



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie industriel
Spécialité : Génie industriel

Thème

**ETUDE ET DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME
PHOTOVOLTAIQUE**

Présenté et soutenu publiquement par :

Mme **BOUCHIBAFATIMA ZOHRA MANEL**

Mme **HADIDALLAH MIMOUNA**

Encadré par :

AOUIMER YAMINA

JUIN 2023

R EMERCIEMENT

Nous remercions 'ALLAH' qui nous a donné le courage pour achever ce modeste travail, ainsi que nos parents et toutes nos familles qui nous ont apporté le soutien nécessaire et leurs réconforts durant toute la période de nos études.

Nous tenons tout d'abord à remercier AOUIMER YAMINA, pour son aide et ses précieux conseils au cours de réalisation de ce travail, ses idées et ses conseils, ainsi que son aide précieuse durant tous les jours de réalisation de cette thèse.

On remercie tout le personnel du groupement SPE RELIZANE rencontré lors des recherches effectuées et qui ont accepté de répondre à nos questions avec une grande compréhension et générosité.

Enfin, nos remerciements les plus sincères aux personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

DEDICACES 01

Je dédie le fruit de ce travail tout d'abord à mon père et mon supporteur « Abdelhak », grâce à lui je n'ai jamais rien manqué dans la vie, l'homme qui a veillé à mon éducation, j'espère que ce modeste travail soit l'exaucement de ses vœux.

A ma mère et ma meilleure amie « BENHAMOU Zohra » pour les sacrifices qu'elle avait consenti pour mon instruction et mon bien-être.

A les prunelles à mes yeux, mes sœurs « Meriem » et « Radjaa », Vous êtes mes complices, mes confidentes et mes alliées les plus fidèles.

A mon frère adoré « Aboubaker » et sa femme « Djihad » et mes petites nièces « Alâa » et « Iline » qui n'ont jamais cessé de me soutenir.

A tous les membres de mes deux familles « BOUCHIBA » et « BENHAMOU ».

A mon mari et mon partenaire de vie « BENMRAH Mohamed Sedik » pour sa bienveillance et son soutien moral.

A la meilleure copine de chambre « MOUAZ Rania » avec qui j'ai partagé des moments inoubliables pour ces conseils précieux et son amour.

A mon âme sœur "BELKACEM Sihem", qu'aucune dédicace ne saurait exprimer mes remerciements pour tout ce qu'elle a fait pour moi.

A ma chère amie que j'aime « OUSALEM Imene » pour sa sympathie.

A ma chère binôme « Hadidallah Mimouna » pour son entente et sa patience.

A mon ami « Benhariga Yassine » qui n'a pas cessé de m'encourager durant le parcours de mes études.

MANEL

DEDICACES 02

*A mes très chers parents
Pour tout ce que vous m'avez donné ,
Pour tout ce que vous avez fait pour moi.
A ma famille , A mes proches et amies.*

MIMOUNA

SOMMAIRE :

Remerciement

Liste des tableaux

Liste des figures

Résumé

Introduction Générale 1

Chapitre 01 :Les énergies renouvelables et non renouvelables

1.1 Introduction	5
1.2 Les énergies non renouvelables.....	5
1.2.1 Définition	5
1.2.2 Les différents types des énergies fossiles.....	6
1.2.3 Les avantages et les inconvénients de l'énergie fossile	6
1.3 Les énergies renouvelables.....	7
1.3.1 Définition	7
1.3.2 Les différents types des énergies renouvelables	7
1.3.2.1 L'énergie eolienne	7
1.3.2.2 Energie hydraulique	9
1.3.2.3 Energie géothermique.....	11
1.3.2.4 Energie biomasse	12
1.3.2.5 Energie solaire	15
1.4 L'importance des énergies renouvelables	17
1.5 Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie	17
1.6 Potentiel de l'énergie renouvelable en Algérie	18
1.6.1 Potentiel Solaire	18
1.6.2 Potentiel Eolien	18
1.6.3 Potentiel de l'Energie Géothermique	19
1.6.4 Potentiel de l'Energie hydraulique	20
1.6.5 Potentiel de l'Energie biomasse	20
1.7 Conclusion.....	21

Chapitre 02 : Généralités sur le système photovoltaïque.

2.1 Introduction	23
2.2 Effet photovoltaïque	23
2.3 Batteries.....	24
2.3.1 Batteries au plomb-acide	25
2.3.2 Batteries au gel	25
2.3.3 Batteries au lithium-ion	25
2.3.4 Batteries à flux	26
2.4 Onduleur.....	26
2.4.1 Onduleur centralisé	27
2.4.2 Onduleur de chaine.....	27
2.4.3 Micro-onduleur.....	27
2.4.4 Onduleur hybride.....	28
2.5 Régulateur	28
2.5.1 Régulateur MPPT	28
2.5.2 Régulateur PWM.....	29
2.6 Câblage.....	29
2.7 Cellule photovoltaïque	30
2.7.1 La cellule PV	30
2.7.2 La structure.....	30
2.7.3 Les types de cellules photovoltaïque.....	31
2.7.4 Association série et parallèle des cellules photovoltaïques.....	33
2.8 Les différents systèmes photovoltaïques.....	34
2.8.1 Systèmes autonomes	34
2.8.2 Système hybride	35
2.8.3 Les systèmes connectés au réseau	36
2.9 Maintenance	37
2.9.1 Les types de maintenance.....	37
2.10 Maintenance du système photovoltaïque	38
2.10.1 Modules	38
2.10.2 Batteries.....	39
2.10.3 Régulateurs.....	39
2.10.4 Onduleur.....	39
2.11 Conclusion.....	40

Chapitre 03 :Dimensionnement d'un Système Photovoltaïque Autonome

3.1 Introduction	42
3.2 Procédure de calcul	42
3.2.1 Consommation énergétique	42
3.2.2 Energie Solaire Récupérable	43
3.2.3 Données météorologiques	45
3.2.4 Dimensionnement du générateur photovoltaïque :.....	45
3.2.5 Nombre de panneaux photovoltaïques à utiliser	47
3.2.6 Dimensionnement du parc de batteries	47
3.2.7 Dimensionnement du régulateur de charge	48
3.2.8 Dimensionnement de l'onduleur	49
3.2.9 Le dimensionnement des câbles électriques solaires	49
3.3 Présentation de l'habitat a étudié	50
3.3.1 Consommation énergétique	51
3.3.2 Localisation du site.....	51
3.3.3 Données métrologiques	52
3.3.4 Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	52
3.3.5 Choix des batteries	56
3.3.6 Choix du régulateur de charge	59
3.3.7 Choix de l'onduleur.....	59
3.3.8 Choix des câbles.....	60
3.4 Le cout d'installation.....	62
3.5 Conclusion.....	63
Conclusion Générale	64
Bibliography	65

Liste des tableaux :

Tableau 1- 1 Avantages et inconvénients des énergies fossiles	7
Tableau 1- 2 Les ENR et leur production	7
Tableau 3. 1 Relation entre latitude et l'inclinaison	44
Tableau 3. 2 Tension du champ en fonction de sa puissance crête	46
Tableau 3. 3 Consommation énergétique de l'habitation	51
Tableau 3. 4 Différentes charges fonctionnant en courant continu	52
Tableau 3. 5 Différentes charges fonctionnant en courant alternatif	53
Tableau 3. 6 Tension des différentes installations	54
Tableau 3. 7 Types de régulateurs de charge dans les deux installations	59
Tableau 3. 8 Résultats du dimensionnement pour les deux systèmes	62
Tableau 3. 9 Le cout pour les deux installations	62

Liste des figures :

Figure 1.1 Schéma d'ensemble d'une éolienne	8
Figure 1.2 Fonctionnement de l'énergie hydraulique	10
Figure 1.3 Principe de fonctionnement de l'énergie géothermique	11
Figure 1.4 Fonctionnement de l'énergie biomasse	13
Figure 1.5 Schéma d'une installation photovoltaïque connecté au réseau	15
Figure 1.6 Carte de l'irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne(Période2011-2016)....	18
Figure 1.7 Carte du Vent Annuel Moyenne à 50m (Période 2011-2016).....	19
Figure 2.1 Effet photovoltaïque	24
Figure 2.2 Structure de la batterie	25
Figure 2.3 Onduleur	26
Figure 2.4 L'installation d'un onduleur de chaîne	27
Figure 2.5 Micro-Onduleur	28
Figure 2.6 Régulateur	29
Figure 2.7 Câble électrique	30
Figure 2.8 Cellule homojonction et hétérojonction	30
Figure 2.9 Cellule photovoltaïque amorphe	32
Figure 2.10 Cellule en silicium monocristallin	32
Figure 2.11 Cellule en Polycristallin	33
Figure 2.12 Association cellules PV en série et en parallèle	34
Figure 2.13 Principe du système PV autonome	35
Figure 2.14 Système hybride connecté au réseau	36
Figure 2.15 Système PV connecté au réseau	37
Figure 3.1 L'inclinaison photovoltaïque	44
Figure 3.2 Exemple d'installation du système photovoltaïque	50
Figure 3.3 Fiche technique du panneau solaire	55
Figure 3.4 Batterie plomb acide 12v /150Ah	57
Figure 3.5 Batterie lithium ion 48 v/200 Ah	58

Résumé :

Résumé

L'électricité photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen d'un système photovoltaïque.

Le but de ce travail est consacré à présenter le dimensionnement d'un système PV .On a faire une étude à la région d'Adrar Tittaf prenant une consommation journalière pour un maison 4.2 KW .

Abstract

Photovoltaic electricity is obtained by the direct transformation of sunlight into electricity, by means of a photovoltaic system.

The purpose of this work is devoted to present the dimensioning of a PV system. We did a study in the Adrar Tittaf region taking a daily consumption for a house of 4.2 KW.

ملخص

يتم الحصول على الكهرباء الكهروضوئية عن طريق التحويل المباشر لأشعة الشمس إلى كهرباء ، عن طريق النظام الكهروضوئي

الغرض من هذا العمل مكرس لتقديم أبعاد نظام الكهروضوئية. لقد قمنا بدراسة في منطقة أدرار .تيتاف مع استهلاك يومي للمنزل يبلغ 4.2 كيلو وات

Introduction générale :

Introduction Générale

L'énergie est une nécessité comme la nourriture et l'eau. Tout ce qui nous entoure nécessite de l'énergie. Au fil des ans, il y a eu une augmentation de la population terrestre qui est également directement proportionnelle à l'énergie utilisée. Tous les gadgets et équipements possibles ont besoin d'un ou l'autre type d'énergie pour fonctionner. Avec l'épuisement des réserves de combustibles fossiles, il devient nécessaire d'identifier des ressources d'énergie renouvelables viables qui peuvent réduire la dépendance aux combustibles fossiles.

Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie électrique à partir de sources ou des ressources théoriquement illimitées. Les énergies renouvelables sont également désignées par le terme « énergie vertes » ou « énergie propre ». Le faible impact environnemental de leur exploitation en fait un élément majeur des stratégies RSE des entreprises en matière de développement durable. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque est une possibilité de développement efficace assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme une puissance à l'échelle du temps humaine. C'est pour cela que les recherches scientifiques se développent dans le sens de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes solaires. L'optimisation des systèmes solaires est basée sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement. Depuis l'aube des temps, l'humanité a vécu au rythme de la lune et du soleil. Certaines civilisations les ont défiés. A la base du développement des premières sociétés humaines. Structurées, on trouve des techniques liées aux sources naturelles d'énergies dont le soleil est le moteur. Il est donc important de réfléchir à la conception des systèmes utilisant cette ressource qui est gratuitement disponible et en quantité inépuisable. L'auto-consommation est une solution bien utile. L'avantage principal de cette énergie renouvelable est que son utilisation ne pollue pas l'atmosphère et elle ne produit pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre.

L'énergie solaire est donc la forme d'énergie la plus abondante dont nous disposons. On estime que 10 000 TW d'énergie solaire sont incidentes sur la surface de la Terre en une journée (Bosshard, 2006). Selon un rapport, la consommation mondiale d'énergie en 2015 était de 17,4 TW au total (Seger, 2016). Il y a eu une augmentation minimale de la consommation d'énergie chaque année, environ 1 à 1,5 % de croissance annuelle. La

consommation mondiale totale d'énergie devrait augmenter de 56 % d'ici 2040 (U.S Energy Information Administration, 2013). En comparant la consommation actuelle, la croissance projetée dans deux décennies et la quantité de rayonnement solaire reçue en une heure, nous pouvons imaginer le potentiel de l'énergie solaire. L'énergie totale consommée n'est pas une petite fraction de ce que nous recevons en une heure.

Malgré ce potentiel énergétique dont nous disposons, l'utilisation actuelle de l'énergie solaire est inférieure à 5 % dans le monde. Certains pays prennent des initiatives pour passer de l'utilisation des combustibles fossiles aux applications solaires. Ces pays forment un groupe appelé les pays du G-20 qui ont pris le leadership mondial pour adopter des ressources énergétiques renouvelables. L'Allemagne est l'un des pays du G-20 qui a fait passer ses besoins énergétiques d'environ 38 % au solaire, et vise à arrêter complètement sa dépendance au nucléaire et à le remplacer par le solaire d'ici 2050 (Richardson, 2017). De même, la plupart des pays disposent d'un potentiel solaire abondant et peuvent s'inspirer de l'Allemagne.

Outre la récolte de la ressource et la diminution de la dépendance aux combustibles fossiles car ils sont limités, il faut comprendre les conséquences de l'utilisation des combustibles fossiles. La combustion de combustibles fossiles pour l'énergie a un effet néfaste sur l'environnement. Il libère du CO₂ dans l'atmosphère responsable de l'effet de serre. De plus, cela provoque également l'appauvrissement de la couche d'ozone. Ces phénomènes mentionnés peuvent provoquer plusieurs événements tels que; les pluies acides, la pollution de l'air, la pollution des sols due aux travaux d'excavation, etc.

Un panneau solaire de 4 KW utilisé dans les maisons pendant 25 ans peut compenser 199 697 livres de CO₂, équivaut à planter et équivaut à 208 166 (RGS- Rethink your roof, n.d.). Il est fascinant de voir à quel point une seule maison peut avoir un impact sur l'environnement en utilisant des panneaux solaires. On pourrait imaginer quel serait l'avantage d'utiliser cette technologie à plus grande échelle.

Notre étude traite l'énergie solaire photovoltaïque et l'installation d'un système solaire autonome.

La présente étude est structurée en trois chapitres :

Le premier consiste en un exposé des différentes sources d'énergie renouvelables et non renouvelables.

Le deuxième chapitre comprend des généralités sur les systèmes photovoltaïques.

Le troisième chapitre comprend notre étude de cas : Etude et Dimensionnement d'un Système Photovoltaïque Autonome (Off Grid), (SHS : Solar Home Systems)

Enfin, une conclusion qui récapitule les recommandations nécessaires pour un meilleur rendement énergétique d'un système photovoltaïque.

Chapitre 01 :

Les énergies renouvelables et non
renouvelables

1.1 Introduction

De nos jours, il est impossible de se passer des énergies, nous les utilisons dans notre quotidien et nous en sommes totalement dépendant : voitures, électroménagers, chauffage. Les ressources en énergie proviennent de la matière présente dans la nature (soleil, eau, air-vent, pétrole, uranium) ou de cette même matière transformée par les humains (essence, batterie) [1]. Toutes ces ressources peuvent être considérées comme des stocks d'énergie. Ces derniers sont divisés en deux types d'énergie : renouvelable et non renouvelable appelé fossile.

Les énergies renouvelables sont des énergies provenant de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation. La lumière du soleil et le vent, par exemple, constituent de telles sources qui se renouvellent constamment. Les sources d'énergie renouvelables sont abondantes et sont présentes partout autour de nous.

En revanche, les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) sont des ressources non renouvelables qui mettent des centaines de millions d'années à se constituer. Les combustibles fossiles, lorsqu'ils sont brûlés pour produire de l'énergie, provoquent des émissions de gaz à effet de serre nocifs, tels que le dioxyde de carbone.

Donc, les énergies renouvelables sont une source d'énergie, considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain, n'engendre pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles se distinguent des énergies fossiles, polluantes et dont les stocks diminuent. Enfin, les EnR sont plus résilientes, notamment en cas de crise.

Dans ce chapitre, nous explorerons les énergies renouvelables et les non renouvelables, ses différents types, leurs avantages et inconvénients, ainsi que les enjeux actuels et futurs liés à leur utilisation [2].

1.2 Les énergies non renouvelables

1.2.1 Définition

L'énergie produite par la combustion du charbon, du pétrole, du gaz naturel, etc. est appelée « énergie fossile ». Ces combustibles, riches en carbone et hydrogène, sont issus de la transformation de matières organiques enfouies dans le sol pendant des millions d'années. Ce

sont des énergies non renouvelables puisqu'une fois utilisées, elles ne peuvent être reconstituées qu'à l'échelle des temps géologiques [3].

1.2.2 Les différents types des énergies fossiles

1.2.2.1 Le pétrole

Cette énergie est massivement utilisée car elle très énergétique et facile à transporter. Le pétrole est partout dans nos vies : essence, gasoil, plastiques, jouets, tissus synthétiques, etc. Cependant, les ressources pétrolières sont limitées. On estime qu'il reste environ du pétrole pour satisfaire nos besoins pendant 50 ou 60 ans seulement. Sa combustion émet beaucoup de GES.

1.2.2.2 Le gaz

Cette énergie est moins facile à transporter et à utiliser que le pétrole. Le gaz a cependant un fort pouvoir énergétique qui le rend intéressant pour le chauffage et la production d'eau chaude. Sa combustion émet beaucoup de GES.

1.2.2.3 Le charbon

Cette énergie est également très énergétique et permet à certains pays de produire de l'électricité et de la chaleur. En France, nous n'avons plus de centrales à charbon pour produire de l'électricité. Sa combustion émet beaucoup de GES, c'est d'ailleurs l'énergie fossile la plus émettrice de CO2 [4].

1.2.3 Les avantages et les inconvénients de l'énergie fossile

Avantages	Inconvénients
Un combustible utilisé depuis des années, dont l'utilisation et la technologie sont bien maîtrisées	Des ressources non renouvelables et épuisables au fil du temps
Un très bon rendement énergétique, surtout en ce qui concerne le pétrole	Une extraction et une transformation entraînant l'émission d'une grande quantité de gaz à effet de serre, source principale du réchauffement climatique
Stockage et transport faciles et moins chères que les énergies renouvelables	Une source inégalement répartie dans le monde, ce qui crée de nombreux conflits

	économiques et sociaux
--	------------------------

Tableau 1-1 *Avantages et inconvénients des énergies fossiles*

1.3 Les énergies renouvelables

1.3.1 Définition

Les énergies renouvelables (ENR) sont alimentées par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées... Elles permettent de produire de l'électricité, de la chaleur, du froid, du gaz, du carburant, du combustible. Il existe 5 grandes familles d'énergies renouvelables :

Energie	Production
Énergie éolienne (terrestre et en mer)	Électricité
Biomasse	Chauffage (bois-énergie), chaleur et électricité (déchets)
Énergie hydraulique	Électricité
Géothermie	Chaleur
Énergie solaire (photovoltaïque, thermique et thermodynamique)	Électricité et chaleur

Tableau 1-2 *Les ENR et leur production*

1.3.2 Les différents types des énergies renouvelables

1.3.2.1 L'énergie éolienne

Le vent souffle à travers les hélices qui, lorsqu'elles tournent, permettent de produire de l'électricité [5].

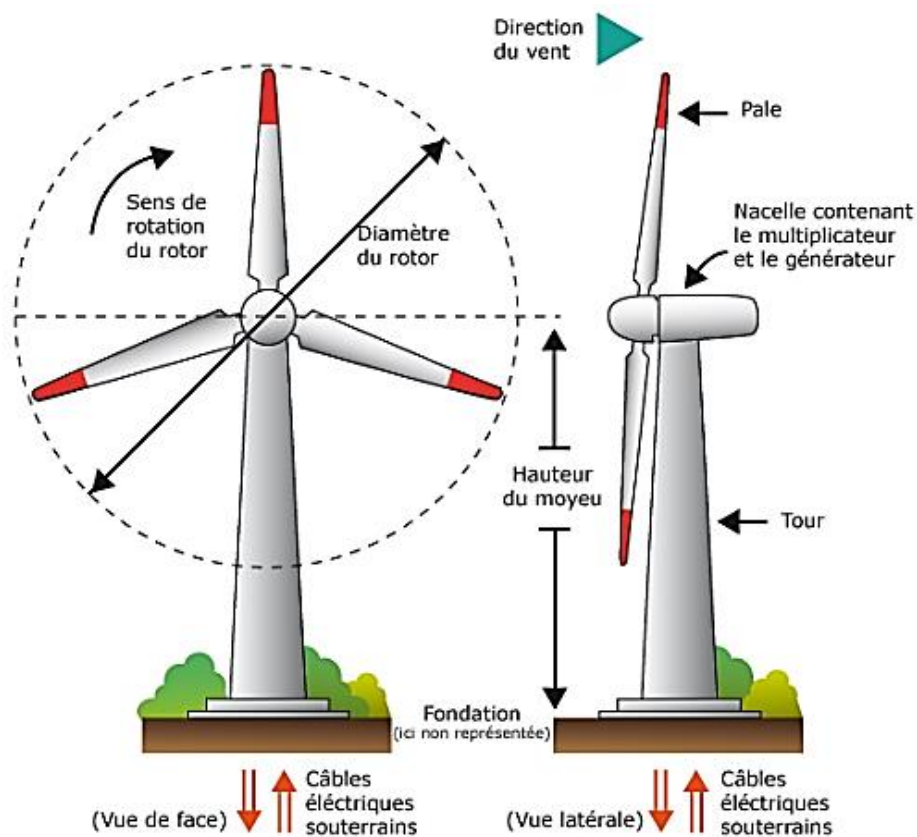


Figure 1-1 Schéma d'ensemble d'une éolienne

- **Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne**

Elle dépend de la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui est ensuite convertie en énergie électrique.

Les éoliennes sont équipées de grandes pales qui tournent sous l'effet du vent. La rotation des pales actionne un rotor, qui est connecté à une génératrice électrique. Lorsque le rotor tourne, il génère de l'électricité qui est envoyée à un transformateur pour être convertie en courant alternatif utilisable sur le réseau électrique.

Le fonctionnement de l'énergie éolienne dépend de plusieurs facteurs, notamment la vitesse et la direction du vent, la taille et la forme des pales de l'éolienne, ainsi que la hauteur et la position de l'éolienne par rapport au sol ou à la mer [6].

- **Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne**

La classification des avantages et inconvénients des énergies varie en fonction des situations géographiques, des besoins en énergie, des coûts d'installation et de maintenance, et d'autres facteurs.

➤ **Avantages**

- L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable et non épuisable.
- Elle ne produit pas de polluants atmosphériques, de déchets dangereux ou de produits chimiques toxiques.
- Les coûts d'exploitation de l'énergie éolienne sont relativement faibles par rapport aux autres sources d'énergie, car il n'y a pas de carburant à acheter et peu de maintenance est nécessaire.
- L'installation et l'entretien des éoliennes créent des emplois locaux dans les secteurs de la construction, de l'ingénierie et de la maintenance.

➤ **Inconvénients**

- L'énergie éolienne dépend de la force du vent, qui peut être imprévisible et variable en fonction des conditions météorologiques.
- Les éoliennes peuvent être considérées comme des yeux orbes et faire du bruit, ce qui peut causer des problèmes esthétiques et environnementaux pour les communautés locales.
- Les éoliennes nécessitent de grands espaces pour être installées, ce qui peut être un défi dans les zones urbaines densément peuplées.
- Les éoliennes peuvent avoir un impact négatif sur la faune, en particulier les oiseaux et les chauves-souris, qui peuvent être blessés ou tués par les pales en mouvement [7].

1.3.2.2 Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'énergie obtenue à partir de la force de l'eau en mouvement, que ce soit sous forme de chute d'eau, de courant ou de marée. Cette énergie peut être utilisée pour produire de l'électricité, pour pomper de l'eau ou pour actionner des machines industrielles [8].

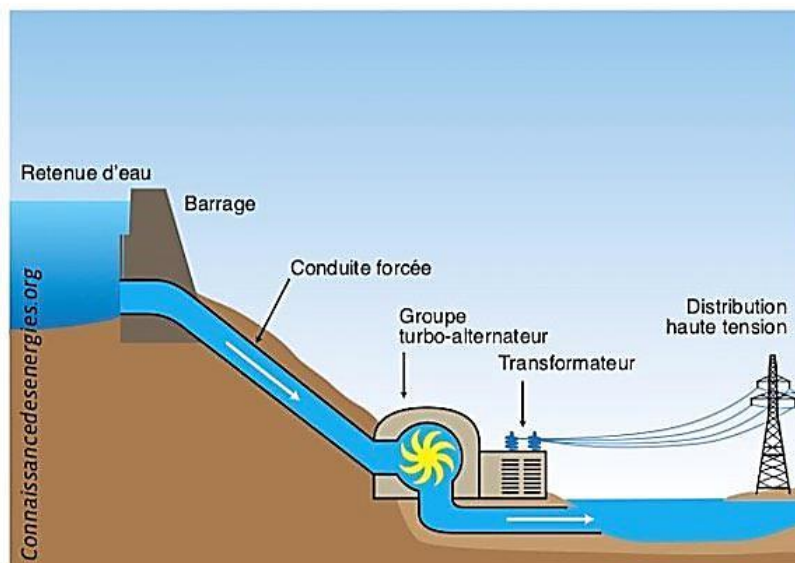


Figure 1-2 Fonctionnement de l'énergie hydraulique

- **Le principe de fonctionnement de l'énergie hydraulique**

Elle est basée sur la transformation de l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique, qui est ensuite transformée en énergie électrique.

Dans les centrales hydrauliques de barrage, l'eau est stockée dans un réservoir et canalisée vers une turbine, qui est connectée à un générateur électrique. L'eau est libérée en aval du barrage, créant une force motrice qui fait tourner la turbine.

Dans les centrales hydrauliques au fil de l'eau, l'eau est captée directement dans la rivière et canalisée vers une turbine. La vitesse de l'eau en mouvement est utilisée pour faire tourner la turbine et produire de l'électricité.

Le débit d'eau et la hauteur de chute de l'eau sont deux facteurs importants qui déterminent la production d'énergie électrique dans une centrale hydraulique [9].

- **Les avantages et les inconvénients de l'énergie hydraulique**

- **Avantages**

- Renouvelable et durable
- L'énergie hydraulique ne produit pas de gaz à effet de serre.

- L'énergie hydraulique peut être stockée sous forme d'eau dans les réservoirs. Cela permet de réguler la production d'énergie en fonction de la demande.
- L'eau coule continuellement dans les rivières et les barrages, ce qui signifie que l'énergie hydraulique peut être produite en continu.

➤ **Inconvénients**

- La construction de barrages et d'installations hydroélectriques peut être coûteuse.
- La construction de barrages et la création de réservoirs peut avoir un impact négatif sur l'environnement, en particulier sur les écosystèmes aquatiques et les populations de poissons.
- La production d'énergie hydraulique dépend des précipitations et de la quantité d'eau disponible dans les rivières. Les périodes de sécheresse peuvent réduire considérablement la production d'énergie.
- Les barrages peuvent présenter des risques pour la sécurité en cas de rupture ou de crue soudaine [10].

1.3.2.3 Energie géothermique

L'énergie géothermique est une source d'énergie renouvelable qui consiste à utiliser la chaleur naturelle de la terre pour produire de l'électricité et/ou de la chaleur. Cette chaleur peut être extraite à partir de réservoirs géothermiques naturels situés à faible profondeur ou par le biais de forages géothermiques plus profonds pour atteindre des températures plus élevées [11].

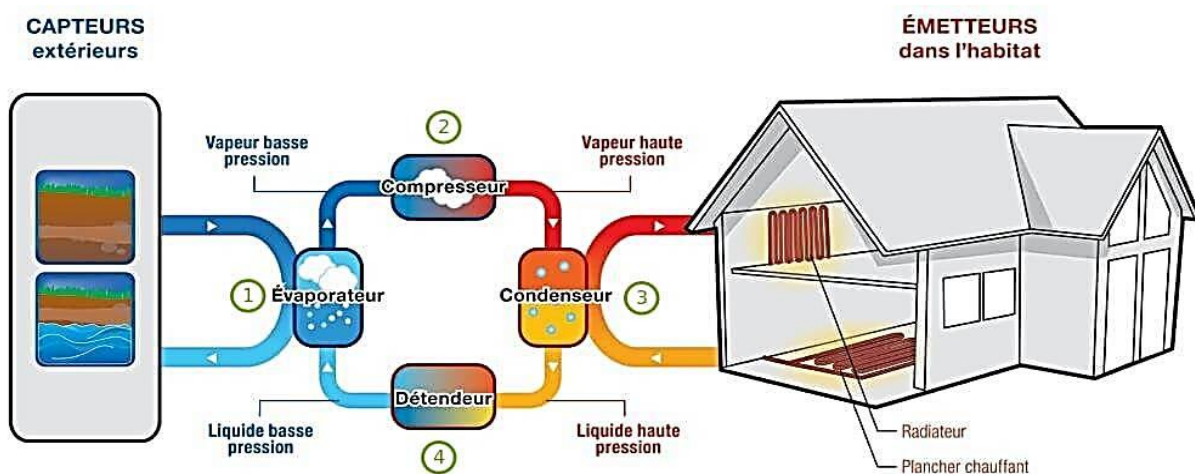


Figure 1-3 Principe de fonctionnement de l'énergie géothermique

- **Principe de fonctionnement de l'énergie géothermique**

Son fonctionnement repose sur la différence de température entre la surface de la terre et son noyau. Cette différence crée un gradient de température qui entraîne un transfert de chaleur vers la surface de la terre. Les réservoirs géothermiques se forment lorsque la chaleur est piégée dans des formations géologiques spécifiques, telles que des fissures dans les roches ou des réservoirs souterrains d'eau chaude ou de vapeur.

Une fois la chaleur extraite, elle est utilisée pour produire de l'électricité ou de la chaleur. Dans les centrales géothermiques, la chaleur est utilisée pour vaporiser un fluide caloporteur qui fait tourner des turbines pour produire de l'électricité [12] .

- **Les avantages et les inconvénients de l'énergie géothermique**

- **Avantages**

- C'est une source d'énergie renouvelable qui ne produit pas de gaz à effet de serre ni de pollution atmosphérique.
- Les centrales géothermiques peuvent produire de l'électricité en continu.
- Les coûts de production de l'énergie géothermique sont stables et prévisibles à long terme.
- Les installations géothermiques peuvent également servir à chauffer et à climatiser des bâtiments, ce qui peut réduire la consommation d'énergie.

- **Inconvénients**

- Les sites géothermiques exploitables sont limités géographiquement et ne se trouvent pas partout dans le monde.
- Les coûts initiaux de la construction d'une centrale géothermique peuvent être élevés.
- L'exploitation de l'énergie géothermique peut entraîner des risques sismiques mineurs et des émissions de gaz à effet de serre si le fluide géothermique n'est pas correctement traité.

1.3.2.4 Energie Biomasse

La biomasse est un terme utilisé pour désigner la matière organique d'origine végétale ou animale utilisée comme source d'énergie. Elle peut être transformée en combustibles solides,

liquides ou gazeux, tels que le bois, les pellets, le biocarburant et le biogaz, pour produire de l'énergie thermique, électrique ou mécanique.

Cette définition est largement acceptée et utilisée dans le domaine de l'énergie et de l'environnement. Elle est également soutenue par des organisations internationales telles que l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) [13].

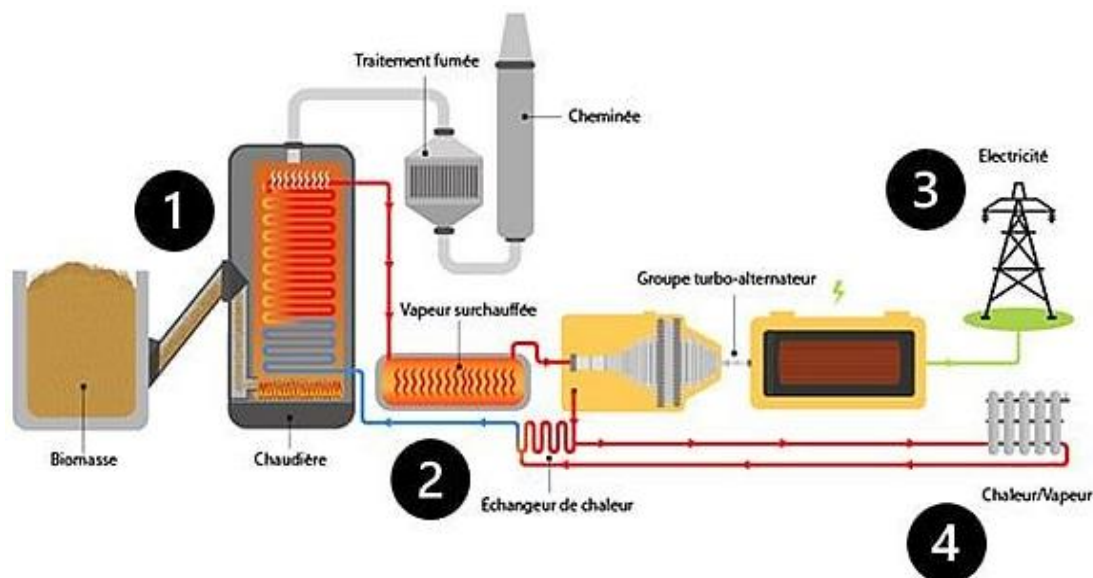


Figure 1-4 Fonctionnement de l'énergie biomasse

- **Les principes de fonctionnement de l'énergie biomasse**

Cette énergie consiste à transformer la matière organique en énergie utilisable. Cette transformation peut se faire de plusieurs façons :

- **Combustion directe**

La biomasse est brûlée pour produire de la chaleur qui peut être utilisée pour chauffer des bâtiments ou produire de la vapeur qui peut être utilisée pour produire de l'électricité. Cette méthode est couramment utilisée pour produire de l'énergie à partir de déchets agricoles et forestiers.

- **Gazéification**

La biomasse est chauffée en l'absence d'oxygène pour produire un gaz de synthèse qui peut être utilisé pour produire de l'électricité ou du gaz naturel de remplacement. Cette méthode est couramment utilisée pour les déchets solides urbains et les résidus forestiers.

➤ Fermentation

La biomasse est transformée en biocarburants, tels que l'éthanol et le biodiesel, par fermentation. Cette méthode est couramment utilisée pour les cultures énergétiques, telles que le maïs et la canne à sucre.

➤ Pyrolyse

La biomasse est chauffée en l'absence d'oxygène pour produire un bio-char, qui peut être utilisé comme engrais, et un gaz de pyrolyse qui peut être utilisé pour produire de l'électricité. Cette méthode est couramment utilisée pour les résidus forestiers et agricoles [14].

• Les avantages et les inconvénients de l'énergie biomasse

➤ Avantages

- La biomasse est une source d'énergie renouvelable, car elle provient de matières organiques qui peuvent être régénérées.
- Elle réduit la dépendance aux combustibles fossiles, qui sont limités et non renouvelables.
- La biomasse peut être utilisée pour produire de l'électricité, de la chaleur et des carburants, ce qui la rend polyvalente et utile dans différents secteurs.
- Elle peut réduire les émissions de gaz à effet de serre, car elle est considérée comme neutre en carbone.
- La biomasse est une source d'énergie locale, ce qui peut réduire la dépendance aux importations d'énergie et stimuler l'économie locale.

➤ Inconvénients

- La production de biomasse nécessite de grandes quantités de terre et d'eau, ce qui peut entraîner une concurrence avec d'autres utilisations de ces ressources, telles que la production alimentaire.

- Elle peut entraîner la déforestation, ce qui peut avoir des effets néfastes sur la biodiversité et les écosystèmes.
- Elle peut libérer des polluants atmosphériques tels que les oxydes d'azote et les particules fines, qui peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine.
- Elle peut ne pas être aussi efficace que les combustibles fossiles, ce qui peut entraîner une demande accrue de matières premières et donc une augmentation de la production de biomasse.
- La production de biomasse peut également entraîner des émissions de gaz à effet de serre, notamment de méthane, lors de la décomposition des déchets organiques.

1.3.2.5 Energie Solaire

L'énergie solaire est une énergie renouvelable provenant du soleil. Elle est convertie en électricité à l'aide de panneaux solaires ou utilisée directement pour chauffer l'eau ou l'air. Cette énergie est propre et durable, ce qui en fait une alternative intéressante aux sources d'énergie fossiles [15].

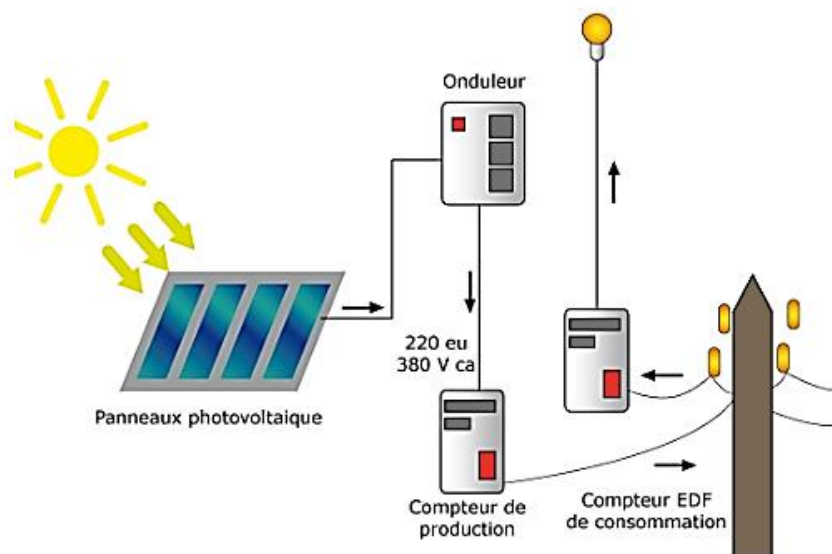


Figure 1-5 Schéma d'une installation photovoltaïque connectée au réseau

- **Les principes de fonctionnement de l'énergie solaire**

Le principe de fonctionnement de l'énergie solaire est basé sur la conversion de l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique ou thermique. Cette conversion est réalisée à l'aide de panneaux solaires, qui sont constitués de cellules photovoltaïques.

Lorsque la lumière du soleil frappe les cellules photovoltaïques, elle crée un courant électrique. Ce courant est ensuite collecté par les fils conducteurs des cellules et envoyé à un onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif utilisable dans les bâtiments ou pour alimenter le réseau électrique.

Pour l'utilisation directe de l'énergie solaire pour le chauffage, des capteurs solaires thermiques sont utilisés pour absorber la chaleur du soleil et la transférer à l'eau ou à l'air, qui est ensuite utilisé pour chauffer les bâtiments.

- **Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire**

- **Avantages**

- L'énergie solaire est renouvelable et durable, car elle ne dépend pas de ressources limitées et ne produit pas de gaz à effet de serre ou de pollution atmosphérique lors de sa production.
- Elle est disponible partout dans le monde, même dans les zones les plus reculées ou les plus ensoleillées.
- Les panneaux solaires ont une longue durée de vie et nécessitent peu d'entretien.
- Les coûts de l'énergie solaire ont considérablement baissé ces dernières années, ce qui la rend plus accessible à de nombreux ménages et entreprises.
- Elle peut être combinée avec d'autres technologies, telles que le stockage d'énergie ou l'éolien, pour maximiser la production d'énergie renouvelable.

- **Inconvénients**

- Les coûts initiaux d'installation de panneaux solaires peuvent être élevés.
- La production d'énergie solaire peut être variable en fonction des conditions météorologiques et de la saisonnalité, ce qui peut nécessiter des solutions de stockage d'énergie ou des sources d'énergie complémentaires.
- La production de panneaux solaires nécessite des matériaux rares et toxiques, ce qui peut avoir un impact environnemental et social négatif.
- Les panneaux solaires peuvent occuper une grande surface de terrain et avoir un impact visuel dans certains environnements.

1.4 L'importance des énergies renouvelables

- Les sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire et éolienne, sont disponibles partout dans le monde, contrairement aux combustibles fossiles, qui sont souvent localisés dans des régions spécifiques.
- L'utilisation de l'énergie renouvelable peut créer des emplois locaux dans les secteurs de la production, de la maintenance et de l'installation d'équipements tels que les panneaux solaires et les éoliennes.
- Les technologies liées aux énergies renouvelables, telles que le stockage de l'énergie, évoluent rapidement, ce qui signifie que leur coût diminue et leur efficacité augmente.
- Les catastrophes naturelles, telles que les ouragans et les inondations, peuvent perturber les sources d'énergie fossile, tandis que les installations d'énergie renouvelable sont souvent plus résilientes et peuvent continuer à fonctionner même en cas de conditions météorologiques extrêmes.
- L'utilisation de l'énergie renouvelable peut améliorer la santé publique en réduisant la pollution de l'air et de l'eau associée aux combustibles fossiles [16] .

1.5 Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie

L'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile à travers le lancement d'un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables qui a été adopté par le Gouvernement en février 2011, révisée en mai 2015 et placée au rang de priorité nationale en février 2016, par Monsieur le Président de la République Mr Abdelaziz BOUTEFLIKA, lors du Conseil Restreint Gouvernement.

L'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables dans sa version actualisée, consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent [17] .

1.6 Potentiel de l'énergie renouvelable en Algérie

1.6.1 Potentiel Solaire

Vue de sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m² soit près de 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/m au Grand Sud [18] .

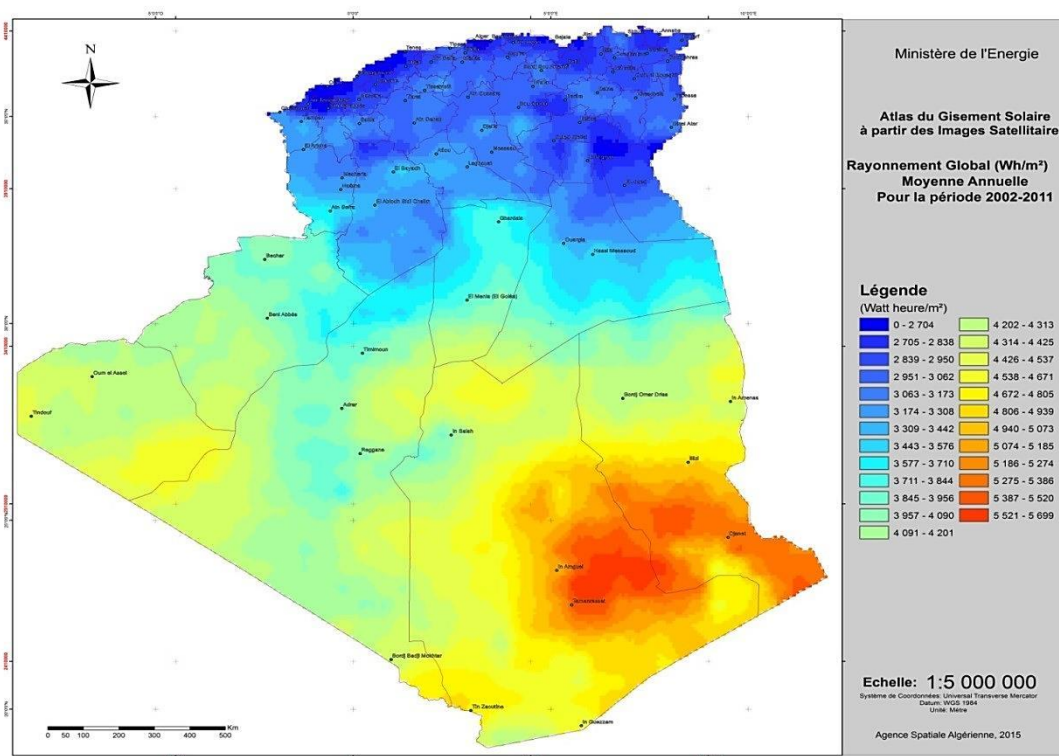


Figure 1-6 Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (Période 2011-2016)

1.6.2 Potentiel Eolien

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifié. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen qui est caractérisé, par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. La carte représentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées

que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset.

Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tébessa, Biskra, M'sila et El bayadh (6 à 7 m/s), et le Grand Sud (>8m/s) .

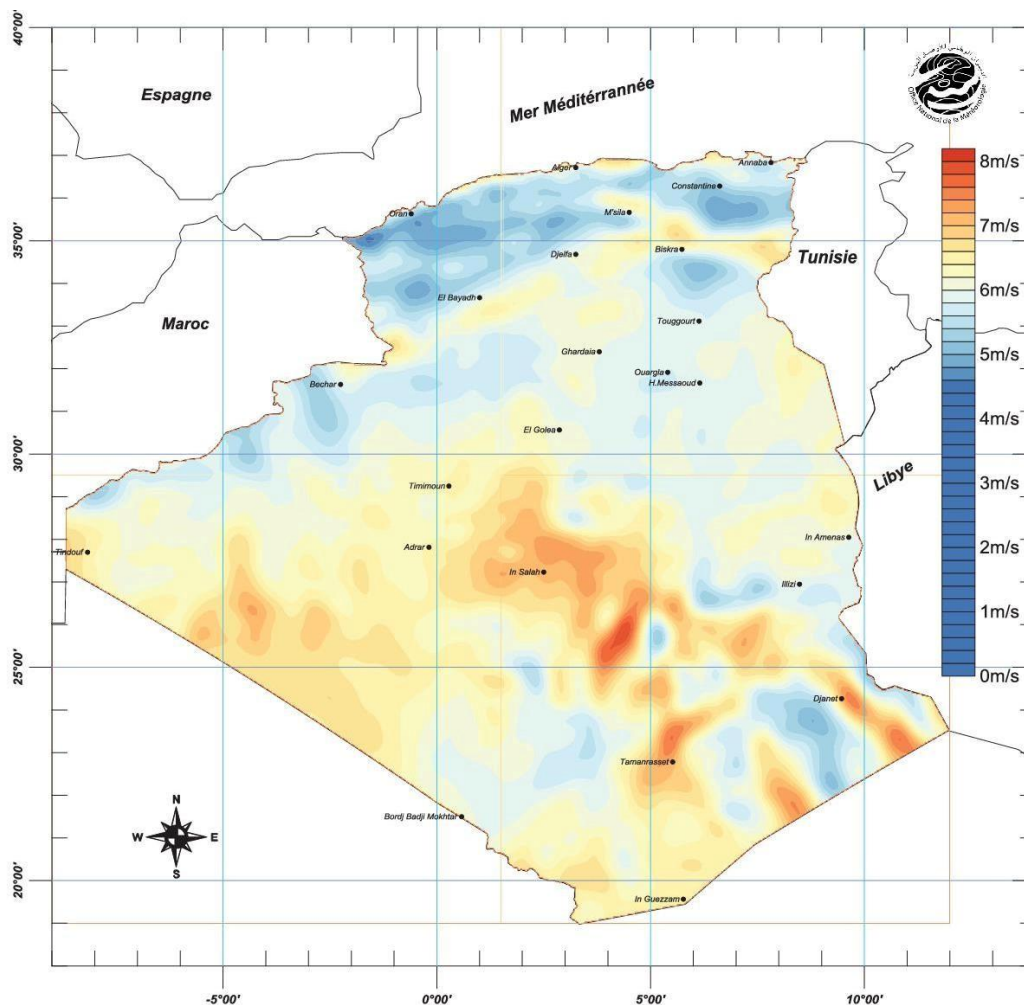


Figure 1-7 Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2011-2016)

1.6.3 Potentiel de l'Énergie Géothermique

L'Algérie possède un potentiel significatif en matière d'énergie géothermique, en particulier dans les régions du sud du pays. Selon une étude menée par le Ministère de l'Énergie et des Mines en 2016, le potentiel de l'énergie géothermique en Algérie est estimé à environ 350 mégawatts électriques.

Les régions du sud de l'Algérie, telles que la région de Tamanrasset, sont considérées comme ayant un potentiel élevé pour l'énergie géothermique en raison de leur situation géologique favorable. Le gouvernement algérien a d'ailleurs lancé plusieurs projets pour développer cette source d'énergie renouvelable dans la région, notamment avec le projet de centrale géothermique de Tamanrasset, d'une capacité de 10 MW.

En outre, le gouvernement algérien a également mis en place des programmes pour encourager l'utilisation de l'énergie géothermique pour les applications de chauffage et de climatisation. Selon le même rapport de 2016, il y a un potentiel de 1,2 million de tonnes équivalent pétrole (tep) pour les applications de chauffage et de climatisation en Algérie

1.6.4 Potentiel de l'Energie hydraulique

L'Algérie dispose d'un potentiel hydraulique important en raison de sa situation géographique et de son relief. Les montagnes de l'Atlas couvrent une grande partie du territoire algérien et fournissent de l'eau pour les rivières et les barrages. Le pays dispose également d'un important réseau de lacs naturels, notamment le lac de retenue de Beni Haroun.

Selon les données de l'Office National de l'Irrigation et du Drainage (ONID), le potentiel hydraulique total de l'Algérie est estimé à environ 80 milliards de mètres cubes par an, dont environ 17 milliards de mètres cubes par an peuvent être exploités pour produire de l'énergie hydroélectrique.

Actuellement, l'Algérie dispose de plusieurs grands barrages hydroélectriques, notamment le barrage de Beni Haroun, le barrage de Djorf Torba et le barrage de Koudiat Acerdoune. Ensemble, ces barrages ont une capacité de production d'électricité d'environ 1 000 mégawatts.

1.6.5 Potentiel de l'Energie biomasse

L'Algérie dispose également d'un potentiel intéressant en matière d'énergie biomasse. Les principales sources de biomasse en Algérie sont les résidus agricoles tels que les pailles, les tiges et les feuilles, ainsi que les déchets urbains et industriels.

Selon une étude menée en 2016 par le Ministère de l'Energie et des Mines, le potentiel de production d'énergie à partir de la biomasse en Algérie est estimé à environ 1,2 million de tonnes équivalent pétrole (tep) par an, dont environ 50% peuvent être exploités.

Actuellement, l'utilisation de la biomasse en Algérie est principalement limitée à la production de chaleur pour les applications industrielles et domestiques. Cependant, le gouvernement algérien a lancé plusieurs programmes pour encourager l'utilisation de la biomasse pour la production d'électricité, notamment en utilisant des technologies de gazéification et de combustion.

1.7 Conclusion

En conclusion, les énergies renouvelables sont une alternative durable, respectueuse de l'environnement, créatrice d'emplois, réductrice de la dépendance énergétique et de plus en plus abordable. Les technologies s'améliorent et les investissements augmentent, mais des défis subsistent, tels que l'adaptation des infrastructures et les coûts initiaux élevés. Malgré cela, l'avenir semble prometteur pour les énergies renouvelables et il est important de continuer à investir dans ce domaine pour garantir un avenir durable pour la planète et ses habitants.

Chapitre 02 :
Généralités sur le système photovoltaïque.

2.1 Introduction

Le système photovoltaïque est une technologie qui utilise l'énergie solaire pour produire de l'électricité de manière propre et renouvelable. Les systèmes photovoltaïques se composent généralement de panneaux solaires, d'un onduleur, d'un système de stockage de batterie et d'un système de régulation de charge.

Ce chapitre vise à présenter les composants essentiels d'un système photovoltaïque et à expliquer leur rôle dans le fonctionnement global du système. Ainsi que les différents types de system photovoltaïque et leur maintenance.

2.2 Effet photovoltaïque

La lumière du soleil se compose de photons contenant une énergie correspondant aux différentes longueurs d'onde du spectre solaire. Quand un photon heurte une cellule photovoltaïque, son énergie peut être transférée à un électron dans le matériau semi-conducteur de la cellule. Avec cette énergie supplémentaire, l'électron peut alors s'échapper de sa position normale dans l'atome créant un « trou », qui deviendra une partie d'un courant dans un circuit électrique. C'est ce qu'on appelle la paire électron-trou.

Une cellule photovoltaïque est une diode, formée de deux couches de matériaux de semi-conducteur dopées de sorte que l'une conduise les charges négatives et l'autre, les charges positives. Ce phénomène crée un champ électrique permanent dans la cellule.

Grâce à cet effet diode et lorsque la paire électron-trou a été créé, les charges négatives vont être séparées des charges positives. Il se crée donc une différence de potentiel entre les couches N et P de la cellule. Un courant circule si une résistance (ampoule par exemple) est placée entre ces contacts [19].

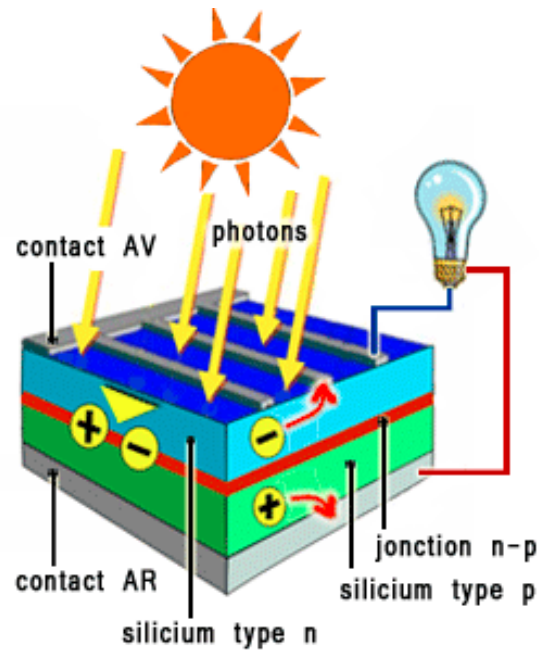


Figure 2-1 *Effet photovoltaïque*

2.3 Batteries

La batterie d'un système photovoltaïque est un dispositif utilisé pour stocker l'électricité produite par les panneaux solaires. Elle permet de stocker l'énergie excédentaire produite pendant les périodes de forte production solaire, pour une utilisation ultérieure lorsque la production est insuffisante, par exemple la nuit ou lors de pics de consommation.

La batterie joue un rôle crucial dans les systèmes photovoltaïques autonomes ou en réseau avec stockage, car elle permet d'assurer un approvisionnement continu en électricité, même en l'absence de soleil. Elle permet également de stabiliser la production et la consommation d'énergie, en évitant les fluctuations et en optimisant l'utilisation de l'énergie solaire.

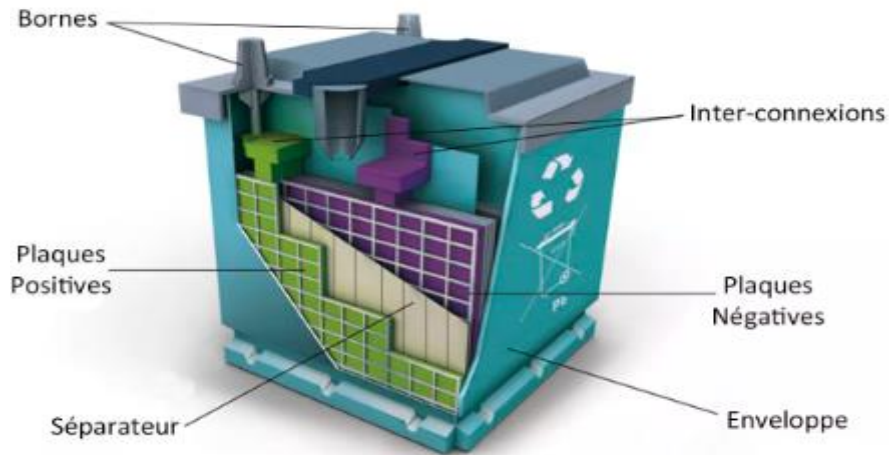


Figure 2-2 Structure de la batterie

Il existe plusieurs types de batteries utilisées dans les systèmes photovoltaïques, chacune ayant des caractéristiques spécifiques en termes de performances, de coûts et de durée de vie :

2.3.1 Batteries au plomb-acide

La batterie au plomb - acide est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus couramment utilisée, en raison de son coût relativement faible et de sa large disponibilité. Elles ont une durée de vie moyenne de 3 à 5 ans et sont disponibles en versions étanches ou non étanches [20].

2.3.2 Batteries au gel

On entend par batterie gel une batterie plomb à électrolyte gélifié. Inventé dans les années 1950 en Allemagne, ce type de batterie créé par Sonnenschein fait partie de celles qui ont une durée de vie optimale par rapport à tant d'autres batteries. Plus exactement, elle est 8 fois plus résistante qu'une batterie traditionnelle. Elle est d'ailleurs la plus utilisée pour stocker de l'énergie solaire [21].

2.3.3 Batteries au lithium-ion

Aujourd'hui, les batteries Lithium-Ion représentent la solution la plus mature pour le stockage à court terme et pour un usage domestique (véhicule électrique, maison individuelle). Le lithium est un métal très léger, le troisième dans la classification des éléments après l'hydrogène et l'hélium [22].

2.3.4 Batteries à flux

Également appelées batteries redox, ces batteries stockent l'énergie sous forme liquide dans des réservoirs séparés. Elles ont une durée de vie très longue, jusqu'à 25 ans, et peuvent être rechargées à plusieurs reprises sans perdre de capacité. Elles sont plus chères que les autres types de batteries [23].

2.4 Onduleur

Un onduleur d'un système photovoltaïque est un dispositif électronique qui convertit le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif utilisable pour les appareils électriques. Les onduleurs sont également utilisés pour optimiser la production d'énergie des panneaux solaires en maximisant la puissance de sortie [24].

Les principales caractéristiques des onduleurs sont :

- Puissance nominale.
- Puissance de point ou surcharge.
- Consommation.
- Tension d'entrée et de sortie.
- Rendement et la durée de vie.



Figure 2-3 Onduleur

Il existe plusieurs types d'onduleurs connectés à un système photovoltaïque, chacun ayant ses propres avantages et inconvénients en termes de performances et de coûts. Les principaux types sont les suivants :

2.4.1 Onduleur centralisé

C'est le type le plus couramment utilisé dans les installations photovoltaïques de grande taille. Il convertit le courant continu (DC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (AC) à haute tension qui est injecté dans le réseau électrique. Il est généralement situé à proximité du tableau de distribution électrique principal de la maison ou de l'entreprise [25].

2.4.2 Onduleur de chaîne

Il est utilisé pour les installations photovoltaïques de petite et moyenne taille. Il convertit également le courant continu (DC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (AC) à basse tension. Il est situé près des panneaux solaires et peut gérer plusieurs chaînes de panneaux solaires [26].

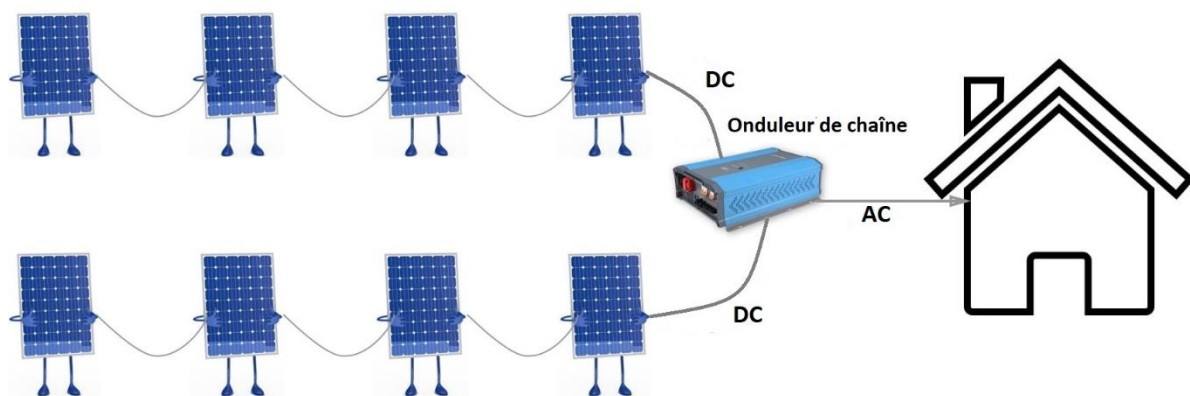


Figure 2-4 L'installation d'un onduleur de chaîne

2.4.3 Micro-onduleur

Il est utilisé pour les installations photovoltaïques résidentielles et de petite taille. Chaque panneau solaire est équipé d'un micro-onduleur qui convertit le courant continu (DC) en courant alternatif (AC) à basse tension. Les micro-onduleurs sont connectés en parallèle et produisent une sortie de courant alternatif (AC) directement exploitable [27].

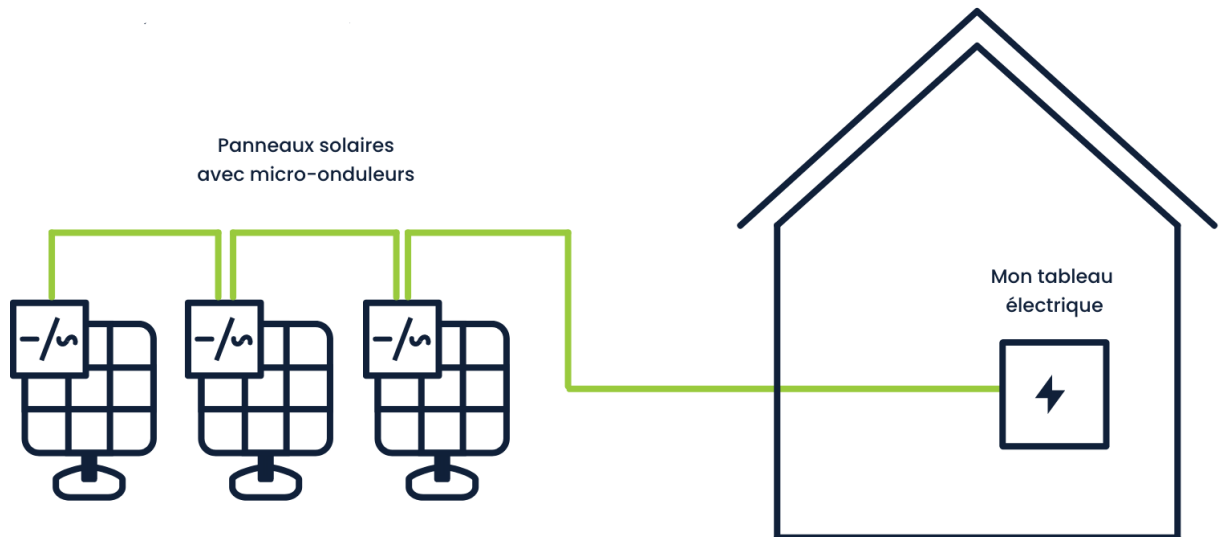


Figure 2-5 Micro-Onduleur

2.4.4 Onduleur hybride

Il permet de charger les batteries solaires en utilisant l'énergie produite par les panneaux solaires et peut également fonctionner comme un onduleur de secours en cas de panne de courant. Il est utilisé pour les systèmes photovoltaïques avec stockage de batterie [28].

2.5 Régulateur

Un régulateur d'un système photovoltaïque est un composant électronique qui régule et protéger la charge de la batterie en évitant la surcharge et la décharge excessive. Les régulateurs de charge sont nécessaires pour préserver la durée de vie des batteries et pour optimiser la production d'énergie solaire en éliminant les pertes d'énergie.

Il existe différents types de régulateurs de charge, notamment les régulateurs de charge à tension constante, les régulateurs de charge à courant constant et les régulateurs de charge à impulsion [29].

2.5.1 Régulateur MPPT

Le régulateur MPPT est conçu pour maximiser la production d'énergie solaire en traquant le point de puissance maximale (MPPT) du panneau solaire. Les panneaux solaires ont un point de puissance maximale qui varie en fonction de la température, de l'ensoleillement et d'autres facteurs. Le régulateur MPPT utilise des techniques de suivi pour trouver ce point et ajuster la tension et le courant de sortie du panneau solaire afin d'optimiser la production d'énergie.

Le régulateur MPPT est capable de fonctionner avec des tensions d'entrée plus élevées que la tension de batterie, ce qui permet d'utiliser des panneaux solaires configurés en série pour augmenter la tension, réduisant ainsi les pertes dans le câblage. Il convertit ensuite cette tension plus élevée en une tension appropriée pour charger la batterie. En ajustant constamment le point de puissance maximale, le régulateur MPPT optimise l'efficacité de la charge solaire, ce qui peut entraîner une augmentation significative de la production d'énergie par rapport à d'autres méthodes de régulation .

2.5.2 Régulateur PWM

Le régulateur PWM est un type plus simple de régulateur utilisé dans les systèmes solaires. Il fonctionne en contrôlant la largeur des impulsions du courant électrique envoyé au panneau solaire. Le régulateur PWM commute rapidement entre un état de charge et un état d'arrêt pour maintenir la tension de la batterie à un niveau approprié. Lorsque la batterie est presque pleine, le régulateur PWM réduit la largeur des impulsions pour limiter la quantité d'énergie envoyée à la batterie, évitant ainsi une surcharge.



Figure 2-6 Régulateur

2.6 Câblage

Le câblage est un élément essentiel pour le bon fonctionnement des systèmes électriques et électroniques. Le câblage peut avoir différentes fonctions selon le système électrique ou électronique concerné. Dans le cas d'un système photovoltaïque, le câblage est utilisé pour connecter les panneaux solaires entre eux, les batteries, le régulateur de charge et l'onduleur. Le câblage permet ainsi de convertir l'énergie solaire en énergie utilisable pour alimenter les appareils électriques [30].



Figure 2-7 Câble électrique

2.7 Cellule photovoltaïque

2.7.1 La cellule PV

Chaque photon (particule de lumière) pénétrant le matériau perd son énergie en créant des paires électrons-trous. Chaque paire induit une charge négative (les électrons) et une charge positive (les trous). Ainsi séparés, les électrons peuvent être collectés pour créer un courant, comme dans une pile. L'effet photovoltaïque est mis en œuvre dans des cellules dont l'assemblage forme les modules photovoltaïques .

2.7.2 La structure

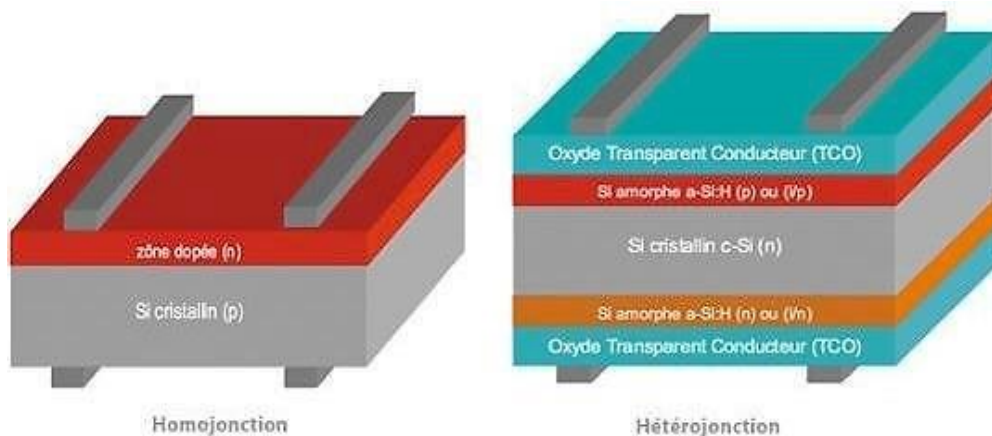


Figure 2-8 Cellule homojonction et hétérojonction

2.7.2.1 Cellule photovoltaïque à homojonction :

La cellule photovoltaïque à homojonction est constituée de deux couches de silicium cristallin. Dans chacune des deux couches, on a ajouté quelques atomes différents du silicium : ainsi, la première zone (n) est dopée en phosphore, plus riche en électrons que le silicium. La seconde zone (p) est dopée en bore, un élément moins riche en électrons que le silicium. Les

deux couches sont assemblées et la différence de densité électronique génère un champ électrique entre les deux : cet ensemble forme la jonction [31] .

2.7.2.2 Cellule photovoltaïque à hétérojonction :

La cellule photovoltaïque à hétérojonction est constituée de deux semi-conducteurs différents : le silicium cristallin et le silicium amorphe. La plus répandue est constituée de silicium cristallin de type n, pris en sandwich entre deux fines couches de silicium amorphe de quelques nanomètres. D'un côté, il y a la couche n⁺ (dopée en atomes riches en électrons), et de l'autre, une couche de type p. Les deux couches de silicium amorphe dopé créent un fort champ électrique qui favorise l'attraction des électrons vers les zones de collecte de l'énergie [32] .

2.7.3 Les types de cellules photovoltaïque

2.7.3.1 Cellule silicium amorphe en couche mince

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires" [33].

➤ Les avantages

- Fonctionnent avec un éclairage faible.
- Bon marché par rapport aux autres types de cellules.
- Moins sensible aux températures élevées.

➤ Les inconvénients

- Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m²), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses.
- Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps.



Figure 2-9 Cellule photovoltaïque amorphe

2.7.3.2 Cellule en silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme [34].

➤ Avantages

- Meilleur rendement que le polycristallin (environ 150 Wc/m²)
- Durée de vie importante (+/- 30 ans)

➤ Inconvénients

- Plus cher que le polycristallin
- Rendement faible sous un faible éclairement

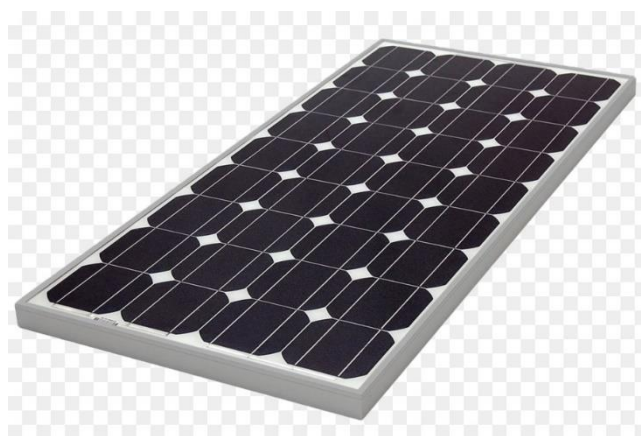


Figure 2-10 Cellule en silicium monocristallin

2.7.3.2 Cellule en silicium polycristallin

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [35].

➤ Avantages

- Bon rendement (environ $100 \text{ W}_c/\text{m}^2$)
- Durée de vie importante (+/- 30 ans)
- Moins cher que le monocristallin

➤ Inconvénients

- Rendement faible sous un faible éclaircissement

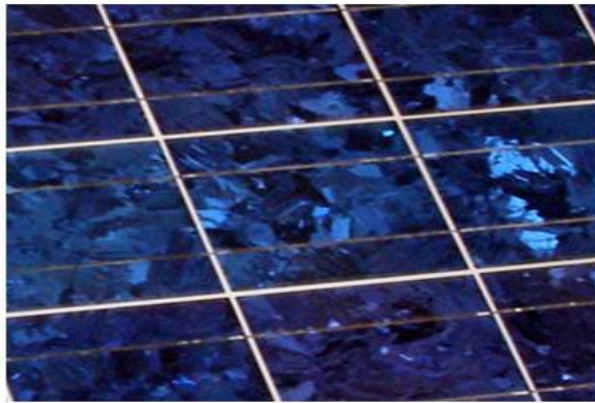


Figure 2-11 Cellule en Polycristallin

2.7.4 Association série et parallèle des cellules photovoltaïques

Dans un système photovoltaïque, les cellules solaires sont souvent connectées en série et/ou en parallèle pour former des modules solaires avec une tension et un courant de sortie spécifiques.

La connexion en série de plusieurs cellules permet d'augmenter la tension de sortie du module.

La connexion en parallèle de plusieurs cellules permet d'augmenter le courant de sortie du module.

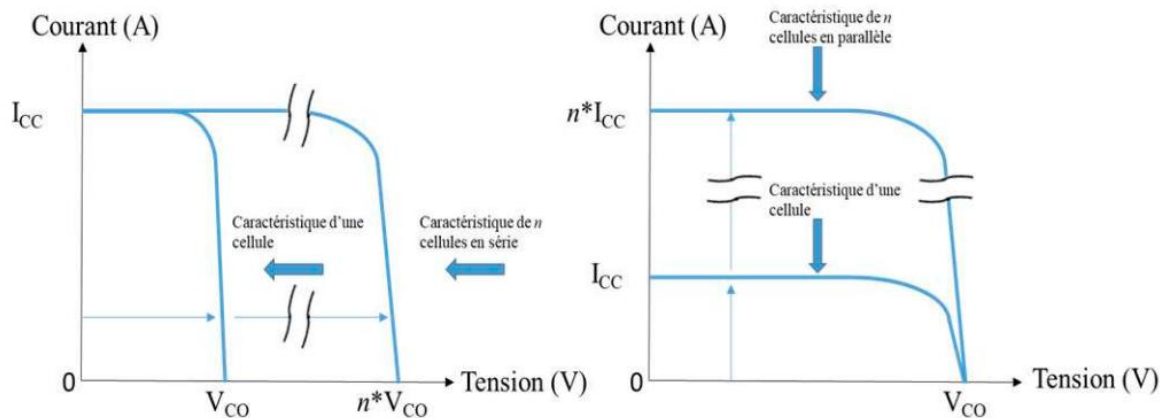


Figure 2-12 Association cellules PV en série et en parallèle

La Figure 3.12 présente les courbes de polarisation pour différentes associations de cellules photovoltaïques. La loi Kirchhoff est respectée pour les courbes de polarisation : lorsqu'on associe des cellules en série la tension s'ajoute et le même courant les traverse ; lorsqu'on les associe en parallèle, le courant résultant correspond à l'addition des courants générés par chaque cellule. On associe ainsi les cellules en série pour augmenter la tension, et en parallèle pour augmenter le courant, mais il est également commun de faire des combinaisons en série et parallèle pour augmenter la puissance maximale PMPP. On peut ainsi extrapoler ce raisonnement à l'association de modules de panneaux solaires, eux-mêmes constitués de plusieurs cellules avec une association définie par le constructeur [36].

2.8 Les différents systèmes photovoltaïques

Il existe différents types de générateurs variant selon le service souhaité et les applications recherchées.

2.8.1 Systèmes autonomes

Les systèmes photovoltaïques autonomes, également appelés "systèmes hors réseau" ou "systèmes isolés", sont des systèmes qui ne sont pas connectés au réseau électrique et fonctionnent de manière autonome. Ils sont souvent utilisés dans des endroits isolés où il n'y a pas d'accès à l'électricité, comme les zones rurales, les chalets de montagne, les bateaux.

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont utilisés pour alimenter en électricité les maisons et les compagnies isolées ; elles sont aussi utiles dans plusieurs applications des

domaines de la santé, de l'agriculture, des télécommunications et des services publics. Ces systèmes sont généralement composés de panneaux solaires photovoltaïques, d'un régulateur de charge, d'un système de stockage d'énergie (batteries) et d'un onduleur [37].

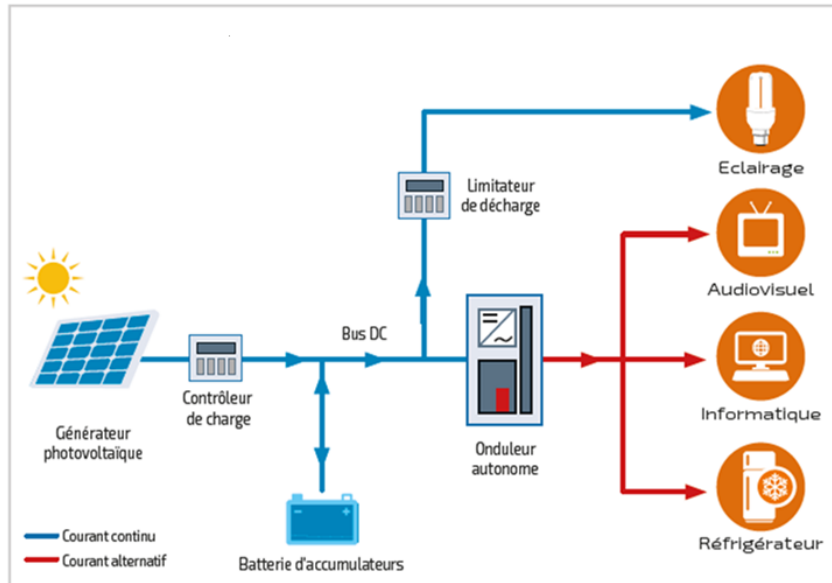


Figure 2-13 Principe du système PV autonome

2.8.2 Système hybride

Le terme « < Système d'Énergie Hybride > » fait référence aux systèmes de génération d'énergie électrique multi-sources. Il s'agit de systèmes complexes associant différentes sources renouvelables ou bien combinées avec des sources conventionnelles (générateur diesel...), différents éléments de stockage et différentes charges. Ils permettent la compensation du caractère intermittent des sources renouvelables et offrent un rendement énergétique global plus élevé.

Les systèmes hybrides de production d'énergie dans leur vue la plus générale, sont ceux qui combinent et exploitent plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Les systèmes qui nous intéressent regroupent deux parties pour la production de l'énergie.

Les systèmes d'énergie hybrides peuvent être connectés aux réseaux électriques. La production énergétique hybride est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. La connexion des sources hybrides aux réseaux électriques doit respecter certaines normes qui ne sont pas forcément spécifiques au domaine d'énergies renouvelables [38].

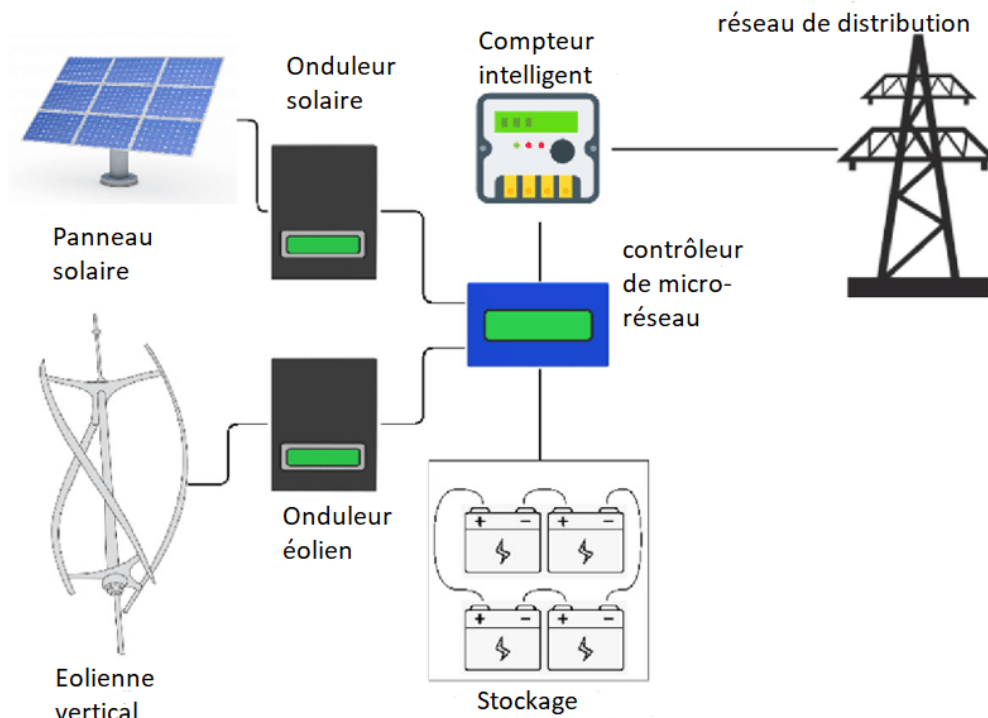


Figure 2-14 *Système hybride connecté au réseau*

Ces systèmes permettent de stocker l'énergie solaire dans des batteries afin de l'utiliser en cas de panne du réseau électrique ou pour être déconnecté du réseau. Les systèmes hybrides fournissent de l'énergie pour compenser la puissance du réseau chaque fois que le soleil brille, et envoient même l'excédent d'énergie au réseau pour obtenir un crédit qui pourra être utilisé ultérieurement.

2.8.3 Les systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution.

Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau [39].

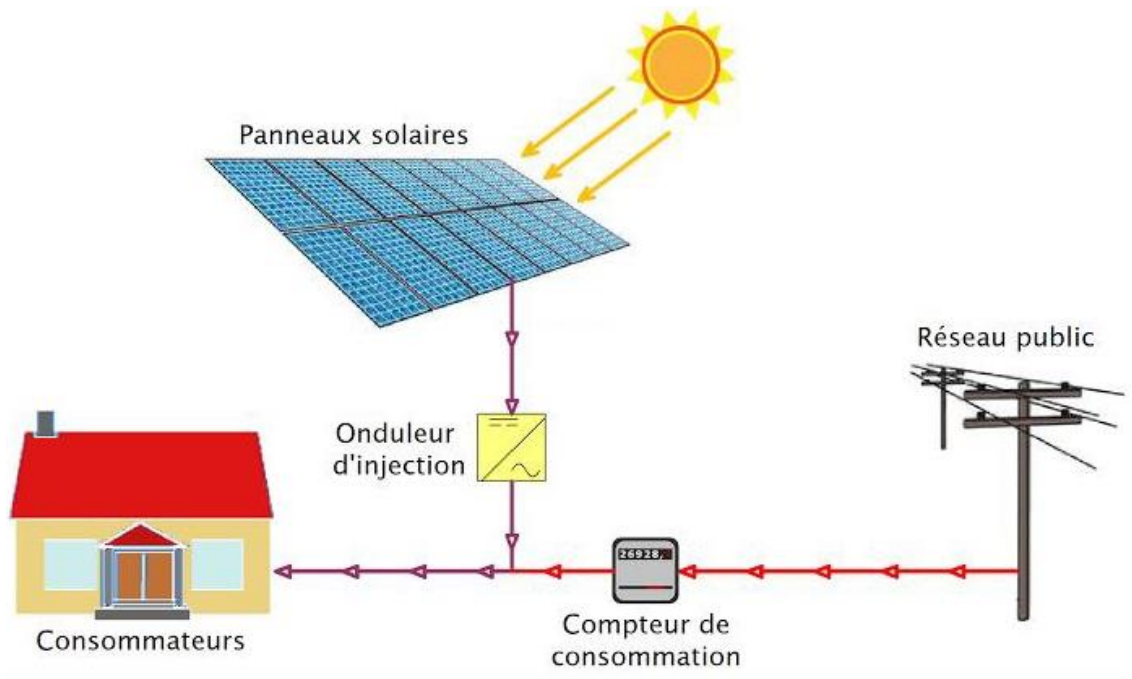


Figure 2-15 Système PV connecté au réseau

2.9 Maintenance

Définition de la maintenance selon l'AFNOR par la norme NF X 60-010 : ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ces opérations au coût optimal.

2.9.1 Les types de maintenance

2.9.1.1 Maintenance corrective

Il s'agit de la maintenance effectuée pour réparer ou corriger les défaillances ou les pannes d'un équipement. Elle vise à rétablir le fonctionnement normal de l'équipement après une défaillance. La maintenance corrective peut être planifiée ou non planifiée, en fonction de la gravité de la défaillance et de l'impact sur l'activité [40].

2.9.1.2 Maintenance préventive

La maintenance préventive consiste à effectuer des actions planifiées et régulières sur les équipements afin de prévenir les défaillances et d'assurer leur bon fonctionnement. Elle est basée sur des intervalles de temps prédéterminés, des cycles d'utilisation ou des seuils de

performance. L'objectif est de détecter et de résoudre les problèmes potentiels avant qu'ils ne conduisent à des défaillances [41].

2.9.1.3 Maintenance prédictive

La maintenance prédictive utilise des techniques de surveillance et de diagnostic pour évaluer l'état d'un équipement en temps réel. Elle se base sur des indicateurs, tels que les mesures de vibrations, de température ou de bruit, pour prédire les défaillances potentielles et planifier les interventions de maintenance de manière proactive. Cela permet de maximiser la disponibilité de l'équipement tout en minimisant les coûts de maintenance [42].

2.9.1.4 Maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle, également appelée maintenance basée sur l'état, est réalisée en fonction de l'état réel de l'équipement. Elle consiste à surveiller les paramètres de fonctionnement de l'équipement, tels que les niveaux de vibration, les températures, les pressions, etc., pour déterminer le moment optimal pour effectuer la maintenance. Cela permet de minimiser les temps d'arrêt et les coûts de maintenance, tout en maximisant la durée de vie utile des équipements [43].

2.10 Maintenance du système photovoltaïque

Les composants photovoltaïques nécessiteront des opérations de maintenance et surtout des contrôles pour s'assurer du bon fonctionnement du système.

2.10.1 Modules

L'entretien des modules se fera chaque fois pour s'assurer que rien ne gêne l'arrivée du rayonnement et que l'énergie produite est transmise au régulateur. On fera donc :

- ✓ Le nettoyage de la face avant des modules à l'eau claire tous les 3 à 6 mois environ pour enlever les salissures, le sable, les éventuels nids ou autres insectes parasites
- ✓ L'élagage de la végétation tout autour si elle a poussé.
- ✓ Une vérification des supports : surveillance des corrosions éventuelles, serrage des fixations mécaniques.
- ✓ La vérification de l'aspect des modules : pas des cellules brunes, pas d'infiltrations éventuelles, ni de dégradation volontaire.

✓ La vérification des connexions : grattage des corrosions éventuelles, serrage des borniers [44].

2.10.2 Batteries

Les opérations de maintenance et les contrôles sur les batteries doivent être effectués avec de l'outillage isolé et en observant les règles de sécurité pour éviter tout court-circuit :

On fera donc des opérations de maintenance et les contrôles suivants :

✓ La mesure de la tension de chaque élément et report des valeurs dans un tableau.

✓ Le contrôle de l'aspect : bac normale, non déformé, bornes propres (sinon les nettoyer).

✓ L'entretien des connexions et nettoyage des contacts.

✓ Le contrôle visuel des niveaux d'électrolyte : ajouter de l'eau distillée si nécessaire (il y a deux indicateurs de niveau MAX et MIN)

✓ La mesure de la densité de l'électrolyte de chaque élément de 2 V: reporter les valeurs dans le même tableau que celui des tensions et comparer les mesures entre elles ; si une ou plusieurs mesure(s) (est) sont différente(s), refaire ces mesures après une charge d'égalisation et encore une nouvelle fois après quelques jours dans un état de charge intermédiaire. Si les densités restent très différentes, il faudra songer au remplacement des batteries si la capacité n'est plus suffisante.

2.10.3 Régulateurs

Les éléments à contrôler sont la fixation du régulateur, le serrage des borniers et la tenue des câbles. Les paramètres de fonctionnement ne devant pas changer dans le temps, sauf après une surcharge occasionnée par exemple par un impact de foudre proche du système ; dans un tel cas, on surveillera que le fonctionnement de fin de charge est correct et que la charge s'arrête.

2.10.4 Onduleur

Faire les contrôles sur l'onduleur, c'est s'assurer que : les récepteurs tolèrent la distorsion de l'onduleur et acceptent les variations de la tension de sortie, l'onduleur protège contre la surcharge et coupe l'utilisateur en cas de basse tension pour la protection de la batterie [45].

2.11 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons examiné les composants clés d'un système photovoltaïque, tels que les panneaux solaires, les onduleurs, les batteries et les régulateurs de charge, en comprenant leur fonctionnement et leur rôle dans la conversion et la distribution de l'énergie solaire.

De plus, nous avons abordé les différents types de systèmes photovoltaïques, y compris les systèmes raccordés au réseau, les systèmes autonomes et les systèmes hybrides. Chacun de ces systèmes présente des caractéristiques uniques et convient à des applications spécifiques en fonction des besoins énergétiques et des conditions environnementales.

Chapitre 03 :
Dimensionnement d'un Système
Photovoltaïque Autonome

3.1 Introduction

Le recours à l'énergie solaire photovoltaïque est de plus en plus courant pour répondre aux besoins énergétiques, que ce soit à grande échelle dans les centrales solaires ou à petite échelle dans les systèmes photovoltaïques autonomes. Les systèmes photovoltaïques autonomes sont des installations indépendantes du réseau électrique qui utilisent l'énergie solaire pour produire de l'électricité et la stocker dans des batteries, afin de l'utiliser.

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome revêt une importance cruciale pour assurer son bon fonctionnement et son efficacité. En effet, un dimensionnement inadéquat peut entraîner des problèmes tels qu'une production insuffisante d'électricité, une décharge prématurée des batteries ou un coût excessif du système.

Ce chapitre vise à présenter les principaux éléments à prendre en compte lors du dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome. Il aborde les différentes étapes du processus de dimensionnement, en mettant l'accent sur les aspects techniques et économiques.

3.2 Procédure de calcul

3.2.1 Consommation énergétique

Un système bien adapté nécessite l'évaluation de la puissance électrique des applications à alimenter. L'énergie nécessaire s'exprime par :

$$E_c = P \times t \quad (3.1)$$

Avec :

E_c : énergie consommée

P : puissance de fonctionnement de l'appareil

t : temps d'utilisation

L'énergie est donc le produit de la puissance par le temps. La relation (IV.1) permet de calculer les besoins journaliers en énergie.

En effet, comme un système photovoltaïque doit fournir son énergie durant une journée entière, il est naturel de prendre la période de 24 heures comme unité de temps.

L'énergie **E**, est donc l'énergie électrique consommée en 24 heures par l'application et s'exprime en Watt- heure par jour (Wh/j). On l'appelle aussi consommation journalière.

Pour calculer la consommation totale d'une installation, on calcule d'abord l'énergie électrique consommée en 24 heures par chaque équipement ou chaque fonction électrique et ensuite on les additionne. Elle s'exprime par :

$$E_t = \sum P_i \times T_i \quad (3.2)$$

Avec :

P_i : Puissance électrique d'un appareil « i » exprimée en Watt (W).

T_i : Durée d'utilisation de cet appareil « i » en heure par jour (h/j).

Lorsque tous les appareils fonctionnent à la même tension, la consommation journalière peut également se chiffrer en Ampère - heure par jour (Ah/j), unité pratique pour tous les systèmes liés à une batterie. Comme ces équipements fonctionnent en alternatif et que la consommation énergétique passe par un onduleur, il est nécessaire de tenir compte du rendement de l'onduleur pour évaluer la puissance requise, on écrit alors : Puissance corrigée = puissance des appareils à alimenter × Rendement de l'onduleur

3.2.2 Energie Solaire Récupérable

➤ Inclinaison et orientation optimales des capteurs photovoltaïques

L'énergie générée par les panneaux photovoltaïques est directement liée à l'ensoleillement. Afin de maximiser l'efficacité de l'installation solaire, il est important de prendre en compte ce facteur, qui dépend à son tour de la localisation de l'installation, de l'orientation et de l'inclinaison des panneaux.

Idéalement, les panneaux doivent être orientés plein sud dans l'hémisphère nord et plein nord dans l'hémisphère sud, en évitant les zones ombragées, et inclinés selon un angle qui optimise la capture de l'énergie solaire.

Un panneau incliné est caractérisé par son angle d'inclinaison β par rapport à l'horizontale et son azimut χ par rapport au sud. Plus les rayons solaires sont proches de la perpendiculaire au plan des panneaux α , plus la quantité d'énergie disponible est élevée.

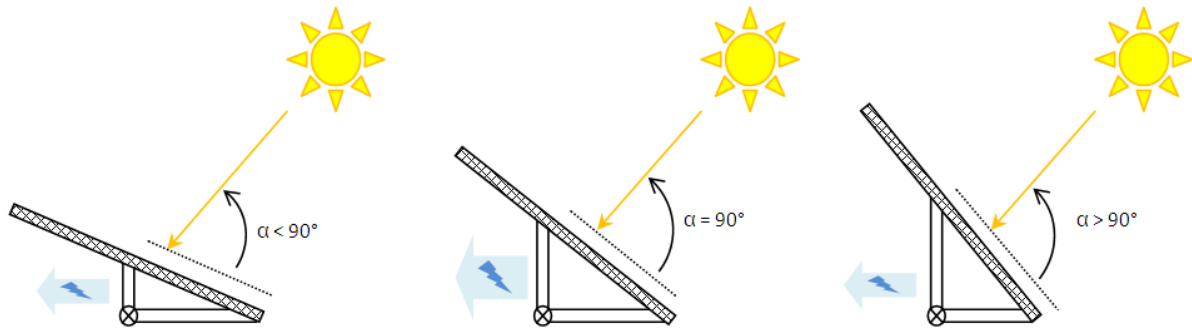


Figure 3-1 L'inclinaison photovoltaïque

En moyenne annuelle, l'inclinaison optimale pour maximiser la production d'énergie est égale à la latitude du lieu. Une inclinaison plus forte que la latitude peut augmenter la capture d'énergie en hiver (lorsque la trajectoire du soleil est basse dans le ciel), au détriment de la capture en été.

L'inverse est vrai pour une inclinaison plus faible que la latitude. Ces considérations sont prises en compte lors de la conception d'un système photovoltaïque.

Le tableau suivant présente les valeurs recommandées d'inclinaison des panneaux photovoltaïques pour une utilisation constante tout au long de l'année, en fonction de la latitude :

Latitude φ	Inclinaison β
$\varphi < 10^\circ$	10°
$10^\circ < \varphi < 30^\circ$	φ
$30^\circ < \varphi < 40^\circ$	$\varphi + 10^\circ$
$\varphi > 40^\circ$	$\varphi + 15^\circ$

Tableau 3-1 Relation entre latitude et l'inclinaison

➤ **Ombage ou repérage des masques :**

Il peut arriver que les modules photovoltaïques soient exposés à des obstacles tels que des bâtiments, des montagnes, des arbres, etc., qui entraînent une occultation du soleil. Les effets de l'ombage sur le rayonnement solaire reçu sont difficiles à estimer de manière intuitive. Cependant, il est crucial de prêter attention aux ombrages partiels, voire ponctuels, car ils ont

un impact significatif sur la production d'énergie, entraînant un déficit de production qu'il faut prendre en compte.

Il est important de noter que lorsqu'une cellule photovoltaïque est ombragée, le courant de toute la chaîne de cellules en série est limité, ce qui peut avoir des conséquences graves si les panneaux ne sont pas équipés de diodes anti-retours. Ces diodes sont essentielles pour éviter les problèmes de rétrodiffusion du courant et minimiser les pertes dues à l'ombrage.

3.2.3 Données météorologiques

La conception des systèmes photovoltaïques exige une connaissance approfondie du rayonnement solaire disponible sur le site d'installation, ce qui constitue l'un des paramètres fondamentaux de l'étude préliminaire. Pour une demande électrique donnée, une plus grande quantité d'énergie solaire reçue se traduit par un nombre moindre de panneaux solaires à installer, et inversement.

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il est absorbé et diffusé vers le sol. L'atmosphère a une influence sur la diffusion et l'absorption d'une partie du rayonnement incident. Cette modification du rayonnement solaire par l'atmosphère est un processus complexe, en grande partie aléatoire.

Le flux lumineux reçu au sol à un moment donné dépend d'un ensemble de paramètres tels que les gaz présents dans l'atmosphère, les nuages, l'albédo (réflectivité du sol), la température ambiante, le vent, l'humidité relative, etc. Tous ces paramètres varient en fonction de la localisation géographique, de la saison, de l'heure du jour et des conditions météorologiques actuelles.

Il est donc essentiel d'avoir accès à des données fiables, obtenues à partir de statistiques accumulées sur plusieurs années, en utilisant un instrument de mesure appelé "héliographe". Les stations météorologiques utilisent cet instrument pour élaborer des statistiques sur le rayonnement solaire intégré en kilo watt-heure par mètre carré (KWh/m²) à partir de toutes les données collectées. Ces données, qui représentent généralement une moyenne journalière, sont couramment utilisées pour dimensionner un système photovoltaïque.

3.2.4 Dimensionnement du générateur photovoltaïque :

Durant cette étape, on effectue le calcul nécessaire pour déterminer le nombre de modules photovoltaïques requis afin de répondre aux besoins en électricité.

3.2.4.1 Puissance crête d'un générateur photovoltaïque

La puissance crête des panneaux solaires à installer est déterminée par l'irradiation du site d'installation. Celle-ci est calculée en utilisant la formule suivante :

$$P_{ch} = \frac{E_c}{K \cdot I_r} \quad (3.3)$$

P_{ch} : Puissance crête de champs photovoltaïque en Watt crête (W_c)

E_c : Energie consommée par jour (Wh/jour)

I_r : Temps moyen d'ensoleillement journalier (h/jour)

A Adrar : $8 \leq I_r \leq 13$ ». On prend la moyenne de 10 h/Jour

K : Coefficient correcteur, ce coefficient dépend :

- De l'incertitude météorologique.
- De l'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison.
- Du point de fonctionnement des modules.
- Du rendement moyen charge/décharge de la batterie (90%).
- Du rendement du régulateur (95%).
- Des pertes dans les câbles et connexions pour les systèmes avec batterie.

K : est en générale compris entre 0.55 et 0.75. La valeur souvent utilisée dans les calculs du système avec batterie est $k=0.65$.

3.2.4.2 Tension de fonctionnement du champ photovoltaïque

La tension de fonctionnement est sélectionnée en fonction de la puissance crête du champ photovoltaïque, exprimée en watts. De façon générale :

Puissance Crête (W_c)	<500 W_c	De 501 W_c à 2000 W_c	De 2001 W_c à 10000 W_c	>10000 W_c
Tension de Champ (V)	12	24	48	96

Tableau 3-2 Tension du champ en fonction de sa puissance crête

3.2.5 Nombre de panneaux photovoltaïques à utiliser

A partir de la puissance crête des panneaux on peut déterminer le nombre de :

- Panneaux solaire nécessaires à l'installation :

$$N_m = \frac{P_{ch}}{\text{Puissance crête unitaire panneau}} \quad (3.4)$$

- Le nombre de modules connectés en série sera égale à :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_n} \quad (3.5)$$

V_{ch} : tension totale du champ.

V_n : la tension délivrée par un seul panneau photovoltaïque.

N_s : nombre de panneaux connectés en série.

- Le nombre de modules connectés en parallèles s'exprime par :

$$N_p = \frac{N_m}{N_s} \quad (3.6)$$

Avec :

N_m : nombre total de panneaux photovoltaïques.

N_p : nombre de panneaux connectés en parallèle.

3.2.6 Dimensionnement du parc de batteries

Pour déterminer le nombre de batteries qu'il vous faut :

- On calcule l'énergie consommée (E_c) par les différents récepteurs.
- On détermine le nombre de jours d'autonomie nécessaires.
- On détermine la profondeur de décharge acceptable pour le type de batterie utilisé.
- On calcule la capacité (C) de la batterie en appliquant la formule ci-dessous :

$$C_{ch} = \frac{E_c \cdot N}{D \cdot U} \quad (3.7)$$

C_{ch} : capacité du champ de batterie en ampère. Heure (Ah).

E_c : énergie consommée par jour (Wh/j).

N : nombre de jour d'autonomie.

D : décharge maximale admissible (0,8 pour les batteries au plomb).

U : tension de la batterie (V).

➤ Nombre de batteries en séries :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_{batterie}} \quad (3.8)$$

V_{ch} : tension du champ.

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

➤ Nombre de batterie en parallèles :

$$N_p = \frac{C_{ch}}{C_{batterie}} \quad (3.9)$$

Avec:

C_{ch} : capacité totale du champ de batteries associées à toute l'installation photovoltaïque.

$C_{batterie}$: capacité d'une batterie.

La profondeur de décharge (DOD), exprimé en %, est le rapport entre la capacité déjà déchargée et la capacité nominale de l'accumulateur. En général, on essaie de limiter la profondeur de décharge à 50%, c'est-à-dire que l'on utilisera que la moitié de la capacité de batteries.

3.2.7 Dimensionnement du régulateur de charge

Le régulateur est dimensionné d'après les paramètres suivants : tension, courant d'entrée et courant de sortie.

Tension nominale du système : la tension nominale d'un système photovoltaïque, qui peut être de 12 V, 24 V, 48 V, ou autre. Cela dépendra de la configuration du système.

Courant d'entrée I_e : C'est le courant de charge maximal que les modules sont susceptibles de débiter. Il doit être supporté sans problème par le régulateur. Pour estimer ce courant,

le plus sûr est de prendre 1,5 fois le courant maximal.

Courant de sortie I_s : L'intensité du courant de sortie du régulateur doit être supérieure à la Valeur maximale que peuvent tirer les récepteurs simultanément. Elle peut être déterminée par la formule suivante :

$$I_{max} = \frac{P_{ch}}{U} \quad (3.10)$$

P_{ch} : la puissance crête du champ de photovoltaïque qui es calculé comme suit :

$$P_{cv} = P_c \times N_p \times N_s \quad (3.11)$$

3.2.8 Dimensionnement de l'onduleur

Le convertisseur de courant se dimensionne en fonction de plusieurs critères :

La tension de sortie : en Algérie nous utilisons du 220/230 V, 50Hz.

Tension d'entrée : Vérification que l'onduleur est compatible avec la tension nominale du système photovoltaïque. la tension d'entrée maximale de l'onduleur doit être supérieure à la tension maximale du panneau solaire.

Puissance nominale : La puissance nominale de l'onduleur doit être suffisante pour gérer la puissance générée par votre système photovoltaïque. la puissance nominale de l'onduleur doit être égale ou supérieure à la puissance totale des panneaux solaires installés.

La puissance maximale de l'onduleur : est un critère essentiel, généralement deux à trois fois supérieure à la puissance nominale. Cette caractéristique est particulièrement importante pour les appareils équipés d'un moteur, tels que les réfrigérateurs, les micro-ondes ou les machines à laver.

La puissance nominale de l'onduleur : doit être suffisante pour répondre aux besoins de démarrage qui entraînent une augmentation significative de la consommation.

Le rendement : il est important de prendre en compte que le convertisseur de courant consomme une partie de l'électricité produite, généralement entre 80% et 95% de l'énergie est restituée. Il est recommandé de choisir un onduleur avec un rendement élevé, idéalement autour de 90%, pour maximiser l'efficacité de la conversion d'énergie.

En outre, il convient de noter que la plupart des convertisseurs ont une consommation d'énergie même lorsqu'ils sont en veille (mode stand-by). Cependant, certains modèles sont dotés d'un système de mise en marche/arrêt qui permet de réaliser des économies d'énergie importantes, notamment dans le cas de petites installations photovoltaïques.

3.2.9 Le dimensionnement des câbles électriques solaires

Il est essentiel d'utiliser des câbles solaires spécifiques pour assurer le transport de l'énergie des modules jusqu'au régulateur de charge. Ces câbles sont conçus pour résister aux conditions d'utilisation et offrent une durée de vie prolongée de plus de 30 ans tout en minimisant les pertes d'énergie.

La résistance d'un câble électrique ne dépend ni de la tension ni de l'intensité du courant qui le traverse, mais plutôt de la résistivité (ρ) du matériau utilisé, tel que le cuivre, l'argent, le fer, etc., ainsi que de la longueur, de la section et de la température du câble.

Le cuivre est largement utilisé comme conducteur en raison de sa résistivité, qui varie entre $16 \times 10^{-9} \Omega.m$ à $0^\circ C$ et $17 \times 10^{-9} \Omega.m$ à $25^\circ C$. L'équation suivante permet de calculer la résistance d'un câble :

$$S = \frac{\rho \times L}{R} \tag{3.12}$$

Avec :

R : la résistance en (Ω).

ρ : la résistivité en ($\Omega.m$).

L : la longueur du câble en (m).

S : la section du câble s en (mm^2) .

Il est important de choisir des câbles solaires appropriés avec la bonne résistance, section et longueur pour minimiser les pertes d'énergie et assurer un fonctionnement efficace du système photovoltaïque.

3.3 Présentation de l'habitat a étudié

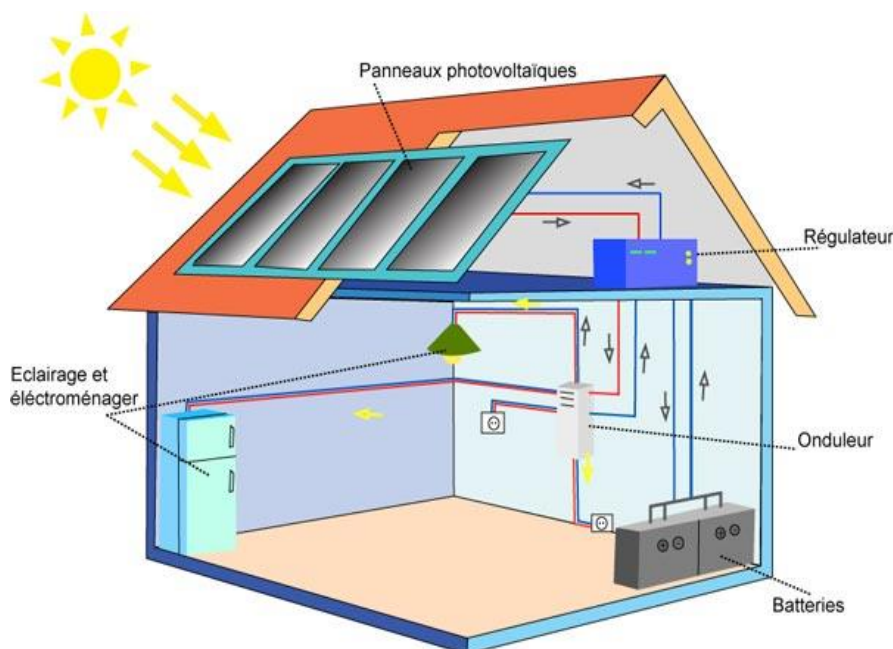


Figure 3-2 Exemple d'installation du système photovoltaïque

3.3.1 Consommation énergétique

Appareils	Nombre	Puissance	Heure	Energie	Rendement	Energie
-----------	--------	-----------	-------	---------	-----------	---------

	de Charges	nominal (W)	d'utilisation (H)	(Wh/jour)	de conversion	corrigée du rendement (Wh/jour)
Lampe étage 1	4	13	6	312	-	312
Lampe étage 2	4	13	6	312	-	312
Lampe couloir	4	13	4	208	-	208
Lampe WC	2	13	2	52	-	52
Lampe douche	2	13	2	52	-	52
Climatiseur	4	1700	6	40800	0.85	34680
Réfrigérateur	1	200	24	4800	0.85	4080
Imprimante	1	132	1	132	0.85	112.2
Ordinateur	2	75	3	450	0.85	382.5
Télévision	2	100	3	600	0.85	510
Machine a lave	1	2050	1	2050	0.85	1742.5
Total	-	4322	-	-	-	42443.2

Tableau 3-3 Consommation énergétique de l'habitation

3.3.2 Localisation du site

Wilaya : Adrar

Site : Tittaf

Latitude : 27°. 9365 Nord

Longitude : -0°.2430 West

Altitude : 290 mètres

Albédo : 0,2

Température ambiante min : +5°C

Température ambiante max : +50°C

D'après le tableau (1) on prend l'Inclinaison comme suit : $\beta (^{\circ}) = \varphi$

Ce qui donne :

$$\beta (^{\circ}) = 27^{\circ}.9365$$

3.3.3 Données météorologiques

A Adrar Tittaf :

La durée d'ensoleillement journalière minimale est de : 8 h/jour.

La durée d'ensoleillement journalière maximale est de :12 h/jour.

En général on prend la moyenne de : 10 h/jour.

3.3.4 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Les lampes disponibles sur le marché fonctionnent soit en alternatif, soit en continu mais avec des tensions inférieures à 24V.

Afin d'éviter d'ajouter des convertisseurs qui augmentaient la consommation, et donc les coûts de l'installation, Il est judicieux de répartir les consommateurs en deux catégories, ceux fonctionnant en continu et ceux fonctionnant en alternatif.

Ensuite, on procède au dimensionnement de chacun d'eux. Leurs besoins sont consignés dans les tableaux suivants :

➤ Cahier de charge pour les appareils qui fonction en courant continu :

Appareils	Nombre de Charge	Puissance (W)	Heure d'utilisation(h)	Energie (Wh/jour)
Lampe étage 1	4	13	6	312
Lampe étage 2	4	13	6	312
Lampe couloire	4	13	4	208
Lampe WC	2	13	2	52
Lampe douche	2	13	2	52
Total	16	65	20	936

Tableau 3-4 Différentes charges fonctionnant en courant continu

➤ Cahier de charge pour les appareils qui fonction en courant alternatif

Appareils	Nombre	Puissance	Heure	Energie	Rendement	Energie
-----------	--------	-----------	-------	---------	-----------	---------

	de charge	(W)	D'utilisation (h)	Consommée (Wh/jour)	De Conversion	Corrigée Du Rendement
Climatiseur	4	1700	6	40800	0.85	34680
Réfrigérateur	1	200	24	4800	0.85	4080
Imprimante	1	132	1	132	0.85	112.2
Ordinateur	2	75	3	450	0.85	382.5
Télévision	2	100	3	600	0.85	510
Machine a lavé	1	2050	1	2050	0.85	1742.5
Total	4257	41507.2

Tableau 3-5 Différentes charges fonctionnant en courant alternatif

En appliquant l'équation (3.3) on va calculer la puissance crête pour les deux installations.

- **Puissance crête de l'installation fonctionnant en courant continu**

Tenant compte de la puissance nécessaire au fonctionnement des appareils en courant continu (Tableau3-4), on évalue la puissance crête des panneaux solaires, donnée par l'équation (3.3), comme suit :

$$P_{ch} = \frac{Ec}{K.I_r}$$

$$P_{ch} = \frac{963}{0.65 \times 10} = 144 W_c$$

- **La puissance crête de l'installation en courant alternatif**

Tenant compte de la puissance nécessaire au fonctionnement des appareils en courant alternatif (Tableau 3-5), on évalue la puissance crête des panneaux solaires, donnée par l'équation (3.3), comme suit :

$$P_{ch} = \frac{41507.2}{0.65 \times 10} = 6385.72 W_c$$

D'après ces puissances crêtes, en se référât au tableau (2) on détermine la tension de

Chaque installation, il vient que :

	Courant continu	Courant alternatif
La puissance crête (WC)	144	6385.72
Tension de l'installation U (V)	12	48

Tableau 3-6 *Tension des différentes installations*

Caractéristiques du panneau solaire à utiliser pour les deux installations Les panneaux photovoltaïques choisis sont de type polycristallin, leurs caractéristiques sont consignées dans la figure ci-dessous :

Dimensions Module	1980 × 1002 × 40 mm
Poids	23 kg
Puissance nominale Pmpp*	330 W
Tension à puissance max. Vmpp*	37.3 V
Courant à puissance max. Impp*	8.86 A
Tension en circuit ouvert Voc	44.72 V
Courant de court-circuit Isc	9.57 A
* Caractéristiques électriques selon STC (valeurs aux Conditions de test standardisées (STC): irradiation 1000W/m ² , température de cellule 25°C, masse d'air 1,5)	
Puissance nominale (tolérance +/- 3%)	330 W
Type de cellules	Polycristallin
Nombre de cellules couplées en série	72
Tension maximale système	1000 V
Coefficient de température de Pmpp (%)	-0.45/°C
Coefficient de température de Voc (%)	-0,35/°C
Coefficient de température de Isc (%)	+0.04/°C
Température de fonctionnement	-40°C à +85°C
Charge de surface maximale	200 kg/m ²
Résistance aux impacts (grêle)	23 m/s, 7,53 g
Boîte de raccordement	PV-JB002 (pas de connecteur)
Longueur de câble/ Connecteur	900 mm / MC4.
Tolérance de puissance	+/-3%
Cadre	Aluminium
Garantie produit	5 ans
Garantie de puissance	10 ans 90% + 25 ans 80% de la puissance minimale

Figure 3- 3 Fiche technique du panneau solaire

➤ **Nombre de panneaux à utiliser pour l'installation en courant continu**

D'après les équations (3.4 ; 3.5 ; 3.6) le nombre de panneaux utiliser en séries et en

Parallèles correspond à :

- **Nombre de panneaux total à utiliser :**

$$330 \text{ W} \rightarrow 1000 \text{ W/m}^2$$

$$X \rightarrow 1350 \text{ W/m}^2$$

$$X=445.5 \text{ W}$$

$$445.5 \times 10 = 4455 \text{ Wh/j}$$

$$N_m = \frac{P_{ch}}{\text{Puissance crête unitaire panneau}}$$

Ce qui donne :

$$N_m = \frac{936}{4455} = 0.2$$

Donc on utilise un seul panneau de 330 Wc.

➤ **Nombre de panneaux total à utiliser pour l'installation en courant alternatif**

$$N_m = \frac{P_{Ch}}{\text{Puissance crête unitaire panneau}}$$

$$N_m = \frac{41507.2}{4455} = 9.31$$

Donc on utilise 10 panneaux de 330 Wc.

• **Le nombre de modules connectés en série :**

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_n}$$

Ce qui donne :

$$N_s = \frac{48}{37.3} = 1.28$$

Donc on utilise 2 panneaux de 330Wc connectés en séries.

• **Le nombre de modules connectés en parallèles**

$$N_p = \frac{N_m}{N_s}$$

Ce qui donne :

$$N_p = \frac{10}{2} = 5$$

Donc on utilise 5 panneaux de 330 Wc connectés en parallèles.

3.3.5 Choix des batteries

• **Capacité totale pour l'installation en courant continu**

A partir des équations (3.7 ; 3.8 ; 3.9) on va calculer le nombre total des batteries à utiliser en série et en parallèle. Pour 1 jours d'autonomie (N=1), tenant compte de la puissance requise

au fonctionnement des appareils en courant continu (Tableau 4), la relation (3.7) permet d'évaluer la capacité de charge.

Ce qui donne :

$$C_{ch} = \frac{936 \times 1}{0.8 \times 12} = 97.5 \text{ Ah}$$

Afin de stocker cette énergie, on utilise des batteries solaires de type plomb acide pour l'installations en courant continu ayant pour tension : 12 V et une capacité : $C_{batterie} = 150 \text{ Ah}$.



Figure 3-4 Batterie plomb acide 12v /150Ah

Cet ensemble de batteries étant disposé en parallèle et en série, le nombre de batteries montées en série est évalué comme suit :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_{batterie}}$$

Ce qui donne :

$$N_s = \frac{12}{12} = 1$$

Alors que le nombre de batteries installées en parallèle correspond à :

$$N_p = \frac{C_{ch}}{C_{batterie}}$$

Ce qui donne :

$$N_p = \frac{97.5}{150} = 0.65$$

Donc on utilise 1 batterie de 12 V et 150 Ah .

Étant donné que l'installation courant continu n'utilise qu'une seule batterie, il n'est pas nécessaire de calculer le nombre total de batterie.

- **Capacité totale pour l'installation en courant alternatif :**

A partir des équations (3.7 ; 3.8 ; 3.9) on va calculer le nombre total des batteries à utiliser en série et en parallèle. Pour 1 jours d'autonomie ($N=1$), tenant compte de la puissance requise au fonctionnement des appareils en courant alternatif (Tableau 4), la relation (3.7) permet d'évaluer la capacité de charge.

$$C_{ch} = \frac{41507.2 \times 1}{0,8 \times 48} = 1080.91 \text{ Ah}$$

Pour stocker cette énergie, on utilise des batteries solaires de type lithium ion pour l'installations en courant alternatif ayant pour tension : 48 V et une capacité : $C_{batterie} = 200$ Ah.



Figure 3-5 Batterie lithium ion 48 v/200 Ah

- ❖ Nombre de batteries en séries :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_{batterie}}$$

Ce qui donne :

$$N_s = \frac{48}{48} = 1$$

- ❖ Nombre de batteries en parallèle :

$$N_p = \frac{C_{ch}}{C_{batterie}}$$

Ce qui donne :

$$N_p = \frac{1080.91}{200} = 5.4$$

Alors en utilise 6 batteries en parallèle de 48 V et 200 Ah.

$$\text{Nombre total de batteries} = N_p \times N_s$$

$$N_t = 1 \times 6 = 6$$

3.3.6 Choix du régulateur de charge

En appliquant les équations (3.10 ;3.11) ; La régulation de charge sera dimensionnée pour l'installation de 12 V Comme suit :

$$I_{max} = \frac{P_{c/champs}}{U}$$

Avec :

$$P_{c/champs} = P_C \times N_P \times N_S$$

Ce qui donne :

$$P_{c/champs} = 330 \times 1 \times 1 = 330 W_c$$

Ce qui donne :

$$I_{max} = \frac{330}{12} = 27.5 A$$

- La régulation de charge sera dimensionnée pour l'installation de 48 V comme suit :

$$I_{max} = \frac{P_{c:champs}}{U}$$

$$P_{c/champs} = 330 \times 5 \times 2 = 3300 W_c$$

$$I_{max} = \frac{3300}{48} = 68.75 A$$

	Courant continu	Courant alternatif
Type de régulateur	12V / 30 A	48 V / 100 A

Tableau 3-7 Types de régulateurs de charge dans les deux installations .

3.3.7 Choix de l'onduleur

Les caractéristiques de l'onduleur utilisé doivent être compatibles avec une installation ayant une tension de 48 V et une demande de puissance de 2400 W_c.

$$P_{onduleur} = \sqrt{(P^2 + Pr^2)} \tag{3.13}$$

Avec :

$$Pr = P \times \frac{\sin \beta}{\cos \beta} \tag{3.14}$$

Pr : puissance réactive [KVAR]

P : puissance crête du champ photovoltaïque On prend : $\cos \beta = 0,8$ et $\sin \beta = 0,4$

$$P_r = 3300 \times \frac{0.4}{0.8}$$

$$P_{\text{onduleur}} = \sqrt{(3.3^2 + 1.725^2)} = 3.72$$

Alors l'onduleur pour l'installation en courant alternatif est de 4 KVA.

3.3.8 Choix des câbles

Dans cette partie, on donne un aperçu de calcul des câbles nécessaires à la connexion des différents panneaux photovoltaïques, quant aux autres connexions (régulateur, appareils, onduleur) elles restent tributaires des conditions de réalisation sur le site.

La chute de tension admise à travers un câble étant de 2% de la tension appliquée sur le champ de batteries de stockage, il vient que la différence de potentiel admise aux bornes d'un câble de connexion correspond à :

$$\Delta U = \text{Tension appliquée} \times 0,02$$

- **Calcul de la section du câble à utiliser Pour l'installation en courant continu**

Tenant compte de l'intensité optimale délivrée par un panneau solaire (**Figure 3-3**), soit :

$$I_{\text{max}} = 8,86 \text{ A}$$

Il vient que pour trois panneaux connectés en parallèles, l'intensité totale délivrée sera :

$$I_{\text{max}} = 8.86 \times 3 = 26.58 \text{ A}$$

La tension du champ de batteries étant de 12V, la chute de tension admise pour les câbles de connexion sera alors :

$$\Delta U = 12 \times 0.02 = 0.24 \text{ V}$$

A partir de la loi d'Ohm, on évalue la résistance de ces câbles par :

$$R = \frac{\Delta U}{I} = \frac{0.24}{8.86} = 0.027 \Omega$$

Considérant que la longueur du câble solaire à utiliser étant égale à la largeur des trois panneaux en parallèles, il vient que :

$$L = 0.9 \times 3 = 2.7 \text{ m}$$

Tenant compte de l'équation (3.12), la section des câbles à utiliser se déduit par :

$$S = \frac{\rho \times L}{R}$$

$$S = 16 \times 10^{-19} \times \frac{0.9}{0.027} = 5.33 \text{ mm}^2$$

- **Calculer la section du câble pour l'installation en courant alternatif**

Tenant compte de l'intensité optimale délivrée par les panneau solaire (Figure fiche technique), soit :

$$I_{max} = 8.86 \times 5 = 44.3 \text{ A}$$

$$\Delta U = 48 \times 0.02 = 0.96 \text{ V}$$

$$R = \frac{\Delta U}{I} = \frac{0.96}{44.3} = 0.021 \text{ A}$$

Considérant que la longueur du câble solaire à utiliser étant égale à la largeur des huit panneaux en parallèles, il vient que :

$$L = 0.9 \times 5 = 4.5 \text{ m}$$

Tenant compte de l'équation (3.12), la section des câbles à utiliser se déduit par :

$$S = \frac{\rho \times L}{R}$$

Ce qui donne :

$$S = 16 \times 10^{-19} \times \frac{4.5}{0.021} = 34.28 \text{ mm}^2$$

Les résultats du dimensionnement pour les deux systèmes sont résumés dans le tableau suivant :

Dimensionnement		Système 1 (DC)	Système 2 (AC)
Puissance crête à installer (W _c)		936	41507.2
Tension de l'installation		12	48
Nombre de modules	Total	1	10
	En série	1	2
	En parallèle	1	5
Batteries	Capacité Total (Ah)	97.5	1080.91
	Nombre total	1	6

	Eléments en séries	1	1
	Eléments en parallèle	1	6
	Courant de sortie (A)	8.86	44.3
Régulateur de charge			
Type de câble section (mm²) / et longueur (m)		5.33 mm ² / 0.9 m	34.28 mm ² / 4.5 m
Puissance de l'onduleur (KVA)		/	14

Tableau 3-8 Résultats du dimensionnement pour les deux systèmes

3.4 Le cout d'installation

	Composant	Cout unitaire	Nombre de compostant	Cout total
Installation Courant alternatif	Panneau solaire	300€	10	3000€
	batterie	380€	6	2280€
	Régulateur	764 €	1	764€
	Onduleur	690€	1	690€
	cable	16.90€/par mètre	4.5 mètre	76.05€
Installation Courant continu	Panneau solaire	300€	1	300€
	batterie	427€	1	427€
	Régulateur	459€	1	459€
	Câble	5.66€/par mètre	0.9 mètre	5.66€

Tableau 3- 9 Le cout pour les deux installations

3.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la méthode de dimensionnement des installations autonomes, nous avons intégré les données indispensables concernant les caractéristiques du site d'installation, le site Titaf de la wilaya d'Adrar et de l'énergie solaire reçu sur le site lui-même.

Enfin, le dimensionnement de l'installation photovoltaïque autonome est terminé. D'après les données ensuite les calculs, il est possible de connaître le nombre de modules photovoltaïques nécessaires pour la fourniture de l'énergie électrique dans l'installation considérée, de calculer les caractéristiques des batteries, l'énergie qu'il faut stocker dépend directement de la périodicité de la consommation. La section des câbles électriques transportant l'énergie est effectuée. Une section trop petite augmente la résistance et la température du câble, ce qui réduit la puissance de l'installation.

Conclusion Générale

Un système photovoltaïque (PV) autonome est un système générateur d'électricité destiné à effectuer une tâche bien déterminée. Autrement dit à couvrir les besoins énergétiques d'une maison isolée.

Ce système se compose de plusieurs éléments principalement les modules PV qui représentent le champ de captage des rayons solaires, les batteries qui constituent le champ de stockage c'est là où nous stockons de l'énergie produite par les modules, le régulateur qui protège la batterie contre la surcharge. Ainsi il règle la valeur de la tension nominale, l'onduleur qui assure la conversion du courant continu en courant alternatif dont les utilisateurs ont besoin, le câblage qui relie les différents composants du système entre eux.

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

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

Notre système autonome du foyer, est formé de modules individuels d'une puissance nominale de 42443.2 Wc chacun et destinés à l'alimentation de nos appareils électriques qui consomment quotidiennement une énergie électrique qui se diffère d'une saison à une autre.

Pour ce besoin énergétique, nous avons opté à l'utilisation de 11 panneaux solaire combinés entre eux.

La puissance crête total de notre système est estimée en tenant compte des pertes. Quand il fait sombre, ou pendant l'insuffisance du rayonnement solaire, l'alimentation électrique des appareils se réalise exclusivement depuis le champ de stockage. Nous avons déterminé une tension nominale de fonctionnement du système 12 V et 48 V avec une capacité de stockage moyen, par conséquent, nous avons choisi 7 batteries dont ses caractéristiques sont performantes, un onduleur pour la conversion de courant, et un régulateur pour la protection des batteries.

Grâce à ce projet, il a été déterminé que le soleil est une source inépuisable, c'est une alternative durable pour générer de l'énergie propre qui permet de profiter des avantages économiques et écologiques

Les besoins électriques dans une habitation ont été analysés en calculant la puissance nominale en fonction de l'énergie de consommation journalière maximale et de la puissance crête pour déterminer le nombre de panneaux photovoltaïques en série et en parallèle.

Il a été conclu que les panneaux, étant dans une orientation et une inclinaison optimales, profitent de tout le rayonnement solaire, il a également été déterminé que l'onduleur est suffisant pour la puissance nominale de chaque appareil électrique ; Il est important de souligner que le nombre de batteries en série et en parallèle supporte efficacement toute la charge dans les heures de consommation établies et que le régulateur est correct en tension et en courant pour compenser la décharge de la batterie.

Enfin, il a été déterminé que le système photovoltaïque isolé peut efficacement tirer parti du rayonnement avec des éléments idéaux pour son installation sur le site.

Bibliography

- [1] [En ligne]. Available: <https://www.ecologie.gouv.fr/energies-renouvelables>.
- [2] [En ligne]. Available: <https://www.ecologie.gouv.fr/energies-renouvelables>.
- [3] [En ligne]. Available: <https://mtaterre.fr/les-energies-fossiles..>
- [4] [En ligne]. Available: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/>.
- [5] [En ligne]. Available: <https://www.irena.org/fr/wind..>
- [6] [En ligne]. Available: [https://www.renewableenergyworld.com/wind-power/tech-pros-and-cons-of-wind-power-50413/..](https://www.renewableenergyworld.com/wind-power/tech-pros-and-cons-of-wind-power-50413/)
- [7] [En ligne]. Available: <https://www.irena.org/fr/wind..>
- [8] [En ligne]. Available: <https://www.energy.gov/eere/water/hydropower-basics..>
- [9] [En ligne]. Available: "Advantages and Disadvantages of Hydropower" - National Geographic.
- [10] [En ligne]. Available: <https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics..>
- [11] [En ligne]. Available: <https://www.iea.org/reports/geothermal..>
- [12] [En ligne]. Available: "Renewables 2021 - Analysis and forecast to 2026", International Energy Agency (IEA), 2021..
- [13] [En ligne]. Available: [https://www.energy.gov/..](https://www.energy.gov/)
- [14] [En ligne]. Available: [https://www.upenergie.com/info-energie-energie-solaire/..](https://www.upenergie.com/info-energie-energie-solaire/)
- [15] [En ligne]. Available: <https://www.projetecolo.com/l-importance-des-energies-renouvelables-819.html..>
- [16] [En ligne]. Available: [https://www.algerie-eco.com/..](https://www.algerie-eco.com/)
- [17] [En ligne]. Available: [https://www.algerie-eco.com/..](https://www.algerie-eco.com/)

- [18] [En ligne]. Available: [https://www.algerie-eco.com/..](https://www.algerie-eco.com/)
- [19] [En ligne]. Available: <https://www.ef4.be>.
- [20] N. Achaïbou, « Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque » Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 1-6.
- [21] [En ligne]. Available: <https://www.energy-online.fr>.
- [22] [En ligne]. Available: <https://www.maisondelenergie.fr>.
- [23] X. S. L. e. D. G. Wei Wang, « "Flow Batteries: Current Status and Trends" (Batteries à flux : état actuel et tendances),» Electrochemical Energy Reviews, 2018.
- [24] S. Kalogirou, Solar energy engineering : processes and systems, Academic Press, 2016..
- [25] M. E. A. B. e. A. T. A., Seifeddine Ben Elghali, « "Centralized Inverter Topologies for Grid-Connected Photovoltaic Systems: A Review",» Energies, vol. 11, 2018.
- [26] H. M. Zeeshan, «"A Comprehensive Study of Grid-Connected Photovoltaic Systems,"», 2017..
- [27] [En ligne]. Available: [www.edfenr.com..](http://www.edfenr.com)
- [28] [En ligne]. Available: [solaire-france.com..](http://solaire-france.com)
- [29] [En ligne]. Available: [www.cnrtl.fr..](http://www.cnrtl.fr)
- [30] J. V. D. D. Pierre-Alexis Gril, «Caractérisation de panneaux photovoltaïques par,» juillet 2018.
- [31] [En ligne]. Available: [https://substance.etsmtl.ca..](https://substance.etsmtl.ca)
- [32] [En ligne]. Available: [www.dsnsolar.com..](http://www.dsnsolar.com)
- [33] R. D. M. e. al., «"Optimization of Corrective Maintenance Policies for Multi-Component Systems",» chez International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Boise, ID, USA, 2018..
- [34] K. E. Y. H. W. W. Martin A. Green, «"High-efficiency crystalline silicon solar cells: Status and perspectives",» 2020..
- [35] A. R. H. P. R. R. B. Armin G. Aberle, «"Polycrystalline silicon solar cells: Status and perspectives",» 2013..

- [36] A. R. M. & Y. A., «Nawaz, A Comprehensive Review of Maintenance Strategies for Equipment and Infrastructure of the Process Industry, Chemical Engineering Communications, 2017»..
- [37] S. Kalogirou, Solar energy engineering : processes and systems, Academic Press, 2016..
- [38] J. K. D. & L. J. Yu, Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015...
- [39] J. T. J. Z. Y. M. M. E.-B. Yasser Abdel-Rady Ibrahim, "Grid-Connected Renewable Energy Systems: A Review of Smart Technologies", 2016..
- [40] X. & T. Li, «Maintenance decision-making for complex systems with condition-based information, European Journal of Operational Research, 2019»..
- [41] N. e. a. S.K, Design of wiring system for solar photovoltaic power supply with battery backup, International Journal of Energy and Environment , 2012..
- [42] H. E. D. a. M. C. K. M. E. Ropp, «"A review of photovoltaic charge controllers",» Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 7, pp. 1-13, 1999..
- [43] K. I. H. a. C. H. H. J. Kim, «"An optimal control method of a solar array with a constant current regulator for photovoltaic water pumping systems",» IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, pp. 787-796, 1999..
- [44] M. Walid, Dimensionnement d'une station de production d'énergie électrique à base de photovoltaïque pour alimenter un village, 2021-2022..
- [45] [En ligne]. Available: <https://www.algerie-eco.com/>.