycles - Batterie solaire GEL : 800 à 900 cycles.

Des batteries de tensions différentes : il existe des batteries solaires fonctionnant en 2 V, 6 V ou 12 V. La capacité (en Ampères heure, Ah) est inversement proportionnelle à la tension : les batteries ayant la capacité de stockage la plus élevée sont les batteries 2V. Attention, pour un système sous 12V il vous faudra **1 batterie 12V** ou **2 batteries 6V** ou **6 batteries 2V**.

2.5.1 Durée de vie d'une batterie :

La capacité d'une batterie solaire est exprimée en ampères heure (Ah). Cette capacité représente le courant que la batterie peut potentiellement débiter.

La vitesse de décharge de la batterie a également un impact sur la capacité : plus la décharge est rapide, plus la capacité réelle de la batterie est faible. Cette vitesse de décharge est indiquée également sur la batterie : C10, C20, C100...

Par exemple, une batterie de 70 Ah en C100 aura réellement une capacité de 70 Ah si la décharge dure 100 heures sur une intensité de 0.7A. Si la décharge ne prend que 20h, donc sur une intensité de 2.75A, la capacité de cette batterie tombera aux environs de 55 Ah, pour passer à seulement 50 Ah en 10 heures avec 5A.

Attention ! Une batterie solaire ne doit jamais être déchargée totalement. Au-delà de 25% de décharge, la batterie est en danger.

Tableau comparatif des types de batterie :

Tableau 3: tableau qui compare les caractéristiques des différents types de batterie

Type	Energie massique	Tension d'un élément	Durée de vie (nbr de recharges)	Autodécharge par mois
	30-50Wh/kg	2V	200-300	5%
Ni-Cd	48-80Wh/kg	1.25V	1500	20%
Ni-Mh	60-120Wh/Kg	1.25V	300-500	30%
Lithium	110-160 Wh/Kg	3.7V	500-1000	10%

2.5.2 Les caractéristiques d'une batterie :

Tension nominale :

U liée au nombre d'éléments n : $U = n \times 2.1$, si $n = 6 \Rightarrow U = 12.6 \text{ V}$

.Capacité de stockage :

C qui s'exprime en Ah.

.Courant maximale :

I ou courant de crête (en A).

Profondeur de décharge :

(PDD) : C'est le pourcentage d'énergie maximum que l'on peut retirer d'une batterie. Elle ne doit pas être déchargée au-delà de cette valeur, afin de prolonger sa durée de vie. En général, on choisit PDD = 25% pour 2 jours d'autonomie ou moins, PDD = 70% pour 4 jours d'autonomie, PDD = 80% pour plus de 8 jours d'autonomie.

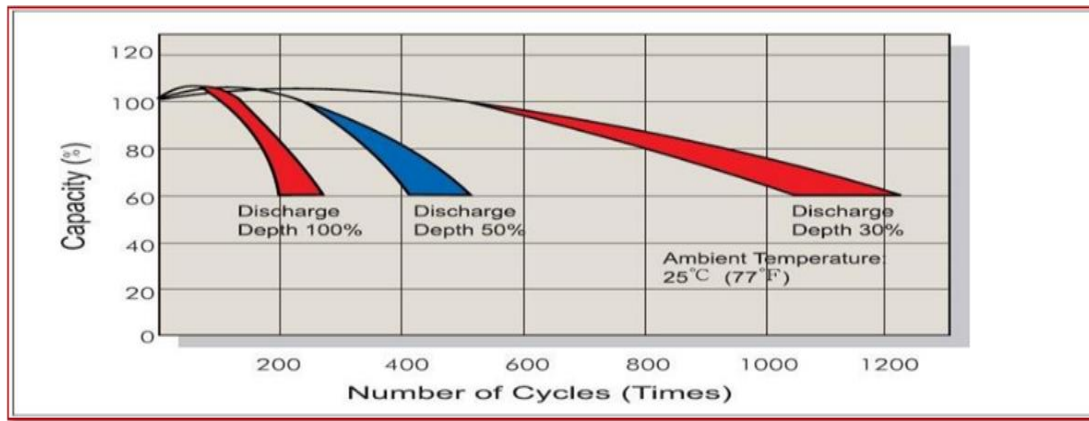


Figure 2.16 : Capacité en pourcentage en fonction du cycle de vie

2.5.3 Température :

La batterie à un fonctionnement idéal à la température ambiante de 25°C ;
Il faut donc prévoir si possible une régulation thermique pour maintenir sa durée de vie.

Tableau 4 : La capacité de la batterie en fonction du températures

Température	0	10	15	20	25	Au delà de 30°C
Capacité	80%	92%	95%	100%	103%	C % diminue

2.5.4 Courant de court-circuit :

D'après la norme NF C 15-100, le courant de court-circuit d'une batterie est :

$$I_{cc} = 10 \times C_n$$
 Ce qui donne pour une batterie 100Ah : $I_{cc} = 10 \times 100 = 1000 \text{ A}$

2.5.5 Résistance interne :

La résistance interne d'un accumulateur est toujours très faible.
 Cette faible résistance interne présente d'ailleurs un inconvénient : quand les deux bornes sont accidentellement, réunies par un conducteur lui-même peu résistant, la résistance totale du circuit reste très faible.

2.5.6 Montage parallèle :

Il est recommandé de mettre un fusible en série avec chaque batterie, on peut ainsi facilement isoler et mesurer une batterie, le fusible est une protection de chaîne en cas de court-circuit.

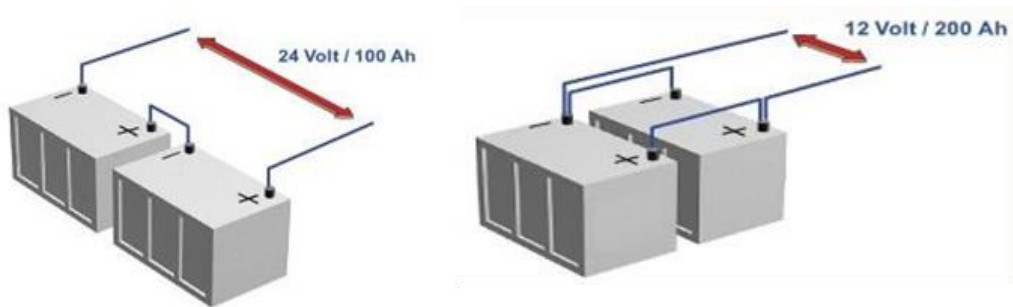


Figure 2.17 : montage de batterie en série et en parallèle

En série pour obtenir des tensions multiples de 12 Volts (24V, 48V)	En parallèle pour augmenter la capacité.
--	---

Remarque importante :

Pour obtenir une certaine capacité il vaut mieux mettre en série de grands éléments qu'en parallèle de petits.

Exemple : Pour obtenir **12V/500Ah**, on prend deux batteries de **6V/500 Ah** en série mieux que de prendre deux batteries de **12V/250Ah** en parallèle.

Voici plusieurs raisons qui expliquent pourquoi il est préférable d'opter pour la mise en série de composants de grande taille plutôt qu'en parallèle pour des éléments de plus petite taille :

1. Le courant est plus faible dans une configuration série

- À puissance équivalente, **plus la tension est élevée, plus le courant est faible.**
- Exemple :
 - Pour délivrer 6000 W :
 - À 12V $\rightarrow 6000W \div 12V = 500A$
 - À 24V $\rightarrow 6000W \div 24V = 250A$
- Moins de courant $\rightarrow$ **moins de pertes par effet Joule (chaleur)**, câbles plus fins, meilleure efficacité.

2. Équilibrage plus facile

- En **parallèle**, si une batterie est un peu plus faible ou plus chargée, le courant ne se répartit pas uniformément → une batterie travaille plus que l'autre, ce qui use le système.
- En **série**, le même courant traverse toutes les batteries, donc elles sont automatiquement équilibrées au niveau du courant.

3. Moins de connexions électriques

- En série, vous n'avez qu'une connexion entre chaque batterie (ex : + d'une vers – de l'autre).
- En parallèle, il faut relier tous les + entre eux et tous les – entre eux, ce qui **augmente les risques de mauvaise connexion, corrosion, échauffement**.

4. Simplicité du BMS (Battery Management System)

- Un BMS qui doit surveiller plusieurs batteries en parallèle a besoin de **plus de capteurs et de logique** pour équilibrer les tensions et courants.
- En série, un BMS peut se concentrer sur les tensions de chaque élément sans avoir à équilibrer les courants entre branches parallèles.

Tableau 5: Comparaison des configurations série et parallèle

Eclairage	Tension	Courant	Équilibrage	Efficacité	Complexité
Série (préférée)	↑ élevée	↓ plus faible	✓ facile	✓ meilleure	✓ plus simple
Parallèle	↓ basse	↑ plus élevé	✗ difficile	✗ pertes	✗ plus complexe

2.6 Générateur :

Le générateur est une source de courant continu...**non stationnaire** car dépend de facteurs d'influences non négligeable : le point de fonctionnement varie !!

La nuit et par faible éclairage, il ne fournit aucune puissance.

Il ne peut également fournir, dans les meilleures conditions, toute la puissance électrique voulue à moins de disposer de suffisamment de panneaux PV c'est à dire de surface.

Le panneau solaire n'est pas connecté aux charges...il a pour fonction Principale de recharger la batterie : plus qu'un point de fonctionnement, il faut alors rechercher un fort courant de charge

La batterie est indispensable...mais présente des conditions de fonctionnement qui impose une régulation.

Le régulateur de charge est un « système automatique » dont la fonction principale est d'assurer le contrôle de l'état de charge de la batterie : pas de surcharge ni décharge trop profonde.

2.7 Fonctions et branchement du régulateur :

Dans un système d'énergie solaire, le régulateur (également désigné comme régulateur de charge ou contrôleur de charge) est essentiel pour la gestion de l'énergie générée par les panneaux photovoltaïques. Son rôle principal consiste à assurer une charge optimale et sûre des batteries de stockage, dans le but d'optimiser leur longévité et leur performance.

La gestion entre les panneaux solaires, les batteries et la consommation d'énergie est assurée par le régulateur de charge. Voici ses tâches principales :

Gestion de la charge des batteries.

Protection contre la surcharge.

Protection contre la décharge excessive.

Optimisation de l'énergie.

Protégez les équipements.

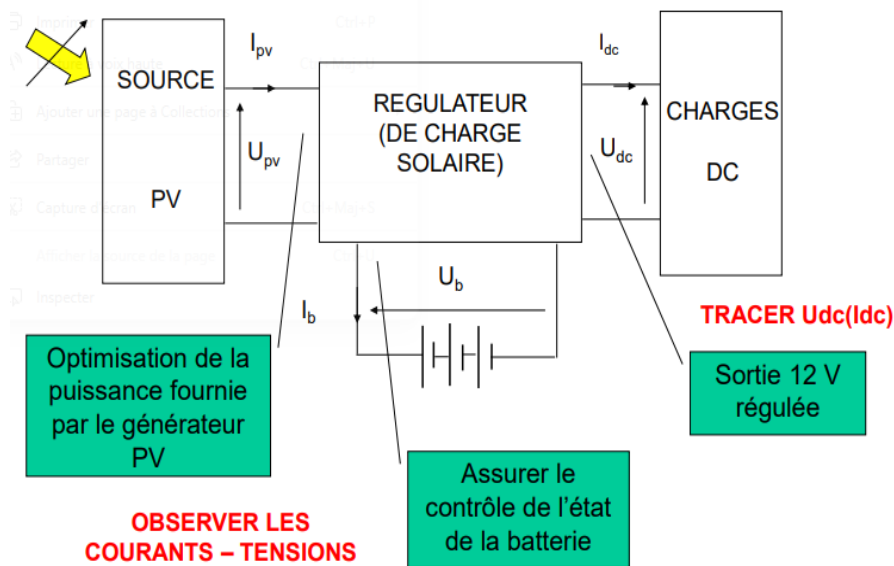


Figure 2.18 : schéma de branchement d'un régulateur et d'une batterie en série

2.7.1 La décharge excessive de la batterie :

Une décharge significative d'une batterie, surtout dans un système de stockage d'énergie tel qu'un dispositif photovoltaïque, peut engendrer divers effets néfastes, aussi bien pour la performance que pour la durabilité de celle-ci. Voici une vue d'ensemble des conséquences d'une décharge trop rapide ou excessive :

Réduction de la durée de vie de la batterie.

Perte de capacité de la batterie.

Risque de surcharge si la batterie se recharge trop rapidement.

Risque de surchauffe.

Risque de défaillance prématurée de la batterie.

Impact sur la performance globale du système photovoltaïque.

Risque pour la sécurité.

Altération de la chimie interne de la batterie.

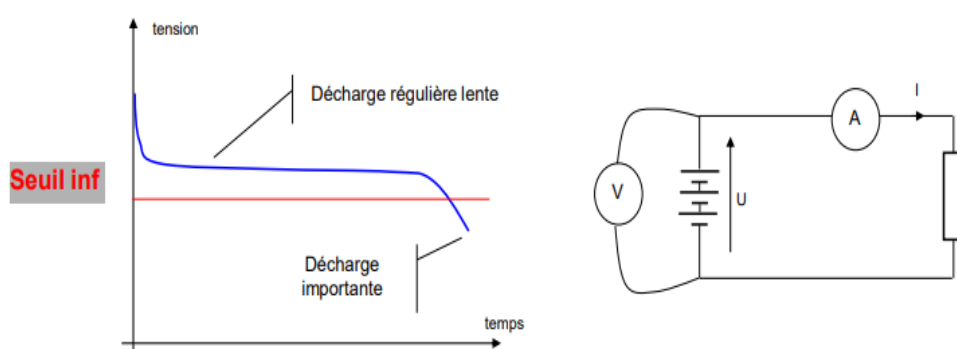


Figure 2.19 : décharge d'une batterie solaire

2.7.2 La recharge excessive de la batterie :

Qu'il s'agisse d'un système photovoltaïque ou de toute autre application, une surcharge considérable d'une batterie peut engendrer des répercussions sérieuses aussi bien pour sa protection que pour son rendement. Voici les effets majeurs d'une surcharge sur une batterie, ainsi que des conseils pour prévenir ce problème.

Réduction de la durée de vie de la batterie.

Surchauffe de la batterie.

Dégazage et perte d'électrolyte (pour les batteries au plomb-acide).

Endommagement du circuit de charge et des composants externes.

Risque de "venting" ou de fuite thermique (batteries lithium-ion).

Perturbation du système photovoltaïque ou de stockage.

Risque d'incendie ou d'explosion (en cas de surcharge extrême).

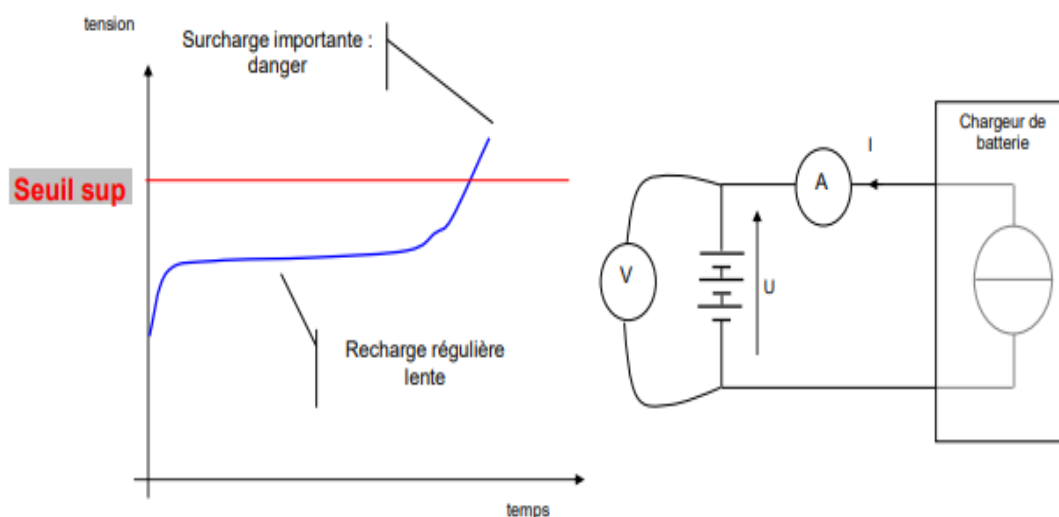


Figure 2.20 : la charge d'une batterie solaire

2.7.3 Mesures préventives et solutions :

Pour éviter ces impacts négatifs et prolonger la durée de vie de la batterie, voici quelques bonnes pratiques à suivre :

Maintenance régulière : Inspectez régulièrement l'état de la batterie (niveau de charge, température, et intégrité des connexions). Cela permet de détecter tôt des signes de problèmes.

Protéger contre les températures extrêmes : Assurez-vous que les batteries sont installées dans un environnement tempéré et bien ventilé, afin d'éviter des décharges excessives dues à des conditions de température inadaptées.

Utiliser un régulateur de charge adapté : Un régulateur de charge intelligent est essentiel pour limiter la charge maximale et protéger la batterie. De plus, les (régulateurs MPPT) optimisent l'entrée d'énergie et garantissent que la batterie ne soit pas surchargée.

Dimensionner correctement la batterie : Assurez-vous que la capacité de la batterie est suffisante pour répondre aux besoins du système sans dépasser les limites de charge.

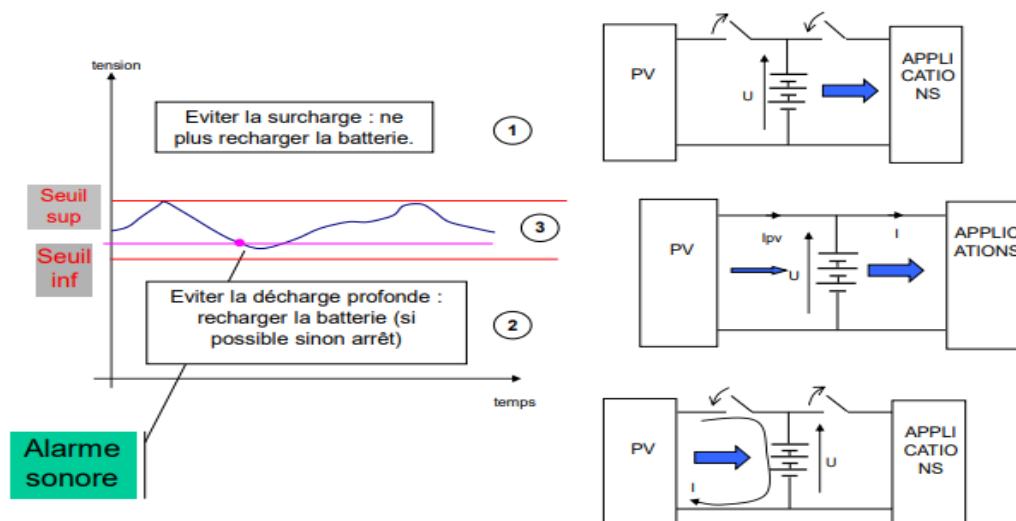


Figure 2.21 : le régulateur protège la batterie de la décharge profonde et la surcharge

2.7.4 Régulateur MPPT :

Détecteur de point de puissance maximum ou **MPPT** du panneau puis conversion en courant de charge par un convertisseur **DC/DC** dévolteur **BOOST** pour disposer d'un courant de charge élevé.

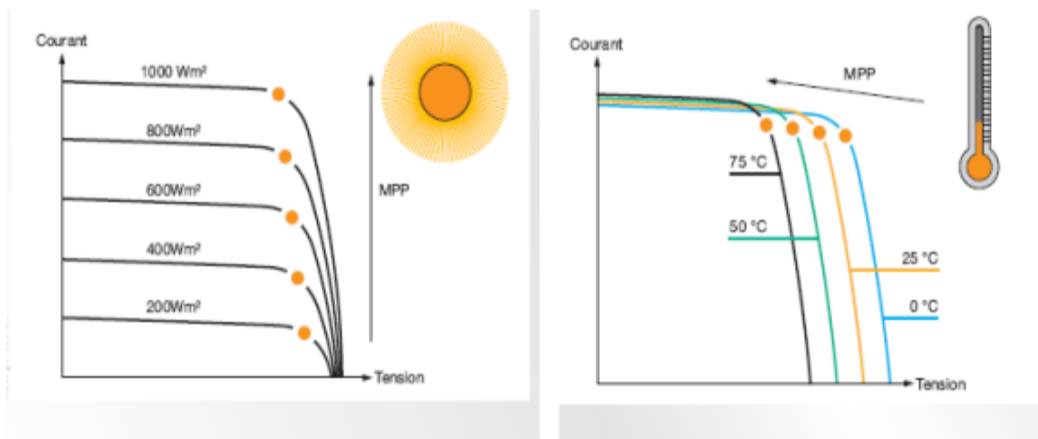


Figure 2.22 : détecteur de point de puissance maximum

2.8 Les équipements de protection

2.8.1 Fusible pour protection des branches :

La protection d'un champ photovoltaïque est réalisée à l'aide de fusible installé sur chaque branche. Il sera placé à la sortie de chaque branche parallèle et sera choisi en tenant compte de :

- La tension de fonctionnement d'un fusible doit être de 1,15 fois la tension à vide dans les conditions

STC des modules raccordés en série : $1,15 \times V_{co} \times N_{ms}$

Tension assignée du fusible $\geq 156,4 \text{ V}$; $(1,15 \times 27,1 \times 5 = 156,4)$

- Le calibre des fusibles doit être compris entre 1,5 et 2 fois le courant I_{sc} (STC) de chaque chaîne.

$$(1,5 \times I_{cc} \leq \text{calibre fusible} \leq 2 \times I_{cc}).$$

$$1,5 \times 4,67 \leq \text{Calibre fusible} \leq 2 \times 4,67 \text{ on a donc } 7 \text{ A} \leq \text{Calibre fusible} \leq 9,34$$

Nous choisirons un fusible de type gG de calibre 8 A de taille 10 x 38 mm (diamètre x longueurs) et de tension maximale 250 VCC.

Comme nous avons 2 branches, il nous faut 2 fusibles de 8 A avec 2 portes fusible de type SBI 10 x 38.

2.8.2 Fusible pour protection générale :

- Tension assignée du fusible $\geq 156,4 \text{ V}$; $(1,15 \times 136 = 156,4)$
- $(1,5 \times I_{cc} \times NBP \leq \text{calibre fusible} \leq 2 \times I_{cc} \times NBP)$

$1,5 \times 4,67 \times 2 \leq \text{Calibre fusible} \leq 2 \times 4,67 \times 2$, on a donc $14,01 \text{ A} \leq \text{Calibre fusible} \leq 18,68 \text{ A}$

Nous choisirons un fusible type un fusible de type gG de calibre 16 A de taille 10 x 38 mm (diamètre x longueurs) et de tension maximale 250 VCC. Le porte fusible choisi est de type SBI 10 x 38.

2.8.3 Interrupteur –sectionneur :

Il sera placé juste à la sortie du générateur et servira entre autres d'isoler électriquement le champ PV afin de permettre des opérations de maintenance en sécurité. Il doit être dimensionné selon la règle suivante :

- Tension assignée du fusible $\geq 1,15 \times V_{co} \times N_{ms}$

Tension assignée du fusible $\geq 156,4 \text{ V}$; $(1,15 \times 136 = 156,4)$

- Intensité nominale $\geq 1,5 \times I_{cc} \times NBP$

Intensité nominale $\geq 14,01 \text{ A}$; $(1,5 \times 4,67 \times 2 = 14,01)$

Nous choisirons un interrupteur sectionneur de type SBN240 constitué de 2 pôles ; d'intensité nominale 16 A ; et de tension maximale 250 Vcc.



Figure 2.23 : Interrupteur –sectionneur

2.8.4 Parafoudre :

Le parafoudre permet de protéger contre les risques de surtensions éventuelles dans l'installation. Pour prévenir les surtensions dues à la foudre, la protection contre les risques de

surtensions induites dans le circuit de la partie à tension alternative de l'installation est important ainsi que la partie à tension continue. Le parafoudre DC choisi est de type DS210-24DC de :

Courant maximal : 6 kA

Tension maximale 150 Vdc



Figure 2.24 : Parafoudre

2.8.5 Mise à la terre :

La mise à la terre est une protection contre tout accident électrique éventuel sur une personne en contact avec un appareil présentant un défaut électrique et aussi une protection pour le matériel mis en place dans le système. On relie donc tout l'équipement électrique et les parties métalliques à la terre à l'aide d'un conducteur de faible résistance (5 ohms), de sorte que le courant électrique en défaut soit évacué dans la terre.

Le conducteur de terre qui assure la liaison entre la prise de terre et la barrette de mesure est de 16 mm² en cuivre isolé ou 25 mm² en cuivre nu. Le conducteur de terre qui assure la liaison entre la barrette de mesure et aux équipements est un câble en cuivre de couleur jaune-verte de 6 mm².

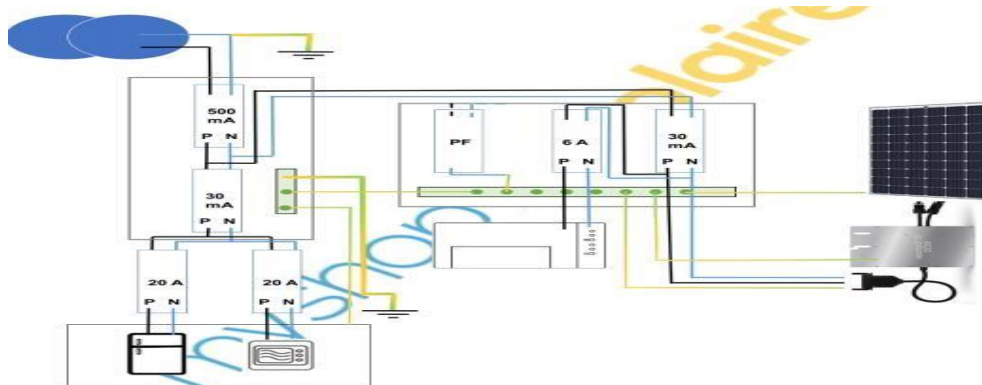


Figure 2.25 : schéma qui montre la mise a la terre

2.8.6 Protection contre la foudre :

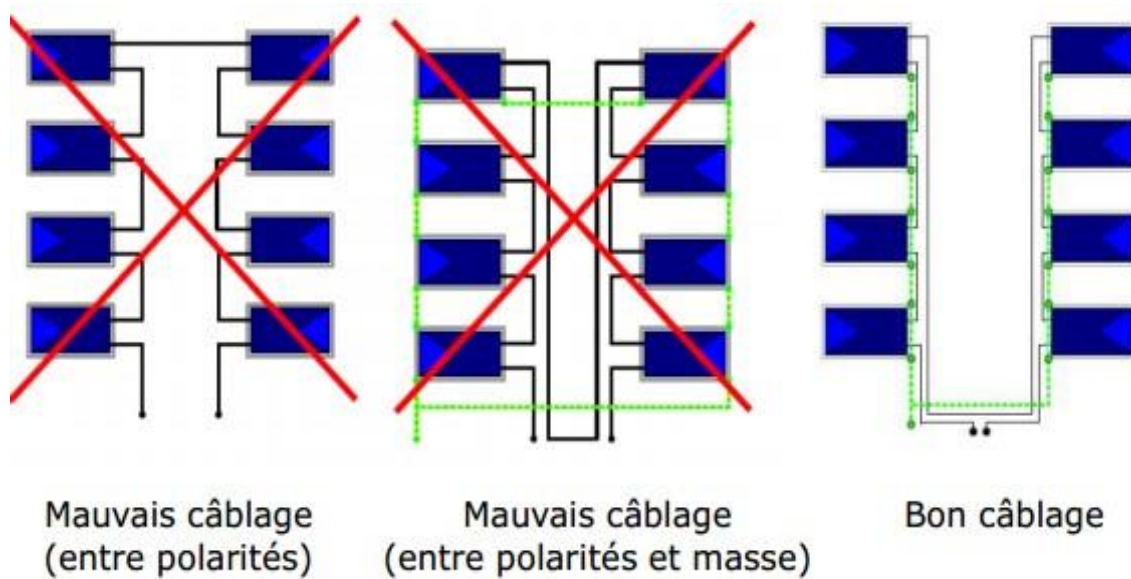


Figure 2.26 : la terre au niveau des panneaux solaires

- ❖ Mise à la terre des masses
- ❖ Réduction des boucles de câblage
- ❖ Interconnexion des masses par conducteur cuivre $\geq 6 \text{ mm}^2$
- ❖ Interconnexion avec descente de paratonnerre (si existant)
- ❖ Parafoudres sur circuit courant continu (type varistances à oxyde de zinc avec déconnexion thermique intégrée)
 - Au niveau de la boîte de jonction (si $L > 10\text{m}$)
 - En entrée de l'onduleur
- ❖ Parafoudres sur circuit alternatif (type varistances à oxyde de zinc avec déconnexion thermique intégrée)
 - Sur ligne AC onduleur
 - Sur réseau distributeur (option)

N.B. Des protections foudre sont souvent intégrées dans les onduleurs.

Le Guide UTE C15-712 recommande toutefois d'en inclure dans les coffrets de protection AC et DC

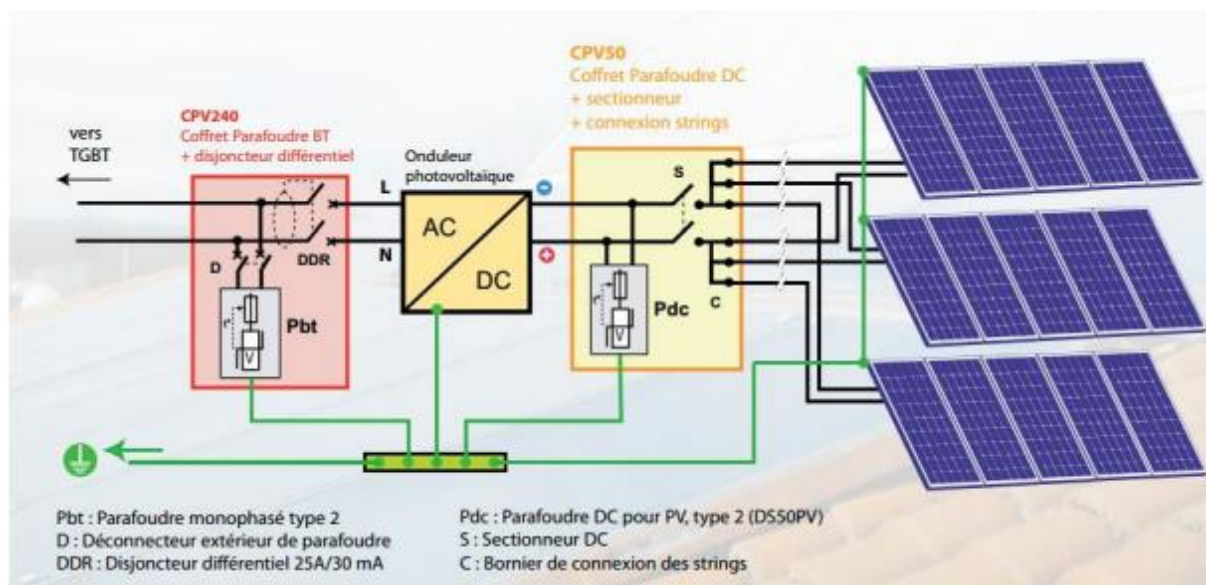


Figure 2.27 : Principe de protection par coffrets suivant UTEC 15-712

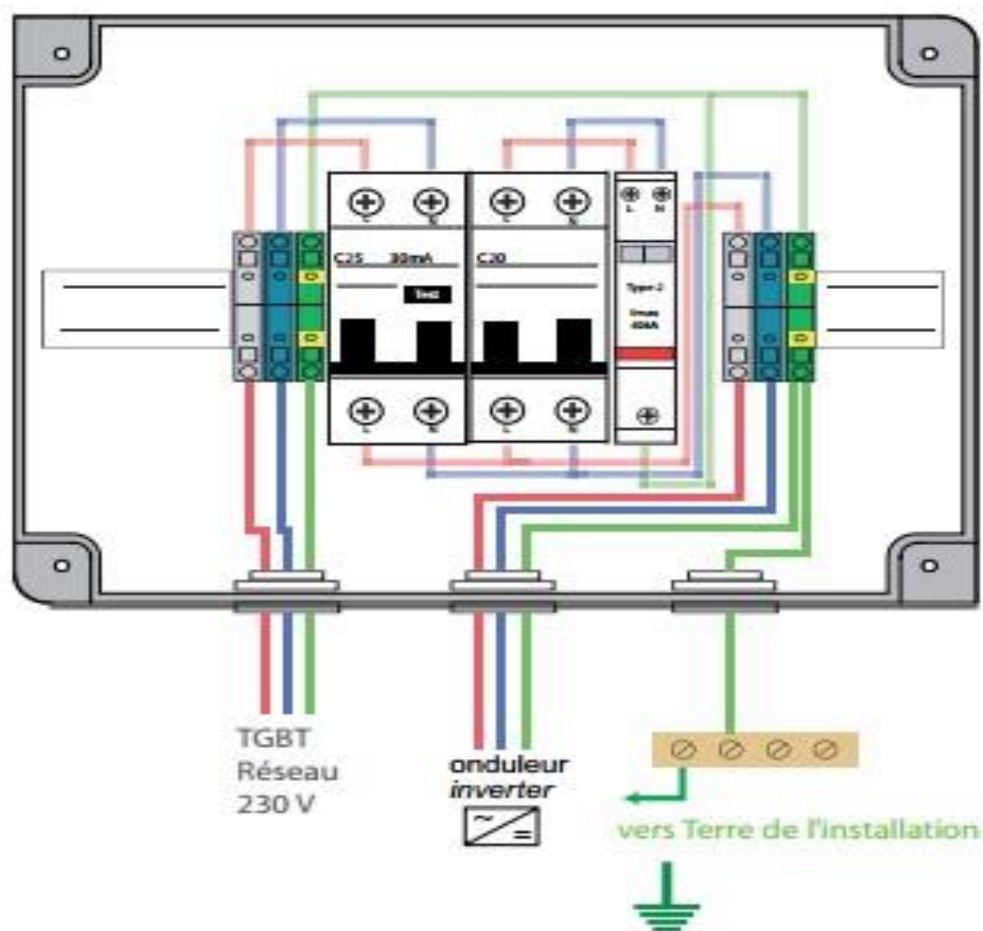


Figure 2.28 : schéma détaillé de Protection contre la foudre

2.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous présentons le système qui permet la conversion de l'énergie solaire photovoltaïque en énergie électrique représenté par des panneaux solaires de trois types, en mentionnant les composants et les caractéristiques de chaque type.

CHAPITRE 3

3.1Présentation du site :

3.1.1 Introduction :

Dans cette partie du travail on va se concentrer sur la géographie et la météo en alentour d'université Saad Dahleb Blida ou Université Blida 1.

Qui est une université publique algérienne située à Blida, au nord du pays à une altitude de 196m au-dessus du niveau de la mer, à une latitude et longitude n° 36.508, 2.880

La période la plus lumineuse de l'année dure environ 3 mois.

Tableau 6 : Analyse Mensuelle des Conditions Climatologiques et de l'Irradiation Solaire

	Irradiation globale horizontale kWh/m ² .ms	Irradiation diffuse horizontale kWh/m ² .ms	température °C	Vitesse du vent m/s	Humidité relative %
Janvier	78.5	30.9	10.0	2.40	79.3
Février	84.3	42.5	10.8	2.49	76.1
Mars	128.0	61.4	13.3	2.70	74.8
Avril	146.5	79.5	15.3	2.99	74.2
Mai	186.7	89.4	19.0	3.0	71.4
Juin	218.9	79.4	22.8	3.10	67.9
Juillet	241.0	67.4	25.9	3.10	66.7
Aout	205.4	74.3	26.2	2.90	67.0
Septembre	150.1	58.7	22.8	2.79	72.3
Octobre	120.9	46.4	20.0	2.29	73.3
Novembre	84.7	33.8	14.3	2.49	75.8
Décembre	96.7	29.3	11.6	2.59	77.1
Année	1714.7	693.0	17.7	2.7	73.0

3.1.2 Incubateur :

Un incubateur d'entreprise est un lieu d'accompagnement pour les créateurs de sociétés, il est financé par une collectivité publique, mais fait aussi appel à des fonds privés. Certains incubateurs sont intégrés à des grandes écoles ou des universités.

Les entreprises accueillies dans des incubateurs sont très jeunes, voir en cours de création. Il s'agit souvent d'entreprises innovantes du secteur des nouvelles technologies, qu'on appelle « jeunes pousses » ou « start-up ».

Le but d'un incubateur est d'aider ces entreprises à grandir, En plus d'offrir une structure, les incubateurs aident les entrepreneurs à réfléchir à leur projet, à élaborer leur modèle économique. Aussi, l'incubateur propose souvent des formations, une assistance juridique et une mise en relation avec des financeurs.

Enfin, un incubateur permet d'échanger avec d'autres entrepreneurs qui pourront éventuellement devenir leurs associés.

L'intégration d'un système photovoltaïque au sein d'un incubateur pour une installation électrique soulève la question cruciale de la durabilité énergétique et de l'efficacité économique. Alors que les incubateurs cherchent à favoriser l'innovation et à soutenir les projets à faible empreinte carbone, l'énergie solaire représente une solution idéale pour répondre à ces enjeux. En effet, l'installation de panneaux photovoltaïques pourrait non seulement réduire les coûts d'exploitation sur le long terme, mais aussi améliorer la performance énergétique des structures en produisant de l'électricité à partir d'une source renouvelable. Cependant, cette transition nécessite une réflexion approfondie concernant les coûts d'installation initiaux, l'adaptation des infrastructures existantes et les bénéfices potentiels en termes de rentabilité et d'impact environnemental. Ainsi, il devient pertinent d'explorer dans quelle mesure l'ajout d'un système photovoltaïque pourrait être un levier stratégique pour améliorer la compétitivité des incubateurs tout en répondant aux exigences écologiques et économiques des entreprises qu'ils soutiennent.

Puisque l'incubateur est situé au sein de l'université donc ça permet aux étudiants de voir le système photovoltaïque devant eux, comme on peut les ajouter un module de travaux pratique pour réparation ça sera plus rentable pour l'investisseur et l'étudiant aura une expérience importante en maintenance de ce genre de système même avant qu'il finisse ces études

3.1.3 Equipements :

Dans ce qui suit nous présentant les équipements dans de différents bureaux et salles :

Bureau de directeur :

Equipements	Climatiseur	Ordinateur	Imprimante	Photocopieuse	Lampe
Nombre	1	1	1	1	12

Secrétariat :

Equipements	Lampes	Ordinateur	photocopieuse	Imprimante	Climatiseur
Nombre	44	1	1	1	1

Salle de réunion :

Equipements	Climatiseur	Data show	Lampe
Nombre	1	1	18

Sale des incubés :

Equipements	Ordinateur	Imprimante	Lampes
Nombre	27	8	25

Le couloir :

Equipements	Ordinateur	Imprimante	Lampes
Nombre	27	1	4

La cuisine :

Equipements	Plaque chauffante	Panineuse	Lampes	Micro-onde	Cafetière	Réfrigérateur
Nombre	1	1	2	1	1	2

Sale Prototypage :

Equipements	imprimante 3D	Lampes
Nombre	1	2

Bureau de directeur :

Equipements	Photocopieuse	Imprimante	Lampes
Nombre	27	1	2

Salle de réunion pour les incubés :

Equipements	Téléviseur	Lampes
Nombre	1	2

3.2 Alimentation de l'incubateur par énergie photovoltaïque :

3.2.1 Consommation électrique :

La consommation d'énergie est la quantité d'énergie utilisée par des équipements (équipement) tels que les climatiseurs, les chaudières ou même les bâtiments.

Celui-ci varie en fonction des paramètres définis comme les performances, le COP, l'isolation thermique, etc.

L'unité d'expression de la consommation d'énergie est le kilowattheure ou kWh.

Pour comparer la consommation énergétique, les unités sont : kWh/m²/an.

Voici un tableau bien détaillé qui détermine la consommation globale de notre incubateur :

Tableau 7 : Consommation Énergétique des Équipements : Détail et Total

Colonne1	Nombre	Puissance unitaire (W)	Consommation unitaire (Wh)	Consommation globale unitaire (Wh)	Heure de marche (h)	Consommation globale journalière (Wh)
Eclairage	111	16	16	1776	8	14 208
Climatiseur	3	2500	2500	7500	6	45 000
Ordinateur	34	210	210	7140	8	42 840
Réfrigérateur	1	500	500	200	24	4 800
Panineuse	1	1500	1500	1500	1	1500
Bain d'huile	1	1000	1000	1000	8	8 000
Plaque chauffante	1	8000	8000	8000	1	8000
Micro-onde	1	1500	1500	1500	1	1 500
Cafetière	1	1000	1000	1000	1	1 000
Data show	3	250	250	750	6	4 500
Téléviseur	1	400	400	400	6	2 400
Photocopieuse	2	1000	1000	2000	5	10 00
Imprimante 3D	1	360	360	360	4	1 440
suppresseur	1	1000	1000	1000	3	3 000
Total				34126		148188

3.3 LE DIMENSIONNEMENT :

3.3.1 Introduction :

Le dimensionnement du système photovoltaïque est utilisé pour déterminer le nombre de panneaux solaires nécessaires pour répondre aux besoins énergétiques à tout moment ainsi que tous les autres composants électriques, en fonction des données d'ensoleillement de localisation.

Dans ce chapitre, nous examinons la procédure et les étapes prise pour mesurer les dimensions d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. Nous considérons l'exemple d'un incubateur à l'Université Saad Dahleb, Blida 1, qui nous permettra d'appliquer les lois pour effectuer les calculs nécessaires à l'installation, puis nous déterminerons les estimations quantitatives pour ce projet et enfin nous déterminerons les étapes de préparation du système pour la remise du projet.

3.3.2 Les étapes de dimensionnement :

Il y a plusieurs facteurs qui jouent sur la production d'électricité :

L'ensoleillement annuel de la région peut être estimé de manière assez précise.

Direction, sachant que le soleil a son point culminant au Sud dans l'hémisphère Nord, c'est la meilleure direction pour les panneaux.

Degrés d'inclinaison, choisis en fonction de l'altitude du soleil pendant les mois ensoleillés pour une récupération optimale.

3.3.3 L'angle d'inclinaison des panneaux :

L'incubateur d'université Blida 1 se situe au nord du pays à une altitude de 196m au-dessus du niveau de la mer, à une latitude et longitude n° 36.508, 2.880.

Puisque on est en Algérie qui se situe dans l'hémisphère nord et donc l'orientation des panneaux photovoltaïque est en plein sud.

$$\delta = 23.45 * \sin\left(2 * \pi * \frac{(d + 284)}{365}\right)$$

Tel que :

d : est le nombre de jour [21 décembre = 356]

L'application numérique :

$$\delta = 23.45 * \sin\left(2 * \pi * \frac{356 + 284}{365}\right) = 4.48^\circ$$

Alors :

L'angle d'inclinaison = Latitude - δ

L'angle d'inclinaison = $36.508 - 4.48 = 32.028^\circ$

3.3.4 Détermination du nombre des panneaux :

On choisit un panneau photovoltaïque monocristallin 335W/32V fabriqué par Jinkosolar qu'on peut le trouver sur le marché, donc il délivre 335W pour un rayonnement de 1000W/m^2 .

Pour calculer le nombre de panneaux pour couvrir la consommation journalière on peut utiliser une méthode simple et efficace :

$$N_{ppv} = \frac{E_{cj}}{P_{ppv} * 0.8} = \frac{\text{Puissance pour couvrir la consommation}}{\text{Puissance d'un seul Panneau} * 0.8}$$

Tel que :

N_{ppv} : Nombre de panneaux photovoltaïque.

E_{cj} : Energie consommé par jour.

P_{ppv} : Puissance panneau photovoltaïque.

Application numérique :

$$N_{ppv} = \frac{34200}{335 * 0.8} = 102$$

Donc on va prendre 102 panneaux photovoltaïques. Qui seront connecté comme suite :

Le nombre de modules connectés en série : 18 modules photovoltaïques ;

Le nombre de modules connectés en parallèles : 6 modules photovoltaïques.

3.3.5 Détermination du nombre d'onduleur et sa puissance correspondante :

On n'a pas un rendement standard pour tous les onduleurs, ça dépendra de la fiche technique, mais généralement le rendement d'un onduleur solaire est 90% donc :

$$P(W) = \frac{E_{cj} \times 1.25}{0.90}$$

Application numérique :

$$P(W) = \frac{34200 \times 1.25}{0.90} = 47500W$$

Donc on a besoin d'utiliser un onduleur d'une puissance égale à 47500W pour ce là on choisit un onduleur.

3.4 Modélisation 3D :

3.4.1 Introduction :

Dans le but d'améliorer nos études et nos calculs on a préféré d'utiliser des méthodes efficaces à l'aide de logiciel de simulation PVsyst est conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais c'est aussi un outil pédagogique très utile. Il inclut une aide contextuelle approfondie, qui explique en détail la procédure et les modèles utilisés et offre une approche ergonomique avec guide dans le développement d'un projet. PVsyst permet d'importer des données météo d'une dizaine de sources différentes ainsi que des données personnelles.

Conception 3D de notre projet :

Après avoir étudié le site géographiquement et météorologique on a fait une conception 3D de pavillon 23 de notre université, on a préféré de monter les panneaux sur le toit pour éliminer l'ombrage du pavillon sur les panneaux et pour garder l'espace vert.

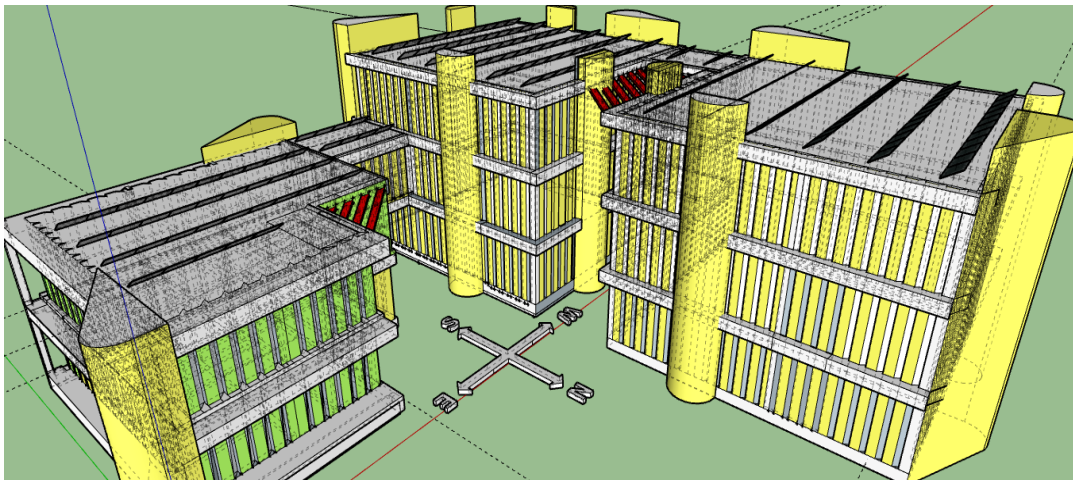


Figure 3.1 : une vue globale sur le département

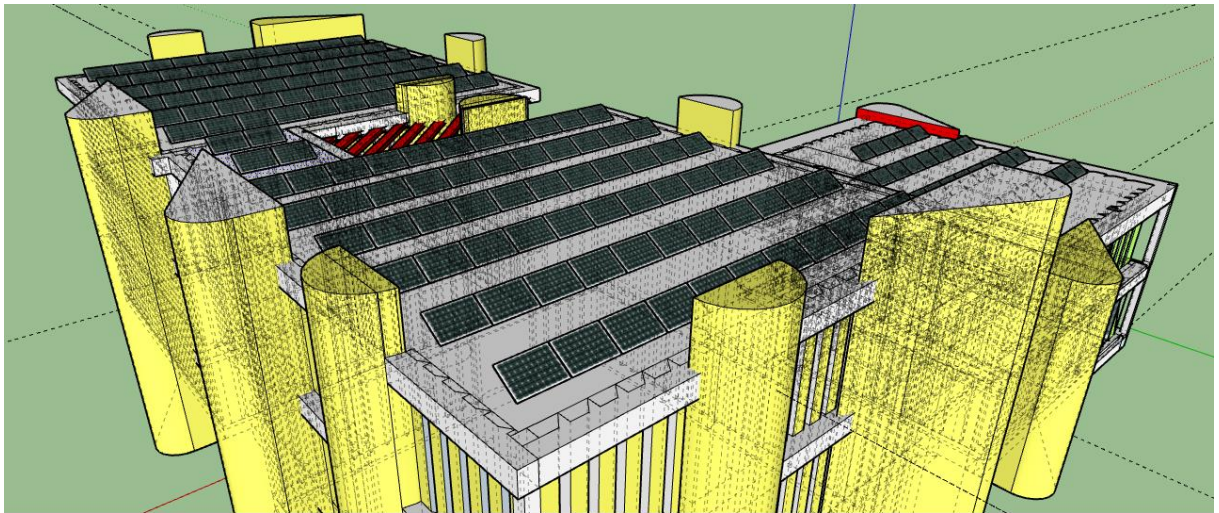


Figure 3.2 : modélisation des panneaux photovoltaïque

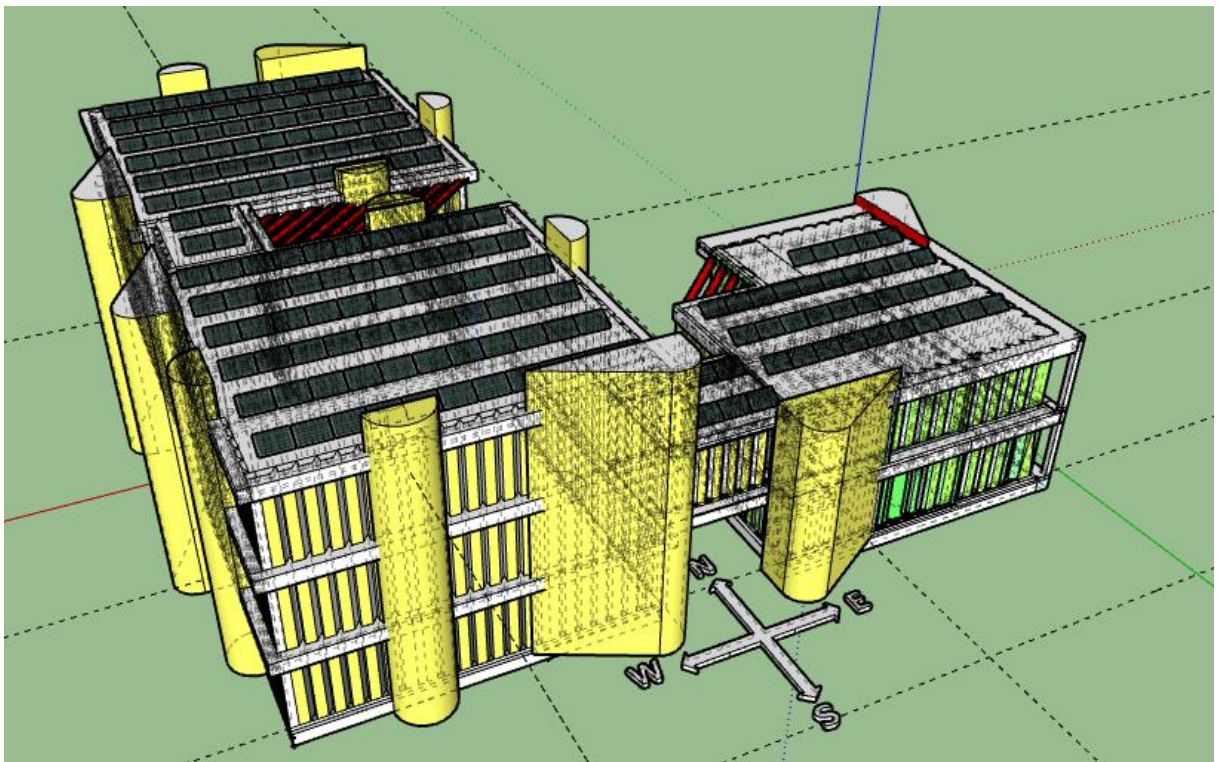


Figure 3.3 : L'orientation des panneaux vers le sud

CHAPITRE 4

4.1 Introduction sur le programme Homer Pro :

Homer Pro est un logiciel de simulation et d'optimisation de systèmes énergétiques hybrides. Conçu pour aider les ingénieurs et les chercheurs à modéliser et évaluer diverses configurations de systèmes énergétiques, il permet d'analyser la viabilité économique et la performance technique de projets intégrant des sources d'énergie renouvelables, des générateurs conventionnels, des batteries et des systèmes connectés au réseau. En fournissant des comparaisons détaillées de coûts, d'émissions et d'efficacité, Homer Pro constitue un outil précieux pour concevoir des solutions énergétiques durables et rentables adaptées à différents contextes opérationnels.

4.2. Introduction et Objectifs de l'Étude :

À ce stade avancé de notre étude, nous entreprendrons une comparaison approfondie de deux systèmes distincts de fourniture d'énergie à l'aide du logiciel Homer Pro. Le premier système est un système autonome, intégrant des panneaux solaires pour la génération d'énergie et des batteries pour le stockage, assurant ainsi une indépendance énergétique complète. Le second système est un système connecté au réseau électrique, qui se distingue par l'absence de besoin en batteries, s'appuyant entièrement sur l'infrastructure existante pour une fourniture continue d'énergie. Cette comparaison vise à évaluer les performances, la fiabilité et l'efficacité économique de chaque système dans des conditions opérationnelles variées.

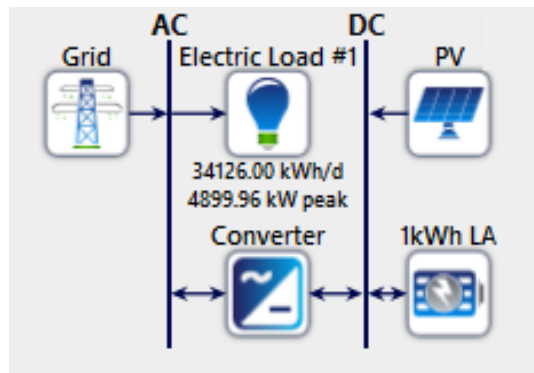


Figure 4.1 : architecture du micro-réseau sous Homer

4.3 Caractéristiques et Coûts des Composants :

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques techniques ainsi que les coûts actuels des composants essentiels du système d'énergie étudié. Chaque choix technologique a été fait de manière stratégique afin d'assurer à la fois la performance, la durabilité et la rentabilité du système sur le long terme.

Tableau 8: Détails et Coûts des Composants pour un Système Énergétique

Composant	Caractéristiques techniques	Prix actuel (\$)
Panneau solaire	Puissance : 1 kW, Durée de vie : 25 ans	200
Batterie	Capacité : 1 kWh, Durée de vie : 10 ans, Type : Lithium (LiFePo4)	110
Onduleur On-Grid	Puissance nominale : 1 kW, Efficacité : 95%, Durée de vie : 15 ans	300
Réseau électrique		0.04 \$/KWh

Le panneau solaire monocristallin a été choisi pour son rendement élevé et sa bonne tenue dans le temps, ce qui en fait une technologie fiable pour une production stable sur les 25 années de durée de vie du projet. Son efficacité permet de maximiser la surface utile, ce qui est particulièrement avantageux dans les zones où l'espace est limité.

La batterie au lithium (LiFePO₄) a été retenue pour sa longue durée de vie (jusqu'à 10 ans), sa sécurité accrue et son meilleur rendement par rapport aux batteries au plomb. Ce type de batterie permet une meilleure gestion des cycles de charge/décharge, essentielle pour assurer une alimentation continue.

L'onduleur On-Grid, avec un rendement de 95 %, assure une conversion efficace de l'énergie continue produite par les panneaux solaires en énergie alternative utilisable sur le réseau. Son espérance de vie de 15 ans en fait un choix économique et robuste pour les systèmes hybrides.

Enfin, le coût de l'électricité provenant du réseau est fixé à 0,04 \$/kWh, ce qui sert de référence pour l'analyse comparative des coûts d'exploitation entre le système connecté au réseau et le système traditionnel.

4.3 Analyse de la Consommation Énergétique :

Ce profil a été généré automatiquement par le logiciel HOMER à partir de la consommation énergétique moyenne quotidienne définie au préalable dans le modèle. Le programme répartit cette consommation sur les 24 heures de la journée en fonction d'un profil horaire standard ou personnalisé, permettant ainsi d'obtenir une courbe représentative des variations de la demande tout au long de la journée.

Ce type de graphique est essentiel pour comprendre les besoins réels en énergie à chaque instant, ce qui permet de dimensionner de manière optimale les différents composants

du système, notamment les panneaux solaires, les batteries et l'onduleur. Une analyse fine de ce profil horaire garantit une conception plus efficace, une meilleure adaptation aux besoins spécifiques du site, ainsi qu'une amélioration significative de la fiabilité et de la rentabilité du système énergétique envisagé.

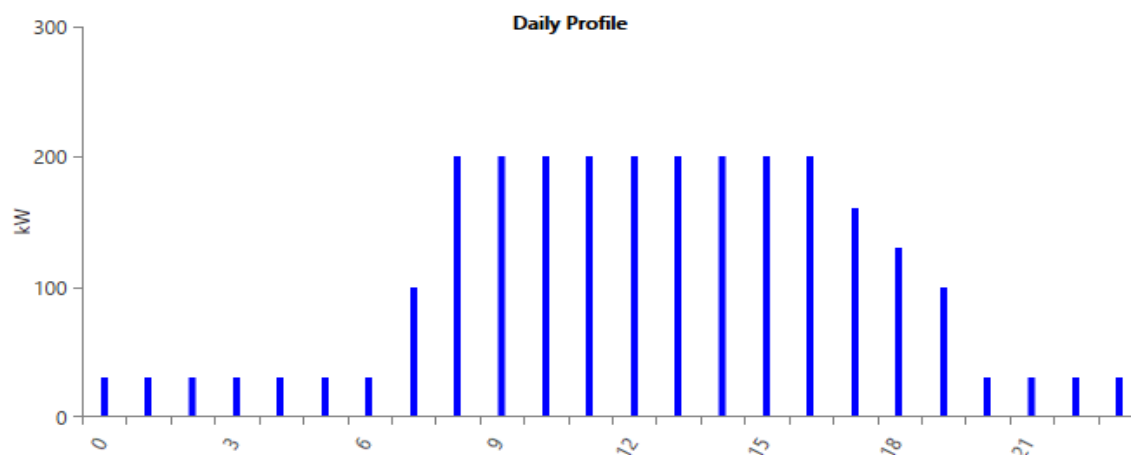


Figure 4.2 : la consommation énergétique au long de la journée

4.4 Résultats de la Simulation :

Suite à une analyse approfondie de divers scénarios par le programme de simulation, les résultats fournissent des recommandations sur les systèmes les plus appropriés à utiliser. Ces systèmes sont classés en fonction de leur rentabilité économique et de leur efficacité opérationnelle.

Architecture									Cost		
				PV (kW) 	1kWh LA 	Grid (kW) 	Converter (kW) 	Ren Frac (%) 	NPC (\$)  	COE (\$)  	Initial capital (\$) 
				4,043		999,999	2,217	43.3	\$5.95M	\$0.0362	\$1.47M
				3,562	2	999,999	2,145	39.9	\$5.96M	\$0.0365	\$1.36M
						999,999		0	\$6.44M	\$0.0400	\$0.00
				49,346	47,398		6,324	100	\$34.1M	\$0.212	\$17.0M

Figure 4.3 : le résultat de la simulation

4.5 Comparaison des Coûts et de la Rentabilité :

D'après les résultats obtenus, il est évident que le système connecté au réseau se révèle être le plus avantageux. Le coût du kilowattheure dans ce système est de 0,0362 dollar, ce qui le rend plus économique que le système traditionnel exclusivement relié au réseau, dont le coût s'élève à 0,04 dollar par kilowattheure. De plus, il surpasse de loin le système autonome basé

sur les batteries, où le coût du kilowattheure atteint 0,212 dollar. Cette analyse démontre que le système connecté au réseau offre non seulement une rentabilité supérieure, mais également une meilleure efficacité économique, rendant ce choix optimal pour les applications nécessitant une fourniture énergétique fiable et économique.

Le tableau suivant présente les composants de chacun des deux systèmes :

Tableau 9 : Capacité des Composants Énergétiques pour Systèmes Connectés au Réseau et Autonomes

Composant	Système connecté au réseau	Système autonome
Panneau solaire	4043 KW	49346 KW
Batterie	Non	47398 KWh
Onduleur	2217 KW	6324 KW
Réseau électrique	Oui	Non

Les résultats ont montré que le système connecté au réseau ne nécessite qu'une puissance photovoltaïque de 4043 kW, grâce à la possibilité de compenser tout déficit de production par l'apport du réseau national. Cela réduit considérablement le besoin en capacités de production et de stockage. L'absence de batteries dans ce système reflète la dépendance au réseau en tant que source de secours permanente, et une puissance d'onduleur de 2217 kW suffit pour alimenter efficacement les charges électriques.

En revanche, le système autonome requiert des capacités nettement plus élevées. Il a fallu installer 49346 kW de panneaux solaires ainsi qu'une capacité de stockage importante de 47398 kWh afin de garantir une alimentation continue, même durant les périodes de faible ensoleillement. Ce système a également nécessité l'utilisation d'un onduleur de 6324 kW pour couvrir l'ensemble de la demande électrique sans appui externe. Ces résultats mettent en évidence les différences fondamentales entre les deux configurations : le raccordement au réseau offre une grande flexibilité et réduit les coûts d'investissement, tandis que le système autonome impose des investissements plus lourds et une complexité technique accrue pour assurer une autonomie énergétique complète, ce qui le rend plus adapté aux zones isolées.

4.6 Retour sur Investissement et Économies à Long Terme :

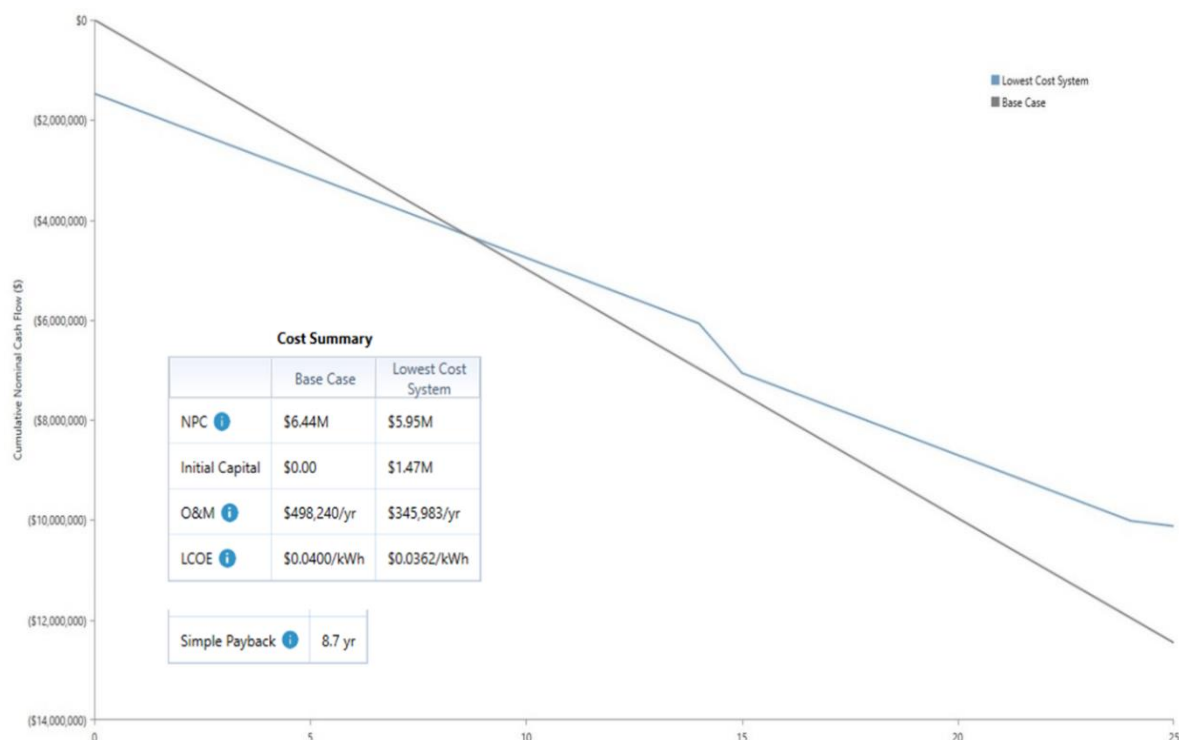


Figure 4.4 : le retour sur l'investissement

En comparant le système gagnant (connecté au réseau) avec le système de base, entièrement dépendant du réseau, nous constatons que, malgré un investissement initial de 1,47 million de dollars pour le système connecté, celui-ci parvient à amortir son coût en seulement 8,7 ans. Au-delà de ce seuil, il devient économiquement plus avantageux, avec un gain net cumulé atteignant environ 490 000 dollars à la fin de la période.

Il est à noter qu'autour de la quinzième année, une légère augmentation des coûts est observée dans le système connecté, principalement due au remplacement des batteries et de l'onduleur. Toutefois, cette hausse ponctuelle ne remet pas en cause sa performance globale. Sur l'ensemble de la durée de vie du projet, estimée à 25 ans, le système connecté au réseau affiche une supériorité claire : son coût total s'élève à 5,95 millions de dollars, contre 6,44 millions pour le système traditionnel.

Cette analyse met en évidence la rentabilité durable du système connecté au réseau. Il offre non seulement des économies substantielles à long terme, mais garantit également une fourniture énergétique plus stable et mieux maîtrisée grâce à la flexibilité apportée par l'accès au réseau électrique.

4.7 Proportions de Production d'Énergie :

Lorsque nous examinons les proportions de production d'énergie dans le système connecté au réseau, nous constatons que les panneaux solaires génèrent une production annuelle de 6 441 167 kilowattheures, représentant ainsi 47,2 % de la production totale. Parallèlement, le réseau électrique compense le déficit d'énergie en l'absence de soleil en fournissant 7 195 935 kilowattheures par an, ce qui équivaut à 52,8 % de l'énergie totale produite.

Production	kWh/yr	%
Generic flat plate PV	6,441,167	47.2
Grid Purchases	7,195,835	52.8
Total	13,637,002	100

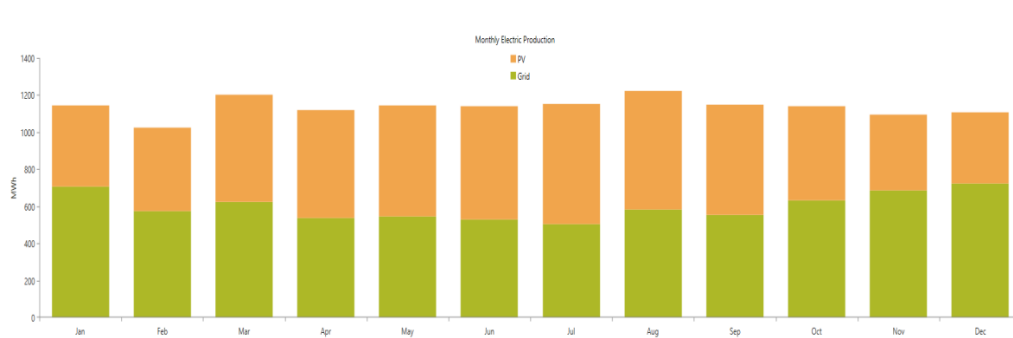


Figure 4.5 production d'énergie

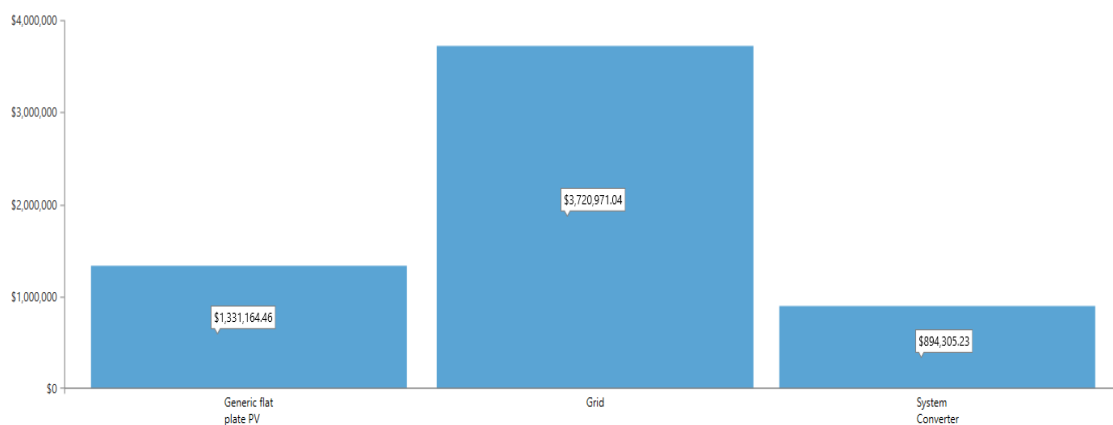


Figure 4.6 : Analyse détaillée d'un dimensionnement

4.8. Réduction des Émissions Polluantes :

Un autre aspect crucial à considérer est la réduction des émissions polluantes. Le système connecté au réseau a presque réduit de moitié les émissions de gaz nocifs. Plus précisément, les émissions de dioxyde de carbone ont été réduites de 7 872 186 kilogrammes par an à 4 547 768

kilogrammes par an. De surcroît, les émissions de dioxyde de soufre et d'oxyde de nitrogène ont diminué respectivement de 34 129 et 16 691 kilogrammes à 19 717 et 9 642 kilogrammes. Ces résultats sont particulièrement impressionnants, car le système n'a pas seulement permis de réduire le coût de l'électricité, mais il a également considérablement diminué les émissions polluantes, favorisant ainsi la protection de l'environnement. Ce double avantage - économique et écologique - souligne l'efficacité et la pertinence du système connecté au réseau dans une perspective de développement durable et de responsabilité environnementale.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	4,547,768	kg/yr
Carbon Monoxide	0	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	19,717	kg/yr
Nitrogen Oxides	9,642	kg/yr

PV Connecté au Réseau

Réseau Uniquement

4.9 Limites du Système Autonome :

Pour le système autonome, le seul avantage notable est l'absence totale d'émissions nocives. Cependant, cet avantage environnemental ne compense pas le coût extrêmement élevé de ce type de système. Les situations où le recours à un système autonome pourrait se justifier se limitent aux zones dépourvues de réseau électrique ou aux régions où le prix de l'électricité est particulièrement élevé. En Algérie, où les tarifs de l'électricité sont subventionnés, l'adoption d'un tel système ne serait pas rentable.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	0	kg/yr
Carbon Monoxide	0	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	0	kg/yr
Nitrogen Oxides	0	kg/yr

PV Autonome

4.10 Conclusion

En conclusion, l'analyse détaillée et la comparaison approfondie des deux systèmes de fourniture d'énergie révèlent que le système connecté au réseau est la solution optimale. Ce système réussit à combiner efficacité énergétique et rentabilité économique, tout en offrant des avantages environnementaux significatifs par la réduction des émissions polluantes. Malgré l'avantage environnemental du système autonome, son coût élevé le rend peu pratique pour la plupart des applications, surtout dans des régions où les tarifs de l'électricité sont subventionnés, comme en Algérie. Le système connecté au réseau, avec son coût compétitif et sa capacité à fournir une énergie fiable tout en réduisant les émissions, représente une solution durable et économiquement viable pour les besoins énergétiques actuels et futurs.

Résumé

Le document fournit un aperçu du soleil et de sa relation avec la Terre. Il traite du mouvement de la Terre autour du soleil, des différents systèmes de coordonnées utilisés pour décrire la position du soleil et des propriétés générales du soleil. Le document aborde également le concept du rayonnement solaire, y compris le rayonnement direct, diffus et global, ainsi que les utilisations potentielles de l'énergie solaire pour le chauffage, le refroidissement et la production d'électricité.

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire à l'aide de capteurs photovoltaïques ou de centrales solaires. Le générateur photovoltaïque se compose d'une cellule photovoltaïque, qui est le plus petit composant du système photovoltaïque. La cellule photovoltaïque est un composant électronique à base de semi-conducteurs qui génère un courant électrique sous l'action des photons lumineux. Cette transformation est basée sur trois mécanismes : l'absorption des photons par les matériaux constitutifs du dispositif, la conversion de l'énergie photonique en énergie électrique par la création de paires électron-trou dans les matériaux semi-conducteurs, et la collecte des particules générées dans le dispositif. Les cellules photovoltaïques peuvent être fabriquées à partir de différentes technologies, telles que le silicium amorphe, le silicium monocristallin et le silicium multi-cristallin, chacune avec ses propres avantages et inconvénients en termes d'efficacité, de coût et de performance dans différentes conditions d'éclairage.

Selon les conditions géographiques et météorologiques de l'Université Saad Dahleb Blida, également connue sous le nom d'Université de Blida 1, située dans le nord de l'Algérie à une altitude de 196 mètres au-dessus du niveau de la mer. Il se concentre ensuite sur l'intégration d'un système photovoltaïque au sein de l'incubateur d'entreprises de l'université, en discutant des avantages potentiels en termes de durabilité énergétique et d'efficacité économique. L'étude décrit les différents équipements et la consommation d'énergie de l'incubateur, puis se penche sur les étapes de dimensionnement du système photovoltaïque, y compris des considérations telles que l'irradiation solaire, l'orientation des panneaux et l'angle d'inclinaison.

Cette étude compare en détail deux systèmes de fourniture d'énergie à l'aide du logiciel Homer Pro : un système autonome basé sur des panneaux solaires et des batteries, et un système connecté au réseau électrique. L'analyse approfondie des performances, de la fiabilité et de l'efficacité économique de chaque système dans diverses conditions opérationnelles révèle que le système connecté au réseau est la solution optimale. Malgré un investissement initial plus

élevé, ce système s'avère plus rentable à long terme, avec un coût du kilowattheure plus faible que le système traditionnel dépendant uniquement du réseau. De plus, il permet une réduction significative des émissions polluantes, offrant ainsi des avantages économiques et environnementaux. Bien que le système autonome présente l'avantage d'être exempt d'émissions, son coût élevé le rend peu viable, surtout dans des régions où les tarifs de l'électricité sont subventionnés, comme en Algérie.

Summary:

The document provides an overview of the sun and its relationship with the Earth. It discusses the movement of the Earth around the sun, the different coordinate systems used to describe the position of the sun, and the general properties of the sun. The document also addresses the concept of solar radiation, including direct, diffuse, and global radiation, as well as the potential uses of solar energy for heating, cooling, and electricity production.

Photovoltaic solar energy is electrical energy produced from solar radiation using photovoltaic sensors or solar power plants. The photovoltaic generator consists of a photovoltaic cell, which is the smallest component of the photovoltaic system. The photovoltaic cell is an electronic component based on semiconductors that generates an electric current under the action of light photons. This transformation is based on three mechanisms: the absorption of photons by the materials constituting the device, the conversion of photonic energy into electrical energy through the creation of electron-hole pairs in the semiconductor materials, and the collection of the particles generated within the device. Photovoltaic cells can be manufactured using different technologies, such as amorphous silicon, monocrystalline silicon, and multicrystalline silicon, each with its own advantages and disadvantages in terms of efficiency, cost, and performance under different lighting conditions.

According to the geographical and meteorological conditions of Saad Dahleb Blida University, also known as Blida 1 University, located in the north of Algeria at an altitude of 196 meters above sea level. It then focuses on the integration of a photovoltaic system within the university's business incubator, discussing the potential benefits in terms of energy sustainability and economic efficiency. The study describes the various equipment and energy consumption of the incubator, then delves into the steps for sizing the photovoltaic system, including considerations such as solar irradiation, panel orientation, and tilt angle.

This study compares in detail two energy supply systems using the Homer Pro software: an off-grid system based on solar panels and batteries, and a grid-connected system. The in-depth analysis of the performance, reliability, and economic efficiency of each system under various operating conditions reveals that the grid-connected system is the optimal solution. Despite a higher initial investment, this system proves to be more cost-effective in the long run, with a lower cost per kilowatt-hour compared to the traditional system that relies solely on the grid. Moreover, it allows for a significant reduction in pollutant emissions, thus offering economic and environmental benefits. Although the autonomous system has the

advantage of being emission-free, its high cost makes it less viable, especially in regions where electricity rates are subsidized, such as in Algeria.

Although the autonomous system has the advantage of being emission-free, its high cost makes it less viable, especially in regions where electricity tariffs are subsidized, such as Algeria.

Bibliographie

- [1] Article scientifique Bacher ancien Directeur Technique de l'Équipement EDF et Tardieu Directeur Général Coyne et Bellier <http://www.futura-sciences.com/>
- [2] Article universitaire de Gilles Lemaire Directeur de recherche INRA [Agronomiehttp://jeunes.edf.com/](http://jeunes.edf.com/)
- [3] Etude géothermique du Sud de l'Algérie S. Ouali¹, A. Khellaf¹ et K. Baddari² ¹ Centre de Développement des Énergies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie ² Laboratoire de Physique de la Terre, Université de Boumerdès, 35000 Boumerdès, Algérie <http://fr.wikipedia.org/>
- [4] O. Gergaud, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 2002.
- [5] L. Leclercq, Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes, thèse de doctorat de l'université de Lille, Laboratoire L2EP, Décembre 2004.
- [6] Document scientifique de l'institut de formation en électricité et gaz école technique de Blida http://pedagogie.ac-limoges.fr/physique-chimie/IMG/pdf/eclipse_eleve.pdf
- [7] Mémoire de Projet de fin d'étude Préparé par Samira BOUJENANE
Tracker solaire https://renards.weebly.com/uploads/2/5/9/8/25986350/geographie10-latitudes_et_longitudes_sommaire.pdf
- [8]. Mémoire de master Présenté et soutenu par Trad Khadîdja thème : Mise en équations des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire https://fr.wikipedia.org/wiki/Position_du_Soleil
- [9] <http://dspace.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/11623/3/chapitre1.pdf>
- [10] La détermination de la constante solaire par Claude Pouill et Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), https://fr.wikipedia.org/wiki/Constante_solaire
- [11] Document scientifique de l'institut de formation en électricité et gaz école technique de Blida

<https://img1.wsimg.com/blobby/go/710760ab-5054-4fd2-86ee-e72953d604bd/downloads/88796540722.pdf>

[12] <https://www.pce-france.fr/fiches-mesureurs/dosimetre-macsolar.htm>

[13] <https://core.ac.uk/download/pdf/51340005.pdf>

[14] Mémoire Etude d'une centrale solaire thermique université Badji Mokhtar Annaba
<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/techniques/5124/5124-principe-solaire-thermodynamique.pdf>

[15] <http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/5022/4/chapitre1.pdf>

[16] <http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/5022/4/chapitre1.pdf>

[17] Mémoire fin d'étude thème énergie solaire photovoltaïque et système et système photovoltaïque autonome a Université Badji Mokhtar –Annaba

[18] http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/azzoui_boubaker/files/chapitre2_systeme_photovoltaique-partie1.pdf

[19] https://www.ummtto.dz/dSPACE/bitstream/handle/ummtto/8855/DjiliCelia_FarebKarima.pdf?sequence=1

[20] <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/aerovoltaique/panneau-solaire-hybride>

[21] <https://idelecplus.com/energie-solaire-les-avantages-et-les-inconvenients>

[22] https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolt%C3%A4que

[23] Mémoire de fin d'études UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU

F. Lasnier, T.G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook", IOP Publishing Ltd. 1980.

ISBN 0-85274-311-4

[24] <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>

[25] BOUZID Allah El Moubarak. <>, Mémoire d'ingénieur d'état, université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2008.

[26] <http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Accueil>

[27] R.Issad. « Etude de contrôle direct du couple de la machine asynchrone alimentée par un générateur photovoltaïque ». "Mémoire de Magister, Université de Bejaïa, 2007-2008

[28]F. Djaloud «Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque», Mémoire de Master, université d'Ouargla, promotion 2012.

[29] Mémoire : étude caractéristique d'un capteur solaire photovoltaïque et évaluation de ses performances sous d'efférentes conditions climatiques présentes par La caractéristique électrique d'une cellule PV

[30]Mémoire fin étude Conception et simulation d'un chargeur solaire pour batterie li-ion
Présenté par : Tairi Yacine, Namane Abderazak

[31] Michael Boxwel, Solar electricity handbook, A simple, practical guide to solar energy: how to design and install photovoltaic solar electric systems, 2012 edition, Green stream Publishing.

[32] Les phases de charge d'une batterie au plomb, <https://www.swiss-batteries.ch/fr/content/80-phase-de-chargedes-batteries#>, consulté le 17/07/2020.

[33]Régulateurs solaires MPPT, https://www.myshop-solaire.com/regulateur-solaire-mppt-_r_688_va_1.html, consulté le 17/07/2020.

[34] Anne Labouret et Michel Villoz, Energie Solaire Photovoltaïque, Edition DUNOD,