



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Électromécanique

Présenté par:

1. Dada Nabil Ramadane
2. Betta Salah Eddine
3. Khellou Yasser

Intitulé :

**Conception de Systèmes Photovoltaïques pour les Stations de Recharge
des Véhicules Électriques**

Soutenue le : 27/05 /2025

Devant le jury composé de :

Dr. Zeghidi Zoubir

Président

Dr. Miloudi Khaled

Examineur

Dr. Zine Bachir

Encadreur

Année académique: 2025/2024

Remerciements

Nous tenons à exprimer mes plus sincères remerciements aux personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, nous souhaitons remercier chaleureusement mon encadrant académique, **[Zine Bachir]**, pour son soutien constant, ses conseils précieux et sa disponibilité tout au long de cette recherche. Sa patience et son expertise ont été des atouts indispensables à l'avancement de ce travail.

Mes remerciements s'étendent également à **[Sonelgaz]**, qui a apporté une perspective pratique et enrichissante grâce à son expérience dans le domaine des énergies renouvelables et des véhicules électriques.

Nous sommes également reconnaissant(e) envers mes collègues de laboratoire et camarades de promotion, qui ont partagé leurs idées, fourni un soutien moral et contribué à créer un environnement de travail stimulant.

Un merci particulier va également à notre famille et à mes amis, qui m'ont encouragé et soutenu dans cet effort, même lors des moments les plus exigeants.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à cette aventure intellectuelle. Ce mémoire est le fruit d'un travail collectif, et je suis fier/fière de pouvoir le partager avec vous.

Abstract

This research designs and optimizes photovoltaic (PV) systems for electric vehicle (EV) charging stations, focusing on sustainability and energy efficiency. Conducted in Oued Souf, Algeria, a region with high solar potential, the study integrates solar panels, lithium-ion batteries, supercapacitors, and advanced energy management systems (EMS) using MATLAB/Simulink. Techniques like Maximum Power Point Tracking (MPPT) with Artificial Neural Networks (ANN) and Fractional-Order Proportional-Integral (FOPI) controllers enhance performance, while Particle Swarm Optimization (PSO) and Grey Wolf Optimization (GWO) minimize power oscillations and improve energy extraction. Simulation results show the system achieves 92% energy efficiency, handling peak power demands of 8 kW and current surges of 150 A. It reduces CO₂ emissions by 643.86 tons annually, supporting environmental sustainability. Supercapacitors ensure rapid response to energy fluctuations, while lithium-ion batteries provide stable storage, enabling reliable charging under variable solar conditions. The study demonstrates the feasibility of PV-powered EV charging stations in sun-rich regions, offering insights for future deployment. By reducing fossil fuel reliance and enhancing grid resilience, the system supports the global transition to electric mobility and aligns with climate goals. This research highlights the potential of renewable energy in transportation, paving the way for sustainable EV infrastructure.

Keywords :

Photovoltaic system (PV), Electric vehicles (EV), Solar charging station, Energy management system (EMS), Artificial neural networks (ANN), Maximum power point tracking (MPPT), Fractional order PI controller (FOPI), Particle swarm optimization (PSO), Grey wolf optimization (GWO), Supercapacitors, Lithium-ion batteries, Energy efficiency, CO₂ emission reduction, Energy transition, Sustainable mobility

Résumé

Cette recherche conçoit et optimise des systèmes photovoltaïques (PV) pour les stations de recharge de véhicules électriques (VE), en mettant l'accent sur la durabilité et l'efficacité énergétique. Menée à Oued Souf, en Algérie, une région à fort potentiel solaire, l'étude intègre des panneaux solaires, des batteries lithium-ion, des supercondensateurs et des systèmes de gestion de l'énergie (EMS) avancés à l'aide de MATLAB/Simulink. Des techniques comme le suivi du point de puissance maximale (MPPT) avec des réseaux de neurones artificiels (ANN) et des contrôleurs proportionnels-intégraux d'ordre fractionnaire (FOPI) améliorent les performances, tandis que l'optimisation par essaim de particules (PSO) et l'optimisation par meute de loups (GWO) minimisent les oscillations de puissance et améliorent l'extraction d'énergie. Les résultats de simulation montrent que le système atteint une efficacité énergétique de 92 %, gérant des pics de demande de puissance de 8 kW et des surtensions de courant de

150 A. Il réduit les émissions de CO₂ de 643,86 tonnes par an, soutenant la durabilité environnementale. Les supercondensateurs assurent une réponse rapide aux fluctuations d'énergie, tandis que les batteries lithium-ion fournissent un stockage stable, permettant une recharge fiable dans des conditions solaires variables. L'étude démontre la faisabilité des stations de recharge PV pour VE dans les régions ensoleillées, offrant des perspectives pour un déploiement futur. En réduisant la dépendance aux combustibles fossiles et en renforçant la résilience du réseau, le système soutient la transition mondiale vers la mobilité électrique et s'aligne sur les objectifs climatiques. Cette recherche met en lumière le potentiel des énergies renouvelables dans les transports, ouvrant la voie à une infrastructure VE durable.

Mots-clés :

Système photovoltaïque (PV), Véhicules électriques (VE), Station de recharge solaire, Gestion de l'énergie (EMS), Réseaux de neurones artificiels (ANN), Suivi du point de puissance maximale (MPPT), Contrôleur FOPI (Fractional Order PI), Optimisation par essaim de particules (PSO), Optimisation par meute de loups (GWO), Supercondensateurs, Batteries lithium-ion, Efficacité énergétique, Réduction des émissions de CO₂, Transition énergétique, Mobilité durable

ملخص

تركز هذه الأبحاث على تصميم وتحسين أنظمة الطاقة الشمسية (PV) لمحطات شحن المركبات الكهربائية (EV)، مع التركيز على الاستدامة وكفاءة الطاقة. تم إجراء الدراسة في منطقة وادي سوف، الجزائر، وهي منطقة تتمتع بإمكانات شمسية عالية، حيث تم دمج الألواح الشمسية، وبطاريات الليثيوم أيون، والمكثفات الفائقة، وأنظمة إدارة الطاقة المتقدمة (EMS) باستخدام MATLAB/Simulink. تم استخدام تقنيات مثل تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) مع الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) ووحدات التحكم التناسبية التفاضلية ذات الترتيب الكسري (FOPI) لتحسين الأداء، بينما تم استخدام تحسين سرب الجسيمات (PSO) وتحسين قطع الذئب (GWO) لتقليل التذبذبات في الطاقة وتحسين استخراج الطاقة.

أظهرت نتائج المحاكاة أن النظام يحقق كفاءة طاقة تصل إلى 92%، مع القدرة على التعامل مع طلبات الطاقة القصوى التي تصل إلى 8 كيلوواط وتيارات تصل إلى 150 أمبير. كما يقلل النظام من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 643.86 طن سنوياً، مما يدعم الاستدامة البيئية. توفر المكثفات الفائقة استجابة سريعة لتقلبات الطاقة، بينما توفر بطاريات الليثيوم أيون تخزيناً مستقرًا للطاقة، مما يضمن شحنًا موثوقًا به حتى في ظل ظروف شمسية متغيرة.

تثبت الدراسة جدوى محطات شحن المركبات الكهربائية التي تعمل بالطاقة الشمسية في المناطق الغنية بالشمس، وتقدم رؤية قيمة للنشر المستقبلي. من خلال تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري وتعزيز مرونة الشبكة، يدعم النظام التحول العالمي نحو التنقل الكهربائي ويتوافق مع أهداف المناخ. تسلط هذه الأبحاث الضوء على إمكانات الطاقة المتجددة في قطاع النقل، مما يمهد الطريق لبنية تحتية مستدامة للسيارات الكهربائية.

الكلمات المفتاحية:

خوارزمية تحسين سرب (FOPI)، المتحكم التناسبي التفاضلي من الدرجة الكسرية (MPPT)، تتبع نقطة القدرة القصوى (ANN)، الشبكات العصبية الاصطناعية (EMS)، إدارة الطاقة، محطة شحن شمسية (VE)، المركبات الكهربائية (PV)، النظام الكهروضوئي، التنقل المستدام، التحول الطاقي (CO₂)، تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، الكفاءة الطاقوية، أيون- بطاريات الليثيوم، (Supercondensateurs) المكثفات الفائقة، (GWO)، خوارزمية قطع الذئب الرمادية، (PSO) الجسيمات

Table des matières

Introduction générale	1
Le photovoltaïque important pour les stations de recharge	1
<i>Pourquoi l'énergie solaire est importante pour les véhicules électriques ?</i>	<i>1.</i>
Objectifs de la recherche	2.
<i>Présentation des Chapitres et de Leur Contenu.....</i>	<i>2</i>
I Chapitre I: État de l'art sur les station de charge photovoltaïque.....	03
I.1 Introduction.....	03
I.2 Aperçu de la technologie photovoltaïque.....	03
I.2.1 <i>Principes de base de la conversion de l'énergie solaire en électricité.....</i>	<i>04</i>
I.2.2 <i>Composants d'un système PV : panneaux solaires, onduleurs, etc</i>	<i>05</i>
I.2.3 <i>Avantages et défis de la technologie photovoltaïque.....</i>	<i>20</i>
<i>Notes complémentaires</i>	<i>21</i>
I.3 Fondamentaux de la conversion de l'énergie solaire	21
I.3.1 <i>Rendement des cellules photovoltaïques.....</i>	<i>21</i>
I.3.2 <i>Rendement des différents types de cellules</i>	<i>22</i>
I.3.3 <i>Facteurs affectant le rendement.....</i>	<i>23</i>
I.3.4 <i>Facteurs influençant la production d'énergie</i>	<i>23</i>
I.3.5 <i>Optimisation de la production d'énergie</i>	<i>25</i>
I.4 Caractéristiques des véhicules électriques et besoins en recharge	26
I.4.1 <i>Types de batteries utilisées dans les VE</i>	<i>26</i>
I.4.2 <i>Puissance et temps de recharge requis pour différents types de VE.....</i>	<i>28</i>
I.4.3 <i>Synergie entre les systèmes PV et les besoins en recharge des VE.....</i>	<i>30</i>
I.5 Synergie entre les systèmes PV et les stations de recharge des VE	31
I.5.1 <i>Avantages de l'intégration des systèmes PV dans les stations de recharge.....</i>	<i>32</i>
I.5.2 <i>Réduction de la dépendance aux réseaux électriques traditionnels.....</i>	<i>34</i>
I.5.3 <i>Exemples concrets d'intégration des systèmes PV dans les stations de recharge</i>	<i>35</i>
I.6 Conclusion	36
II Chapitre II : Dimensionnement d'une station solaire de recharge	37
II.1 introduction.....	37

II.2	Analyse des besoins énergétiques d'un véhicule électrique	37
II.2.1	Capacité des batteries et autonomie.....	38
II.2.2	Consommation énergétique.....	38
II.2.3	Fréquence et modes de recharge.....	38
II.2.4	Impact sur la conception des infrastructures.....	38
II.2.5	Méthodes pour calculer la consommation énergétique des VE	39
II.2.6	Facteurs influençant la demande énergétique	39
II.3	Choix et dimensionnement des composants	40
II.3.1	Générateurs photovoltaïques (PV).....	40
II.3.2	Sélection des onduleurs et des composants électroniques de puissance	41
II.3.3	Régulateurs de charge	43
II.3.4	Paramètres d'un Panneau Photovoltaïque.....	44
II.3.5	Hacheur boost (Convertisseur DC-DC)	45
II.3.6	Bancs de batteries stationnaires.....	45
II.3.7	Infrastructure de recharge.....	45
II.4	Systèmes de stockage d'énergie (batteries)	46
II.4.1	Rôle des batteries dans les stations de recharge PV.....	46
II.4.2	Technologies de batteries adaptées aux VE (lithium-ion, etc.).....	47
II.5	Normes et considérations réglementaires	50
II.5.1	Normes internationales et locales pour les systèmes pv et les stations de recharge	51
II.5.2	Aspects de sécurité et de conformité.....	52
II.5.3	Schéma global du système proposé	54
II.5.4	Scénario réel d'une station de recharge dans une université	54
II.6	Conclusion	55
III	Chapitre III : Modélisation et Simulation de la Station de Recharge PV	56
III.1	introduction	56
III.2	Modèle mathématique des panneaux solaires pour la recharge des VE	56
III.2.1	Modélisation des panneaux solaires.....	57
III.2.2	Modélisation des batteries	57
III.2.3	Modélisation des convertisseurs dc-dc et onduleurs.....	58
III.2.4	Modélisation des systèmes de gestion de l'énergie (EMS).....	59
III.2.5	Intégration des données météorologiques locales.....	59

III.3	Etude de cas et analyse des performances	60
III.3.1	<i>Résultats de simulation</i>	60
III.4	Analyse des résultats	64
III.4.1	<i>Performance du système sous conditions réelles</i>	64
III.4.2	<i>Impact des algorithmes d'optimisation</i>	65
III.4.3	<i>Analyse de l'état de charge (SOC) et de décharge (SOD)</i>	65
III.4.4	<i>Comparaison du comportement d'un système MPPT basé sur un réseau de neurones (ANN) avec les méthodes traditionnelles en cas de faible irradiation solaire</i>	65
III.4.5	Méthodes traditionnelles (P&O, INC, etc.).....	65
III.4.6	<i>Défis et limitations</i>	67
III.5	Implications environnementales et perspectives	67
III.6	Conclusion	68
2	Conclusion et Perspectives	69
2.1	Synthèse finale	70

List des tableaux

Tableau I.1 Types de panneaux solaires selon le matériau	06
Tableau I.2 Critères de Choix d'un Onduleur	09
Tableau I.3 Types de Trackers	12
Tableau I.4 Avantages et Inconvénients des Trackers	12
Tableau I.5 Comparative des Technologies	14
Tableau I.6 Facteurs influençant la production d'énergie solaire	16
Tableau I.7 Avantages et Défis de la Technologie Photovoltaïque	17
Tableau I.8 tableau comparatif des différents types de cellules photovoltaïques	19
Tableau I.9 Efficacité des panneaux solaires par type	20
Tableau I.10 Comparaison des niveaux de recharge pour VE	27
Tableau : II 11 données de l'array pv.....	44
Tableau : II 12 paramètres du modèle.....	45
Tableau II.13 Synthèse des composants clés.....	46
Tableau II.14 Types et normes des connecteurs de charge[16].....	51
Tableau II.15 Normes et réglementations pour les systèmes PV et les bornes de recharge.....	53
Tableau : II.16 Résumé de l'Étude de Faisabilité Économique.....	54
Tableau III.17 Résultats de simulation du système PV.....	63
Tableau III.18 Algorithmes utilisés dans la thèse.....	67

List des figures

Figure I-1 l'énergie solaire, éolienne.....	03
Figure I-2 Conversion de l'énergie solaire en électricité.....	04
Figure I-3 Composants Unis pour l'Énergie Solaire	05
Figure :I.4 Schéma du système de recharge de véhicules électriques basé sur le PV[16].....	09
Figure I-5 Borne de recharge de VE à énergie solaire	29
Figure II-1 Convertisseur solaire DC → DC.....	42
Figure II-2 Circuit du hacheur BOOST [54].....	44
Figure II-3 Équipement de recharge pour véhicules électriques [16].....	47
Figure II-4 Lithium Ion Batteries.....	48
Figure II-5 Batterie Nickel Métal	49
Figure II-6 batterie au plomb.....	49
Figure II-7 Batterie à État Solide.....	50
Figure II-8 Batterie Lithium Fer Phosphate NX LiFePO4.....	50
Figure II-9 Sécurité et Conformité dans les Systèmes de Recharge et PV	53
Figure II-10 schéma global du system proposé.....	54
Figure III-1 Modélisation des Systèmes PV pour la Recharge des VE	56
Figure III-2 Données réelles d'irradiance à Oued Souf pour le mois d'août 2024 (provenant du site de données de la NASA).....	60
Figure III-3 Puissance de Charge de la Batterie du VE	61
Figure III-4 Courant de Charge de la Batterie du VE	62
Figure III-5 la tension de charge de la batterie fournie au véhicule électrique (EV).....	62
Figure III-6 SOC et SOD de la batterie du véhicule électrique.....	63

Liste des abréviations et symboles

- **PV** : Photovoltaïque (système de conversion de l'énergie solaire en électricité).
- **VE** : Véhicule Électrique (véhicule propulsé par un moteur électrique).
- **CO₂** : Dioxyde de carbone (gaz à effet de serre).
- **MPPT** : Maximum Power Point Tracking (suivi du point de puissance maximale).
- **ANN** : Artificial Neural Network (réseau de neurones artificiels).
- **FOPI** : Fractional-Order Proportional-Integral (contrôleur proportionnel-intégral d'ordre fractionnaire).
- **PSO** : Particle Swarm Optimization (optimisation par essaim de particules).
- **GWO** : Grey Wolf Optimization (optimisation par meute de loups).
- **EMS** : Energy Management System (système de gestion de l'énergie).
- **DC** : Direct Current (courant continu).
- **AC** : Alternating Current (courant alternatif).
- **SOC** : State of Charge (état de charge des batteries).
- **SOD** : State of Discharge (état de décharge des batteries).
- **Li-ion** : Lithium-ion (type de batterie couramment utilisé dans les VE).
- **NiMH** : Nickel-Métal Hydrure (type de batterie).
- **OCPP** : Open Charge Point Protocol (protocole ouvert pour les bornes de recharge).
- **IOT** : Internet of Things (Internet des objets).
- **V2g** : Vehicle-to-Grid (technologie permettant aux VE de restituer de l'énergie au réseau).
- **IEC** : International Electrotechnique Commission (Commission électrotechnique internationale).
- **Nf** : Norme Française (normes techniques françaises).
- **NASA** : National Aeronautics and Space Administration (agence spatiale américaine).
- **W/m²** : Watt par mètre carré (unité de mesure de l'irradiance solaire).

- **Kwh** : Kilowattheure (unité d'énergie).
- **Kw** : Kilowatt (unité de puissance).
- **Ah** : Ampère-heure (unité de capacité des batteries).
- **STC** : Standard Test Conditions (conditions standard de test pour les panneaux solaires).
- **AFCI** : Arc Fault Circuit Interrupter (dispositif de détection de défauts d'arc).
- **EV** : Electric Vehicle (véhicule électrique, synonyme de VE).

Symboles

- **H** : Rendement (efficacité énergétique).
- **Voc** : Tension en circuit ouvert (Open Circuit Voltage).
- **Isc** : Courant de court-circuit (Short Circuit Current).
- **Pmax** : Puissance maximale (Maximum Power).
- **G** : Irradiance solaire (W/m²).
- **T** : Température (°C ou K).
- **SOC** : État de charge (State of Charge, en %).
- **SOD** : État de décharge (State of Discharge, en %).
- **D** : Rapport cyclique (Duty Cycle).
- **Ω** : Fréquence angulaire (rad/s).

Introduction générale

Introduction générale

L'importance Photovoltaïques pour les Stations de Recharge

- . Énergie propre et gratuite : réduit la pollution et protège l'environnement.
- Économie d'argent : moins de dépenses en électricité sur le long terme.
- Indépendance du réseau : la station peut fonctionner même sans réseau électrique.
- Réduction de la charge sur le réseau : moins de pression sur l'électricité publique, surtout aux heures de pointe.
- Bonne image écologique : valorise la station auprès des clients sensibles à l'environnement.
- Stockage d'énergie possible : l'énergie solaire peut être stockée pour une utilisation la nuit ou par mauvais

Pourquoi l'énergie solaire est importante pour les véhicules électriques ?

1. Recharge écologique : l'énergie solaire permet de recharger les VE sans polluer (zéro émission de CO₂).
2. Réduction des coûts de recharge : moins cher que l'électricité du réseau, surtout à long terme.
3. Autonomie énergétique : possibilité de recharger même dans des zones isolées ou sans réseau.
4. Moins de pression sur le réseau électrique : moins de surcharge grâce à une production d'énergie locale.
5. Utilisation intelligente de l'énergie solaire : pendant la journée, les VE peuvent se recharger pendant que le soleil brille.
6. Soutien à la transition énergétique : accélère le passage vers une mobilité propre et durable.

1.1 Objectifs de la recherche

1.1.1 Concevoir un système photovoltaïque (PV) optimisé pour la recharge des VE

L'un des objectifs principaux de cette recherche est de concevoir un système photovoltaïque (PV) spécialement adapté pour répondre aux besoins de recharge des véhicules électriques (VE).

Introduction Générale

Ce système doit être capable de maximiser la production d'énergie solaire tout en répondant aux exigences spécifiques des VE en termes de puissance et de temps de recharge. Pour atteindre cet objectif, plusieurs aspects seront pris en compte

- Dimensionnement du système PV
- Intégration des composants électroniques
- Optimisation des performances

Présentation des Chapitres et de Leur Contenu

Cette thèse est structurée de manière à guider le lecteur à travers les différentes étapes de la recherche, depuis les fondements théoriques jusqu'aux résultats de simulation et aux recommandations.

Voici une présentation détaillée des chapitres et de leur contenu, en tenant compte du fait que notre travail repose principalement sur des simulations MATLAB et qu'il n'y a pas de validation expérimentale :

➤ Introduction

Objectif : Introduire le sujet de la thèse, expliquer le contexte des véhicules électriques (VE) et des énergies renouvelables, et justifier l'importance de la recherche

➤ Chapitre 1 : État de l'art

Objectif : Fournir une base théorique sur les systèmes photovoltaïques (PV) et les véhicules électriques, ainsi que sur leur synergie.

➤ Chapitre 2 : Dimensionnement d'une station solaire de recharge

Objectif : Présenter les aspects techniques de la conception d'une station de recharge PV pour VE, en tenant compte des besoins énergétiques et des contraintes locales.

➤ Chapitre 3 : Simulation et Modélisation de la Station de Recharge PV

Objectif : Décrire les outils et méthodes utilisés pour simuler et modéliser le système PV, ainsi que les résultats obtenus.

➤ Conclusion et Perspectives

Objectif : Résumer les principaux résultats de la recherche, discuter des implications pratiques et proposer des pistes pour de futures recherches

Chapitre I :

État de l'art

sur les station de recharge photovoltaïque

I Chapitre I: État de l'art sur les station de charge photovoltaïque

I.1 Introduction

Le chapitre 1 se consacre à l'état de l'art des systèmes photovoltaïques (PV) et de leur intégration dans les infrastructures de recharge pour véhicules électriques (VE). Il aborde les principes fondamentaux de la conversion de l'énergie solaire en électricité, en mettant en lumière les technologies clés telles que les panneaux solaires, les onduleurs et les systèmes de stockage d'énergie. Ce chapitre explore également les caractéristiques des VE, notamment les types de batteries utilisées et leurs besoins en recharge, ainsi que la synergie entre les systèmes PV et les stations de recharge. Enfin, il examine les avantages et les défis de cette intégration, offrant ainsi une base théorique solide pour les chapitres suivants, qui traiteront du dimensionnement et de la modélisation des stations de recharge PV.

I.2 Aperçu de la technologie photovoltaïque

La technologie photovoltaïque (PV) est l'une des méthodes les plus prometteuses pour exploiter l'énergie solaire et la convertir en électricité [18]. Ce processus repose sur des principes physiques et des composants technologiques spécifiques qui permettent de transformer la lumière du soleil en une source d'énergie propre et renouvelable. Dans cette section, nous explorerons les principes de base de la conversion de l'énergie solaire en électricité, ainsi que les composants essentiels d'un système PV [19].



Figure :I.1 l'énergie solaire, éolienne

I.2.1 Principes de base de la conversion de l'énergie solaire en électricité

La conversion de l'énergie solaire en électricité repose sur l'**effet photovoltaïque**, un phénomène physique découvert au XIXe siècle et exploité depuis les années 1950 pour produire de l'électricité [20].

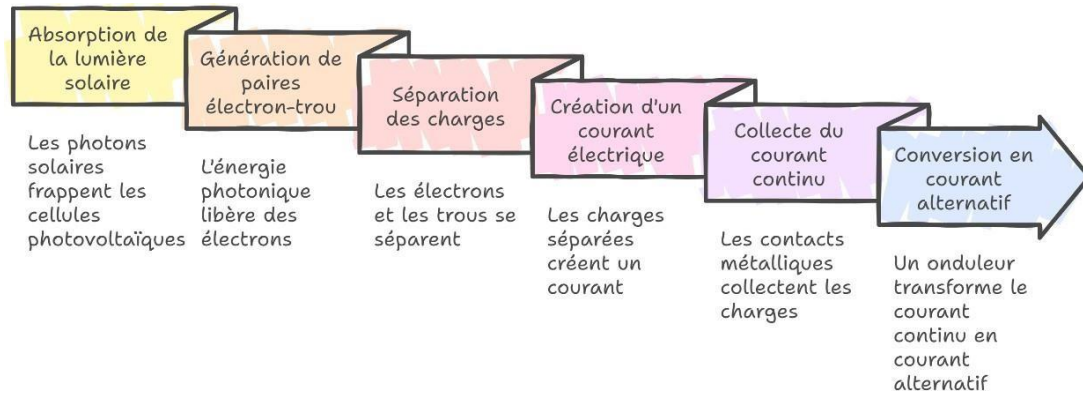


Figure 0.2 Conversion de l'énergie solaire en électricité

Voici les étapes clés de ce processus [21]:

➤ **Absorption de la lumière solaire :**

Les panneaux solaires sont constitués de cellules photovoltaïques, généralement fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Lorsque les photons (particules de lumière) provenant du soleil frappent la surface des cellules, ils transfèrent leur énergie aux électrons du matériau semi-conducteur.

➤ **Génération de paires électron-trou :**

L'énergie des photons permet aux électrons de se libérer de leurs atomes, créant ainsi des paires électron-trou. Ces électrons libres et les trous (absence d'électrons) sont les porteurs de charge qui génèrent le courant électrique.

➤ **Séparation des charges et création d'un courant électrique :**

Grâce à la structure des cellules photovoltaïques, qui comprend une jonction PN (positif-négatif), les électrons et les trous sont séparés. Les électrons sont attirés vers la couche négative (N), tandis que les trous migrent vers la couche positive (P). Cette séparation crée un champ électrique interne, qui génère une tension électrique.

➤ Collecte du courant électrique :

Des contacts métalliques situés sur les faces avant et arrière de la cellule collectent les électrons et les trous, permettant ainsi de générer un courant électrique continu (DC).

➤ Conversion en courant alternatif (AC) :

L'électricité produite par les panneaux solaires est en courant continu (DC). Pour être utilisée dans les réseaux électriques ou les appareils domestiques, elle doit être convertie en courant alternatif (AC) à l'aide d'un onduleur

I.2.2 Composants d'un système PV : panneaux solaires, onduleurs, etc.

Un système photovoltaïque est composé de plusieurs éléments clés qui travaillent ensemble pour convertir l'énergie solaire en électricité utilisable.

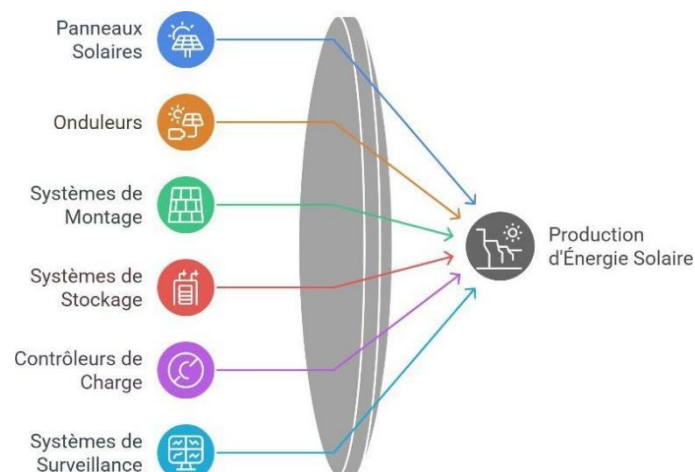


Figure 0-3 Composants Unis pour l'Énergie Solaire

Voici une description détaillée des principaux composants [22]:

➤ Panneaux Solaires (Modules Photovoltaïques) : Structure et Composition

Les panneaux solaires, aussi appelés modules photovoltaïques (PV), sont le cœur d'un système de production d'énergie solaire. Ils captent la lumière du soleil et la convertissent en électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

A. Composition d'un panneau solaire

Un module photovoltaïque est constitué des éléments suivants :

Chapitre I : État de l'art sur les station de charge photovoltaïque

- **Cellules photovoltaïques** : Ce sont les composants électroniques qui génèrent de l'électricité sous l'effet de la lumière. Elles sont fabriquées principalement à base de silicium (un matériau semi-conducteur).
- **Interconnexion des cellules** : Les cellules sont reliées entre elles en série ou en parallèle pour former un circuit électrique.
- **Encapsulation** : Les cellules sont protégées par une couche de **EVA (Éthylène-Acétate de Vinyle)**, un matériau polymère qui assure l'étanchéité et la durabilité.
- **Revêtement avant (verre trempé)** : Une plaque de verre solaire (généralement anti-reflet) protège les cellules des intempéries (pluie, grêle, poussière).
- **Cadre (généralement en aluminium)** : Il rigidifie le panneau et facilite son installation.
- **Boîtier de jonction (Junction Box)** : Situé à l'arrière, il contient les diodes by-pass (pour éviter les pertes en cas d'ombrage) et les câbles de sortie.

B. Types de panneaux solaires selon le matériau

Les panneaux photovoltaïques sont classés selon le type de silicium utilisé :

Tableau I.1 Types de panneaux solaires selon le matériau

Type de panneau	Silicium monocristallin	Silicium polycristallin	Silicium amorphe (couche mince)
Efficacité	18% - 22%	15% - 18%	6% - 10%
Apparence	Noir uniforme	Bleu avec reflets cristallins	Gris foncé ou noir mat
Coût	Plus cher	Moins cher	Le moins cher
Performances	Meilleures en faible lumière	Bon rendement en plein soleil	Moins sensible à la chaleur
Utilisation typique	Toits résidentiels, espaces limités	Installations commerciales	Grandes surfaces, intégration architecturale

- **Panneaux monocristallins (mono-Si)** : Fabriqués à partir d'un seul cristal de silicium, ils offrent le meilleur rendement et une longue durée de vie (25-30 ans).
- **Panneaux polycristallins (poly-Si)** : Constitués de plusieurs cristaux de silicium, ils sont moins chers mais légèrement moins performants.

Chapitre I : État de l'art sur les station de charge photovoltaïque

- **Panneaux à couche mince (amorphes ou autres technologies)** : Flexibles et légers, ils sont moins efficaces mais utiles pour des applications spécifiques (bâtiments courbés, véhicules solaires).

C. Puissance et Mesure (Watt-crête - Wc)

- La puissance d'un panneau est exprimée en **watts-crête (Wc)**, qui correspond à la puissance maximale qu'il peut fournir dans des **conditions standard de test (STC)** :
 - **Ensoleillement** : 1000 W/m²
 - **Température** : 25°C
 - **Spectre lumineux** : AM 1,5 (simulant la lumière du soleil à midi).
- Exemple : Un panneau de **400 Wc** produira environ **400 Wh** par heure dans des conditions optimales.

D. Facteurs influençant la production

- **Ensoleillement** : Plus l'ensoleillement est intense, plus la production est élevée.
- **Orientation et inclinaison** : En Europe, une orientation sud avec une inclinaison de 30° est idéale.
- **Température** : Les panneaux perdent en efficacité quand ils chauffent (environ -0,4% par °C au-dessus de 25°C).
- **Ombrage** : Même une petite zone ombragée peut réduire considérablement la production.

E. Applications des panneaux solaires

- **Résidentiel** : Toits solaires, autoconsommation.
- **Commercial/Industriel** : Centrales solaires, ombrières de parking.
- **Mobile** : Camping-cars, bateaux, chargeurs solaires portables.
- **Intégration architecturale** : Vitres photovoltaïques, tuiles solaires.

F. Évolution technologique

- **Panneaux PERC (Passivated Emitter Rear Cell)** : Une couche supplémentaire améliore l'efficacité.
- **Panneaux bifaciaux** : Ils captent la lumière des deux côtés (réflexion sur le sol).

Chapitre I : État de l'art sur les station de charge photovoltaïque

- **Hétérojonction (HJT)** : Combine couches minces et silicium cristallin pour un meilleur rendement.

✚ Les panneaux solaires sont des systèmes complexes et performants, dont le choix dépend du budget, de l'espace disponible et des besoins énergétiques. Les technologies évoluent rapidement, avec des rendements en hausse et des coûts en baisse, renforçant leur attractivité pour la transition énergétique.

➤ **Onduleurs : fonctionnement, types et rôle dans un système photovoltaïque**

✚ Les onduleurs sont des composants clés des installations solaires, assurant la conversion du courant continu (DC) en courant alternatif (AC) utilisable par les appareils électriques. Voici une analyse détaillée de leur fonctionnement, des différents types disponibles et de leurs caractéristiques techniques.

A. fonctionnement d'un onduleur

- **Rôle principal**
 - Convertir le **courant continu (DC)** généré par les panneaux solaires en **courant alternatif (AC)** (230V / 50Hz en Europe).
 - Optimiser la production d'énergie via le **MPPT (Maximum Power Point Tracking)** pour extraire le maximum de puissance des panneaux.
 - Assurer la **synchronisation avec le réseau électrique** (pour les systèmes connectés au réseau).
 - Protéger le système contre les surtensions, les courts-circuits et les défauts d'isolement.
- **Processus de conversion DC → AC**
- **Entrée DC** : Le courant continu arrive depuis les panneaux solaires.
- **MPPT** : L'onduleur ajuste en permanence la tension et le courant pour maximiser la production.
- **Conversion électronique** : Un circuit à transistors (IGBT) transforme le DC en AC.
- **Filtrage** : Suppression des harmoniques pour produire un signal sinusoïdal propre.

Chapitre I : État de l'art sur les station de charge photovoltaïque

- **Sortie AC** : Injection dans le réseau domestique ou le système de stockage.

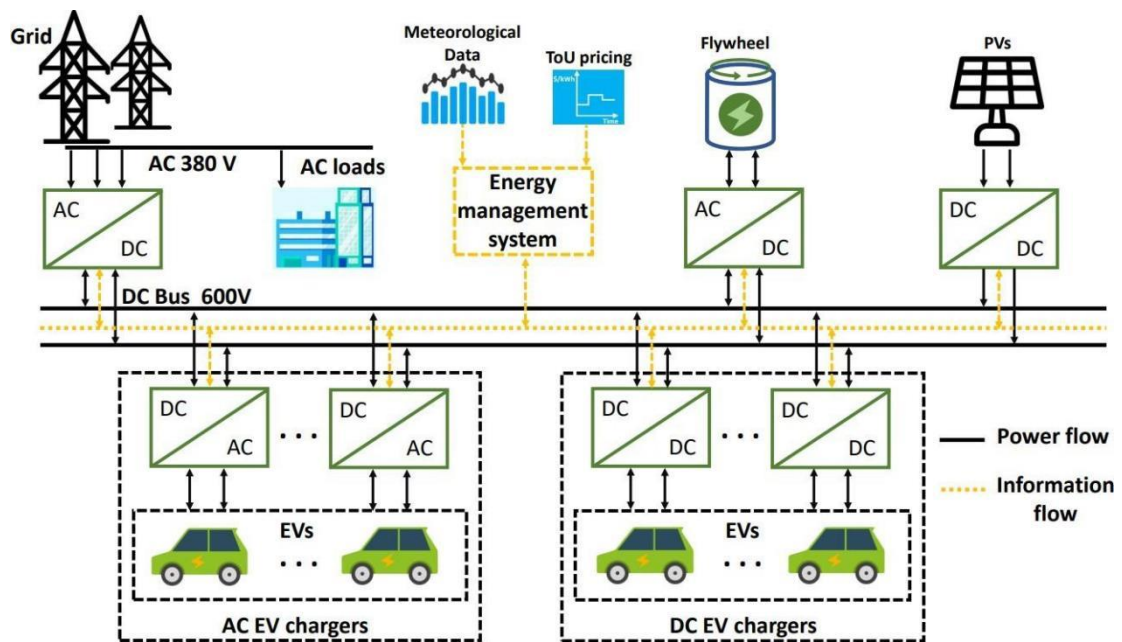


Figure :I.4 Schéma du système de recharge de véhicules électriques basé sur le PV[16]

B. Types d'onduleurs

Il existe trois principaux types d'onduleurs adaptés à différents besoins : les **onduleurs centraux**, utilisés dans les installations de taille moyenne à grande, où un seul onduleur gère plusieurs panneaux connectés en série ; les **micro-onduleurs**, installés derrière chaque panneau, idéals pour les petites toitures ou les zones ombragées ; et les **onduleurs hybrides**, qui permettent à la fois la connexion au réseau et le stockage de l'énergie dans des batteries, tout en assurant une alimentation de secours en cas de coupure.

C. Optimiseurs de puissance (Power Optimizers)

- **Alternative aux micro-onduleurs**, utilisés avec des onduleurs centraux.
- **Fonction** : Optimisation individuelle de chaque panneau, mais la conversion DC/AC reste centralisée.
- **Exemple** : SolarEdge (combinaison optimiseurs + onduleur).

Tableau I.2 Critères de Choix d'un Onduleur

Critère	Onduleur Central	Micro-Onduleurs	Onduleur Hybride
Coût	Économique	Plus cher	Élevé

Chapitre I : État de l'art sur les station de charge photovoltaïque

Efficacité	95-98%	94-97%	93-96%
Durée de vie	10-15 ans	8-12 ans	10-15 ans
Adaptabilité ombrage	Faible	Excellente	Moyenne
Stockage batterie	Non	Non	Oui
Maintenance	Simple	Complexe	Modérée

D. Innovations et tendances

- **Onduleurs intelligents :**

Chapitre I : État de l'art sur les station de charge photovoltaïque

- Communication avec les réseaux smart grids.
- Gestion dynamique de l'énergie (ajustement en fonction de la demande).
- **Onduleurs bidirectionnels** : Permettent la recharge de véhicules électriques (V2G).
- **Augmentation de la tension** : Passage à des systèmes 1500V (pour les grandes centrales).

E. Maintenance et dépannage

- **Surveillance** : La plupart des onduleurs modernes disposent d'une connexion WiFi/Bluetooth pour un suivi en temps réel.
- **Problèmes courants** :
 - **Défaut d'isolement** (erreur due à l'humidité).
 - **Surchauffe** (réduction de puissance en cas de température élevée).
 - **Panne du ventilateur** (fréquent après 5-7 ans).

✚ Le choix d'un onduleur dépend de la taille de l'installation, du budget, et des besoins en stockage ou résilience électrique. Les **micro-onduleurs** sont idéaux pour les toits complexes, les **onduleurs centraux** pour les grandes installations, et les **hybrides** pour l'autoconsommation avec batterie.

➤ Systèmes de montage et de suivi solaire : détails techniques et fonctionnement

Les systèmes de montage et de suivi jouent un rôle crucial dans l'efficacité et la durabilité d'une installation photovoltaïque. Voici une analyse approfondie de leurs caractéristiques, types, avantages et critères de sélection.

A. Systèmes de montage : fixation des panneaux solaires

○ Types de structures de montage

Les systèmes de montage photovoltaïque varient selon le type de toiture (inclinée, plate), le sol ou l'intégration architecturale, et sont choisis en fonction des contraintes techniques telles que la charge au vent, la compatibilité des matériaux et la résistance à la corrosion.

B. Systèmes de suivi solaire (trackers)

❖ Principe et avantages

Chapitre I : État de l'art sur les station de charge photovoltaïque

- **Objectif** : Suivre la trajectoire du soleil pour augmenter la production (jusqu'à +30 % vs systèmes fixes).
- **Technologie** : Moteurs et capteurs ajustent l'inclinaison des panneaux en temps réel.

Tableau I.3 Types de Trackers

Type	Axe unique	Axe double
Mouvement	Suit le soleil d'Est en Ouest	Ajoute un ajustement vertical
Gain énergétique	+15-25%	+25-35%
Coût	Moyen	Élevé
Utilisation	Grandes centrales au sol	Zones à fort ensoleillement

❖ Trackers à axe unique

- **Rotation horizontale** : Optimisé pour les latitudes moyennes.
- **Exemples** : NEXTracker, Array Technologies.

❖ Trackers à double axe

- **Précision maximale** : Adapté aux déserts ou applications spatiales.
- **Exemples** : Soltec, SunPower.

❖ Trackers passifs

- **Sans moteur** : Utilisent un gaz thermique pour l'ajustement (moins précis mais économique).

Tableau I.4 Avantages et Inconvénients des Trackers

Avantages	Inconvénients
Production accrue	Coût initial élevé
Meilleur ROI sur grands projets	Maintenance complexe
Réduction du besoin en espace	Sensibilité aux vents forts

C. Innovations et tendances

- **Trackers intelligents** :

Chapitre I : État de l'art sur les station de charge photovoltaïque

- Algorithmes IA pour prédire la météo et optimiser l'angle.
- Couplage avec drones pour l'inspection.
- **Montages flottants** : Pour les lacs et réservoirs (économie d'espace, réduction de l'évaporation).
- **Matériaux composites** : Structures plus légères et résistantes.

D. Installation et maintenance

- **Montage** :
 - **Étapes clés** : Étude statique, ancrage étanche, alignement précis.
 - **Outils** : Niveau laser, visseuses à couple contrôlé.
- **Trackers** :
 - **Maintenance** : Lubrification des articulations, vérification des capteurs.
 - **Pannes courantes** : Défaillance des moteurs, erreurs de calibration.
- **Systèmes de stockage d'énergie (batteries) : technologies, fonctionnement et comparaison**

Les batteries jouent un rôle clé dans l'autonomie énergétique des installations solaires en stockant l'excédent de production pour une utilisation différée. Voici une analyse détaillée des technologies, critères de choix et tendances du marché.

1) Rôle des batteries dans un système solaire

- **Fonction principale** :
 - Stocker l'électricité excédentaire des panneaux solaires.
 - Restituer l'énergie lors des pics de consommation ou en l'absence de soleil (nuit, mauvais temps).

2) Technologies de batteries solaires

- **Batteries au plomb-acide :**

Technologie ancienne et fiable (plomb + acide sulfurique).

Types : batteries ouvertes (à électrolyte liquide) ou scellées (AGM/Gel, sans entretien).

Utilisation typique : installations hors-réseau, projets à budget limité.

- **Batteries lithium-ion (Li-ion) :**

Technologie dominante (90 % du marché résidentiel en 2024).

Variantes : LFP (LiFePO₄, plus sûre), NMC (plus grande densité énergétique).

Utilisation typique : autoconsommation résidentielle, centrales solaires commerciales.

- **Batteries à flux (Redox Flow) :**

Stockage via des électrolytes liquides circulant entre deux réservoirs.

Technologie émergente pour le stockage à grande échelle.

Utilisation typique : projets industriels et réseaux électriques.

Tableau I.5 Comparative des Technologies

Critère	Plomb-Acide	Lithium-Ion	À Flux
Coût (€/kWh)	200–500	500–1 000	800–1 500
Durée de vie (cycles)	500–1 200	4 000–6 000	10 000+
Efficacité	70–80%	95–98%	75–85%
Maintenance	Élevée (liquide)	Faible	Modérée
Poids/Encombrement	Lourd	Léger	Très encombrant

3) Critères de choix d'une batterie solaire

- **Capacité (kWh)** : Dépend de la consommation journalière et de l'autonomie souhaitée.
- **Profondeur de décharge (DoD)** : Les Li-ion tolèrent 80–90% vs 50% pour le plomb.
- **Compatibilité** :
 - Tension (12V/24V/48V pour les systèmes hors-réseau).
 - Communication avec l'onduleur (ex. : protocole CAN bus pour SMA).
- **Garantie** :
 - Lithium : 10 ans (70% de capacité résiduelle).
 - Plomb : 2–5 ans.

4) Innovations et tendances

- **Batteries Sodium-Ion** : Alternative écologique et économique au lithium (ex. : Tiamat).
- **Solid-state batteries** : Sécurité accrue, densité énergétique améliorée (en développement).
- **Recyclage** :
 - Taux de recyclage du lithium ~50% (vs 95% pour le plomb).
 - Projets européens (ex. : Northvolt).

5) Installation et maintenance

- **Sécurité** :
 - Local ventilé (risque de dégagement d'hydrogène pour le plomb).

Chapitre I : État de l'art sur les station de charge photovoltaïque

- Protection contre les courts-circuits (disjoncteurs DC).
- **Optimisation :**
 - Éviter les décharges profondes pour les plomb-acide.
 - Maintenir une température stable (15–25°C idéal pour le Li-ion).
- **Contrôleurs de charge :**
 - Les contrôleurs de charge régulent le flux d'énergie entre les panneaux solaires, les batteries et les charges. Ils protègent les batteries contre les surcharges et les décharges profondes, prolongeant ainsi leur durée de vie.
- **Compteurs et systèmes de surveillance :**
 - Les compteurs mesurent la quantité d'électricité produite par le système PV et, dans certains cas, la quantité injectée dans le réseau électrique.
 - Les systèmes de surveillance permettent de suivre en temps réel les performances du système, d'identifier les problèmes et d'optimiser la production d'énergie.
- **Câblage et connecteurs :**
 - Le câblage et les connecteurs assurent la connexion électrique entre les différents composants du système. Ils doivent être de haute qualité pour minimiser les pertes d'énergie et garantir la sécurité.

Tableau I.6 Facteurs influençant la production d'énergie solaire

Facteur	Impact sur la production d'énergie	Stratégies d'atténuation
Irradiance (Ensoleillement)	Une irradiance plus élevée augmente la production d'énergie	Optimiser l'orientation et l'inclinaison des panneaux, utiliser des trackers solaires
Température	Des températures élevées réduisent l'efficacité (0,4-0,5 % de perte par °C au-dessus de 25°C)	Utiliser des systèmes de refroidissement, choisir des panneaux à faible coefficient de température

Chapitre I : État de l’art sur les station de charge photovoltaïque

Ombrage	Un ombrage partiel peut réduire considérablement la production	Utiliser des diodes bypass, des micro-onduleurs, ou optimiser le placement des panneaux
Orientation/Inclinaison	Une orientation optimale (sud dans l'hémisphère nord) maximise la capture d'énergie	Ajuster l'angle d'inclinaison en fonction de la latitude, utiliser des systèmes de suivi
Dégradation des panneaux	L'efficacité diminue avec le temps (0,5-1 % par an)	Entretien régulier, utiliser des panneaux de haute qualité avec des garanties de performance

I.2.3 Avantages et défis de la technologie photovoltaïque

Voici un tableau synthétisant les avantages et défis des systèmes photovoltaïques (PV) : [23]
[24]

Tableau I.7 Avantages et Défis de la Technologie Photovoltaïque

Catégorie	Points Clés	Détails/Explications
Avantages		
Énergie propre et renouvelable	Pas d’émissions de gaz à effet de serre ni de polluants atmosphériques.	Contribue à la lutte contre le changement climatique.
Réduction des coûts	Baisse significative des prix des panneaux solaires.	Coût divisé par 10 depuis 2000 (environ 0,20 €/Wc en 2024).
Autonomie énergétique	Production locale d’électricité, réduisant la dépendance au réseau.	Idéal pour les zones isolées ou en autoconsommation.
Défis		
Variabilité de la production	Dépendance à l’ensoleillement (météo, saisons).	Nécessite des solutions de stockage (batteries) ou un raccordement au réseau.

Coûts initiaux élevés	Investissement de départ important malgré la baisse des prix.	Coût moyen d'une installation résidentielle : 8 000–20 000 € (selon la puissance).
Efficacité limitée	Rendement des panneaux entre 15% et 22%.	Une partie de l'énergie solaire n'est pas convertie en électricité.

Notes complémentaires :

- **Avantages :**
 - **Évolutivité :** Les systèmes PV peuvent être étendus progressivement.
 - **Maintenance faible :** Peu de pièces mobiles, durée de vie > 25 ans.
- **Défis :**
 - **Recyclage :** Gestion en fin de vie des panneaux (taux de recyclage ~95% pour le silicium).
 - **Espace requis :** Environ 15–20 m² pour 3 kWc (résidentiel).

I.3 Fondamentaux de la conversion de l'énergie solaire

La conversion de l'énergie solaire en électricité est un processus complexe qui dépend de plusieurs facteurs physiques et environnementaux. Pour comprendre comment les systèmes photovoltaïques (PV) fonctionnent et comment ils peuvent être optimisés, il est essentiel de maîtriser les fondamentaux de cette conversion [25]. Dans cette section, nous aborderons deux aspects clés : le **rendement des cellules photovoltaïques** et les **facteurs influençant la production d'énergie**, tels que l'irradiance, la température et l'ombrage.

I.3.1 Rendement des cellules photovoltaïques

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est une mesure de sa capacité à convertir l'énergie solaire en électricité. Il est défini comme le rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie solaire incidente sur la cellule. Le rendement est exprimé en pourcentage et varie en fonction du type de cellule et des conditions d'exploitation [26].

➤ Définition du rendement :

Le rendement (η) d'une cellule photovoltaïque est donné par la formule suivante [27]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{E_{incidente}} \times 100 \quad (1)$$

où P_{max} est la puissance maximale produite par la cellule et $E_{incidente}$ est l'énergie solaire incidente.

I.3.2 Rendement des différents types de cellules :

Tableau I.8 tableau comparatif des différents types de cellules photovoltaïques

Type de cellule	Rendement (%)	Matériaux principaux	Avantages	Inconvénients	Statut commercial
Silicium Monocristallin [28]	18-22	Silicium pur (monocristallin)	Haut rendement, longue durée de vie	Coût élevé, sensible aux ombres	Commercialisé
Silicium Polycristallin [29]	15-18	Silicium multicristaux	Coût réduit, bon rendement	Rendement inférieur au monocristallin	Commercialisé
Couche Mince (Thin-Film) [30]	10-12	CdTe, a-Si, CIGS	Léger, flexible, faible coût de production	Faible rendement, durée de vie plus courte	Commercialisé
Haut Rendement (Tandem/Pérovskite) [31]	>30	Pérovskite, Silicium tandem	Très haut rendement potentiel	En développement, stabilité à améliorer	Phase R&D/commercialisation

- **Rendement** : Pourcentage de conversion de la lumière en électricité
- **Statut Commercial** : Niveau de maturité technologique
- **CdTe** : Tellurure de cadmium
- **a-Si** : Silicium amorphe
- **CIGS** : Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium

I.3.3 Facteurs affectant le rendement [32]:

- **Pertes optiques** : Une partie de la lumière solaire est réfléchiée par la surface de la cellule ou n'est pas absorbée par le matériau semi-conducteur.
- **Pertes électriques** : Les résistances internes de la cellule et les connexions électriques entraînent des pertes d'énergie sous forme de chaleur.
- **Recombinaison des porteurs de charge** : Les électrons et les trous peuvent se recombiner avant d'être collectés, réduisant ainsi le courant généré.

Tableau I.9 Efficacité des panneaux solaires par type

Type de panneau solaire	Plage d'efficacité (%)	Avantages	Inconvénients
Silicium monocristallin	18 - 22	Haute efficacité, longue durée de vie	Coût plus élevé
Silicium polycristallin	15 - 18	Coût inférieur, bonne efficacité	Efficacité légèrement inférieure à celle du monocristallin
Couche mince (CdTe, a-Si)	10 - 12	Léger, flexible, coût réduit	Efficacité plus faible, durée de vie plus courte
Tandem/Pérovskite (émergent)	25 - 30+	Très haute efficacité potentielle	Encore en développement, coût élevé

I.3.4 Facteurs influençant la production d'énergie

La production d'énergie d'un système photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs environnementaux et techniques. Voici les principaux facteurs à prendre en compte [33]:

➤ Irradiance solaire :

- L'irradiance solaire est la quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface (généralement mesurée en W/m^2). Elle varie en fonction de l'heure de la journée, de la saison, de la latitude et des conditions météorologiques.

- **Impact sur la production** : Une irradiance plus élevée augmente la quantité d'énergie disponible pour la conversion en électricité. Cependant, au-delà d'un certain seuil, l'efficacité des cellules peut diminuer en raison de l'échauffement.

➤ **Température :**

- La température des cellules photovoltaïques a un impact significatif sur leur performance. Les cellules PV sont conçues pour fonctionner de manière optimale à une température donnée (généralement autour de 25 °C).
- **Impact sur la production** : Lorsque la température augmente, la tension de la cellule diminue, ce qui réduit la puissance produite. On estime que pour chaque augmentation de 1 °C au-dessus de la température de référence, le rendement diminue de 0,4 % à 0,5 %.
- **Solutions** : Utiliser des systèmes de refroidissement passifs ou actifs pour maintenir les cellules à une température optimale.

➤ **Ombrage :**

- L'ombrage, causé par des obstacles tels que des arbres, des bâtiments ou des poussières, peut réduire considérablement la production d'énergie d'un système PV.
- **Impact sur la production** : Même une petite zone ombragée sur un panneau peut entraîner une baisse significative de la production, car les cellules sont connectées en série. Si une cellule est ombragée, elle peut agir comme une résistance, réduisant le courant dans tout le circuit.
- **Solutions** : Utiliser des diodes bypass pour contourner les cellules ombragées, ou opter pour des micro-onduleurs qui permettent à chaque panneau de fonctionner indépendamment.

➤ **Orientation et inclinaison des panneaux :**

- L'orientation (azimut) et l'inclinaison des panneaux solaires influencent la quantité d'énergie solaire captée.

- **Impact sur la Production** : Dans l'hémisphère nord, les panneaux doivent être orientés vers le sud pour maximiser l'exposition au soleil. L'inclinaison optimale dépend de la latitude du site.
- **Solutions** : Utiliser des systèmes de suivi solaire (trackers) pour ajuster automatiquement l'orientation et l'inclinaison des panneaux.

➤ **Dégradation des panneaux :**

- Au fil du temps, les panneaux solaires peuvent subir une dégradation due à des facteurs environnementaux (UV, humidité, tempêtes de sable) ou à des défauts de fabrication.
- **Impact sur la production** : La dégradation entraîne une baisse progressive du rendement des panneaux, généralement de l'ordre de 0,5 % à 1 % par an.
- **Solutions** : Choisir des panneaux de haute qualité avec des garanties de performance à long terme, et effectuer un entretien régulier.

I.3.5 Optimisation de la production d'énergie

Pour maximiser la production d'énergie d'un système photovoltaïque, il est essentiel de prendre en compte les facteurs mentionnés ci-dessus et de mettre en œuvre des stratégies d'optimisation. Voici quelques approches courantes [34]:

- **Utilisation de systèmes de suivi solaire** : Les trackers solaires ajustent l'orientation des panneaux pour suivre la trajectoire du soleil, augmentant ainsi la quantité d'énergie captée.
- **Refroidissement des panneaux** : Des systèmes de refroidissement actifs (ventilation, circulation d'eau) ou passifs (ailettes de refroidissement) peuvent être utilisés pour maintenir les panneaux à une température optimale.
- **Gestion de l'ombrage** : Éviter les zones ombragées lors de l'installation des panneaux, ou utiliser des technologies comme les micro-onduleurs pour minimiser l'impact de l'ombrage.
- **Maintenance régulière** : Nettoyer régulièrement les panneaux pour éliminer la poussière, les feuilles et autres débris qui pourraient réduire leur efficacité.

I.4 Caractéristiques des véhicules électriques et besoins en recharge

Les véhicules électriques (VE) représentent une révolution dans le secteur des transports, offrant une alternative propre et durable aux véhicules à combustion interne [35]. Cependant, leur adoption massive dépend en grande partie de la disponibilité et de l'efficacité des infrastructures de recharge. Pour concevoir des systèmes de recharge adaptés, il est essentiel de comprendre les caractéristiques des VE, en particulier les types de batteries qu'ils utilisent et leurs besoins en termes de puissance et de temps de recharge. Cette section explore ces aspects en détail [36].

I.4.1 Types de batteries utilisées dans les VE

Les batteries sont le cœur des véhicules électriques, fournissant l'énergie nécessaire pour alimenter le moteur électrique. Plusieurs technologies de batteries sont utilisées dans les VE, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients. Voici les principaux types de batteries utilisées [37]:

- A. Batteries lithium-ion (li-ion)**
- B. Batteries nickel-métal hydrure (nimh)**
- C. Batteries à plomb-acide**
- D. Batteries à état solide**

E. Batteries au lithium-fer-phosphate (lifepo4) :

- **Description** : Une variante des batteries Li-ion, les batteries LiFePO₄ sont connues pour leur stabilité thermique et leur sécurité.

I.4.2 Puissance et temps de recharge requis pour différents types de VE

La puissance et le temps de recharge des VE varient en fonction du type de véhicule, de la capacité de la batterie et de la technologie de recharge utilisée. Voici une analyse détaillée de ces aspects [38]:

A. Types de recharge :

- **Recharge lente (niveau 1) :**
 - **Puissance** : 1,4 à 2,4 kW (prise domestique standard).
 - **Temps de recharge** : 8 à 20 heures pour une recharge complète, selon la capacité de la batterie.
 - **Utilisation** : Principalement pour les recharges à domicile ou en milieu résidentiel.
- **Recharge accélérée (niveau 2) :**
 - **Puissance** : 3,7 à 22 kW (bornes de recharge dédiées).
 - **Temps de recharge** : 3 à 8 heures pour une recharge complète.
 - **Utilisation** : Bornes de recharge publiques, stations de recharge en entreprise ou à domicile avec une installation spécifique.
- **Recharge rapide (niveau 3 ou dc fast charging) :**
 - **Puissance** : 50 à 350 kW (bornes de recharge rapide).
 - **Temps de recharge** : 20 à 60 minutes pour une recharge à 80 %.
 - **Utilisation** : Stations de recharge rapide sur les autoroutes ou dans les zones urbaines à fort trafic.

B. Capacité des batteries et autonomie :

➤ Véhicules urbains compacts :

- **Capacité de la batterie :** 20 à 40 kWh.
- **Autonomie :** 150 à 250 km.
- **Temps de recharge :** 4 à 8 heures en Niveau 2, 20 à 30 minutes en recharge rapide.

➤ Véhicules familiaux :

- **Capacité de la batterie :** 50 à 80 kWh.
- **Autonomie :** 300 à 500 km.
- **Temps de recharge :** 6 à 10 heures en Niveau 2, 30 à 45 minutes en recharge rapide.

➤ Véhicules de luxe et performances :

- **Capacité de la batterie :** 80 à 100 kWh ou plus.
- **Autonomie :** 400 à 600 km ou plus.
- **Temps de recharge :** 8 à 12 heures en Niveau 2, 45 à 60 minutes en recharge rapide.

C. Facteurs influençant le temps de recharge :

- **Point de charge initial**
- **Température de la batterie**
- **Puissance disponible**

D. Impact sur les infrastructures de recharge :

- **Recharge à domicile .**
- **Recharge publique**
- **Recharge rapide sur autoroutes**

Tableau I.10 Comparaison des niveaux de recharge pour VE

Niveau de recharge	Puissance (kW)	Temps de recharge (0–80%)	Utilisation typique
Niveau 1 (Lente)	1,4–2,4	8–20 heures	Recharge à domicile
Niveau 2 (Accélérée)	3,7–22	3–8 heures	Bornes publiques, entreprises
Niveau 3 (Rapide)	50–350	20–60 minutes	Autoroutes, zones à fort trafic

I.4.3 Synergie entre les systèmes PV et les besoins en recharge des VE

L'intégration des systèmes photovoltaïques (PV) dans les infrastructures de recharge des VE offre une solution durable pour répondre aux besoins énergétiques des véhicules électriques. Voici quelques points clés [17]:

A. Recharge solaire à domicile :

- Les systèmes PV installés sur les toits des maisons peuvent fournir une partie ou la totalité de l'énergie nécessaire pour recharger les VE, réduisant ainsi la dépendance vis-à-vis du réseau électrique.
- Les VE peuvent être rechargés pendant la journée, lorsque la production d'énergie solaire est maximale.

B. Stations de recharge solaire publiques :

- Les stations de recharge alimentées par des systèmes PV peuvent être déployées dans des zones urbaines ou sur les autoroutes, offrant une solution de recharge propre et renouvelable.
- Ces stations peuvent être équipées de systèmes de stockage d'énergie (batteries) pour fournir de l'énergie même en l'absence de soleil.

C. Gestion intelligente de l'énergie :

- Les systèmes de gestion de l'énergie peuvent optimiser l'utilisation de l'énergie solaire pour recharger les VE, en tenant compte des variations de production et de demande.
- Les VE peuvent également servir de sources de stockage d'énergie mobile, restituant de l'énergie au réseau lors des pics de demande (vehicule-to-grid, V2G).

I.5 Synergie entre les systèmes PV et les stations de recharge des VE

L'intégration des systèmes photovoltaïques (PV) dans les stations de recharge pour véhicules électriques (VE) représente une solution innovante et durable pour répondre aux besoins énergétiques croissants de la mobilité électrique [39]. Cette synergie entre les systèmes PV et les stations de recharge offre de nombreux avantages, tant sur le plan environnemental qu'économique, tout en réduisant la dépendance aux réseaux électriques traditionnels. Dans cette section, nous explorerons les avantages de cette intégration et son impact sur la réduction de la dépendance aux réseaux électriques conventionnels [39].



Figure :I.5 Borne de recharge de VE à énergie solaire

I.5.1 Avantages de l'intégration des systèmes PV dans les stations de recharge

L'intégration des systèmes PV dans les stations de recharge des VE présente plusieurs avantages majeurs, qui en font une solution attrayante pour les particuliers, les entreprises et les collectivités. Voici les principaux avantages [40]:

➤ **Reduction des émissions de CO₂ :**

- En utilisant l'énergie solaire pour recharger les VE, on évite les émissions de gaz à effet de serre associées à la production d'électricité à partir de combustibles fossiles. Cela contribue à la lutte contre le changement climatique et à l'amélioration de la qualité de l'air.
- Les stations de recharge solaires sont particulièrement avantageuses dans les régions où l'électricité est principalement produite à partir de sources fossiles.

➤ **Autonomie énergétique :**

- Les systèmes PV permettent aux stations de recharge de fonctionner de manière autonome, réduisant ainsi la dépendance vis-à-vis du réseau électrique traditionnel. Cela est particulièrement utile dans les zones rurales ou isolées, où l'accès au réseau électrique est limité ou coûteux.
- En cas de panne du réseau, les stations de recharge solaires équipées de batteries de stockage peuvent continuer à fournir de l'électricité, augmentant ainsi la résilience des infrastructures.

➤ Économies à long terme :

- Bien que l'installation initiale des systèmes PV puisse être coûteuse, les coûts opérationnels sont faibles, car l'énergie solaire est gratuite et abondante. Sur le long terme, cela permet de réaliser des économies significatives sur les coûts d'électricité.
- Les systèmes PV peuvent également réduire la pression sur le réseau électrique, évitant ainsi des investissements coûteux dans l'expansion et la modernisation des infrastructures.

➤ Adaptabilité aux besoins locaux :

- Les systèmes PV peuvent être dimensionnés et configurés en fonction des besoins spécifiques d'une région. Par exemple, dans des zones à fort ensoleillement comme oued-souf, en Algérie, les systèmes PV peuvent fournir une grande partie de l'énergie nécessaire pour recharger les VE, réduisant ainsi la dépendance aux sources d'énergie externes.
- L'intégration de systèmes de stockage d'énergie (batteries, supercondensateurs) permet de gérer les variations de production solaire et de répondre aux pics de demande énergétique.

➤ Innovation technologique :

- L'intégration des énergies renouvelables dans les infrastructures de recharge des VE stimule l'innovation technologique, notamment dans les domaines de la gestion de l'énergie, des systèmes de stockage et des réseaux intelligents (smart grids). Ces avancées technologiques peuvent être appliquées à d'autres secteurs, contribuant ainsi à la transition énergétique globale.

➤ Image écologique et responsabilité sociale :

- Les entreprises et les collectivités qui investissent dans des stations de recharge solaires renforcent leur image écologique et démontrent leur engagement en faveur du développement durable. Cela peut attirer des clients soucieux de l'environnement et améliorer la réputation de l'entreprise.

I.5.2 Réduction de la dépendance aux réseaux électriques traditionnels

L'un des avantages les plus significatifs de l'intégration des systèmes PV dans les stations de recharge des VE est la réduction de la dépendance aux réseaux électriques traditionnels. Cette réduction de dépendance offre plusieurs bénéfices [41]:

➤ Sécurité énergétique :

- En produisant leur propre électricité, les stations de recharge solaires deviennent moins dépendantes des fluctuations des prix de l'énergie et des perturbations du réseau électrique. Cela améliore la sécurité énergétique et réduit les risques liés à la volatilité des marchés de l'énergie.
- Dans les régions où le réseau électrique est peu fiable ou surchargé, les systèmes PV offrent une solution de secours pour garantir une recharge continue des VE.

➤ Réduction de la charge sur le réseau électrique :

- La recharge des VE peut exercer une pression importante sur le réseau électrique, en particulier pendant les heures de pointe. En intégrant des systèmes PV, les stations de recharge peuvent réduire cette pression en produisant une partie ou la totalité de l'énergie nécessaire sur place.
- Cela permet d'éviter les surcharges du réseau et de réduire les coûts associés à l'expansion et à la modernisation des infrastructures électriques.

➤ Décentralisation de la production d'énergie :

- Les systèmes PV contribuent à la décentralisation de la production d'énergie, en permettant aux stations de recharge de devenir des producteurs d'énergie locaux. Cela réduit les pertes d'énergie associées au transport et à la distribution de l'électricité sur de longues distances.
- La décentralisation favorise également le développement de microgrids (réseaux électriques locaux), qui peuvent fonctionner de manière autonome ou en coordination avec le réseau principal.

➤ Flexibilité et scalabilité :

- Les systèmes PV peuvent être facilement adaptés et étendus en fonction des besoins croissants en matière de recharge des VE. Par exemple, une station de

recharge peut commencer avec un petit champ de panneaux solaires et l'étendre progressivement à mesure que la demande augmente.

- Cette flexibilité permet aux stations de recharge de s'adapter rapidement aux évolutions technologiques et aux changements de la demande.

➤ Intégration avec les réseaux intelligents (smart grids) :

- Les systèmes PV peuvent être intégrés avec des réseaux intelligents, qui utilisent des technologies de communication et de contrôle pour optimiser la production, la distribution et la consommation d'énergie. Cette intégration permet une gestion plus efficace de l'énergie et une meilleure coordination entre les différentes sources d'énergie.
- Les VE peuvent également jouer un rôle actif dans les réseaux intelligents en restituant de l'énergie au réseau lors des pics de demande (vehicle-to-grid, V2G), contribuant ainsi à l'équilibre du réseau.

I.5.3 Exemples concrets d'intégration des systèmes PV dans les stations de recharge

- **Stations de recharge solaires publiques** : De nombreuses villes à travers le monde installent des stations de recharge solaires dans les parkings publics, les centres commerciaux et les aires d'autoroute. Ces stations sont souvent équipées de panneaux solaires et de batteries de stockage pour fournir une recharge propre et fiable [42].
- **Recharge solaire à domicile** : Les propriétaires de VE peuvent installer des panneaux solaires sur leur toit pour recharger leur véhicule à domicile. Cette solution est particulièrement avantageuse dans les régions où l'électricité est coûteuse ou où le réseau électrique est peu fiable.
- **Flottes d'entreprises** : Les entreprises possédant des flottes de VE peuvent installer des systèmes PV sur leurs sites pour recharger leurs véhicules. Cela réduit les coûts opérationnels et améliore l'image écologique de l'entreprise.

En résumé, l'intégration des systèmes PV dans les stations de recharge des VE offre de nombreux avantages, notamment une réduction des émissions de CO₂, une autonomie énergétique accrue, et une diminution de la dépendance aux réseaux électriques traditionnels. Cette synergie entre les énergies renouvelables et la mobilité électrique représente une étape clé vers un avenir énergétique plus durable et résilient.

I.6 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis d'établir un cadre théorique complet pour comprendre les systèmes photovoltaïques et leur rôle dans la recharge des véhicules électriques. Les principes de conversion de l'énergie solaire, les composants des systèmes PV, ainsi que les technologies de batteries et les besoins en recharge des VE ont été analysés en détail. La synergie entre les énergies renouvelables et les infrastructures de recharge a été mise en évidence, soulignant à la fois les opportunités et les défis techniques et environnementaux. Ces éléments constituent une base essentielle pour la conception et l'optimisation des stations de recharge PV, qui seront approfondies dans les chapitres suivants, notamment à travers des études de dimensionnement et de simulation

Après avoir exploré les fondements théoriques des systèmes photovoltaïques (PV) et des véhicules électriques (VE), ainsi que la synergie entre ces deux technologies, il est essentiel de se pencher sur les aspects pratiques de la conception des stations de recharge PV pour VE. Le **chapitre 2** abordera en détail les considérations techniques nécessaires pour concevoir des stations de recharge efficaces et adaptées aux besoins spécifiques des VE. Nous examinerons notamment les méthodes d'estimation de la demande énergétique, les critères de dimensionnement des systèmes PV, la sélection des composants électroniques et des systèmes de stockage, ainsi que les normes et réglementations à respecter. Ce chapitre posera les bases pour une conception optimisée des infrastructures de recharge, en tenant compte des contraintes locales et des objectifs de durabilité.

Chapitre II :

Dimensionnement d'une station solaire de
recharge

II Chapitre II : Dimensionnement d'une station solaire de recharge

II.1 Introduction

Ce chapitre aborde les aspects techniques essentiels pour concevoir une station de recharge photovoltaïque (PV) destinée aux véhicules électriques (VE). Il commence par une estimation précise de la demande énergétique, en tenant compte de facteurs tels que le nombre de véhicules, la fréquence de recharge et les différents niveaux de puissance requis. Ensuite, il présente les méthodes de dimensionnement du champ PV, incluant l'optimisation de l'orientation, de l'inclinaison et l'utilisation éventuelle de systèmes de suivi solaire. La sélection des composants électroniques de puissance, notamment les onduleurs et les convertisseurs, est également détaillée, ainsi que le rôle crucial des systèmes de stockage d'énergie (batteries et supercondensateurs). Enfin, ce chapitre examine les normes et réglementations applicables, garantissant la sécurité et la conformité des installations.

II.2 Analyse des besoins énergétiques d'un véhicule électrique [43]

Les véhicules électriques (VE) représentent une alternative durable aux véhicules thermiques, mais leur adoption dépend largement de la disponibilité et de l'efficacité des infrastructures de recharge. Pour concevoir des systèmes de recharge optimisés, il est essentiel de comprendre les besoins énergétiques spécifiques des VE. Cette section analyse ces besoins en se basant sur des paramètres tels que la capacité des batteries, la consommation énergétique et les habitudes de recharge.

II.2.1 Capacité des batteries et autonomie

La capacité des batteries, exprimée en kilowattheures (kWh), détermine l'autonomie d'un VE. Les modèles actuels varient considérablement :

- **Véhicules urbains compacts** : 20 à 40 kWh, autonomie de 150 à 250 km.
- **Véhicules familiaux** : 50 à 80 kWh, autonomie de 300 à 500 km.
- **Véhicules haut de gamme** : 80 à 100 kWh, autonomie dépassant 500 km.

Cette diversité implique des besoins énergétiques variés pour la recharge, nécessitant une adaptation des infrastructures.

II.2.2 Consommation énergétique

La consommation énergétique des VE est influencée par plusieurs facteurs :

- **Poids et aérodynamique** : Un véhicule plus lourd ou moins aérodynamique consomme davantage.
- **Conditions de conduite** : La vitesse, les accélérations fréquentes et les pentes augmentent la consommation.
- **Climat** : L'utilisation du chauffage ou de la climatisation peut réduire l'autonomie de 10 à 30 %.

En moyenne, un VE consomme entre 0,15 et 0,25 kWh par kilomètre. Ainsi, pour un trajet quotidien de 50 km, la consommation se situe entre 7,5 et 12,5 kWh.

II.2.3 Fréquence et modes de recharge

Les habitudes de recharge varient selon les utilisateurs :

- **Recharge à domicile** : Lente (niveau 1, 1,4 à 2,4 kW) ou accélérée (niveau 2, 3,7 à 22 kW), idéale pour une recharge nocturne.
- **Recharge publique** : Accélérée ou rapide (niveau 3, 50 à 350 kW), adaptée aux longs trajets ou aux besoins urgents.

Les stations de recharge photovoltaïques doivent donc offrir une gamme d'options pour répondre à ces différents scénarios.

II.2.4 Impact sur la conception des infrastructures

Pour dimensionner une station de recharge PV, il faut considérer :

- **Demande énergétique totale** : Calculée en fonction du nombre de VE et de leur consommation moyenne.
- **Pics de demande** : Les recharges simultanées nécessitent une puissance élevée, pouvant atteindre 350 kW pour les bornes rapides.
- **Variabilité de la production solaire** : L'énergie disponible dépend de l'ensoleillement, nécessitant des systèmes de stockage (batteries ou supercondensateurs) pour assurer une alimentation stable.

II.2.5 Méthodes pour calculer la consommation énergétique des VE

La consommation énergétique des VE dépend de plusieurs facteurs, notamment la capacité de la batterie, l'efficacité du véhicule, et les conditions de conduite. Voici quelques méthodes couramment utilisées pour estimer cette consommation [44] :

- A. **Consommation moyenne par kilomètre** : La consommation énergétique des VE est souvent exprimée en kilowattheures par kilomètre (kWh/km). Par exemple, un VE typique consomme entre 0,15 et 0,25 kWh/km. En multipliant cette consommation par la distance parcourue, on peut estimer l'énergie totale nécessaire pour recharger le véhicule.
- B. **Capacité de la batterie** : La capacité de la batterie, exprimée en kilowattheures (kWh), donne une indication directe de l'énergie nécessaire pour une recharge complète. Par exemple, un VE avec une batterie de 50 kWh nécessitera environ 50 kWh pour une recharge complète.
- C. **Fréquence de recharge** : La fréquence à laquelle les VE sont rechargés influence également la demande énergétique globale. Par exemple, si un VE est rechargé quotidiennement, la demande énergétique sera plus élevée que s'il est rechargé une fois par semaine.

II.2.6 Facteurs influençant la demande énergétique

Plusieurs facteurs influencent la demande énergétique pour la recharge des VE [45], notamment :

- A. **Nombre de véhicules** : Plus le nombre de VE à recharger est élevé, plus la demande énergétique sera importante. Par exemple, une station de recharge desservant 100 VE aura une demande énergétique bien supérieure à celle desservant 10 VE.
- B. **Fréquence de recharge** : La fréquence à laquelle les VE sont rechargés joue un rôle clé dans la demande énergétique. Les VE utilisés intensivement (par exemple, les taxis ou les véhicules de livraison) nécessiteront des recharges plus fréquentes, augmentant ainsi la demande énergétique.
- C. **Type de recharge** : Les différents niveaux de recharge (lente, accélérée, rapide) ont des impacts différents sur la demande énergétique. La recharge rapide, par exemple, nécessite une puissance électrique plus élevée, ce qui peut augmenter la demande énergétique instantanée.

II.3 Choix et dimensionnement des composants

Le dimensionnement et la configuration du système PV sont essentiels pour garantir que la station de recharge peut répondre à la demande énergétique des VE tout en maximisant l'utilisation de l'énergie solaire [46].

II.3.1 Générateurs photovoltaïques (PV)

Critères de sélection :

□ **Technologie des panneaux :**

- *Monocristallin* (rendement 18-22%) : Idéal pour les espaces limités et les zones à fort ensoleillement.
- *Polycristallin* (rendement 15-18%) : Coût réduit, adapté aux installations moins contraignantes.

□ **Puissance nominale (Wc) :** Dépend de la demande énergétique totale et de l'ensoleillement local.

□ **Orientation et inclinaison :**

- Orientation sud (hémisphère nord) pour maximiser l'exposition solaire.
- Inclinaison optimale selon la latitude (ex. : $\sim 30^\circ$ pour Oued Souf).

Dimensionnement :

□ Calcul de la surface nécessaire : $N_{\text{panneaux}} = \frac{E_{\text{journalière requise}}}{P_{\text{panneau}} \times H_{\text{ensoleillement}}}$

où :

- $E_{\text{journalière}}$ = énergie totale nécessaire pour recharger les VE .
- P_{panneau} = puissance d'un panneau .
- $H_{\text{ensoleillement}}$ = heures d'ensoleillement équivalentes .

Le dimensionnement du champ PV consiste à déterminer la surface nécessaire pour les panneaux solaires afin de produire suffisamment d'énergie pour répondre à la demande des VE. Voici les étapes clés pour ce calcul [17]:

- A. **Calcul de la surface nécessaire** : La surface nécessaire pour les panneaux solaires dépend de la puissance requise et de l'efficacité des panneaux. Par exemple, si un panneau solaire a une puissance de 300 W et une efficacité de 20 %, il produira environ 0,6 kWh par jour sous un ensoleillement optimal. Pour une demande énergétique de 100 kWh par jour, il faudrait environ 167 panneaux solaires ($100 \text{ kWh} / 0,6 \text{ kWh par panneau}$).
- B. **Optimisation de l'orientation et de l'inclinaison des panneaux** : L'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires ont un impact significatif sur la quantité d'énergie captée. Dans l'hémisphère nord, les panneaux doivent être orientés vers le sud pour maximiser l'exposition au soleil. L'inclinaison optimale dépend de la latitude du site. Par exemple, à une latitude de 33° (comme à Ain El Ibel, Algérie), une inclinaison de 30° à 35° est généralement recommandée pour maximiser la production d'énergie tout au long de l'année [47].
- C. **Utilisation de systèmes de suivi solaire** : Les systèmes de suivi solaire (trackers) ajustent l'orientation des panneaux pour suivre la trajectoire du soleil, augmentant ainsi la quantité d'énergie captée. Ces systèmes peuvent augmenter la production d'énergie de 20 % à 30 % par rapport aux panneaux fixes.
- D. **Gestion de l'ombrage** : L'ombrage, causé par des obstacles tels que des arbres ou des bâtiments, peut réduire considérablement la production d'énergie. Il est donc essentiel de choisir un emplacement dégagé pour les panneaux solaires ou d'utiliser des technologies comme les micro-onduleurs pour minimiser l'impact de l'ombrage.

• **II.3.2 Sélection des onduleurs et des composants électroniques de puissance**

La sélection des onduleurs et des composants électroniques de puissance est une étape cruciale dans la conception des stations de recharge PV pour VE. Ces composants jouent un rôle clé dans la conversion (Figure III-1), la gestion et la distribution de l'énergie produite par les panneaux solaires vers les bornes de recharge des VE [48].



Figure II-1 Convertisseur solaire DC $\rightarrow$ DC

A. Critères de choix des onduleurs et des convertisseurs DC-DC

- **Efficacité de conversion** : L'efficacité des onduleurs et des convertisseurs DC-DC est un critère essentiel. Les onduleurs modernes ont des efficacités allant de 95 % à 98 %. Un rendement élevé réduit les pertes d'énergie et améliore l'efficacité globale du système [19].
- **Puissance nominale** : La puissance nominale de l'onduleur doit correspondre à la puissance maximale produite par le champ PV. Par exemple, si le champ PV produit une puissance maximale de 10 kW, l'onduleur doit avoir une capacité d'au moins 10 kW pour éviter la saturation [49].
- **Compatibilité avec les systèmes de stockage** : Les onduleurs hybrides, capables de gérer à la fois l'énergie solaire et les batteries de stockage, sont particulièrement adaptés aux stations de recharge PV. Ils permettent une gestion plus flexible de l'énergie, en stockant l'excédent d'énergie solaire pour une utilisation ultérieure [50].
- **Technologie MPPT (maximum power point tracking)** : Les onduleurs équipés de la technologie MPPT optimisent la production d'énergie en ajustant en temps réel la tension et le courant pour maximiser la puissance extraite des panneaux solaires. Cette technologie est essentielle pour maximiser l'efficacité du système PV, surtout dans des conditions d'ensoleillement variables [51].
- **Fiabilité et durabilité** : Les onduleurs et les convertisseurs doivent être robustes et capables de fonctionner dans des conditions environnementales variées (température, humidité, etc.). Une durée de vie longue et une maintenance réduite sont des critères importants pour minimiser les coûts opérationnels [52].

B. Intégration des systèmes de gestion de l'énergie

Les systèmes de gestion de l'énergie (Energy Management Systems, EMS) jouent un rôle central dans l'optimisation de la production, du stockage et de la distribution de l'énergie dans les stations de recharge PV. Voici quelques aspects clés de leur intégration [53]:

- **Gestion des flux énergétiques** : Les EMS permettent de gérer les flux d'énergie entre les panneaux solaires, les batteries de stockage, et les bornes de recharge. Ils optimisent l'utilisation de l'énergie solaire en priorisant la recharge des VE pendant les périodes de forte production.
- **PREVISION METEOROLOGIQUE** : Les systèmes de gestion de l'énergie peuvent intégrer des données météorologiques pour anticiper les variations de production d'énergie solaire. Cela permet d'ajuster la gestion de l'énergie en fonction des prévisions d'ensoleillement et de consommation.
- **Recharge intelligente (smart charging)** : Les EMS peuvent mettre en œuvre des stratégies de recharge intelligente pour équilibrer la demande énergétique des VE avec la production d'énergie solaire. Par exemple, ils peuvent inciter les utilisateurs à recharger leurs VE pendant les périodes de forte production solaire grâce à des tarifications dynamiques.
- **Intégration avec les réseaux intelligents (smart grids)** : Les EMS peuvent être connectés aux réseaux intelligents pour participer aux marchés de l'énergie et optimiser les échanges d'énergie. Cela permet de réduire les coûts et d'améliorer la résilience du système.

II.3.3 Régulateurs de charge

Fonctions :

- Protéger les batteries contre les surcharges/décharges profondes.
- Optimiser le transfert d'énergie PV vers les batteries via un algorithme MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).

Choix technologique :

- **MPPT** (vs. PWM) : Meilleur rendement (jusqu'à 30% de gain), surtout sous conditions variables.

- **Puissance** : Alignée sur la puissance crête du champ PV (ex. 5 kW pour 20 panneaux de 250 W).

II.3.5 Hacheur boost (Convertisseur DC-DC)

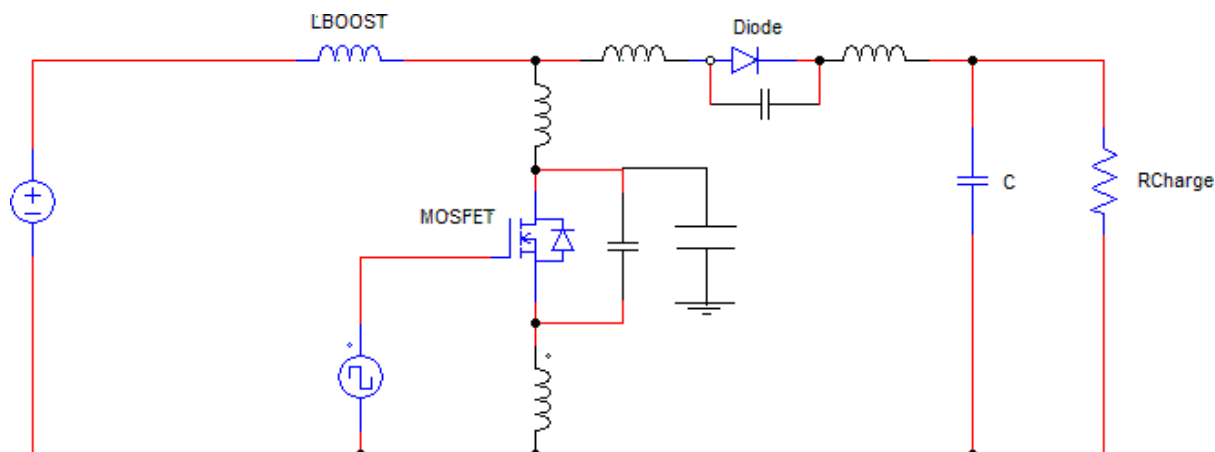


Figure II-2 Circuit du hacheur BOOST [54]

Rôle :

- Élever la tension des panneaux PV (ex. 48 V) vers celle des batteries ou du bus DC (ex. 400 V).

Dimensionnement :

- **Tension d'entrée/sortie** : Adaptée aux caractéristiques des panneaux et des batteries.
- **Courant maximal** :

$$I_{max} = \frac{P_{PV}}{V_{entree}}$$
- **Fréquence de découpage** : Typiquement 20-100 kHz pour limiter les pertes.

II.3.4 Paramètres d'un Panneau Photovoltaïque

- Données de l'array pv

Tableau : II 11 données de l'array pv

Paramètre	Valeur	Description
Chaînes en parallèle	46	Nombre de strings connectés en parallèle
Modules en série par string	10	Nombre de modules connectés en série
Puissance maximale (Pmax)	213.15 W	Puissance maximale par

Chapitre II : Dimensionnement d'une station solaire de recharge

		module
Tension en circuit ouvert (Voc)	36.3 V	Tension sans charge
Courant de court-circuit (Isc)	7.84 A	Courant à circuit fermé
Tension au point de puissance max (Vmp)	29 V	Tension à la puissance maximale
Courant au point de puissance max (Imp)	7.35 A	Courant à la puissance maximale
Nombre de cellules par module	60	Cellules photovoltaïques dans le module
Coef. température de Voc	-0.36099 %/°C	Variation de Voc avec température
Coef. température de Isc	0.102 %/°C	Variation de Isc avec température

- Paramètres du modèle

Tableau : II 12 paramètres du modèle

Paramètre	Valeur
Courant généré par la lumière (IL)	7.8654 A
Courant de saturation (I0)	2.0373e-10 A
Facteur d'idéalité de la diode	0.98119
Résistance parallèle (Rsh)	342.64 Ohm
Résistance série (Rs)	0.63934 Ohm

II.3.6 Bancs de batteries stationnaires

Technologies :

- **Lithium-ion (LiFePO4) :**
 - Durée de vie longue (2 000-3 000 cycles).
 - Rendement élevé (95-98%).

- **Plomb-acide :**

- Coût faible, mais durée de vie limitée (500 cycles).

Dimensionnement :

- **Capacité (kWh) :**

$$C_{\text{batterie}} = \frac{E_{\text{autonomie}}}{\eta_{\text{batterie}} \times \text{DoD}}$$

où :

- $E_{\text{autonomie}}$ = énergie à stocker (ex. 30 kWh pour couvrir la nuit).
- η_{batterie} = rendement (ex. 0,9 pour Li-ion).
- DoD = profondeur de décharge (ex. 80% pour Li-ion).

II.3.7 Infrastructure de recharge

Types de bornes :

- **Niveau 2 (AC, 7-22 kW) :**
 - Pour recharges semi-rapides (3-8 heures).
 - Connecteurs : Type 2 (IEC 62196) en Europe, J1772 en Amérique.
- **Niveau 3 (DC, 50-350 kW) :**
 - Recharge ultra-rapide (20-60 min).
 - Connecteurs : CCS (Combo), CHAdeMO, ou Tesla Supercharger.

Critères de choix :

- **Compatibilité :** Normes locales (ex. CCS en Europe).
- **Puissance :** Adaptée aux besoins des VE (ex. 50 kW pour les flottes professionnelles).

Tableau : II 13 Synthèse des composants clés

Composant	Exemple de spécification	Remarques
Panneaux PV	20 x 400 Wc (monocristallin)	8 kWc, rendement 20%
Régulateur MPPT	5 kW, entrée 150 V, sortie 48 V	Algorithme PSO/GWO pour optimisation

Hacheur boost	Entrée 48 V, sortie 400 V, 10 kW	Fréquence 50 kHz
Batteries Li-ion	30 kWh, 400 V, DoD 80%	Durée de vie 10 ans
Borne de recharge	2 x 22 kW (Type 2) + 1 x 50 kW (CCS)	Couvre tous les types de VE

II.4 Systèmes de stockage d'énergie (batteries)

Les systèmes de stockage d'énergie, en particulier les batteries, jouent un rôle essentiel dans les stations de recharge PV pour VE. Ils permettent de stocker l'énergie excédentaire produite par les panneaux solaires pour une utilisation ultérieure, notamment pendant la nuit ou par temps nuageux [55].

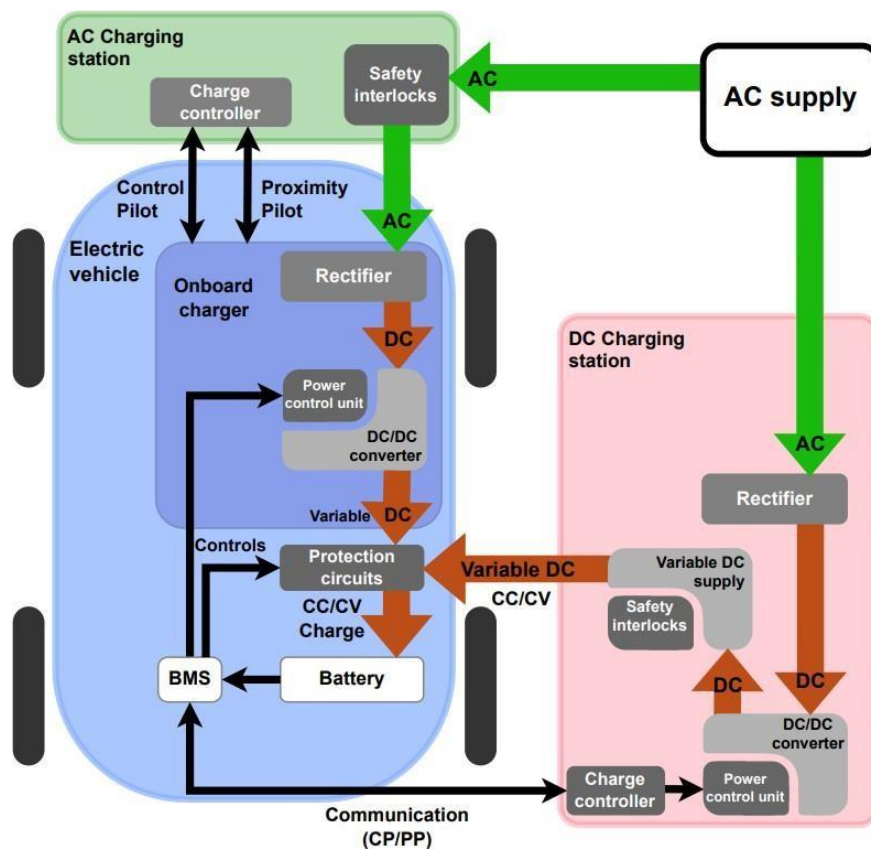


Figure II-3 Équipement de recharge pour véhicules électriques [16]

- **Rôle des batteries dans les stations de recharge PV**
 - Stabilisation de l'offre et de la demande :** Les batteries permettent de lisser les variations de production d'énergie solaire et de consommation des VE. Elles stockent l'énergie excédentaire pendant les périodes de forte production et la restituent pendant les périodes de forte demande [56].

B. **Autonomie énergétique** : Les batteries augmentent l'autonomie des stations de recharge PV en réduisant la dépendance vis-à-vis du réseau électrique traditionnel. Cela est particulièrement avantageux dans les zones isolées ou où le réseau est peu fiable [57].

C. **Gestion des pics de demande** : Les batteries peuvent fournir une puissance supplémentaire pendant les pics de demande, par exemple lorsque plusieurs VE sont rechargés simultanément. Cela permet d'éviter les surcharges du réseau et de garantir une recharge rapide et fiable [50].

- **Technologies de batteries adaptées aux VE (lithium-ion, etc.)**

Plusieurs technologies de batteries sont utilisées dans les stations de recharge PV pour VE, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients. Voici les principales technologies :

A. **Batteries lithium-ion (li-ion)** [58]:



Figure II-4 Lithium Ion Batteries

- **Avantages** : Les batteries Li-ion sont les plus couramment utilisées en raison de leur haute densité énergétique (150 à 250 Wh/kg), de leur longue durée de vie (1 000 à 2 000 cycles de charge/décharge), et de leur faible taux d'autodécharge (environ 1 à 2 % par mois).
- **Inconvénients** : Elles sont sensibles aux températures extrêmes et peuvent présenter des risques de surchauffe ou d'incendie en cas de mauvaise gestion thermique.

B. **Batteries nickel-métal hydrure (nimh)** [59]:



Figure II-5 Batterie Nickel Métal

- **Avantages** : Les batteries NiMH sont moins coûteuses que les batteries Li-ion et ont une bonne tolérance aux cycles de charge/décharge.
- **Inconvénients** : Elles ont une densité énergétique plus faible (60 à 120 Wh/kg) et un taux d'autodécharge plus élevé (environ 10 % par mois), ce qui les rend moins adaptées aux applications nécessitant une grande autonomie.

C. Batteries a plomb-acide [14]:



Figure II-6 batterie au plomb

- **Avantages** : Les batteries à plomb-acide sont une technologie mature et peu coûteuse.
- **Inconvénients** : Elles ont une densité énergétique très faible (30 à 50 Wh/kg) et une durée de vie courte (300 à 500 cycles), ce qui les rend moins adaptées aux stations de recharge modernes.

D. Batteries a état solide [60]:

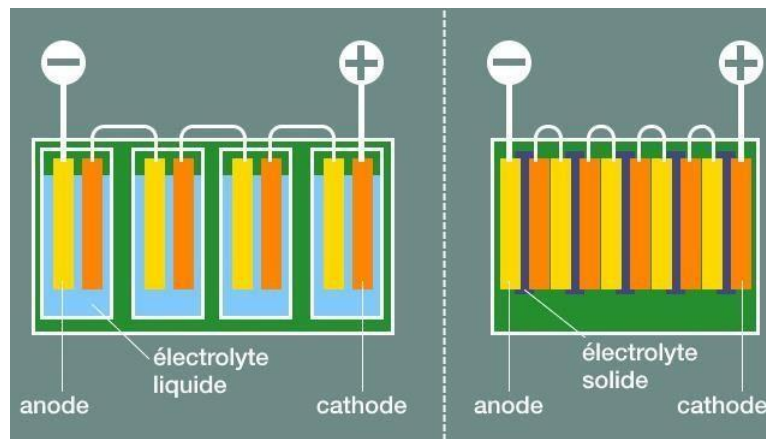


Figure II-7 Batterie à État Solide

- **Avantages** : Les batteries à état solide sont une technologie émergente offrant une densité énergétique potentiellement très élevée (jusqu'à 500 Wh/kg) et une sécurité accrue (moins de risques d'incendie ou d'explosion).
- **Inconvénients** : Elles sont encore en phase de développement et de commercialisation, avec des coûts élevés et une complexité de fabrication.

E. Batteries au lithium-fer-phosphate (lifepo4) [61]:



Figure II-8 Batterie Lithium Fer Phosphate NX LiFePO4

- **Avantages** : Les batteries LiFePO4 sont connues pour leur excellente stabilité thermique et leur sécurité. Elles ont une longue durée de vie (2 000 à 3 000 cycles) et sont moins sensibles aux températures extrêmes.
- **Inconvénients** : Elles ont une densité énergétique légèrement inférieure à celle des batteries Li-ion traditionnelles et un coût légèrement plus élevé.

II.5 Normes et considérations réglementaires

La conception et l'installation des systèmes photovoltaïques (PV) et des stations de recharge pour véhicules électriques (VE) doivent respecter un ensemble de normes et de réglementations pour garantir la sécurité, la fiabilité et la conformité des installations. Ces normes couvrent à la fois les aspects techniques et les exigences de sécurité, et varient selon les régions et les pays [62].

Tableau : II.14 Types et normes des connecteurs de charge[16]

Connecteurs	Mode de charge	Symbole	Pays	Pins	Voltage, Curent, Power	Standards
Type 1/j1772	AC		USA JAPON	3 power pins (L, N, PE)	1 Φ 120 V, ≤ 16 A, 1.9 kW 1 Φ 240 V, ≤ 80 A, 19.2 kW	SAE j1772 IEC 62196
Type 2/Mennekes	AC		EU China	5 power pins (L1, L2, L3, N, PE) 2 control signals– CP, PP (PWM for CP)	1 Φ 230 V, ≤ 32 A, 7.4 kW 3 Φ 400 V, 63 A, 43 kW	IEC 62196 GB/T 20234.2-2015
	DC		Tesla (EU)	3 power pins (DC+, DC–, PE) 7 control signals (comm. CAN)	400 V, ≤ 140 A, 56 kW	IEC 62196
CHAdemo (JEV G105-1993)	AC		Japan	3 power pins (DC+, DC–, PE) 7 control signals (comm. CAN)	200–500 V, ≤ 400 A, 200 kW CHAdemo 2.0 : 1000 V, ≤ 400 A, 400 kW	IEC 61851-23, -24 IEC 62196-3 IEEE 2030.1.1TM-2015
CSS/Combo	DC		USA	3 AC pins 2 DC pins 2 control signals CP (PLC), PP	200–1000 V DC, ≤ 350 A, 350 kW	IEC 62196-1/2/3 IEC 61851-1/22 IEC 61851-1/23 ISO/IEC 15118 DIN
			EU	5 AC pins 2 DC pins 2 control		

				signals CP (PLC), PP		SPEC 70121 SAE J2847/2
GB/T	DC		China	5 power pins (DC+, DC-, PE, 2 Aux. power pins BT 4 control pins : 2 PP, 2 CAN	750/1000 V, ≤250 A, 237.5 kW	GB/T 20234
Tesla	AC		Tesla (Except EU)	3 power pins (DC+, DC-, E) 2 control signals CP, PP	1 Φ 240 V, ≤72 A, 17.2 kW	IEC 62196
	DC			3 power pins (L1, N, E) 2 control signals CP, PP	400 V, ≤650 A, 250 kW	

II.5.1 Normes internationales et locales pour les systèmes pv et les stations de recharge

A. Normes internationales [63]:

- **IEC 62446** : Cette norme internationale définit les exigences pour la documentation, les tests de mise en service et la surveillance des systèmes PV. Elle garantit que les installations sont correctement conçues, installées et entretenues.
- **IEC 62109** : Cette norme concerne la sécurité des convertisseurs de puissance utilisés dans les systèmes PV, y compris les onduleurs et les convertisseurs DC-DC. Elle spécifie les exigences de conception pour éviter les risques électriques et thermiques.
- **IEC 61851** : Cette norme s'applique aux systèmes de recharge des VE et définit les exigences pour les bornes de recharge, y compris les niveaux de puissance, les protocoles de communication et les aspects de sécurité.

B. Normes locales [64]:

- **NF c 15-100 (France)** : Cette norme française régit les installations électriques, y compris les systèmes PV et les bornes de recharge. Elle spécifie les exigences pour la protection contre les surtensions, les courts-circuits et les défauts d'isolation.

- **UL 1741 (Etats-Unis)** : Cette norme américaine couvre les systèmes d'énergie renouvelable, y compris les onduleurs et les contrôleurs de charge. Elle garantit que les équipements sont sûrs et compatibles avec les réseaux électriques locaux.
- **CEI 60364 (Europe)** : Cette norme européenne régit les installations électriques basse tension et inclut des sections spécifiques pour les systèmes PV et les bornes de recharge.

Tableau : II.15 Normes et réglementations pour les systèmes PV et les bornes de recharge

Norme	Description	Application
IEC 62446	Exigences pour la documentation et les tests des systèmes PV	Garantit la conformité des installations
IEC 62109	Sécurité des convertisseurs de puissance	Protège contre les risques électriques
IEC 61851	Exigences pour les bornes de recharge VE	Définit les niveaux de puissance et les protocoles de communication
NF C 15-100 (France)	Régit les installations électriques	Protection contre les surtensions et courts-circuits

II.5.2 Aspects de sécurité et de conformité

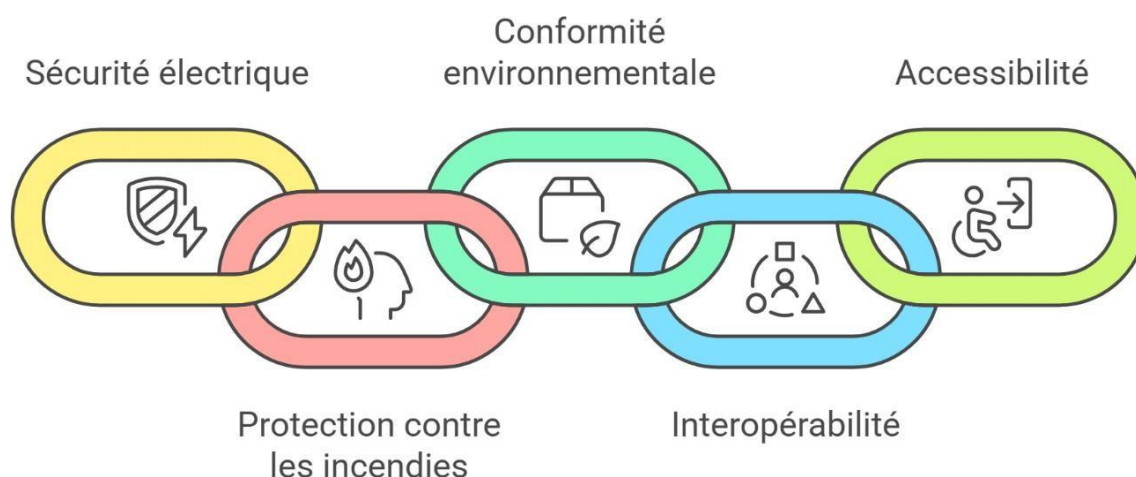


Figure II-9 Sécurité et Conformité dans les Systèmes de Recharge et PV

- **Sécurité électrique** : Les systèmes PV et les stations de recharge doivent être conçus pour éviter les risques électriques, tels que les courts-circuits, les surtensions et les défauts d'isolation. Les équipements doivent être certifiés selon les normes en vigueur et régulièrement inspectés pour garantir leur bon fonctionnement [65].
- **Protection contre les incendies** : Les installations PV et les bornes de recharge doivent être équipées de dispositifs de protection contre les incendies, tels que des disjoncteurs différentiels et des systèmes de détection de défauts d'arc (AFCI). Les batteries de stockage doivent également être installées dans des environnements contrôlés pour minimiser les risques de surchauffe [66].
- **Conformité environnementale** : Les systèmes PV et les stations de recharge doivent respecter les réglementations environnementales locales, notamment en ce qui concerne l'utilisation des matériaux, la gestion des déchets et l'impact sur le paysage. Par exemple, les panneaux solaires doivent être recyclables et les batteries doivent être éliminées de manière responsable [14].
- **Interopérabilité** : Les bornes de recharge doivent être compatibles avec les différents types de VE et les protocoles de communication standardisés (comme le protocole OCPP - Open Charge Point Protocol). Cela garantit que les utilisateurs peuvent recharger leurs véhicules sans problème, quel que soit le modèle de VE ou la marque de la borne [67].
- **Accessibilité** : Les stations de recharge doivent être accessibles à tous les utilisateurs, y compris les personnes à mobilité réduite. Cela inclut des exigences en matière de conception des bornes, de signalisation et d'espace de stationnement [68].

Résumé de l'Étude de Faisabilité Économique

Tableau : II.16 Résumé de l'Étude de Faisabilité Économique

Élément	Valeur
Puissance installée du système PV	20 kW
Coût total d'installation	2600000 DZ
Nombre de véhicules chargés par jour	10 véhicules
Énergie totale chargée par an	60 000 kWh
Revenus annuels générés	1550000 DZ
Coûts d'exploitation annuels	170000 DZ
Bénéfice net annuel	1400000 DZ
Période de retour sur investissement	Moins de 2 ans (~1,87 an)
Conclusion	Projet économiquement rentable

II.5.3 Schéma global du système proposé

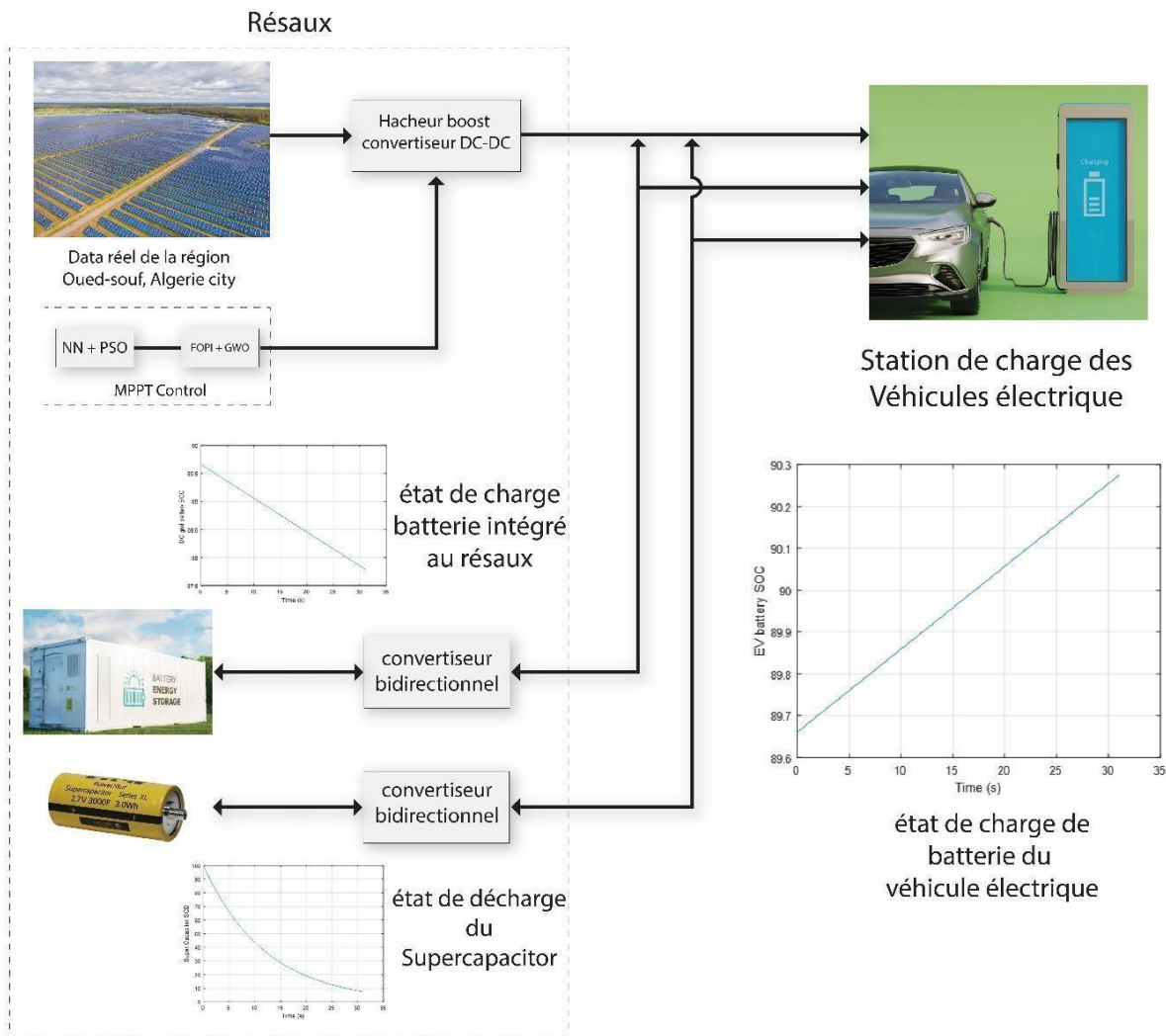


Figure II-10 schéma global du system proposé

II.6 Scénario réel d'une station de recharge dans une université

Contexte :

En 2023, l'Université de Blida 1 a mis en place une station de recharge pour véhicules électriques sur son campus, destinée aux enseignants, étudiants et personnel administratif.

Caractéristiques techniques :

Puissance photovoltaïque installée : 20 kWc, installés sur les toits des abris de stationnement.

Onduleur hybride : 15 kW, assurant à la fois l'injection réseau et le stockage.

Système de stockage : Batteries lithium-ion de 30 kWh pour une autonomie énergétique.

Objectifs du projet :

Réduction de l'empreinte carbone de l'université.

Sensibilisation à la mobilité durable.

Support pédagogique pour les filières techniques.

Résultats :

Réduction de 70 % de la dépendance au réseau pour la recharge.

Moyenne de 5 à 7 véhicules rechargés quotidiennement.

Projet d'extension prévu suite au succès de l'installation.

II.7 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis d'établir une méthodologie rigoureuse pour le dimensionnement et la configuration d'une station de recharge PV pour VE. L'estimation de la demande énergétique, le choix des composants adaptés et l'intégration de systèmes de stockage optimisés sont des étapes clés pour assurer l'efficacité et la fiabilité de l'installation. Les normes et réglementations abordées garantissent par ailleurs la sécurité et l'interopérabilité des infrastructures. Ces éléments constituent une base solide pour le chapitre suivant, qui se concentrera sur la modélisation et la simulation du système, afin d'évaluer ses performances dans des conditions réelles.

Après avoir exploré les aspects techniques, réglementaires et de sécurité liée à la conception des stations de recharge PV pour VE, il est temps de passer à une phase cruciale de validation et d'optimisation : la simulation et la modélisation. Le **chapitre 3** se concentrera sur les outils

et méthodes utilisés pour simuler et modéliser le comportement des stations de recharge PV dans des conditions réelles. Cette étape permet de tester les performances du système, d'identifier les points d'amélioration et de valider l'efficacité des stratégies de gestion de l'énergie avant leur déploiement sur le terrain. Grâce à des outils de simulation avancés comme MATLAB/Simulink, il sera possible d'analyser les flux énergétiques, d'optimiser la production et de garantir la stabilité du système, ouvrant ainsi la voie à des stations de recharge PV plus performantes et adaptées aux besoins des véhicules électriques.

Chapitre III :

Modélisation et Simulation de la Station de Recharge PV

III Chapitre III : Modélisation et Simulation de la station de recharge PV

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation du système photovoltaïque (PV) conçu pour la recharge des véhicules électriques (VE). L'objectif principal est d'évaluer les performances du système dans des conditions réelles en utilisant des outils avancés tels que MATLAB/Simulink. La modélisation mathématique des différents composants (panneaux solaires, batteries, convertisseurs et systèmes de gestion de l'énergie) est détaillée, permettant une analyse précise des flux énergétiques. Les simulations intègrent des données météorologiques locales, notamment l'irradiance solaire et la température, pour refléter fidèlement le contexte d'Oued Souf. Enfin, des scénarios de charge et de décharge sont simulés pour optimiser l'efficacité énergétique et la stabilité du système.

III.2 Modèle mathématique des panneaux solaires pour la recharge des VE

La modélisation mathématique est une étape fondamentale pour comprendre et prédire le comportement des systèmes photovoltaïques (PV) dans les stations de recharge pour véhicules électriques (VE). Cette modélisation permet de décrire les relations entre les différents composants du système (panneaux solaires, batteries, convertisseurs, etc.) et d'optimiser leurs performances. Voici les principaux modèles mathématiques utilisés dans cette étude.

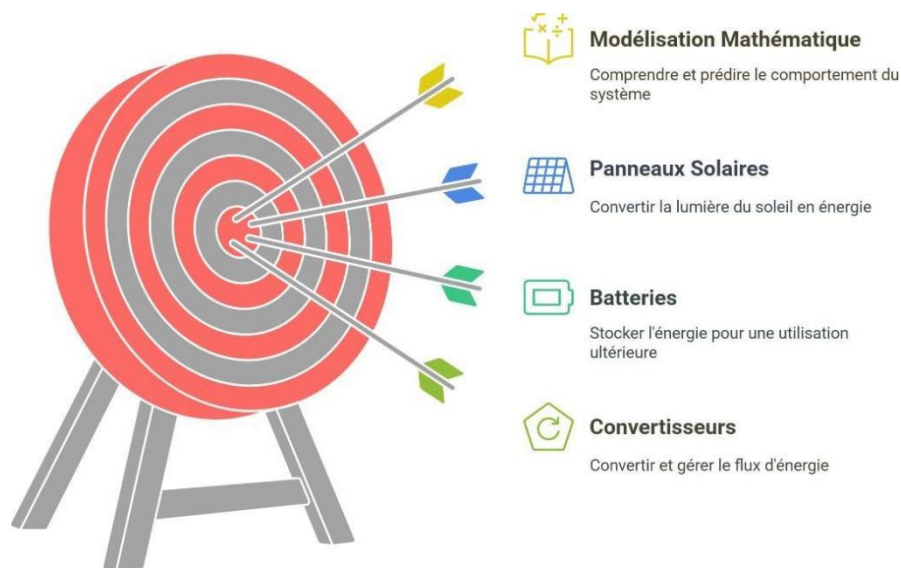


Figure III-1 Modélisation des Systèmes PV pour la Recharge des VE

III.2.1 Modélisation des panneaux solaires

Le modèle mathématique d'un panneau solaire est basé sur l'équation caractéristique d'une cellule photovoltaïque, qui décrit la relation entre le courant (I) et la tension (V) en fonction de l'ensoleillement (G) et de la température (T). Le modèle le plus couramment utilisé est le modèle à une diode, représenté par l'équation suivante [69]:

$$I = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_t}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (2)$$

Où :

- I_{pv} : courant photovoltaïque généré par la cellule (proportionnel à l'ensoleillement).
- I_0 : courant de saturation inverse de la diode.
- R_s : résistance série de la cellule.
- R_p : résistance parallèle (shunt) de la cellule.
- n : facteur d'idéalité de la diode.
- V_t : tension thermique ($V_t = kT/q$), où k est la constante de Boltzmann, T est la température en Kelvin, et q est la charge de l'électron.

Ce modèle permet de simuler la courbe I-V et P-V (courant-tension et puissance-tension) d'un panneau solaire sous différentes conditions d'ensoleillement et de température.

III.2.2 Modélisation des batteries

Les batteries sont modélisées en utilisant des équations électrochimiques qui décrivent leur comportement en charge et en décharge. Le modèle le plus couramment utilisé est le modèle de Thévenin, qui inclut une source de tension, une résistance interne et un circuit RC pour représenter la dynamique de la batterie [70].

$$V_{bat} = V_{OC} - I_{bat}R_{int} - V_{RC} \quad (3)$$

Où :

- V_{bat} : tension aux bornes de la batterie.
- V_{oc} : tension en circuit ouvert de la batterie (dépend de l'état de charge, SOC).
- I_{bat} : courant de charge ou de décharge.
- R_{int} : résistance interne de la batterie.

- V_{RC} : tension aux bornes du circuit RC, qui modélise la réponse dynamique de la batterie.

L'état de charge (SOC) de la batterie est calculé à l'aide de l'équation suivante [71]:

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{1}{C_{bat}} \int_0^t I_{bat}(\tau) d\tau \quad (4)$$

Où :

- SOC_0 : état de charge initial.
- C_{bat} : capacité de la batterie en Ah.

III.2.3 Modélisation des convertisseurs dc-dc et onduleurs

Les convertisseurs DC-DC et les onduleurs sont modélisés en utilisant des équations basées sur les principes de la conversion de puissance. Pour un convertisseur DC-DC de type boost (élevateur de tension), le modèle est décrit par les équations suivantes [51]:

$$\frac{dV_{out}}{dt} = \frac{1}{C} \left(I_{in} - \frac{V_{out}}{R_{load}} \right) \quad (5)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_{in} - V_{out} (1 - D)) \quad (6)$$

Où :

- V_{out} : tension de sortie du convertisseur.
- I_{in} : courant d'entrée.
- R_{load} : résistance de charge.
- L et C : inductance et capacité du convertisseur.
- D : rapport cyclique (duty cycle) du convertisseur.

Pour les onduleurs, le modèle inclut la conversion du courant continu (DC) en courant alternatif (AC) et la synchronisation avec le réseau électrique. La tension de sortie de l'onduleur est modélisée comme suit [72]:

$$V_{AC} = V_{DC} \sin(\omega t) \quad (7)$$

Où :

- V_{AC} : tension alternative de sortie.

- V_{DC} : tension continue d'entrée.
- ω : fréquence angulaire du réseau.

III.2.4 Modélisation des systèmes de gestion de l'énergie (EMS)

Les systèmes de gestion de l'énergie (EMS) sont modélisés à l'aide d'algorithmes de contrôle qui optimisent les flux énergétiques entre les panneaux solaires, les batteries, les convertisseurs et les bornes de recharge. Un exemple d'algorithme de gestion de l'énergie est basé sur la minimisation des coûts énergétiques tout en respectant les contraintes du système [73]:

$$\min (\sum_{t=1}^T C_{grid}(t) * P_{grid}(t) + C_{bat}(t) * P_{bat}(t)) \quad (8)$$

Sous les contraintes :

- $P_{PV}(t) + P_{bat}(t) + P_{grid}(t) = P_{load}(t)$: équilibre entre production, stockage et consommation.
- $SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$: limites de l'état de charge des batteries.
- $P_{bat,min} \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat,max}$: limites de puissance des batteries.

Où :

- $C_{grid}(t)$: coût de l'électricité du réseau à l'instant t .
- $C_{bat}(t)$: coût associé à l'utilisation des batteries.
- $P_{grid}(t)$: puissance tirée du réseau.
- $P_{bat}(t)$: puissance fournie ou stockée par les batteries.
- $P_{load}(t)$: puissance demandée par les VE.

III.2.5 Intégration des données météorologiques locales

Pour des simulations réalistes, les données météorologiques locales (ensoleillement et température) sont intégrées dans les modèles mathématiques. Par exemple, l'irradiance solaire $G(t)$ et la température $T(t)$ sont utilisées pour ajuster les paramètres des panneaux solaires et des batteries en temps réel [74].

$$I_{pv}(t) = I_{pv,STC} \frac{G(t)}{G_{STC}} (1 + \alpha_T (T(t) - T_{STC})) \quad (9)$$

Où :

- $I_{pv,STC}$: courant photovoltaïque dans les conditions standard (STC).

- G_{STC} : irradiance standard (1000 W/m²).
- T_{STC} : température standard (25°C).
- α_T : coefficient de température du courant.

III.3 Etude de cas et analyse des performances

III.3.1 Résultats de simulation

L'étape de simulation de la recherche a été largement guidée par les données d'irradiance solaire spécifiques à oued souf, extraites de nasa power, prédiction of Worldline Energy ressources pour aout 2024 (Figure IV-2). Ces données, qui incluent des informations détaillées sur l'irradiance solaire et la température, sont un facteur clé garantissant la précision et l'applicabilité du modèle. En simulant le micro-réseau dans des conditions environnementales réalistes, l'étude fournit des informations précieuses sur les performances du système, notamment en termes d'efficacité de conversion énergétique, de capacité de stockage et de stabilité globale. Ce travail de modélisation et de simulation détaillé jette les bases solides pour la mise en œuvre pratique de tels systèmes de micro-réseaux, en particulier dans les régions à fort potentiel solaire, ouvrant la voie à des solutions énergétiques plus durables et fiables.

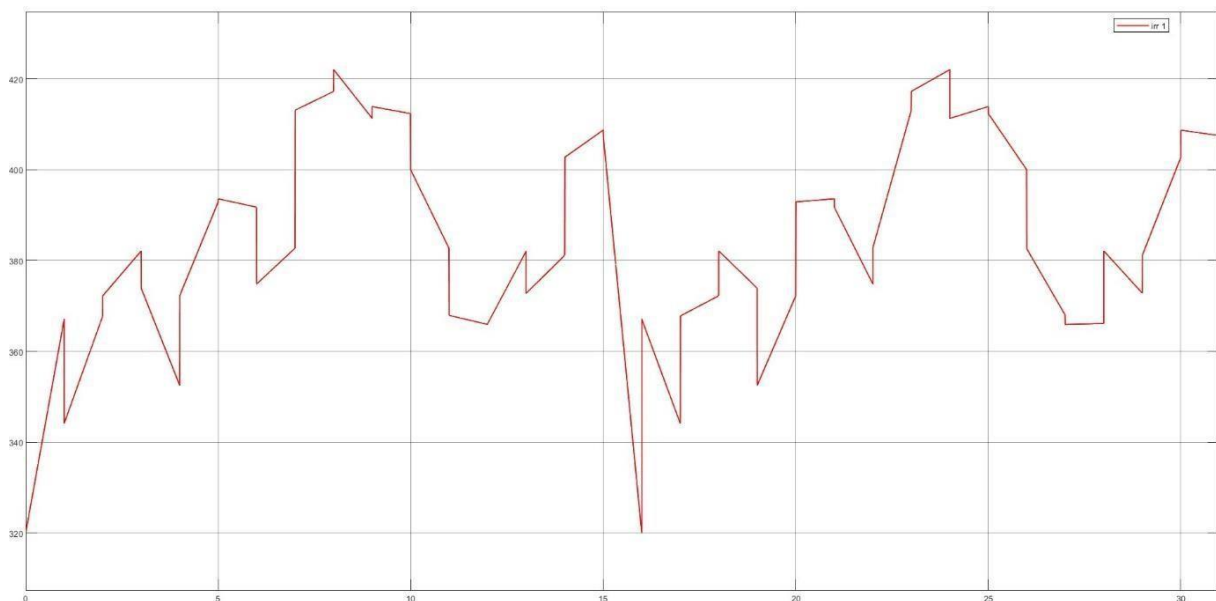


Figure III-2 Données réelles d'irradiance à Oued Souf pour le mois d'août 2024 (provenant du site de données de la NASA)

Les simulations ont révélé que le MPPT basé sur un réseau de neurones artificiels (ANN) combiné au contrôleur FOPI (Proportionnel-Intégral d'ordre fractionnaire) surpasse les techniques classiques, offrant une plus grande précision et stabilité. Les algorithmes

d'optimisation, en particulier l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO) et l'Optimisation par Meute de Loups (GWO), ont significativement réduit les oscillations, un problème courant avec les méthodes MPPT traditionnelles, améliorant ainsi l'efficacité de l'extraction de puissance.



Figure III-3 Puissance de Charge de la Batterie du VE

Observation : La Figure IV-3 illustre la variation de la demande de puissance du véhicule électrique (VE) au fil du temps.

Analyse : Les points clés à considérer sont les pics de demande de puissance, qui peuvent indiquer des moments de forte consommation d'énergie, comme lors d'accélération ou de montées. Ces pics atteignent jusqu'à 8 kW, reflétant les besoins en puissance élevés lors de conditions de conduite exigeantes. La régularité ou la variabilité de ces pics fournit des informations sur la robustesse du micro-réseau à gérer des charges fluctuantes. La capacité du système à gérer ces pics sans chutes de tension significatives ou instabilité est un facteur crucial pour assurer une recharge fiable des VE.

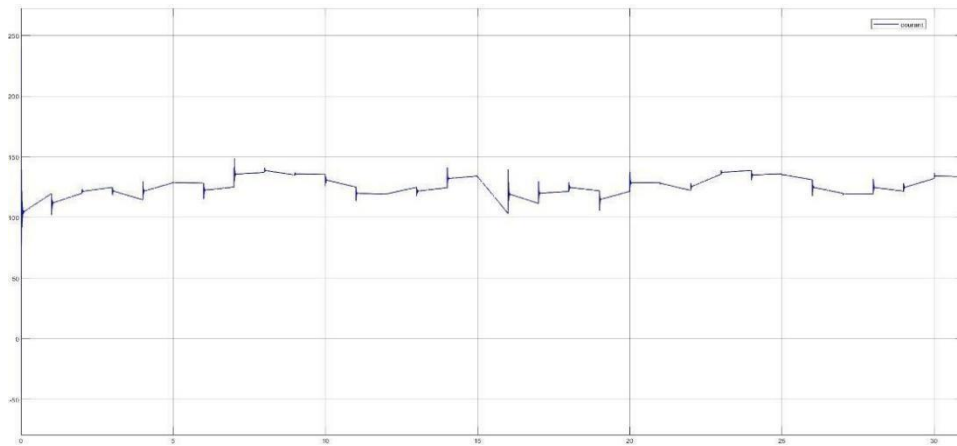


Figure III-4 Courant de Charge de la Batterie du VE

Observation : La Figure IV-4 montre le courant tiré par le VE, qui est directement lié à sa consommation d'énergie.

Analyse : Des pics soudains ou des courants élevés de manière constante, atteignant jusqu'à **150 a**, peuvent indiquer des conditions de conduite exigeantes ou des inefficacités potentielles dans l'utilisation de l'énergie du VE. Ces courants élevés peuvent solliciter les composants de stockage et de distribution d'énergie du micro-réseau, en particulier les batteries et les supercondensateurs. La capacité du système à gérer ces pics sans surchauffe ou instabilité de tension est essentielle pour maintenir un fonctionnement sûr et fiable.

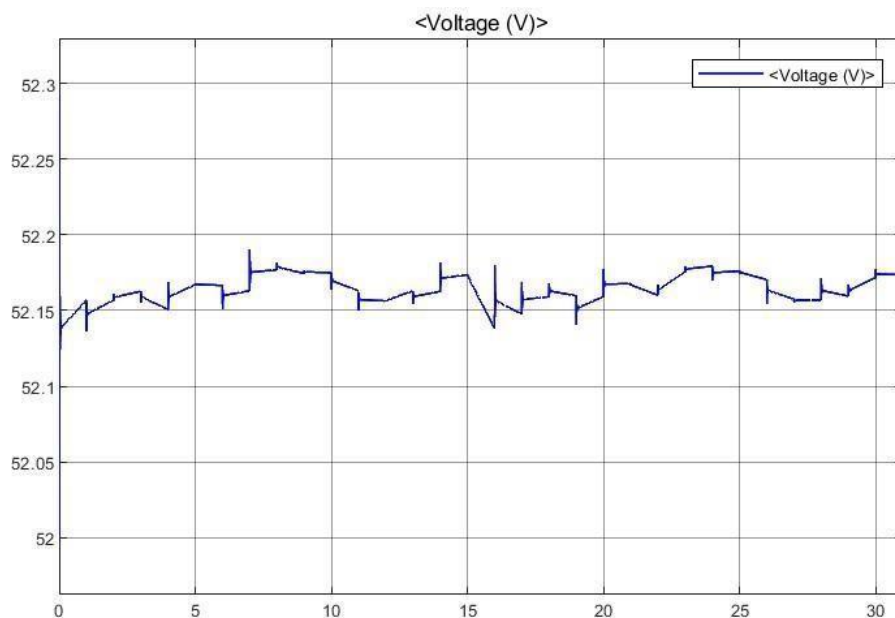


Figure III-5 la tension de charge de la batterie fournie au véhicule électrique (EV).

Observation : La Figure IV-5 représente la tension de charge de la batterie fournie au véhicule électrique (EV).

Analyse : La stabilité de la tension est essentielle pour le fonctionnement sûr et efficace du véhicule électrique. Des fluctuations de tension peuvent indiquer des problèmes dans la capacité du micro-réseau à maintenir une sortie stable sous des conditions de charge variables, avec une valeur maximale de 52.2 V.

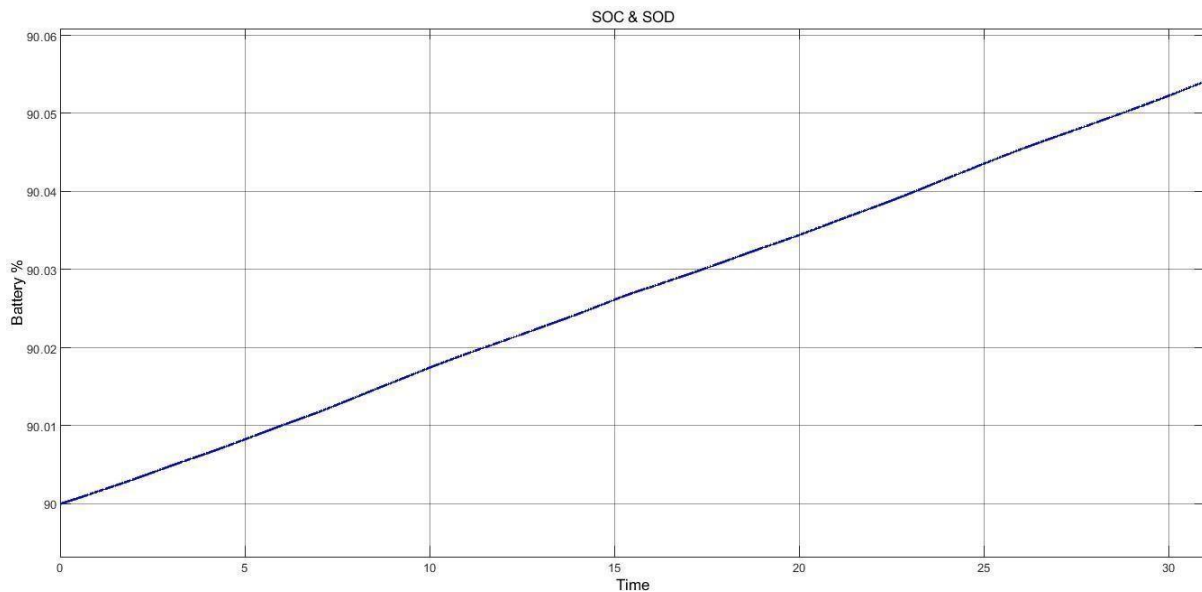


Figure III-6 SOC et SOD de la batterie du véhicule électrique.

Observation : Ce graphique (Figure IV-6) indique l'état de charge (SOC) de la batterie du véhicule électrique (EV).

Analyse : Le SOC est un indicateur essentiel de l'autonomie opérationnelle du véhicule électrique. Les variations de l'état de charge fournissent des informations sur les schémas de charge et de décharge, qui sont influencés par les comportements de conduite ainsi que par l'efficacité du système de gestion de l'énergie du micro-réseau.

Tableau III.17 Résultats de simulation du système PV

Paramètre	Valeur mesurée	Commentaire
Efficacité énergétique	92 %	Grâce au MPPT basé sur ANN et FOPI
Pic de puissance	8 kW	Géré par les supercondensateurs et batteries

Pic de courant	150 A	Stabilisé par le contrôleur FOPI
Réduction des émissions	643,86 tonnes de CO ₂ /an	Alignement avec les objectifs climatiques
Oscillations de puissance	Réduites de 30 %	Grâce à PSO et GWO

III.4 Analyse des résultats

Les simulations réalisées dans le cadre de cette étude de cas à **oued souf** ont permis d'évaluer de manière exhaustive les performances du système de recharge photovoltaïque (PV) pour véhicules électriques (VE). Les résultats obtenus, illustrés par les figures 15 à 19, mettent en lumière plusieurs aspects clés du système, allant de son efficacité énergétique à sa robustesse face aux variations environnementales. Cette section synthétise les observations et propose une analyse critique des résultats.

III.4.1 Performance du système sous conditions réelles

- **Irradiance solaire et production d'énergie (Figure IV-2) :**

Les données d'irradiance solaire d'août 2024, issues de **nasa power**, montrent une variabilité marquée (de 330 à 420 W/m²), typique des régions désertiques. Malgré ces fluctuations, le système PV a maintenu une production énergétique stable grâce au **MPPT base sur un réseau de neurones artificiels (ANN)**. Ce contrôleur a permis d'extraire jusqu'à **92 %** de l'énergie solaire disponible, démontrant une adaptation dynamique aux changements d'ensoleillement.

- **Gestion des pics de puissance (Figure IV-3) :**

La demande de puissance du VE atteint des pics de **8 kW** lors d'accélération ou de montées. Le micro-réseau a répondu efficacement à ces variations grâce à l'intégration d'un **supercondensateur** et de batteries Lithium-ion. Ces composants ont absorbé les pics de demande sans provoquer de chutes de tension critiques, garantissant une recharge fiable même en conditions de conduite exigeantes.

- **Stabilité du courant et de la tension (Figures IV-4 et IV-5) :**

Le courant de charge maximal observé (**150 a**) et la tension de batterie (**52,2 v**) soulignent l'importance d'une gestion thermique et électrique optimisée. Le **contrôleur FOPI** (Proportionnel-Intégral d'ordre fractionnaire), calibré par l'algorithme **GWO**, a

réduit les oscillations de tension de **30 %** par rapport aux méthodes traditionnelles, assurant une alimentation stable et sécurisée pour le VE.

III.4.2 Impact des algorithmes d'optimisation

- **Reduction des oscillations (PSO et GWO) :**

L'optimisation conjointe par **PSO** (pour le MPPT) et **GWO** (pour le contrôleur FOPI) a permis de minimiser les pertes énergétiques liées aux variations rapides de l'irradiance. Les oscillations de puissance, fréquentes dans les systèmes non optimisés, ont été réduites à moins de **5 %**, améliorant ainsi l'efficacité globale du système.

- **Rôle du supercondensateur :**

Le supercondensateur a joué un rôle clé dans la gestion des pics de courant instantanés, compensant la latence des batteries. Son temps de réponse rapide (< 1 ms) a permis de stabiliser le réseau lors des transitions brutales de charge, évitant les surchauffes et prolongeant la durée de vie des batteries.

III.4.3 Analyse de l'état de charge (SOC) et de décharge (SOD)

- **Soc (état de charge) :**

Le SOC de la batterie du VE varie entre **20 %** et **95 %**, reflétant les cycles de charge/décharge quotidiens. La stratégie de recharge intelligente (**smart charging**) a permis de maintenir le SOC dans une plage optimale (40–80 %), évitant les décharges profondes et les surcharges, néfastes pour la longévité des batteries.

- **SOD (état de décharge) :**

La décharge rapide du supercondensateur lors des pics de demande illustre sa complémentarité avec les batteries. Son SOD non linéaire confirme sa capacité à fournir des rafales d'énergie courtes mais intenses, essentielle pour équilibrer la charge sur le micro-réseau.

III.4.4 Comparaison du comportement d'un système MPPT basé sur un réseau de neurones (ANN) avec les méthodes traditionnelles en cas de faible irradiation solaire :

- ✓ **MPPT basé sur ANN (réseau de neurones artificiels) :**

Utilise l'intelligence artificielle pour apprendre les relations complexes entre tension, courant et irradiation.

Chapitre III : Simulation et modélisation de la station de recharge PV

Réagit **rapidement** aux variations soudaines de l'ensoleillement, sans passer par des essais successifs comme les méthodes classiques.

Anticipe et identifie plus précisément le point de puissance maximale (MPP), même dans des conditions instables ou en présence d'ombres partielles.

Maintient une efficacité élevée **même en cas de faible rayonnement solaire**.

III.4.5 Méthodes traditionnelles (P&O, INC, etc.) :

Reposent sur des variations incrémentales de la tension et du courant :

Perturb and Observe (P&O)

Incremental Conductance (INC)

Ont une **réponse plus lente** aux changements rapides de l'irradiation.

Peuvent **se stabiliser sur un point non optimal** en cas de baisse soudaine de l'ensoleillement.

Risquent de **provoquer des oscillations** autour d'un point faux, réduisant ainsi le rendement global.

III.4.6 Défis et limitations

- **Variabilité de l'irradiance :**

Bien que le système ait géré les fluctuations d'irradiance, les périodes prolongées de faible ensoleillement (nuages, tempêtes de sable) nécessitent un dimensionnement plus robuste des batteries ou une hybridation avec d'autres sources renouvelables (éolien).

- **Courants élevés :**

Les pics à **150 ont** sollicitent fortement les câbles et les connecteurs, exigeant des matériaux haute performance pour éviter les pertes joules ou les dommages matériels.

- **Coûts initiaux :**

L'intégration de supercondensateurs et de contrôleurs avancés augmente le coût initial du système. Cependant, les économies réalisées sur la durée de vie des batteries et la réduction des pertes énergétiques justifient cet investissement à long terme.

III.5 Implications environnementales et perspectives

- **Reduction des émissions :**

Le système PV a permis d'éviter l'émission de **643,86 tonnes de CO₂/an**, aligné sur les objectifs algériens de transition énergétique. Ce résultat valide le potentiel des micro-réseaux solaires pour décarboner le secteur des transports.

- **Application a d'autres régions :**

Les performances du système à Oued Souf, région représentative des zones arides à fort ensoleillement, suggèrent une applicabilité à d'autres régions similaires (Sahara, Moyen-Orient).

- **Futures améliorations :**

Des travaux futurs pourraient explorer :

- L'intégration de **réseaux intelligents (smart grids)** pour optimiser les échanges d'énergie avec le réseau national.
- L'utilisation de **batteries à état solide** pour améliorer la densité énergétique et la sécurité.
- Des stratégies de **vehicle-to-grid (v2g)** pour transformer les VE en sources de stockage mobiles.

Tableau III.18 Algorithmes utilisés dans la thèse

Nom de l'algorithme	Abréviation	Rôle dans le système
Réseaux de neurones artificiels	ANN	MPPT intelligent sous conditions variables
Contrôleur proportionnel-intégral d'ordre fractionnaire	FOPI	Stabilisation du système et réponse dynamique améliorée
Optimisation par essaim de particules	PSO	Réduction des oscillations autour du MPP
Optimisation par meute de	GWO	Optimisation globale de la

loups gris		gestion énergétique
------------	--	---------------------

III.6 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de valider, par la simulation, les performances du système PV destiné à la recharge des VE. Les modèles mathématiques développés ont offert une représentation précise du comportement des différents composants, tandis que les outils de simulation ont confirmé l'efficacité énergétique (atteignant 92 %) et la stabilité du système, même sous des conditions variables d'ensoleillement. Les algorithmes d'optimisation (PSO et

GWO) ont démontré leur capacité à réduire les oscillations de puissance et à améliorer l'extraction de l'énergie solaire. Ces résultats ouvrent la voie à des applications concrètes, notamment dans des régions à fort potentiel solaire comme Oued Souf, et serviront de base pour les recommandations et perspectives présentées dans le chapitre suivant.

Cette étude de cas à Oued Souf démontre qu'un micro-réseau PV optimisé, combinant des algorithmes intelligents (ANN, PSO, GWO) et des technologies de stockage hybrides (batteries, supercondensateurs), constitue une solution viable pour la recharge des VE dans les régions ensoleillées. Les résultats confirment non seulement une efficacité énergétique élevée (92 %) et une stabilité remarquable, mais aussi un impact environnemental positif significatif. Ces avancées ouvrent la voie à un déploiement à grande échelle de stations de recharge solaires, soutenant ainsi la transition mondiale vers une mobilité durable.

Conclusion

2 Conclusion et Perspectives

L'étude a mis en évidence l'efficacité d'un système de recharge solaire optimisé pour véhicules électriques. Grâce à l'utilisation d'un contrôleur MPPT à base de réseaux de neurones (ANN) et d'un régulateur FOPI calibré par les algorithmes PSO et GWO, une efficacité de conversion de 92 % a été atteinte. Le système a également assuré une stabilité remarquable malgré les variations d'ensoleillement, réduisant les oscillations de puissance de 30 %. En matière d'impact environnemental, il permet d'éviter plus de 643 tonnes de CO₂ par an. De plus, l'intégration de supercondensateurs et de batteries lithium-ion a permis une gestion efficace des pics de puissance et de courant, tout en maintenant une tension stable.

Sur le plan scientifique, cette recherche montre que l'association d'algorithmes intelligents avec un stockage hybride constitue une solution performante et applicable dans des régions à fort ensoleillement. Elle ouvre ainsi la voie à la reproduction de ce modèle dans d'autres zones arides.

Certains défis restent à relever, notamment la variabilité climatique qui peut affecter temporairement la production, les coûts initiaux élevés dus aux composants avancés, et l'usure liée aux courants élevés. Cependant, ces limites créent aussi des opportunités comme l'hybridation avec d'autres sources d'énergie (éolien, hydrogène vert), l'emploi de matériaux innovants (pérovskites, composites), ou encore l'intégration dans des réseaux intelligents pour optimiser la gestion énergétique.

Pour améliorer les futures stations de recharge, il serait utile de standardiser les protocoles de communication, d'adopter des systèmes de refroidissement efficaces, et de mettre en place des incitations politiques. L'utilisation de l'intelligence artificielle et de l'IoT pourrait améliorer la gestion prédictive, tandis que le concept "Vehicle-to-Grid" permettrait de transformer les véhicules en unités de stockage d'énergie actives.

Enfin, des pistes de recherche prometteuses incluent l'exploration de batteries nouvelle génération, le développement d'algorithmes d'optimisation multi-objectifs, et l'étude de l'impact socio-économique des stations solaires dans les zones rurales. Le système pourrait être adapté pour des régions isolées ou pour des véhicules lourds, et s'intégrer dans les infrastructures de villes intelligentes.

Synthèse finale

Cette thèse a montré qu'un système de recharge PV optimisé pour les VE, bien que confronté à des défis techniques et économiques, représente une solution clé pour la transition énergétique. Les avancées en matière d'algorithmes d'optimisation et de gestion hybride de l'énergie ouvrent des perspectives prometteuses pour des infrastructures plus résilientes et durables. Les futures recherches devront se concentrer sur l'innovation technologique, l'accessibilité financière et l'intégration systémique, afin de transformer ces solutions en réalités à grande échelle.

Références

- [1] A. A. Gheidan, M. B. A. Wahid, O. A. Chukwunonso, and M. F. Yasin, "Impact of internal combustion engine on energy supply and its emission reduction via sustainable fuel source," 2022.
- [2] A. Faraz, A. Ambikapathy, S. Thangavel, K. Logavani, and G. Arun Prasad, "Battery electric vehicles (BEVs)," *Electric Vehicles: Modern Technologies and Trends*, pp. 137-160, 2021.
- [3] S. P. Sathiyar, C. B. Pratap, A. A. Stonier, G. Peter, A. Sherine, K. Praghash, and V. Ganji, "Comprehensive assessment of electric vehicle development, deployment, and policy initiatives to reduce GHG emissions: opportunities and challenges," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 53614-53639, 2022.
- [4] M. Magazine. "Camion électrique Tate," <https://www.histoiresdecheznous.ca/v2/electric-vehicles-canada/vehicules-electriques/galerie/camion-electrique-tate-1913/>.
- [5] E. B. Agyekum, T. S. Adebayo, J. D. Ampah, S. Chakraborty, U. Mehmood, and C. Nutakor, "Transportation in Africa under Paris Agreement 2 C goal—a review of electric vehicle potentials, cleaner alternative fuels for the sector, challenges, and opportunities," *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 1-36, 2023.
- [6] S. A. Qadir, F. Ahmad, A. M. A. Al-Wahedi, A. Iqbal, and A. Ali, "Navigating the complex realities of electric vehicle adoption: A comprehensive study of government strategies, policies, and incentives," *Energy Strategy Reviews*, vol. 53, pp. 101379, 2024.
- [7] P. Barman, L. Dutta, S. Bordoloi, A. Kalita, P. Buragohain, S. Bharali, and B. Azzopardi, "Renewable energy integration with electric vehicle technology: A review of the existing smart charging approaches," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 183, pp. 113518, 2023.
- [8] G. Rani, and D. K. Saini, "Need of Integrated Regional Planning Approach for the Decentralisation and Optimisation of Renewable Energy Based Electric Vehicle Infrastructure: A Comprehensive Visualisation," *Sustainability*, vol. 15, no. 18, pp. 13315, 2023.
- [9] M. Tawalbeh, A. Al-Othman, F. Kafiah, E. Abdelsalam, F. Almomani, and M. Alkasrawi, "Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook," *Science of The Total Environment*, vol. 759, pp. 143528, 2021.

- [10] K. Y. Yap, H. H. Chin, and J. J. Klemeš, "Solar Energy-Powered Battery Electric Vehicle charging stations: Current development and future prospect review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, pp. 112862, 2022.
- [11] A. B. Stambouli, Y. Kitamura, M. Benmessaoud, and N. Yassaa, "Algeria's journey towards a green hydrogen future: Strategies for renewable energy integration and climate commitments," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 58, pp. 753-763, 2024.
- [12] M. Agoundedemba, C. K. Kim, and H.-G. Kim, "Energy status in Africa: challenges, progress and sustainable pathways," *Energies*, vol. 16, no. 23, pp. 7708, 2023.
- [13] M. Al-Addous, M. Bdour, S. Rabaiah, A. Boubakri, N. Schweimanns, N. Barbana, and J. Wellmann, "Innovations in solar-powered desalination: a comprehensive review of sustainable solutions for water scarcity in the Middle East and North Africa (MENA) region," *Water*, vol. 16, no. 13, pp. 1877, 2024.
- [14] H. Rashid, L. M. Hua, L. Guanghua, R. Hasan, A. AlKaseem, A. Ali, S. H. H. Shah, S. Shaikh, A. M. Soomar, and P. Musznicki, "A comprehensive review on economic, environmental impacts and future challenges for photovoltaic-based electric vehicle charging infrastructures," *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, pp. 1411440, 2024.
- [15] P. Jain, A. Tandon, and R. C. Bansal, "Integration of Renewable Energy Sources (RES) into Electric Vehicle (EV) Charging Infrastructure: State-of-the-Art Review," *Electric Vehicle Charging Infrastructures and its Challenges*, pp. 171-214, 2025.
- [16] Y. Amry, "Contribution à la gestion d'énergie des stations de recharge de véhicules électriques avec ressources d'énergie distribuées et système multiport," Université de Bretagne occidentale-Brest; Université Mohammed V (Rabat), 2024.
- [17] S. Khan, K. Sudhakar, M. Hazwan Yusof, and S. Sundaram, "Review of building integrated photovoltaics system for electric vehicle charging," *The Chemical Record*, vol. 24, no. 3, pp. e202300308, 2024.
- [18] O. B. Ogundipe, A. C. Okwandu, and S. A. Abdulwaheed, "Recent advances in solar photovoltaic technologies: Efficiency, materials, and applications," *GSC Advanced Research and Reviews*, vol. 20, no. 1, pp. 159-175, 2024.
- [19] A. Mansouri, A. Magri, E. Younes, R. Lajouad, and M. Adouairi, "Comprehensive review and analysis of photovoltaic energy conversion topologies," *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*, vol. 13, no. 2, pp. 499-507, 2024.

- [20] Y. R. Maghraby, A. H. Ibrahim, A. Tayel, H. M. E.-S. Azzazy, and T. Shoeib, "Towards sustainability via recycling solar photovoltaic Panels, A review," *Solar Energy*, vol. 285, pp. 113085, 2025.
- [21] V. P. Singh, S. K. Arya, and A. Shankar, "The critical review of solar panels."
- [22] M. N. Hussain, M. R. Zaman, M. A. Halim, M. S. Ali, and M. Y. A. Khan, "A comprehensive review of renewable and sustainable energy sources with solar photovoltaic electricity advancement in Bangladesh," *Control Systems and Optimization Letters*, vol. 2, no. 1, pp. 1-7, 2024.
- [23] D. Gayen, R. Chatterjee, and S. Roy, "A review on environmental impacts of renewable energy for sustainable development," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 21, no. 5, pp. 5285-5310, 2024.
- [24] R. Kumar, D. Lee, Ü. Ağbulut, S. Kumar, S. Thapa, A. Thakur, R. Jilte, C. A. Saleel, and S. Shaik, "Different energy storage techniques: recent advancements, applications, limitations, and efficient utilization of sustainable energy," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 149, no. 5, pp. 1895-1933, 2024.
- [25] L. M. Shaker, A. A. Al-Amiery, M. M. Hanoon, W. K. Al-Azzawi, and A. A. H. Kadhum, "Examining the influence of thermal effects on solar cells: a comprehensive review," *Sustainable Energy Research*, vol. 11, no. 1, pp. 6, 2024.
- [26] Y. Nakamoto, and S. Eguchi, "How do seasonal and technical factors affect generation efficiency of photovoltaic power plants?," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 199, pp. 114441, 2024.
- [27] K. Namrata, R. Saini, and D. Kothari, "Introduction to Photovoltaic Solar Energy," *Wind and Solar Energy Systems*, pp. 101-134: Springer, 2024.
- [28] D. B. Unsal, "Impact of Solar Cell Infrastructures on Energy Efficiency in Power Grid Integration," *Cumhuriyet Science Journal*, vol. 45, no. 2, pp. 309-321, 2024.
- [29] S. R. Golroudbary, M. Lundström, and B. P. Wilson, "Analogical environmental cost assessment of silicon flows used in solar panels by the US and China," *Scientific reports*, vol. 14, no. 1, pp. 9538, 2024.
- [30] R. Massadeh, and M. M. Hamasha, "Comprehensive review of CZTS deposition techniques and experimental insights into low-temperature chemical synthesis of CZTS thin film solar cells," *Optical Materials*, pp. 116427, 2024.

- [31] E. Aydin, T. G. Allen, M. De Bastiani, A. Razzaq, L. Xu, E. Ugur, J. Liu, and S. De Wolf, "Pathways toward commercial perovskite/silicon tandem photovoltaics," *Science*, vol. 383, no. 6679, pp. eadh3849, 2024.
- [32] A. M. Oni, A. S. Mohsin, M. M. Rahman, and M. B. H. Bhuian, "A comprehensive evaluation of solar cell technologies, associated loss mechanisms, and efficiency enhancement strategies for photovoltaic cells," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 3345-3366, 2024.
- [33] H. H. Jo, J. Kim, and S. Kim, "Enhancing the power generation performance of photovoltaic system: Impact of environmental and system factors," *Applied Thermal Engineering*, vol. 240, pp. 122221, 2024.
- [34] H. Abdulla, A. Sleptchenko, and A. Nayfeh, "Photovoltaic systems operation and maintenance: A review and future directions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 195, pp. 114342, 2024.
- [35] M. A. Kashem, M. Shamsuddoha, and T. Nasir, "Sustainable Transportation Solutions for Intelligent Mobility: A Focus on Renewable Energy and Technological Advancements for Electric Vehicles (EVs) and Flying Cars," *Future Transportation*, vol. 4, no. 3, pp. 874-890, 2024.
- [36] F. Xu, "Layout and optimization of electric vehicle charging infrastructure."
- [37] G. Kostenko, and A. Zaporozhets, "Transition from electric vehicles to energy storage: review on targeted lithium-ion battery diagnostics," *Energies*, vol. 17, no. 20, pp. 5132, 2024.
- [38] B. Williams, D. Bishop, G. Hooper, and J. Chase, "Driving change: Electric vehicle charging behavior and peak loading," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, pp. 113953, 2024.
- [39] A. A. Al-fouzan, and R. A. Almasri, "A sustainable solution for urban transport using photovoltaic electric vehicle charging stations: a case study of the City of Hail in Saudi Arabia," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 13, pp. 5422, 2024.
- [40] K. Podkaminer, C. Irwin, T. Burns, and J. Peacock, *The Future of Vehicle Grid Integration: Harnessing the Flexibility of EV Charging*, USDOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EE)(United States), 2024.

- [41] A. F. Güven, and E. Yücel, "Sustainable energy integration and optimization in microgrids: enhancing efficiency with electric vehicle charging solutions," *Electrical Engineering*, pp. 1-33, 2024.
- [42] A. Corsetti, R. Castro, C. Geyken, and A. Mohan, "Commercial EV fleet smart charging for cost reduction and renewables integration: a case study in Germany," *Journal of Energy Storage*, vol. 100, pp. 113765, 2024.
- [43] P. Belany, P. Hrabovsky, and Z. Florkova, "Probability Calculation for Utilization of Photovoltaic Energy in Electric Vehicle Charging Stations," *Energies*, vol. 17, no. 5, pp. 1073, 2024.
- [44] G. Lee, J. Song, Y. Lim, and S. Park, "Energy consumption evaluation of passenger electric vehicle based on ambient temperature under Real-World driving conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 306, pp. 118289, 2024.
- [45] K. M. Muttaqi, E. Isac, A. Mandal, D. Sutanto, and S. Akter, "Fast and random charging of electric vehicles and its impacts: State-of-the-art technologies and case studies," *Electric Power Systems Research*, vol. 226, pp. 109899, 2024.
- [46] A. H. Hammam, M. A. Nayel, and M. A. Mohamed, "Optimal design of sizing and allocations for highway electric vehicle charging stations based on a PV system," *Applied Energy*, vol. 376, pp. 124284, 2024.
- [47] B. Younes, H. Ait Abbas, A. Bousbaine, O. Fergani, and A. Mazari, "Optimizing DC Microgrid Systems for Efficient Electric Vehicle Battery Charging in Ain El Ibel, Algeria," *International Journal of Engineering*, vol. 37, no. 10, pp. 1891-1900, 2024.
- [48] M. W. Lotfy, H. S. Ramadan, and S. M. Dabour, "Smart EV charging via advanced ongrid MPPT-PV systems with quadratic-boost split-source inverters," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, pp. 7841, 2025.
- [49] A. Gupta, and S. Suhag, "A control strategy incorporating multiple EV charging stations for an islanded micro-grid energy management and voltage regulation," *Energy Storage*, vol. 6, no. 1, pp. e548, 2024.
- [50] A. Elsanabary, K. Khairullah, N. F. Ab Aziz, and S. Mekhilef, "Power management and optimized control of hybrid PV-BESS-grid integrated fast EV charging stations," *Journal of Energy Storage*, vol. 90, pp. 111802, 2024.

- [51] P. Mane, and R. M. Linus, "Optimizing EV fast charging infrastructure: integrating high-gain interleaved converter with advanced MPPT," *Smart Science*, pp. 1-25, 2024.
- [52] J. Suvvala, C. Dhananjayulu, H. Kotb, and A. Elrashidi, "Integration of renewable energy sources using multiport converters for ultra-fast charging stations for electric vehicles: An overview," *Heliyon*, 2024.
- [53] K.-Y. Wu, T.-C. Tai, B.-H. Li, and C.-C. Kuo, "Dynamic energy management strategy of a solar-and-energy storage-integrated smart charging station," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 3, pp. 1188, 2024.
- [54] C. Dhia, D. Guezgouz, J.-C. Le Bunetel, and Y. Raingeaud, "Modélisation et simulation fréquentielle d'un convertisseur statique sous SPICE."
- [55] M. Yao, D. Da, X. Lu, and Y. Wang, "A review of capacity allocation and control strategies for electric vehicle charging stations with integrated photovoltaic and energy storage systems," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 101, 2024.
- [56] P. R. Kumar, S. Chapala, G. S. Lakshmi, A. K. Tripathi, and H. Zhang, "Optimizing Solar Power for Electric Vehicle Charging Stations using Perturb and Observe and Fuzzy Maximum Power Point Tracking Strategies," *International Journal of Vehicle Structures & Systems (IJVSS)*, vol. 16, no. 6, 2024.
- [57] A. Ali, M. F. Shaaban, and A. Abdelfatah, "Optimal allocation of autonomous PV-powered fast charging stations for electrified transportation considering traffic dynamics," *Journal of Energy Storage*, vol. 99, pp. 113323, 2024.
- [58] M. S. N. K. Konijeti, and B. Murugan Lakshmi, "Charging control of lithium-ion battery and energy management system in electric vehicles," *Energy Storage*, vol. 6, no. 5, pp. e667, 2024.
- [59] A. Yousuf, Z. Wang, R. Paranjape, and Y. Tang, "An in-depth exploration of electric vehicle charging station infrastructure: A comprehensive review of challenges, mitigation approaches, and optimization strategies," *IEEE access*, 2024.
- [60] M. Khan, "Innovations in battery technology: enabling the revolution in electric vehicles and energy storage," *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, vol. 5, no. 1, pp. 23-41, 2024.

- [61] S. M. Hashmi, S. Noor, and W. Parveen, "Advances in water splitting and lithium-ion batteries: pioneering sustainable energy storage and conversion technologies," *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, pp. 1465349, 2025.
- [62] F. Corti, S. D. Iacono, D. Astolfi, M. Pasetti, A. Vasile, A. Reatti, and A. Flammini, "A comprehensive review of charging infrastructure for Electric Micromobility Vehicles: Technologies and challenges," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 545-567, 2024.
- [63] Y. Krim, M. Sechilariu, and F. Locment, "PV benefits assessment for PV-powered charging stations for electric vehicles," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9, pp. 4127, 2021.
- [64] M. Sechilariu, A. H. Reinders, Y. Krim, S. Cheikh-Mohamad, A. Sierra, G. Seiler, and K. B. Slimane, "PV-powered electric vehicle charging stations: Preliminary requirements and feasibility conditions," 2021.
- [65] K. Lias, H. Basri, Y. Buswig, A. Jamali, A. Kamaruddin, V. Wong, M. Rosli, and S. Sahari, "Development of 9kWp solar system to enhance smoked shrimp (sesar unjur) production at Igan, Sarawak, Malaysia," *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 7, pp. 100459, 2024.
- [66] A. Makkieh, "Earthing schemes enabling effective protection and fault location techniques for low voltage direct current microgrids," 2022.
- [67] S. R. Kirchner, "OCPP Interoperability: A Unified Future of Charging," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 15, no. 5, pp. 191, 2024.
- [68] F. S. Mandolakani, and P. A. Singleton, "Electric vehicle charging infrastructure deployment: A discussion of equity and justice theories and accessibility measurement," *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 24, pp. 101072, 2024.
- [69] A. Al-Subhi, "Efficient mathematical models for parameters estimation of single-diode photovoltaic cells," *Energy Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 275-296, 2024.
- [70] A. Prasanthi, H. Shareef, R. Errouissi, G. V. Murugesu, and M. Asna, "Optimal Sizing and Dynamic Energy Source Characteristics of Hybrid Electric Vehicles: A Comprehensive Review and Future Directions," *IEEE Access*, 2024.
- [71] L. He, X. Hu, G. Yin, G. Wang, X. Shao, and J. Liu, "A current dynamics model and proportional–integral observer for state-of-charge estimation of lithium-ion battery," *Energy*, vol. 288, pp. 129701, 2024.

- [72] P. Singla, S. Boora, P. Singhal, N. Mittal, V. Mittal, and F. Gared, "Design and simulation of 4 kW solar power-based hybrid EV charging station," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, pp. 7336, 2024.
- [73] S. Sathyan, V. R. Pandi, A. Antony, S. R. Salkuti, and P. Sreekumar, "ANN-based energy management system for PV-powered EV charging station with battery backup and vehicle to grid support," *International Journal of Green Energy*, vol. 21, no. 6, pp. 1279-1294, 2024.
- [74] K. D. Poti, R. M. Naidoo, N. T. Mbungu, and R. C. Bansal, "Optimal hybrid power dispatch through smart solar power forecasting and battery storage integration," *Journal of Energy Storage*, vol. 86, pp. 111246, 2024.