

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

**ETUDE NUMERIQUE DES PERFORMANCES D'UNE
CENTRALE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE**

Devant le jury composé de :

Dr. Bachir ZINE

Dr. Mokhtar GHODBANE

Dr. Soulef LARGOT

Dr. Mohamed Laid ZENINA

Dr. Youcef GUERFI

Président

Encadreur

Encadreur

Examineur

Examineur

Présenté par :

Abassi Omar

Boutaleb seyfelislam

Rezzazga Mourad

Touahri Ahmed

El-Oued (2022)

REMERCIEMENTS

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, notre remerciement s'adresse à ***Dr. Soulef LARGOT*** pour sa soutient moral et ses encouragements.

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de ***Dr. Mokhtar GHODBANE***. On le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa rigueur et sa disponibilité, son aide pratique durant notre préparation de ce mémoire.

Nous adressons également nos remerciements à tous les membres du comité de discussion, les honorables docteurs ***Dr. Bachir ZINE, Dr. Mohamed Laid ZENINA*** et ***Dr. Youcef GUERFI***, qui ont bien voulu nous apporter leurs précieux conseils et observations visant à améliorer ce travail.

Notre remerciement s'adresse également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Abassi, Boutaleb, Rezzazga & Touahri

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

En premier lieu à mes parents qui m'ont soutenu pour me permettre de réaliser tous mes objectifs et qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.

A mes frères, mes sœurs et toute la famille BOUTALEB.

A toute la promotion d'électromécanique 2022 A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à maintenant surtout nos enseignants du département génie mécanique.

A tous mes camarades et mes amis de Sidi Amranne.

S. BOUTALEB

Je dédie ce travail à tous ceux qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui :

A mon cher père ALLAH YARHMOU et ma chère mère Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense Amour que je leur porte, ni la profonde gratitude que je leur témoigne pour tous les sacrifices qu'ils n'ont jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être. J'espère avoir répondu aux espoirs qu'ils ont fondé en moi, et que ce modeste travail soit l'exaucement de leurs vœux.

A mes chers frères, à mes chères sœurs et leurs fils que vous trouvez tous mes vœux et vous voir réussir dans vos vies.

A ma chère femme nous avons dessiné bien des routes ensemble et espérons un avenir heureux et joyeux, merci pour ton attention tes intentions et tes sentiments à mon égard.

A mes chères fils YACER, MOUAD, KHALED, MALEK sans oublier KARAKOUDI que vous trouvez tous mes vœux et vous voir réussir dans vos vies.

A tous les membres de la famille REZAZGA, petits et grands.

A toute la promo 2022, puisse Dieu les garder, éclairer leurs routes et les aider à réaliser leurs vœux les plus chers.

A mes collègues de travail merci pour tous, bonne réussite personnelle et professionnelle.

A tous ceux qui me sont chers exception EL-MOARADA.

Mr ALI CHEMSSA Recevez ici, l'expression de ma reconnaissance et mon profond respect.

M. REZAZGA

Nous dédions cet humble travail à :

A nos chers parents, source de vie, d'amour et d'affection.

Pour nos frères et sœurs et leurs enfants, cela témoigne de l'amour.

de la joie et du don qui nous unissent.

Aux membres du corps professoral de l'Université d'El-Oued qui nous ont fourni une formation scientifique très importante.

A tous ceux qui nous ont encouragés et conseillés.

Pour ceux qui n'ont pas ménagé leur temps ou leurs connaissances pour répondre à nos questions.

Pour ceux qui nous ont soutenu.

A nos chers amis.

A tous ceux qui nous ont accompagnés sur notre route universitaire.

A. ABASSI

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
DEDICACE	ii
TABLE DES MATIERES	iv
NOMENCLATURES	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	4
I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	4
<i>Introduction</i>	<i>4</i>
<i>Bref sur les cellules photovoltaïques</i>	<i>5</i>
Historique de cellules photovoltaïques	5
La cellule photovoltaïque	6
Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	8
Les différentes technologies photovoltaïques	10
(a) Le silicium [43]	10
(i) Silicium monocristallin	11
(ii) Silicium polycristallin	11
(iii) Silicium en ruban autosupporté	12
(iv) Silicium en couches minces nanocristallin et amorphe	12
(b) Les cellules III-V multi-jonctions	12
(c) Cellules en couches minces	13
(i) Cellules à base de tellure de cadmium	13
(ii) Cellules à base de séléniure de cuivre indium	14
(d) Les cellules photovoltaïques organiques	15

(e) Silicium en couches minces nanocristallin et amorphe	16
Association des cellules	17
(a) Association en série	17
(b) Association en parallèle	18
<i>Bref sur systèmes photovoltaïques</i>	19
(a) Système autonome	19
(i) Système autonome sans batterie	19
(ii) Système autonome avec batterie	20
(b) Système hybride	21
<i>Recherche bibliographique</i>	23
<i>Production d'électricité utilisant la technologie photovoltaïque</i>	26
<i>Conclusion</i>	27
CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION DE LA CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE	28
II. MODELISATION ET SIMULATION DE LA CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE	28
<i>Introduction</i>	28
<i>Etapas de modélisation et de simulation de la centrale photovoltaïque</i>	29
Caractéristiques de la centrale	29
Caractéristiques du module	30
Caractéristiques de l'onduleur	31
Dégradation du module PV	32
Batterie de Stockage	33
Sortie de courant alternatif d'un système PV	35
Les pertes de courant alternatif d'un système PV	35
Puissance générée par un système PV	35
<i>Conclusion</i>	36
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS	37
III. RESULTATS ET DISCUSSIONS	37
<i>Introduction</i>	37

<i>Les conditions climatiques</i>	37
<i>Analyse énergétique de la centrale photovoltaïque</i>	41
<i>Analyse économique de la centrale photovoltaïque</i>	47
<i>Analyse environnementale de la centrale photovoltaïque</i>	48
<i>Conclusion</i>	49
CONCLUSION GENERALE ET PROSPECTIVES	50
REFERENCES	51

NOMENCLATURES

I_{0BSC}	Densité de courant d'obscurité, (A/m ²)
I_{Ph}	Densité de courant photogénéré, (A/m ²)
I_{cc}	Courant de court-circuit, (A)
I_m	Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, (A)
P_i	Puissance d'éclairement reçue par unité de surface, (W/m ²)
V_{co}	Tension en circuit ouvert, (V)
FF	Facteur de forme
I_{ccNp}	La somme des courants de court-circuit de (N_p) cellules en parallèle, (A)
I_{ccNs}	Courant de court-circuit de N_s cellules en série, (A)
I_s	Courant de saturation de la diode, (A)
k	Constante de Boltzmann, ($1,380649 \times 10^{-23}$)
q	Charge élémentaire ($1,60217663 \times 10^{-19}$ C)
S	Surface de la cellule photovoltaïque (m ²)
SAM	System Advisor Model
T	Température (°C)
V_{coNp}	La tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle (V)
V_{coNs}	La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série (V)
V_m	Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque (V)
V_m	Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque (V)
η	Rendement de conversion

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I. 1 : <i>Réprésentation de la jonction p-n dans une cellule PV.</i>	7
Figure I. 2 : <i>Structure (image gauche) diagramme de bande (image droite) de cellules photovoltaïques.</i>	7
Figure I. 3 : <i>Classification des cellules solaires photovoltaïques.</i>	8
Figure I. 4 : <i>Caractéristiques $I=(V)$ sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque [41].</i>	10
Figure I. 5 : <i>Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque [43].</i>	11
Figure I. 6 : <i>Exemple de deux matériaux utilisés pour fabriquer une cellule photovoltaïque organique : Phényle-C-Butyric Acid Methyl ester (PCBM) comme accepteur et Poly(3-Hexyl) Thiophène (P3HT) comme donneur [50].</i>	16
Figure I. 7 : <i>Caractéristiques résultantes d'un groupement de (N_s) cellules en séries.</i>	18
Figure I. 8 : <i>Caractéristiques d'un groupement de (N_p) cellules en parallèle.</i>	19
Figure I. 9 : <i>Pompage d'eau par PV autonome sans batterie.</i>	20
Figure I. 10 : <i>Système PV autonome avec batterie.</i>	21
Figure I. 11 : <i>Exemple d'un système photovoltaïque hybride.</i>	22

CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION DE LA CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE

Figure II. 1 : <i>La localisation de la commune de Guemar sur la carte de l'Algérie.</i>	28
Figure II. 2 : <i>Localisation de la commune de Guemar dans la Wilaya d'El-Oued.</i>	28
Figure II. 3 : <i>Caractéristiques du module aux conditions de référence (le rayonnement solaire totale = $1000W/m^2$, température de la cellule PV = $25\text{ }^\circ C$).</i>	31
Figure II. 4 : <i>Courbes de rendement et caractéristiques de l'onduleur utilisé.</i>	32
Figure II. 5 : <i>Schéma fonctionnel du courant alternatif connecté à une batterie dans un système PV [71].</i>	34
Figure II. 6 : <i>Schéma fonctionnel du courant continu connecté à une batterie dans un système PV [71].</i>	34

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure III. 1 : <i>La variation du rayonnement solaire total annuel moyen en fonction du temps.</i>	38
Figure III. 2 : <i>Variation de la température moyenne annuelle de l'air en fonction du temps.</i>	39
Figure III. 3 : <i>Variation de la vitesse moyenne annuelle du vent en fonction du temps.</i>	40
Figure III. 4 : <i>Quantité d'électricité nette (données horaires) vers le réseau en fonction du temps.</i>	42
Figure III. 5 : <i>L'électricité nette au réseau au cours de la première année.</i>	43
Figure III. 6 : <i>L'électricité nette annuelle vers le réseau par rapport au temps de la durée de vie de la centrale photovoltaïque.</i>	44
Figure III. 7 : <i>Les pertes enregistrées dans la centrale photovoltaïque au cours de la première année de fonctionnement.</i>	46

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I. 1 : <i>Une synthèse des recherches les plus importantes de la littérature sur la technologie photovoltaïque.</i>	23
---	----

CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION DE LA CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE

Tableau II. 1 : <i>les caractéristiques de la centrale étudiée.</i>	29
---	----

INTRODUCTION GENERALE

Les ressources énergétiques mondiales peuvent être divisées par type en combustibles fossiles, combustibles nucléaires et ressources renouvelables. En ce qui concerne les combustibles fossiles, il se forme à la suite de restes d'organismes vivants qui ont été enfouis à de grandes profondeurs et ont été soumis à une pression et à une chaleur intense, ce qui a conduit à leur transformation en hydrocarbures. Les combustibles fossiles sont une bonne source d'énergie et sont largement utilisés, malgré leur impact négatif sur l'environnement et leurs limites. Les combustibles fossiles sont le charbon, le pétrole et le gaz naturel [1]. Quant au combustible nucléaire, il a été développé dans la seconde moitié du XXe siècle. C'est une technologie très demandée depuis sa création et qui nécessite un contrôle strict en raison des risques et des éventuels accidents qui peuvent survenir. Le combustible nécessaire pour un réacteur nucléaire est l'uranium et parfois le platine. La désintégration radioactive est accélérée à l'intérieur du réacteur nucléaire pour libérer plus rapidement de l'énergie aux fins d'utilisation. L'énergie renouvelable est l'énergie issue de processus naturels, sans intervention humaine, et constamment renouvelée. Il existe de nombreuses sources d'énergie renouvelable, tels que l'énergie solaire, l'énergie géothermie, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, en plus de l'énergie de la biomasse sous ses différentes formes [2, 3]. Les avantages les plus importants des énergies renouvelables sont qu'elles sont inépuisables, gratuites et propres. Ainsi, chaque pays, y compris l'Algérie, recherche des sources d'énergie propres et permanentes auprès de Mère Nature, et tente de généraliser l'exploitation de ces sources propres sur l'ensemble du territoire national, en fonction de la disponibilité des conditions climatiques appropriées et de la quantité d'énergie demande dans ces endroits [4-19].

L'énergie solaire est l'énergie émise par le rayonnement solaire qui est largement disponible géographiquement, où elle est la source d'énergie renouvelable la plus importante car elle est de nature permanente et non polluante, à une époque où il y a eu une diminution notable des niveaux de combustibles fossiles, de pétrole et de charbon, en plus du gaz naturel. Les techniques d'utilisation de l'énergie solaire comprennent l'utilisation de l'énergie thermique du soleil, que ce soit pour le chauffage direct ou dans le cadre d'un processus de conversion mécanique pour le mouvement ou l'énergie électrique, ou pour générer de l'électricité par des phénomènes photovoltaïques à l'aide de panneaux photovoltaïques, en plus des conceptions architecturales qui dépendent de l'exploitation de l'énergie solaire, qui sont des techniques qui

peuvent contribuer de manière significative à résoudre certains des problèmes les plus urgents du monde aujourd'hui. Il existe de nombreux types de capteurs solaires, y compris les capteurs solaires plans, les concentrateurs solaires et les panneaux photovoltaïques [20, 21], où la recherche scientifique moderne cherche à améliorer les performances de ces capteurs de plusieurs manières, dont la plus importante est l'utilisation de fluides de travail contenant des nanoparticules [2, 3, 22-25]. Donc, la plupart des sources d'énergie renouvelables disponibles à la surface de la Terre sont attribuées au rayonnement solaire en plus des sources d'énergie secondaires (l'énergie éolienne, l'énergie des vagues, l'hydroélectricité et la biomasse, etc.). Il convient de noter que seule une petite partie de l'énergie solaire disponible a été utilisée dans la vie humaine. L'énergie électrique est générée à partir de l'énergie solaire par des générateurs thermiques (les centrales solaires pour produire de l'électricité qui dépendent des Réflecteurs Linéaires de Fresnel ou les Collecteurs cylindro-parabolique, etc.) ou des panneaux photovoltaïques [26-28]. Une fois l'énergie solaire convertie en énergie électrique, seule l'ingéniosité humaine contrôle ses utilisations [29-31]. D'autres applications qui dépendent de l'exploitation de l'énergie solaire sont le chauffage de l'eau [23, 24, 32-35], la climatisation [36-38], la distillation et le dessalement de l'eau, la cuisson, le séchage des fruits et légumes [39], etc.

Comme indiqué ci-dessus, l'une des applications modernes les plus importantes de la conversion de l'énergie solaire est la production d'électricité photovoltaïque. Les systèmes photovoltaïques (PVs) fonctionnent en convertissant directement la lumière du soleil en électricité et les cellules photovoltaïques sont les éléments constitutifs des PVs qui génèrent de l'électricité. La centrale photovoltaïque est un système photovoltaïque à grande échelle conçu pour fournir de l'électricité commerciale au réseau électrique. La source d'énergie d'une centrale photovoltaïque est constituée de panneaux solaires qui convertissent directement la lumière en électricité.

Le sujet de ce travail porte sur la possibilité d'exploiter des panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité dans des zones désertiques comme la région d'El-Oued, qui est connue pour son secteur agricole, qui est l'un des secteurs qui consomment de l'électricité en très grande quantité. Cette étude est une simulation d'une centrale photovoltaïque dans la région de Guemar (33,71° N et 6,71° E et 44 m) dans la wilaya d'El-Oued, Algérie, où le programme

SYSTEM ADVISOR MODEL (SAM) a été utilisé pour effectuer la simulation. Cette étude permettra aux étudiants de :

- Mieux connaître les énergies renouvelables, notamment solaires .
- En savoir plus sur l'électricité photovoltaïque, notamment les centrales photovoltaïques .
- Identifier et savoir raccorder un panneau photovoltaïque à un système ;
- Connaître les facteurs les plus importants qui affectent la productivité d'une centrale photovoltaïque .
- Lier les connaissances acquises académiquement aux connaissances acquises expérimentalement.

Concernant le plan de travail suivi dans ce mémoire, il est le suivant :

- Introduction générale .
- Chapitre N° 1 : il contient une recherche bibliographique sur les systèmes photovoltaïques .
- Chapitre N° 2 : il est destiné à présenter tous les composants de la centrale photovoltaïque étudiée, ainsi que les étapes de simulation .
- Chapitre N° 3 : il est destiné à présenter, analyser et discuter les résultats obtenus .
- Conclusion générale.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

Le phénomène de production d'électricité à partir de la lumière a été découvert au début du 19e siècle, mais il n'a été appliqué qu'au milieu du 20e siècle. La première cellule photovoltaïque a été développée pour les programmes spatiaux aux États-Unis, où les cellules étaient peu nombreuses et chères. Le développement des cellules photovoltaïques comme source d'énergie a commencé dans les laboratoires des États-Unis d'Amérique au début des années soixante-dix du XXe siècle. Donc, la conversion de la lumière du soleil en énergie électrique à l'aide de panneaux photovoltaïques est l'une des avancées scientifiques majeures du XXe siècle et l'une des meilleures techniques utilisées dans le domaine des énergies renouvelables, où l'utilisation de systèmes photovoltaïques est devenue l'une des sources importantes et croissantes dans de nombreuses régions du monde, ce qui l'a rendu important pour son utilisation dans de nombreuses applications.

Un panneau photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques. Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs (principalement du silicium) qui sont compressés dans une tranche spécialement traitée pour former un champ électrique, positif à une extrémité et négatif à l'autre. Lorsque l'énergie lumineuse atteint la cellule, des électrons sont libérés des atomes du semi-conducteur. Pour simplifier le problème, les photons de la lumière solaire excitent les électrons à un état d'énergie plus élevé pour générer de l'électricité. Les électrons sont collectés sous la forme d'un courant électrique si des conducteurs électriques sont connectés aux extrémités négative et positive. Les cellules photovoltaïques doivent être protégées des éléments et sont généralement stockées sous une enceinte en verre. Lorsque plus d'énergie est nécessaire que la capacité d'une seule cellule, les cellules sont connectées électriquement pour former des panneaux photovoltaïques ou solaires. Et un panneau suffit pour alimenter un téléphone. Pour alimenter une usine ou une maison en électricité, un large éventail de panneaux photovoltaïques doit être créé. Le système photovoltaïque est constitué de cellules solaires connectées électriquement les unes aux autres pour former une unité de production

d'énergie électrique. Les modules sont conçus pour fournir de l'énergie électrique à une certaine tension, généralement 12 volts. La quantité d'électricité générée dépend de la quantité de lumière tombant sur l'unité. Il est possible de former un ensemble de modules en les reliant entre eux. Les cellules photovoltaïques produisent un courant constant. Les cellules peuvent être connectées en série ou en parallèle pour produire le courant ou la tension souhaité.

Dans ce chapitre, la plupart des informations et données relatives au développement des cellules photovoltaïques, ainsi que des panneaux et systèmes photovoltaïques seront présentées et se concluront par une recherche récente dans la littérature.

Bref sur les cellules photovoltaïques

Historique de cellules photovoltaïques

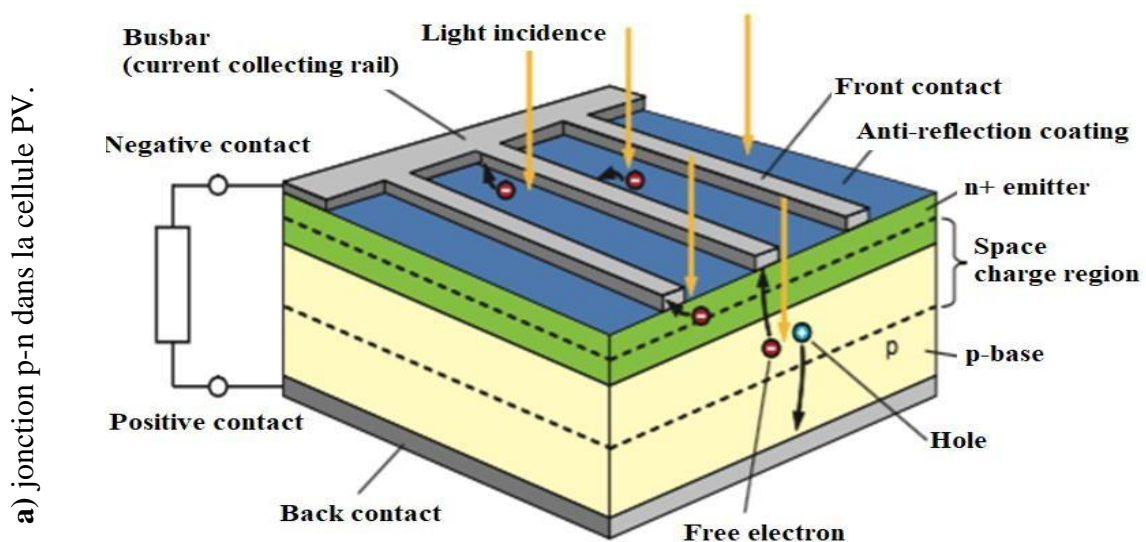
La cellule photovoltaïque est l'un des composants les plus importants des panneaux photovoltaïques, car la cellule convertit la lumière du soleil et les photons qui y tombent en énergie électrique qui peut être utilisée pour faire fonctionner des charges électriques. Le développement de la technologie des cellules solaires est dû à un article de 1839 du physicien français Antoine César Becquerel, qui a observé l'effet photoélectrique en testant une électrode solide dans une solution d'électrolyte, car il a vu la tension se produire lorsque la lumière tombe sur l'électrode. Par la suite, la première véritable cellule solaire a été construite vers 1883 par Charles Frits, qui a utilisé des jonctions formées en superposant du sélénium (un semi-conducteur) avec une fine couche d'or. En plus, Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule PV en silicium d'un rendement de 4,5% [40]. En 1941, les cellules solaires au silicium ont été inventées par Russell Ohl avec une efficacité de conversion d'énergie inférieure à 1%. En 1954, trois chercheurs américains (Gerald Pearson, Calvin Fuller et Daryl Chapin) ont conçu une cellule solaire en silicium capable d'atteindre un rendement de conversion d'énergie de 6 % avec la lumière directe du soleil. Ils ont créé un réseau de plusieurs bandes de silicium (Chacun a la taille d'une lame de rasoir), et les a mis à la lumière du soleil, et a capturé les électrons libres et les a transformés en courant électrique, car ces trois inventeurs sont les premiers à fabriquer des panneaux photovoltaïques.

La cellule photovoltaïque

Le principe de la cellule photovoltaïque est de convertir l'énergie photonique contenue dans le rayonnement solaire qui tombe sur la cellule en énergie électrique par l'effet de l'action photoélectrique. Cette conversion repose sur trois mécanismes :

- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif .
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur .
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le processus se déroule à l'intérieur des cellules solaires photovoltaïques qui sont constituées de deux types différents de semi-conducteurs, un type n (type négatif) et un type p (type positif). Cet assemblage crée une jonction p-n, où un champ électrique est créé dans cette jonction p-n lorsque les trous migrent vers le côté n et les électrons vers le côté p. La lumière du soleil est constituée de photons qui sont de petits paquets d'énergie ou de rayonnement électromagnétique. Si la longueur d'onde de la lumière est compatible avec la cellule solaire, alors l'énergie des photons est transmise aux électrons de la cellule solaire (voir la figure I.1). Par conséquent, ces électrons se déplacent de la "bande de valence" vers la "bande de conduction", créant derrière des "trous" dans la "bande de valence" (voir la figure I.2). Par conséquent, une paire électron-trou est formée.



b) Principe de fonctionnement du module PV.

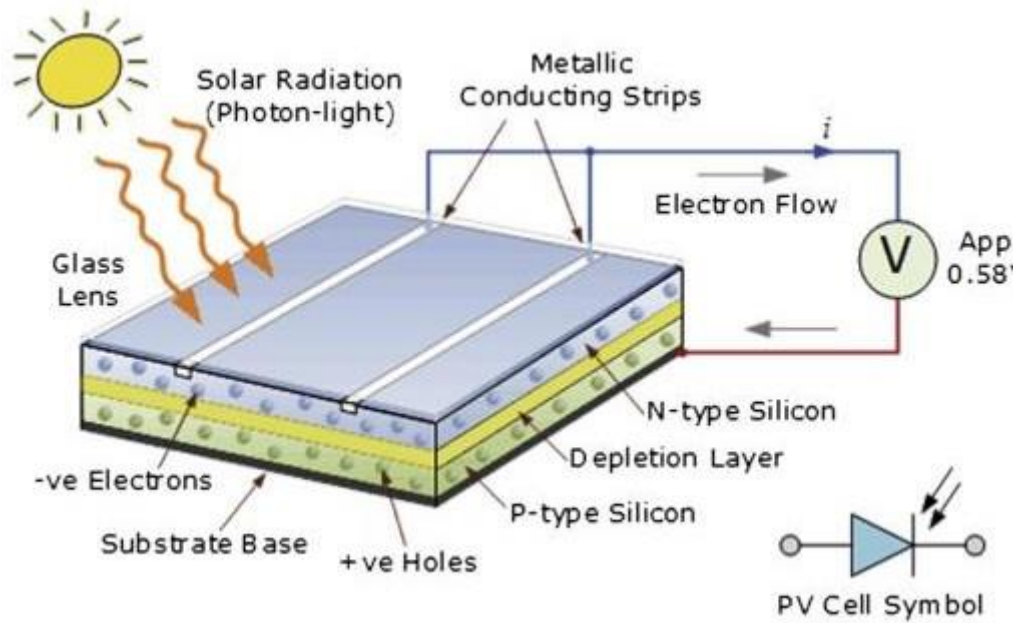


Figure I. 1 : Représentation de la jonction p-n dans une cellule PV et le principe de fonctionnement du module photovoltaïque [41].

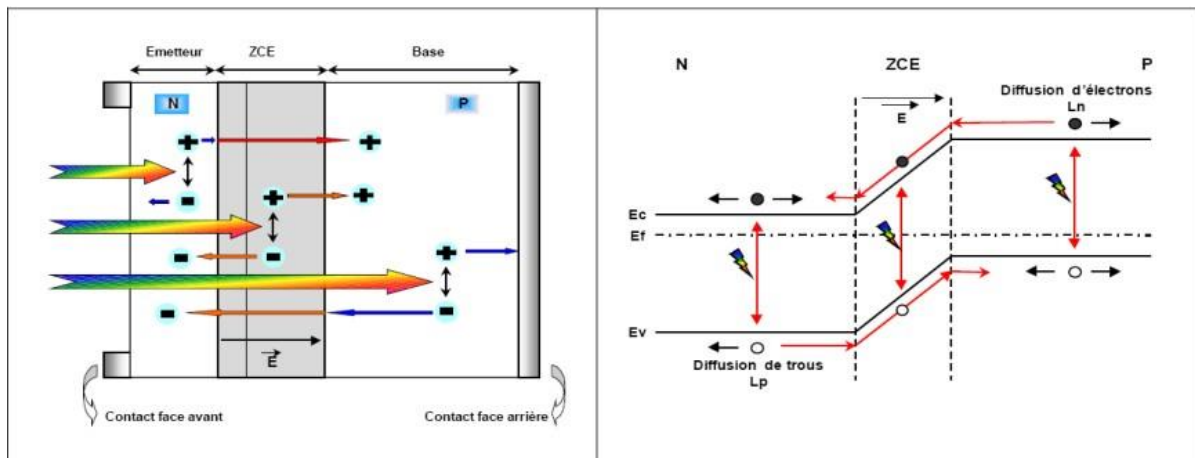


Figure I. 2 : Structure (image gauche) diagramme de bande (image droite) de cellules photovoltaïques.

Comme illustré à la Figure I.3, la jonction p-n peut être constituée de différents matériaux, qui s'améliorent constamment. En conséquence, les cellules solaires ont évolué de la première génération à la quatrième génération. Les cellules solaires de première génération comprennent des cellules en silicium cristallin. La deuxième génération, également connue sous le nom de cellules en silicium à couche mince, comprend les cellules CdTe, les cellules en silicium

amorphe et les cellules CIGS. Les cellules de troisième génération comprennent des cellules solaires à colorant DSSC et des cellules solaires à jonctions multiples du groupe III-V. La configuration à jonctions multiples est utilisée pour maximiser l'absorption de la lumière en raison des différentes capacités d'absorption de différentes jonctions. Généralement, deux principales technologies photovoltaïques sont rapportées dans la littérature : les technologies PV conventionnelles et PV concentrées.

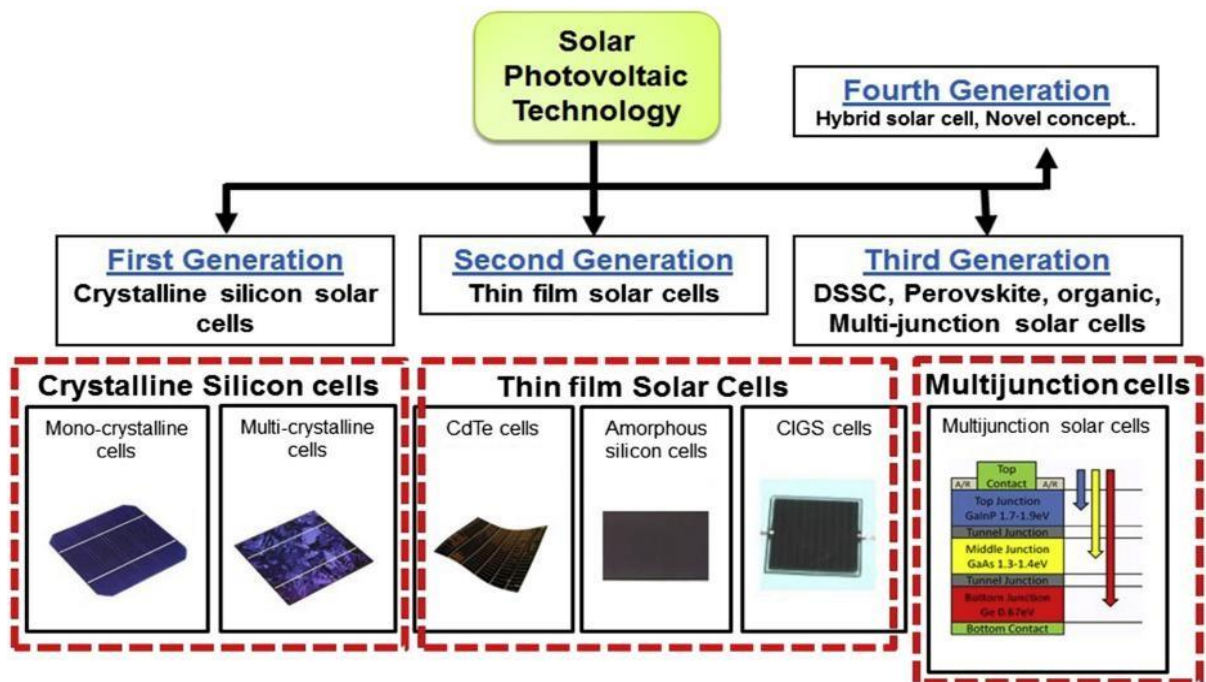


Figure I. 3 : Classification des cellules solaires photovoltaïques [41].

Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Le courant délivré à une charge par une photovoltaïque photocellule éclairée est donné par l'équation (I.1).

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V) \quad (I.1)$$

Avec (I_{ph}) est le courant photogénéré et (I_{obsc}) est le courant d'obscurité.

Pour une cellule photovoltaïque idéale, Le courant est calculé comme indiqué dans l'équation (I.2).

$$I(V) = I_{ph} - I_s (\exp(qV / kT) - 1) \quad (I.2)$$

Avec (I_s) est le courant de saturation de la diode, (q) est la charge élémentaire, (k) est la constante de Boltzmann et (T) est la température.

Comme le montre la figure I.4, dans une cellule photovoltaïque, il y a deux courants s'opposent (courant sous obscurité et courant sous éclairment). A partir de la caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

- (I_{CC}) est courant de court-circuit en Volt (obtenu pour $V=0$) .
- (V_{CO}) est la tension en circuit ouvert en Ampère (obtenue pour $I=0$) .
- (I_m) est le courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en Ampère .
- (V_m) est la tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque en Volt .
- (η) est le rendement de conversion .
- (FF) est le facteur de la forme.

Quant au rendement (η), il représente le rapport entre la puissance électrique maximale fournie et la puissance solaire incidente.

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_i S} \quad (I.3)$$

Avec (P_i) est la puissance d'éclairment reçue par unité de surface et (S) d'une cellule photovoltaïque.

Quant au facteur de la forma (FF), il représente le rapport entre la puissance maximale délivrée sur la charge ($V_m I_m$) et le produit des coefficients ($V_{co} \cdot I_{cc}$).

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (I.4)$$

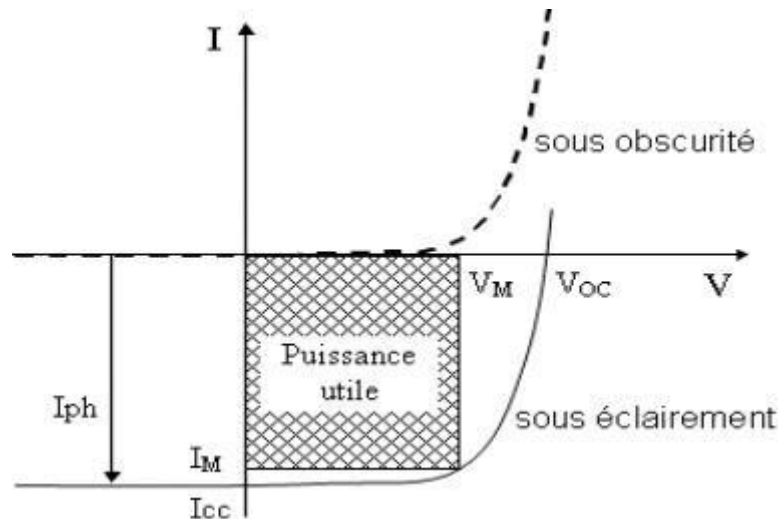


Figure I. 4 : Caractéristiques $I=(V)$ sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque [42].

Les différentes technologies photovoltaïques

(a) Le silicium [43]

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques comme le montre la Figure 1.5. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, polycristallin, rubans) dites de première génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince.

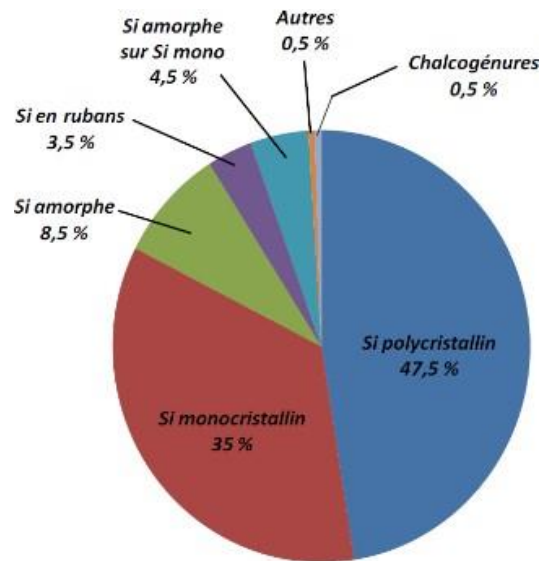


Figure I. 5 : Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque [44].

(i) Silicium monocristallin

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique, mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable, proche du MWh [45]. Les siliciums obtenus sont appelés Cz (méthode Czochralski) et FZ (Float Zone), et permettent d'obtenir des rendements de conversion records en laboratoire, de l'ordre de 25 % pour des cellules de 4 cm² (Université de New South Wales, Australie) [42, 46], soit supérieurs de huit points à ceux de l'industrie. Les inconvénients de cette technologie sont les rendements faibles obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux.

(ii) Silicium polycristallin

Le silicium polycristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (dénommé silicium multicristallin) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Cependant, le matériau multicristallin est d'une part contraint et disloqué, et d'autre part contaminé par des impuretés résiduelles de la matière première de silicium. Cette dernière est en partie constituée par des rebuts de l'industrie de la microélectronique, c'est-à-dire le silicium monocristallin Cz ou FZ. Les rendements de conversion industriels, qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980, sont actuellement de 16 à 17 % pour des grandes plaquettes de 200 cm² [42, 46]. Il s'agit de la technologie la plus

représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.

(iii) Silicium en ruban autosupporté

Les techniques de production de silicium cristallin en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. La plus connue est basée sur l'effet de capillarité entre deux lèvres de carbone. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et, pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles. Cependant, la vitesse de croissance linéaire extrêmement lente (quelques cm/min) pousse les industriels à abandonner progressivement cette technologie. Les meilleurs rendements obtenus sont néanmoins de l'ordre de 15 % [46, 47].

(iv) Silicium en couches minces nanocristallin et amorphe

Depuis les années 1970, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres. Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclairage contrairement au silicium cristallin, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces (de l'ordre de 1 m²). Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements (inférieurs à 10 % au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au cours du temps [44].

(b) Les cellules III-V multi-jonctions

Le marché des cellules MJ III-V est dominé par les cellules triple-jonction avec un coût de fabrication de l'ordre de 20 000 USD/m², soit environ 50 USD/Watt pour une efficacité de l'ordre de 40% sous concentration. Ce coût élevé provient de plusieurs facteurs, dont le coût élevé et la rareté de la matière première en matériaux III-V. Le coût du substrat (Ge ou GaAs dans ce cas) représente une fraction importante (>50%) du coût d'une cellule solaire. Autres facteurs contribuent, tels que les métallisations en or ou argent qui coûtent relativement cher, ainsi que les limitations imposées par la vitesse de croissance par épitaxie. Pour cela, nous pouvons agir sur deux leviers en particulier pour baisser le coût des cellules MJ ; d'une part

l'optimisation de la quantité de matière à utiliser et d'autre part l'amélioration des procédés de croissance.

En principe, la réutilisation de substrat est ainsi une approche prometteuse et consiste à réaliser la croissance d'une cellule sur un substrat III-V puis la détacher du substrat pour les apporter sur un autre substrat à bas coût comme le silicium. Ainsi, le substrat III-V peut être réutilisé pour réaliser d'autres croissances. Horowitz et al. Montrent qu'avec cinq réutilisations du substrat, le prix des MJ pourrait être divisé par quatre dans une approche moyen terme. L'empilement mécanique des cellules MJ sur un substrat de silicium apparaît comme une autre approche fiable dont l'objectif est de produire des cellules MJ III-V sur des substrats adaptés, mais moins coûteux. À long terme, les cellules MJ ont donc le potentiel de voir leur coût réduit possiblement d'une dizaine de fois. Malgré cela, leur coût par Watt ne leur permettrait pas d'être compétitives par rapport aux cellules standards à base de silicium. La concentration solaire, permettant de réduire la taille de la cellule, doit donc être utilisée [48].

(c) Cellules en couches minces

(i) Cellules à base de tellure de cadmium

Le photovoltaïque au tellure de cadmium (CdTe) est une technologie photovoltaïque (PV) basée sur l'utilisation du tellure de cadmium, une couche mince de semi-conducteurs conçue pour absorber et convertir la lumière solaire en électricité. Le tellure de cadmium PV est la seule technologie à couches minces à moindre coût que les cellules solaires conventionnelles à base de silicium cristallin dans les systèmes à plusieurs kilowatts. Sur la base du cycle de vie, le CdTe PV présente la plus faible empreinte carbone, la plus faible consommation d'eau et le plus court délai de récupération énergétique de toutes les technologies solaires. Le temps de retour énergétique de moins d'un an de CdTe permet des réductions de carbone plus rapides sans déficits énergétiques à court terme.

La toxicité du cadmium est une préoccupation environnementale atténuée par le recyclage des modules CdTe à la fin de leur durée de vie, même si des incertitudes subsistent et que l'opinion publique reste sceptique à l'égard de cette technologie. L'utilisation de matériaux rares peut également devenir un facteur limitant l'évolutivité industrielle de la technologie CdTe à moyen terme. L'abondance du tellure – dont le tellure est la forme anionique – est comparable à celle du platine dans la croûte terrestre et contribue de manière significative au

coût du module. Le photovoltaïque CdTe est utilisé dans certaines des plus grandes centrales photovoltaïques au monde, telles que la ferme solaire Topaz. Avec une part de 5,1% de la production photovoltaïque mondiale, la technologie CdTe représentait plus de la moitié du marché des couches minces en 2013. La société First Solar, basée à Tempe, en Arizona, est un important fabricant de technologie CdTe [49].

(ii) Cellules à base de sélénure de cuivre indium

Une cellule solaire en cuivre-indium-gallium-sélénure (ou cellule CIGS, parfois une cellule CI(G)S ou CIS) est une cellule solaire à couche mince utilisée pour convertir la lumière solaire en énergie électrique. Il est fabriqué en déposant une mince couche de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénure sur un support en verre ou en plastique, ainsi que des électrodes à l'avant et à l'arrière pour recueillir le courant. Le matériau ayant un coefficient d'absorption élevé et absorbant fortement la lumière du soleil, un film beaucoup plus mince est nécessaire par rapport aux autres matériaux semi-conducteurs. CIGS est l'une des trois principales technologies PV à couche mince, les deux autres étant le tellure de cadmium et le silicium amorphe. Comme ces matériaux, les couches CIGS sont suffisamment minces pour être flexibles, leur permettant d'être déposées sur des substrats flexibles. Cependant, comme toutes ces technologies utilisent généralement des techniques de dépôt à haute température, les meilleures performances proviennent normalement des cellules déposées sur du verre, même si les avancées dans le dépôt à basse température des cellules CIGS ont effacé une grande partie de cette différence de performance. CIGS surpasse le silicium polycristallin au niveau de la cellule, mais l'efficacité de son module est encore inférieure, en raison d'une conversion ascendante moins mature.

La part de marché des films minces stagne autour de 15%, laissant le reste du marché PV aux cellules solaires conventionnelles en silicium cristallin. En 2013, la part de marché des seuls CIGS était d'environ 2% et toutes les technologies à couches minces combinées sont tombées en dessous de 10%. Les cellules CIGS continuent d'être développées, car elles promettent d'atteindre une efficacité similaire à celle du silicium, tout en maintenant leurs faibles coûts, comme c'est généralement le cas pour la technologie des couches minces. Les principaux fabricants de systèmes photovoltaïques CIGS étaient les sociétés maintenant en faillite Nanosolar et Solyndra. Le leader actuel du marché est la société japonaise Solar Frontier,

Global Solar et GSHK Solar qui produisent des modules solaires sans métaux lourds tels que le cadmium ou le plomb [50].

(d) Les cellules photovoltaïques organiques

La production d'électricité d'origine photovoltaïque pourrait se baser sur l'utilisation des matériaux organiques en complément du silicium. La fabrication des cellules photovoltaïques organiques nécessite une collaboration étroite entre les chimistes qui synthétisent les matériaux, les physiciens de l'état solide qui les caractérisent et les ingénieurs qui préparent les cellules et qui mesurent leurs propriétés.

Plusieurs raisons justifient l'utilisation des matériaux organiques pour la fabrication des cellules photovoltaïques. La plus importante se trouve dans les avantages particuliers de ces matériaux : ils peuvent être mis en forme facilement, par voie sèche (évaporation sous vide) ou par voie humide (Tournette, jet d'encre), avec des techniques simples, issues de l'industrie de la microélectronique. De plus, les quantités de matériaux utilisés sont relativement petites, les films ayant des épaisseurs de l'ordre de 100 nm. Enfin l'ingénierie moléculaire permet d'adapter les valeurs du gap et des niveaux d'énergie HOMO et LUMO. C'est pour cela que les recherches dans ce domaine sont très actives à travers le monde ; mais des problèmes restent à résoudre et ce type de cellule n'est pas encore commercialisé [51].

Une cellule Photovoltaïque Organique (OPV) est généralement fabriquée sur un substrat de verre recouvert d'ITO (couche mince – 150 nm – d'oxyde d'indium et d'étain possédant des bonnes propriétés de transparence dans le visible et de conductivité électrique). Ce substrat constitue l'anode du dispositif. Parfois, on remplace le verre par une feuille plastique souple recouverte également d'ITO. Les cellules ont des dimensions de quelques cm², ce qui est suffisant pour les caractériser. Elles mettent en œuvre deux types de matériaux organiques qui ont des électronégativités différentes. Le plus avide d'électrons est qualifié d'accepteur (A), l'autre, celui qui cède facilement ses charges négatives, est appelé donneur (D). C'est une différence avec les cellules en silicium. Il est d'usage de classer les matériaux selon leur masse molaire (M_w). Pour des valeurs de (M_w) élevées, on a des composés macromoléculaires (polymères), alors que pour des masses molaires plus petites, on les qualifie de matériaux moléculaires. Les polymères ne peuvent pas être déposés par évaporation sous vide. Un exemple de matériaux accepteur (PCBM, matériau moléculaire) et donneur (P3HT, polymère) est donné sur la figure I.6 [51].

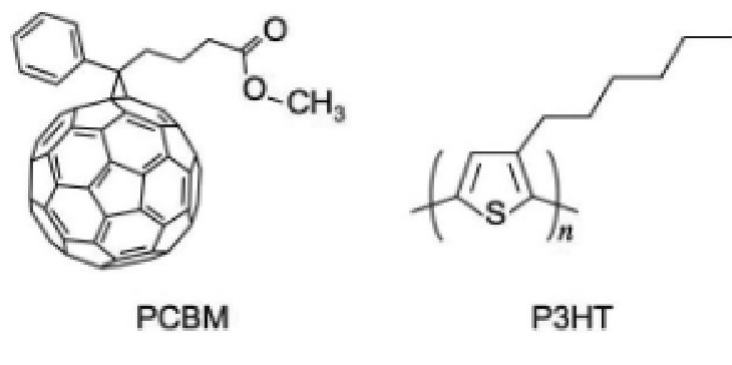


Figure I. 6 : Exemple de deux matériaux utilisés pour fabriquer une cellule photovoltaïque organique : Phényle-C-Butyric Acid Methyl ester (PCBM) comme accepteur et Poly(3-Hexyl) Thiophène (P3HT) comme donneur [51].

En 1978, les chercheurs de l'IBM Thomas J. Watson Research Center prévoient que les valeurs des rendements η des OPV pourraient dépasser les 1 %. Ce rendement n'a été atteint que 8 ans plus tard, en 1986. Jusqu'en l'an 2000, cette valeur a parfois été reproduite, mais elle n'a jamais été améliorée. Ce n'est que depuis le début du XXI^e siècle que le rendement a commencé à croître régulièrement, pour atteindre aujourd'hui les 6 %. Des modèles, basés sur les matériaux et les technologies actuellement utilisés, montrent qu'un rendement de 10 % est envisageable à moyen terme [51].

(e) Silicium en couches minces nanocristallin et amorphe

L'utilisation du silicium a été intensivement étudiée depuis les années 1970. Non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules de la calculatrice ou Regardez. Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, notamment son fonctionnement. Contrairement au silicium cristallin, il peut être utilisé à l'intérieur en basse lumière, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation d'énergie pendant le cycle de production et il est capable de déposer sur de grandes surfaces (environ 1 mètre carré). Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe (moins de 10% au niveau industriel) et leurs performances se dégradent assez rapidement dans le temps. L'avenir des couches de silicium amorphe pourrait connaître mariage avec le silicium cristallin. En effet, les hétérostructures à base de silicium amorphe/silicium cristallin (la structure HIT de Sanyo) a des rendements en laboratoire de plus de 16 % et de 21% en production industrielle [52].

Association des cellules

(a) Association en série

Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante de groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, un tel regroupement est représenté par la figure 1.7. L'équation (I.5) résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules.

$$\begin{aligned} V_{CON_s} &= N_s \times V_{co} \\ I_{cc} &= I_{ccN_s} \end{aligned} \quad (I.5)$$

Où (V_{CON_s}) est la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série et (I_{ccN_s}) est le courant de court-circuit de N_s cellules en série.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface de cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble [53].

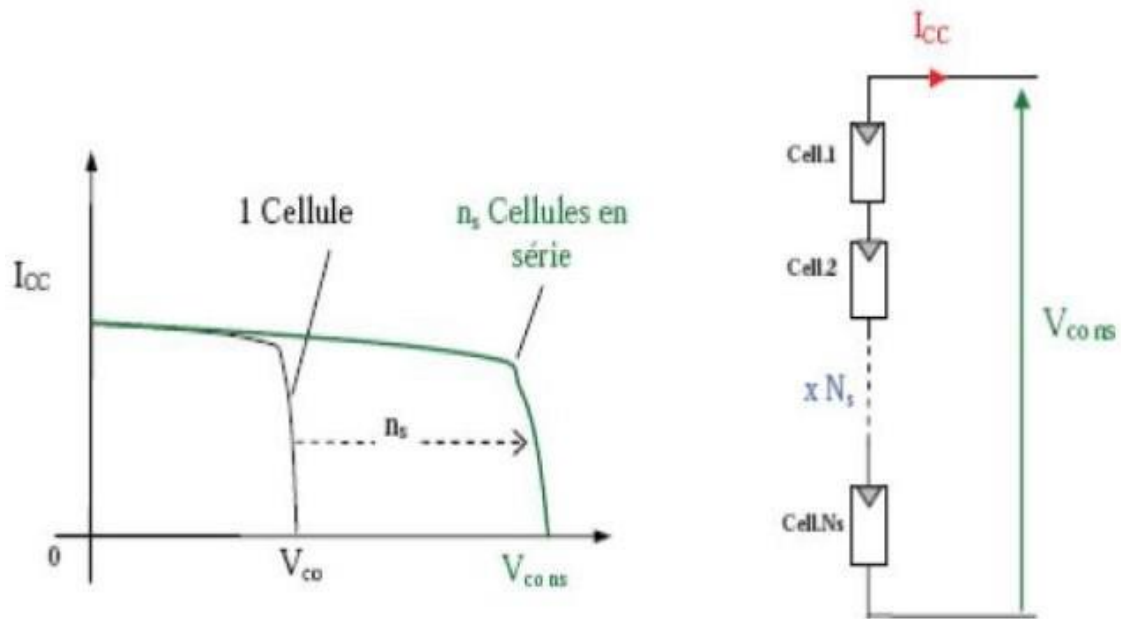


Figure I. 7 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de (N_s) cellules en séries.

(b) Association en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créée. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. L'équation (1.6) et la figure 1.8 résument les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (N_p) cellules [54].

$$\begin{aligned} V_{co N_p} &= V_{co} \\ I_{cc N_p} &= N_p \times I_{cc} \end{aligned} \tag{I.6}$$

Avec ($I_{cc N_p}$) est la somme des courants de court-circuit de (N_p) cellules en parallèle, et ($V_{co N_p}$) est la tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

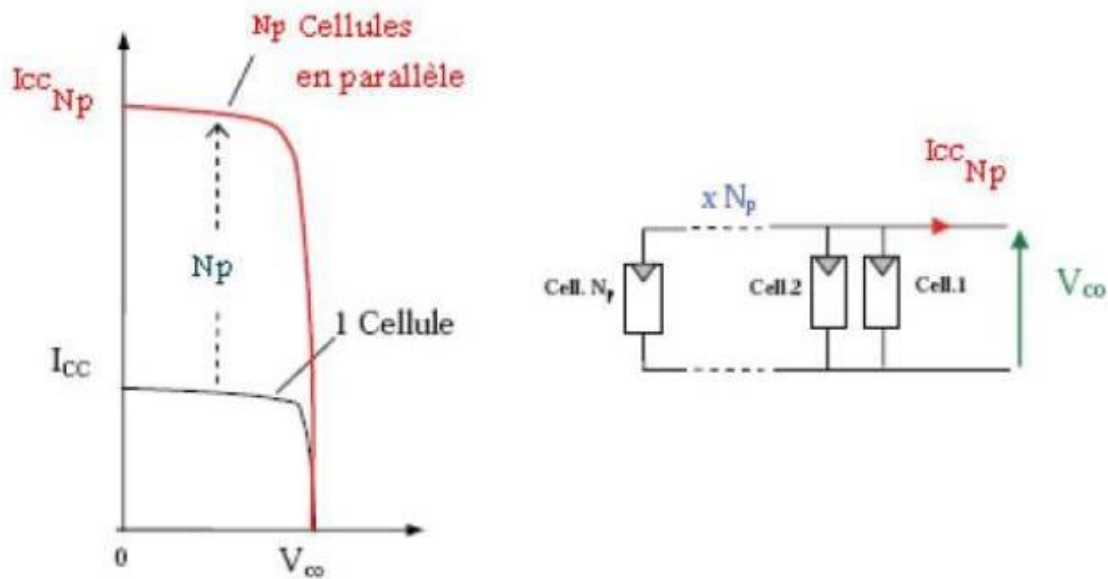


Figure I. 8 : Caractéristiques d'un groupement de (N_p) cellules en parallèle.

Bref sur systèmes photovoltaïques

Le système photovoltaïque est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque), une interface de puissance (les convertisseurs statique DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge. Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en trois catégories :

(a) Système autonome

Le système PV autonome (système PV hors réseau) est un système de production d'électricité isolé par rapport à un système de production d'électricité connecté au réseau. Le système autonome est principalement utilisé dans les zones isolées sans électricité, et le but principal de sa construction est de résoudre le problème de l'absence d'électricité. La fiabilité de la source d'alimentation est fortement affectée par les conditions climatiques, la charge et d'autres facteurs, et la stabilité de l'alimentation électrique est également relativement faible, il est donc nécessaire d'installer des équipements de stockage et de gestion de l'énergie. Les systèmes photovoltaïques autonomes sont divisés en deux types :

(i) Système autonome sans batterie

Des panneaux photovoltaïques autonomes sans batterie permettent de produire de l'électricité à partir de l'énergie du soleil, cette électricité étant convertie en courant électrique

qui est directement consommé par des appareils électriques comme une pompe à eau pour l'arrosage en journée. Ainsi, il consomme l'énergie produite lorsqu'il est produit directement pendant la journée. Le modèle de base d'un système autonome sans batterie consiste en un panneau solaire connecté directement à une charge en courant continu. Comme il n'y a pas de batteries qui stockent l'électricité dans cette configuration, l'énergie n'est pas stockée et est donc capable d'alimenter les appareils utilisés pendant la journée tels que les ventilateurs, les pompes, etc. Le suivi de point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking « MPPT ») est généralement utilisé pour utiliser efficacement l'énergie solaire, en particulier pour les charges électriques telles que les pompes à eau avec déplacement positif (voir le figure I.9). L'adaptation d'impédance est également un critère de conception dans les systèmes à couplage direct.

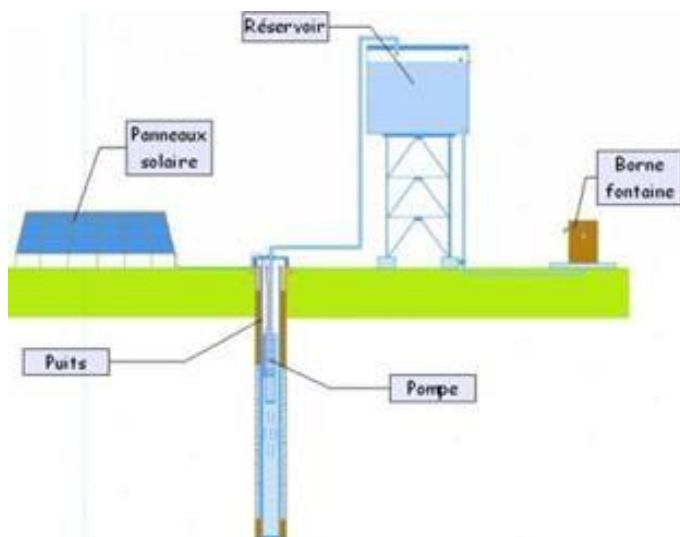


Figure I. 9 : Pompage d'eau par PV autonome sans batterie.

(ii) Système autonome avec batterie

Dans les systèmes PV autonomes, l'énergie électrique produite par les panneaux PV ne peut pas toujours être utilisée directement. Étant donné que la demande de la charge n'est pas toujours égale à la capacité des panneaux PVs, des batteries sont généralement utilisées. Les principales fonctions d'une batterie de stockage dans un système PV autonome sont de stocker l'énergie électrique lorsqu'il y a un surplus disponible et de la fournir en cas de besoin, de stabiliser la tension et le courant, ainsi que de fournir des courants de surtension aux charges telles que les moteurs en cas de besoin. Le système photovoltaïque autonome avec une batterie se compose des panneaux photovoltaïques, d'une batterie de stockage, d'un transformateur, d'un

régulateur de puissance, d'un système de distribution et de transmission d'énergie, comme indiqué sur la figure I.10.

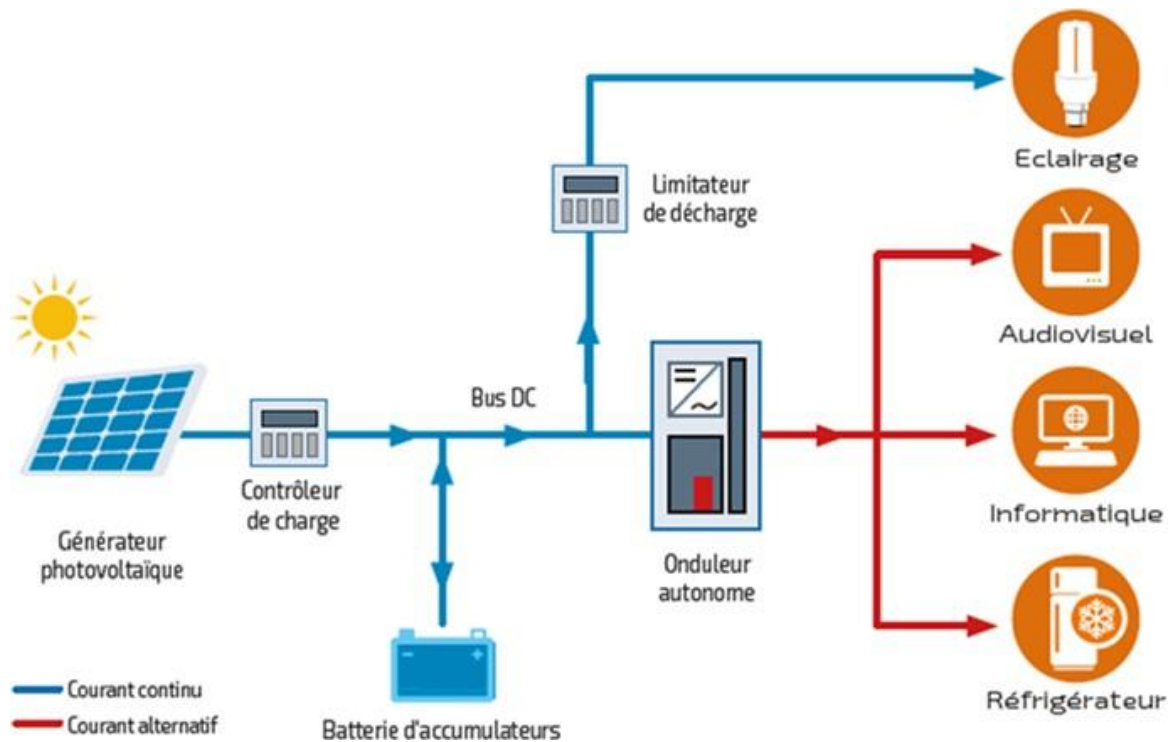


Figure I. 10 : Système PV autonome avec batterie.

(b) Système hybride

Les systèmes photovoltaïques hybrides sont des systèmes d'alimentation hybrides qui combinent l'énergie photovoltaïque à partir d'une source solaire renouvelable avec une autre source pour générer de l'énergie électrique. Les systèmes photovoltaïques avec un générateur diesel sont l'un des types courants de systèmes d'alimentation hybrides qui combinent des panneaux photovoltaïques et des générateurs diesel, puisque les panneaux photovoltaïques n'ont pas de coût secondaire et ont l'avantage dans le réseau, les générateurs diesel sont utilisés pour combler en permanence l'écart entre la charge actuelle et la puissance réelle générée par le système de panneau PV. Étant donné que l'énergie solaire est volatile et que la capacité de production des générateurs diesel est limitée dans une certaine mesure, l'option d'utiliser une batterie de stockage est généralement viable afin d'améliorer la production des panneaux photovoltaïques à la pleine capacité du système hybride. De plus, le meilleur modèle

commercial pour réduire la consommation de diesel consiste à utiliser l'énergie éolienne et photovoltaïque, en particulier dans les endroits reculés, car ces zones ne sont pas connectées au réseau et le transport du carburant est très coûteux [55]. Donc les systèmes hybrides sont souvent utilisés pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle [56-58].

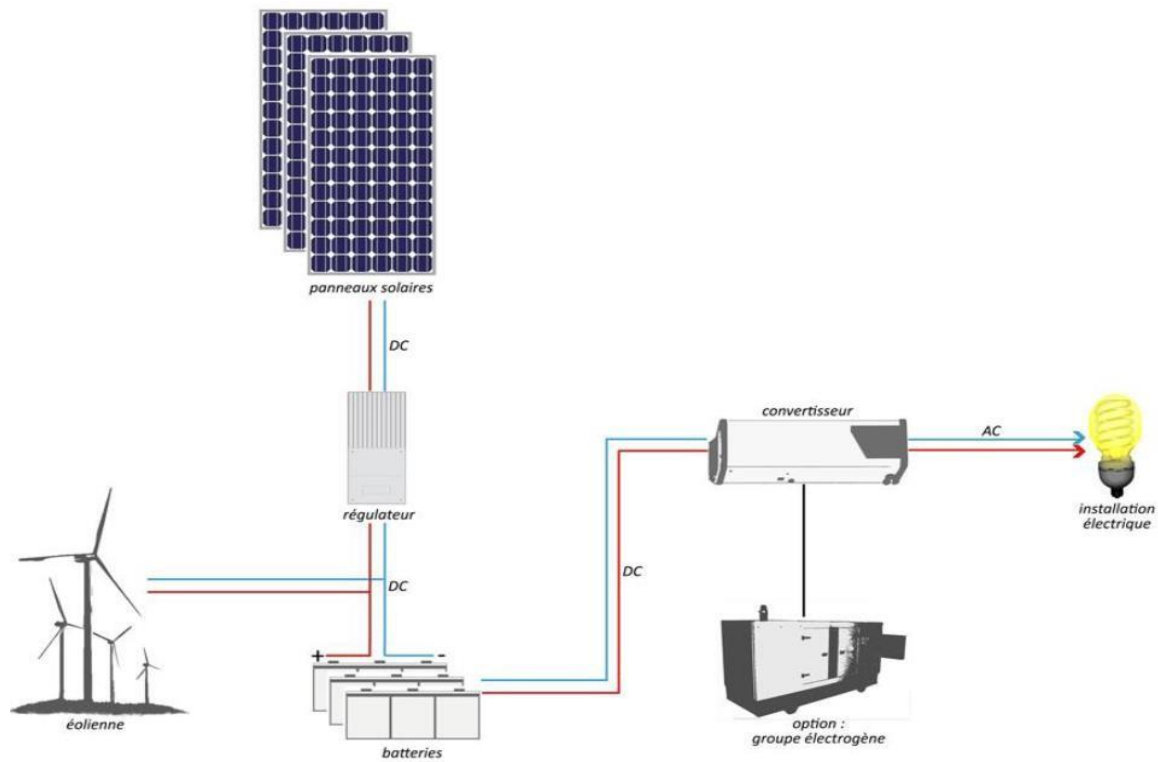


Figure I. 11 : Exemple d'un système photovoltaïque hybride.

Recherche bibliographique

Une cellule PV est un dispositif électronique spécialisé composé de semi-conducteurs qui convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique à l'aide de divers phénomènes chimiques et physiques. Elle est également connue sous le nom de cellule solaire. La conversion d'énergie dans une cellule PV est appelée l'effet photoélectrique, qui a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839. Les cellules PV n'ont eu d'application pratique dans la technologie des satellites que dans les années soixante du siècle dernier, et les panneaux solaires photovoltaïques (constitués d'unités de cellules) ont commencé à atteindre les toits à la fin des années quatre-vingt, et l'énergie photovoltaïque a considérablement augmenté depuis le début du XXIe siècle, de lors de la construction d'immenses fermes solaires photovoltaïques. Comme mentionné dans la littérature, les cellules photovoltaïques sont utilisées dans les détecteurs infrarouges, les calculateurs d'intensité lumineuse, les ventilateurs solaires, les radiateurs solaires et les panneaux solaires pour produire de l'énergie électrique pour les maisons ou les bureaux. Un panneau solaire se compose de centaines ou de milliers de cellules photovoltaïques installées ensemble comme une énorme cellule unitaire. Le tableau 1 ci-dessous contient un résumé des recherches scientifiques les plus importantes menées sur les systèmes photovoltaïques.

Tableau I. 1 : *Une synthèse des recherches les plus importantes de la littérature sur la technologie photovoltaïque.*

La référence et l'année	Résumé des travaux
Liu et al. (2011) [59]	En 2011, ils ont exploré les moyens de développer la technologie photovoltaïque en analysant la croissance des brevets dans ce domaine.
Chen et al. (2019) [60]	Ils ont introduit une nouvelle technique de masquage pour le verre de gravure à l'acide fluorhydrique afin d'éviter la formation de trous et de réduire la gravure latérale dans le processus de gravure, qui consiste en une ou plusieurs couches de métal qui ont été préparées sur la surface de l'échantillon par un système de dépôt par faisceau ionique.

<p>Cai et al. (2020) [57]</p>	<p>Cette étude vise à déterminer la taille et l'emplacement optimaux en fonction de critères économiques pour une application hors réseau d'un système hybride avec panneaux photovoltaïques, batterie et technologie diesel.</p>
<p>Gopalamma et Ramavathu (2021) [61]</p>	<p>Cette étude a porté sur la présentation de techniques intelligentes et durables de recyclage des panneaux photovoltaïques, les processus de recyclage dépendant de traitements mécaniques, thermiques et chimiques.</p>
<p>Cho et al. (2019) [62]</p>	<p>Le but de cette étude est d'analyser les associations et les corrélations entre le revenu, l'éducation et l'adoption de l'énergie solaire par le biais d'enquêtes et de systèmes d'information géographique (Geographic Information Systems « GIS ») respectivement. Les résultats de l'analyse GIS et de la régression linéaire montrent des corrélations entre les niveaux de revenu, l'éducation et le nombre d'utilisateurs du solaire photovoltaïque dans les secteurs de recensement de l'Oregon.</p>
<p>Ho et O'Sullivan (2018) [63]</p>	<p>Ce travail développe un cadre de cartographie de la normalisation pour des analyses systématiques et complètes de la façon dont la normalisation soutient l'innovation dans la technologie photovoltaïque, en intégrant les dimensions clés de la normalisation abordées dans les modèles conceptuels existants et la littérature connexe.</p>
<p>Tossa et al. (2016) [43]</p>	<p>Ce travail est une étude comparative de performances réalisée sur quatre modules photovoltaïques (une unité monocristalline, deux modules polycristallins et une unité de structure tandem (amorphe/microcristalline) dite module micromorphe) sous climat chaud et rude. Les résultats montrent que le module micromorphe présente les meilleures performances sur le site retenu (à Ouagadougou), avec un taux de performance moyen de 92%. Les modules monocristallins et polycristallins du même fabricant ont tous deux un taux de rendement moyen de 84 %. Le deuxième module polycristallin d'un autre fabricant, présente étrangement le taux de rendement moyen le plus bas (80%) en raison à la fois de sa grande résistance série et du coefficient de</p>

	température de puissance maximum élevé dans les conditions de fonctionnement.
Brahim, et Jemni (2017) [58] & Joshi et Dhoble (2018) [56]	Cet article a fourni un examen de la tendance historique et récente de la technologie de développement de technologie solaire hybride photovoltaïque/thermique (PV/T), en particulier ses performances et sa faisabilité économique dans différents domaines d'application. Il a également présenté des recommandations futures et une évaluation critique pour surmonter les obstacles et les défis qui visent à améliorer cette technique.
Bianchini et al. (2016) [64]	L'analyse des performances et l'évaluation économique de différentes technologies photovoltaïques basées sur des mesures expérimentales ont été étudiées au « OUTDOOR DEVELOPMENT CENTER HENERGIA OF HERA S.P.A. » à Forli (Italie).
Behar et al. (2021) [65]	Cette étude a examiné la faisabilité de l'intégration de la technologie des centrales solaires dans les usines d'extraction de cuivre à Chili, car trois technologies commerciales (PV, CSP et hybride PV/CSP) ont été envisagées pour l'intégration dans quatre usines existantes de différentes tailles et situés dans différentes régions. Pour fournir une analyse complète, la conception, la performance et l'évaluation économique de douze cas ont été réalisées et les coûts d'investissement ont été estimés en tenant compte des caractéristiques du marché Chilien ainsi que de l'effet d'échelle.
Aarich et al. (2018) [66]	Dans ce travail, la comparaison des performances de trois technologies PV à base de silicium connectées au réseau similaires a été présentée à Marrakech (Maroc) après 32 mois de mesures.
Zhao et Wang (2019) [67]	Dans ce travail, la technologie, le coût et la performance économique de l'industrie photovoltaïque distribuée en Chine sont présentés.
Fisac et al. (2014) [68]	Ce travail a décrit comment la technologie photovoltaïque et la technologie thermoélectrique sont liées dans une structure unique, où un

	<p>gradient de température est utilisé dans le panneau PV pour alimenter les cellules thermoélectriques qui génèrent de l'électricité, ce qui a contribué positivement à l'équilibre global de l'ensemble du système.</p>
<p>Yu et al. (2019) [69]</p>	<p>Cette étude a permis d'évaluer sur le terrain les performances de plusieurs technologies photovoltaïques au silicium cristallin ("silicium multicristallin de type p (multi-Si)", "silicium monocristallin de type p (mono-Si)" et "modules de silicium monocristallin de type n") dans Pingshan, Chine.</p>
<p>Wang et al (2020) [70]</p>	<p>Grâce à cet important travail, l'évaluation économique des technologies de stockage d'énergie photovoltaïque pour les futurs systèmes électriques domestiques au Royaume-Uni a été réalisée. Les résultats montrent que la valeur actualisée nette des systèmes photovoltaïques au Royaume-Uni est passée de 28650 £ en 2011 à 1200 £ en 2017, en raison de la baisse du soutien gouvernemental aux technologies photovoltaïques.</p>
<p>Chen et al. (2021) [71]</p>	<p>Dans cette étude, un ruban en alliage In-50Sn sans matrice métallique a été développé comme alternative aux rubans photovoltaïques (PV) trempés conventionnels. La bande d'alliage in-50Sn s'écoule directement sur l'électrode Ag sur une cellule solaire Si, et le composite métallique Ag-In formé a été utilisé pour connecter le substrat Si et la bande photovoltaïque.</p>

Production d'électricité utilisant la technologie photovoltaïque

L'énergie solaire est utilisée dans la production d'électricité soit par le biais de centrales électriques à grande échelle, soit par des installations de bâtiments. Généralement, trois technologies principales sont adoptées pour la production d'électricité, à savoir l'électricité thermique, l'électricité photovoltaïque et l'électricité hybride (thermique/photovoltaïque).

La lumière du soleil est constituée de photons qui sont de petits paquets d'énergie ou de rayonnement électromagnétique. Si la longueur d'onde de la lumière est compatible avec la cellule solaire, alors l'énergie des photons est transmise aux électrons de la cellule solaire. Par conséquent, ces électrons se déplacent de la bande de valence vers la bande de conduction, créant derrière des trous dans la bande de valence. Ainsi, une paire électron-trou est formée.

La jonction p-n peut être constituée de différents matériaux, qui s'améliorent constamment. En conséquence, les cellules PVs ont évolué de la première génération à la quatrième génération. Les cellules solaires de première génération comprennent des cellules en silicium cristallin. La deuxième génération, également connue sous le nom de cellules en silicium à couche mince, comprend les cellules CdTe, les cellules en silicium amorphe et les cellules CIGS. Les cellules de troisième génération comprennent les cellules solaires à colorant DSSC et les cellules solaires à jonctions multiples du groupe III-V. La configuration à jonctions multiples est utilisée pour maximiser l'absorption de la lumière en raison des différentes capacités d'absorption des différentes jonctions. Généralement, deux principales technologies photovoltaïques sont rapportées : la technologie PV conventionnelle et la technologie panneaux photovoltaïques à concentration (PVC).

Les avancées technologiques dans le domaine des instruments optiques ont conduit à l'invention des PVCs. Le PVC concentre la lumière du soleil sur les cellules photovoltaïques en ajoutant un concentrateur optique composé soit d'un miroir incurvé, soit d'une lentille. Cela améliore l'efficacité des PVs grâce aux photons supplémentaires orientés par le concentrateur. Donc, l'ajout d'un concentrateur augmente considérablement le courant généré par le PV, ainsi que la tension de fonctionnement. Généralement, les technologies PVC sont classées en fonction de leur degré de concentration en PV à faible concentration ou PV à haute concentration. Généralement, les concentrateurs bas sont constitués de miroirs tandis que les concentrateurs élevés sont constitués de lentilles de Fresnel.

Conclusion

Ce chapitre a permis de consolider les connaissances sur la technologie photovoltaïque. Commenant par la définition des cellules photovoltaïques (principe de leur fonctionnement, matériaux disponibles pour leur fabrication, etc.), puis le système photovoltaïque a été abordé (composants du système, capacité, usages, etc.), et ce chapitre se termine par une recherche approfondie dans la littérature sur la base de références récentes dans ce domaine, et une brève introduction aux technologies photovoltaïques a également été mentionnée.

CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION DE LA CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE

II. MODELISATION ET SIMULATION DE LA CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE

Introduction

Ce chapitre vise à expliquer la modélisation et la simulation d'une centrale photovoltaïque dans la région de Guemar (Coordonnées 33,71° N et 6,71° E et 44 m), Wilaya d'El Oued, Algérie. La modélisation et la simulation seront effectuées à l'aide de SYSTEM ADVISOR MODEL (SAM).

System Advisor Model (SAM) est un modèle logiciel économique technique gratuit qui facilite la prise de décision pour les personnes travaillant dans le secteur des énergies renouvelables :

- Les ingénieurs : pour comparer les technologies, les sites ou les configurations et pour estimer le coût actualisé de l'énergie pour un système ;
- , les chefs de projet et les conseillers économiques, les analystes politiques, les développeurs de technologies, les chercheurs et les étudiants de premier cycle), y compris les systèmes photovoltaïques de différentes tailles et utilisations.



Figure II. 1 : *La localisation de la commune de Guemar sur la carte de l'Algérie.*



Figure II. 2 : *Localisation de la commune de Guemar dans la Wilaya d'El-Oued.*

Etapas de modélisation et de simulation de la centrale photovoltaïque

Les étapes de modélisation et de simulation de la centrale photovoltaïque étudiée sont les suivantes :

Caractéristiques de la centrale

La page de l'emplacement et les ressources propose plusieurs façons de choisir un profil météo pour l'analyse. Dans cette étude, la région de Guemar à El-Oued (Coordonnées 33,71° N et 6,71° E et 44 m) a été choisie pour installer la centrale photovoltaïque étudiée selon les caractéristiques indiquées dans le tableau II.1.

Tableau II. 1 : *les caractéristiques de la centrale étudiée.*

Item	Caractéristique
Site	Guemar (Coordonnées 33,71° N et 6,71° E et 44 m), Wilaya d'El Oued, Algérie
Rayonnement solaire total (moyenne annuelle)	5,56 kWh/m ² /jour
Température moyenne annuelle de l'air	22 °C
Vitesse moyenne annuelle du vent	3,1 m/s
Dimensions du module	1,658m x 0,976 m
Efficacité nominale du module (Matériau du module : Multi-c-Si) (Surface du module : 1,618 m ²) (Nombre de cellules : 60)	15,46 %

Nombre d'onduleurs (DC/AC=1,2)	6
Superficie totale de la centrale	19,40 hectares
Perte de puissance totale en courant continu	4,44 %
Taux annuel de dégradation du courant continu	0,5 %/an
Durée de vie de la centrale	25 ans

Caractéristiques du module

SAM utilise l'un des quatre modèles de module et l'un des trois modèles de température de cellule pour calculer la puissance de sortie directe d'un seul module dans chaque sous-réseau. SAM fait les hypothèses suivantes :

- Tous les modules du système fonctionnent à leur tension de point de puissance maximale, à l'exception de la non-concordance des sous-réseaux et des pertes de limite de tension de fonctionnement de l'onduleur .
- Le point de puissance maximum du sous-réseau est déterminé par le point de puissance maximum d'un seul module et le nombre de modules par chaîne .
- Tous les sous-réseaux du système ont le même nombre de modules par chaîne et fonctionnent donc à la même tension .
- Tous les modules de chaque sous-réseau fonctionnent de manière uniforme, où le SAM ne calcule pas les pertes d'inadéquation des modules.

Le calcul de la sortie de courant continu du module dans un pas de temps lorsque le soleil est levé est un processus en deux étapes :

- Calcul de la température de la cellule photovoltaïque. SAM suppose que la température des cellules dans tous les modules de chaque sous-réseau est uniforme.
- Calcul de la puissance de sortie CC du module en fonction de ses caractéristiques physiques, de l'éclairement effectif et de la température de la cellule.

La figure II.3 montre les caractéristiques du module utilisé dans cette étude aux conditions de référence (Le rayonnement solaire total = 1000W/m^2 , température de la cellule PV = $25\text{ }^\circ\text{C}$).

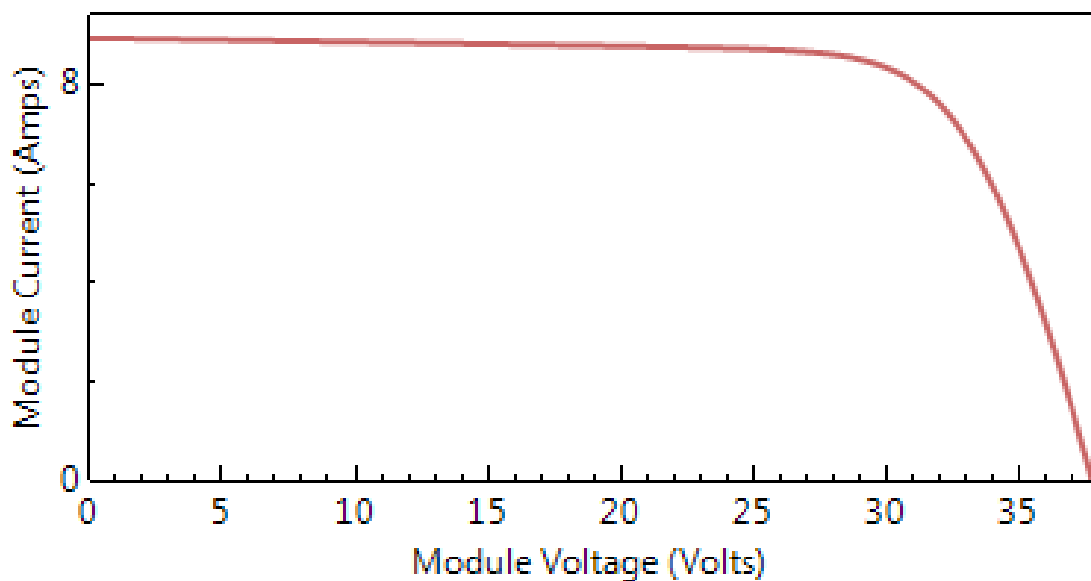


Figure II. 3 : *Caractéristiques du module aux conditions de référence (le rayonnement solaire totale = 1000W/m^2 , température de la cellule PV = $25\text{ }^\circ\text{C}$).*

Le SAM calcule la tension de fonctionnement du réseau à chaque pas de temps pour déterminer la tension d'entrée de l'onduleur, en supposant que chaque module fonctionne à son point de puissance maximum.

Caractéristiques de l'onduleur

Le SAM utilise l'un des modèles d'onduleurs (Inverter CEC Database (Sandia inverter model), Inverter Datasheet et Inverter Part Load Curve)) pour calculer la puissance totale de sortie de courant alternatif de tous les onduleurs du système. Pour les systèmes avec plus d'un onduleur, le SAM modélise les onduleurs comme un seul grand onduleur qui fonctionne avec

la tension de chaîne de courant continu du réseau comme tension d'entrée de l'onduleur. Le SAM ne peut pas modéliser un système avec plus d'un type d'onduleur.

La figure II.4 montre les courbes de rendement et caractéristiques de l'onduleur utilisé.

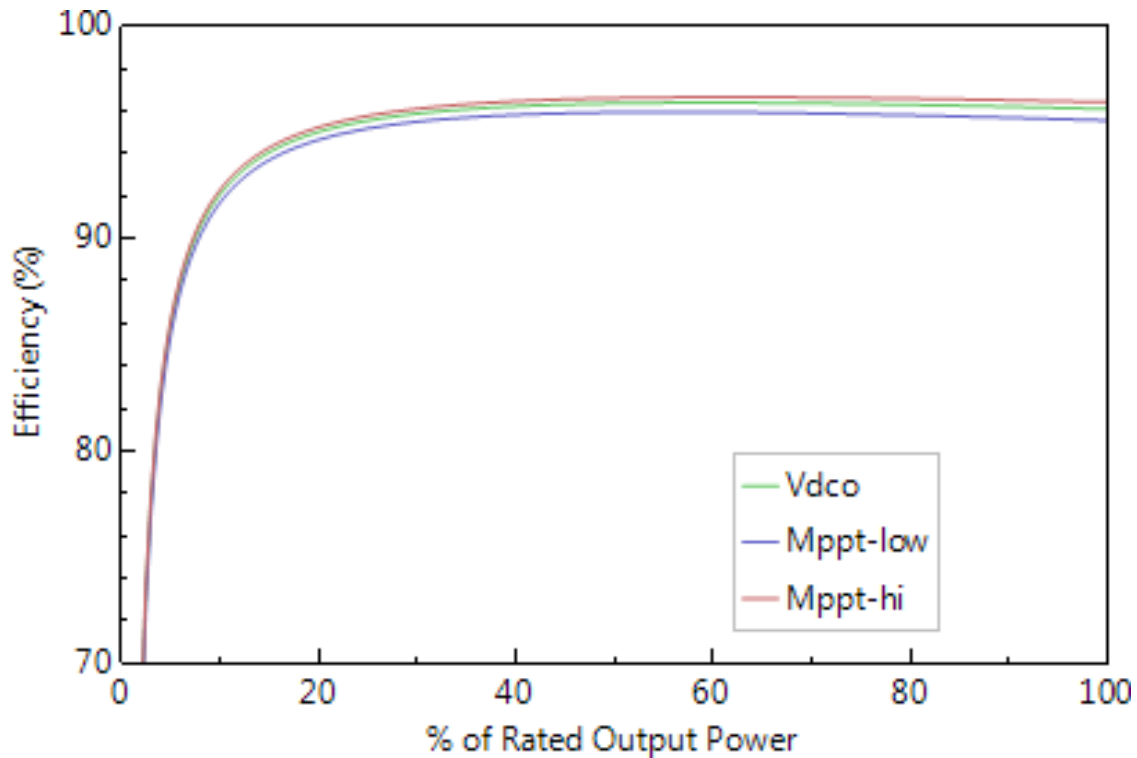


Figure II. 4 : Courbes de rendement et caractéristiques de l'onduleur utilisé.

Dégradation du module PV

Le modèle photovoltaïque offre deux options pour modéliser la réduction de la sortie du réseau au fil du temps en raison de la dégradation du couvercle du module et d'autres causes. Ces options se trouvent sur la page « SAM's Lifetime input ».

- Dégradation du courant alternatif (PV Simulation Over One Year): la simulation d'un PV sur un an applique un taux annuel de dégradation du courant alternatif à la sortie de courant alternatif du système .
- Dégradation du courant continu ou du courant alternatif (PV Simulation Over Analysis Period): la simulation d'un PV sur la période d'analyse applique des taux de dégradation du courant continu à la sortie de courant continu du générateur et des pertes supplémentaires à la sortie de courant continu du générateur ou à la sortie de courant alternatif système.

Ces options ne sont disponibles dans le SAM que pour le modèle photovoltaïque détaillé avec un modèle financier. Ils ne sont pas disponibles pour le modèle avec l'option "Pas de modèle financier".

Batterie de Stockage

Le SAM peut modéliser des batteries pour stocker de l'énergie électrique vers et depuis des batteries au plomb ou des batteries lithium-ion, ainsi que permettre une estimation de la durée de vie de la batterie, et peut concevoir des batteries au vanadium et au fer.

Le modèle de batterie fait partie du modèle photovoltaïque détaillé du SAM, mais uniquement lorsqu'il est associé à l'un des modèles financiers de flux de trésorerie du SAM, car le modèle de batterie implique des remplacements de batterie qui nécessitent un modèle financier. Le modèle de batterie nécessite des informations sur le système photovoltaïque, les paramètres de la batterie et les données de charge électrique du bâtiment pour les applications derrière le compteur.

Pour les applications à l'arrière du compteur où la charge électrique du bâtiment est satisfaite par le système PV, la batterie et le réseau, un modèle financier résidentiel ou commercial doit être utilisé. Pour ces systèmes, le moment de la charge de la batterie est déterminé soit par l'excès de PV, soit par le réseau. La décharge de l'énergie de la batterie pour répondre à la charge du bâtiment se fait soit par le biais d'un modèle de répartition manuelle, qui est un ensemble de profils de répartition pouvant affecter jusqu'à six périodes dans une matrice heure par mois pour le jour de la semaine et le week-end, ou en choisissant l'une des options de répartition automatisées.

Pour la batterie connectée en courant alternatif, comme illustré à la figure II.5, la batterie est connectée au bus du courant alternatif du système à l'aide des entrées d'efficacité de conversion CA à CC et CC à CA à point unique pour représenter les pertes de conversion électrique. Pour la batterie connectée en courant continu illustrée à la figure II. 6, la batterie est connectée au système de gestion de batterie représenté par l'efficacité de conversion CC-CC en un seul point.

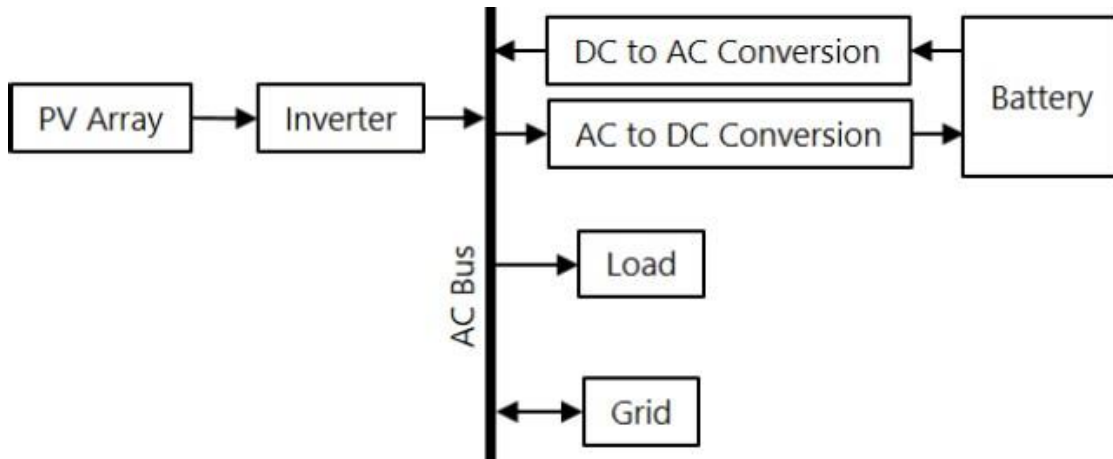


Figure II. 5 : Schéma fonctionnel du courant alternatif connecté à une batterie dans un système PV [72].

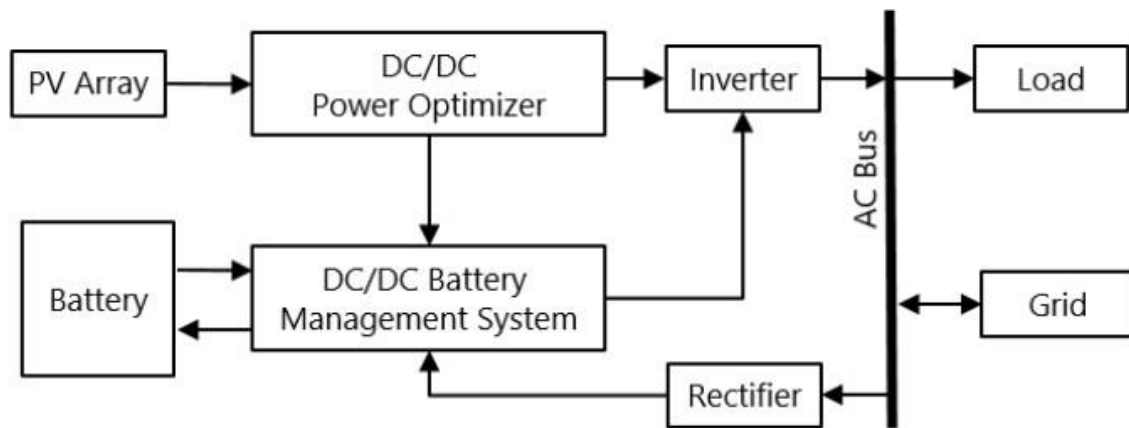


Figure II. 6 : Schéma fonctionnel du courant continu connecté à une batterie dans un système PV [72].

Pour les applications de stockage de services publics où le système photovoltaïque et la batterie sont connectés directement au réseau et n'interagissent pas avec la charge électrique d'un bâtiment ou d'une installation, il doit utiliser l'un des modèles financiers du contrat d'achat d'électricité (PPA), où le moment de la charge de la batterie et le déchargement est déterminé par le modèle de répartition manuelle.

Pour les batteries connectées en courant alternatif et en courant continu, le modèle calcule les pertes causées par la dégradation au fil du temps, les effets thermiques et les différences de tensions de charge et de décharge.

Sortie de courant alternatif d'un système PV

La sortie de courant alternatif d'un système PV est l'électricité générée par le système photovoltaïque et peut être fournie au réseau électrique, à la charge électrique du bâtiment ou de l'installation et à la batterie de stockage électrique en fonction du modèle financier associé au modèle de performance photovoltaïque.

Les pertes de courant alternatif d'un système PV

Le SAM modélise les pertes électriques du courant alternatif d'un système PV en utilisant le seul pourcentage de perte du courant alternatif. Donc, dans le SAM, le modèle calcule le pourcentage de perte du courant alternatif à partir des pourcentages de perte du câblage du courant alternatif et du transformateur élévateur sur la page du Sam « Losses input ».

En plus, les pertes de réduction et de disponibilité peuvent être utilisées pour tenir compte des pertes d'exploitation imposées au système par des facteurs autres que les conditions climatiques (comme la ressource solaire) et la conception du système, tels que les pannes forcées, programmées et imprévues, ou d'autres facteurs qui réduisent la puissance de sortie CA du système. Donc, le SAM modélise les pertes de réduction et de disponibilité à l'aide d'un tableau de valeurs de perte horaire qui s'appliquent à chaque pas de temps de la simulation. Dans le SAM, les pertes sont définies à l'aide de la fenêtre « Edit Losses windows », accessible depuis la page « Losses Input ».

Puissance générée par un système PV

L'énergie nette produite par le système PV est l'électricité générée par le système PV après toutes les pertes et tous les ajustements. Pour un projet photovoltaïque qui utilise l'un des modèles financiers Utility IPP, l'électricité générée par le système est l'électricité livrée au réseau et vendue à un prix d'électricité négocié. Pour les projets avec des options de financement résidentiel ou commercial, c'est l'électricité produite par le système qui peut répondre à tout ou partie de la charge électrique d'un bâtiment ou d'une installation, ou être livrée au réseau. Pour un système photovoltaïque avec stockage par batterie, la puissance générée par le système est négative par pas de temps lorsque la batterie est chargée par le réseau.

Conclusion

Dans ce chapitre, tous les composants d'un système photovoltaïque destiné à être utilisé dans des centrales photovoltaïques ont été abordés. Les principaux composants d'une centrale photovoltaïque sont les panneaux solaires, les batteries, le contrôleur de charge, l'onduleur, les disjoncteurs, le réseau électrique, et les charges électriques.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction

Une centrale photovoltaïque est un système de production d'électricité basé sur l'énergie solaire. Il est composé de panneaux photovoltaïques (les panneaux solaires convertissent la lumière qui les éclaire en énergie électrique. Le réseau se compose de plusieurs panneaux PVs connectés à une structure renforcée et interconnectée qui transfère l'énergie aux sous-systèmes qui permettent la transmission, la distribution ou le stockage de l'électricité), eux-mêmes constitués de cellules solaires également appelées cellules photovoltaïques qui captent la lumière du soleil et la convertissent par des processus photovoltaïques en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont généralement constituées de silicium, et le système solaire photovoltaïque ne dépend pas de réactions chimiques ou de carburants pour produire de l'énergie, et n'a pas non plus besoin de systèmes moteurs tels que ceux contenus dans un moteur électrique.

Dans ce chapitre, les résultats obtenus après la modélisation et la simulation seront présentés et discutés, dans lesquels la productivité de la centrale photovoltaïque, l'analyse économique et environnementale seront présentées. Il convient de noter ici que les résultats de ce chapitre seront présentés sous la forme de la variation horaire de la moyenne annuelle pour une journée typique.

Les conditions climatiques

La région de Guemar (Coordonnées 33,71° N et 6,71° E et 44 m), Wilaya d'El Oued, Algérie, a été établie pour planter cette centrale photovoltaïque, car la province d'El-Oued est célèbre pour l'agriculture et le commerce, et l'endroit choisi est très bon pour distribuer l'électricité après sa production au reste des endroits de cette province, ce qui contribuera à résoudre le problème de l'électricité et augmentera également les opportunités d'investissement dans cette province.

Les données météorologiques pour la zone sélectionnée pour planter la centrale photovoltaïque sont présentées dans les figures III (1-3). La figure III.1 montre la variation du rayonnement solaire total annuel moyen en fonction du temps. Comme indiqué précédemment dans le tableau II.1, le rayonnement solaire total moyen annuel a été estimé par 5,56 kWh/m²/jour, ce qui équivaut à 2034,96 kWh/m² par an.

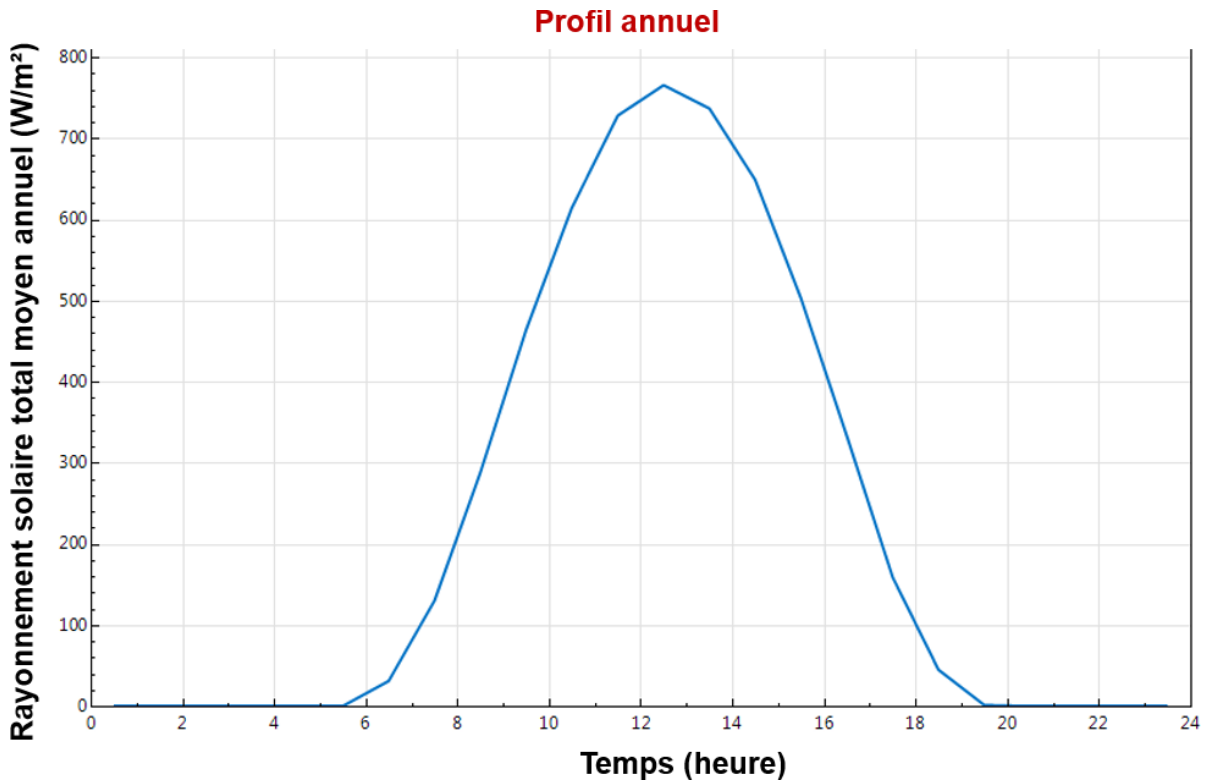


Figure III. 1 : La variation du rayonnement solaire total annuel moyen en fonction du temps.

Comme on le constate, le lieu choisi pour implanter la centrale photovoltaïque est riche en rayonnement solaire, ce qui favorise l'exploitation de l'énergie solaire dans de nombreux domaines, dont le plus important est la production d'électricité, ce qui contribuera à résoudre la crise de l'agriculture zones, en particulier pour les fermes, les exploitations agricoles, les investissements et les lieux de récupération agricole situés en dehors du réseau.

La figure III.2 montre la variation de la température moyenne annuelle de l'air en fonction du temps. Comme on le sait, El-Oued est une zone désertique à caractère agricole et commercial par excellence, et son climat désertique est froid en hiver, chaud et sec en été. Comme le montre la figure III.2, la température maximale moyenne de l'air a été estimée à 28,1 °C, tandis que la température maximale réelle mesurée 49,6 °C au mois de Juillet.

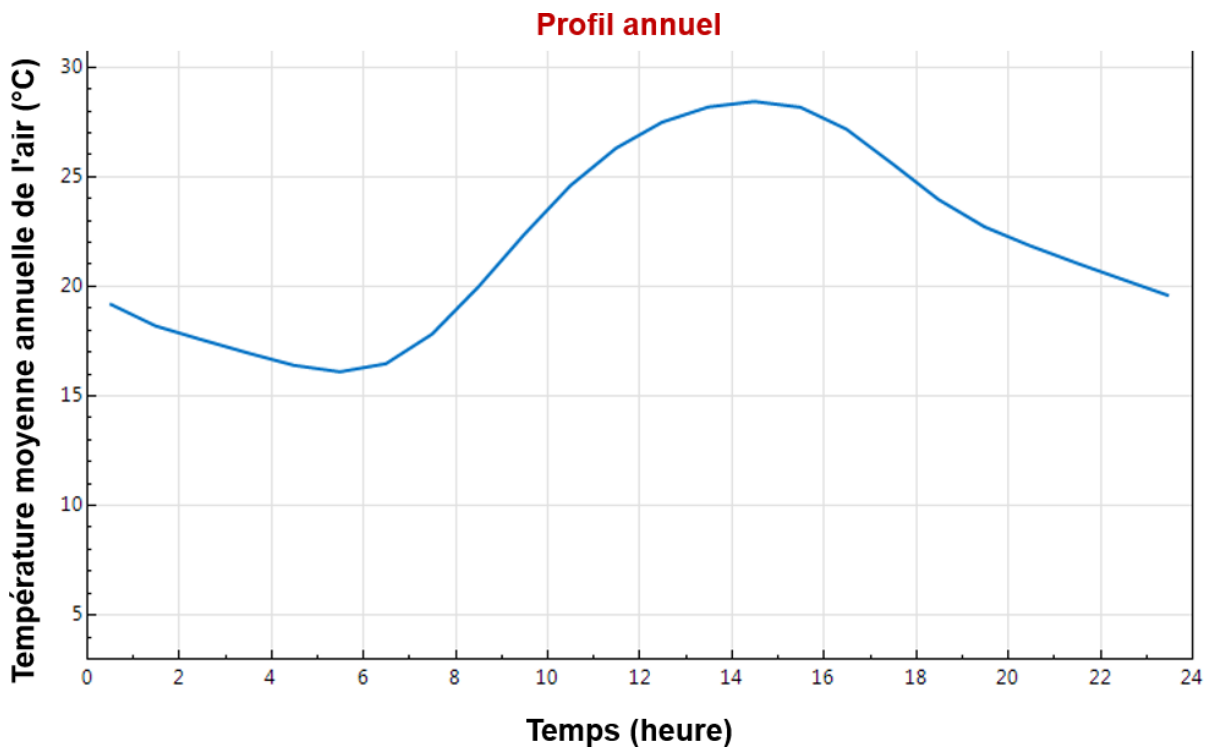


Figure III. 2 : *Variation de la température moyenne annuelle de l'air en fonction du temps.*

A titre d'information, l'augmentation de la température de la cellule photovoltaïque affecte négativement ses performances. Lorsque la température de la cellule augmente, le courant augmente légèrement et la tension de la cellule diminue encore plus, et donc la capacité de production du PV diminue et le rendement diminue. La sensibilité des cellules photovoltaïques à la température varie selon la technologie utilisée, où les cellules à couches minces sont moins affectées par l'augmentation de la température que les cellules monocristallines. Les semi-conducteurs sont sensibles à une augmentation de la température, car l'augmentation de la température réduit l'écart de bande et donc les coefficients des semi-conducteurs sont affectés, car l'énergie des électrons augmente et l'énergie nécessaire pour rompre la liaison entre les électrons et le noyau diminue. Cela entraîne une augmentation du courant et une diminution de la tension lorsque la température augmente.

Par conséquent, il est recommandé de toujours doter le système photovoltaïque d'une technologie de refroidissement spéciale en été afin de maintenir les performances du système photovoltaïque utilisé, et la surface de réception des panneaux photovoltaïques doit être

constamment nettoyée pour s'assurer que la plus grande quantité du rayonnement solaire l'atteint.

Les centrales photovoltaïques doivent installer des brise-vent et des barrières anti-poussières pour éviter que la charge du vent n'endommage le système de support de la centrale photovoltaïque afin d'assurer le fonctionnement normal de la centrale solaire, et également pour éviter le dépôt de poussière sur les surfaces des panneaux photovoltaïques car la poussière déposée sur leurs surfaces réduit franchement leurs performances. La figure III.3 montre la variation de la vitesse moyenne annuelle du vent en fonction du temps. La région d'El-Oued est caractérisée par un mouvement aérien actif de février à avril, lorsque les vents du nord soufflent. Quant à l'été, les vents de sirocco (vent de SHAHILI) soufflent parfois du sud. Comme pour le reste des mois, le mouvement de l'air est principalement une brise fraîche.

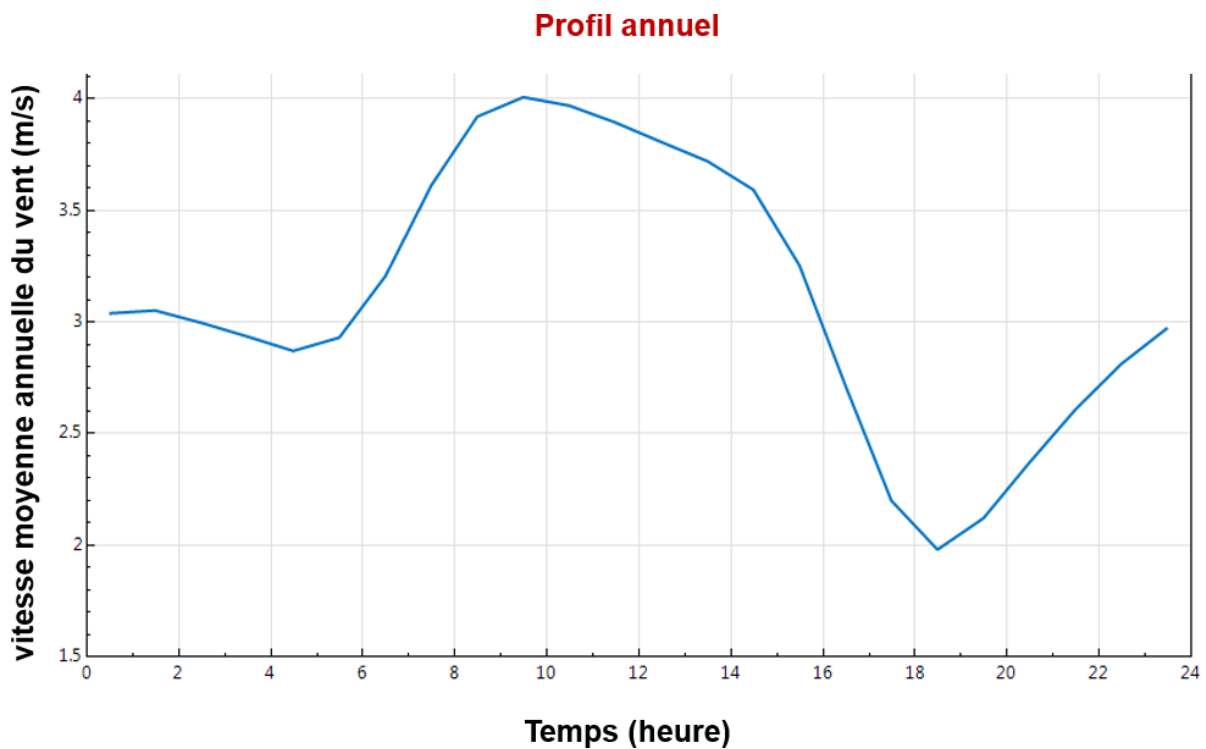


Figure III. 3 : *Variation de la vitesse moyenne annuelle du vent en fonction du temps.*

En installant des brise-vent autour de la centrale photovoltaïque, les résultats suivants seront obtenus :

- Réduire la vitesse du vent, empêcher les panneaux photovoltaïques de basculer et protéger les supports des centrales photovoltaïques contre la destruction par les vents violents .
- Réduire l'accumulation de poussière à la surface des panneaux solaires et améliorer l'efficacité de la production d'électricité.
- Contribue à protéger les panneaux contre les dommages causés par les débris et les animaux sauvages.
- L'équipement brise-vent peut fonctionner normalement après la tempête .
- Réduisant les coûts d'entretien, ce brise-vent réduit le temps de nettoyage et le coût de l'eau en réduisant la poussière et en permettant aux travailleurs de nettoyer plus rapidement.

Analyse énergétique de la centrale photovoltaïque

La productivité d'une centrale photovoltaïque est affectée par plusieurs facteurs, notamment des facteurs climatiques et opérationnels, où le changement climatique aura un impact direct sur les performances des centrales photovoltaïques, représenté par l'écart ou l'intermittence de la quantité de rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre, nécessaire pour maintenir la production d'énergie solaire. De plus, l'augmentation des températures de surface de la Terre, l'augmentation de la quantité d'humidité et d'aérosols, l'augmentation des particules en suspension, ainsi que le transit des nuages entraînent une diminution globale du rayonnement solaire, ce qui se traduit par une augmentation du nombre de jours pendant lesquels la luminosité du soleil diminue. Ce qui se distingue par le programme SAM est qu'il prend en compte les facteurs susmentionnés et toutes les pertes lors de la simulation, puis il donne la productivité nette de la centrale PV comme le montre la figure III. 4 qui montre la productivité nette de la centrale étudiée dans une période d'une journée annuelle typique.

De la figure III.4, on peut conclure que :

- La centrale photovoltaïque étudiée peut produire une quantité journalière d'électricité 147,02 MW .
- La centrale photovoltaïque étudiée peut produire annuellement une quantité d'électricité de 54,14 GW (~54140 MW).

Les résultats présentés dans la figure sont très encourageants pour les décideurs qui envisagent d'aller de l'avant vers la construction de ce type de centrales dans le sud de l'Algérie à caractère agricole, commercial et industriel.

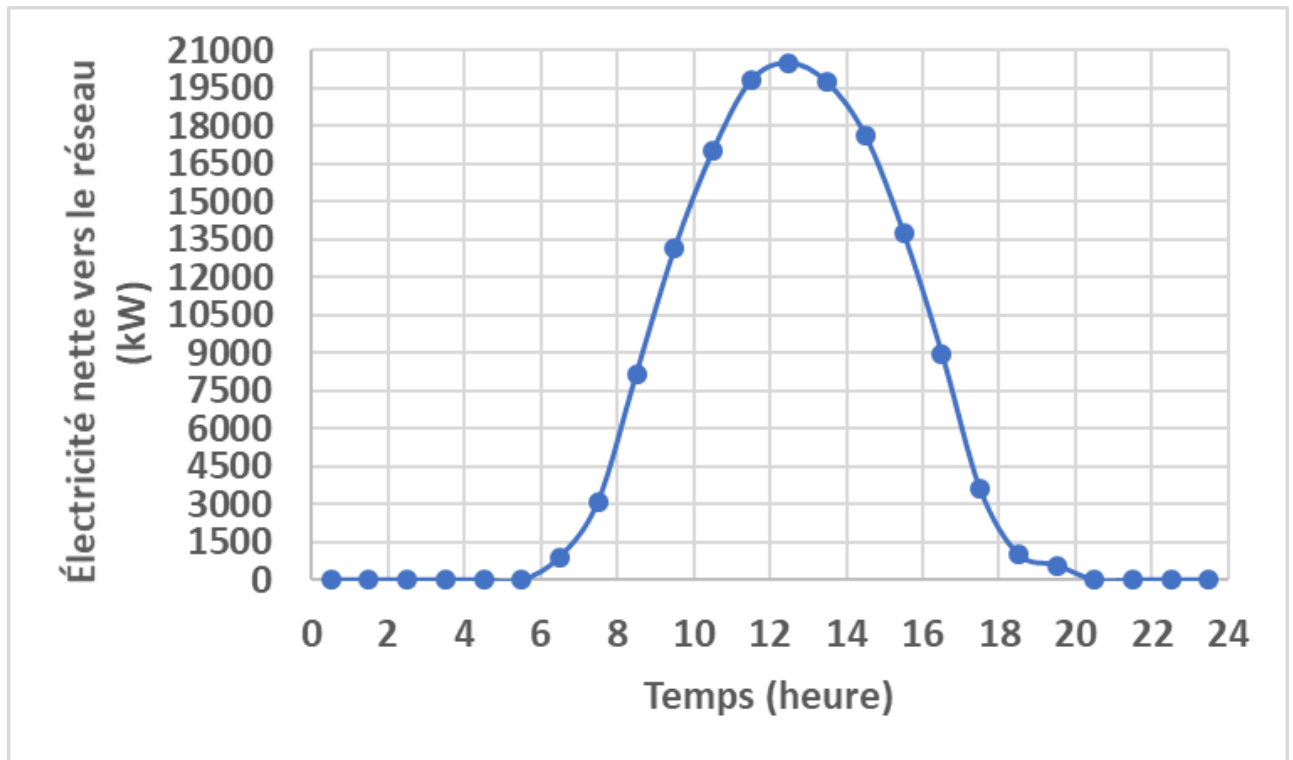


Figure III. 4 : *Quantité d'électricité nette (données horaires) vers le réseau en fonction du temps.*

En ce qui concerne l'électricité nette au réseau au cours de la première année, elle est illustrée à la figure III.5. De cette figure on peut déduire ce qui suit :

- La quantité de production la plus élevée a été enregistrée en Avril, avec une valeur de $5,21 \times 10^6$ kWh. Il est à noter que chacun des mois de Mai à Septembre a de plus grandes quantités de rayonnement solaire, mais le mois d'Avril a atteint la plus grande productivité électrique car la température de l'air au mois d'Avril correspond davantage aux cellules photovoltaïques installées. La cellule PV est déficiente, comme indiqué précédemment, mais malgré cela, la productivité pour le reste de tous les mois reste acceptable et suffisante pour couvrir de nombreux secteurs dans la région sélectionnée et ses environs, où la somme de tous les mois a été estimée par $5,41 \times 10^7$ kWh.

- La quantité de production la plus faible a été enregistrée en Décembre, avec une valeur de $3,54 \times 10^6$ kWh. Comme on le sait, pendant les mois froids, la quantité de rayonnement solaire diminue et les fluctuations météorologiques accompagnées de nuages augmentent, ce qui entraîne une diminution de la productivité de la centrale photovoltaïque.

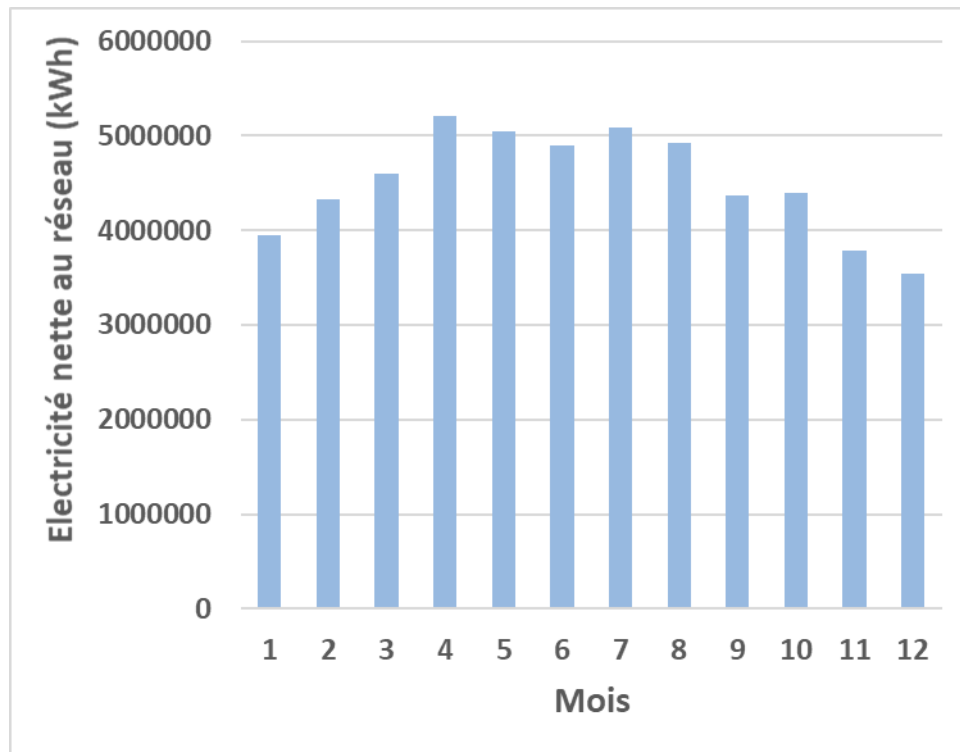


Figure III. 5 : L'électricité nette au réseau au cours de la première année.

La figure III.6 montre l'électricité nette annuelle vers le réseau en fonction du temps pendant la durée de vie de la centrale photovoltaïque. De cette figure on peut déduire ce qui suit :

- Dans la première année de fonctionnement de la centrale photovoltaïque, sa production a été estimée à $5,41 \times 10^7$ kWh, et dans sa vingt-cinquième année, sa production a diminué de $6,41 \times 10^6$ kWh pour devenir $4,77 \times 10^7$ kWh. Autrement dit, sa productivité diminue de 11,8 % dans sa vingt-cinquième année .
- Durant les années productives de la station et selon les résultats obtenus, d'une année à l'autre, la productivité de la station décline à un rythme de 0,494 %, sachant qu'elle a été imposée à la simulation 0,5 % et cela est dû à la précision du

SAM lors de sa simulation car il donne des résultats proches de la réalité, où ses résultats sont très fiables.

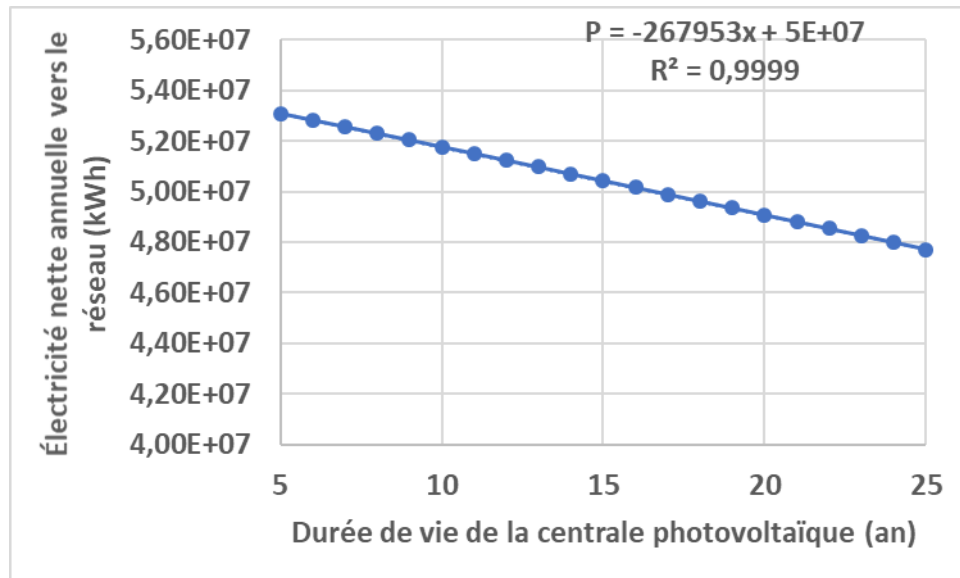


Figure III. 6 : L'électricité nette annuelle vers le réseau par rapport au temps de la durée de vie de la centrale photovoltaïque.

De nombreux facteurs affectent la production d'énergie des centrales photovoltaïques. Il existe des facteurs directement liés aux caractéristiques des modules eux-mêmes tels que la manière dont le système est conçu et installé (inclinaison, direction, configuration de la corde, etc.), et également des facteurs environnementaux tels que l'ombre, la poussière, la pollution par la neige, ainsi que diverses fluctuations météorologiques jouent un rôle dans la détérioration des performances des panneaux PV, ce qui se traduit par une diminution de la productivité de la centrale photovoltaïque [73]. Les pertes du système font référence aux effets que le SAM ne modélise pas explicitement, où ces facteurs de perte linéaires sont appliqués sous forme de pourcentage de réduction à la production estimée du système calculée par le SAM. La figure III. 7 montre les pertes enregistrées dans la centrale photovoltaïque au cours de la première année de fonctionnement.

Une estimation précise de la quantité d'énergie que votre conception de système PV produira est essentielle pour garantir que le système répond aux besoins de votre client. Mais sans une bonne compréhension des facteurs qui peuvent réduire la production du système,

arriver à une estimation précise peut être difficile, même avec l'aide d'applications logicielles qui simulent les performances du système.

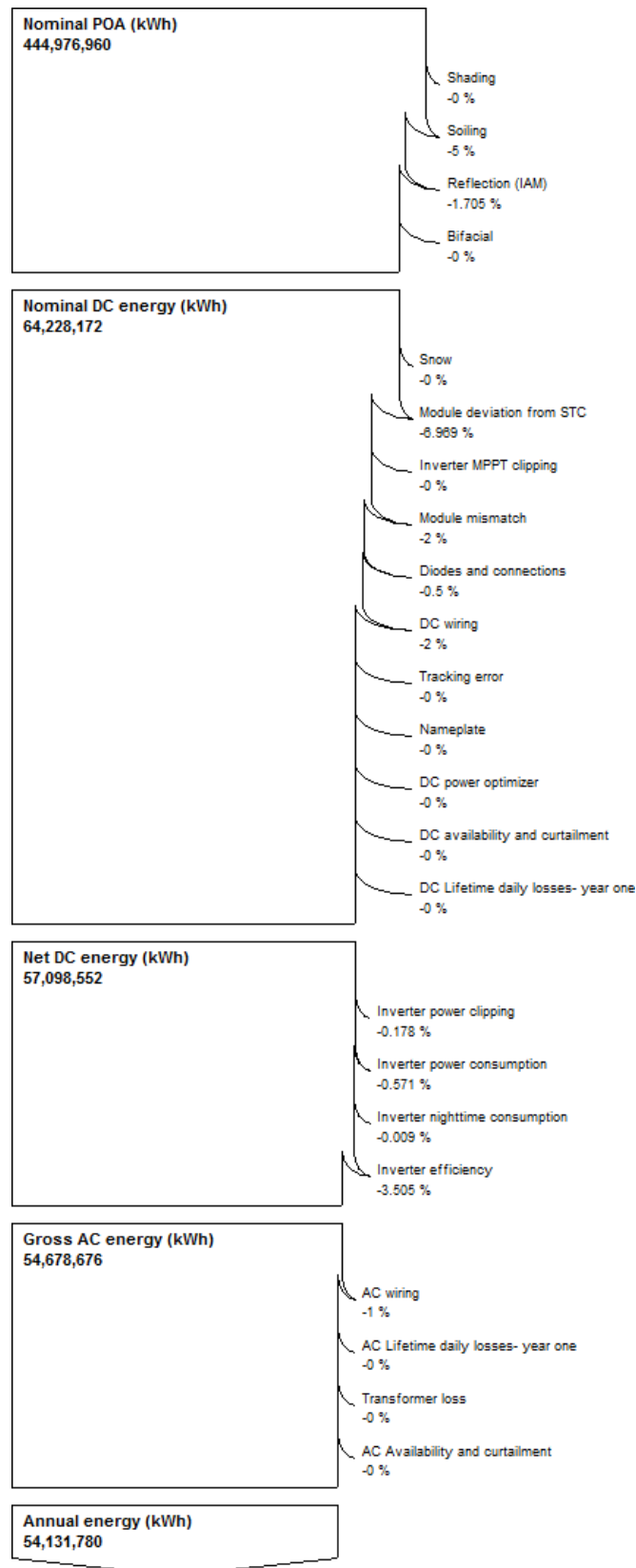


Figure III. 7 : Les pertes enregistrés dans la centrale photovoltaïque au cours de la première année de fonctionnement.

Les pertes de courant continu (CC) sont les facteurs qui réduisent la quantité d'énergie de courant continu (CC) produite par les panneaux photovoltaïques avant que cette énergie ne soit convertie en courant alternatif (CA) par l'onduleur pour une utilisation à la maison et sur la grille électrique. Celles-ci sont toutes appliquées sous forme de pertes latérales de courant continu à pourcentage fixe au système, ce qui signifie que la sortie des modules PV sera réduite de ces valeurs en pourcentage.

Analyse économique de la centrale photovoltaïque

Dans cette partie, une analyse économique et financière de la centrale PV a été réalisée, ce qui permet de donner un calcul précis du coût actualisé de l'électricité (LCOE), où LCOE inclut tous les coûts liés à l'investissement global ainsi que les coûts d'exploitation frais. Pour l'Algérie, le décret exécutif n° 17-98 du 26 février 2017, modifié et complété par le décret exécutif n° 17-204, définit la procédure d'appel d'offres pour la production d'énergie renouvelable ou de cogénération et leur intégration dans le système électrique national [74]. Par ce décret, le gouvernement algérien visait à fixer le prix plafond de 01 kWh d'électricité, car ce décret a des critères de sélection des investisseurs qui choisissent de construire des centrales solaires, donc cet objectif principal de ce décret est d'ouvrir la voie à tous les investisseurs dans le domaine de la production d'électricité solaire en les incitant à baisser leurs offres. En d'autres termes, il vise à déterminer le prix maximum acceptable pour ce type de projet en Algérie, calculé sur la base d'éléments techniques et économiques afin d'anticiper et d'équilibrer les montants nécessaires pour compenser les surcoûts supportés par les acheteurs d'énergie. Les résultats de l'analyse économique de la centrale photovoltaïque étudiée se résument comme suit :

- Le coût total d'installation de la centrale photovoltaïque étudiée a été estimé à 33,88 millions de dollars .
- La valeur actuelle nette (VAN, ou « NET PRESENT VALUE (NPV) ») est la différence entre la valeur actuelle des entrées de trésorerie et la valeur actuelle des

sorties de trésorerie sur une période de temps. La VAN est utilisée dans la budgétisation des immobilisations et la planification des investissements pour analyser la rentabilité d'un investissement ou d'un projet prévu. La VAN est le résultat de calculs utilisés pour trouver la valeur actuelle d'un futur flux de paiements. Selon le chiffre d'affaires de la centrale thermique, le capital investi peut être restitué après 09 ans, à compter de la date d'exploitation de la centrale. La VAN, est utilisée pour calculer la valeur totale actuelle d'un futur flux de paiements. Si la VAN d'un projet ou d'un investissement est positive, cela signifie que la valeur actuelle actualisée de tous les flux de trésorerie futurs liés à ce projet ou à cet investissement sera positive et donc attractive. Pour calculer la VAN, il faut estimer les flux de trésorerie futurs pour chaque période et déterminer le taux d'actualisation correct. La VAN de la centrale photovoltaïque étudiée a été estimé à 6,91 millions de dollars .

- Le revenu net pour toutes les années d'exploitation après le retrait du capital d'investissement est estimé à 62,30 millions de dollars .
- Le coût nivelé de l'électricité est égal à 3.88 ¢/kWh.

Comme on le note, tous les facteurs économiques incitent à investir dans ces centrales électriques qui dépendent des énergies renouvelables, ce qui permettra l'emploi de nombreux diplômés universitaires, dont des ingénieurs et des techniciens.

Analyse environnementale de la centrale photovoltaïque

Comme on le sait, l'utilisation de l'énergie solaire pour produire de l'électricité photovoltaïque n'entraîne pas d'émissions de dioxyde de carbone qui contribuent au réchauffement climatique [75]. Selon Ghodbane et al. [28], la valeur totale approximative des émissions de CO₂ des centrales électriques au charbon est de 2 kg CO₂/kWh, où le prix international pour 01 tonne de CO₂ est de 14,5 \$. Sur la base de ces données, il est conclu que la centrale PV étudiée contribuera à réduire les émissions de dioxyde de carbone de 108263,56 tonnes annuellement, ce qui signifie que l'établissement exploité gagnera et économisera l'équivalent de 1,57 millions de dollars. Par conséquent, l'intérêt à l'exploitation de telles

centrales PVs est vital pour réduire les émissions de CO₂ et économiser les frais de l'établissement exploité.

Conclusion

A travers ce chapitre, une analyse de l'efficacité de la construction d'une centrale photovoltaïque dans la région de Guemar, Wilaya d'El-Oued en Algérie a été menée. Pour cela, il s'est appuyé sur le programme « SAM » pour mener la simulation. Les résultats obtenus sont très encourageants pour entamer le premier pas vers l'implantation de telles centrales photovoltaïques dans le sud algérien qui connaît un saut qualitatif dans le domaine de l'avancement agricole et industriel.

CONCLUSION GENERALE ET PROSPECTIVES

Ce mémoire est une simulation d'une centrale photovoltaïque dans la région de Guemar (Coordonnées 33,71° N et 6,71° E et 44 m), Wilaya d'El Oued, Algérie. La modélisation et la simulation seront effectuées à l'aide de SYSTEM ADVISOR MODEL (SAM). Ce travail permet d'acquérir des connaissances très importantes sur les centrales photovoltaïques. Les résultats obtenus sont très précieux dont les plus importants sont :

- La centrale photovoltaïque étudiée peut produire une quantité journalière d'électricité 147,02 MW .
- La centrale photovoltaïque étudiée peut produire annuellement une quantité d'électricité de 54,14 GW (~54140 MW) .
- Le coût total d'installation de la centrale photovoltaïque étudiée a été estimé à 33,88 millions de dollars .
- La valeur actuelle nette (VAN) de la centrale photovoltaïque étudiée a été estimé à 6,91 millions de dollars .
- Le revenu net pour toutes les années d'exploitation après le retrait du capital d'investissement est estimé à 62,30 millions de dollars .
- Le coût nivelé de l'électricité est égal à 3.88 ¢/kWh .
- La centrale photovoltaïque étudiée contribuera à réduire les émissions de dioxyde de carbone de 108263,56 tonnes annuellement, ce qui signifie que l'établissement exploité gagnera et économisera l'équivalent de 1,57 millions de dollars.

Enfin, on constate que les panneaux photovoltaïques pour la production d'électricité est un choix pratique avec des indicateurs financiers et environnementaux attractifs. Ainsi, à l'avenir, il est possible d'établir des centrales photovoltaïques comme options durables pour produire de l'énergie électrique bon marché et propre, en particulier dans les endroits disposant d'un potentiel solaire suffisant.

REFERENCES

- [1] R. Zhar, A. Allouhi, M. Ghodbane, A. Jamil, K. Lahrech, Parametric analysis and multi-objective optimization of a combined Organic Rankine Cycle and Vapor Compression Cycle, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 47 (2021) 101401. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101401>.
- [2] Z. Said, M. Ghodbane, B. Boumeddane, A.K. Tiwari, L.S. Sundar, C. Li, N. Aslfattahi, E. Bellos, Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of a parabolic trough solar collector using MXene based silicone oil nanofluids, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 239 (2022) 111633. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111633>.
- [3] M. Ghodbane, Z. Said, A.K. Tiwari, L. Syam Sundar, C. Li, B. Boumeddane, 4E (energy, exergy, economic and environmental) investigation of LFR using MXene based silicone oil nanofluids, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 49 (2022) 101715. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101715>.
- [4] A. Khechekhouche, B. Benhaoua, M.E.H. Attia, Z. Driss, A. Manokar, M. Ghodbane, Polluted groundwater treatment in southeastern Algeria by solar distillation, *Algerian Journal of Environmental Science and Technology* 6(1) (2020). <https://www.aljest.net/index.php/aljest/article/view/269/0>.
- [5] A. Sadoun, A. Khechekhouche, I. Kemerchou, M. Ghodbane, B. Souyei, Impact of natural charcoal blocks on the solar still output, *Heritage and Sustainable Development* 4(1) (2022) 61-66. <https://doi.org/10.37868/hsd.v4i1.80>.
- [6] M. Ghodbane, B. Boumeddane, Numerical modeling of a parabolic trough solar collector at Bouzaréah, Algeria, *Int J Chem Pet Sci.* 4(2) (2015) 11-25. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/4604>.
- [7] M. Ghodbane, B. Boumeddane, Numerical simulation of a solar-driven ejector refrigeration cycle coupled to a parabolic trough concentrator, *International Journal of Chemical and Petroleum Sciences* 5(1) (2016) 1-12. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/4608>.
- [8] D. Benmenine, M. Ghodbane, M.E. Soudani, H. Abdelouahed, A. Massiv, N. Elsharif, A small parabolic trough collector as a solar water heater: an experimental study in Ouargla region, Algeria, *International Journal of Energetica* 5(2) (2020) 1-6. <http://dx.doi.org/10.47238/ijeca.v5i2.141>.
- [9] M. Ghodbane, B. Boumeddane, Estimating solar radiation according to semi empirical approach of PERRIN DE BRICHAMBAUT: application on several areas with different climate in Algeria, *International Journal of Energetica* 1(1) (2016) 20-29. <https://dx.doi.org/10.47238/ijeca.v1i1.12>.
- [10] M. Ghodbane, B. Boumeddane, A parabolic trough solar collector as a solar system for heating water: a study based on numerical simulation, *International Journal of Energetica* 2(2) (2017) 29-37. <https://dx.doi.org/10.47238/ijeca.v2i2.32>.
- [11] M. Ghodbane, B. Boumeddane, A. Khechekhouche, D. Benmenine, Study of a solar air conditioning system with ejector, *International Journal of Energetica* 5(1) (2020) 14-21. <https://dx.doi.org/10.47238/ijeca.v5i1.115>.

- [12] M. Ghodbane, B. Boumeddane, S. Largot, N.E. Heniat, Simulation numérique d'un concentrateur cylindro-parabolique en El Oued, Algérie, International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET) 3(2) (2015) 68-74. <http://ipco-co.com/IJSET/GEEE-2015/12.pdf>.
- [13] M. Ghodbane, B. Boumeddane, A. Khechekhouche, Performance Simulation of a Solar-Driven Ejector Air Conditioning System, International Symposium on Mechatronics and Renewable Energies El-Oued, 10- 11 December 2018, 2018, pp. <http://dSPACE.univ-eloued.dz/xmlui/handle/123456789/1395>.
- [14] M. Ghodbane, B. Boumeddane, S. Largot, Etude optique et thermique d'un concentrateur cylindro-parabolique en site d'Alger, Algérie, IXth International Congress on Renewable Energy and the Environment, Djerba, Tunisie, 2015, pp. 18-20.
- [15] M. Ghodbane, B. Boumeddane, Engineering design and optical investigation of a concentrating collector: Case study of a parabolic trough concentrator J. Fundam. Appl. Sci. 10(2) (2018) 148-171. <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v10i2.11>.
- [16] M. Ghodbane, B. Boumeddane, A numerical analysis of the energy behavior of a parabolic trough concentrator, Journal of Fundamental and Applied Sciences 8(3) (2016) 671-691. <https://doi.org/10.4314/jfas.v8i3.2>.
- [17] M. Ghodbane, B. Boumeddane, N. Moumami, S. Largot, H. Berkane, Study and numerical simulation of solar system for air heating, Journal of Fundamental and Applied Sciences 8(1) (2016) 41-60. <https://doi.org/10.4314/jfas.v8i1.3>.
- [18] M. Ghodbane, B. Boumeddane, N. Said, Design and experimental study of a solar system for heating water utilizing a linear Fresnel reflector, Journal of Fundamental and Applied Sciences 8(3) (2016) 804-825. <https://doi.org/10.4314/jfas.v8i3.8>.
- [19] M. Ghodbane, Étude et optimisation des performances d'une machine de climatisation a éjecteur reliée à un concentrateur solaire Mechanical Engineering Department, Saad Dahleb University of Blida 1, Algeria: www.univ-blida.dz, Central library of Saad Dahlab University 2017, pp. 1-200. <http://di.univ-blida.dz:8080/jspui/handle/123456789/9965>.
- [20] M. Ghodbane, B. Boumeddane, Optical modeling and thermal behavior of a parabolic trough solar collector in the Algerian sahara AMSE JOURNALS-AMSE IIETA, MMC_B 86(2) (2017) 406-426. https://doi.org/10.18280/mmc_b.860207
- [21] M. Ghodbane, D. Benmenine, A. Khechekhouche, B. Boumeddane, Brief on Solar Concentrators: Differences and Applications, Instrumentation Mesure Metrologie 19(5) (2020) 371-378. <https://dx.doi.org/10.18280/i2m.190507>.
- [22] A.K. Hussein, M. Ghodbane, Z. Said, R.S. Ward, The effect of the baffle length on the natural convection in an enclosure filled with different nanofluids, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 147(1) (2022) 791-813. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10300-1>.
- [23] M. Ghodbane, Z. Said, A.A. Hachicha, B. Boumeddane, Performance assessment of linear Fresnel solar reflector using MWCNTs/DW nanofluids, Renewable Energy 151 (2020) 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.137>.
- [24] Z. Said, M. Ghodbane, L.S. Sundar, A.K. Tiwari, M. Sheikholeslami, B. Boumeddane, Heat transfer, entropy generation, economic and environmental analyses of linear Fresnel reflector using novel rGO-Co₃O₄ hybrid nanofluids, Renewable Energy 165(Part 1) (2021) 420-437. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.054>.

- [25] Z. Said, P. Sharma, N. Aslfattahi, M. Ghodbane, Experimental analysis of novel ionic liquid-MXene hybrid nanofluid's energy storage properties: Model-prediction using modern ensemble machine learning methods, *Journal of Energy Storage* 52 (2022) 104858. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104858>.
- [26] M. Ghodbane, M. Majdak, B. Boumeddane, The efficiency of linear Fresnel reflectors in producing superheated steam for power plant drive, *E3S Web Conf.* 323 (2021) 00011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132300011>.
- [27] M. Ghodbane, B. Boumeddane, Z. Said, E. Bellos, A numerical simulation of a linear Fresnel solar reflector directed to produce steam for the power plant, *Journal of Cleaner Production* 231 (2019) 494-508. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.201>.
- [28] M. Ghodbane, E. Bellos, Z. Said, B. Boumeddane, A. Khechekhouche, M. Sheikholeslami, Z.M. Ali, Energy, Financial and Environmental investigation of a direct steam production power plant driven by linear Fresnel solar reflectors, *Journal of Solar Energy Engineering* 143(2) (Apr 2021) 021008. <https://doi.org/10.1115/1.4048158>.
- [29] M. Ghodbane, B. Boumeddane, A.K. Hussein, H.M. Ali, D. Li, Thermal numerical investigation of a small parabolic trough collector under desert climatic conditions *Journal of Thermal Engineering* 7(3) (2021) 429-446. <https://doi.org/10.18186/thermal.884657>.
- [30] M. Ghodbane, B. Boumeddane, A.K. Hussein, D. Li, S. Sivasankaran, Optical numerical investigation of a solar power plant of parabolic trough collectors, *Journal of Thermal Engineering* 7(3) (2021) 550-569. <https://doi.org/10.18186/thermal.888167>.
- [31] M. Ghodbane, B. Boumeddane, A. Khechekhouche, S. Largot, Study of the effect of the position and metal of the receiver tube on the performance of a parabolic trough solar collector, *Materials Today: Proceedings* 51 (2022) 2144-2151. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.497>.
- [32] M. Ghodbane, B. Boumeddane, N. Said, A linear Fresnel reflector as a solar system for heating water: theoretical and experimental study, *Case Studies in Thermal Engineering* 8(C) (2016) 176-186, <http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2016.06.006>.
- [33] Z. Said, M. Ghodbane, A.K. Tiwari, H.M. Ali, B. Boumeddane, Z.M. Ali, 4E (Energy, Exergy, Economic, and Environment) examination of a small LFR solar water heater: An experimental and numerical study, *Case Studies in Thermal Engineering* 27 (2021) 101277. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101277>.
- [34] M. Ghodbane, E. Bellos, Z. Said, B. Boumeddane, A.K. Hussein, L. Kolsi, Evaluating energy efficiency and economic effect of heat transfer in copper tube for small solar linear Fresnel reflector, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 143(6) (2021) 4197-4215. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09384-6>.
- [35] Z. Said, M. Ghodbane, A.A. Hachicha, B. Boumeddane, Optical performance assessment of a small experimental prototype of linear Fresnel reflector *Case Studies in Thermal Engineering* 16 (2019) 100541. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100541>.
- [36] M. Ghodbane, B. Boumeddane, K. Lahrech, Solar thermal energy to drive ejector HVAC systems: A numerical study under Blida climatic conditions, *Case Studies in Thermal Engineering* 28 (2021) 101558. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101558>.

- [37] M. Ghodbane, B. Boumeddane, A.K. Hussein, Performance Analysis of a Solar-Driven Ejector Air Conditioning System Under El-Oued Climatic Conditions, Algeria, Journal of Thermal Engineering 7(1) (2021) 172-189. <https://dx.doi.org/10.18186/thermal.847334>.
- [38] M. Ghodbane, Z. Said, O. Ketfi, B. Boumeddane, A.T. Hoang, M. Sheikholeslami, M.E.H. Assad, M.H. Ahmadi, V.N. Nguyen, V.D. Tran, T.H. Truong, Thermal performance assessment of an ejector air-conditioning system with parabolic trough collector using R718 as a refrigerant: A case study in Algerian desert region, Sustainable Energy Technologies and Assessments (2022).
- [39] M.E.H. Attia, Z. Driss, M. Ghodbane, A.K. Hussein, S.K. Rout, D. Li, Experimental Study of the Temperature Distribution Inside an Indirect Solar Dryer Chamber, in: M. Ramgopal, S.K. Rout, S.K. Sarangi (Eds.) Advances in Air Conditioning and Refrigeration, Springer Singapore, Singapore, 2021, pp. 305-316. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6360-7_28.
- [40] D.M. Chapin, C.S. Fuller, G.L. Pearson, A New Silicon p- n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power, Journal of Applied Physics 25(5) (1954) 676-677.
- [41] N. Amin, S. Ahmad Shahahmadi, P. Chelvanathan, K.S. Rahman, M. Istiaque Hossain, M.D. Akhtaruzzaman, Solar Photovoltaic Technologies: From Inception Toward the Most Reliable Energy Resource, in: M.A. Abraham (Ed.), Encyclopedia of Sustainable Technologies, Elsevier, Oxford, 2017, pp. 11-26. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10092-2>.
- [42] A. Nouar, Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, 2010.
- [43] A.K. Tossa, Y.M. Soro, L. Thiaw, Y. Azoumah, L. Sicot, D. Yamegueu, C. Lishou, Y. Coulibaly, G. Razongles, Energy performance of different silicon photovoltaic technologies under hot and harsh climate, Energy 103 (2016) 261-270.
- [44] A. MAOUCHE, Etude et Identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique, Université de Batna, 2011.
- [45] J.-C. Muller, Techniques de l'Ingénieur, dossier BE8579
- [46] M. URIEN, Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible, UNIVERSITÉ BORDEAUX I, 2008.
- [47] J. Zhao, A. Wang, M.A. Green, F. Ferrazza, 19.8% efficient "honeycomb" textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells, Applied Physics Letters 73(14) (1998) 1991-1993.
- [48] M. EL-GAHOUCI, Cellules solaires multi-jonctions dupliquées pour le photovoltaïque à très haute concentration, Sherbrooke (Québec) Canada, 2021.
- [49] Le tellurure de cadmium photovoltaïque. <https://www.hisour.com/fr/cadmium-telluride-photovoltaics-39663/>. <https://www.hisour.com/fr/cadmium-telluride-photovoltaics-39663/>
- [50] Cellules solaires au sélénure de gallium et d'indium de cuivre. <https://www.hisour.com/fr/copper-indium-gallium-selenide-solar-cells-39668/>
- [51] P. Destruel, I. Seguy, Les cellules photovoltaïques organiques. <http://dx.doi.org/10.1051/refdp/2007064> (<http://www.refletsdelaphysique.fr>), Reflets de la Physique 6 16-18.

- [52] O.K. Simya, A. Mahaboobatcha, K. Balachander, A comparative study on the performance of Kesterite based thin film solar cells using SCAPS simulation program, *Superlattices and Microstructures* 82 (2015) 248-261.
- [53] S. Petibon, *Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques*, Université de Toulouse, 2009.
- [54] K. AMARA, *Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension*, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2015.
- [55] Y. He, S. Guo, J. Zhou, F. Wu, J. Huang, H. Pei, The quantitative techno-economic comparisons and multi-objective capacity optimization of wind-photovoltaic hybrid power system considering different energy storage technologies, *Energy Conversion and Management* 229 (2021) 113779.
- [56] S.S. Joshi, A.S. Dhoble, Photovoltaic -Thermal systems (PVT): Technology review and future trends, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 92 (2018) 848-882.
- [57] W. Cai, X. Li, A. Maleki, F. Pourfayaz, M.A. Rosen, M. Alhuyi Nazari, D.T. Bui, Optimal sizing and location based on economic parameters for an off-grid application of a hybrid system with photovoltaic, battery and diesel technology, *Energy* 201 (2020) 117480.
- [58] T. Brahim, A. Jemni, Economical assessment and applications of photovoltaic/thermal hybrid solar technology: A review, *Solar Energy* 153 (2017) 540-561.
- [59] J.S. Liu, C.-H. Kuan, S.-C. Cha, W.-L. Chuang, G.J. Gau, J.-Y. Jeng, Photovoltaic technology development: A perspective from patent growth analysis, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95(11) (2011) 3130-3136.
- [60] L. Chen, Y. Huang, Z. Qian, X. Zhang, J. Liang, R. Wang, A novel mask technology of glass HF etching and application in photovoltaic cells, *Journal of Alloys and Compounds* 783 (2019) 428-433.
- [61] S.L.K.G. Aravelli, S.N. Ramavathu, Smart and sustainable technologies for recycling photovoltaic panels, *Environmental Challenges* 2 (2021) 100020.
- [62] Y. Cho, A. Shaygan, T.U. Daim, Energy technology adoption: Case of solar photovoltaic in the Pacific Northwest USA, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 34 (2019) 187-199.
- [63] J.-Y. Ho, E. O'Sullivan, Standardisation framework to enable complex technological innovations: The case of photovoltaic technology, *Journal of Engineering and Technology Management* 50 (2018) 2-23.
- [64] A. Bianchini, M. Gambuti, M. Pellegrini, C. Saccani, Performance analysis and economic assessment of different photovoltaic technologies based on experimental measurements, *Renewable Energy* 85 (2016) 1-11.
- [65] O. Behar, D. Sbarbaro, L. Moran, Which is the most competitive solar power technology for integration into the existing copper mining plants: Photovoltaic (PV), Concentrating Solar Power (CSP), or hybrid PV-CSP?, *Journal of Cleaner Production* 287 (2021) 125455.
- [66] N. Aarich, M. Raoufi, A. Bennouna, N. Erraissi, Outdoor comparison of rooftop grid-connected photovoltaic technologies in Marrakech (Morocco), *Energy and Buildings* 173 (2018) 138-149.

- [67] Z. Xin-gang, W. Zhen, Technology, cost, economic performance of distributed photovoltaic industry in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 110 (2019) 53-64.
- [68] M. Fisac, F.X. Villasevil, A.M. López, High-efficiency photovoltaic technology including thermoelectric generation, *Journal of Power Sources* 252 (2014) 264-269.
- [69] C. Yu, J. Chai, S. Han, Z. Liu, X. Li, J. Yao, Field performance evaluation of various crystalline silicon photovoltaic technologies in Pingshan, China, *Energy Reports* 5 (2019) 525-528.
- [70] Y. Wang, R. Das, G. Putrus, R. Kotter, Economic evaluation of photovoltaic and energy storage technologies for future domestic energy systems – A case study of the UK, *Energy* 203 (2020) 117826.
- [71] K.-J. Chen, Y.-H. Fang, F.-Y. Hung, Novel photovoltaic ribbon technology: Interfacial behavior of In–50Sn alloy ribbon without metal matrix under electrothermal effects and chlorine corrosion, *Materials Today Communications* 26 (2021) 101865.
- [72] NREL, System Advisor Model (SAM), 2022. (Accessed June 18th, 2022 2022).
- [73] A. Barbón, M. Ghodbane, L. Bayón, Z. Said, A general algorithm for the optimization of photovoltaic modules layout on irregular rooftop shapes, *Journal of Cleaner Production* (2022).
- [74] A. Sellal, Décret exécutif n° 17-98 du 29 Jomada El Oula 1438 correspondant au 26 février 2017 définissant la procédure d'appel d'offres pour la production des énergies renouvelables ou de cogénération et leur intégration dans le système national d'approvisionnement en énergie électrique. Web page: https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/decret_17-98_5b6854c307691.pdf, JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 15, 5 Mars 2017, pp. 3-8.
- [75] B. Mahlous, L. Zahri, Y. Tercha, Etude de l'effet des changements de conditions opérationnelles sur les performances des panneaux photovoltaïques. Mémoire de Master en Electromécanique, Mechanical Engineering Department, El-Oued University, 2022.

Titre: Etude numérique des performances d'une centrale solaire photovoltaïque.

Master : Electromécanique.

Auteur : Abassi Omar, Boutaleb seyfelislam, Rezzazga Mourad et Touahri Ahmed.

Mots clés : Energie solaire ; Centrales photovoltaïques ; Simulation ; Performances.

Résumé

A travers ce mémoire, une analyse de l'efficacité de la construction d'une centrale photovoltaïque dans la région de Guemar, Wilaya d'El-Oued en Algérie a été menée. Pour cela, il s'est appuyé sur le programme « SAM » pour mener la simulation. Les résultats obtenus sont très encourageants pour entamer le premier pas vers l'implantation de telles centrales photovoltaïques dans le sud algérien qui connaît un saut qualitatif dans le domaine de l'avancement agricole et industriel. Les résultats obtenus sont très précieux, où la centrale photovoltaïque étudiée peut produire une quantité journalière d'électricité de 147,02 MW, et peut produire annuellement une quantité d'électricité de 54,14 GW (~54140 MW) avec un coût total d'installation de 33,88 millions de dollars. Concernant la valeur actuelle nette (VAN) de la centrale photovoltaïque étudiée, elle a été estimée à 6,91 millions de dollars avec un revenu net 62,30 millions de dollars pour toutes les années d'exploitation après le retrait du capital d'investissement. Concernant le coût nivelé de l'électricité est égal à 3.88 €/kWh. En plus, la centrale photovoltaïque étudiée contribuera à réduire les émissions de dioxyde de carbone de 108263,56 tonnes annuellement, ce qui signifie que l'établissement exploité gagnera et économisera l'équivalent de 1,57 millions de dollars. Les résultats obtenus sont très encourageants pour entamer le premier pas vers l'implantation de telles centrales photovoltaïques dans le sud algérien qui connaît un saut qualitatif dans le domaine de l'avancement agricole et industriel.

Title: studying the effect of changes in operating conditions on the performance of photovoltaic panels.

Keywords: Solar energy; Photovoltaic power plants; Simulation; Performance.

Abstract

Through this thesis, an analysis of the efficiency of the construction of a photovoltaic plant in the El-Oued region of Algeria has been conducted. For this, it has relied on the "SAM" program to conduct the simulation. The results obtained are very encouraging to start the first step towards establishing such stations in the south of Algeria, which knows a qualitative leap in the field of agricultural and industrial advancement. The results obtained are very valuable, where the photovoltaic plant studied can produce a daily quantity of electricity of 147.02 MW, and can produce an annual quantity of electricity of 54.14 GW (~54140 MW) with a total cost of \$33.88 million facility. Regarding the net present value (NPV) of the photovoltaic plant studied, it was estimated at 6.91 million dollars with a net income of 62.30 million dollars for all the years of operation after the withdrawal of the investment capital. . Regarding the levelized cost of electricity is equal to 3.88 ¢/kWh. In addition, the photovoltaic plant studied will contribute to reducing carbon dioxide emissions by 108,263.56 tons annually, which means that the establishment operated, will earn and save the equivalent of 1.57 million dollars. The results obtained are very encouraging to take the first step towards the establishment of such photovoltaic power plants in southern Algeria, which is experiencing a qualitative leap in the field of agricultural and industrial advancement.

العنوان: دراسة تأثير تغيرات الظروف التشغيلية على أداء الألواح

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية؛ المحطات الكهروضوئية؛ المحاكاة؛

المخلص

من خلال هذا الفصل، قد اجري تحليل لكفاءة إنشاء محطة كهروضوئية في منطقة الوادي بالجزائر. لهذا، قد اعتمد على برنامج "SAM" لأجراء المحاكاة. النتائج التي تم الحصول عليها مشجعة للغاية للبدء بالخطوة الأولى نحو إنشاء مثل هذه المحطات بالجنوب الجزائري الذي يعرف قفزة نوعية في مجال الرقي بالمجال الزراعي والصناعي. النتائج التي تم الحصول عليها قيمة للغاية، حيث يمكن للمحطة الكهروضوئية المدروسة أن تنتج كمية يومية من الكهرباء تبلغ 147.02 ميغاوات، ويمكن أن تنتج كمية سنوية من الكهرباء تبلغ 54.14 جيجاوات ~ 54140 (ميغاوات) بتكلفة إجمالية تبلغ 33.88 مليون دولار. وفيما يتعلق بصافي القيمة الحالية (NPV) لمحطة الطاقة الكهروضوئية التي تمت دراستها فقد قدرت بنحو 6.91 مليون دولار بصافي دخل 62.30 مليون دولار لجميع سنوات التشغيل بعد سحب رأس المال الاستثماري. فيما يتعلق بتكلفة التسوية للكهرباء تساوي 3.88 / kWh . بالإضافة إلى ذلك، ستساهم المحطة الكهروضوئية التي تمت دراستها في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 108263.56 طنًا سنويًا، مما يعني أن المنشأة المشغلة ستكسب وتوفر ما يعادل 1.57 مليون دولار. النتائج التي تم الحصول عليها مشجعة للغاية لاتخاذ الخطوة الأولى نحو إنشاء مثل هذه المحطات الكهروضوئية في جنوب الجزائر ، والتي تشهد نقلة نوعية في مجال التقدم الزراعي والصناعي.