



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N°d'enregistrement

Université de Ghardaïa

...../...../.....

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département d'automatique et d'électromécanique

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Energies Renouvelables en électrotechnique

Thème

Etude et dimensionnement optimale d'un système
photovoltaïque autonome

Présenté par :

Abdelkader BOUCHARB

Soutenue publiquement le :20/06/2023

Devant le jury composé de:

BELGHERAS Sifia	MCA	Univ. Ghardaïa	Président
YETTO Fatiha	Directeur de Recherche	URAER	Examineur
MEDOUKALI Hemza	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
BENSAHA Abdelmadjid	Docteur	URAER	Encadreur

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

Nous remercions tout d'abord **Allah** le tout puissant, pour nous avoir donné la force et la patience, la santé et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Nous remercions nos chers **parents** qui nous ont aidés à être ce que nous sommes et qui nous ont entourés avec leur amour et affection. Nous remercions leur dévouement, leur temps consacré et leur présence constante au cours de toutes ces années d'études. Nous ne saurions jamais les remercier assez pour leur bonté. « Merci infiniment, ce travail est le vôtre ».

Nous exprimons notre grande gratitude au **Pr. Jaafar Djelloul**, Directeur de l'Unité de Recherche Appliquée aux Energies Renouvelables, qui nous a ouvert les portes de l'unité.

Nous remercions encore **Mr. Said MIDANE** pour faciliter les procédures administratives.

Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur le **Dr. Abdelmadjid BENZAHA**, qui a accepté de superviser, diriger et contrôler ces travaux.

Enfin nous sommes très reconnaissants à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin durant la préparation de ce mémoire.

ملخص

يركز مشروع مذكرة نهاية الدراسة على تحسين تكلفة المولد الكهروضوئي و بطاريات التخزين لنظام كهروضوئي مستقل عن الشبكة الكهربائية، والذي تم إجراؤه وفقاً لنوعين من الألواح الكهروضوئية (أحادي البلورات و متعدد البلورات) ، كل نوع يتميز بسعته قصوى و سعره الخاص، وكذلك بطاريات التخزين المتميزة بسعتها و أسعارها وهذا من أجل الحفاظ على مستوى عالٍ من الموثوقية بأقل تكلفة من أجل تحقيق تحجيم مثالي للأنظمة الكهروضوئية المستقلة. باستخدام الماطلاب، حددنا الطاقة المطلوبة ، وعدد الألواح الكهروضوئية اللازمة وكذلك سعة بطاريات التخزين ، و أيضا عدد البطاريات ، وسعة منظم الطاقة الشمسية المختارة من أقصى تيار منتج في المحطة الكهروضوئية وكذلك استطاعة الأنفرتر. تم تنفيذ جميع أعمالنا بناءً على دراسة حالة حقيقية لمنزل يقع في غرداية ، مع مراعاة الظروف المناخية المحددة. تقدم نتائج بحثنا توصيات عملية للتحجيم الأمثل للأنظمة الكهروضوئية المستقلة.

كلمات مفتاحية : التحجيم ، التحسين ، التكلفة ، النظام الكهروضوئي ، مستقل.

Résumé

Notre mémoire de fin d'études porte sur L'optimisation du cout du générateur PV et la banque des batteries dans un système photovoltaïque autonome (SPV), qui a été fait en fonction de deux types de modules PV (monocristalline et polycristalline), caractérisés par leurs puissances crêtes et leurs prix spécifiques et aussi des batteries de stockage caractérisées par leurs prix et leurs capacités ; afin de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal des systèmes photovoltaïques autonomes. À l'aide de MATLAB, nous avons déterminé la puissance requise, le nombre de modules PV nécessaires et aussi la capacité de batteries de stockage, le nombre de batteries, la capacité du régulateur solaire choisi à partir de courant maximum produite par la centrale PV et aussi la puissance de l'onduleur. L'ensemble de nos travaux a été effectué en se basant sur une étude de cas réelle dans une maison F3 située à Ghardaïa, en tenant compte des spécificités climatiques. Les résultats de notre recherche fournissent des recommandations pratiques pour le dimensionnement optimal des systèmes photovoltaïques autonomes.

MOTS CLES : Dimensionnement, optimisation, cout, système photovoltaïque, autonome.

Abstract

The final study note project focuses on optimizing the cost of the photovoltaic generator and storage batteries for a photovoltaic system independent of the electric grid, which was conducted according to two types of photovoltaic panels (monocrystalline and polycrystalline), each type characterized by its maximum capacity and its own price, as well as storage batteries distinguished by their capacity. This is in order to maintain a high level of reliability at the lowest cost in order to achieve optimal scaling of stand-alone PV systems. Using the MATLAB, we determined the required power, the number of photovoltaic panels needed, as well as the capacity of storage batteries, as well as the number of batteries, and the capacity of the solar regulator selected from the maximum current produced in the photovoltaic station, as well as the capacity of the inverter. All our work was carried out based on a real case study of a house located in Ghardaia, taking into account the specific climatic conditions. The results of our research provide practical recommendations for the optimal sizing of stand-alone PV systems.

Keywords: scaling, optimization, cost, photovoltaic system, standalone.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur les énergies renouvelables et ces applications en Algérie	1
1.1 Introduction.....	3
1.2 Types des énergies renouvelables	3
1.2.1 Energie solaire	4
1.2.2 Energie géothermique	11
1.2.3 Energie éolienne	15
1.2.4 Energie de biomasse	20
1.3 Conclusion	23
Chapitre 2 : Etudes antérieurs sur le dimensionnement photovoltaïque autonome	23
2.1 Introduction.....	24
2.2 Etude bibliographique	25
2.3 Conclusion	39
Chapitre 3 : Energie solaire & Description du système photovoltaïque autonome	40
3.1 Introduction.....	41
3.2 Energie solaire.....	41
3.2.1 Energie solaire thermique	42
3.2.2 Energie solaire photovoltaïque	42
3.3 Description des éléments d'un système photovoltaïque autonome	43
3.3.1 Générateur photovoltaïque (PV).....	43
3.3.2 Effet du niveau d'éclairement	50
3.3.3 Système de stockage	51
3.3.4 Système de régulation.....	57
3.3.5 Système de conversion	61

3.3.6	Charge.....	63
3.4	Conclusion	64
Chapitre 4 : Etude et dimensionnement optimale d'une centrale PV autonome		40
4.1	Introduction.....	65
4.2	Dimensionnement et optimisation du système PV	65
4.2.1	Méthode de dimensionnement.....	66
4.2.2	Coût total du système photovoltaïque.....	71
4.3	Etude de cas : Dimensionnement d'un système PV autonome alimentant un appartement de type F3 située à la région de Ghardaïa.....	72
4.3.1	Gisement solaire du site d'étude.....	72
4.3.2	Description de l'habitat étudié.....	73
4.3.3	Charge électrique de la maison.....	74
4.3.4	Résultats du dimensionnement du système PV et des batteries	76
4.4	Conclusion	79
Conclusion générale		81
Bibliographies.....		83

Liste des figures

Figure 1-1 : Les types des énergies renouvelables en Algérie.....	4
Figure 1-2 : Conception solaire passive	5
Figure 1-3 : Schéma d'un system photovoltaïque autonome	6
Figure 1-4 : Chauffe-eau solaire.....	7
Figure 1-5 : Le central d'OUED NECHOU Ghardaïa	7
Figure 1-6 : L'aéroport Ahmed Ben Bella d'Oran	8
Figure 1-7 : Configuration d'un system de Pompage photovoltaïque.....	10
Figure 1-8 : Centrale hybride de Hassi R'mel.....	11
Figure 1-9 : Une partie du champ solaire de SPP 1.....	11
Figure 1-10 : Zones géothermiques préférentielles et potentiel à l'exhaure	13
Figure 1-11 : ventilo-convecteur dans la salle de cantine	14
Figure 1-12 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	16
Figure 1-13 : Schéma d'un dispositif éolien à axe verticale et horizontale.....	17
Figure 1-14 : Carte de la vitesse annuelle moyenne de vent dans l'Algérie à 30 m du sol..	18
Figure 1-15 : La ferme éolienne de Kabertène (wilaya d'Adrar)	19
Figure 1-16 : Aérogénérateur (INRA - Adrar).	19
Figure 1-17 : Taux d'hydrogène produit et puissance éolienne fournie par une éolienne de 250 kW.	20
Figure 1-18 : Dispositif expérimental de production de biogaz, division Bioénergie et Environnement, CDER.....	22
Figure 2-1 : Système photovoltaïque autonome.	25
Figure 2-2 : Schéma du système SAPV étudié avec deux types des modules PV.	26
Figure 2-3 : Configuration des systèmes autonomes hybrides éolien-photovoltaïque.....	27

Figure 2-4 : Schéma du système de contrôleur hybride panneau PV et supercondensateur	28
Figure 2-5 : Schéma de conception sous TRNSYS de la station photovoltaïque.....	29
Figure 2-6 : Configuration du système SAPV.....	30
Figure 2-7 : Composants du système PV autonome.....	32
Figure 2-8 : Schéma du système analysé.....	35
Figure 2-9 : Schéma d'Unité d'équipe EESFC.	38
Figure 2-10: Schéma de principe de la technologie des équipements d'énergie Solaire	38
Figure 2-11 : Système solaire photovoltaïque.	38
Figure 3-1 : Schéma d'un system photovoltaïque autonome	43
Figure 3-2 : Structure de la cellule et déplacement des porteurs de charge	44
Figure 3-3 : Photo d'une cellule monocristalline	45
Figure 3-4 : Photo d'une cellule polycristalline	45
Figure 3-5 : l'orientation et l'inclinaison des modules PV.....	49
Figure 3-6 Schéma de la caractéristique courant-tension d'un module PV	50
Figure 3-7 : Schéma de l'effet de l'éclairement sur le module PV	50
Figure 3-8 : Courbe de la cellule monocristalline à divers température.....	51
Figure 3-9 : : Photo d'une batterie solaire	52
Figure 3-10 : Composition d'une batterie monobloc	55
Figure 3-11 : Principe de fonctionnement d'un accumulateur plomb / acide.....	56
Figure 3-12: Branchement de régulateur de charge.....	57
Figure 3-13 : Courbe de courant et tension de charge	58
Figure 3-14 : Schéma de principe d'un régulateur de charge série	59
Figure 3-15 : Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle	61
Figure 3-16 branchement d'un convertisseur.	61
Figure 3-17 : Courbe de PPM et ICC.	63
Figure 4-1: Algorithme d'optimisation du nombre de modules photovoltaïques.....	69

Figure 4-2 : Algorithme d'optimisation de la banque de batteries.....	69
Figure 4-3 : Station radiométrique de l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable URAER-Ghardaïa.....	73
Figure 4-4 : Plan descriptif 2D de la maison.....	74

Liste des tableaux

Tableau 4-1 : Consommation électrique des électroménagers et du système d'éclairage en fonction de la fréquence d'utilisation.....	74
Tableau 4-2 : Optimisation du coût, enchaînement et schéma de connexion des batteries solaires.....	76
Tableau 4-3 : Optimisation du coût, enchaînement et schéma de connexion des modules photovoltaïques.	77

Liste des Nomenclatures

P_G	puissance crête du générateur photovoltaïque	Wc
E_C	consommation d'énergie quotidienne	Wh
P_{cm}	puissance crête du module photovoltaïque	Wc
A_m	surface de module photovoltaïque	m ²
D_{Ins}	durée d'insolation ou le nombre d'heures d'ensoleillement	h
$U_{Tension_système}$	tension du système photovoltaïque	V
U_n	tension nominale du module	V
N_{m_string}	nombre de séries des modules photovoltaïques en parallèle	
C_m	coût de module photovoltaïque	DA
C_B	capacité de stockage de batteries	Ah
n_j	nombre de jours d'autonomie	
P_f	profondeur de décharge	%
N_{B_string}	nombre de séries des batteries en parallèle	V
C_E	capacité de stockage d'une seule batterie	Ah
U_{nb}	tension nominale de la batterie	V
C_b	coût de la batterie	DA
I_{max}	courant maximum produite par le générateur photovoltaïque	A
I_{cc}	courant de court circuit des modules photovoltaïques	A
C_G	cout du générateur PV	DA
C_{Bat}	cout de la banque de batteries	DA
C_R	cout du régulateur de charge	DA
I_R	courant du régulateur choisit	A

C_0	cout de l'onduleur	DA
P_0	puissance de l'onduleur choisit	W
C_{S+C}	cout de la structure et des câbles électriques	DA

Liste des Abréviations

PV : photovoltaïque

GPV : générateur photovoltaïque

G : intensité de la radiation

N : un semi-conducteur de type N

P : un semi-conducteur de type P

Si : silicium

KWc : kilo Watt crête

a-Si : silicium amorphe

Ah : Ampère heure

MPPT : Maximum Power Point Tracking

DC : Convertisseur continu

AC : Convertisseur alternatif

Cj : Consommation journalière

Wh : Watt heure

CC : court-circuit

°C : degré celsius

DA/kWh : Dinars Algerian/kilo Watt Heure

Introduction générale

La pollution de l'environnement, Le pétrole qu'est en voie de disparition et le changement climatique sont les principaux défis qui soulignent l'importance d'évoluer vers l'utilisation de sources d'énergie renouvelables.

En général, les systèmes photovoltaïques (PV) peuvent être principalement classés en différents types en fonction de la production d'énergie, tels que : le système PV autonome hors réseau, le système PV connecté au réseau et le système PV hybride. L'utilisation des systèmes PV autonomes hors réseau favorise une conversion de la technologie en termes de "quitter le réseau" ou de "vivre hors réseau".

Par conséquent, le système SAPV (stand-alone photovoltaic) est l'une des sources alternatives les plus prometteuses qui peut être un choix approprié pour les zones rurales. Une plus grande sécurité et la simplicité du système sont les avantages supérieurs du système SAPV. Cependant, la faible fiabilité et le coût d'investissement élevé du générateur photovoltaïque sont les principales limites du système SAPV hors réseau. Par conséquent, le dimensionnement approprié du système PV autonome hors réseau est essentiel pour répondre à la charge électrique requise [1].

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons à une région saharienne qui est une zone aride, marquée par des conditions favorisant l'utilisation de l'énergie solaire, notamment pour les besoins électriques des habitants. Le régime climatique semi-aride est caractérisé par un été chaud et sec et un hiver très froid (notamment la nuit par rapport au jour) avec des précipitations rares et irrégulières.

Dans cette contribution, nous avons basée sur un dimensionnement optimal d'un système photovoltaïque autonome qui a été fait en fonction de deux types de modules PV caractérisés par leurs puissances crêtes et leurs prix spécifiques et aussi des batteries de stockage caractérisées par leurs prix et leurs capacités. L'objectif est de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal des systèmes photovoltaïques autonomes.

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres qui se résument dans ce qui suit :

- Au premier chapitre nous allons donner quelques généralités sur les énergies renouvelables et ces applications en Algérie.

Introduction générale

- Le deuxième chapitre a permis de présenter quelques études antérieures sur le dimensionnement photovoltaïque autonome.
- Le troisième chapitre est consacré à une description générale de chaque élément constituant le système photovoltaïque autonome.
- Dans le quatrième chapitre, on a donné les étapes pour faire un dimensionnement photovoltaïque optimale pour les systèmes photovoltaïques autonomes et on a étudié un cas d'une centrale PV autonome alimentant un appartement de type F3 situé dans la région de Ghardaïa.

Enfin, une conclusion générale clôturera notre mémoire.

Chapitre 1 :

Généralités sur les énergies

renouvelables et ces

applications en Algérie

1.1 Introduction

L'utilisation croissante de l'énergie dans le monde a engendré une forte demande en sources d'énergie alternatives et renouvelables, dans le but de réduire la dépendance aux énergies fossiles et de préserver l'environnement.

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui sont naturellement renouvelables, comme le soleil, le vent et l'eau. Contrairement aux combustibles fossiles, qui sont finis et épuisables.

Les énergies renouvelables ont connu une croissance rapide ces dernières années et ont commencé à devenir une source d'énergie importante dans plusieurs pays. L'adoption de technologies de production d'énergie renouvelable a également créé de nouvelles opportunités d'emploi et de développement économique, ainsi que des avantages environnementaux significatifs.

Cette introduction se concentrera sur les principales sources d'énergie renouvelable et leurs applications.

1.2 Types des énergies renouvelables

En effet, les énergies renouvelables sont considérées comme une solution durable pour répondre aux besoins énergétiques de l'humanité tout en limitant les impacts environnementaux négatifs.

Il existe plusieurs familles d'énergies renouvelables :

- **L'énergie solaire** : elle est produite par la conversion de la lumière du soleil en électricité, soit par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques, soit par le biais de capteurs thermiques.
- **L'énergie éolienne** : elle est produite par la force du vent, qui fait tourner des éoliennes pour générer de l'électricité.
- **L'énergie géothermique** : elle est produite par la chaleur provenant de l'intérieur de la terre, qui est récupérée pour produire de l'électricité ou de la chaleur.
- **L'énergie de la biomasse** : elle est produite par la combustion de matières organiques telles que les déchets agricoles, les résidus forestiers ou les cultures énergétiques pour produire de la chaleur ou de l'électricité.

Chaque type d'énergie renouvelable a ses avantages et ses limites en termes de coûts, de rendement, de disponibilité géographique, de fiabilité et de faisabilité technique. Cependant, leur combinaison peut offrir une solution efficace et durable pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux tout en préservant notre planète [2].

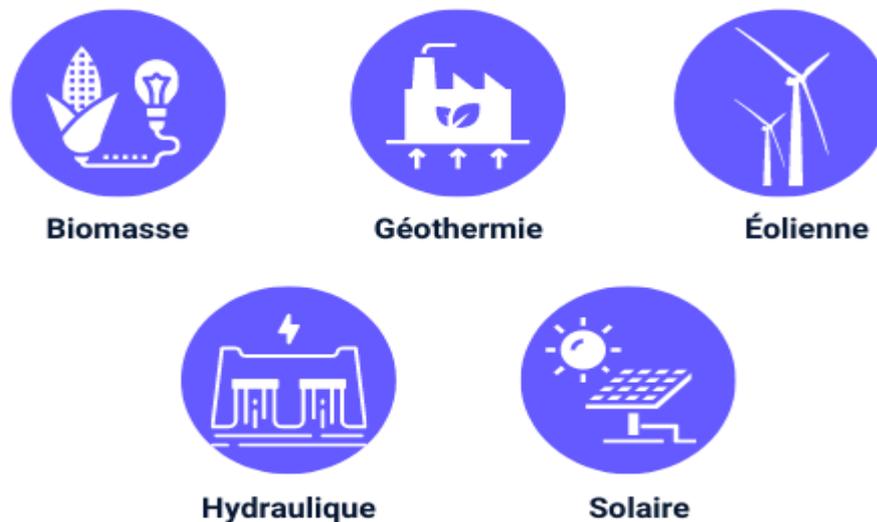


Figure 1-1 : Les types des énergies renouvelables en Algérie [3].

1.2.1 Energie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable et propre, qui peut être utilisée pour produire de l'électricité ou de la chaleur sans émettre de gaz à effet de serre ou de polluants. Les cellules photovoltaïques sont souvent utilisées pour produire de l'électricité à petite échelle, comme pour alimenter des lampes solaires ou des dispositifs électroniques portables. Les collecteurs solaires sont utilisés pour chauffer l'eau dans les systèmes de chauffage solaire, les piscines ou les systèmes de chauffage domestique. Les concentrateurs solaires sont utilisés pour produire de l'électricité à grande échelle dans des centrales solaires thermiques. En concentrant les rayons du soleil sur un point focal, ils peuvent atteindre des températures très élevées, ce qui permet de produire de la vapeur pour alimenter des turbines à vapeur et produire de l'électricité [4].

1.2.1.1 Techniques pour capter l'énergie solaire

Il existe trois techniques pour capter l'énergie solaire : l'énergie solaire passif, l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie solaire thermique. Les panneaux solaires photovoltaïques convertissent directement l'énergie solaire en électricité, les systèmes solaires thermiques utilisent des capteurs solaires pour absorber l'énergie solaire et la convertir en chaleur, tandis

que le solaire passif utilise la conception architecturale pour tirer parti de la lumière solaire naturelle pour l'éclairage et le chauffage. Ces techniques sont en constante évolution pour augmenter leur efficacité et leur rentabilité.

- **Energie solaire passive**

L'énergie solaire passive utilise la lumière naturelle pour chauffer et éclairer les bâtiments. Le chauffage solaire passif absorbe la lumière solaire par les murs, planchers et meubles pour générer de la chaleur, réduisant ainsi la consommation d'énergie. Les fenêtres jouent un rôle important en laissant entrer la lumière. Le chauffage de l'eau peut être réalisé avec des tubes contenant un liquide caloporteur, qui est chauffé par la lumière solaire avant d'être acheminé vers un ballon d'eau chaude. Deux types de circulation existent : forcée avec une pompe et spontanée grâce à la remontée naturelle. Ce système permet des économies d'argent et une réduction de l'impact environnemental. Les occupants ressentent un confort thermique accru grâce à la diffusion uniforme de la chaleur [5].

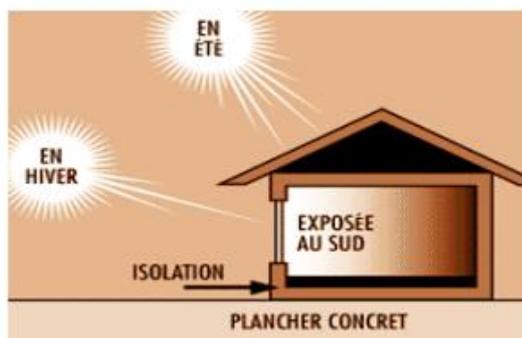


Figure 1-2 : Conception solaire passive [6].

- **Energie solaire photovoltaïque**

Le photovoltaïque solaire convertit directement la lumière en électricité via des cellules solaires. Cette technologie est idéale pour des besoins énergétiques limités et a un faible impact environnemental et d'entretien. sa performance est affectée par les conditions météorologiques et son coût augmente lorsque la demande augmente. Le dimensionnement d'un système PV est crucial pour son efficacité et sa rentabilité à long terme. Cette étude prend en compte plusieurs facteurs tels que la demande en énergie, le rayonnement solaire, la température ambiante, la vitesse du vent et la taille du système. L'objectif est de trouver l'option la plus efficace et la moins chère pour répondre aux besoins énergétiques. Il est important de faire appel à des professionnels qualifiés pour garantir la sécurité et la fiabilité du système. L'utilisation de

technologies complémentaires telles que le stockage d'énergie peut être envisagée pour une production d'énergie en continu [7].

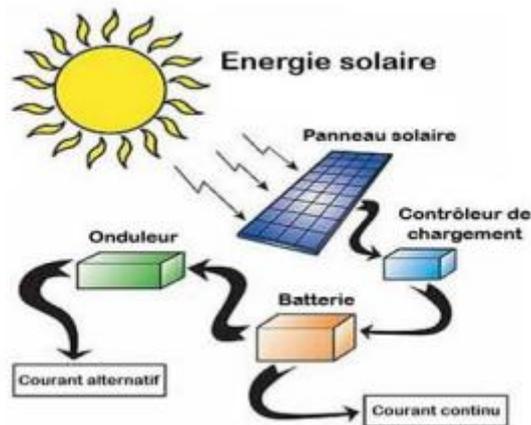


Figure 1-3 : Schéma d'un système photovoltaïque autonome [5].

- **Energie solaire thermique**

L'énergie solaire thermique est une technologie qui permet de convertir l'énergie des rayons solaires en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement, comme pour chauffer l'eau sanitaire. Grâce aux progrès technologiques, les capteurs solaires ont été améliorés pour une meilleure absorption et rétention de la chaleur. Les systèmes de stockage de l'énergie solaire thermique ont également connu des améliorations pour permettre le stockage de l'énergie produite pendant les périodes de forte production solaire. De plus, L'énergie solaire thermique est une source d'énergie renouvelable et propre, offrant une option écologique et durable pour répondre aux besoins énergétiques de la société [5].

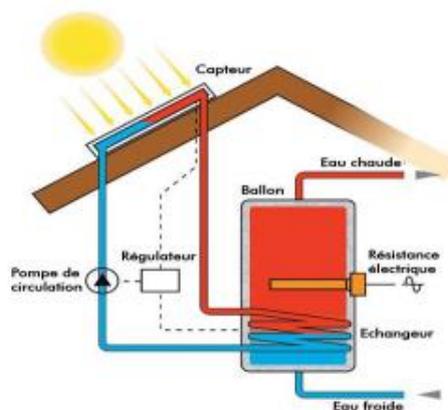


Figure 1-4 : Chauffe-eau solaire [5].

1.2.1.2 Quelques applications de l'énergie solaire en Algérie

- Centrale photovoltaïque connectée au réseau d'OUED NECHOU - Ghardaïa

Grâce à sa position géographique, l'Algérie bénéficie d'un ensoleillement exceptionnel avec l'un des plus hauts potentiels solaires mondiaux, atteignant 5 milliards de kilowattheures par an. Les régions du Sahara et des Hauts plateaux bénéficient de près de 3 900 heures d'ensoleillement par an, selon les experts. Dans le cadre du programme de développement des énergies renouvelables initié par le ministère compétent, la construction de la centrale solaire photovoltaïque de 1,1 MW à Ghardaïa vise à tester les performances de ce type d'équipement et son adaptation au climat du Sud. Cette centrale pilote permettra également d'évaluer la rentabilité des panneaux photovoltaïques avant de généraliser leur déploiement à l'échelle nationale. [8].



Figure 1-5 : Le central d'OUED NECHOU Ghardaïa [8].

- Une aérogare verte (l'aéroport Ahmed Ben Bella d'Oran)

Le nouveau terminal de l'aéroport d'Oran, en Algérie, est partiellement alimenté par plus de 4 500 panneaux solaires sur sa toiture, d'une capacité totale de 1,7 MW. Cela permet au terminal, accueillant jusqu'à 3,5 millions de passagers par an, de bénéficier d'une alimentation électrique durable et de réduire son empreinte carbone. [9].



Figure 1-6 : L'aéroport Ahmed Ben Bella d'Oran [9].

- Quelques installations de chauffe-eaux solaire
- **Installation à l'école technique de Blida**

Alimentation en eau chaude de la cantine de l'école.

Les principales composantes sont :

- Un champ de capteurs de surface totale de 18.8 m^2 sur toit incliné.
- Un volume de stockage composé de deux ballons de 500 litres chacun, pourvus d'échangeurs thermiques permettant le transfert de la chaleur récupérée sur les capteurs vers l'eau sanitaire.
- Chaudière à gaz pour l'appoint.
- Thermostat différentiel.
- Taux de couverture solaire 63 %.
- Apport solaire annuel 11 000 kWh/an [10].

- **Installation au centre de formation de Ben Aknoun**

Alimentation en eau chaude de la cantine de l'école.

Les principales composantes sont :

- Un champ de capteurs de surface totale de 18.4 m^2 sur terrasse horizontale.

- Un volume de stockage composé de 4 ballons de 300 litres chacun, pourvus d'échangeurs thermiques permettant le transfert de la chaleur récupérée sur les capteurs vers l'eau sanitaire.
 - Taux de couverture solaire 64 %.
 - Apport solaire annuel 9000 kWh/an [10].
- Utilisation de l'énergie solaire pour le pompage de l'eau

L'utilisation de l'énergie solaire, en particulier l'énergie photovoltaïque, pour le pompage de l'eau est bien adaptée pour la plus part de ces régions arides et semi-arides en raison de l'existence dans ces régions d'un potentiel hydraulique souterrain peu profond, inférieurs à 30 mètres dans la majorité des zones désertique sahariennes, et un grand potentiel énergétique solaire, supérieur à 6 KWh /m² sur une surface inclinée à la latitude du lieu.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays peut couvrir certains de ces besoins en énergie solaire, ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées surtout dans les applications du pompage.

Les systèmes de pompage photovoltaïque apparaissent comme l'une des applications solaires prometteuse. L'utilisation de cette énergie solaire photovoltaïque reste la solution idéale pour les régions arides et permet ainsi l'alimentation en eau et l'autosuffisance agricole.

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est composé de :

- Un générateur photovoltaïque.
- Un groupe moteur-pompe.
- Une tuyauterie et des accessoires.
- Comme option, un système de conditionnement de puissance, de réservoir d'eau, des batteries et de l'équipement de régulation et contrôle (Figure 1-7) [11].

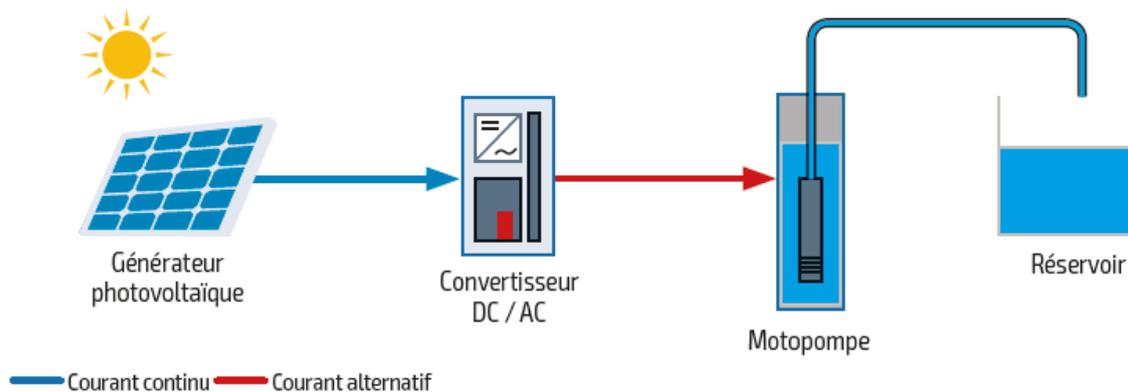


Figure 1-7 : Configuration d'un système de Pompage photovoltaïque [11].

- Centrale hybride de Hassi R'mel

La centrale SPP1 de Hassi R'mel est un système hybride fonctionnant au gaz naturel et à l'énergie solaire. Elle produit 150 MW au total, dont 30 MW sont fournis par l'énergie solaire. Cette centrale est composée d'un champ solaire et d'un cycle combiné :

- Le champ solaire est constitué de capteurs cylindro-paraboliques, répartis sur deux surfaces. Chaque surface contient 28 boucles de quatre modules, répartis en 2 rangées. Le module est formé de 12 segments comportant chacun plusieurs miroirs. La composante directe du rayonnement solaire incident est concentrée par les miroirs sur un récepteur situé au point focal de la parabole (Figure 1-9). Un fluide caloporteur HTF (Heat Transfer Fluid) circule à l'intérieur du récepteur. Le fluide chauffé, dont la température peut atteindre 393°C, passe à travers une série d'échangeurs de chaleur pour céder sa chaleur à l'eau et produire ainsi de la vapeur d'eau (générateur de vapeur solaire).



Figure 1-8 : Centrale hybride de Hassi R'mel.

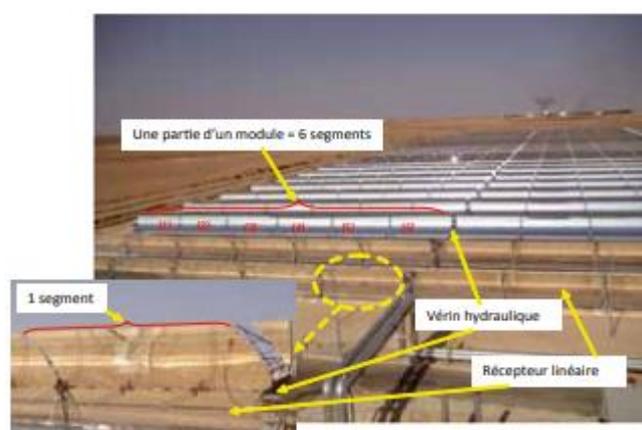


Figure 1-9 : Une partie du champ solaire de SPP 1.

- Le cycle combiné est constitué de 2 turbines à gaz (fonctionnant au gaz naturel) dont la puissance nominale unitaire est de 45 MW. La chaleur de combustion de ces turbines est récupérée dans deux chaudières horizontales à circulation naturelle. Ces dernières font fonctionner une turbine à vapeur d'une puissance nominale de 80.08 MW. Il est à noter que le point fort de cette centrale hybride est l'ajout de la vapeur produite par le champ solaire à celle récupérée des turbines à gaz pour alimenter la turbine à vapeur. La puissance électrique produite par la centrale augmente en conséquence.[12]

1.2.2 Energie géothermique

La géothermie utilise la chaleur de la Terre pour produire de l'électricité ou du chauffage. C'est une source d'énergie renouvelable et durable [14].

La température de la Terre augmente avec la profondeur, en moyenne de 3 °C par 100 mètres. Cependant, cette augmentation de température peut varier selon les régions et dépend de

plusieurs facteurs, tels que la composition de la croûte terrestre, la présence de sources de chaleur géologiques et l'activité tectonique. C'est pourquoi la géothermie n'est pas toujours une source d'énergie disponible ou viable dans toutes les régions du monde.

La chaleur produite dans la croûte terrestre est principalement due à la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre.

La géothermie est une source d'énergie fiable et stable dans le temps, contrairement à d'autres sources d'énergie renouvelables qui dépendent des conditions atmosphériques ou de la disponibilité de matières organiques. Elle peut donc produire de manière constante tout au long de l'année, ce qui en fait une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques de manière durable [13].

On distingue trois types de géothermie ; la haute, la basse et la très basse énergie.

- **La géothermie à haute énergie :** La température élevée du gisement (entre 80 °C et 300 °C) permettant la production d'électricité.
- **La géothermie à basse énergie :** Les températures comprises entre 30 °C et 100 °C. Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur.
- **La géothermie à très basse énergie :** La température est comprise entre 10 °C et 30 °C. Cette technologie est appliquée au chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique [14].

1.2.2.1 Ressources géothermiques en Algérie

Les calcaires jurassiques du nord de l'Algérie abritent de nombreux réservoirs géothermiques, donnant lieu à plus de 200 sources thermales principalement situées dans les régions du Nord-est et du Nord-ouest du pays. Ces sources ont souvent des températures dépassant les 40 °C, la plus chaude étant celle de Hammam Meskhoutine (96 °C). Ces émergences naturelles débitent plus de 2 m³/s d'eau chaude, provenant généralement de fuites des réservoirs existants, mais cela représente seulement une petite partie du potentiel de production. Au sud, la formation du continental intercalaire constitue un vaste réservoir géothermique, connu sous le nom de 'nappe albienne', couvrant plusieurs milliers de km². Cette nappe est exploitée par des forages qui atteignent plus de 4 m³/s, avec une température moyenne de l'eau à 57 °C. Si l'on combine le débit de la nappe albienne avec celui des sources thermales, cela représenterait une puissance géothermique de plus de 700 MW. La carte géothermique schématique (figure 1-10) illustre les principales zones d'intérêt. [15].

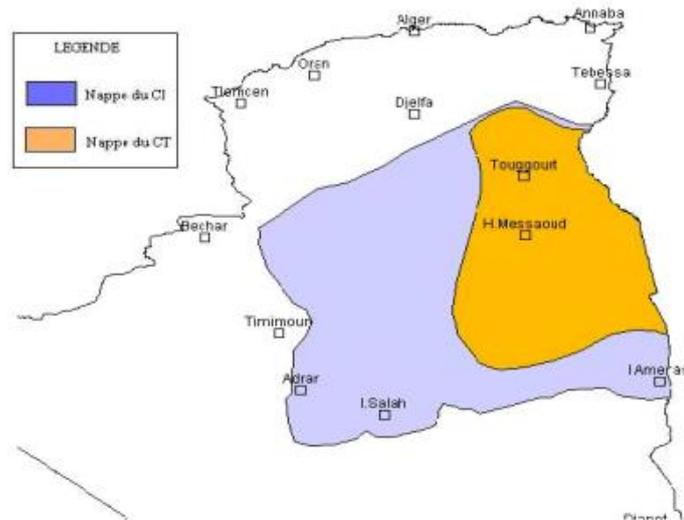


Figure 1-10 : Zones géothermiques préférentielles et potentiel à l'exhaure [15].

1.2.2.2 Utilisation de l'énergie géothermique en Algérie

- Les stations thermales médicalisées

En Algérie, parmi les nombreuses stations thermales existantes, seules huit sont médicalisées. Il s'agit des stations thermales suivantes : Hammam Zelfana (Ghardaïa), Hammam Bouhanifia (Mascara), Hammam Bouhadjar (Ain Temouchent), Hammam Boughrara (Tlemcen), Hammam Righa (Ain Defla), Hammam Guergour (Setif), Hammam Salhine (Biskra) et Hammam Meskoutine (Guelma). Ces stations thermales sont gérées par la Société Algérienne de Thermalisme et sont conventionnées avec différentes caisses de sécurité sociale telles que la CNAS, la Casnos et la caisse militaire. [16].

- Climatisation

En Algérie la climatisation est très énergivore en matière de consommation énergétique. Une solution se trouve dans l'exploitation des ressources naturelles non conventionnelles telles que la géothermie.

Dans le cadre d'un programme de promotion des énergies propres et renouvelables de la direction de l'environnement de la wilaya de Saïda, un système de climatisation géothermique a été mis en place à l'école primaire Si Ben Salah, située à Sidi Aïssa commune de Sidi Amar Daïra de Sidi Boubeker.

L'intervention du Centre de Développement des Energies Renouvelables consiste en l'étude de l'efficacité énergétique de cette installation qui est destinée à la climatisation de la cantine de l'école.

Cette installation, qui est alimentée à partir d'une source géothermale dont la température est de 46°C avec un débit de 25 m³ /h, est composée de trois systèmes :

- Un système de récupération de la chaleur géothermique.
- Un système de ventilo-convecteur constitué de deux circuits d'eau et d'un circuit d'air pour le chauffage de la cantine en hiver et la climatisation en été. Le circuit d'air est constitué d'une gaine d'aspiration et de deux gaines de refoulement (figure 1-11).
- Une pompe à chaleur air-eau qui assure la climatisation durant toute l'année. Son fonctionnement est autonome et peut servir d'appui au chauffage en cas de panne du système de récupération de la chaleur géothermique ou si la température du puits est insuffisante.

Des essais ont été effectués sur différentes parties de l'installation. Cette étude nous a conduit à des résultats très concluants quand à l'utilisation des eaux géothermales pour la climatisation [17].

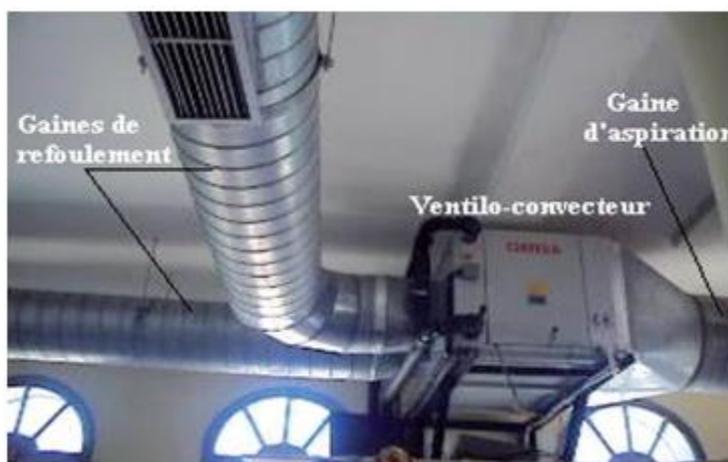


Figure 1-11 : ventilo-convecteur dans la salle de cantine.

- Agriculture

Les deux applications principales de la géothermie dans le domaine agricole sont la pisciculture et les serres. Les cultures sous serres constituent une option intéressante, car les besoins en énergie sont élevés. C'est en Algérie que l'on trouve les plus grands complexes de serres chauffées par la géothermie. L'élévation de la température, ainsi que son maintien constant, dans les installations de pisciculture, favorise une augmentation du métabolisme chez les poissons et les crustacés. Dans le secteur de la fabrication alimentaire, des températures allant de 40°C à 100°C sont utilisées pour déshydrater les fruits et les légumes. À partir de 60°C, l'air chauffé peut être employé pour le séchage des produits agricoles, des poissons et du bois. Ces

processus thermiques sont importants pour la production et la préservation des produits alimentaires et des matériaux à base de bois. [13].

- Industrie

Des ressources géothermiques modérées peuvent être utilisées pour la protection contre le gel de grands bâtiments industriels utilisant des pompes à chaleur géothermiques. Or, pour répondre aux besoins industriels en eau chaude ou en vapeur, une ressource géothermique à haute température (100°C à 200°C) est nécessaire. Si la source géothermique est inférieure à 100 °C, elle peut être utilisée pour préchauffer l'eau, qui sera ensuite portée à la température nécessaire à l'aide d'une chaudière à gaz ou à mazout. Les processus qui nécessitent de grandes quantités d'eau chaude, tels que la séparation des fibres, le lavage des textiles, l'extraction chimique ou l'évaporation de solutions concentrées, nécessitent une température élevée. Il est important de noter que la disponibilité des ressources géothermiques varie selon les régions et nécessite une réflexion approfondie avant de décider d'utiliser ou non cette ressource énergétique pour les besoins industriel [13].

1.2.3 Energie éolienne

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, créée par les différences de température et de pression dans l'atmosphère qui génèrent les vents. Les éoliennes peuvent convertir cette énergie cinétique du vent en énergie électrique utilisable.

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure 1-12). L'énergie éolienne est une énergie 'renouvelable' non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [18].

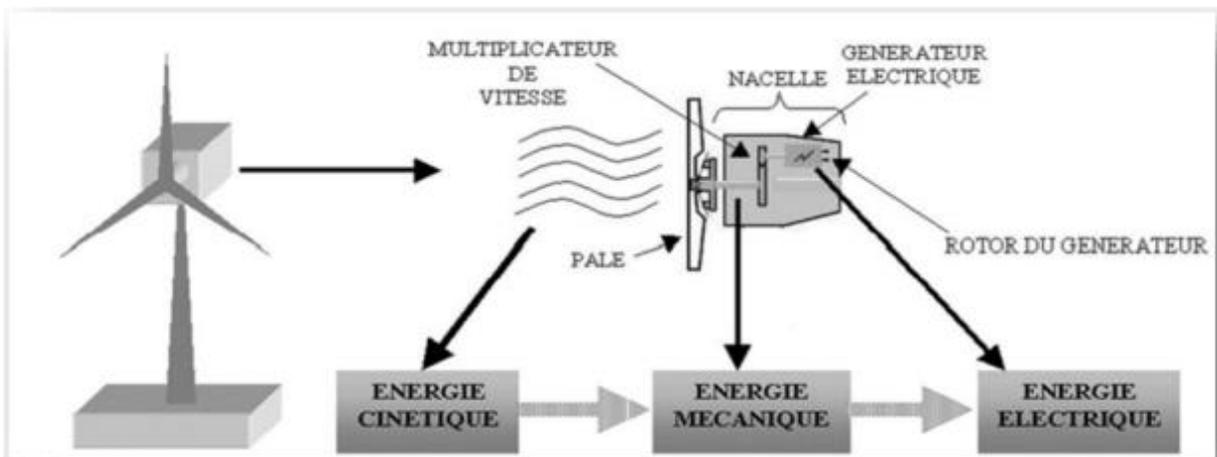


Figure 1-12 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [18].

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière [19].

1.2.3.1 Différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

- Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières à être développées pour la production d'électricité. Contrairement aux éoliennes à axe horizontal, elles ont l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, ce qui facilite leur accessibilité pour la maintenance et la réparation. Cependant, les éoliennes à axe vertical ont des rendements moins élevés que les éoliennes à axe horizontal, ce qui les rend moins populaires dans les grands parcs éoliens.

- Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont inspirées de la technologie des moulins à vent traditionnels, et sont composées de pales aérodynamiques profilées, similaires aux ailes d'un avion. Le nombre de pales peut varier entre 1 et 3, avec le rotor tripale étant le plus courant car il offre un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation de l'éolienne. Les éoliennes à axe horizontal sont actuellement les plus répandues dans les parcs éoliens à grande échelle [20].

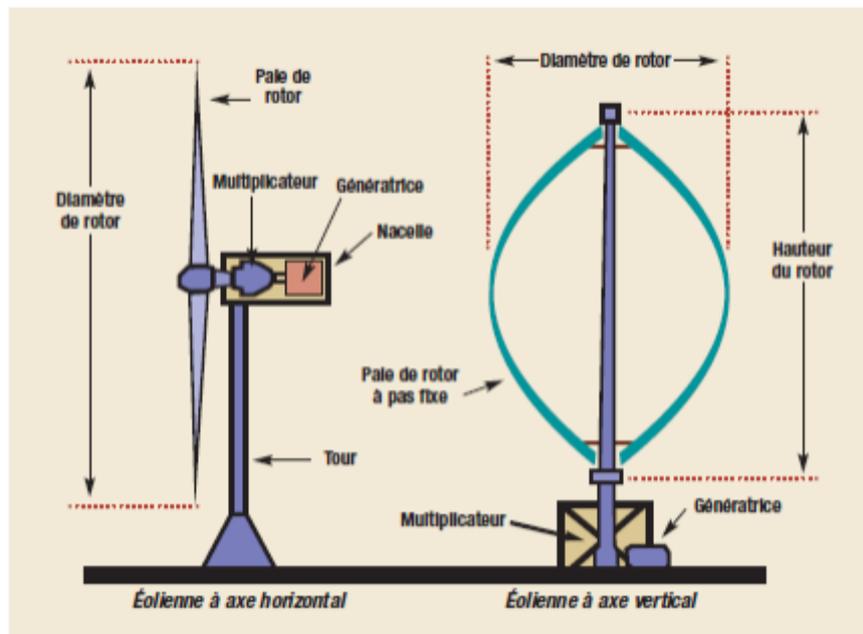


Figure 1-13 : Schéma d'un dispositif éolien à axe verticale et horizontale [6].

1.2.3.2 Ressources éoliennes de l'Algérie

L'Algérie est un très vaste pays caractérisé par une bande côtière peuplée, limité par la méditerranée au nord et l'atlas saharien au sud. Le grand sud, qui représente plus de 90% du territoire, est caractérisé par un climat aride et des populations éparses. Vu le coût élevé du transport de l'énergie vers les régions isolées, les installations éoliennes autonomes sont mieux adaptées et plus viables pour couvrir les besoins énergétiques des régions du sud de l'Algérie. Toute fois, Cette ultime étape qu'est l'application éolienne, ne peut se faire sans l'étude préalable de la source d'énergie qui est le vent.

La carte de la vitesse annuelle moyenne du vent de l'Algérie, présentée en (figure 1-14), a permis une première identification des sites ventés.

Le gisement éolien est plus important au Sud qu'au Nord, plus particulièrement, dans la région du Sud-ouest limité par Timimoune, In Salah et Tamanrasset où la vitesse dépasse 6m/s à la hauteur de 30 m au dessus du sol [20].

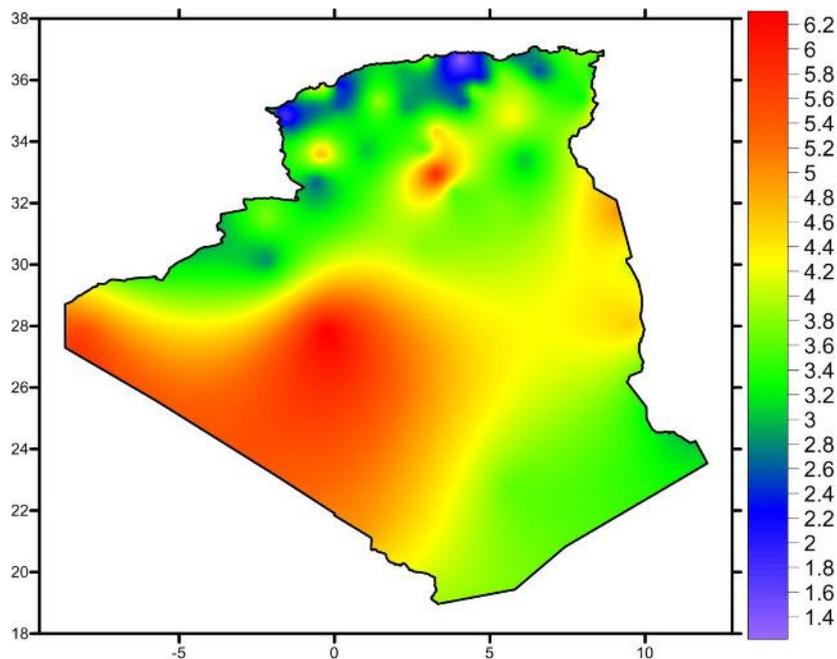


Figure 1-14 : Carte de la vitesse annuelle moyenne de vent dans l'Algérie à 30 m du sol [20].

1.2.3.3 Applications éolienne

- La première ferme éolienne en Algérie (Kabertène la wilaya d'Adrar)

La ferme éolienne de Kabertène (wilaya d'Adrar) de production d'électricité constitue un modèle réussi en matière d'exploitation des énergies propres et renouvelables, estiment les responsables locaux du secteur de l'Energie. Implanté dans la zone de Kabertène, sur le territoire de la commune de Tissabit (80 km Nord d'Adrar), ce projet, fruit d'un partenariat Algéro-français et premier du genre à échelle nationale, est une station expérimentale représentant un modèle réussi en matière d'exploitation de l'énergie éolienne pour la production de l'électricité.

Il se compose de 12 éoliennes tripales G52 (ventilateurs) d'une puissance de 850 kW chacune, installées sur la base d'études techniques et de terrain, tenant compte des courants de vents qui caractérisent la région, cette centrale assure une production alternative propre et renouvelable de 10 mégawatts d'électricité, intégrée au réseau électrique pour le renforcement des capacités d'alimentation en énergie de la wilaya d'Adrar [22].

Le parc éolien de Kabertène a été construit par le consortium algéro-français Cegelec, tandis que la partie études, génie civil et sous-traitance a été confiée à un consortium composé des filiales de Sonelgaz Credeg, Inerga, Etterkib et Transex. Ce projet a créé 12 opportunités d'emploi [23].



Figure 1-15 : La ferme éolienne de Kabertène (wilaya d'Adrar) [22].

- L'aérogénérateur d'Adrar 50 ans d'existence

A l'intérieur de la station de l'Institut national de recherche agronomique (INRA) d'Adrar, se dresse une éolienne qui a 50 ans d'existence (figure 1-16). Constitué d'un mat de 24 mètres surmonté d'une hélice à trois pales d'un diamètre de quinze mètres, elle a été installée en 1953 par « le Service de la Colonisation et de l'Hydraulique » relevant des militaires, qui contrôlaient les territoires du Sud algérien [24].



Figure 1-16 : Aérogénérateur (INRA - Adrar) [24].

- Production de l'hydrogène à partir de l'énergie éolienne

Des travaux ont été menés pour l'estimation de l'hydrogène produit à partir de l'énergie éolienne pour l'Algérie, les principaux résultats obtenus sont présentés pour sept sites, à savoir, Béchar, Hassi-Messaoud, In Amenas, In Salah, Timimoune, Tindouf et Adrar (figure 1-17).

La méthodologie proposée permet l'estimation de la quantité d'hydrogène produite sur un site choisie en fonction des données de vent, des caractéristiques de l'éolienne et de l'électrolyseur sélectionnés. Inversement, En fonction des besoins en hydrogène, il est possible de choisir l'éolienne et l'électrolyseur adaptés aux sites sélectionnés [21].

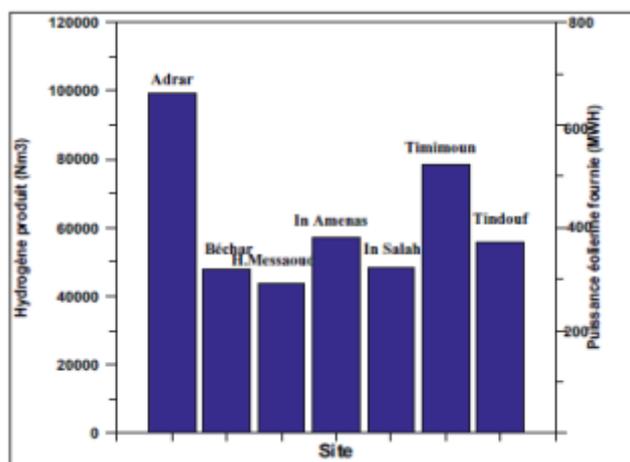


Figure 1-17 : Taux d'hydrogène produit et puissance éolienne fournie par une éolienne de 250 kW [21].

1.2.4 Energie de biomasse

L'énergie de la biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire, c'est l'ensemble de la matière organique d'origine biologique, qu'elle soit végétale ou animale par exemple, les plantes et les animaux sont de la biomasse, ainsi que les matériaux qu'ils produisent, tel le bois et les déchets. La biomasse est une énergie renouvelable tant que sa consommation ne dépasse pas l'accroissement biologique. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, ou bien après de nouvelles transformations chimiques biocarburant [25].

Cette filière a atteint en 2012 (326,2 TWh exactement), la part de l'électricité à partir de la biomasse dans la production d'électricité mondiale est de 1,4 % et de 6,9 % dans la production d'électricité mondiale d'origine renouvelable [26].

Cette énergie est divisé en trois catégories sont :

- Bioénergie.
- Biogaz.
- Biocarburant.

1.2.4.1 Bioénergie

Bioénergie est une forme d'énergie renouvelable issue de la transformation de la biomasse en chaleur. Elle est formée de l'ensemble des organismes vivants sur les continents et dans les océans, les microorganismes, les plantes et les animaux.

La bioénergie présente plus de 10% de l'utilisation globale d'énergie.

La bioénergie peut être produite à partir des déchets végétaux ou autres provenant de l'agriculture et de l'industrie agroalimentaire, une source de biomasse très économique. Il est aussi possible d'obtenir cette énergie par la transformation des cultures destinées à cet usage.

La bioénergie en tant qu'énergie renouvelable, et de part l'impact de son utilisation dans la participation à la lutte contre les effets néfastes des changements climatiques, présente un intérêt certain pour un pays comme l'Algérie [27].

1.2.4.2 Biogaz

Le biogaz est une technologie universelle pour la production un combustible inépuisable ; elle obtenue par la fermentation des matières organique animales ou végétale en l'absence d'oxygène par un processus est appelé méthanisation.

La méthanisation est une procède de digeste anaérobie des résidus animale ou végétale pour la production du gaz qui constitué essentiellement de méthane (CH_4 : 50 à 80 %) et de dioxyde de carbone (CO_2 : 20 à 50 %) [28].

- Utilisation de biogaz en Algérie

L'utilisation du biogaz en Algérie remonté à 1940. Son exploitation avait permis la mise en marche des phares et des bouées qui ont illuminés toute la côte algérienne.

C'est surtout grâce aux travaux de deux chercheurs DUCCELLIER et ISMAN que ce biocombustible convertible en toute forme d'énergie (chaleur, électricité, carburant...) a été exploité.

Un premier digesteur fût construit à l'Institut National Agronomique d'El Harrach et en 1948 on assiste à la mise en marche de la première voiture expérimentale au niveau africain.

En 1951, ces mêmes auteurs ont conçu un tracteur « Caterpillar » dont le moteur présentait une puissance supérieure à celui fonctionnant à l'essence.

Chapitre 1 : Généralités sur les énergies renouvelables et ces applications en Algérie

Un autre digesteur, constitué de 03 cuves de 14 m³ non enterrées en béton mince vibré et armé a été construit en 1953 à l'Ecole d'Agriculture de Guelma. Le biogaz était à usage domestique, (cuisine et chauffage de l'école qui comptait près de 80 personnes).

En ce qui nous concerne, ce n'est qu'en 1984 que le Centre de Développement des Energies Renouvelables à Bouzaréah a relancé les recherches dans ce domaine à travers la réalisation d'un digesteur pilote à Bouzaréah et de deux autres, l'un à Igli (Bechar) et l'autre au parc zoologique de Ben Aknoun. Ces premières tentatives de recherche ont été redynamisées, en 2000, par l'équipe de recherche Biogaz de la Division Bioénergie et Environnement.

Le biogaz constituerait un très bon substitut au bois de chauffe et un important soutien aux programmes nationaux de lutte contre la déforestation et la désertification. Le digestat récupéré serait d'un apport certain pour l'émergence de l'agriculture de montagne et vivrière contribuant ainsi à l'amélioration des conditions de vie des populations isolées dans le cadre d'un développement durable.

Par ailleurs, l'utilisation de la biométhanisation pour le traitement et la valorisation énergétique des effluents industriels et des déchets urbains est une orientation qui nous permettrait de solutionner le problème des déchets organiques et d'assainir l'environnement. En fin, le recours au biogaz en Algérie, n'est aucunement une action dérisoire ou contradictoire, vu les richesses du pays en hydrocarbures, bien au contraire cette technologie permettrait d'instaurer une société qui sera basée sur le recyclage et non plus sur le gaspillage [28].



Figure 1-18 : Dispositif expérimental de production de biogaz, division Bioénergie et Environnement, CDER.

1.2.4.3 Biocarburant

L'autre atout de la biomasse est la possibilité de fabriquer des biocarburants. Il en existe deux types : les éthanol et les biodiesels. Les éthanol, destinés aux moteurs à essence, sont issus de différentes plantes comme le blé, le maïs, la betterave et la canne à sucre. Le procédé consiste à extraire le sucre de la plante pour obtenir de l'éthanol après fermentation.

Quant aux biodiesels, ils sont extraits des oléagineux (colza, tournesol, soja etc) Les esters d'huile obtenus peuvent alors être mélangés au gazole.

En règle générale, ces biocarburants sont mélangés aux carburants classiques, essence et gazole. Ils entraînent alors une petite diminution des rejets de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone, gaz responsable de l'effet de serre. Mais ces biocarburants ont un énorme inconvénient ; ils occupent des surfaces agricoles au détriment des cultures vivrières.

Ces combustibles ont différentes applications. Dans les zones rurales, ils peuvent alimenter les moulins mécaniques ou les systèmes d'électrification à petite échelle. Dans les villes, les biocarburants sont particulièrement employés dans le secteur des transports où ils contribuent à réduire les émissions de gaz à effet de serre [27].

1.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous présentons les types d'énergies renouvelables et leurs applications en Algérie. L'Algérie a un grand potentiel en énergie solaire et c'est une opportunité pour la transition énergétique.

L'énergie solaire photovoltaïque est une technologie prometteuse pour la production d'électricité, et l'Algérie l'intègre dans son programme national de développement des énergies renouvelables. Le développement des énergies renouvelables peut avoir des avantages économiques et environnementaux importants en consommant des coûts à long terme et des émissions de gaz à effet de serre.

Cela peut servir d'exemple de la vie quotidienne pendant une période de transition plus permanente.

Chapitre 2 :

Études antérieures

sur le dimensionnement

photovoltaïque autonome

2.1 Introduction

Le présent chapitre se penche sur les études antérieures relatives au dimensionnement des systèmes photovoltaïques autonomes. Cette analyse approfondie de la littérature scientifique vise à rassembler et à synthétiser les connaissances accumulées, offrant ainsi une base solide pour l'élaboration de nouvelles méthodologies et approches de dimensionnement dans le domaine.

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome représente un défi complexe nécessitant une compréhension approfondie des multiples paramètres et variables en jeu. Les études antérieures ont grandement contribué à l'avancement des connaissances dans ce domaine en explorant différents aspects du dimensionnement, tels que l'optimisation de la taille des panneaux solaires, le dimensionnement des batteries, des régulateurs de charge et des onduleurs.

Par conséquent, cette revue de la littérature, qui s'appuie sur une méthodologie rigoureuse, adopte une approche scientifique afin d'apporter une contribution significative à la compréhension du dimensionnement des installations photovoltaïques autonomes, tout en identifiant les domaines nécessitant davantage de recherche et d'innovation.

2.2 Étude bibliographique

En examinant les modèles de simulation utilisés, les variables considérées, les méthodes d'analyse employées ainsi que les résultats obtenus, nous pourrions évaluer la robustesse et les limites des approches existantes.

Une attention particulière sera portée aux défis et contraintes inhérents au dimensionnement, tels que les variations saisonnières, les conditions météorologiques, les profils de charge électrique, les aspects économiques et les considérations environnementales. En analysant les études antérieures, nous pourrions identifier les recommandations et les meilleures pratiques permettant de relever ces défis.

On a commencé par un article publié en 2009, Shen [29] a présenté l'optimisation de la taille du générateur solaire et de la batterie dans le système SPV. Sous la demande de charge donnée et le LPSP souhaité, les tailles optimales de panneaux solaires et de batteries sont trouvées au minimum coût du système. La méthode est appliquée dans une étude de cas basée sur les conditions météorologiques Malaisiennes. Cela montre que les lieux du système utilisé et les

types de systèmes adoptés auront une incidence sur les résultats d'optimisation de manière significative.

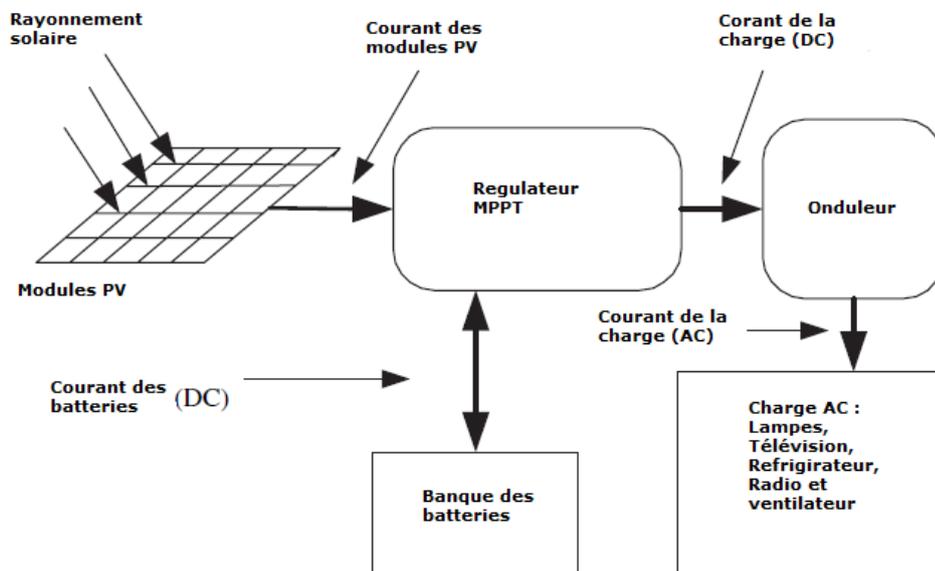


Figure 2-1 : Système photovoltaïque autonome.

Dans la même année, Chel et al. [30] ont présenté une méthodologie pour évaluer la taille et le coût des composants du système PV. Cette méthode est basée sur l'analyse du coût du cycle de vie (LCC), le coût en capital (USD/kWP) et le coût unitaire de l'électricité (USD/kWh) qu'ont été déterminés pour les systèmes PV et ils étaient appliqués sur le système PV autonome (SAPV) et le système PV intégré au bâtiment (BIPV). Comme ils ont étudié l'effet du crédit carbone sur l'économie du système PV et ont montré que la réduction du coût unitaire de l'électricité de 17 à 19 % et de 21 à 25 % pour les systèmes SAPV et BIPV, respectivement.

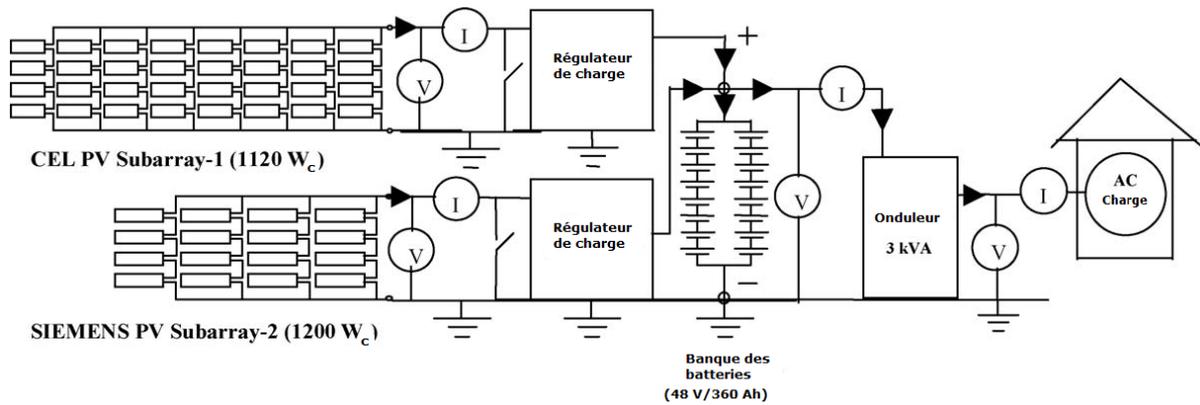


Figure 2-2 : Schéma du système SAPV étudié avec deux types des modules PV.

Dans un mémoire de fin d'étude et pour l'obtention de diplôme d'ingénieur présenté en 2009 par Melle HENNOUS Chahrazet et Melle AIT-ALLALA Kahina [31], ces derniers ont dimensionné un système photovoltaïque autonome pour l'alimentation de l'éclairage et les micros ordinateurs de la Faculté Génie Électrique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Elles ont constaté que cette installation photovoltaïque peut être possible du point de vue énergétique, mais elle ne peut pas être intéressante d'un point de vue économique.

En 2010, G. Notton et al. [32] ont décrit et appliqué une méthodologie de dimensionnement optimal pour les systèmes photovoltaïques (PV) connectés au réseau, en tenant compte de divers facteurs tels que la technologie et l'inclinaison du module PV, le type d'onduleur et l'emplacement. Ils ont utilisé un modèle pour décrire l'efficacité de différentes technologies de modules PV, notamment m-Si, p-Si, a-Si et CIS. L'étude a été menée sur des stations météorologiques en Bulgarie, en Corse et en France. Les auteurs ont constaté que le principal paramètre affectant le dimensionnement était la courbe de rendement de l'onduleur, l'influence de la technologie du module PV étant moins importante, sauf pour les modules photovoltaïques amorphes, pour lesquels des remarques particulières ont été faites. De plus, l'inclinaison du système PV avait un impact significatif sur les performances, en particulier lorsque l'onduleur était sous-dimensionné par rapport à la puissance crête des modules PV. Dans l'ensemble, les auteurs ont développé une méthodologie complète pour optimiser le dimensionnement des systèmes photovoltaïques connectés au réseau qui prend en compte plusieurs facteurs pouvant affecter leurs performances.

Deux années après, Kaldellis et al. [33] ont développé une méthodologie technico-économique intégrée pour l'évaluation des systèmes autonomes hybrides éolien-photovoltaïque.

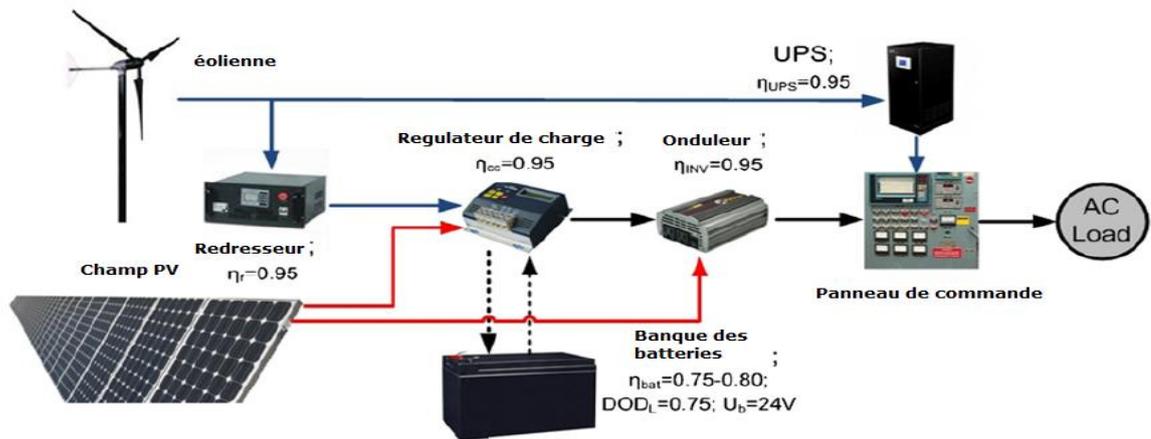


Figure 2-3 : Configuration des systèmes autonomes hybrides éolien-photovoltaïque.

L'objectif était d'identifier les configurations optimales pour les consommateurs éloignés à l'aide de critères de performance économique. Les chercheurs ont appliqué leur modèle d'évaluation à quatre zones représentatives du territoire grec avec différentes caractéristiques de potentiel éolien. Ils visaient à obtenir des configurations optimales basées sur un investissement initial minimum, un coût total sur 10 ans et sur 20 ans. L'étude a examiné des systèmes autonomes basés sur des sources d'énergie renouvelables (SER) qui utilisent l'énergie éolienne ou solaire et le stockage d'énergie, ainsi que des configurations hybrides qui exploitent à la fois le potentiel éolien et solaire. Les configurations hybrides se sont avérées réduire considérablement la capacité de stockage d'énergie et améliorer les performances économiques du système.

Selon les résultats obtenus, la solution hybride éolien-photovoltaïque proposée a été favorablement comparée à toutes les autres alternatives énergétiques autonomes. L'étude a montré la capacité des systèmes hybrides à s'adapter même dans des zones où le potentiel SER local n'est pas nécessairement de haute qualité. Dans l'ensemble, l'étude visait à fournir des informations sur la configuration optimale des systèmes d'alimentation autonomes pour les consommateurs éloignés, en tenant compte des critères de performance économique.

Le travail de recherche mené par Kazema et al. [34] en 2013 a proposé un dimensionnement optimal d'un système PV autonome pour régions éloignées de la zone de Sohar à Oman. L'optimisation a été menée en termes d'angle d'inclinaison du générateur photovoltaïque ainsi que la taille des sources d'énergie du système. Des Méthodes numériques d'optimisation de l'angle d'inclinaison du module PV, de la taille du générateur PV et de la batterie de stockage capacité ont été mises en œuvre à l'aide de MATLAB. Les résultats ont montré que pour la zone de Sohar l'angle d'inclinaison d'un générateur photovoltaïque doit être ajusté deux fois par an lorsque le générateur photovoltaïque doit être incliné à 49° dans la période du 21/09 au 21/03 (n

= 255–81), alors qu'il doit être horizontal (l'angle d'inclinaison est nul) dans la période du 21/03 au 21/09 (n = 81–255). Cet ajustement va augmenter l'énergie collectée par le générateur à 20.6%. Quant au système PV taille, les résultats montrent que le rapport de dimensionnement du générateur photovoltaïque pour Oman est de 1.33 tandis que le rapport de dimensionnement pour la batterie est de 1.6. Le coût de l'énergie générée par le système proposé est de 0,196 USD/kWh.

Dans la même année, l'article proposé par Benyahia et al. [35] présente un schéma simple d'un circuit basé sur un supercondensateur (RC) qui est modélisé et caractérisé à l'aide de méthodes expérimentales. Des simulations informatiques et des résultats expérimentaux ont été comparés pour démontrer la précision du modèle adopté. L'article considère ensuite un exemple de système autonome hybride photovoltaïque/supercondensateur. Un modèle dynamique du composant du système photovoltaïque est développé et validé avec des résultats expérimentaux. De plus, la commande de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour le photovoltaïque et la commande de l'état de charge (SOC) du supercondensateur sont traitées. À l'aide de MATLAB/Simulink, un modèle de simulation pour le système énergétique hybride est développé sur la base des modèles de composants dynamiques. Le coût des composants PV dépend du prix unitaire et de la quantité requise. Il comprend les panneaux solaires, les onduleurs, les batteries, et autres composants nécessaires. Les prix peuvent varier selon le fournisseur, la qualité et la quantité. Obtenir des devis ou consulter des installateurs qualifiés permet d'obtenir une estimation précise du coût.

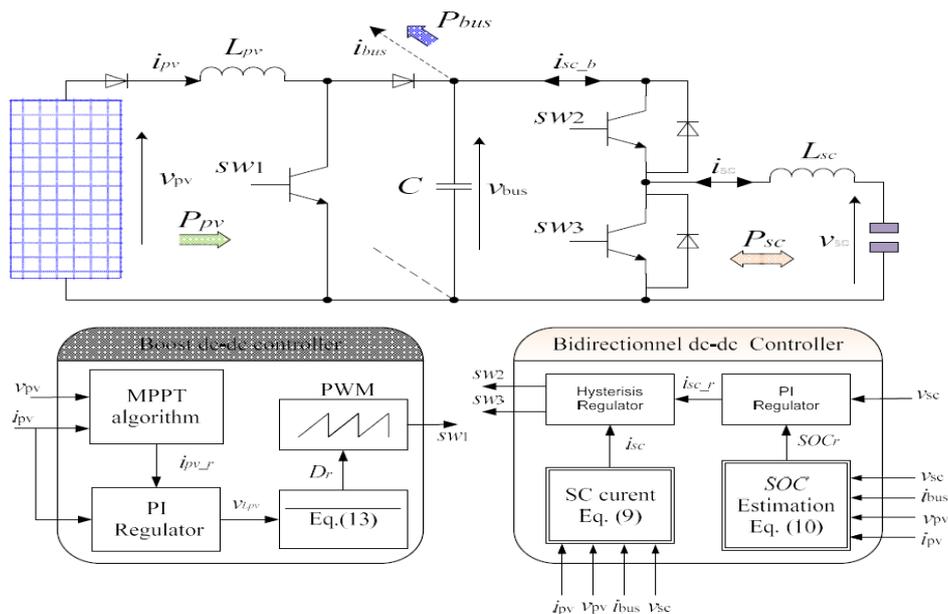


Figure 2-4 : Schéma du système de contrôleur hybride panneau PV et supercondensateur.

Chapitre 2 : Études antérieures sur le dimensionnement photovoltaïque autonome

Dans son mémoire présenté en 2013 [36], Abdelmadjid Bensaha a étudié une station solaire photovoltaïque autonome pour alimenter une maison située dans un site isolé à Bechar. La méthode détaillée de dimensionnement PV a aidé pour la validation des résultats trouvés par simulation où le logiciel TRNSYS. La simulation a montré qu'il y a des déficits de couverture de la charge proposée, c'est pour cela que il a modifié les valeurs de dimensionnement de tel sorte que le système photovoltaïque couvre la charge, et comme il a constaté que le déficit est pendant la nuit il a proposé de modifier le nombre des batteries par l'ajout de 4 batteries.

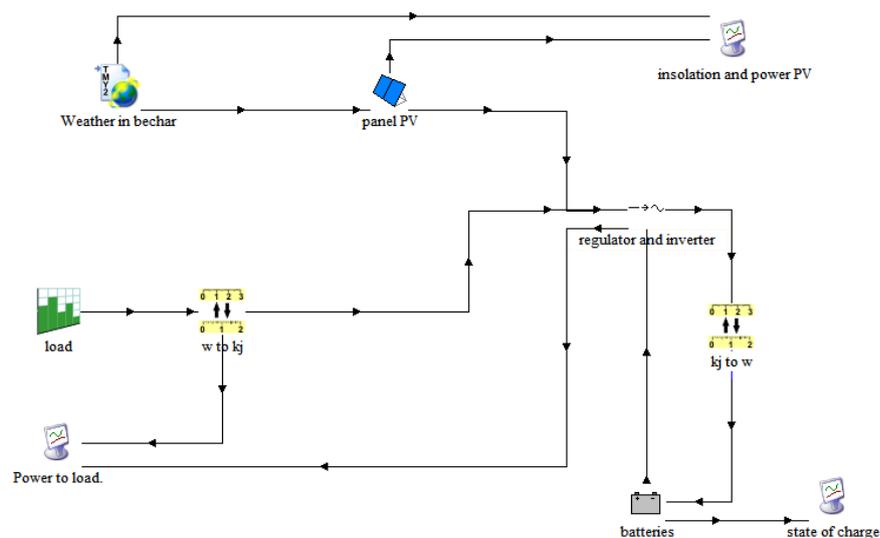


Figure 2-5 : Schéma de conception sous TRNSYS de la station photovoltaïque.

Après une année, Ahmed et al. [37] ont proposé une nouvelle technique d'optimisation pour concevoir des systèmes photovoltaïques autonomes pour répondre à la demande de charge isolée. La technique proposée est basée sur l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles (ABC) et vise à optimiser le coût du système PV, y compris les modules photovoltaïques, la banque de batteries, le contrôleur de chargeur de batterie et l'onduleur. Pour ce faire, les auteurs ont défini deux fonctions objectives : la première est de maximiser la puissance de sortie du module PV, et la seconde est de minimiser le coût du cycle de vie (LCC) du système. L'analyse a été réalisée à l'aide de données recueillies dans la ville d'Helwan, en Égypte, y compris le rayonnement solaire mesuré et la température ambiante.

En 2014, Guzmán et al. [38] présentent un algorithme de contrôle de charge prioritaire pour une gestion optimale de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes. Dans de tels systèmes, il n'y a pas de connexion au réseau, et le générateur solaire et le groupe de batteries doivent être soigneusement dimensionnés pour répondre à la demande d'énergie pendant une période de temps donnée. Les batteries sont considérées comme un composant faible du

Chapitre 2 : Études antérieures sur le dimensionnement photovoltaïque autonome

système, représentant une part importante du coût total et sont généralement remplacées une ou deux fois pendant la durée de vie du système PV. Pour améliorer l'efficacité de la gestion de l'énergie et garantir l'approvisionnement énergétique des charges critiques, les auteurs ont développé un algorithme de contrôle de charge prioritaire. L'algorithme gère les charges du système et le stockage de la batterie de manière à optimiser la gestion de l'énergie, à augmenter la fiabilité du système et à améliorer la satisfaction de l'utilisateur final. L'article décrit un modèle de système PV autonome utilisé pour le développement de l'algorithme de contrôle de charge prioritaire, et explique comment l'algorithme a été mis en œuvre. Les résultats de plusieurs simulations de scénarios de test sont présentés et discutés pour démontrer l'efficacité de l'algorithme de contrôle de charge prioritaire dans l'optimisation de la gestion de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes. Dans l'ensemble, le document apporte une contribution précieuse à la conception et à l'optimisation de systèmes photovoltaïques autonomes pour un approvisionnement énergétique fiable et efficace.

En 2015, Irwana et al. [39] ont effectué une évaluation d'un système photovoltaïque autonome (SAPV) à l'aide du logiciel PVSYST. Ils ont utilisé un logiciel de simulation pour développer un système SAPV fiable et prédire sa production d'énergie annuelle. Les auteurs ont simulé la configuration du système SAPV à l'aide du logiciel d'outils PVSYST et ont déterminé la quantité totale d'énergie électrique générée par le générateur photovoltaïque qui alimente la charge, ainsi que divers types de pertes de puissance. Ils ont également calculé la taille optimale de la configuration du système SAPV et le flux d'énergie total à travers l'ensemble du système. En utilisant le logiciel PVSYST, les chercheurs ont pu prédire l'énergie fournie à la charge pour toute l'année. Globalement, leur étude visait à évaluer la faisabilité et l'efficacité d'un système SAPV à l'aide d'un logiciel de simulation.

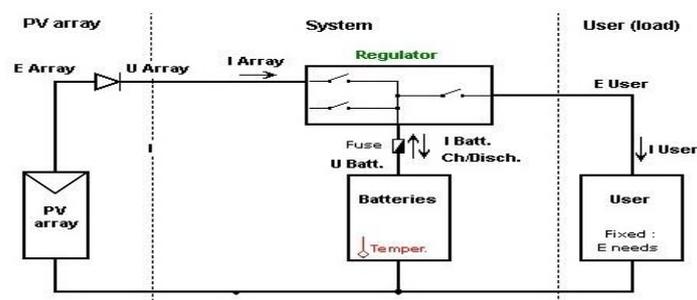


Figure 2-6 : Configuration du système SAPV.

Dans un mémoire de master présenté en 2015, Mr NECHMI Abdelouhab [40] a fait un aperçu sur le système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable à Bouira. Dans cette méthode, il a abordé le calcul de l'énergie consommée par la pompe. L'étude de dimensionnement du système photovoltaïque comporte d'abord le calcul le nombre des

panneaux solaire nécessaires pour couvrir l'énergie électrique requise, et ensuite il a étudié l'état de leur installation à travers le gisement d'énergie par rapport à la région, et de dimensionnement des batteries pour stocker l'énergie pour satisfaire les besoins énergétiques dans les jours non éclairés.

Une année après, dans un mémoire, Mr Hichem DAHMANI et Mr Mohamed BOUZAIA [41] ont dimensionné un système photovoltaïque dédié à une habitation situé dans la wilaya de Bejaïa. Pour ce faire, ils ont d'abord estimé l'énergie électrique afin d'élaborer des profils de charge pour chaque saison permettant de déterminer la consommation journalière la plus élevée, ensuite ils ont fait une comparaison économique entre le coût de cette installation PV et celle alimentée par la société SDE (société de distribution de l'électricité et du gaz). Le coût de l'installation photovoltaïque est moins couteux comparé à celui de la société SDE, ils concluent que le système photovoltaïque est fiable et rentable avec un coût raisonnable par rapport à une installation conventionnelle.

Dans la même année, l'article de Nordin et al. [42] a proposé une nouvelle méthode d'optimisation pour la conception et le dimensionnement de systèmes photovoltaïques autonomes. Voici les principales étapes de leur méthode :

- Déterminer le profil de demande de charge : les auteurs ont utilisé un profil de charge typique d'une zone rurale en Malaisie comme référence.
- Calculer la demande énergétique totale de la charge : Les auteurs ont calculé la demande énergétique totale du profil de charge dans une période spécifique (dans leur cas, un an).
- Déterminez la probabilité de perte d'alimentation électrique (LPSP) et l'autonomie de la batterie : la LPSP est la probabilité que le système ne puisse pas répondre à la demande de charge en raison d'un rayonnement solaire ou d'une capacité de batterie insuffisante. Les auteurs ont défini le LPSP comme référence et ont déterminé l'autonomie requise de la batterie (c'est-à-dire le nombre de jours pendant lesquels la batterie devrait être en mesure d'alimenter la charge sans aucun apport solaire) sur la base du LPSP.
- Dimensionner le générateur photovoltaïque et la capacité de la batterie : les auteurs ont utilisé une approche itérative pour déterminer toutes les combinaisons possibles de générateur photovoltaïque et de capacité de la batterie qui répondent aux exigences du LPSP et de l'autonomie de la batterie. Ils ont calculé le coût total de chaque combinaison et sélectionné la conception optimale en fonction du coût actualisé de l'énergie (LCOE) le plus bas.

- Simuler et comparer la méthode proposée avec des recherches antérieures : les auteurs ont simulé leur méthode proposée en utilisant les données météorologiques de la Malaisie et l'ont comparée à trois études de recherche antérieures sélectionnées. Ils ont évalué les performances de chaque méthode en termes de LPSP, LCOE et de fiabilité du système. Dans l'ensemble, la nouvelle méthode d'optimisation des auteurs vise à fournir une solution rentable et fiable pour la conception de systèmes photovoltaïques autonomes dans les zones rurales, en tenant compte du profil de demande de charge spécifique et des conditions météorologiques de l'emplacement. Les auteurs ont ensuite comparé les résultats obtenus à l'aide de l'algorithme ABC avec ceux obtenus à l'aide de l'algorithme génétique (AG) pour évaluer l'efficacité de la technique proposée. Enfin, ils ont testé la validité de l'algorithme ABC dans un endroit différent, la ville de Zagazig, et ont constaté qu'il était encore plus optimal que l'algorithme GA. Dans l'ensemble, les résultats de l'étude ont montré que l'algorithme ABC proposé est une technique viable et efficace pour optimiser la conception de systèmes photovoltaïques autonomes pour électrifier des sites ruraux en Égypte.

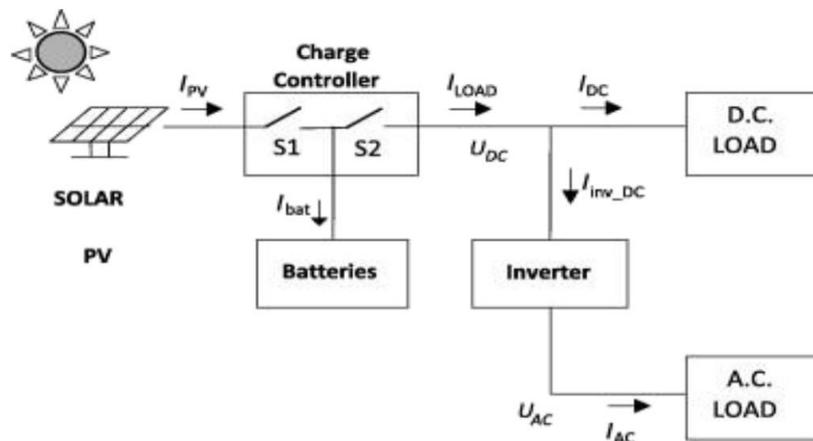


Figure 2-7 : Composants du système PV autonome.

En 2016, Doroudchi et al. [43] ont appliquée une programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP) pour optimiser le coût énergétique d'une maison unifamiliale avec stockage d'énergie par batterie pour quatre différents scénarios pour les installations de panneaux solaires. L'optimisation est effectuée sur une échelle mensuelle pour une maison à Helsinki, en Finlande. Les résultats numériques indiquent qu'il est raisonnable d'intégrer un stockage dans les systèmes PV connectés au réseau dans les applications résidentielles et représentent l'impact de la taille de la batterie sur le coût énergétique mensuel de la maison.

Le mémoire de Oualid Mokhtar proposé en 2016 [44] a fait élaboration d'un programme d'aide au diagnostic pour un système photovoltaïque autonome à Alger, il a utilisé la norme internationale CEI61724 qui fournit des recommandations pour le suivi et l'analyse des performances électriques des systèmes photovoltaïques pour le diagnostic des défauts. Cette analyse est utilisée pour évaluer l'impact des différents défauts sur les performances du champ PV.

En 2017, Osuna et al. [45] ont développé une application de bureau conviviale appelée ePV-Trainer à l'aide du logiciel LabVIEW™. Le logiciel est conçu pour aider les utilisateurs à dimensionner les systèmes photovoltaïques autonomes et connectés au réseau, et il peut être utilisé avec des données provenant de n'importe quel endroit dans le monde. Le but de l'article est de décrire et d'évaluer le fonctionnement du logiciel, et l'étude a compris des exemples pratiques pour vérifier que les données du programme correspondent aux calculs manuels. Le logiciel fournit des estimations de la production d'électricité pour les systèmes photovoltaïques sur la base de paramètres réels de rayonnement solaire et de température. L'ePV-Trainer a été développé spécifiquement à des fins éducatives.

En 2017, Okoye et al. [46] ont proposé un nouveau modèle d'optimisation basé sur la programmation en nombres entiers pour dimensionner et concevoir des systèmes photovoltaïques autonomes dans le secteur résidentiel. Le modèle proposé prend en compte les données spécifiques au site et détermine non seulement le nombre optimal de modules PV et de batteries, mais évalue également la faisabilité économique du système grâce au coût annualisé. Ils ont évalué l'efficacité du modèle proposé à travers une étude de cas à Bursari, au Nigeria, et l'ont comparé aux générateurs diesel actuellement utilisés. Les résultats ont montré que la mise en place d'un système solaire photovoltaïque était non seulement respectueuse à l'environnement, mais aussi environ 30 % moins chère que les générateurs diesel, avec une économie annuelle d'environ 361 USD par bâtiment résidentiel. Les auteurs ont également fourni des informations managériales précieuses sur l'effet de plusieurs paramètres sur les performances du système PV proposé.

Dans la même année, L'article de AbdulAziz et al. [47] présente une nouvelle méthode d'optimisation appelée « Firefly Algorithm-based Sizing Algorithm (FASA) pour l'optimisation du dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome (SAPV). L'algorithme Firefly (FA) a été utilisé pour sélectionner le modèle de chaque composant du système de manière à optimiser un indicateur de performance technique, c'est-à-dire la probabilité de perte d'alimentation électrique (LPSP). Avant FASA, un algorithme de dimensionnement itératif

(ISA) a été développé pour déterminer les solutions optimales pour l'analyse comparative FASA. Bien qu'ISA soit capable de déterminer des solutions de conception optimales, son temps de calcul peut être très long. Par conséquent, FASA a été introduit pour accélérer l'optimisation du dimensionnement des systèmes SAPV. Deux cas de conception de systèmes PV avec batteries ont été étudiés, à savoir un système avec un contrôleur de charge standard (cas 1) et un système avec un contrôleur de charge basé sur MPPT (cas 2). Les résultats ont montré que la FASA avait réussi à trouver le LPSP optimal dans tous les cas de conception. De plus, FASA a surpassé les algorithmes de dimensionnement avec une intelligence de calcul sélectionnée en produisant le temps de calcul le plus court dans l'optimisation du dimensionnement.

En 2017, Ghaib et al. [48] ont développé une nouvelle méthodologie de conception pour les systèmes d'alimentation photovoltaïque autonomes (SPPS) pour l'électrification rurale. La méthodologie consiste en plusieurs étapes, notamment la prévision de la demande de charge, la caractérisation des performances des panneaux photovoltaïques sur le site d'installation, la sélection de la technologie de stockage d'énergie appropriée et la conception d'une configuration SPPS optimale. De plus, les auteurs ont introduit un nouveau nombre sans dimension pour caractériser les performances des panneaux photovoltaïques à un emplacement particulier. Ils ont ensuite appliqué leur méthodologie à l'électrification de 93 foyers dans une communauté rurale et ont découvert qu'une configuration SPPS comprenant un stockage d'énergie à air comprimé et des super condensateurs était la conception la plus efficace.

En 2018, Melle Meghellet Hanine et Melle Hocine Lynda [04] ont fait contribution à l'étude d'un système photovoltaïque, elles ont donné une description générale sur l'énergie solaire photovoltaïque et elles ont détaillé le principe de la cellule et les différents mécanismes de conversion, et elles ont présenté une description générale sur le système PV et ces différents composants en suite elles ont cerné globalement les différents défauts les plus fréquentes qui affectent négativement au rendement d'un système solaire comme l'orientation et l'inclinaison des modules photovoltaïques, enfin elles ont présenté et montré plus en détails les bonnes décisions à prendre pour installer un dispositif photovoltaïque efficace et comment contourner la problématique d'orientation et l'inclinaison pour l'optimisation de la production.

Dans la même année, Kavadias et al. [49] ont proposé une étude sur l'utilisation de sources d'énergie renouvelables pour la production d'énergie durable, en se concentrant sur le potentiel de l'énergie solaire et son application dans les systèmes d'énergie autonome. L'étude examine l'impact de différentes données d'entrée météorologique sur le processus de dimensionnement

Chapitre 2 : Études antérieures sur le dimensionnement photovoltaïque autonome

des systèmes photovoltaïques autonomes et présente une étude de cas sur un système PV-ES combiné fournissant une autonomie d'énergie dans une zone éloignée de l'île de Rhodes.

En 2018, L'article de Ayop et al. [50] traite l'optimisation du dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome (SAPS) pour un faible coût global sans compromettre la fiabilité. Les auteurs passent en revue sept méthodes de dimensionnement d'un micro-réseau et utilisent la probabilité de perte d'alimentation électrique (LPSP) et le coût du cycle de vie (LCC) pour déterminer la taille optimale du SAPS. Ils ont utilisé également la méthode d'amélioration de la fiabilité (RIM) pour améliorer la fiabilité du système et l'appliquer au bâtiment FKE (Faculty of Electrical Engineering) à UTM (Universiti Teknologi Malaysia), Johor. Le LPSP est la probabilité que le système ne fournisse pas d'électricité pendant une période donnée, et LCC est le coût total de possession et d'exploitation du système sur sa durée de vie. Le RIM proposé améliore la fiabilité du SAPS jusqu'à 77,8 % par rapport au LPSP de 0,812 % avec une augmentation de coût de seulement 4,9 %. La méthodologie de cette étude pourrait être utile pour dimensionner des systèmes photovoltaïques autonomes dans des endroits sans alimentation de secours stable.

En 2018, Giallanza et al. [51] ont mené une analyse à haute résolution pour dimensionner un système autonome hybride photovoltaïque-éolien-batterie qui vise à minimiser le coût annualisé du système tout en satisfaisant à deux contraintes de fiabilité. Les variables de décision étaient la surface photovoltaïque, le rayon de l'éolienne et la capacité de la batterie. Pour évaluer le nombre d'occupants actifs et la consommation d'électricité domestique, ils ont développé un modèle haute résolution basé sur un système d'inférence de logique floue. Pour permettre un dimensionnement plus précis du système, ils ont défini un nouveau paramètre de fiabilité appelé rapport de probabilité de perte saisonnière de charge, qui prend en compte la saisonnalité des données. Ce nouveau paramètre a été utilisé dans le processus itératif en plus de la traditionnelle probabilité de perte de charge.



Figure 2-8 : Schéma du système analysé.

À l'aide de l'environnement MATLAB®, ils ont effectué des simulations pour une habitation domestique située à trois endroits différents en Sicile. Les résultats ont montré que l'introduction du nouveau paramètre a entraîné une amélioration significative de la fiabilité du système tout en augmentant légèrement son coût. Par rapport à la procédure traditionnelle, la méthodologie proposée a amélioré la fiabilité du système de 75 %, démontrant une avancée importante dans la conception plus efficace des systèmes d'énergie renouvelable.

En 2019, Castelo et al. [52] ont proposé une méthode analytique pour dimensionner la puissance nominale de la production photovoltaïque connectée aux nœuds d'un départ de distribution radial. L'objectif de cette méthode est de minimiser les pertes énergétiques totales pendant la période d'insolation journalière, avec une contrainte d'optimisation constituée par le flux d'énergie dans la barre relâchée, conditionnée à l'indépendance énergétique du départ. Le dimensionnement est réalisé à partir de la capacité de production photovoltaïque et des facteurs de charge, calculés dans des intervalles de temps définis dans la courbe de production type d'une unité photovoltaïque raccordée au réseau de distribution. La méthode analytique est basée sur les multiplicateurs de Lagrange et s'appuie sur la méthode de Gauss-Jacobi pour rendre possible la solution du système d'équation résultant. Les auteurs ont évalué cette méthode d'optimisation sur le système de test IEEE 37-bus, en considérant différents scénarios d'intégration de génération. Les résultats montrent le dimensionnement optimal ainsi que les pertes d'énergie liées à la puissance supplémentaire et la localisation de la production photovoltaïque dans des scénarios d'intégration de production distribuée. Dans l'ensemble, cette étude présente une méthode analytique complète pour optimiser le dimensionnement de la production photovoltaïque dans les systèmes de distribution radiale, en tenant compte des pertes d'énergie, de la capacité de production, des facteurs de charge et des contraintes d'optimisation.

En 2019, l'étude de Ridha et al. [01] présente un nouvel algorithme d'évolution différentielle adaptative par mutation (MADE) pour optimiser la configuration des systèmes solaires photovoltaïques hors réseau (SAPV), en considérant trois objectifs contradictoires. L'analyse des performances du système SAPV proposé avec trois types de batteries (plomb-acide, AGM et lithium-ion) montre que la configuration optimale basée sur le plomb-acide à moins de fonction de fitness, de coût de cycle de vie et de coût actualisé de l'énergie, mais une probabilité de perte de charge plus élevée.

En 2019, Bukar et al. [53] ont effectué un examen des stratégies d'optimisation du système et de gestion de l'énergie (EMS) d'un système photovoltaïque et éolien autonome intégré à une pile à combustible. Ils visaient à déterminer la combinaison la plus rentable des composants du

système et à coordonner le flux de puissance des composants du système pour répondre à la demande de charge et à d'autres contraintes. Les auteurs ont analysé et comparé diverses méthodes d'optimisation du système et EMS à partir de plusieurs cas de la littérature, et ont mis en évidence les futures recommandations de recherche et les défis associés. Les auteurs visaient à fournir une plate-forme fondamentale aux chercheurs intéressés par l'amélioration des systèmes d'énergie renouvelable intégrés aux piles à combustible.

Berragui Abdelfettah et Absa Amjed [54] en 2020 ont fait un dimensionnement d'une installation PV dans la région d'Ouargla, ils ont montré que cette région est très favorable pour les projets photovoltaïques. L'étude économique a montré que la fourniture de l'énergie nécessaire aux besoins des abonnés situés à la fin du bout de ligne par les systèmes PV est plus économique et beaucoup moins chère que l'extension du réseau électrique. Du point de vue environnemental, ces systèmes PV permettent de fournir de l'énergie propre vue la quantité considérable d'émission CO₂ évitée dans l'atmosphère.

Un autre mémoire en 2020 présenté par M'HAMMDI Rachida et BENAMRANI Chaima [55] présente une étude techno-économique d'un système photovoltaïque (Maison solaire) sur le site d'Adrar, cette étude basée sur un pré dimensionnement de l'installation en fonction des valeurs moyennes de gisement solaire et la consommation énergétique d'une maison choisie pour les quatre saisons, elles ont présenté les étapes de dimensionnement avec une méthode simple et elles ont fait une simulation technique économique avec logiciel de RETSCREEN, enfin elles ont présenté une analyse des émissions des gaz toxiques pour connaître la contribution de ce système à la préservation des gaz toxiques intervenus.

En 2020, Janardhan et al. [56] ont proposé une étude sur un nouveau système photovoltaïque autonome à onduleur à plusieurs niveaux. Le système a été modélisé et simulé à l'aide de MATLAB, ils ont utilisé un onduleur à cinq niveaux avec une technique de modulation de la largeur d'impulsion sinusoïdale de changement de niveau pour contrôler la commutation de l'onduleur à micro-niveaux. Les résultats expérimentaux correspondent étroitement aux résultats de la simulation et le système à une faible distorsion harmonique totale.

En 2021, Mr. Beneddif Fatima Zohra et Melle. Beldjilali Assmaa [57] ont fait une étude dimensionnelle d'une installation photovoltaïque grâce aux systèmes SCADA, les organisations peuvent contrôler leurs processus industriels soit sur place, soit à distance, et interagir directement avec les équipements, tels que les moteurs, les pompes et les capteurs, à tous les niveaux, et ce depuis un emplacement central. Ces systèmes peuvent parfois contrôler automatiquement des équipements sur la base des données reçues.



Figure 2-9 : Schéma d'Unité d'équipe EESFC.

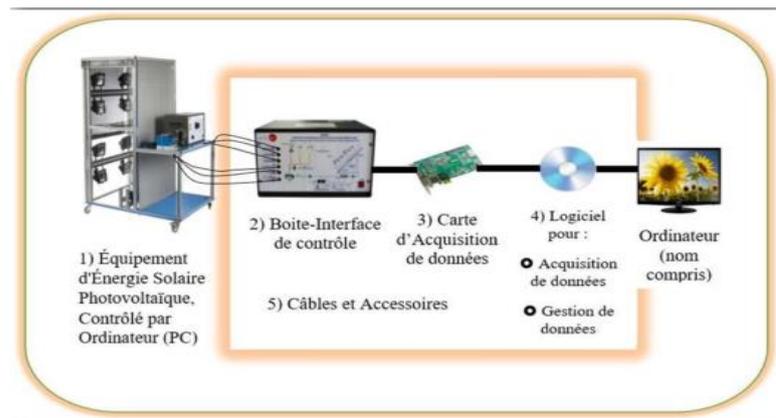


Figure 2-10 : Schéma de principe de la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC).

En 2022, Hamoodi et al. [58] ont proposé une conception et dimensionnement d'un système solaire photovoltaïque dans le bâtiment de laboratoire du Collège technique d'ingénierie / Mossoul pour couvrir ses besoins en énergie électrique et fournit une simulation pour ce travail à l'aide du programme PV * SOL. Les résultats obtenus montrent que l'étude théorique et le logiciel donnent les mêmes résultats. Ils ont également conclu que le système solaire photovoltaïque est très important lors de son application au Collège technique d'ingénierie/Mossoul afin de garantir la continuité de l'alimentation électrique pendant la formation et l'examen des étudiants.

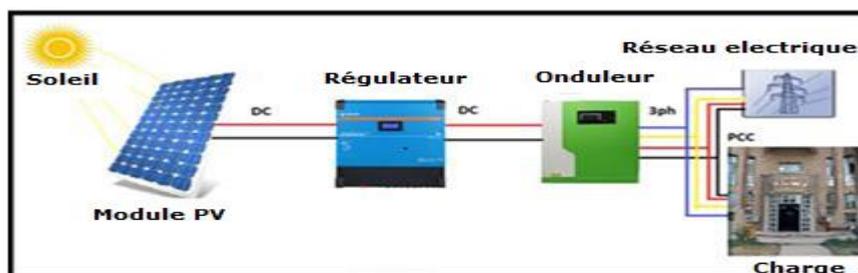


Figure 2-11 : Système solaire photovoltaïque.

En 2022, Mr BENMESSAOUD Younes et Melle BOUTI Fatima [59] ont dimensionné Un système photovoltaïque autonome pour alimenter une maison à Ghardaïa, ils ont fait les dimensionnements avec une interface graphique via un langage de programmation (VISUAL BASIC) et ont fait une comparaison des résultats trouvés qu'ont été fait avec le logiciel commercial (PVSYST), les résultats trouvés sont sensiblement identiques, le programme de dimensionnement a été généralisé à plusieurs autres sites.

Récemment en 2022, Nicoletti et al. [60] ont proposé une étude sur le dimensionnement optimal en termes de coût d'un système de batterie photovoltaïque et d'une pompe à chaleur air-eau pour le chauffage et le refroidissement durables des ménages dans la région méditerranéenne. L'étude introduit une procédure pour déterminer le dimensionnement optimal des composants et effectue des simulations énergétiques à l'aide d'EnergyPlus pour obtenir les données d'entrée requises. Les auteurs ont ensuite utilisé un code de calcul pour modéliser les composants et le système de gestion en fonction des normes. Grâce à une analyse paramétrique qui fait varier la taille des composants, l'étude vise à obtenir la solution optimale pour cinq sites italiens aux caractéristiques climatiques différentes. L'article effectue également une analyse initiale de sensibilité aux coûts qui démontre la forte interdépendance entre les tailles de l'AWHP (Air / water heat pump) et de l'installation photovoltaïque, ainsi qu'entre la taille de l'installation photovoltaïque et celle des batteries. L'étude conclut qu'un dimensionnement combiné est nécessaire pour obtenir des solutions optimales en termes de coût pour le chauffage et le refroidissement durables des ménages.

2.3 Conclusion

En conclusion, ce chapitre constitue une référence précieuse pour notre étude sur le dimensionnement optimal d'une centrale PV autonome, nous sommes en mesure de développer une approche solide et éclairée pour notre propre dimensionnement, contribuant ainsi à l'avancement de l'énergie solaire autonome et durable.

Les études antérieures ont abordé divers aspects du dimensionnement, notamment l'optimisation du nombre de modules photovoltaïques, du nombre de batteries, de la capacité du régulateur de charge et de la capacité de l'onduleur. Elles ont permis de mettre en évidence les modèles de simulation utilisés, les variables prises en compte et les méthodes d'analyse employées.

Grâce à cette analyse approfondie, nous avons pu identifier les forces et les limites des approches existantes. Les recommandations et les bonnes pratiques émergentes constituent des

Chapitre 2 : Études antérieures sur le dimensionnement photovoltaïque autonome

guides précieux pour surmonter les défis associés au dimensionnement, tels que les variations saisonnières, les conditions météorologiques changeantes et les profils de charge électrique fluctuants.

Il est important de souligner que malgré les avancées significatives réalisées dans le domaine du dimensionnement photovoltaïque autonome, des lacunes subsistent. Ces lacunes peuvent porter sur des aspects spécifiques, tels que l'intégration de l'incertitude dans les modèles de dimensionnement ou l'évaluation de l'impact environnemental global des systèmes.

Chapitre 3 :

Energie solaire & Description

du système photovoltaïque

autonome

3.1 Introduction

L'énergie solaire est une forme d'énergie renouvelable qui est produite par le rayonnement du soleil. Elle est considérée comme une source d'énergie propre et durable car elle ne produit pas d'émissions nocives pour l'environnement.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord rappelé quelques notions sur l'énergie solaire, et ensuite nous donnons la description de chaque composant du système photovoltaïque autonome.

3.2 Energie solaire

Le soleil est une source d'énergie pratiquement inépuisable qui émet un rayonnement vers la surface de la Terre, équivalent à environ 8400 fois notre consommation énergétique annuelle. Cela signifie qu'il envoie une puissance instantanée d'environ 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m^2) sur toute la gamme de spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge [61]. Le soleil émet un rayonnement de type électromagnétique. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ 8 minutes et 19 secondes à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s.

Ce rayonnement constitue un spectre continu allant des ultra-violet à l'infra-rouge en passant par le visible ou il émet avec le maximum d'intensité. Cependant, en traversant la chromosphère du Soleil et l'atmosphère de la Terre, les atomes qui les composent absorbent certains photons.

Le spectre alors observable depuis la surface de la Terre est donc un spectre de raies d'absorptions. Ainsi, à la surface de la Terre le rayonnement solaire comprend : 5% d'ultra-violet, 40% de lumière visible et 55% d'infra-rouge, les IR étant porteurs de l'essentiel de l'énergie thermique. Le rayonnement ultra-violet émis par le Soleil est classé en 3 types d'ultra-violet : les UV-A ayant une longueur d'onde de 380 (cette valeur peut varier légèrement selon la source) à 315 nanomètres ($1\text{nm}=1\times 10^{-9}\text{mètre}$), les UV-B dont la longueur d'onde est comprise entre 315 et 280 nm ainsi que les UV-C qui ont une longueur d'onde allant de 280 à 200 nm. Cependant seuls les UV-A et une petite partie des UV-B la surface de la Terre car en traversant l'atmosphère la totalité des UV-C et la majeure partie des UV-B sont soit absorbées, soit réfléchies. Ainsi le rayonnement solaire que nous recevons comprend seulement 5% d'ultra-violet, ces 5% étant composés à 95% d'UV-A et à 5% d'UV-B.

Le rayonnement solaire peut être considéré comme un ensemble de photons, particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée "quantum d'énergie" et notée " ΔE " exprimée par cette relation :

$$\Delta E = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (3-1)$$

h : constante de Planck c'est-à-dire $6,63 * 10^{-34}$ J/s.

c : célérité.

λ : longueur d'onde (en mètre).

Ainsi, les photons composant le rayonnement ultraviolet, du fait de leur longueur d'onde, transportent un quantum d'énergie plus important que les photons composant le rayonnement infrarouge.

L'énergie que transmet le Soleil à la surface de l'atmosphère par rayonnement est égale à 1350 Watts/m^2 (c'est la constante solaire). Cependant, en traversant l'atmosphère, des parties de ce rayonnement sont réfléchies, absorbées ou diffusées, ce qui diminue significativement cette valeur. Cette diminution est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante. Ainsi, l'énergie que nous transmet le Soleil dépend de plusieurs facteurs comme l'épaisseur de l'atmosphère où l'on se trouve ou encore la position du Soleil et sa valeur atteint dans les meilleures conditions entre 900 à 1000 Watts/m^2 .

Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

- L'énergie solaire thermique
- L'énergie solaire photovoltaïque

3.2.1 Energie solaire thermique

Consiste à produire la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité [61].

3.2.2 Energie solaire photovoltaïque

L'utilisation de panneaux solaires permet de produire de l'électricité directement à partir de la lumière. Cette méthode est déjà largement employée dans plusieurs pays, notamment dans ceux qui manquent de ressources énergétiques traditionnelles comme le pétrole ou le charbon [62].

3.3 Description des éléments d'un système photovoltaïque autonome

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont des installations qui utilisent l'énergie solaire pour produire de l'électricité sans avoir besoin d'une connexion au réseau électrique. Ils sont souvent utilisés dans des endroits éloignés où l'accès à l'électricité est limité ou inexistant. Un système photovoltaïque autonome est composé de plusieurs éléments clés qui travaillent ensemble pour produire, stocker et utiliser l'énergie solaire de manière efficace. Dans cette description, nous explorerons les éléments essentiels d'un système photovoltaïque autonome, tels que les panneaux solaires, les régulateurs de charge, les batteries de stockage, les convertisseurs de courant continu en courant alternatif. Comprendre ces composants clés permet de mieux appréhender le fonctionnement et les avantages des systèmes photovoltaïques autonomes [41].

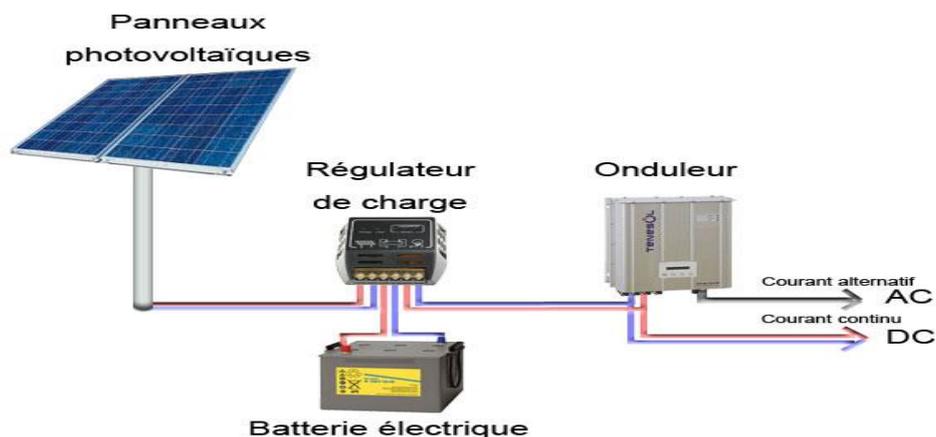


Figure 3-1 : Schéma d'un système photovoltaïque autonome [63].

3.3.1 Générateur photovoltaïque (PV)

Le champ PV est constitué des modules photovoltaïques interconnectés entre eux. Ils transforment la lumière du soleil en courant électrique continu (DC).

3.3.1.1 Cellule solaire

La cellule photovoltaïque est constituée de deux couches de silicium, l'une dopée au bore (P) et chargée positivement, tandis que l'autre est dopée au phosphore (N) et chargée négativement, créant ainsi une jonction P-N avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transfèrent leur énergie aux atomes de la jonction P-N, provoquant ainsi la libération de charges électriques de signes opposés et créant une différence de potentiel.

(ddp). Cette différence de potentiel peut être mesurée entre les bornes positives et négatives de la cellule [62].

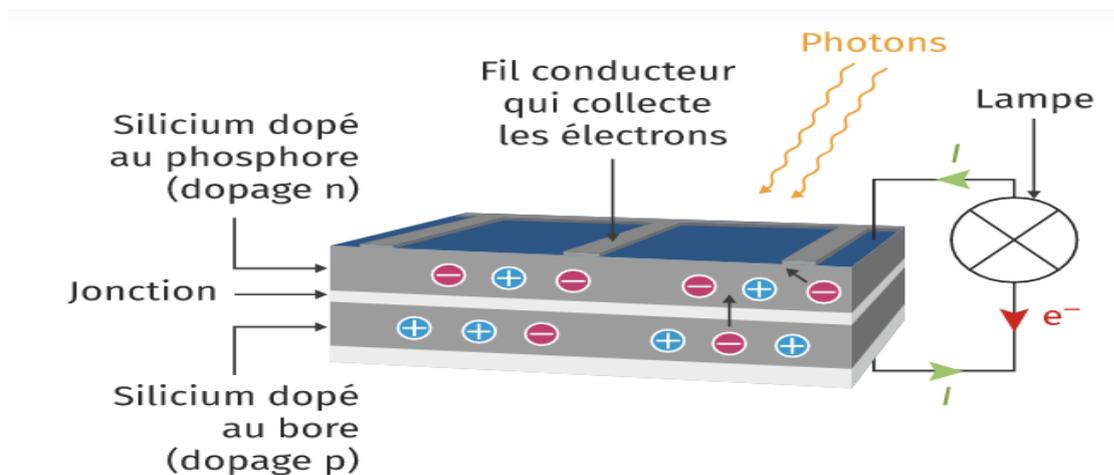


Figure 3-2 : Structure de la cellule et déplacement des porteurs de charge [62].

Au fil des années récents, plusieurs types de cellules photovoltaïques ont été développés, chacun avec ses propres caractéristiques et avantages.

- Cellule monocristalline

Le silicium est utilisé pour former de gros cristaux qui sont ensuite découpés pour créer des cellules photovoltaïques. Pour obtenir un arrangement cristallin parfait, on introduit un bloc de silicium pré-cristallisé dans du silicium fondu. Le silicium se cristallise ensuite autour de ce bloc en conservant le même arrangement cristallin, utilisant la méthode de Czochralski. Cela permet d'avoir une disposition atomique parfaite à l'intérieur de la cellule, ce qui lui confère une efficacité électrique légèrement supérieure à celle des cellules polycristallines, avec une moyenne d'environ 19 % et des valeurs allant de 12 à 20 %. Le record en laboratoire est de 24,7 % [64].



Figure 3-3 : Photo d'une cellule monocristalline [63].

- Cellule polycristalline (multicristalline)

Pendant le processus de refroidissement du silicium, plusieurs cristaux se forment, puis sont découpés pour créer des cellules photovoltaïques composées de plusieurs cristaux. Ces cellules sont réputées pour offrir le meilleur compromis qualité/prix. Leur efficacité électrique moyenne est d'environ 15%, avec un rendement record en laboratoire de 19,8 % [64].

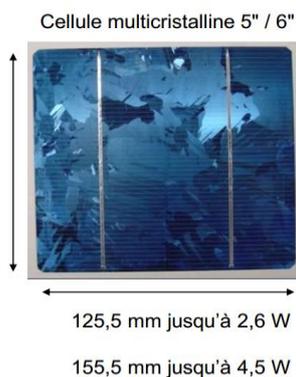


Figure 3-4 : Photo d'une cellule polycristalline [63].

- Cellule amorphe en couche mince

Lors de la transformation du silicium, un gaz est produit et projeté sur une feuille de verre pour former des cellules de silicium amorphe en couche mince. Les atomes dans ces cellules sont arrangés de manière aléatoire, ce qui confère des propriétés semi-conductrices relativement faibles. L'efficacité électrique de ces cellules se situe entre 7 et 10 %. Leur épaisseur est d'environ un micromètre, tandis que les cellules cristallines ont une épaisseur d'environ une centaine de micromètres. Elles sont généralement utilisées dans des applications nécessitant une faible puissance électrique, comme les montres ou les calculatrices solaires. Les cellules en couches minces conservent une bonne efficacité électrique même en présence d'un rayonnement

diffus (par exemple par temps nuageux), tandis que les cellules cristallines sont plus performantes en cas de rayonnement direct [63].

- **Cellules multi-jonctions**

Les cellules multi-jonctions permettent de capturer l'énergie d'un plus grand nombre de photons tout en maintenant une tension élevée à travers la cellule. Les photons sont d'abord dirigés à travers un matériau avec la plus grande "bande interdite", puis à travers des matériaux avec des bandes interdites de plus en plus petites. Cela permet d'exploiter une plus grande partie du spectre solaire, ce qui conduit à des rendements nettement supérieurs par rapport aux cellules à une seule jonction. Des rendements de plus de 40 % ont déjà été observés, et une cellule à triple jonction peut atteindre des rendements de plus de 30 % [63].

- **Cellules non-silicium**

Les cellules photovoltaïques non-silicium sont des types de cellules solaires qui utilisent des matériaux autres que le silicium comme matériau de base pour convertir l'énergie solaire en électricité. Contrairement aux cellules solaires en silicium, qui sont les plus couramment utilisées dans les panneaux solaires traditionnels, les cellules non-silicium peuvent offrir des avantages potentiels tels que des rendements plus élevés, une flexibilité accrue et des coûts de fabrication réduits.

Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques non-silicium, notamment :

- **Cellules à couche mince**

Utilisant des matériaux tels que le tellure de cadmium (CdTe), le sélénium de cuivre indium (CIGS) ou le diséléniure de cuivre gallium (CIGS), ces cellules sont fabriquées en déposant une fine couche de matériau photosensible sur un substrat. Elles peuvent être plus légères, plus souples et moins coûteuses à produire que les cellules en silicium, mais leur rendement peut varier.

- **Cellules organiques**

Également appelées cellules solaires organiques ou cellules à base de polymères, elles utilisent des matériaux organiques semi-conducteurs pour convertir la lumière en électricité. Elles sont généralement légères, flexibles et peuvent être fabriquées à moins coût, mais leur rendement est généralement plus faible que celui des cellules en silicium.

- **Cellules à colorant**

Utilisant un colorant pour absorber la lumière et générer de l'électricité, ces cellules sont souvent utilisées dans des applications spécifiques, comme les dispositifs de teinture solaire pour les fenêtres, mais elles ont généralement un rendement plus faible.

- **Cellules à pérovskite**

Utilisant des matériaux à base de pérovskite, ces cellules ont gagné en popularité ces dernières années en raison de leur rendement potentiellement élevé et de leur coût de fabrication relativement bas. Cependant, elles sont encore en cours de développement et de recherche.

En résumé, les cellules photovoltaïques non-silicium offrent divers avantages potentiels, mais elles présentent également des défis techniques et commerciaux à surmonter. La recherche et le développement dans ce domaine sont en constante évolution, et de nouvelles avancées pourraient ouvrir la voie à des technologies solaires plus efficaces et abordables dans le futur.

3.3.1.2 Module photovoltaïque

Pour augmenter la puissance de production, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les cellules sont connectées en série pour augmenter la tension tout en maintenant le même courant, tandis que la connexion en parallèle permet d'augmenter le courant tout en conservant la tension. Les cellules sont protégées de l'humidité en étant encapsulées dans un polymère EVA (éthylène-vinyl-acétate), avec une surface avant recouverte d'un verre trempé à haute transmission et à bonne résistance mécanique, et une surface arrière protégée par du polyéthylène. Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant des diodes antiparallèles [36].

- **Caractéristiques des modules photovoltaïques**

Le module photovoltaïque est un élément de base du générateur, par assemblage de modules on obtient l'énergie électrique nécessaire ; un module photovoltaïque est caractérisé par plusieurs grandeurs principales :

Puissance crête (P_c) : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).

Tension de circuit ouvert (V_{co}): Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".

Courant de court-circuit (I_{cc}) : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".

Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m) : Lorsque la puissance crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m * I_m$.

Rendement : Rapport entre la puissance électrique optimale et la puissance de radiation incidente.

Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} * I_{cc}$ [36].

- Effet de l'orientation des modules PV

L'orientation des modules photovoltaïques (PV) peut avoir un impact significatif sur leur rendement et leur production d'énergie. En effet, l'orientation des modules PV détermine la quantité de lumière solaire qu'ils peuvent absorber et convertir en énergie électrique.

En général, les modules PV doivent être orientés vers le sud pour maximiser leur production d'énergie. Cela permet aux modules de recevoir une quantité maximale de lumière solaire directe pendant les heures de pointe de la journée. Cependant, en fonction de votre emplacement géographique et des conditions locales, d'autres orientations peuvent être plus appropriées pour maximiser le rendement énergétique.

Par exemple, dans l'hémisphère sud, les modules PV doivent être orientés vers le nord pour maximiser leur production d'énergie. De même, dans les zones ombragées, il peut être préférable d'orienter les modules PV vers l'ouest ou l'est pour éviter les ombres portées qui pourraient réduire la production d'énergie.

- Effet de l'inclinaison des modules PV

L'inclinaison des modules photovoltaïques (PV) peut également avoir un impact significatif sur leur rendement et leur production d'énergie. L'angle d'inclinaison des modules PV est important

car il détermine la quantité de lumière solaire qui est captée par les modules et l'angle sous lequel cette lumière est absorbée.

En général, les modules PV doivent être inclinés à un angle égal à la latitude de votre emplacement géographique pour maximiser leur production d'énergie. Cela permet aux modules de recevoir une quantité maximale de lumière solaire directe pendant les heures de pointe de la journée. Par exemple, si vous vous trouvez à une latitude de 30 degrés, les modules PV doivent être inclinés à un angle de 30 degrés par rapport à l'horizon.

Cependant, en fonction de votre emplacement géographique et des conditions locales, d'autres angles d'inclinaison peuvent être plus appropriés pour maximiser le rendement énergétique. Par exemple, dans les zones à forte latitude, les modules PV peuvent être inclinés à un angle plus élevé pour maximiser leur production d'énergie pendant les mois d'hiver lorsque le soleil est bas dans le ciel. De même, dans les zones à faible latitude, les modules PV peuvent être inclinés à un angle plus faible pour maximiser leur production d'énergie pendant les mois d'été lorsque le soleil est haut dans le ciel.

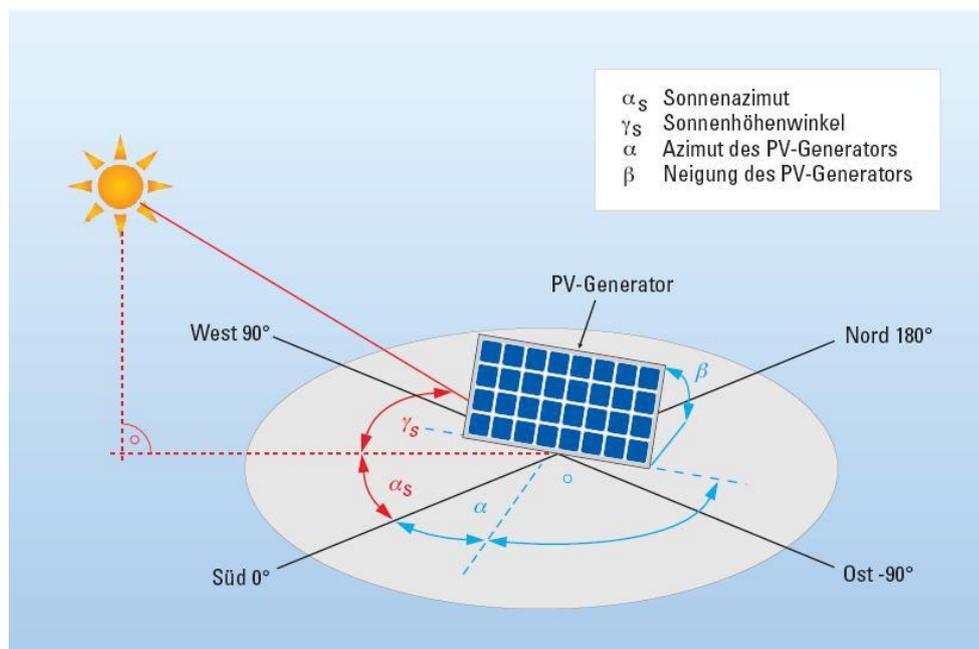


Figure 3-5 : l'orientation et l'inclinaison des modules PV [63].

- Caractéristique courant-tension d'un module PV :

Le profil de la caractéristique courant-tension d'un module est le même que celui d'une cellule photovoltaïque.

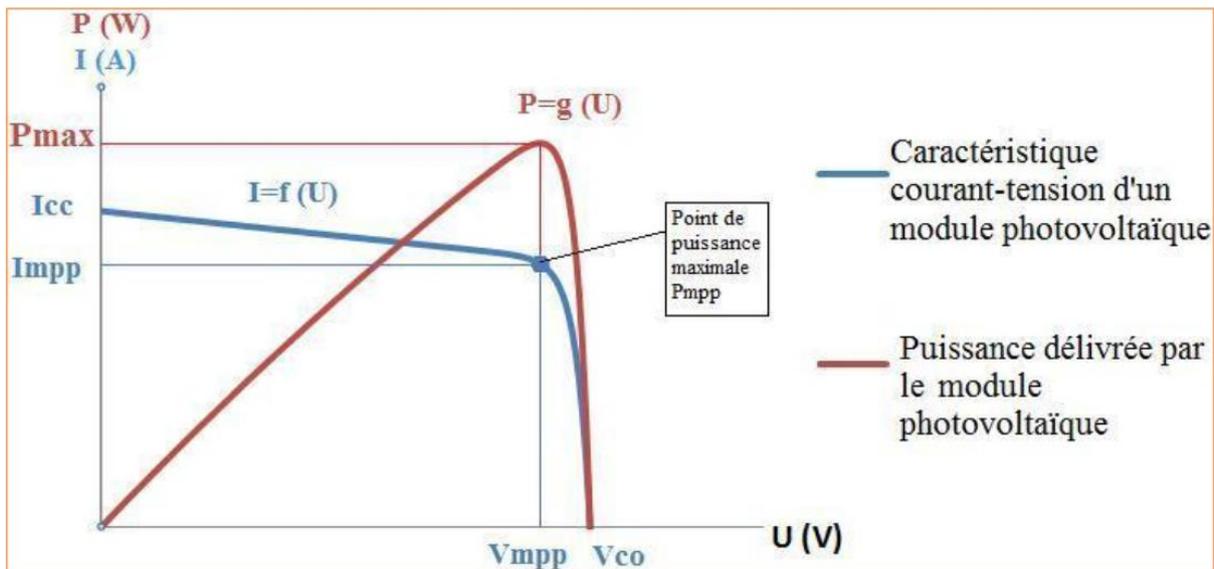


Figure 3-6 : Schéma de la caractéristique courant-tension d'un module PV [63].

3.3.2 Effet du niveau d'éclairement

Le courant débité par la cellule dépend fortement du niveau d'éclairement. On constate expérimentalement que le courant de court circuit est directement proportionnel à l'éclairement [66].

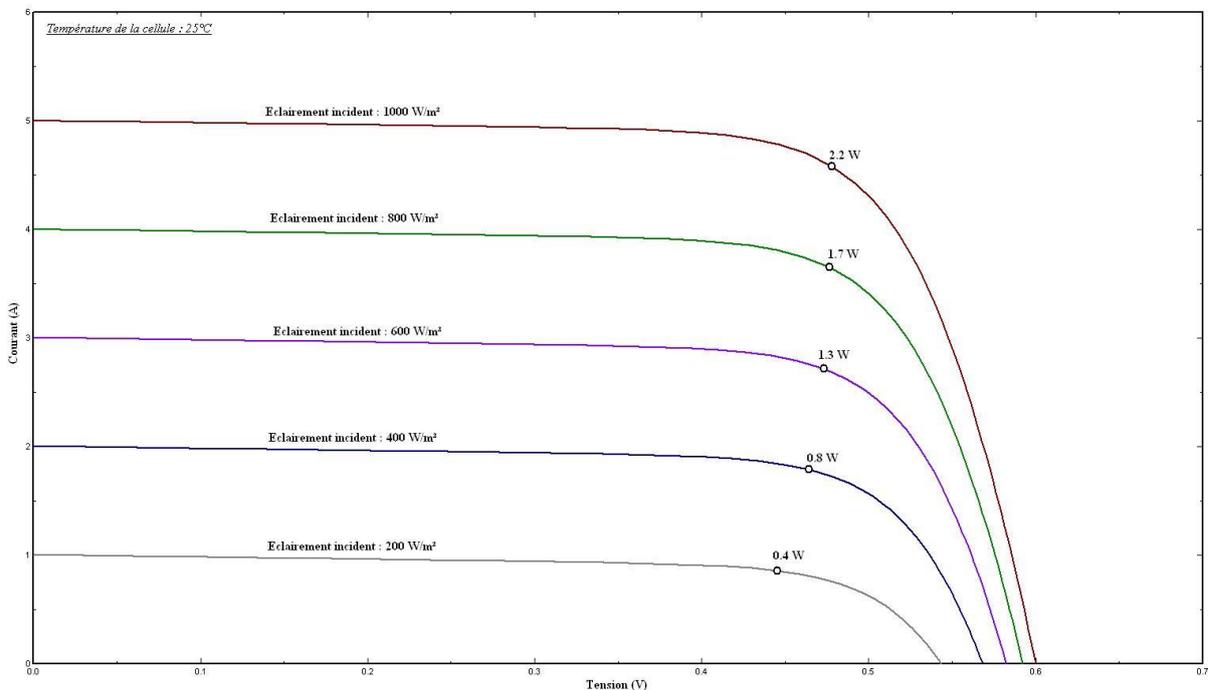


Figure 3-7 : Schéma de l'effet de l'éclairement sur le module PV [66].

- Effet de la température

La température est un paramètre important puisque les modules sont exposés au rayonnement solaire, susceptible de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique : elle se dissipe sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température du module est toujours plus élevée que la température ambiante.

L'influence de la température est très significative, et demandera des choix importants dans la conception des systèmes. Malheureusement, la tension du module cristallin baisse assez fortement avec la température.

Cet effet est représenté par (la figure 3-8) où l'on voit différentes courbes d'une cellule cristalline entre 10 et 75 °C sous un ensoleillement de 1 000 W/m².

La tension perd 2 à 2.5 mV/ °C (soit -0,41 %/°C) ce qui donne un déficit de 80 à 100 mV entre 10 et 50 °C par exemple. Pour d'autres technologies, les variations de la tension en fonction de la température baissent lorsque le gap augmente : pour le silicium amorphe, l'effet est réduit de 30% (environ 0,29 %/°C).

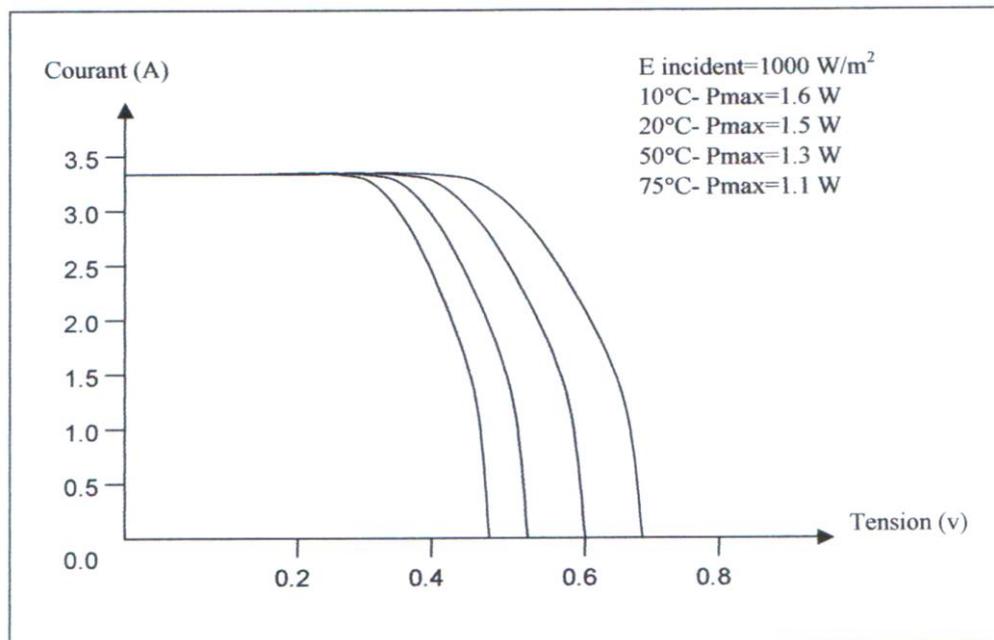


Figure 3-8 : Courbe de la cellule monocristalline à divers température [66].

3.3.3 Système de stockage

Une installation solaire autonome, également appelée "site isolé", inclut une ou plusieurs batteries conçues pour stocker l'énergie produite par les panneaux solaires. Ces batteries, communément appelées "batteries solaires", sont spécifiquement conçues pour une décharge

lente. Le stockage d'énergie dans une installation photovoltaïque consiste à conserver l'énergie produite par le générateur PV pour une utilisation ultérieure. Pour gérer efficacement l'énergie solaire, il est nécessaire de disposer d'un système de stockage adapté aux conditions météorologiques qui répond à deux fonctions principales : fournir de l'électricité à l'installation lorsque le générateur PV ne produit pas (par exemple, la nuit ou par mauvais temps) et fournir à l'installation une puissance plus importante que celle fournie par le générateur PV [67].

3.3.3.1 Définition d'une batterie solaire

Une batterie solaire est un accumulateur électrique pour stocker l'énergie électrique générée par un panneau photovoltaïque dans une installation d'énergie solaire. Parfois, ils sont également connus sous le nom de batteries photovoltaïques. Lorsque nous installons des panneaux solaires dans une installation autonome, un système de batterie est obligatoire pour garantir que nous aurons de l'électricité lorsque nous en aurons besoin. De plus, dans le cas où notre maison est connectée au réseau électrique, les batteries domestiques sont utiles en cas de panne de courant. La technologie des batteries solaires stocke l'énergie électrique générée lorsque les panneaux solaires reçoivent l'énergie solaire excédentaire pendant les heures de rayonnement solaire les plus remarquables [68].



Figure 3-9 : Photo d'une batterie solaire .

3.3.3.2 Caractéristiques d'une batterie solaire

Les Caractéristiques principales d'une batterie sont :

- Capacité de stockage en Ampère heure

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant. Théoriquement, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures.

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :

- **Rapports de chargement et déchargement** : Si la batterie est chargée ou déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

- **Température** : Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 °C. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie.
- **Durée de vie** : Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre des cycles)
- **Profondeur de décharge**

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge. Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25 % de leur capacité totale dans chaque cycle. La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications photovoltaïques sont conçues pour des décharges jusqu'à 80 % de leur capacité, sans les endommager. Les fabricants de batteries

de nickel- Cadmium assurent qu'elles peuvent totalement être déchargées sans aucuns dommages.

- Tension d'utilisation : C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.
- Rendement : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.
- Taux d'autodécharge : L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné [67].
- Etat de charge

Le niveau de charge d'une batterie EDC, appelé en anglais SOC (State Of Charge), est crucial pour la plupart des applications utilisant des accumulateurs. Savoir à quel niveau se trouve la batterie est essentiel pour éviter des modes de fonctionnement qui pourraient l'endommager, tels que des surcharges ou des décharges excessives. De plus, connaître le SOC permet de prévoir si la batterie pourra assurer sa fonctionnalité, comme la quantité d'autonomie restante d'une voiture électrique.

Cependant, le SOC n'est pas directement mesurable par un seul paramètre facilement accessible. Pour estimer le SOC, plusieurs propriétés électriques et électrochimiques de la batterie sont nécessaires, telles que la tension à vide, la tension en charge, le courant, la température, l'impédance interne, la gravité spécifique de l'électrolyte, ainsi que sa conductivité. En combinant ces paramètres avec des algorithmes appropriés, une estimation du SOC peut être obtenue. Cela fournit également des informations précieuses sur l'état interne de la batterie et peut aider l'utilisateur à prévoir sa durée de vie restante [72, 73].

3.3.3.3 Différents types de Batteries solaires

- Batterie Nickel-cadmium

Les batteries Cadmium-Nickel sont réalisées à partir de 2 électrodes (hydroxyde de Nickel et Cadmium) immergés dans une solution de potasse. La réaction réversible globale est la suivante :



L'électrode positive est l'hydroxyde de Nickel, et le Cadmium l'électrode négative. L'électrolyte est à base de potasse, d'où le nom d'accumulateur alcalin. La tension varie de 1.15 à 1.45 V par

élément avec une valeur nominale à 1.2 V [73]. Bien que moins performants que les accumulateurs au Plomb, les accumulateurs au Cd-Ni présentent les avantages suivants:

- très bonne résistance mécanique (applications embarquées)
 - ne craignent pas le gel et supportent les températures élevées.
 - supportent les décharges totales pas d'émanation toxique [70].
- Batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH)

Les batteries Ni-MH se distinguent des Ni-Cd notamment par la composition de leur électrode négative, basée sur l'adsorption d'hydrogène dans un métal. Cette technologie offre des avantages intéressants par rapport aux Ni-Cd, tels qu'une densité d'énergie plus élevée et l'absence de cadmium, ce qui facilite le recyclage et réduit les risques liés à une éventuelle fuite de la batterie. Cependant, le coût de ce type de batterie reste élevé. Les batteries Ni-MH ont été développées avec trois objectifs principaux : augmenter la capacité volumique, permettre des recharges rapides et éliminer le cadmium, substance toxique pour l'environnement et déjà interdite dans certains pays. Cependant, à l'exception de leur compacité, ces batteries ne présentent pas de meilleures performances que les Ni-Cd pour les applications solaires, et peuvent même être moins performantes en termes de résistance au froid [74,75].

- Batterie au plomb

La batterie est constituée de deux électrodes, une positive et une négative, ainsi que d'un électrolyte. L'électrode positive est composée de dioxyde de plomb (PbO_2) tandis que l'électrode négative est en plomb (Pb). L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) qui permet le flux d'ions entre les deux électrodes et génère un courant électrique. Lorsque la batterie se décharge, la densité de l'électrolyte diminue, et les matières actives des électrodes se transforment en sulfate et en eau.

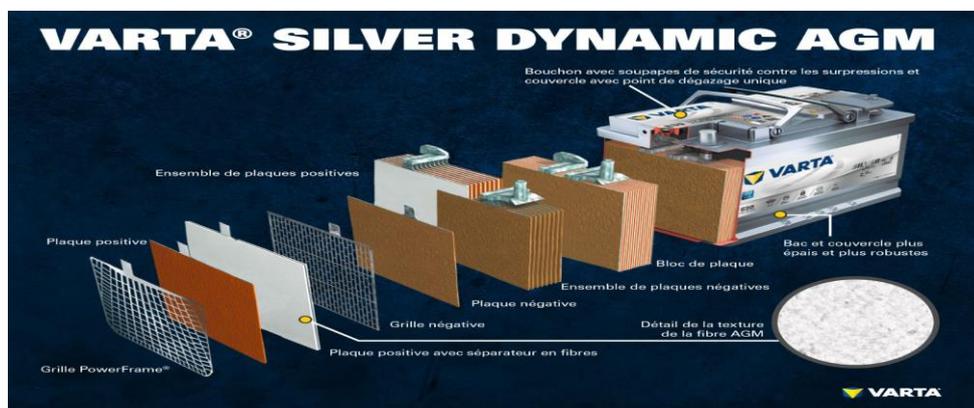


Figure 3-10 : Composition d'une batterie monobloc

On peut dire qu'une batterie est constituée de plusieurs cellules, qui sont des unités indépendantes complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires pour stocker l'énergie. Leur regroupement en un module appelé batterie permet d'obtenir une tension plus élevée aux bornes du dispositif.

Il est important de noter que des décharges trop profondes peuvent entraîner une perte irréversible de capacité. Si la charge se poursuit trop longtemps, la tension peut atteindre une valeur seuil au-delà de laquelle on observe une décomposition de l'eau (électrolyse) en dioxygène gazeux (O_2) à l'électrode positive et en dihydrogène gazeux (H_2) à l'électrode négative [75, 76]

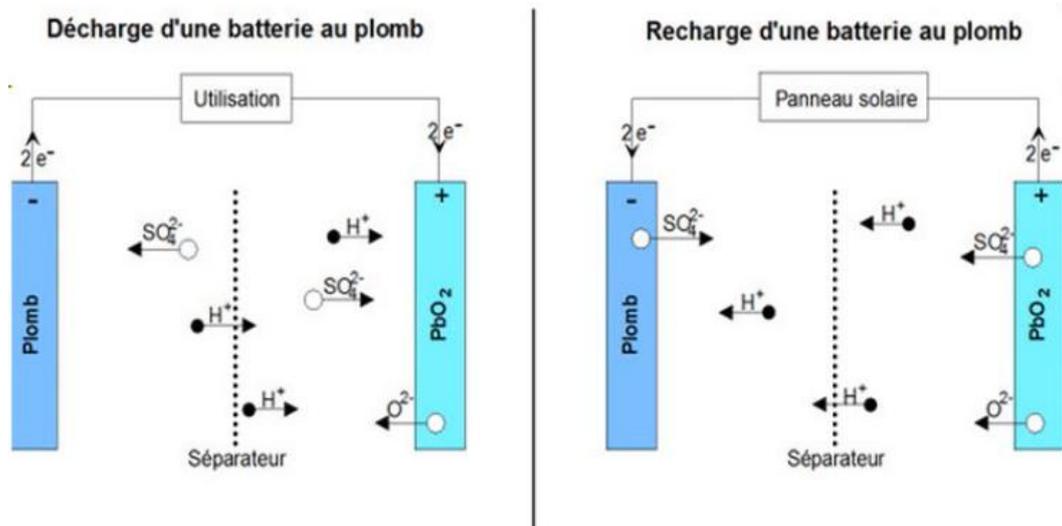


Figure 3-11 : Principe de fonctionnement d'un accumulateur plomb / acide.

- Batterie Nickel-NaCl

La batterie Nickel-NaCl est un type de batterie rechargeable qui utilise le nickel et le chlorure de sodium ($NaCl$) comme électrodes et un électrolyte de chlorure de sodium fondu ($NaCl$) pour permettre la circulation des ions entre les électrodes. Cette technologie de batterie est également connue sous le nom de batterie Zebra en raison de la couleur rayée des électrodes. Les batteries Nickel-NaCl ont une densité d'énergie élevée et une longue durée de vie, ce qui les rend adaptées aux applications de stockage d'énergie à grande échelle telles que les réseaux électriques intelligents et les énergies renouvelables.

- Batterie Nickel-Zinc

La batterie Nickel-Zinc est un type de batterie rechargeable qui utilise du nickel et du zinc comme matériaux actifs. Elle est similaire aux batteries NiCd, mais avec une tension plus élevée de 1,6 V. Les batteries Nickel-Zinc ont une courbe de charge/décharge similaire à celle des cellules NiCd ou NiMH de 1,2 V, mais avec une tension nominale plus élevée. Elles sont moins chères que les batteries au nickel-cadmium et ont un potentiel pour remplacer les batteries au plomb en raison de leur rapport énergie/masse plus élevé et de leur rapport puissance/masse plus élevé. Les batteries Nickel-Zinc sont également plus respectueuses de l'environnement car elles n'utilisent pas de mercure, de plomb ou de cadmium. Cependant, elles ont une durée de vie plus courte et une auto-décharge plus élevée que les batteries Li-ion. Les batteries Nickel-Zinc sont utilisées dans une variété d'applications, y compris les outils électriques et les véhicules électriques [77].

3.3.4 Système de régulation

Les régulateurs de charge font partie des composants d'un système photovoltaïque conçus pour surveiller et contrôler la charge et la décharge d'une batterie, de manière à maximiser sa durée de vie. Leur fonction principale est de réduire le courant de charge lorsque la batterie est presque pleine. Lorsque la batterie approche de sa capacité maximale, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives, et il est préférable de réduire le courant de charge pour éviter des dommages et pour permettre une charge complète. Un courant excessif peut déformer les électrodes internes et créer un court circuit [65].

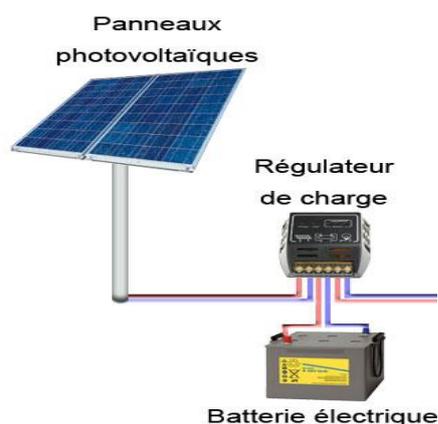


Figure 3-12 : Branchement de régulateur de charge [63].

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- ❖ la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.

- ❖ L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation

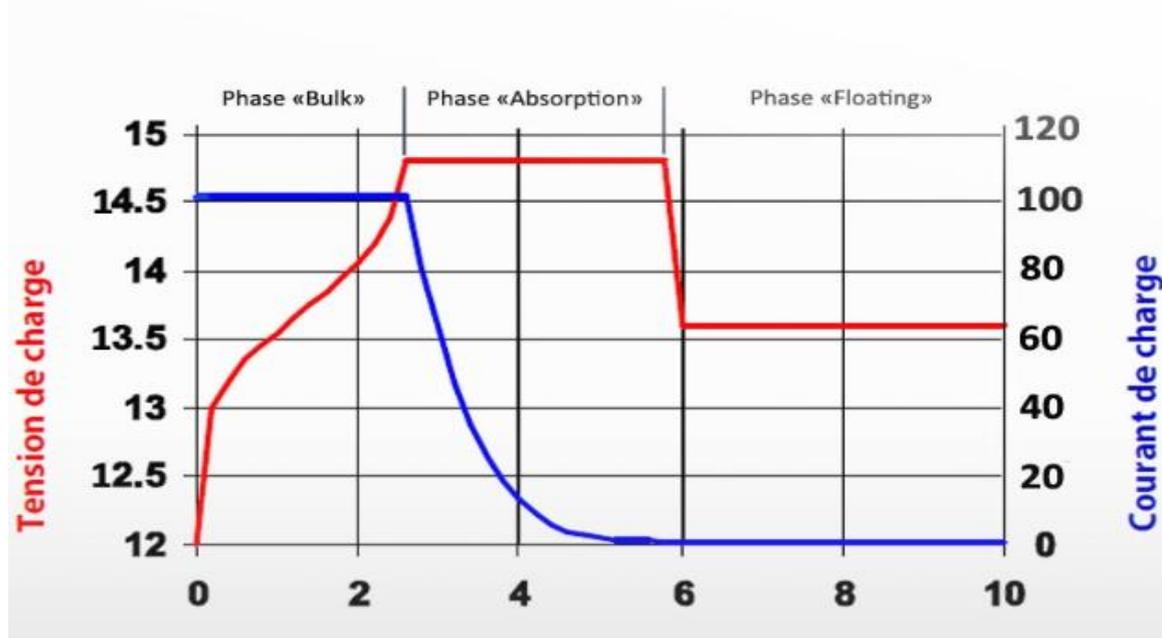


Figure 3-13 : Courbe de courant et tension de charge [65].

Il existe deux types de régulation :

3.3.4.1 Régulation de décharge

La régulation de décharge est un système qui surveille la tension de la batterie et réduit la quantité de courant prélevé pour éviter une décharge profonde et prolonger la durée de vie de la batterie. Cela est important dans les systèmes de stockage d'énergie à base de batteries utilisés sur de longues périodes. La régulation de décharge peut également éviter les dommages causés par une décharge excessive, comme la sulfatation des électrodes, qui réduit la durée de vie de la batterie.

3.3.4.2 Régulation de charge

La régulation de charge permet de limiter le courant de charge lorsque la batterie est presque pleine, afin d'éviter une surcharge. Si la tension par élément dépasse la tension de surcharge, la charge est interrompue pour éviter d'endommager la batterie [78].

Il existe plusieurs types de montage de régulation de charge pour les batteries au plomb

- Régulation de charge série

La régulation de charge série est un système qui permet de charger plusieurs batteries en série de manière à ce qu'elles soient toutes chargées de manière égale. Le principe de fonctionnement consiste à surveiller la tension de chaque batterie individuelle et à ajuster le courant de charge

en conséquence pour maintenir une tension égale sur toutes les batteries. Cela permet de garantir une durée de vie plus longue pour l'ensemble du système de batteries, car la surcharge ou la sous-charge d'une batterie individuelle peut entraîner une défaillance prématurée et une perte d'efficacité globale.

Tant que la tension U_{bat} aux bornes de la batterie est inférieure à la tension de la diode Zener U_z , le courant délivrer par le panneau charge la batterie à travers un transistor se bloque, et le courant ne passe qu'à travers la résistance [78].

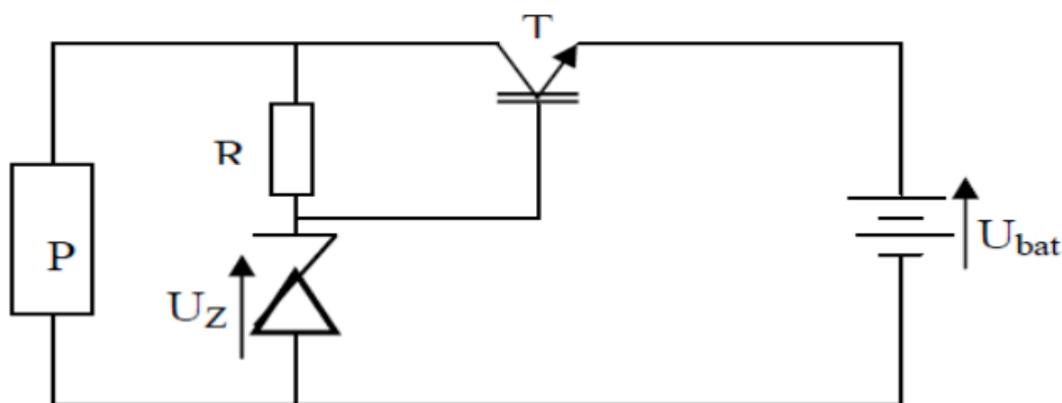


Figure 3-14 : Schéma de principe d'un régulateur de charge série

- Régulateur de charge de coupure

Le principe de fonctionnement du régulateur de charge de coupure est de couper la charge de la batterie une fois que sa tension atteint un seuil prédéfini. Ce seuil est généralement fixé à une tension qui est considérée comme étant sûre pour la batterie. Lorsque la tension de la batterie dépasse ce seuil, le régulateur de charge coupe la charge et empêche la batterie de se charger davantage. De cette façon, le régulateur de charge de coupure peut aider à protéger la batterie contre une surcharge qui peut endommager ses électrodes et réduire sa durée de vie.

- Régulateur de charge à découpage

Un régulateur de charge à découpage est un dispositif électronique qui contrôle le flux d'énergie provenant des panneaux solaires vers la batterie en utilisant une technique de découpage. Le principe de fonctionnement est le suivant :

1. Le régulateur de charge à découpage reçoit l'énergie des panneaux solaires sous forme de courant continu (DC).

2. Ce courant est ensuite converti en courant alternatif (AC) à une fréquence élevée à l'aide d'un oscillateur interne.

3. Le courant alternatif est ensuite transformé en un courant de tension constante à l'aide d'un transformateur.

4. Le courant de tension constante est ensuite redressé et filtré pour produire un courant continu de tension régulée qui est envoyé à la batterie.

5. Le régulateur de charge à découpage surveille en permanence la tension de la batterie et ajuste la quantité de courant qui est envoyée en fonction de son état de charge afin de maintenir la batterie dans un état de charge optimal.

Les régulateurs de charge à découpage sont efficaces car ils permettent de maximiser l'efficacité de la charge de la batterie et de minimiser les pertes d'énergie dans le processus. Ils sont également capables de gérer des tensions plus élevées que les régulateurs de charge linéaires, ce qui les rend idéaux pour les systèmes de panneaux solaires de grande taille.

- Régulateur de charge série à coupure partielle

Ce genre de dispositif de contrôle permet de diviser le panneau solaire en deux parties, chacune fournissant une tension identique. Selon ce principe, une partie du panneau charge la batterie via un régulateur de charge série à coupure, tandis que l'autre partie est directement connectée pour charger la batterie en continu [77].

- Régulateur de charge parallèle

Ce type de régulateur est installé en parallèle avec le panneau solaire, ce qui permet de convertir l'énergie excédentaire en chaleur grâce à des composants de puissance. Le principe de fonctionnement est le suivant: lorsque la tension de la batterie est basse, le transistor T est bloqué et le courant ainsi que la tension aux bornes de la résistance sont faibles, ce qui permet à l'ensemble du courant généré par le panneau solaire de charger la batterie. Si la tension aux bornes de la diode Zener atteint la valeur de référence, le courant I augmente subitement, ce qui rend le transistor T conducteur et permet de fournir une partie du courant de charge [77].

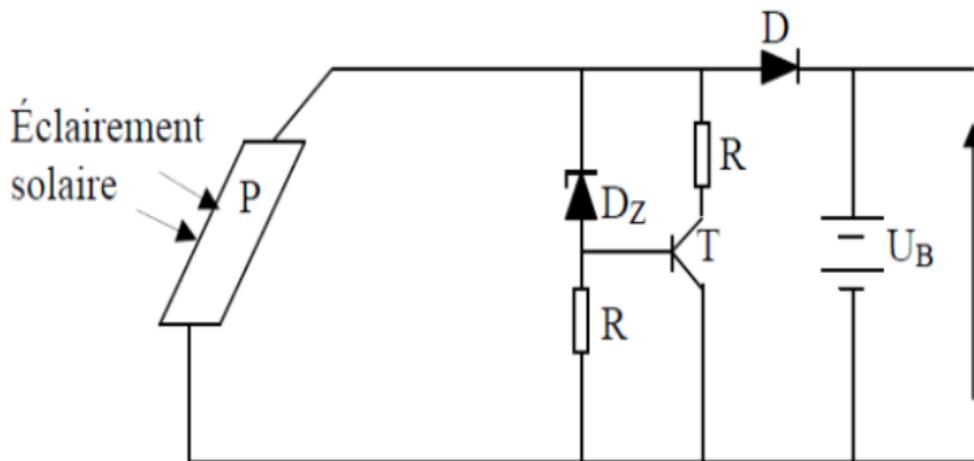


Figure 3-15 : Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle

3.3.5 Système de conversion

Un onduleur est un appareil électrique qui permet de transformer la tension /courant continue des modules photovoltaïque ou des batteries en tension /courant alternatif. On dit qu'un onduleur est autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde [79].

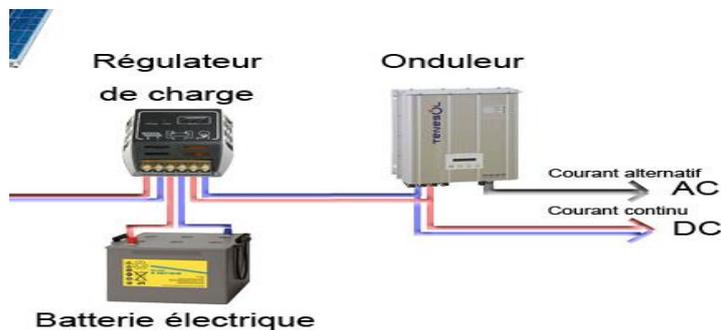


Figure 3-16 : Branchement de l'onduleur [63].

3.3.5.1 Classification des onduleurs

Il y a plusieurs types de schémas d'onduleurs, qui sont classés en fonction des modes de commutation de leurs interrupteurs [80]. Bien qu'il y ait de nombreux domaines d'application, on peut principalement distinguer deux catégories d'onduleurs.

- Onduleur autonome

Un onduleur autonome est un dispositif qui permet de transformer une source d'énergie électrique continue en énergie alternative. Ce convertisseur est capable de générer sa propre fréquence et sa propre forme d'onde de tension alternative. Il est composé d'un ensemble

d'interrupteurs de puissance tels que des MOSFET, des IGBT ou des thyristors, qui sont contrôlés par différents types de commandes afin de produire à la sortie des tensions et des courants qui se rapprochent d'une sinusoïde [81].

- Onduleur non autonome

Les onduleurs non autonomes sont des convertisseurs dont la fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie sont imposées par le réseau alternatif qu'ils alimentent.

3.3.5.2 Principe de fonctionnement des onduleurs

- Onduleur monophasé

L'onduleur en question est composé de deux bras, chacun équipé de deux interrupteurs. Chaque interrupteur est constitué de deux semi-conducteurs en antiparallèle.

- Onduleur triphasé

Cet onduleur est constitué de trois bras, chacun équipé de deux interrupteurs. Chaque interrupteur est constitué de deux semi-conducteurs en antiparallèle. En régime nominal, l'onduleur triphasé est capable de fournir un système triphasé équilibré de tension [83].

3.3.5.3 Rendement des onduleurs

L'onduleur convertit un courant et une tension continue en un courant et une tension alternative. Cette conversion s'effectue grâce à des composants électriques qui chauffent (diodes, condensateurs, etc.). Une partie de la puissance continue en entrée de l'onduleur est dissipée sous forme de chaleur. On définit le rendement de l'onduleur comme le rapport de la puissance de sortie (alternative) sur la puissance d'entrée (continue)

Un onduleur présente généralement un rendement de l'ordre de 95 %. Pour une tension d'entrée fixée, le rendement maximum atteint à peu près à 50 % de la puissance nominale de l'onduleur [66].

3.3.5.4 Effet de la température sur les onduleurs

Il est important de respecter la température maximale de fonctionnement de l'onduleur. Il est recommandé de placer l'onduleur dans un endroit bien ventilé.

En général, la plage de température de fonctionnement d'un onduleur est comprise entre -25°C et 60°C . La température de fonctionnement de l'onduleur est mentionnée dans sa fiche technique. Lorsque la température de l'onduleur dépasse la valeur maximale, celui-ci limite

volontairement la puissance délivrée en quittant le point de puissance maximum du groupe photovoltaïque. La température a une forte influence sur la durée de vie de l'onduleur [66].

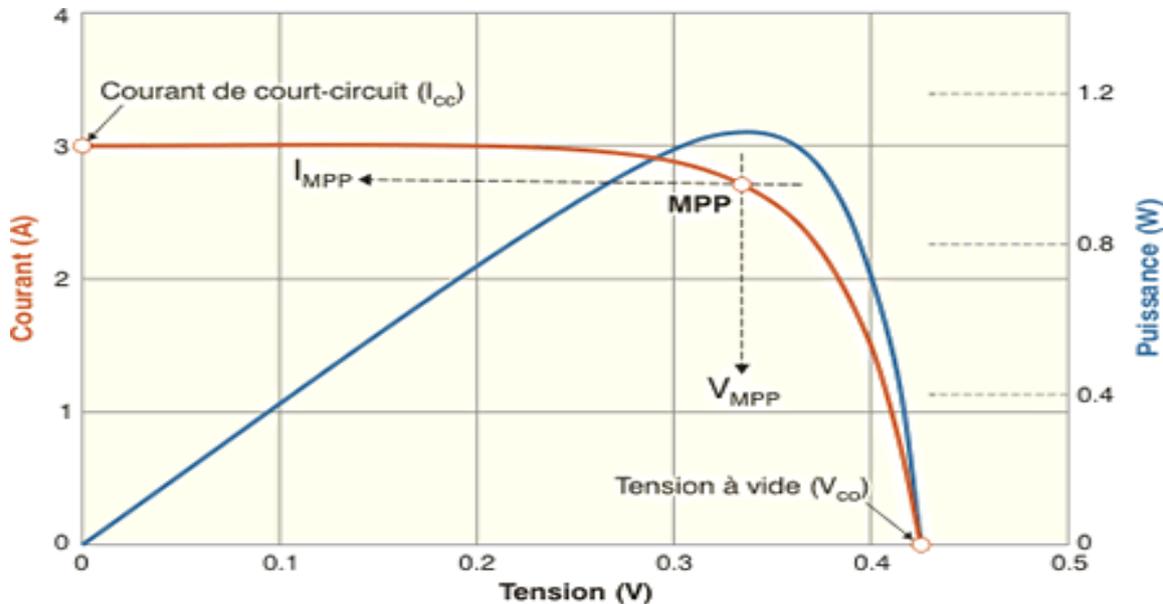


Figure 3-17 : Courbe de PPM et ICC [66].

3.3.5.5 Durée de vie des onduleurs

La durée de vie des onduleurs peut varier en fonction de plusieurs facteurs tels que la qualité de fabrication, l'environnement dans lequel ils sont utilisés, la fréquence d'utilisation, la charge électrique qu'ils doivent supporter, la maintenance régulière, etc. En général, les onduleurs de bonne qualité peuvent avoir une durée de vie de 10 ans ou plus s'ils sont bien entretenus et utilisés correctement. Cependant, il est important de noter que les onduleurs peuvent tomber en panne à tout moment, même s'ils sont de haute qualité et bien entretenus. Il est donc recommandé de prévoir un plan de remplacement et de sauvegarde en cas de panne.

3.3.6 Charge

La charge et les équipements électriques alimentés par le système peuvent être de type continu, tels que des équipements de télécommunications ou des pompes à eau. Ils peuvent également être de type alternatif dans les cas d'utilisation domestique, comme une maison solaire. Dans ce cas, un onduleur est nécessaire pour convertir l'énergie continue produite par les panneaux solaires en énergie alternative utilisable par les équipements électriques [67].

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous exposons les concepts fondamentaux qui sont nécessaires à la construction d'un système photovoltaïque autonome, tels que le champ photovoltaïque, le régulateur, la batterie et l'onduleur, ainsi que les principes de fonctionnement de chaque élément.

Dans le prochain chapitre, nous utilisons ces éléments pour réaliser une étude et un dimensionnement d'une centrale photovoltaïque.

Chapitre 4 :

Etude et dimensionnement optimale d'un système PV autonome

4.1 Introduction

Il existe trois procédures principales de dimensionnement des systèmes PV autonomes : des méthodes intuitives, numériques et analytiques et des méthodes individuelles.

Dans ce chapitre, nous allons baser sur un dimensionnement optimal d'un système photovoltaïque autonome qui a été fait en fonction de deux types de modules PV de plusieurs capacités et celui des batteries de stockage. L'objectif est de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal des systèmes photovoltaïques autonomes.

4.2 Dimensionnement et optimisation du système PV

Le dimensionnement précis d'une installation photovoltaïque autonome est une étape cruciale dans la conception d'un système efficace et fiable. L'étude approfondie et le dimensionnement précis sont nécessaires pour garantir que le système photovoltaïque autonome fonctionne de manière optimale, en fournissant une alimentation électrique fiable tout en maximisant l'utilisation de l'énergie solaire disponible. Un dimensionnement incorrect peut entraîner une sous-utilisation ou une surutilisation des composants, ce qui peut avoir un impact négatif sur les performances du système et sa durabilité à long terme.

L'étude de dimensionnement est toujours confrontée à deux critères essentiels qui sont le gisement solaire et la demande en énergie [82]. Le dimensionnement d'un générateur photovoltaïque a pour objectif la détermination de la puissance crête du champ photovoltaïque, la capacité des batteries associées à partir des données d'ensoleillement, et les besoins électriques de l'utilisateur. Les différents éléments doivent garantir l'approvisionnement en énergie électrique tout au long de l'année ou éventuellement sur une période déterminée [83].

4.2.1 Méthode de dimensionnement

Un bon dimensionnement est une étape indispensable pour optimiser des systèmes à énergies renouvelables et ce, du fait de leur nature intermittente. A cet effet, ces travaux se font en fonction de deux types de modules PV (monocristalline et polycristalline), chaque type a plusieurs puissances crêtes et leurs prix et celui des batteries de stockage, le prix et leurs capacités afin de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal des systèmes photovoltaïques autonomes.

Le dimensionnement du système tout entier s'articule sur la méthodologie suivante :

4.2.1.1 Optimisation du nombre de modules photovoltaïques

L'optimisation du nombre de modules photovoltaïques consiste à déterminer la quantité optimale de panneaux solaires nécessaires pour répondre à la demande énergétique du système autonome. Plusieurs facteurs sont pris en compte lors de cette optimisation. Tout d'abord, l'irradiation solaire moyenne de la région est évaluée afin de calculer la quantité d'énergie solaire disponible. Ensuite, l'efficacité des panneaux solaires est prise en considération pour déterminer combien d'énergie chaque module peut produire. Enfin, la consommation électrique prévue est utilisée pour estimer la puissance requise. En utilisant ces données, il est possible de calculer le nombre optimal de modules photovoltaïques nécessaires pour répondre aux besoins énergétiques du système.

Pour calculer le nombre de panneaux solaires photovoltaïques, nous devons estimer la durée d'insolation dans le lieu d'installation. La puissance crête du générateur photovoltaïque, le nombre total de modules solaires et la surface occupé par ces modules peuvent être calculés par les équations suivantes :

$$P_G = \frac{E_C \times 1.16}{D_{\text{ins}}} \quad (4-1)$$

$$N_m = \frac{P_G}{P_{cm}} \quad (4-2)$$

$$S_G = N_m \times A_m \quad (4-3)$$

Le facteur 1.16 représente la somme des rendements de tous les composants du système PV (régulateur de charge, batteries et onduleur).

Le nombre de modules en série s'exprime sous la forme suivante :

$$N_{m_série} = \frac{U_{Tension_système}}{U_n} \quad (4-4)$$

La valeur de la tension du système sera déterminée en fonction de la puissance crête du générateur. Elle sera fixée à :

- Si la puissance crête du générateur photovoltaïque inférieur à 500 Wc, la tension du système sera 12 V.
- Si la valeur de la puissance crête du générateur photovoltaïque comprise entre 500 et 1200 Wc, la tension du système sera 24 V.
- Si la valeur de la puissance crête du générateur photovoltaïque supérieur à 1200 Wc, la tension du système sera 48 V.

Le nombre de string des modules se calcule par l'équation (4-5) :

$$N_{m_string} = \frac{N_m}{N_{m_série}} \quad (4-5)$$

Le coût du générateur photovoltaïque varie en fonction de la capacité du champ photovoltaïque. Il est déterminé en connaissant le nombre de modules photovoltaïques et le coût de chacun.

$$C_G = C_m \times N_m \quad (4-6)$$

L'algorithme d'optimisation du nombre de modules en fonction de leurs technologies de fabrication et de leurs prix est décrit par (la figure 4-1).

4.2.1.2 Optimisation du nombre de batteries

L'optimisation du nombre de batteries est essentielle pour garantir un stockage adéquat de l'énergie produite par les panneaux solaires. Cette méthode prend en compte la consommation électrique, les heures d'ensoleillement disponibles et la capacité de décharge des batteries. Pour déterminer le nombre optimal de batteries nécessaires afin de maintenir un approvisionnement énergétique continu, même pendant les périodes de faible ensoleillement, on se base sur la capacité de stockage (Ah) des batteries, qui est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$C_B = \frac{E_c n_J}{P_f U_{Tension_système}} \quad (4-7)$$

$P_{Profondeur_décharge} = 0.8$ pour les batteries solaires.

$P_{Profondeur_décharge} = 0.6$ pour les batteries industrielles.

$P_{Profondeur_décharge} = 0.5$ pour les batteries de voitures.

Le nombre de string des batteries se calcule par l'équation (4-8) :

$$N_{B_string} = \frac{C_B}{C_E} \quad (4-8)$$

Le nombre de batteries en série s'exprime sous la forme suivante :

$$N_{B_série} = \frac{U_{Tension_système}}{U_{nb}} \quad (4-9)$$

Le nombre total de batteries se calcule conformément à l'équation suivante :

$$N_B = N_{B_string} \times N_{B_série} \quad (4-10)$$

Le coût de la banque de batteries est basé sur la taille réelle des batteries.

$$C_{Bat} = C_b \times N_B \quad (4-11)$$

L'algorithme d'optimisation du nombre de batteries est donné par (la figure 4-2).

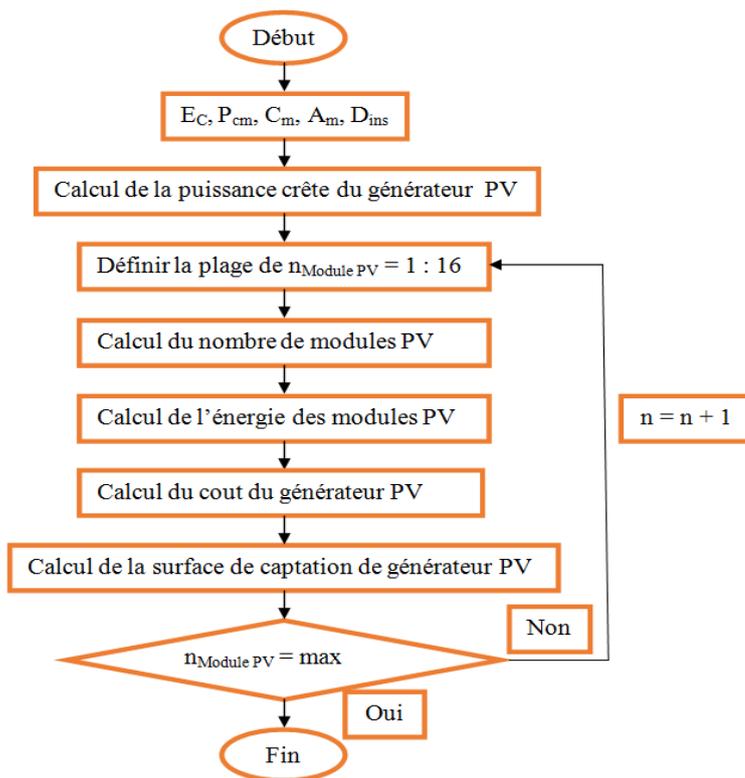


Figure 4-1 : Algorithme d'optimisation du nombre de modules photovoltaïques.

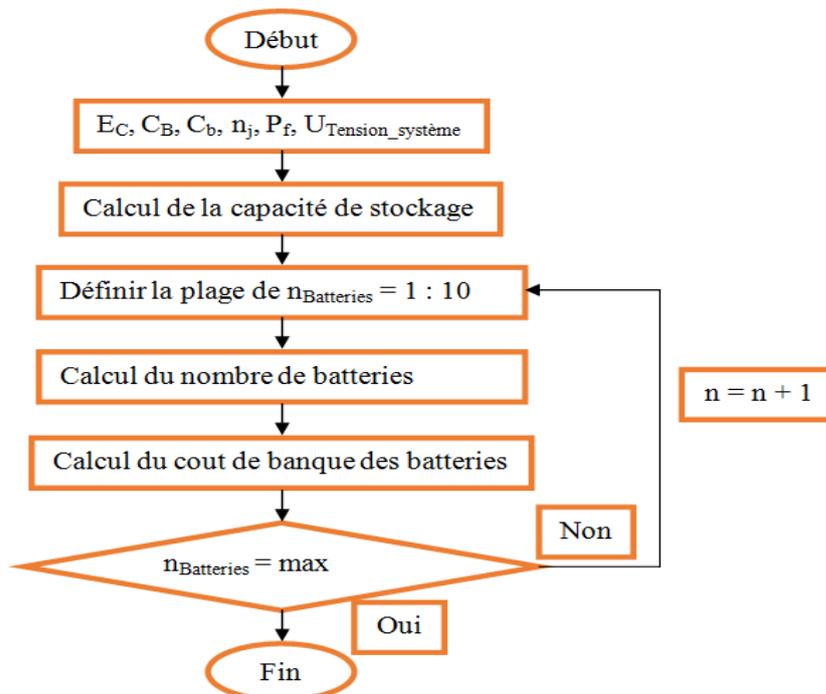


Figure 4-2 : Algorithme d'optimisation de la banque de batteries.

4.2.1.3 Choix du régulateur de charge

Le régulateur de charge est un composant crucial dans une installation photovoltaïque autonome, car il contrôle le flux d'énergie entre les panneaux solaires et les batteries. L'optimisation de la capacité du régulateur de charge implique de calculer la capacité adéquate en fonction de la puissance des panneaux solaires et de la capacité de charge des batteries. Cela garantit que le régulateur de charge peut gérer efficacement le flux d'énergie et protéger les batteries contre une surcharge ou une décharge excessive.

Le régulateur à utiliser est choisi selon le nombre de string des modules PV installés et le courant maximum produit par le générateur photovoltaïque (I_{max}) qui se trouve comme suit :

$$I_{max} = I_{cc} \times N_{B_string} \quad (4-12)$$

Le courant du régulateur de charge choisit doit être supérieure à I_{max} .

4.2.1.4 Choix de l'onduleur

L'onduleur est responsable de la conversion de l'énergie produite par les panneaux solaires en courant alternatif utilisable. L'optimisation de la capacité de l'onduleur implique de sélectionner un onduleur dont la capacité de sortie correspond à la puissance maximale des panneaux solaires. Cela permet d'assurer une conversion efficace de l'énergie solaire en électricité utilisable. La capacité de l'onduleur est la même que celle de la puissance crête de générateur PV [84] :

$$P_o = P_G \quad (4-13)$$

4.2.1.5 Dimensionnement des câbles électriques solaires

Pour assurer le transport de l'énergie des modules solaires jusqu'au la charge, il est essentiel d'utiliser des câbles solaires spécifiquement conçus pour résister aux conditions environnementales auxquelles ils sont exposés. Ces câbles solaires sont conçus pour assurer une longue durée de vie, généralement supérieure à 30 ans, tout en minimisant les pertes d'énergie.

La résistance d'un câble électrique ne dépend pas de la tension ou de l'intensité du courant qui le traverse, mais plutôt de la résistivité (ρ) des matériaux utilisés (tels que le cuivre, l'argent, le fer, etc.), de la longueur du câble (L), de sa section transversale (S) et de sa température. Parmi les matériaux conducteurs, le cuivre est largement utilisé en raison de sa

bonne conductivité électrique. Sa résistivité varie généralement entre $16 \times 10^{-9} \Omega.m$ à $0^\circ C$ et $17 \times 10^{-9} \Omega.m$ à $25^\circ C$ [30].

L'équation permettant de connaître la résistance est la suivante :

$$R = \rho \times \frac{L}{S} \quad (4-14)$$

4.2.2 Coût total du système photovoltaïque

Le coût d'un système photovoltaïque (PV) peut varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que la capacité du générateur photovoltaïque, la capacité des batteries, la capacité de l'onduleur, la capacité du contrôleur de charge et d'autres composants utiles.

Généralement on peut calculer le cout total de système photovoltaïque par cette équation :

$$C_T = C_G + C_{Bat} + C_R + C_O + C_{S+C} \quad (4-15)$$

4.2.2.1 Cout du régulateur de charge et l'onduleur (C_R et C_O)

Le coût du régulateur de charge se calcule par l'équation 4-16 :

$$C_R = \gamma_{Coût-A} I_R \quad (4-16)$$

$\gamma_{Coût-A}$ indiquent le coût unitaire du courant du régulateur de charge.

De même, le coût de l'onduleur est donné par la formule suivante :

$$C_O = \delta_{Coût-W} P_O \quad (4-17)$$

4.2.2.2 Coût de la structure et des câbles électriques (C_{S+C})

Le coût de la structure du générateur photovoltaïque et celui des câbles électriques reliant les composants du système photovoltaïque représentent environ 20 % du coût total de ces composants [84].

4.3 Etude de cas : Dimensionnement d'une centrale PV autonome alimentant un appartement de type F3 située à la région de Ghardaïa

Le dimensionnement de la station photovoltaïque a été réalisé en tenant compte des paramètres spécifiques du site de Ghardaïa, tels que les conditions climatiques et géographiques.

Nous envisageons une station photovoltaïque qui alimente une maison située dans un endroit isolé à Ghardaïa. Cette maison est équipée par des appareils électriques tels que les lampes d'éclairages et les appareils électroménagers.

4.3.1 Gisement solaire du site d'étude

Le site d'étude choisi est localisé dans le nord de la Sahara algérienne, Noumerat-Ghardaïa (latitude 32.48° Nord, longitude 3.80° Est) est le chef-lieu de la wilaya, située à 600 km au sud d'Alger, elle est la capitale de la vallée du Mzab et elle fait partie du patrimoine mondial, de par son architecture et son histoire.

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un system énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire [83, 84].

Le rayonnement solaire possède une énergie reliée directement à la longueur d'onde par la constante de Planck et la célérité de la lumière. Le rayonnement solaire est l'ensemble du spectre de rayonnement émis par le soleil, c'est l'ensemble des longueurs d'onde λ comprises entre 0.3 et 3 μm . Il comprend les ultraviolets, le visible, le proche infrarouge et le moyen infrarouge. Lors de la traversée de l'atmosphère il est absorbé principalement par l'ozone, la vapeur d'eau et le gaz carbonique. Une partie de ce rayonnement arrive au sol de manière directionnelle, rayonnement direct, et une autre partie est diffusée par les molécules et les particules présentes dans l'atmosphère, rayonnement diffus. L'unité de mesure couramment utilisée est le W/m^2 [85].

Le nombre de mesures in-situ en Algérie, effectuées dans les stations météorologiques ou radiométriques est actuellement de 75 stations. C'est pourquoi, il est souhaitable de s'orienter vers une deuxième voie qui se base sur des modèles d'évaluation permettant d'extraire les

différentes composantes du rayonnement solaire. La station radiométrique de l'URAER-Ghardaïa effectue des mesures instantanées pour les différentes composantes du rayonnement : le global G, le rayonnement diffus D et le rayonnement direct I.

Les données sont collectées auprès d'une station radiométrique de bonne précision installée à l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable (la figure 4-3). Cette station dispose de deux parties : un composant fixe "pyranomètre de type EKO" pour la mesure du flux de rayonnement global sur un plan horizontal et une partie mobile munie d'un "pyrhéliomètre de type EKO" qui est en mesure de suivre le chemin du soleil du lever au coucher du soleil. Elle sert à mesurer la composante solaire directe reçue sur un plan normale. L'autre "pyranomètre EKO" mesure le flux de rayonnement diffus sur un plan horizontal. Le système est pourvu d'un corps noir de forme sphérique qui cache (création d'ombrage) le flux provenant directement du disque solaire. Les valeurs mesurées des composants solaires instantanés (diffus, directs et globaux) correspondent à un intervalle de cinq minutes [85].



Figure 4-3 : Station radiométrique de l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable URAER-Ghardaïa.

4.3.2 Description de l'habitat étudié

Le cas de notre étude, est une maison familiale de type F3 décrite sur (la figure 4-4). Ce logement comporte 2 chambres, un salon, une cuisine, une toilette, une salle de bain, un hall et un couloir.

La maison a une surface habitable d'environ 87.3 m², la hauteur des murs égale à 3 m.

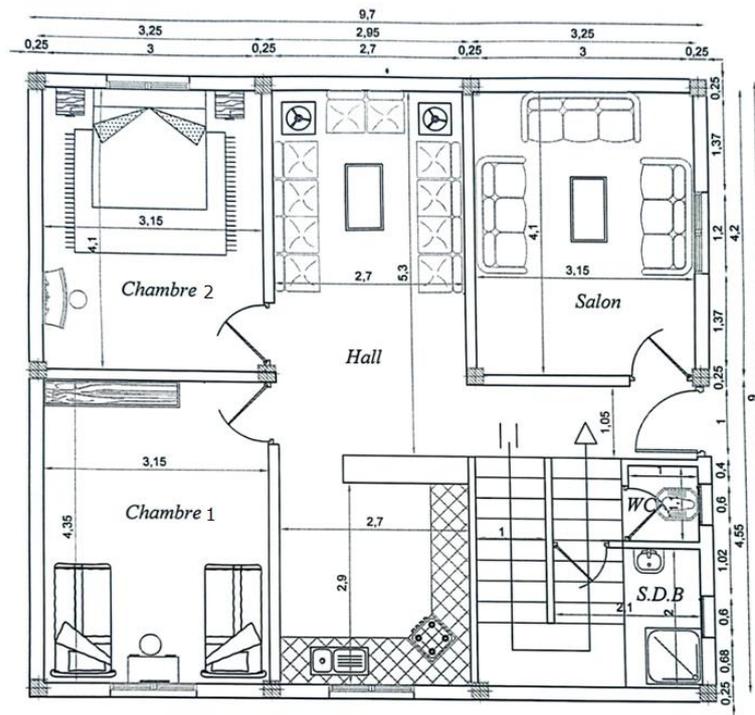


Figure 4-4 : Plan descriptif 2D de la maison.

4.3.3 Charge électrique de la maison

Le tableau (4-1) donne à la fois un état récapitulatif des consommations électriques journalières des électroménagers et du système d'éclairage pour toutes les pièces de l'habitat étudié.

Tableau 4-1 : Consommation électrique des électroménagers et du système d'éclairage en fonction de la fréquence d'utilisation.

Pièce	Equipement électrique	Propriétés	Puissance (W)	Fréquence d'utilisation (h)	Consommation journalière (Wh/j)
Chambre 1	Lampe d'éclairage	En service	20	8	160
	Sèche cheveux	En service	450	2	900
	Radio réveil	En service	10	20	200
	Chargeurs GSM	En service	5	3	15

Chambre 2	Lampe d'éclairage	En service	20	8	160
	Chargeurs GSM	En service	5	3	15
	Fer à repassé	En service	925	1	925
Salon	Lampe d'éclairage	En service	20	6	120
	TV	En service	138	8	1104
		En veille	6	16	96
	Démo	En service	15	8	120
		En veille	8.5	16	136
	micro	En service	70	6	420
		En veille	3	1	3
Chargeur GSM	En service	5	3	15	
Cuisine	Lampe d'éclairage	En service	20	8	160
	Frigo combiné 200 litres	En service	200	7	1400
	Four micro-ondes	En service	1350	1/3	450
	Lave-vaisselle	En service	1250	1/2	625
	Friteuse	En service	1900	1/5	380
Salle de bain	Lampe d'éclairage	En service	9	4	36
	Machine à laver	En service	1350	2	2700
	Rasoir électrique	En service	10	1/5	2
	Tondeuse électrique	En service	1000	1/2	500
Toilette	Lampe d'éclairage	En service	6	3	18
Couloir	Lampe d'éclairage	En service	10	2	20
Hall	Lampe d'éclairage 1	En service	15	8	120
	Lampe d'éclairage 2	En service	15	8	120
	Aspirateur		800	3/2	1200
Consommation journalière total					12 120

4.3.4 Résultats du dimensionnement du système PV et des batteries

L'objectif vise à optimiser le nombre de modules constituant le générateur photovoltaïque et le nombre de batteries. Sur la base des équations précédentes, il est possible de dresser deux tableaux, l'un tableau (4-2) concerne l'optimisation du coût des batteries de stockage et l'autre tableau (4-3) concerne les modules photovoltaïques. L'installation s'est basée sur une charge de 12.12 kWh définie comme étant la consommation journalière maximale durant toute l'année. L'enchaînement, le montage et la connexion des modules se font conformément et s'accordent aux équations précédentes.

Tableau 4-2 : Optimisation du coût, enchaînement et schéma de connexion des batteries solaires.

Capacité de la batterie (Ah)	Coût de la batterie (DA)	Nombre obtenu de batteries		Coût de la banque de batteries (DA)	Connexion des batteries
		Par calcul	à installer		
8	5 712	368	368	2 102 016	92 rangers de 4 batteries en série
14	10 608	212	212	2 248 896	53 rangers de 4 batteries en série
22	14 280	136	136	1 942 080	34 rangers de 4 batteries en série
38	33 456	80	80	2 676 480	20 rangers de 4 batteries en série
60	38 554	52	52	2 004 808	13 rangers de 4 batteries en série
90	56 714	36	36	2 041 704	9 rangers de 4 batteries en série
100	61 196	32	32	1 958 272	8 rangers de 4 batteries en série
165	106 284	20	20	2 125 680	5 rangers de 4 batteries en série
220	129 948	16	16	2 079 168	4 batteries en série
240	132 396	16	16	2 118 336	4 batteries en série

Pour notre application, les résultats montrent que le système composé de 12 modules solaires monocristallins est le plus rentable parmi les 16 types de modules considérés. Ce sont des modules de 262 Wc qui s'élèvent à 51 500 DA pour un seul. L'installation va comprendre aussi 136 batteries solaires (14 280 DA par batterie) avec une capacité de 22 Ah. Le montage de ces éléments est indiqué sur les deux tableaux. Il est à signaler que dans le tableau (4-3) si le prix unitaire est le même, nous retenons le cas dont la surface de captation du champ PV est la moins faible.

Tableau 4-3 : Optimisation du coût, enchaînement et schéma de connexion des modules photovoltaïques.

Type de modules	Puissance crête du module (Wc)	Coût du module (DA)	Nombre de modules PV par calcul	Connexion des modules PV	Nombre de modules PV à installer	Energie produite par les modules (Wh)	Coûts obtenus (DA)		Surface de captation du champ PV (m ²)
							des modules PV	Par Wh	
Monocristallin	20	8160	141	36 rangers de 4 modules en série	144	14 400	1 150 560	79.90	21.71
	30	9384	94	24 rangers de 4 modules en série	96	14 400	882 096	61.26	18.42
	40	12038	71	18 rangers de 4 modules en série	72	14 400	854 698	59.35	20.16
	55	15504	52	13 rangers de 4 modules en série	52	14 300	806 208	56.38	18.93
	90	24278	32	8 rangers de 4 modules en série	32	14 400	776 896	53.95	16.67
	115	27744	25	7 rangers de 4 modules en série	28	16 100	693 600	43.08	16.95
	140	31210	21	6 rangers de 4 modules en série	24	16 800	655 410	39.01	17.54
	175	37720	17	5 rangers de 4 modules en série	20	17 500	641 240	36.64	16.86
	262	51500	11	6 rangers de 2 module en série	12	15 720	566 500	36.03	12.36

Chapitre 4 : Etude et dimensionnement optimale d'un système PV autonome

Polycristallin	20	7958	141	36 rangers de 4 modules en série	144	14 400	1 122 078	77.92	21.71
	30	8774	94	24 rangers de 4 modules en série	96	14 400	824 756	57.27	21.55
	45	12648	63	16 rangers de 4 modules en série	64	14 400	796 824	53.34	17.89
	60	15706	47	12 rangers de 4 modules en série	48	14 400	738 182	51.26	17.11
	90	23256	32	8 rangers de 4 modules en série	32	14 400	744 192	51.68	16.67
	115	25498	25	7 rangers de 4 modules en série	28	16 100	637 450	39.59	16.95
	175	37526	17	5 rangers de 4 modules en série	20	17 500	637 942	36.45	16.86

Par calcul, de l'équation (4-12), le courant du régulateur choisi doit dépasser 55 A. C'est-à-dire la capacité du régulateur de charge doit être supérieure à la capacité déterminée, c'est pourquoi nous avons choisi un régulateur dont sa capacité est de 60 A. La capacité de l'onduleur requise pour la présente étude est retenue à une valeur de 3144 W. Nous devons donc sélectionner un onduleur de capacité supérieure à cette valeur; onduleur de 5 kVA de capacité par exemple.

Coût du régulateur (106 898 DA)

Coût d'onduleur (329 262 DA)

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mené une étude technico-économique pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome pour alimenter une maison par l'électricité. Nous avons résumé les principales étapes comme suit :

- Choix de l'emplacement : nous avons choisi Ghardaïa comme emplacement pour notre installation du système photovoltaïque. Il est important de tenir compte de la disponibilité de la lumière solaire dans cette région, car cela affectera la performance globale du système.
- Détermination des besoins en électricité : nous avons commencé par évaluer les besoins électriques de la maison, en prenant en compte les appareils électriques utilisés, leur puissance et leur durée d'utilisation quotidienne. Cela nous a permis de déterminer la quantité d'énergie électrique nécessaire.
- Détermination de l'angle d'inclinaison des panneaux : En utilisant les données sur le gisement solaire de Ghardaïa, nous avons calculé l'angle d'inclinaison optimal des panneaux solaires afin d'optimiser la réception de la lumière solaire.
- Détermination de la tension du système : nous avons évalué la tension appropriée pour notre système photovoltaïque, en prenant en compte les besoins spécifiques de la maison et les caractéristiques des panneaux solaires sélectionnés.
- Sélection des panneaux solaires : nous avons choisi le type de panneaux solaires qui convient le mieux à notre système, en prenant en compte des facteurs tels que l'efficacité, la durabilité et le coût. Cette sélection nous a permis de calculer le

nombre optimal de panneaux nécessaires pour répondre aux besoins en énergie électrique de la maison.

- Calcul du nombre de batteries : nous avons déterminé la capacité de stockage d'énergie nécessaire en fonction des besoins quotidiens de la maison et de l'autonomie souhaitée. En utilisant cette information, nous avons choisi le type de batteries et calculé le nombre optimal de batteries nécessaires pour stocker l'énergie produite par les panneaux solaires.
- Calcul de la capacité du régulateur de charge et de l'onduleur : nous avons dimensionné le régulateur de charge et l'onduleur en fonction de la capacité des panneaux solaires et des batteries. Le régulateur de charge garantit une charge optimale des batteries, tandis que l'onduleur convertit l'énergie stockée en courant alternatif utilisable par les appareils électriques de la maison.
- Calcul du coût des équipements : Enfin, nous avons évalué le coût total de tous les équipements nécessaires pour le dimensionnement du système photovoltaïque, y compris les panneaux solaires, les batteries, le régulateur de charge, l'onduleur et d'autres composants nécessaires.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons dimensionné et optimisé un système photovoltaïque autonome.

Au début nous avons présenté les types des énergies renouvelables en Algérie, nous avons basé sur l'énergie solaire photovoltaïque comme source pour la production de l'énergie électrique.

Dans notre travail, nous nous sommes appuyés sur certaines études antérieures dans ce domaine qui contiennent les différents types des méthodes de dimensionnement pour avoir quelques idées afin de proposer une méthode optimale de dimensionnement. Nous avons aussi présenté une description pour le système PV et leurs composants (module, batterie, onduleur et régulateur ...)

Une étude de cas appliquée à un habitat situé dans la région de Ghardaïa a été menée pour optimiser le dimensionnement du générateur PV et du banc de batteries et choisir le contrôleur de charge et l'onduleur appropriés dans le système photovoltaïque autonome. Dans ce mémoire, le dimensionnement optimal des modules PV et du banc de batteries a été effectué pour les systèmes PV autonomes. L'optimisation a été menée en utilisant l'environnement MATLAB basé sur deux types de PV solaires avec leur puissance de sortie et leur coût pour choisir des panneaux PV à moindre coût et la même chose pour le parc de batteries en sélectionnant parmi dix éléments de batteries à capacité et coût différents pour choisir un coût minimum de la banque de batteries. Cette méthode de dimensionnement aide les utilisateurs à sélectionner de manière optimale les composants photovoltaïques autonomes.

Une comparaison du programme MATLAB (établie dans le cadre de ce mémoire) avec une autre méthode de dimensionnement (retscreen...) aurait amélioré la qualité de notre étude. De plus, le développement d'un programme de dimensionnement sous Android pour des utilisateurs amateurs constitue une extension possible de ce travail.

Ce mémoire met en évidence l'importance de poursuivre les recherches dans ce domaine, en se concentrant sur les domaines qui nécessitent davantage d'attention. Les travaux futurs devraient viser à développer des approches novatrices, basées sur des données fiables et des

Conclusion générale

méthodologies rigoureuses, afin d'améliorer la précision et l'efficacité du dimensionnement des installations photovoltaïques autonomes.

Bibliographies

- [1] H. M. Ridha, C. Gomes, H. Hazim, and M. Ahmadi pour, “Sizing and implementing off-grid stand-alone photovoltaic/battery systems based on multi-objective optimization and techno-economic (MADE) analysis,” *Energy*, vol. 207, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118163.
- [2] Sofia Belaid Lalouni, « Cours Energie Solaire Photovoltaïque », Université A. MIRA de Bejaia, 2015.
- [3] <https://safetyculture.com/fr>.
- [4] MEGHELLET HANINE – HOCINE LYNDIA Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque.
- [5] <https://fr.wikipedia.org>.
- [6] Pollution Probe, «L'abc des technologies de l'énergie renouvelable »,2003.
- [7] *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483.
- [8] Documentation centrale photovoltaïque d'oued nechou, ghardaïa SKTM.
- [9] www.euronews.fr
- [10] Sarl Baosem «guide des énergies renouvelables», édition 2007.
- [11] Gherbi Djoudi Akila «Pompage solaire photovoltaïque» bulletin des énergies renouvelables N°23 2012, CDER.
- [12] EL GHARBI Najla «La centrale hybride de Hassi R'mel» bulletin des énergies renouvelables N°21 2011, CDER.
- [13] D. SEMMAR «Application Directe de l'Énergie Géothermique en Algérie» bulletin des énergies renouvelables N°5 Juin 2004, CDER.
- [14] Marwan JARKAS « Les énergies renouvelables».
- [15] FEKRAOUI «La géothermie, une Énergie d'Avenir» bulletin des énergies renouvelables N°4 Décembre 2003, CDER.
- [16] S. OUALI «Les sources Thermales en Algérie» bulletin des énergies renouvelables N°13 Juin 2008, CDER.

Bibliographies

- [17] Wahiba Bendaïkha «La climatisation géothermique: une solution adaptée à l'Algérie» bulletin des énergies renouvelables N°17 2010, CDER.
- [18] Soltane B, ‘ ‘ Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ‘ ‘, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010. J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'ingénieur, traite de génie énergétique, pp. b 8 585 1- b 8 585 21, 2002.
- [19] BAROUD Hinde et DJEKAOUA Habiba , « Estimation de l'ensoleillement par deux modèles semi-empiriques dans la région de Ghardaïa » Mémoire de MASTER, Université de Ghardaïa, Soutenu publiquement le : 24/06/2018.
- [20] SAHEB KOUSSA «Production d'électricité par un générateur éolien» bulletin des énergies renouvelables N°13 Juin 2008, CDER.
- [21] Lilia AICHE-HAMANE «Les perspectives de la production de l'Hydrogène par voie Eolienne» bulletin des énergies renouvelables N°13 Juin 2008, CDER.
- [22] www.dknews-dz.com.
- [23] www.algerie360.com
- [24] «L'aérogénérateur d'Adrar 50 ans d'existence» extrait du Journal El WATAN du 15 novembre 2003 page 24.
- [25] DOUADI TAREK, « Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone »; Mémoire de Magister en Electrotechnique, Option : Maîtrise d'énergie, Université de Batna, Décembre 2006.
- [26] KHECHAB Bachir , « Etude et modélisation d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation GADA dans la région d'Adrar », Mémoire de Magister , UNIVERSITE AFRICAINE AHMED DRAIA ADRAR, Année Universitaire 2014 / 2015.
- [27] Majda Amina AZIZA «Bioénergie et Biocarburants» bulletin des énergies renouvelables N°14 Décembre 2008, CDER.
- [28] L. AMROUCHE, S. IGOUD «Pourquoi s'intéresser au Biogaz ? » bulletin des énergies renouvelables N°7 Juin 2005, CDER.
- [29] W.X. Shen, Optimally sizing of solar array and battery in a standalone photovoltaic system in Malaysia, Renewable Energy, vol 34, 348–352, 2009.

Bibliographies

- [30] A. Chel, G.N. Tiwari, A. Chandra, Simplified method of sizing and life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic system, *Energy and Buildings*, vol 41, 1172–1180, 2009.
- [31] C. Hennous et k. Ait-Allala, Dimensionnement et installation d'un système photovoltaïque application à la F.G.E.I), mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electronique Option : Communication- Contrôle, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2009.
- [32] G. Notton, V. Lazarov, and L. Stoyanov, "Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations," *Renew Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 541–554, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.renene.2009.07.013.
- [33] J. K. Kaldellis, D. Zafirakis, and K. Kavadias, "Minimum cost solution of wind-photovoltaic based stand-alone power systems for remote consumers," *Energy Policy*, vol. 42, pp. 105–117, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2011.11.054.
- [34] H.A. Kazema, T. Khatiba, K. Sopian, Sizing of a standalone photovoltaic/battery system at minimum cost for remote housing electrification in Sohar, Oman, *Energy and Buildings*, vol 61, 108–115, 2013.
- [35] N. Benyahia et al., "Characterization and control of supercapacitors bank for stand-alone photovoltaic energy," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2013, pp. 539–548. doi: 10.1016/j.egypro.2013.11.055.
- [36] A. Bensaha, Conception et simulation d'une station photovoltaïque alimentant un site isolé au sud Algérien par TRNSYS, mémoire de Master en Electronique Option : Instrumentation, Université Amar Telidji, Laghouat, 2013.
- [37] A. F. Mohamed, M. M. Elarini, and A. M. Othman, "A new technique based on Artificial Bee Colony Algorithm for optimal sizing of stand-alone photovoltaic system," *J Adv Res*, vol. 5, no. 3, pp. 397–408, 2014, doi: 10.1016/j.jare.2013.06.010.
- [38] J. Faxas-Guzmán, R. García-Valverde, L. Serrano-Luján, and A. Urbina, "Priority load control algorithm for optimal energy management in stand-alone photovoltaic systems," *Renew Energy*, vol. 68, pp. 156–162, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.01.040.

Bibliographies

- [39] Y. M. Irwan et al., “Stand-Alone Photovoltaic (SAPV) System Assessment using PVSYST Software,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, Nov. 2015, pp. 596–603. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.539.
- [40] A. Nechmi, aperçu sur le système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable, mémoire de master en hydraulique urbaine Option: Alimentation d'eau potable, Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique Arbaoui Abdellah, Bouira, 2015.
- [41] D. Hichame et B. Mohamed, Etude et dimensionnement d'un système photovoltaïque dédié à une habitation, Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER PROFESSIONNEL en Electrotechnique option : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2017
- [42] N. D. Nordin and H. Abdul Rahman, “A novel optimization method for designing standalone photovoltaic system,” *Renew Energy*, vol. 89, pp. 706–715, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.12.001.
- [43] E. Doroudchi, S.K. Pal, M. Lehtonen, J. Kyyra, Optimizing Energy Cost via Battery Sizing in Residential PV/battery Systems. In: *Proceedings of the 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, ISGT ASIA 2015*, 2016.
- [44] O. Mokhtar, Elaboration d'un programme d'aide au diagnostic pour un système photovoltaïque autonome, mémoire de master en Génie électrique Option: Technologie des systèmes électro Energétiques des sources d'énergie renouvelables (TS3ER), Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2016.
- [45] D. E. Osuna et al., “ePV6-Trainer: Software for dimensioning stand-alone and grid-connected photovoltaic systems for educational purposes,” *Measurement (Lond)*, vol. 112, pp. 67–73, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2017.08.026.
- [46] C. O. Okoye and O. Solyali, “Optimal sizing of stand-alone photovoltaic systems in residential buildings,” *Energy*, vol. 126, pp. 573–584, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.03.032.
- [47] N. I. Abdul Aziz, S. I. Sulaiman, S. Shaari, I. Musirin, and K. Sopian, “Optimal sizing of stand-alone photovoltaic system by minimizing the loss of power supply probability,” *Solar Energy*, vol. 150, pp. 220–228, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.04.021.

Bibliographies

- [48] K. Ghaib and F. Z. Ben-Fares, "A design methodology of stand-alone photovoltaic power systems for rural electrification," *Energy Convers Manag*, vol. 148, pp. 1127–1141, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.06.052.
- [49] K. A. Kavadias and E. Karamanou, "Meteorological input data effect on sizing stand-alone photovoltaic systems," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 90–95. doi: 10.1016/j.egypro.2018.12.024.
- [50] R. Ayop, N. M. Isa, and C. W. Tan, "Components sizing of photovoltaic stand-alone system based on loss of power supply probability," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81. Elsevier Ltd, pp. 2731–2743, Jan. 01, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2017.06.079.
- [51] A. Giallanza, M. Porretto, G. L. Puma, and G. Marannano, "A sizing approach for stand-alone hybrid photovoltaic-wind-battery systems: A Sicilian case study," *J Clean Prod*, vol. 199, pp. 817–830, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.223.
- [52] J. A. da Costa, D. A. C. Branco, M. C. P. Filho, M. F. De Medeiros, and N. F. da Silva, "Optimal sizing of photovoltaic generation in radial distribution systems using Lagrange multipliers," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 9, May 2019, doi: 10.3390/en12091728.
- [53] A. L. Bukar and C. W. Tan, "A review on stand-alone photovoltaic-wind energy system with fuel cell: System optimization and energy management strategy," *Journal of Cleaner Production*, vol. 221. Elsevier Ltd, pp. 73–88, Jun. 01, 2019. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.228.
- [54] B. ABDELFFETTAH et A. AMJED, Etude technicoéconomique d'une installation photovoltaïque pour application dans la région de Ouargla, projet de fin d'étude en Electrotechnique Industrielle, université kasdi merbah, ourgla ,2020
- [55] R. M'Hammdi et C. Ben Amrani, étude techno-économie d'un système photovoltaïque (Maison solaire) sur le site D'adrar, mémoire de master physique énergétique et énergie renouvelable Option : Sciences de la Matière, Université Ahmed Draya, Adrar, 2020.
- [56] K. Janardhan, A. Mittal, and A. Ojha, "Performance investigation of stand-alone solar photovoltaic system with single phase micro multilevel inverter," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 2044–2055, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.egypr.2020.07.006

Bibliographies

- [57] B. FATIMA ZOHRA et B. ASSMAA, Etude Dimensionnelle D'une Installation Photovoltaïque, Projet de fin d'études en Energétique, Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib, 2021
- [58] A. N. Hamoodi, F.S. Abdulla, Sarmad, Mezher, Sulaiman, Design and sizing of solar PV system for the laboratory building at the Technical College of Engineering/Mosul and simulation with the PV*SOL program, Journal of Engineering and Technology, vol 1 (4), 15–22, 2022.
- [59] Y. Ben Messaoud et F. Bouti, Dimensionnement des système photovoltaïque, mémoire de master en énergie renouvelable électrotechnique Option : Électrotechnique, Université de Ghardaïa, 2022.
- [60] F. Nicoletti, M. A. Cucumo, and N. Arcuri, "Cost optimal sizing of photovoltaic-battery system and air–water heat pump in the Mediterranean area," Energy Convers Manag, vol. 270, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116274.
- [61] OUITIS Rym and TASSIST Zineddine, "Commande MPPT d'un système photovoltaïque résidentiel connecte au réseau électrique par la technique essaim particule
- [62] Belakehal Soltane, "Conception & Commande des Machines à Aimant Permanents Dédiées aux Énergies Renouvelables," Thèse de Doctorat, université de Constantine, 10/06/2010.
- [63] http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Fichier:Sch_install_autonome.jpg
- [64] Pierre Dupuis, Modélisation aux éléments finis du refroidissement d'un module photovoltaïque intégré au bâtiment à l'aide de matériau à changement de phase option : génie civil en 2019
- [65] Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Stéphane Petibon, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-000377788/document>, 2009
- [66] Abdelkarim ghezal, aspects techniques des projets solaires PV raccordés au réseau, option : formation sur les études de faisabilité technico- économique des projets photovoltaïques raccordées au réseau
- [67] Belhadj Mohammed « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome » université de Bechar ,2008.

Bibliographies

- [68] Oriol Planas - Industrial Technical Engineer, specialty in mechanics: May 13, 2015
- [69] Maxime Montaru, « Contribution A L'évaluation Du Vieillissement Des Batteries DePuissance Utilisées Dans Les Véhicules hybrides selon leurs usages ». Institut polytechnique de Grenoble, thèse de doctorat soutenue le 06/07/2009.
- [70] Alain Ricaud, « Modules Et Systèmes Photovoltaïques ». Université De Savoie. Article : septembre 2008
- [71] Mazouz Karim, [étude d'une batterie de stockage dans un système photovoltaïque] universite Abderrahmane mira Bejaia option automatisme industriel, Mémoire De Fin D'étude 2012
- [72] Fabrice Delfosse, « Détermination De L'état De Charge Des Batteries D'un Véhicule Electrique ». Université De Liège, Mémoire D'ingénieur Année Académique 1997-1998
- [73] Stéphane VIGHETTI, « système photovoltaïque raccordes Au Reseau : choix et Dimensionnement des Etages de conversion » ., Universite De Grenbole, these De Doctorat Soutenu Le 24/09/2010. Polytechnique De Grenoble .
- [74] BELLALA Djamel, « Contribution A l'Optimisation Des Systèmes De Conversion D'Énergie. Application Aux Systèmes Photovoltaïques ». Université De Batna, Thèse De doctorat soutenue Le 06 / 07 /2009
- [75] Loïc BOULON, « Modélisation Multiphasique Des Eléments De Stockage Et De Conversion D'énergies Pour Les Véhicules Electriques Hybrides. Approche Systémie Pour La Gestion D'énergie » Université De Franche-Comté, Thèse De Doctorat Soutenu Le 3/7/2009
- [76] Akassewa Tchapo SINGO, « Système D'alimentation Photovoltaïque Avec Stockage Hybride Pour L'habitat Energétiquement Autonome », Université Henri Poincaré Thèse De Doctorat Soutenu Le 3/02/2010
- [77] <https://alpinpowersystems.com/resources/battery-chemistries-technologies/nickel-zinc-batteries/>

Bibliographies

- [78] Maouedj Rachid, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et Bouzareah » Université de Tlemcen, 2005
- [79] Labouret Anne, « Energie solaire photovoltaïque », Université de Paris, 2006.
- [80] Khaled Saidoun, M. Simoussi, " Commande MLI d'un onduleur multi-niveaux ", Mémoire de Master en ETH, UMMTO 2015.
- [81] OURABI Lassaad, " Les convertisseurs continus/alternatifs ", ISET de Bizerte.
- [82] H. Hassini, Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque, Thèse de Doctorat en Sciences Spécialité Physique énergétique, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, 2010.
- [83] A. Gama, Etude et réalisation d'un banc d'essai hybride photovoltaïque thermodynamique, Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'El-Harrach, 2007.
- [84] A. Chel, G.N. Tiwari, A. Chandra, Simplified method of sizing and life cycle cost assessment of building integrated photovoltaic system, Energy and Buildings, vol 41, 1172 – 1180, 2009.
- [85] A. Bensaha, Exploitation de l'énergie solaire pour la conception d'un habitat dans un site isolé en zone semi-aride à Ghardaïa, Thèse de Doctorat LMD Spécialité Matériaux et Energies Renouvelables, Université Amar Telidji, Laghouat, 2021.