

الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Institut d'électronique et des télécommunications IET

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Département : Electronique

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des systèmes embarqués - Microélectronique

Présentée par :

- OUAREM NABILA
- ROUABAH NESRINE

Intitulé :

- ZITOUNI MAYA
- DJEBARNI LOKMANE

Conception et réalisation d'une borne de recharge intelligente pour véhicules électriques

Soutenu le : 07/12/2025

Devant le jury composé de :

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
Mr. Abed Tarak	MAA	Président	Univ-BBA
Mr. Zaidi Elyazid	MCB	Encadrant	Univ-BBA
Mr. Benamer Ahmed	MAA	Encadrant	Univ-BBA
Mr. Djedoui Layachi	MCB	Co-Encadrant	ENSI
Mr. Brahimi Abdelhalim	MCB	Examineur	Univ-BBA

Année Universitaire 2024/2025



Remerciements

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département d'Électronique de la Faculté des Sciences et de la Technologie de l'Université Mohamed El Bachir

El Ibrahim – Bordj Bou Arreridj.

Avant tout, nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, pour la force, la patience et la motivation qu'Il nous a accordées afin de mener ce travail à son terme.

Nous tenons également à nous remercier pour les efforts fournis, la persévérance et l'engagement tout au long de ce projet.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات،

والذي وفقنا لإتمام هذا العمل العلمي المتواضع

نتوجه بخالص الشكر وأسمى عبارات التقدير إلى أستاذتنا ،

على حسن توجيهاتهم، وصبرهم، وتعاملهم الراقي، ونصائحهم القيّمة التي كانت الركيزة الأساسية في إتمام هذا المشروع

لقد تعلمنا منهم الكثير، ليس فقط في الجانب العلمي، بل أيضاً في الأخلاق والمنهجية

كما أتقدم بالشكر إلى أستاذة القسم الأفاضل،

الذين بذلوا ما في وسعهم لتقديم علم نافع، وكان لهم دور كبير في تكويني طيلة سنوات الدراسة

ولا يفوتني أن أشكر اللجنة العلمية، وطاقم المخابر، وكل العاملين والإداريين،

على تعاونهم ومساعدتهم في توفير الظروف الملائمة لإنجاز هذا العمل

وفي النهاية، أرفع أعظم كلمات الشكر والامتنان إلى عائلتي الكريمة

... إلى أمهاتنا، أبائنا، وإخوتنا

فبدنوكم ما كنا لنصل إلى هذه اللحظة

دعواتكم، دعمكم، وصبركم... كانت هي الوقود الذي أوصلنا للنهاية

جزاكم الله خيراً جميعاً، وفقنا وإياكم لما يحب ويرضى





Dédicace

بسم الله الرحمن الرحيم،
...وبعد رحلة طويلة من السعي والاجتهاد
:نهدي هذا العمل المتواضع إلى
اوليائنا الاعزاء

احمد روابح وحسان زيتوني و وارم العيد وعائلة جبارني ،
اللذين غرسوا فينا حب العلم، ومنحانا القوة لنستمر رغم كل الصعوبات
.إليهم... إلى صبرهم، وإلى دعواتهم التي كانت السند الذي لا ينهار
.نهديكم ثمرة سنوات من الكفاح، فأنتم سبب ما وصلنا إليه
... إلى اماهتنا

يا من كنتِ النور الذي نستنير به، والدعم الذي لا حدود له، دعاؤكم هو سرّ التوفيق
.إلى امي وعمتي حورية بماثية امي و امي صبيرة سعيدة وربيعة وسيدة جبارني
...إلى اباينا

يا من علمتمونا الثبات واحترام العلم، كنتم القدوة الأولى والطريق الذي سرنا فيه
إلى إخوتنا وأفراد عائلتنا،

الذين لم يخلوا علينا بكلمة تشجيع، ولا بحضور يخفف ثقل الأيام
لامية دعاء سرور محمد هارون انتصار فريال رندة ايمان ليندة عبد السلام يعقوب بشرى سارة
.هاجر وعائلة جبارني

إلى أصدقائنا الحقيقيين،

الذين شاركونا الضحك والتعب، الذين كانوا سنداً وقت الضيق، وشركاء نجاحنا اليوم

إلى أنفسنا ،

...التي تحملت، وصبرت، وواصلت السير رغم كل شيء

.هذا العمل هو نجاحنا، ونستحق أن نفخر به



وأخيرًا

ملخص

(Smart Charging System – SCS) يندرج هذا العمل ضمن إطار التحول العالمي نحو التنقل الكهربائي، ويهدف إلى تصميم وتطوير نظام شحن ذكي، قابل للتشغيل في (Electric Vehicles – EV) ومتعدد الاستعمالات للمركبات الكهربائية (SCS) (Hybrid Power Electronics – PE) (Photovoltaic Solar Energy – PV) تضمين المرونة التشغيلية، حيث يمكن تغذيته بالطاقة الشمسية الكهروضوئية (PE) أو بالطاقة الكهربائية التقليدية، مما يسمح باستمرار الخدمة والتكيف مع مختلف سيناريوهات الاستخدام (PV – Energy) ، تفصل بين (Dual-Layer Control Architecture – DLCA) يركز الشاحن المطور على بنية تحكم ثنائية المستويات (Embedded Control Unit – ECU) المهام الزمنية الحرجة ووظائف الاتصال والإدارة الرقمية. تتولى وحدة التحكم المضمنة إدارة عملية الشحن، توليد إشارة التحكم بالتيار وفق معايير الشحن المعتمدة، مراقبة القيم الكهربائية، وتنفيذ أنظمة الحماية والسلامة في حين تتكفل وحدة الاتصال الذكية بوظائف الإشراف، تبادل البيانات، كشف (Protection and Safety Systems – PSS) خارجية. يضمن هذا التنظيم أداءً موثوقاً وقابلية عالية للتوسع (Digital Platform – DP) (الأعطال، وربط النظام بمنصة رقمية والتطوير.

تشمل التيار، الجهد، القدرة، الطاقة المستهلكة (Electrical Monitoring – EM) يشمل النظام منظومة متكاملة للقياس والمراقبة ودرجة الحرارة، إضافة إلى تطبيق آليات أمان متقدمة مثل الحماية التفاضلية، كشف أعطال التماس الأرضي، الإيقاف التلقائي، الذي يسمح بإدارة جلسات الشحن، ضبط (Digital Control – DC) والمراقبة الذاتية المستمرة. كما تم تطوير التحكم الرقمي حدود التيار، وتكييف نمط الشحن حسب حالة البطارية وطبيعة مصدر الطاقة بالتوازي مع الجانب العتادي، تم تطوير نظام برمجي يشمل تطبيقاً هاتفياً وواجهة رقمية تمكن المستخدم من التحكم الكامل في عملية الشحن، سواء في المنزل أو في المحطات الخارجية، مع إمكانية تتبع الاستهلاك الطاقوي، إدارة المستخدمين، وتنفيذ الدفع الإلكتروني بشكل آمن. وتُظهر النتائج المتحصل عليها أن النظام المقترح يمثل حلاً عملياً وذو تكلفة مناسبة، (Electronic Payment – EP) يجمع بين الذكاء، الأمان، وقابلية النشر في بنى تحتية مستقبلية. ويساهم هذا العمل في إرساء أساس علمي وتطبيقي لتطوير حلول محلية وتعزز الاعتماد على الابتكار التكنولوجي الوطني (Energy Transition – ET) مستدامة تدعم التحول الطاقوي

الكلمات المفتاحية

إلكترونيات، (PV) الطاقة الشمسية الكهروضوئية، (HC) الشحن الهجين، (SCS) نظام الشحن الذكي، (EV) المركبات الكهربائية أنظمة الحماية، (EM) المراقبة الكهربائية، (ECU) وحدة التحكم المضمنة، (DLCA) بنية التحكم ثنائية المستويات، (PE) القدرة (DC) التحكم الرقمي، (PSS) والسلامة

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la transition mondiale vers la mobilité électrique et vise à concevoir et développer un système de recharge intelligent (SRI) polyvalent pour véhicules électriques (VE), utilisable dans les environnements résidentiels, publics et semi-publics. Le système proposé repose sur une architecture d'électronique de puissance (EP) hybride, garantissant une grande flexibilité opérationnelle. Il peut être alimenté par l'énergie solaire photovoltaïque (PV) ou par l'électricité conventionnelle, assurant ainsi un service continu et une adaptabilité à divers scénarios d'utilisation.

Le chargeur développé est basé sur une architecture de contrôle à double couche (ACDC), séparant les tâches critiques en temps réel des fonctions de communication numérique et de gestion. Une unité de contrôle embarquée (ECU) gère le processus de recharge, générant des signaux de contrôle de courant conformément aux normes de recharge établies, surveillant les valeurs électriques et mettant en œuvre des systèmes de protection et de sécurité (SPS). L'unité de communication intelligente assure la surveillance, l'échange de données, la détection des pannes et l'intégration du système avec une plateforme numérique externe (PNE). Cette configuration garantit des performances fiables et une grande évolutivité.

Le système comprend un système de surveillance électrique (SE) intégré qui contrôle le courant, la tension, la puissance, la consommation d'énergie et la température. Ce système intègre des mécanismes de sécurité avancés tels que la protection différentielle, la détection des défauts à la terre, l'arrêt automatique et l'autosurveillance continue. Un système de contrôle numérique (DC) a également été développé, permettant la gestion des sessions de charge, la limitation du courant et l'adaptation du mode de charge en fonction de l'état de la batterie et de la source d'alimentation.

Parallèlement au matériel, un système logiciel a été développé, comprenant une application mobile et une interface numérique. Ce système permet aux utilisateurs de contrôler pleinement le processus de charge, que ce soit à domicile ou dans des stations externes, avec la possibilité de suivre la consommation d'énergie, de gérer les utilisateurs et de mettre en œuvre en toute sécurité le paiement électronique (PE). Les résultats montrent que le système proposé constitue une solution pratique et économique qui allie intelligence, sécurité et déployabilité dans les infrastructures futures. Ce travail contribue à établir une base scientifique et appliquée pour le développement de solutions durables et adaptées aux contextes locaux, soutenant la transition énergétique et favorisant le recours à l'innovation technologique nationale.

Mots clés :

Véhicules électriques (VE), Système de recharge intelligent (SRI), Recharge hybride (RI), Énergie solaire photovoltaïque (PV), Électronique de puissance (EP), Architecture de contrôle à deux niveaux (ACL), Unité de contrôle embarquée (ECU), Surveillance électrique (SE), Systèmes de protection et de sécurité (SPS), Commande numérique (CC)

Abstract:

This work falls within the framework of the global shift towards electric mobility and aims to design and develop a versatile Smart Charging System (SCS) for electric vehicles (EVs), usable in residential, public, and semi-public environments. The proposed system is based on a hybrid power electronics (PE) architecture, ensuring operational flexibility. It can be powered by photovoltaic solar energy (PV) or conventional electricity, allowing for continuous service and adaptability to various usage scenarios.

The developed charger is based on a dual-layer control architecture (DLCA), separating time-critical tasks from digital communication and management functions. An embedded control unit (ECU) manages the charging process, generating current control signals according to established charging standards, monitoring electrical values, and implementing protection and safety systems (PSS). The intelligent communication unit handles monitoring, data exchange, fault detection, and system integration with an external Digital Platform (DP). This configuration ensures reliable performance and high scalability.

The system includes an integrated Electrical Monitoring (EM) system that monitors current, voltage, power, energy consumption, and temperature. It also incorporates advanced safety mechanisms such as differential protection, ground fault detection, automatic shutdown, and continuous self-monitoring. Digital Control (DC) has also been developed, allowing for the management of charging sessions, current limiting, and adaptation of the charging mode based on battery condition and power source.

In parallel with the hardware, a software system has been developed, including a mobile application and a digital interface. This system empowers users to fully control the charging process, whether at home or at external stations, with the ability to track energy consumption, manage users, and securely implement Electronic Payment (EP). The results show that the proposed system represents a practical and cost-effective solution that combines intelligence, security, and deployability in future infrastructures. This work contributes to establishing a scientific and applied foundation for developing sustainable, locally-based solutions that support the Energy Transition (ET) and promote reliance on national technological innovation.

Keywords:

Electric vehicles (EV), Intelligent charging system (SCS), Hybrid charging (HC), Solar photovoltaic (PV) power, Power electronics (PE), Dual-level control architecture (DLCA), Embedded control unit (ECU), Electrical monitoring (EM), Protection and safety systems (PSS), Digital control (DC)

LISTE DES SYMBOLES

I_p	<i>Courant photo-généré (A)</i>
I_o	<i>Courant de saturation de la diode (A)</i>
q	<i>Charge de l'électron $1.6021 \times 10^{-19} \text{ C}$</i>
k	<i>Constante de Boltzmann $1.3865 \times 10^{-23} \text{ J/K}$</i>
T	<i>Température de fonctionnement (Kelvin)</i>
n	<i>Facteur de la diode ($1 \leq n \leq 2$)</i>
G	<i>Ir radiance (W/m^2)</i>
R_s	<i>Résistance série (Ω)</i>
R_p	<i>Résistance de shunt (Ω)</i>
N_s	<i>Nombre de cellules en série</i>
V_{oc}	<i>Tension en circuit ouvert</i>
$I(s.c)$	<i>Courant de court-circuit</i>
$V(m.p)$	<i>Tension au point de puissance maximale</i>
$I(m.p)$	<i>Courant au point de puissance maximale</i>
I_d	<i>Courant traversant la diode</i>
I	<i>Courant du module PV (A)</i>
V	<i>Tension du module PV (V)</i>
E_g	<i>Énergie de gap du silicium (semi-conducteur)</i>

LISTE DES ABREVIATIONS

HEV	<i>Véhicule Hybride Électrique</i>
ICE	<i>Moteur à Combustion Interne</i>
EV	<i>Véhicule Électrique</i>
BEV	<i>Véhicule Électrique à Batterie</i>
PHEV	<i>Véhicule Hybride Rechargeable</i>
MHEV	<i>Hybride Léger</i>
FHEV	<i>Hybride Complet</i>
Micro-HEV	<i>Micro-Hybride</i>
S&S	<i>Système Stop & Start</i>
CS	<i>Mode Maintien de Charge</i>
CD	<i>Mode Décharge de Batterie</i>
NiMH	<i>Batterie Nickel-Hydrure Métallique</i>
Li-ion	<i>Batterie Lithium-ion</i>
HEV Série	<i>Hybride en Série</i>
HEV Parallèle	<i>Hybride Parallèle</i>
HEV Série-Parallèle	<i>Hybride Série-Parallèle</i>
HEV Complexe	<i>Hybride Mixte / Complexe</i>
BMS	<i>Système de gestion des batteries</i>
SOC	<i>State off charge</i>
RE	<i>Freinage Régénératif</i>
STC	<i>Conditions standard de test (Standard Test Condition)</i>
EVSE	<i>Electric Véhicule Supplie Equipment</i>
CP	<i>Control Pilot</i>
PP	<i>Proximité Pilot</i>
PWM	<i>Pulse Wit Modulation</i>
IEC 61851	<i>International Standard</i>
CCS	<i>Combine Chagrin System</i>

<i>PLC</i>	<i>Power Line Communication</i>
<i>PV</i>	<i>Photovoltaïque</i>
<i>DC</i>	<i>Direct Curent</i>
<i>AC</i>	<i>Alternation Curent</i>
<i>MPPT</i>	<i>Maximum Power Point Trekking</i>
<i>kW</i>	<i>Kilowatt</i>
<i>PCB</i>	<i>Printer Circuit Bord</i>
<i>GFCI</i>	<i>Ground Faut Circuit Interrupteur</i>
<i>MOV</i>	<i>Métal Oxyde Aristo OR</i>
<i>NE555</i>	<i>Time IC</i>
<i>ACS750</i>	<i>Curent Sensor</i>
<i>LM35</i>	<i>Température Sensor</i>
<i>ICL7660</i>	<i>Voltage Convertir</i>
<i>LM7805</i>	<i>Voltage Régulation</i>
<i>RGB LED</i>	<i>Red Green Blue LED</i>
<i>ESP32</i>	<i>Wi-Fi Microcontrôleur</i>
<i>Wi-Fi</i>	<i>Wireless Fidélité</i>
<i>GPS</i>	<i>Global Positionne System</i>
<i>RFID</i>	<i>Radio Fréquence Identification</i>
<i>JSON</i>	<i>JavaScript Object Notation</i>
<i>API</i>	<i>Application Program ming Interface</i>
<i>MQTT</i>	<i>Message Queuing Télémétrie Transport</i>
<i>HTTPS</i>	<i>Secure HyperText Transfer Protocol</i>
<i>TFT</i>	<i>Thin Film Transistor Display</i>
<i>UI</i>	<i>User Interface</i>
<i>UX</i>	<i>User Expérience</i>

Résumé.....	i
Liste des symboles.....	iv
Liste des abréviations	iiiv
Table des matières.....	iiiv
Liste des Figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xii

Sommaire

Introduction Général.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les véhicules hybrides et électriques	
1.1 Introduction	4
1.2 Véhicules hybrides	4
1.2.1 Histoire des véhicules hybrides	5
1.2.2 Contexte et aspects environnementaux	7
1.2.3 Différentes technologies de véhicules hybrides	8
1.2.4 Composants clés d'une voiture électrique hybride.....	11
1.2.5 Configurations des véhicules hybrides	12
1.2.5.1 Configuration de la série	12
1.2.5.2 Configuration parallèle.....	13
1.2.5.3 Configuration série-parallèle	14
1.2.5.4 Configuration complexe	15
1.3 Les véhicules électriques	18
1.3.1 Définition	18
1.3.2 Histoire des véhicules électriques	18
1.3.3 Composants clés d'un VE	20
1.3.4 Infrastructure de recharge des VE	28
1.3.5 Exemples de véhicules électriques récents	28
1.4 Conclusion	29
Bibliographie chapitre 1.....	30

Chapitre 2 : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

2.1 Introduction	33
2.2 Concepts généraux des systèmes photovoltaïques	33
2.2.1. Énergie solaire photovoltaïque	33
2.2.2. Rayonnement solaire	34
2.2.3. Cellules solaires.....	34
2.3 Principe de fonctionnement de l'énergie photovoltaïque.....	35
2.3. 1. La conversion de la lumière en électricité	35
2.3.2. L'absorption de la lumière dans le matériau.....	36
2.3.3. Génération de l'énergie solaire.....	38
2.3.4. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	39
2.4. Paramètres fondamentaux d'une cellule solaire	40
2.5. Assemblage des modules photovoltaïques	41
2.5.1. Assemblage en série.....	42
2.5.2. Assemblage en parallèle.....	43
2.5.3. Assemblage en série / parallèle.....	44
2.6. Conclusion	45
Bibliographie chapitre 2	46

Chapitre 3: Réalisation expérimental du système de recharge pour le véhicule électrique

3.1. Introduction.....	48
3.2. Définition complète du dispositif NBM EV Smart Charger.....	48
3.3 Protocole de charge des véhicules électriques.....	49
3.4 Processus complet de conversion	50
3.4.1Panneaux solaires photovoltaïques.....	50
3.4.2Régulateur de charge Maximum Power Point Trekking.....	50
3.4.3Batteries de stockage.....	51
3.4.4L'onduleur de tension.....	51
3.4.5Tableau de protection électrique.....	51
3.4.6. Principe de connections de chargeur.....	52

3.5 Les composants principaux de chargeur.....	52
3.5.1Tableau des composants	53
3.6 Description et rôle des sous-blocs.....	54
3.6.1 Bloc de production d'énergie solaire.....	54
3.6.2. Bloc d'alimentation	55
3.6.3 Bloc de sécurité et de commande.....	56
3.6.4 Unité de commande (Arduino Pro Mini)	57
.3.6.5 Bloc Unité de communication (ESP32)	59
.3.6.6 Bloc interface utilisateur	61
3.6.7. Bloc véhicule électrique (LOAD) ...	61
3 .7. Schéma électronique global du charger..... ;;;	62
3.8 Étapes générales de fabrication d'une carte électronique (PCB)...	62
3.8.1 Conception du schéma électronique.....	62
3. 8.2Impression du circuit sur un transparent.....	63
3.8.3 Gravure du cuivre.....	63
3.8.4. Etape de perçage de la carte	64
3.8.5. Soudure des composants (Assemblage).....	64
3.8.6 Le support de la carte électronique (PCB).....	65
3 .9. Produit final	65
3.10. Application mobile et interface utilisateur.....	66
3.10.1. Architecture logicielle de l'application	66
3.10.2 Étapes de développement de l'application.....	66
3.11Application NBM EV	67
3.11.1. Démarrer une nouvelle session.....	67
3.11.2 Mode de charge.....	68
3.11.3. Tableau de bord.....	69
3.11.4. Mapp..... ;	69
3.11.5Offres.....	70
3.11.6. Paramètres	71
3.12 Conclusion	72
CONCLUSION GENERALE	73

Liste des Figures

Figure 1.1 Schéma d'un HEV	5
Figure 1.2 Peiper 6 H.P., 1900	6
Figure 1.3 Toyota Prius XW10	6
Figure 1.4 Honda Insight	7
Figure 1.5 Détail des gains apportés par l'hybridation full-Hybrid sur la Peugeot 3008	10
Figure 1.6 Un schéma explicatif d'un véhicule hybride rechargeable	10
Figure 1.7 Schéma d'un HEV.....	12
Figure 1.8 Schéma bloc d'une architecture série.	13
Figure 1.9 Configuration parallèle d'un HEV	14
Figure 1.10 Configuration mixte d'un HEV.	15
Figure 1.11 Structure hybride combinée	16
Figure 1.12 La jamais contente	19
Figure 1.13 Voiture électrique de W. P 1902	19
Figure 1.14 Voiture électrique la Anderson 1918	19
Figure 1.15 Composants constituant une voiture électrique	21
Figure 1.16 Pack de batterie pour VE.....	25
Figure 1.17 La recharge par inductance d'un VE.....	26
Figure 1.18 Différents types de charge pour un VE.....	27
Figure 1.19 Exemple des stations de recharge pour VE.....	28
Figure 2.1 : schéma unifilaire photovoltaïque.....	33
Figure 2.2 : schéma rayonnement-solaire.....	34
Figure 2.3 : schéma Cellules solaires.....	35
Figure 2.4: schéma La conversion de la lumière en électricité.....	35
Figure 2.5: schéma diagramme des bandes d'énergie.....	36
Figure 2.6: Structure de bande d'un semi-conducteur à gap (a) : direct et (b) : indirect.....	37
Figure 2.7 : Génération de paires électron-trou.....	38
Figure 2.8 : Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	39
Figure 2.9. Modèle à deux diodes.....	40
Figure 2.10. Schéma Assemblage en série	42
Figure 2.11. Schéma Assemblage des panneaux en série.....	43
Figure 2.12. Schéma Assemblage en parallèle	43
Figure 2.13. Schéma Assemblage des panneaux en parallèle.....	44
Figure 2.14. Schéma Assemblage en série / parallèle.....	44
Figure 3.1 : MPPT Solar.....	54
Figure 3.2 : Diagramme d'énergie solaire.....	55
Figure 3.3 : Schéma de conversion.....	55
Figure 3.4 : Capture de température.....	57
Figure 3.5 : Capture de courant.....	57

Figure 3.6 : Arduino Pro Mini.....	58
Figure 3.7 : Diagramme d'commande.....	59
Figure 3.8 : esp woorm 32.....	59
Figure 3.9: Test de ESP32.....	59
Figure 3. 10: Diagramme d'communication.....	60
Figure 3. 11: Affichage de TFT.....	61
Figure 3. 12 : Schéma électronique global.....	62
Figure 3. 13 : Schéma circuit imprimé.....	62
Figure 3.14 : Impression du circuit sur un transparent.....	63
Figure 3 .15 : Gravure.....	63
Figure 3.16 : Perçage de la carte.....	64
Figure 3.17 : Soudure des éléments électroniques.....	64
Figure 3.18 : Le support de la carte PCB.....	65
Figure 3.19 : Prototype final.....	65
Figure 3. 20: Interface de Application.....	67
Figure 3.21 : Interface maison.....	68
Figure 3.22 : Interface Tableau de bord.....	69
Figure 3 .23 : Interface Mapp.....	70
Figure 3. 24 : Interface offres.....	70
Figure 3. 25: Interface App Parameters.....	71

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 Résumé des fonctionnalités des véhicules hybrides	11
Tableau 1.2 Résumé des configurations des véhicules hybrides.....	17
Tableau 3. 1 Rôle des composants électroniques	53



Introduction Générale



Introduction générale

La transition vers une mobilité durable constitue aujourd'hui un enjeu majeur face aux défis environnementaux, énergétiques et économiques auxquels le monde est confronté. Les véhicules électriques et hybrides, combinés aux technologies d'énergie renouvelable comme le photovoltaïque, représentent une alternative crédible visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, améliorer l'efficacité énergétique et promouvoir une utilisation responsable des ressources. Cependant, l'intégration de ces technologies nécessite des systèmes de recharge intelligents, sûrs, performants et capables d'exploiter les sources énergétiques renouvelables.

C'est dans cette perspective que s'inscrit ce mémoire, qui a pour objectif d'étudier, concevoir et réaliser un système de recharge intelligent pour véhicule électrique, incluant une supervision en temps réel et une possible alimentation par énergie solaire. Notre choix s'est orienté vers ce thème car il répond à plusieurs problématiques actuelles : le besoin de bornes économiques et fiables, l'intégration de l'IoT dans les systèmes de recharge, la sécurisation du processus de charge et la valorisation des énergies renouvelables dans le secteur de la mobilité.

Ainsi, le mémoire se compose de trois chapitres complémentaires :

- ***Le premier chapitre*** est consacré à la compréhension des véhicules hybrides et électriques : leurs architectures, leurs composants essentiels, leurs atouts et leurs enjeux dans la transition énergétique.
- ***Le deuxième chapitre*** présente les bases théoriques des systèmes photovoltaïques, leur fonctionnement, leurs performances et la manière dont ils peuvent être exploités pour alimenter un chargeur de véhicule électrique.
- ***Le troisième chapitre*** décrit la conception et la réalisation pratique du système de recharge intelligent NBM EV Smart Charger, en détaillant son architecture électronique, son fonctionnement logiciel et son intégration avec une application mobile. Ce mémoire vise ainsi à proposer une solution concrète, moderne et sécurisée permettant à l'utilisateur de superviser et contrôler la recharge de son véhicule électrique, tout en s'appuyant sur des technologies innovantes conciliant énergie propre et électronique embarquée.



Chapitre 1 :
Généralités sur les véhicules hybrides et électriques



Chapitre 1

Généralités sur les véhicules hybrides et Électriques

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons un panorama général des deux principaux modes de propulsion utilisés dans les véhicules hybrides et électriques. Le contenu est structuré en deux grandes sections.

La première section est dédiée à l'état de l'art des véhicules hybrides (HV). Nous y retraçons leur historique, en montrant que le concept d'hybridation n'est pas récent : les premiers prototypes datent en effet de 1898. Nous décrivons ensuite les différentes technologies et architectures des véhicules hybrides, ainsi que leurs caractéristiques essentielles.

La seconde section porte sur les véhicules électriques (VE). Nous y proposons une vue d'ensemble de cette catégorie, en mettant en avant les atouts de leur chaîne de traction, notamment en termes d'efficacité énergétique et de réduction de l'impact environnemental. Nous abordons également les évolutions récentes des VE et leurs principales limites, en particulier celles liées aux systèmes de stockage embarqués et aux différentes solutions de recharge disponibles.

1.2 Véhicules hybrides

Les **Véhicules Électriques Hybrides (HEV)** ont gagné en popularité ces dernières années en raison de leur meilleur rendement énergétique et de leurs émissions réduites [1]. Ils offrent également une conduite plus douce et plus silencieuse que les véhicules traditionnels [1]. Un véhicule hybride est un type de véhicule qui combine **deux ou plusieurs sources d'énergie** pour la propulsion [1]. En règle générale, les HEV sont équipés d'un **Moteur à Combustion Interne (ICE)** associé à un **Moteur Électrique** et à une **batterie** [1].

La combinaison de l'ICE et du moteur électrique permet au véhicule de fonctionner avec un meilleur rendement énergétique et des émissions inférieures à celles des véhicules à essence traditionnels [1].

Il existe deux types principaux de véhicules hybrides : les hybrides en série et les hybrides parallèles [1]. Dans un hybride de série, l'ICE est utilisé uniquement pour générer de l'électricité pour le moteur électrique, qui alimente les roues [1]. Dans un hybride parallèle, l'ICE et le moteur électrique sont utilisés pour alimenter les roues, le moteur électrique fournissant une puissance supplémentaire en cas de besoin

[1]. Les véhicules hybrides utilisent également le **freinage régénératif**, qui convertit l'énergie normalement perdue lors du freinage en électricité pour recharger la batterie, ce qui améliore l'efficacité globale du véhicule [1].

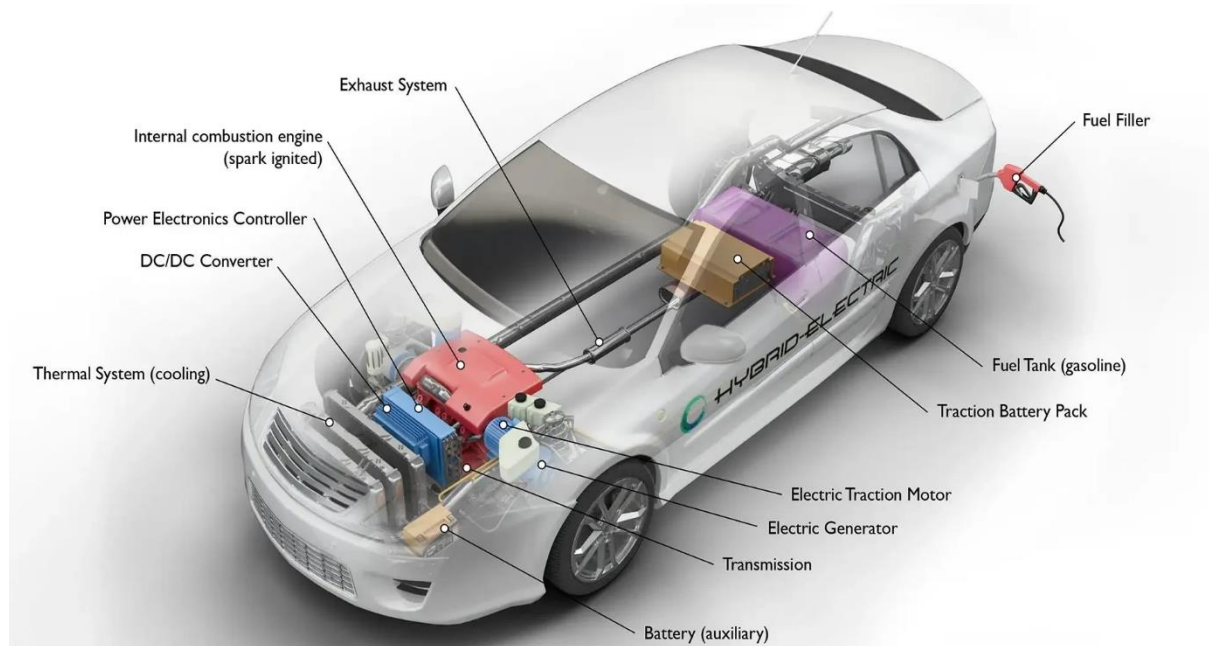


Figure 1.1: Schéma d'un HEV. [2]

Ce schéma souligne la complexité et l'intégration harmonieuse des composants qui permettent aux HEV d'offrir une expérience de conduite polyvalente et plus respectueuse de l'environnement [2]. De plus, il met en évidence le rôle central du **Système de Gestion de l'Énergie (EMS)**, qui passe de manière transparente d'une source d'énergie à l'autre pour maintenir des performances optimales et minimiser la consommation de carburant [2].

1.2.1 Histoire des véhicules hybrides

Les deux premiers véhicules hybrides électriques ont été présentés à Paris en 1899 [2]. Le premier, conçu par Peiper à Liège (**Belgique**), permettait à la batterie d'être chargée par l'ICE à l'arrêt, la machine électrique fournissant un appoint de puissance. Le second véhicule, conçu par une entreprise française, visait à augmenter l'autonomie d'un véhicule électrique en rechargeant la batterie avec un ICE relié à un générateur [3].



Figure 1.2: Peiper 6 H.P. Voiturette in 1900 [3]

En raison de l'absence de convertisseur statique à l'époque, la machine électrique était contrôlée par des interrupteurs mécaniques et des résistances, rendant le système moins efficace, et le développement des HEV fut longtemps interrompu [4]. En 1975, le Dr Victor Wouk a construit une Buick Skylark dans une version hybride parallèle [4]. Au début des années 1990, les constructeurs automobiles ont conçu des prototypes (Ford Prodigy, Renault Next) [4]. Les développements les plus significatifs sont la **Toyota Prius** (Figure 1.3) [5] et la **Honda Insight** (Figure 1.4) [6], qui ont été les premiers HEV commercialisés en 1997 et, à ce titre, ont une importance historique [4].

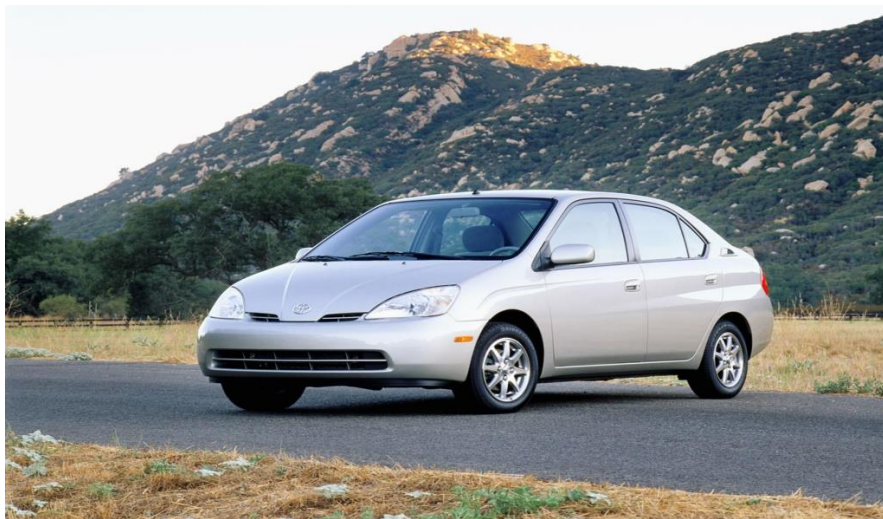


Figure 1.3 : Toyota Prius XW10 : la pionnière [5]



Figure1. 4 : Honda Insight [6]

1.2.2 Contexte et aspects environnementaux

Aujourd'hui, le développement de carburants alternatifs plus propres pour les véhicules est devenu un défi pour de nombreux constructeurs automobiles à travers le monde. Ainsi, pour surmonter ces défis, de nombreuses industries de construction automobile ont recours à une autre source d'énergie connue sous le nom de « véhicule hybride ». Certains chercheurs ont également défini de telle manière qu'« un véhicule qui fonctionne avec un carburant autre que les carburants traditionnels (diesel/essence) est connu sous le nom de véhicule hybride/véhicules à carburant alternatif » . [7]

La quantité de CO₂ créée par la combustion d'un gallon de carburant dépend de la quantité de carbone dans le carburant. Ainsi, plus de 99 % du carbone d'un carburant est émis sous forme de CO₂ lors de la combustion du carburant. De très petites quantités sont émises sous forme d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone, qui sont convertis en CO₂ relativement rapidement dans l'environnement.[7]

L'électrification est le moyen le plus efficace d'atteindre des transports plus propres et systématiques qui sont essentiels au développement durable du monde, cela pourrait être réalisé en utilisant la technologie des batteries. Les batteries des véhicules électriques ont fait leurs preuves dans l'histoire, tandis que le premier véhicule électrique a été trouvé sur la route après l'invention des batteries au plomb rechargeables et des moteurs électriques à la fin des années 1800.[7]

À l'heure actuelle, deux grandes technologies de batteries sont utilisées dans les véhicules électriques, à savoir le nickel-hydrure métallique (NiMH) et le lithium-ion (Li-ion). La plupart des véhicules électriques hybrides disponibles sur le marché aujourd'hui utilisent des batteries NiMH en raison de leur énergie spécifique et de leur densité d'énergie plus élevées, de sorte que l'adaptation des batteries Li-ion devrait croître rapidement dans les PHEV et les BEV [7].

1.2.3 Différentes technologies de véhicules hybrides

Il existe différentes technologies de véhicules hybrides disponibles sur le marché, notamment les véhicules microhybrides, les véhicules hybrides moyens, les véhicules hybrides complets et les véhicules hybrides rechargeables [8]. Chaque technologie possède plusieurs caractéristiques qui rendent le véhicule plus léger, plus économique et produisent moins de gaz à effet de serre.

Nous venons de voir que l'électrification du véhicule permet d'apporter de nombreuses fonctionnalités. Cependant toutes ces fonctionnalités ne seront bien évidemment pas présentes dans l'ensemble des véhicules hybrides. Afin de différencier et classer les véhicules hybrides, une typologie basée sur les fonctionnalités intégrées dans le véhicule est communément utilisée [8]. C'est cette typologie qui sera détaillée dans cette section.

Ces technologies se distinguent par leur degré d'électrification, leurs fonctionnalités et leurs objectifs environnementaux.

- **Véhicules micro-HEV (ou micro-hybrides)**

Les micro-hybrides sont les véhicules dont le degré d'hybridation est le plus faible [8]. En plus des caractéristiques qui peuvent être mises en œuvre sur un véhicule conventionnel, les micro-hybrides disposent de la fonctionnalité **Start-Stop (S&S)**. Dans le cas des micro-hybrides, cette fonctionnalité est assurée par un alterno-démarrreur (ou un démarreur renforcé) ,et l'intégration peut donc avoir lieu directement sur un véhicule conventionnel sans modifications complexes.

Certains micro-hybrides ont également la capacité de récupérer l'énergie de freinage. Ils sont parfois appelés hybrides mous (soft-hybrids), bien que ce terme ne soit pas universellement utilisé. Il convient de noter que des systèmes S&S ont été développés spécifiquement pour augmenter la puissance de freinage régénératif, comme le système StARS + X de Valeo, qui combine un alterno-démarrreur de type i-StARS avec un système de supercondensateur et peut récupérer une puissance de freinage allant jusqu'à 4 kW [8].

- **Véhicules Mild-HEV (ou Mild-Hybrid) :**

Les véhicules hybrides légers se caractérisent par l'intégration de fonctions d'assistance électrique et de flux en série en plus de celles mises en œuvre dans les véhicules micro-hybrides. Dans le cas des véhicules hybrides légers, ces caractéristiques seront toujours limitées mais nécessiteront l'utilisation

d'une plus grande puissance électrique (au niveau du moteur et de la batterie) et de l'énergie stockée (au niveau de la batterie). L'utilisation de machines électriques dédiées et intégrées sera donc le cas général, tout comme l'utilisation d'une batterie à plus forte densité d'énergie et une meilleure résistance aux cycles. Dans ce type de véhicule, la batterie sera utilisée en maintenant l'état de charge (Charge Sustaining ou CS), en alternant entre décharge (assistance électrique) et charge (débit en série, récupération lors du freinage). Compte tenu de la contribution de l'assistance électrique à la demande de puissance, le moteur thermique peut être sous-dimensionné par rapport à un véhicule classique aux performances identiques. Parmi les véhicules hybrides légers, citons les Honda Insight et Civic, ou la Mercedes S400 Hybrid, pour lesquelles l'hybridation permet d'obtenir un gain de 22 % par rapport au cycle NEDC [8].

- **Vehicles Full-HEV (or Full-Hybrid)**

Les véhicules entièrement hybrides sont une évolution des véhicules hybrides légers, auxquels la fonction de mode électrique a été ajoutée. L'intégration de cette fonctionnalité nécessite l'utilisation de composants électriques plus performants (puissance, énergie) afin que le mode électrique puisse assurer à lui seul la traction du véhicule. Cette performance accrue des composants électriques profite également aux autres fonctions du véhicule. Notons toutefois que dans cette catégorie de véhicules, le mode électrique est limité, tant en termes de puissance (il ne peut donc pas être engagé pour tous les usages) qu'en termes d'énergie (les véhicules full-hybrid n'ont pas vraiment d'autonomie électrique). Par exemple, la Toyota Prius, qui a été la première full-hybrid à être largement commercialisée en 1999, dispose d'un mode électrique qui ne peut être enclenché qu'à des vitesses inférieures à 60 km/h et pour des accélérations légères, avec une autonomie électrique maximale de 2 km. Dans ce type de véhicule, la batterie sera également utilisée comme CS. Le moteur à combustion interne peut également être sous-dimensionné, compensant la puissance réduite par la puissance fournie occasionnellement par le moteur électrique.[8] Grâce à la combinaison de ces caractéristiques, les véhicules full-hybrid réalisent des gains significatifs en termes de consommation de carburant et d'émissions de CO₂. Pour le véhicule full-hybrid 3008 Hybrid4 de PSA, des gains de 21 % sur le cycle NEDC et jusqu'à 30 à 35 % en usage urbain sont annoncés par rapport à un véhicule conventionnel équivalent (cf. Figure 1.5).



Figure 1.5 : Détail des gains apportés par l'hybridation full-Hybrid sur la Peugeot 3008[9].

• Vehicles PHEV (or Plug-in Hybrid)

Ces véhicules ont donc la particularité unique d'offrir la possibilité de recharger le système de stockage d'énergie (ESS) à partir d'une source d'énergie externe (électricité du réseau). Cette fonctionnalité permet de décharger la batterie pendant l'utilisation du véhicule et nécessite une augmentation de l'énergie ESS et un changement radical dans l'utilisation de l'énergie électrique embarquée. C'est ce qu'on appelle le fonctionnement à épuisement de la charge (CD), contrairement au fonctionnement à maintien de la charge (CS) des véhicules hybrides non rechargeables. Deux stratégies d'épuisement de la charge peuvent être distinguées : le « Charge Depleting All Electric » (CD-AE), qui consiste à décharger la batterie en mode tout électrique, et le « Charge Depleting Blended » (CD Blended), qui consiste à décharger la batterie en utilisant les deux sources d'énergie. En fonction des caractéristiques du véhicule, de ses performances et de la gestion de l'énergie mise en œuvre, ces différentes stratégies peuvent être utilisées de différentes manières (voir Figure 6), soit pour maximiser l'utilisation du mode tout électrique, soit pour minimiser le fonctionnement du CS, c'est-à-dire lorsque la batterie est déchargée.[8]

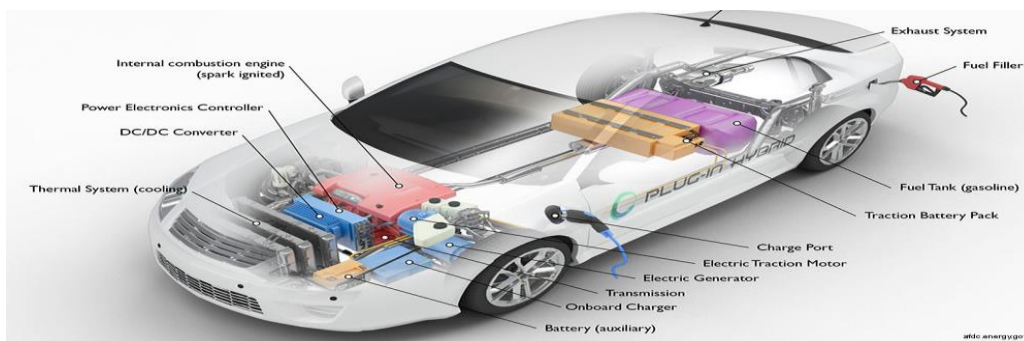


Figure 1.6 : Un schéma explicatif d'un véhicule hybride rechargeable [10]

Les PHEV pourront bénéficier d'une conduite tout électrique prolongée grâce à une plus grande électrification du groupe motopropulseur, tant en termes de puissance que d'énergie embarquée. Cependant, l'utilisation du mode électrique peut être limitée par trois contraintes : la puissance du groupe motopropulseur électrique, la vitesse maximale en mode électrique (cinématique de transmission) et l'énergie stockée dans la batterie. Ainsi, les VHR peuvent être divisés en trois sous-catégories en fonction de leurs limites d'utilisation.

Tableau 1.1: Résumé des fonctionnalités des véhicules hybrides.

Feature	Micro-Hybrid	Mild-Hybrid	Full-Hybrid	Plug-in Hybrid
Start-Stop System	Yes	Yes	Yes	Yes
Electric Motor Assistance	No	Yes	Yes	Yes
All-Electric Driving	No	No	Yes (limited)	Yes (longer range)
Regenerative Braking	Sometimes	Yes	Yes	Yes
Charging Capability	No	No	No	Yes (Plug-in)
Fuel Efficiency Improvement	Moderate	High	Very High	Very High

1.2.4 Composants clés d'une voiture électrique hybride

Les véhicules hybrides combinent l'utilisation d'un moteur électrique et d'un moteur à combustion interne pour augmenter l'efficacité énergétique et réduire les émissions. Leur fonctionnement peut varier en fonction du type de véhicule hybride, mais en général, ils utilisent une combinaison des composants suivants :

- 1) **Moteur électrique** : Le moteur électrique d'un véhicule hybride est alimenté par une batterie qui stocke l'énergie du freinage régénératif et du moteur à combustion interne. Le moteur électrique fonctionne en conjonction avec le moteur à combustion interne pour alimenter le véhicule ou peut également être utilisé exclusivement pour de courtes distances
- 2) **Batterie** : La batterie stocke l'énergie générée par le freinage régénératif et le moteur à combustion interne. La batterie alimente le moteur électrique, et lorsque la batterie est épuisée, le moteur à combustion interne commence à recharger la batterie
- 3) **Freinage régénératif** : Les véhicules hybrides utilisent le freinage régénératif, un processus qui capte l'énergie cinétique produite lors du freinage et la convertit en énergie électrique stockée dans la batterie.

- 4) **Dispositif de répartition de la puissance** : Le dispositif de répartition de la puissance est un dispositif mécanique qui contrôle le flux de puissance entre le moteur à combustion interne et le moteur électrique. Le dispositif peut augmenter ou diminuer la puissance de sortie de chaque composant en fonction des conditions de conduite.
- 5) **Système de contrôle** : Le système de contrôle d'un véhicule hybride gère le fonctionnement du moteur électrique et du moteur à combustion interne. Il détermine quand utiliser chaque composant et quand recharger la batterie.[11]

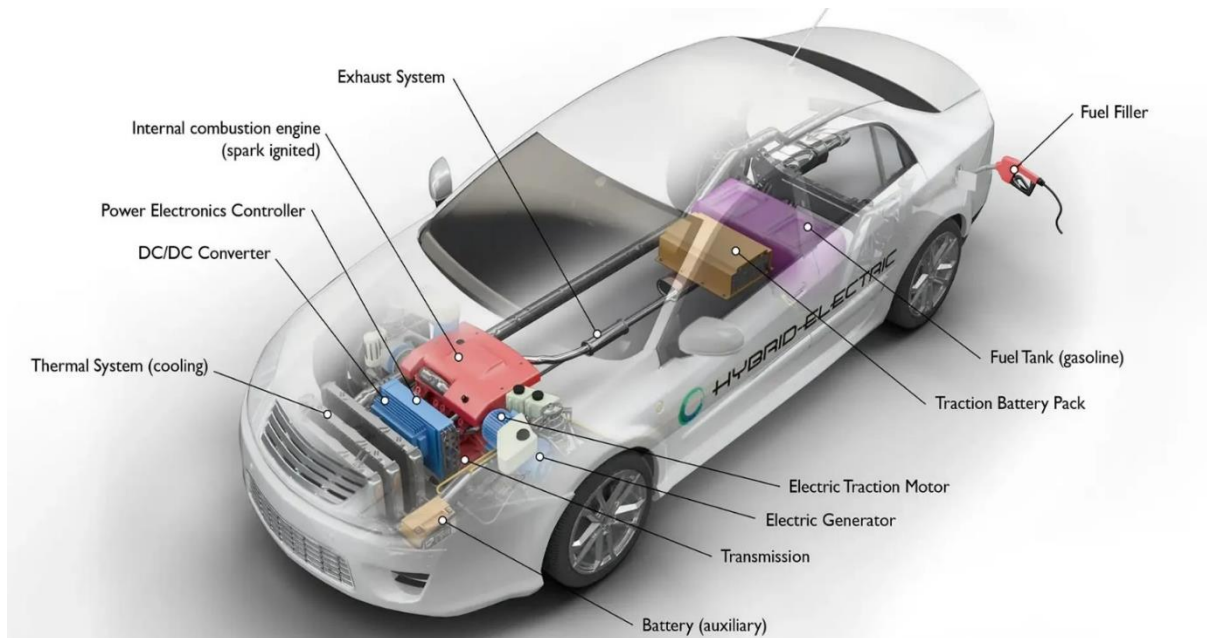


Figure 1.7: Schéma d'un HEV.[12]

1.2.5 Configurations des véhicules hybrides

Les paragraphes qui suivent présenteront brièvement les principales architectures actuellement existantes, permettant l'intégration des composants nécessaires à la mise en œuvre des fonctionnalités décrites ci-dessus. Pour une description plus détaillée, le lecteur peut se référer aux travaux suivants.

Dans ce qui suit, nous abordons les quatre configurations principales : la configuration série, la configuration parallèle, la configuration série-parallèle et la configuration mixte (complexe). [13][8]

1.2.5.1 Configuration de la série

Cette architecture est la plus proche d'un véhicule électrique dans la mesure où toute l'énergie fournie à la roue provient de la machine de traction électrique. Pour assurer les performances dynamiques du véhicule, cet engin doit donc être dimensionné avec les mêmes contraintes que celles d'un véhicule

électrique. L'engin de traction électrique d'un hybride de série peut donc être alimenté par deux sources d'énergie électrique, l'une provenant du moteur à combustion interne relié à une seconde machine électrique (générateur), et l'autre fournie par la batterie (voir Figure 1-8). La séparation du point de fonctionnement du moteur à combustion interne (vitesse/couple) de celui de l'engin de traction électrique permet d'élaborer des stratégies de gestion visant à optimiser l'utilisation du moteur à combustion interne. Il peut donc être bénéfique d'optimiser l'efficacité du moteur à des points spécifiques.[14]

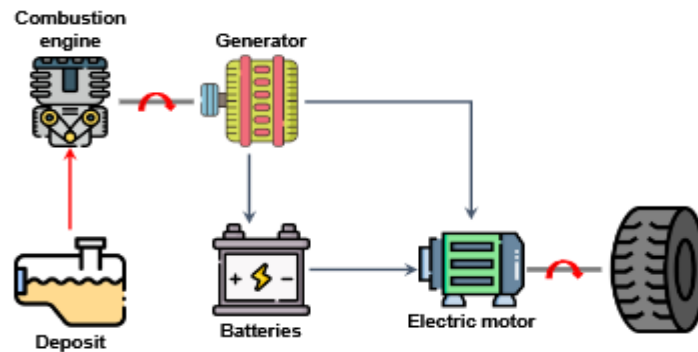


Figure 1. 8 : Schéma bloc d'une architecture série. [14]

Les véhicules de série seront majoritairement associés à des systèmes intégrant de grandes capacités de stockage (PHEV ou E-REV). Cette application ouvre de nouvelles perspectives du point de vue du développement du moteur à combustion interne, car il n'a plus besoin de fournir une puissance instantanée élevée ou des transitoires sévères. Le coût supplémentaire lié à l'utilisation d'une deuxième machine électrique est un inconvénient de cette architecture. Il convient également de noter que cette architecture est connue pour sa faible efficacité dans les applications de type autoroute.

1.2.5.2 Configuration parallèle

Grâce à cette configuration, les moteurs thermiques et électriques peuvent propulser les systèmes de transmission. Un véhicule hybride électrique avec une configuration parallèle dispose du moteur à combustion interne et du moteur électrique couplé à l'essieu moteur final des roues par des embrayages. De plus, cette configuration permet au moteur à combustion interne et électrique de fournir de l'énergie pour entraîner les roues en mode combiné ou isolé. De cette façon, les deux systèmes fonctionnent en parallèle. La figure 1.9 montre le schéma de la configuration parallèle des HEV. Cette configuration suppose une simplification remarquable de l'architecture série puisque le générateur électrique n'est plus nécessaire.[15]

En ce sens, le moteur électrique pouvait fonctionner en mode inverse, convertissant l'énergie cinétique du système de transmission en électricité stockée dans des batteries. En général, la taille des composants thermiques peut être réduite par rapport à la configuration en série. [15]

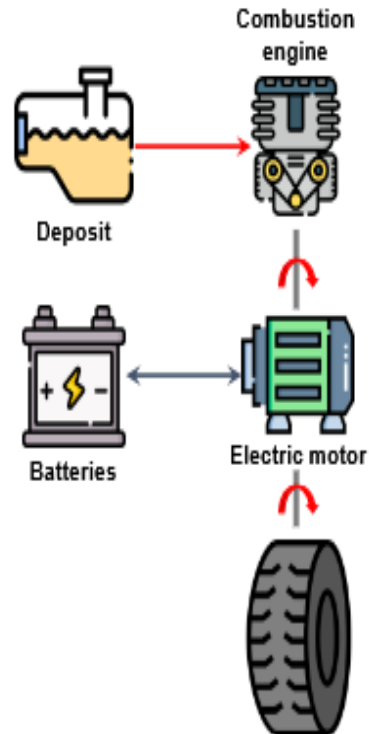


Figure 1.9: Configuration parallèle d'un HEV.[14]

1.2.5.3 Configuration série-parallèle

Un véhicule hybride série-parallèle combine les avantages des versions en série et en parallèle. L'inconvénient de cette combinaison est que le véhicule devient complexe et coûteux. Cette conception combine des composants des conceptions parallèles et en série, les principaux étant un moteur thermique, un générateur et un moteur électrique. Un composant mécanique, le train planétaire, permet de coupler la puissance mécanique des moteurs électriques et thermiques. D'autres possibilités ont été explorées car ce système série-parallèle permet une grande souplesse d'utilisation. De nombreuses alternatives peuvent être construites en fonction des performances recherchées par le fabricant. La figure 1.10 montre la structure de base des véhicules hybrides série-parallèle. Cette structure combine les avantages des conceptions en série et parallèles.[16]

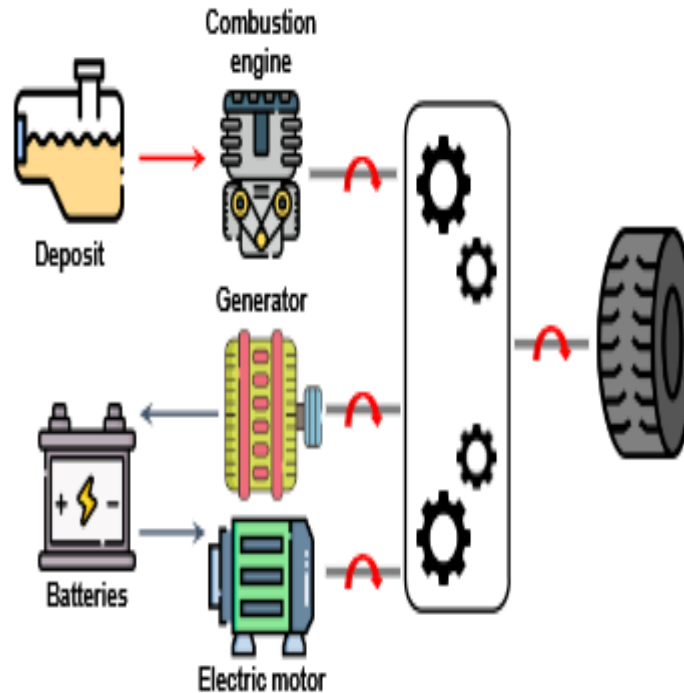


Figure 1.10: Configuration mixte d'un HEV. [16]

1.2.5.4 Configuration complexe

Le véhicule électrique hybride combiner (CHEV) combine directement la série et le parallèle, qui peuvent fonctionner en mode série ou en mode parallèle. Le système hybride électrique hybride se caractérise par le système de moteur à combustion interne et le système d'entraînement du moteur avec mécanisme de transmission mécanique, les deux ensembles d'agences ou par le biais du train d'engrenages ou de la structure d'engrenages planétaires connectés pour réguler la relation entre le moteur à combustion interne et la vitesse du moteur. Par rapport aux systèmes hybrides parallèles, les systèmes de groupe motopropulseur hybrides ont plus de flexibilité pour ajuster la puissance du moteur et le fonctionnement du moteur en fonction des conditions de fonctionnement. Ce système de connexion est complexe et coûteux.

Lorsque le véhicule démarre ou roule à basse vitesse, le moteur est coupé et seul le moteur est utilisé pour fournir la puissance de sortie. Lorsque la voiture roule à grande vitesse, le moteur tourne tandis que le générateur prend en charge la production d'énergie ou la régulation de la vitesse en fonction des conditions de travail réelles. Lorsque le véhicule est freiné, le système est également capable de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique stockée dans une batterie [17].

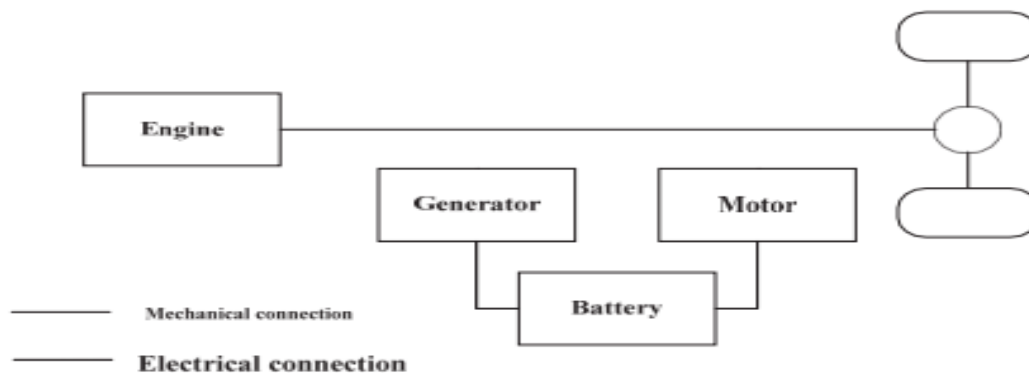


Figure 1.11: Structure hybride combinée [17].

Selon le système hybride, la puissance de sortie du moteur dans la puissance de sortie du système représentait la proportion, ce qui est souvent dit que les différents degrés de mélange, les systèmes hybrides peuvent également être divisés en cinq catégories, y compris les systèmes micro-hybrides, le système hybride léger, le système hybride, le système hybride complet, la prise de courant externe chargeant le véhicule hybride.

Les véhicules hybrides ont fait l'objet de recherches et de développements approfondis depuis plusieurs décennies, et ils continuent d'être un domaine d'intérêt important dans l'industrie automobile. Les véhicules hybrides utilisent à la fois un moteur à combustion interne et un moteur électrique pour alimenter le véhicule, ce qui permet d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les émissions. La recherche s'est concentrée sur l'amélioration des performances et de l'efficacité de ces véhicules, ainsi que sur le développement de nouvelles technologies et conceptions hybrides. Parmi les développements récents dans le domaine des véhicules hybrides, citons l'utilisation de véhicules électriques hybrides rechargeables (PHEV), qui permettent une plus grande autonomie en mode électrique uniquement, et le développement de systèmes hybrides qui utilisent des piles à combustible à hydrogène comme source d'énergie alternative. La recherche s'est également concentrée sur l'impact environnemental des véhicules hybrides, notamment en termes d'émissions globales du cycle de vie, ainsi que sur la durabilité des matériaux utilisés dans leur production. Dans l'ensemble, la recherche sur les véhicules hybrides se poursuit, alors que l'industrie automobile continue d'explorer des moyens d'améliorer leurs performances, leur efficacité et leur durabilité [17].

Résumé de l'architecture des véhicules hybrides :

Le tableau ci-dessous résume les trois modèles de véhicules hybrides, leurs avantages et leurs inconvénients.

Tableau 1. 2 : Résumé des configurations des véhicules hybrides.

Configuration	Caractéristique clé	Exemples de véhicules	Avantages	Inconvénients
Série	Un moteur électrique entraîne les roues ; Le moteur agit comme un générateur	Chevrolet Volt (avant l'arrêt)	Conduite électrique efficace, transmission simple, gestion flexible de l'énergie	Autonomie limitée, dépendance à la batterie
Parallèle	Le moteur et le moteur entraînent directement les roues	Toyota Prius, Honda Insight	Polyvalence, Efficacité énergétique améliorée, Rentabilité	Autonomie réduite en mode électrique uniquement, Distribution d'énergie complexe
Série-Parallèle	Combine des systèmes en série et en parallèle	Toyota Prius (entièrement hybride)	Efficacité maximale, Conduite tout électrique, Flexibilité	Système plus complexe, Contraintes de poids et d'espace
Complexe	Systèmes avancés avec plusieurs sources d'énergie et moteurs	BMW i8 (hybride de performance)	Haute performance, gestion avancée de l'énergie, faibles émissions avec une puissance élevée	Coût élevé, maintenance compliquée

1.3 Les véhicule électrique

1.3.1 Définition

Le véhicule électrique offre un bon compromis énergétique/économique et répond parfaitement aux enjeux environnementaux : une dépendance complète des énergies fossiles, pas d'oil, moins polluants, zéro émission des gaz a effet de serre. Cependant, les VE ont moins de performance qu'un véhicule conventionnel. La recharge des VE à partir des sources en utilisant les fossiles pour la production de l'électricité reste toujours un problème, encore le prix, le recyclage des batteries et l'autonomie présentent des problématiques pour cette catégorie. La récupération de l'énergie cinétique pour la recharge des batteries est limitée avec la limitation du courant de charge de la batterie par rapport a son courant de décharge, pour laquelle la durée de charge des VE est généralement très long par rapport à un véhicule thermique (5 munîtes pour un plein d'essence), et pour cette raison la charge des VE est recommandée les nuits [18].

Contrairement, des solutions sont envisageables afin de résoudre ces problèmes, comme les bornes de recharges basées sur les énergies renouvelables comme le soleil, l'éolienne, etc., l'embarquement des autres sources auxiliaires de stockage d'énergie électrique comme les super-condensateurs qui donnent une autonomie importante.[18]

A savoir que le rendement d'un véhicule électrique est supérieur à 90% contrairement a un véhicule thermique qui perd plus que 60% de l'énergie contenue dans le carburant [19].

1.3.2 Histoire des véhicules électriques

D'après les sources [19] [20] [21] [22], l'historique des VE daté depuis les années 1830 :

- ➔ Les années 1832-1839, l'homme d'affaire Ecossais Robert Anderson a développé un modèle d'une voiture électrique, quelques années après, Robert et Thomas Davenport (Américain) ont développé d'autres modèles avec des batteries non rechargeables.
- ➔ En 1859, le français Gaston Planté invente la batterie rechargeable au plomb acide. 20 ans après, cette technologie de batterie a été améliorée par le Français Camille Faure vers les années 1981.
- ➔ En 1897, New York les premiers services de taxi en mode électrique.
- ➔ En 1899, la Jamais Contente la première voiture électrique qui dépasse les 100 km/h. la Figure 1. 11 présente un modèle de cette voiture qui a été conduite par le Belge Camille Jenatzy en Belgique.



Figure 1.12 : La jamais contente.[23]

- ➔ En 1900, 1/3 des voitures des américains étaient électriques, le reste était des autos à essence et à vapeur.
- ➔ L'année 1902 : la Phaéton de Wood présentée dans la figure (1.13), une voiture qui pouvait rouler 29 kilomètres à une vitesse de 22.5km/h.

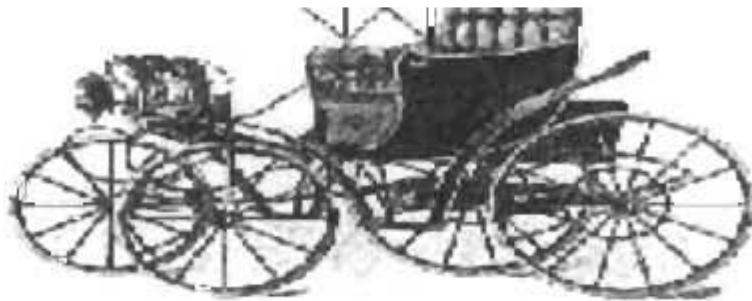


Figure 1.13: Voiture électrique de W. P 1902 .[24]

- ➔ En 1918 : l'Anderson Electric Car Compagnie présente son modèle dans la figure (1.14) :

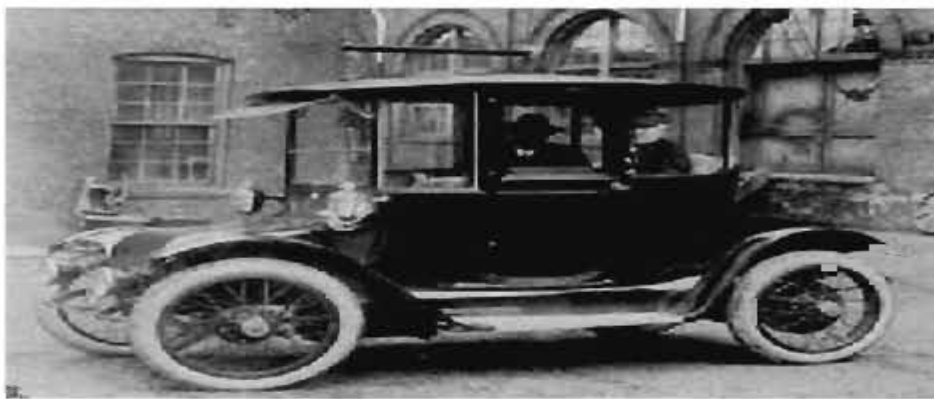


Figure 1.14: Voiture électrique la Anderson 1918 [25]

- ➔ En 1966, le Congrès américain recommande la construction des véhicules électriques, notamment les années de la crise pétrolière 1973 afin de trouver un moyen de transport alternative indépendant des carburants et moins polluant, à partir des années 2000 la voiture électrique à ré-mourir de nouveau. Cependant en 2007, il y avait presque 100000 véhicules électriques en circulation aux États-Unis.
- ➔ -En 2009, le VE apparait comme un alternatif mode de transport.

Présentement en 2019, les YE sont devenus populaire garce à l'objectif mondiale qui a était confirmé les années passées pour la mise en circulation plus de 2 millions YEH d'ici 2020.

1. 3. 3 Composants clés d'un Véhicule Électrique

Introduction technique

Les véhicules électriques (VE) reposent sur une architecture électromécanique avancée intégrant plusieurs sous-systèmes étroitement interconnectés. Le cœur du VE est constitué d'un moteur électrique à haut rendement, alimenté par une batterie de traction à haute densité énergétique. L'énergie stockée est gérée et protégée par un système de gestion de batterie (BMS), tandis que les convertisseurs de puissance (inverter, DC/DC, chargeur embarqué) assurent l'adaptation précise des tensions et courants nécessaires au fonctionnement optimal du moteur et des auxiliaires. L'ensemble de ces composants fonctionne sous une logique de contrôle électronique sophistiquée permettant :

Une efficacité énergétique élevée, une réduction des pertes, une gestion thermique optimisée, et une performance dynamique stable. Grâce aux récents progrès dans les matériaux, l'électronique de puissance (IGBT, SiC), et les technologies lithium-ion, les VE modernes atteignent des niveaux de rendement et de fiabilité bien supérieurs à ceux des systèmes thermiques traditionnels. L'analyse détaillée des composants clés permet ainsi de comprendre les mécanismes physiques, électriques et algorithmiques qui rendent les véhicules électriques plus performants, plus silencieux et plus économiques en énergie.

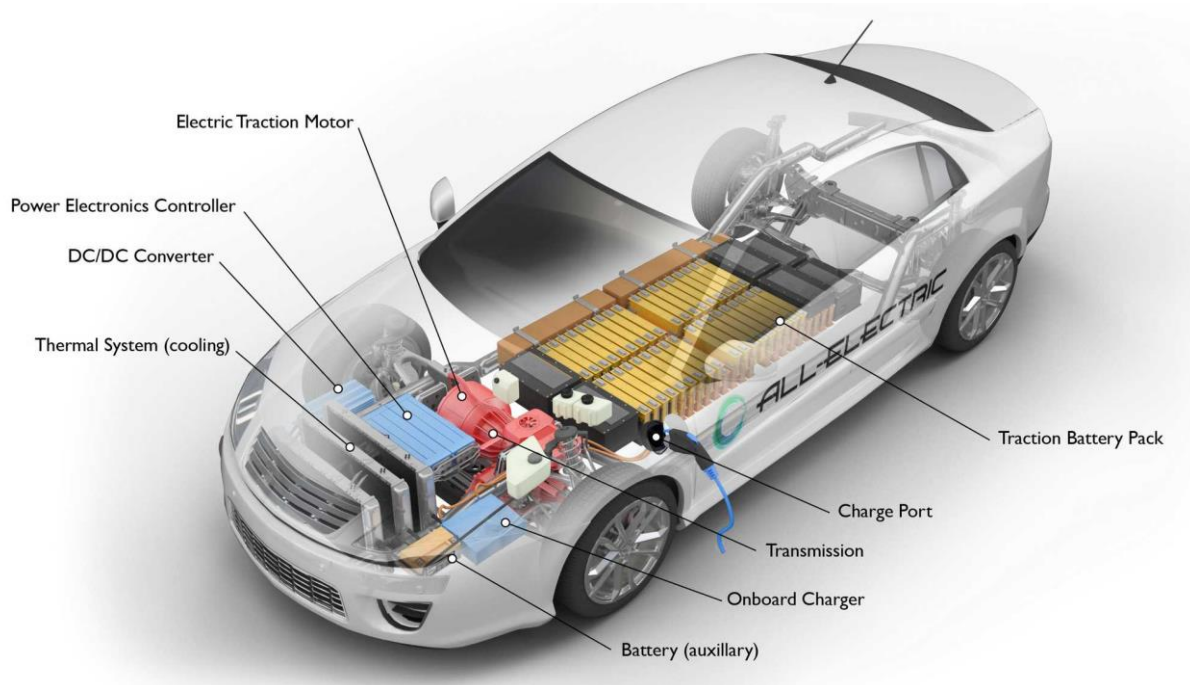


Figure 1.15: Composants constituant une voiture électrique [26]

1.3.3.1 Le moteur électrique

Un VE contient au moins un moteur électrique selon le constructeur automobile, cette machine utilisée pour transformer l'énergie électrique provient des batteries en énergie mécanique afin de propulser le véhicule, de même cette machine a une fonctionnalisation inverse pour récupérer l'énergie cinétique pendant le freinage et la transformer en énergie électrique. Trois types de moteurs électriques sont utilisés par la majorité des constructeurs automobiles qui sont : les moteurs à courant continu, les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones [27] [28].

1.3.3.2 Composants techniques des véhicules électriques

La compréhension des composants techniques et des équipements électriques des véhicules est essentielle pour saisir leur fonctionnement global. Contrairement aux véhicules à combustion interne, les véhicules électriques (VE) et les dispositifs électrifiés reposent sur un ensemble de composants spécifiques assurant à la fois leurs performances et la sécurité des utilisateurs. Le texte suivant présente une synthèse des principaux éléments techniques constituant les VE et les équipements électriques associés.

1. Variateur de vitesses

Le variateur de vitesse constitue un élément clé des véhicules électriques et des équipements électrifiés. Il a pour rôle de convertir le courant continu (DC) fourni par la batterie en courant continu ou en courant alternatif (AC), afin d'alimenter et de réguler le fonctionnement du moteur électrique. Lors du freinage régénératif, le processus inverse se produit : l'énergie cinétique récupérée est transformée en électricité, puis réinjectée dans la batterie pour améliorer l'efficacité énergétique du système.

2. La batterie

La batterie représente le composant central de tout véhicule électrique ou équipement électrifié, puisqu'elle constitue leur principale source d'énergie. Elle emmagasine l'électricité sous forme de courant continu et l'alimente vers l'ensemble des systèmes du véhicule ou de l'appareil. Aujourd'hui, les batteries lithium-ion sont les plus répandues grâce à leur forte densité énergétique, leur longue durée de vie et leur faible taux d'autodécharge, ce qui en fait une solution particulièrement efficace et fiable.

3. Le convertisseur DC/DC

Le convertisseur DC/DC est un élément essentiel qui assure la liaison entre la batterie haute tension et les accessoires basses tensions du véhicule ou de l'équipement. Il réduit la tension fournie par la batterie principale à un niveau compatible — généralement 12 ou 24 V — pour alimenter les équipements auxiliaires tels que l'éclairage, les essuie-glaces ou encore les systèmes audios. Ce composant joue un rôle clé dans l'optimisation de l'efficacité énergétique et dans le bon fonctionnement des systèmes embarqués.

4. Le moteur électrique

Le moteur électrique est le composant chargé de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, permettant ainsi de propulser le véhicule ou d'actionner l'équipement. Comparés aux moteurs à combustion interne, les moteurs électriques sont généralement plus compacts, plus légers et nettement plus silencieux. Ces caractéristiques contribuent à une meilleure efficacité globale, à un fonctionnement plus fluide et à une dynamique de conduite améliorée.

5. Le système de gestion thermique

Comme les moteurs et les variateurs génèrent de la chaleur durant leur fonctionnement, il est indispensable de disposer d'un système de gestion thermique performant afin de maintenir une température de fonctionnement optimale. Ce système repose généralement sur une combinaison de trois

techniques de refroidissement : le refroidissement liquide, la convection naturelle et le refroidissement par air forcé. Ensemble, elles garantissent la durabilité, la fiabilité et la sécurité des différents composants.

6. Le chargeur embarqué

Le chargeur embarqué est responsable de la conversion du courant alternatif (AC) provenant d'une station de charge externe en courant continu (DC) pour charger la batterie du véhicule ou de l'équipement.

7. Le calculateur de bord

Le calculateur de bord constitue l'unité de commande centrale chargée de superviser l'ensemble des fonctions électriques du véhicule ou de l'équipement. Il gère la répartition de l'énergie entre la batterie, l'onduleur et le moteur électrique, tout en prenant en compte les actions du conducteur comme l'appui sur l'accélérateur ou les freins afin d'assurer une conduite fluide, sécurisée et optimale.

1.3.3.3 Batterie de traction

Un véhicule électrique doit toujours disposer d'un système de stockage pour emmagasiner l'énergie électrique nécessaire à son fonctionnement. Il existe plusieurs technologies de stockage, chacune présentant des caractéristiques propres. Aujourd'hui, les constructeurs automobiles recherchent des solutions offrant un compromis optimal entre différents critères tels que le coût, le poids, la durée de vie, l'autonomie, le taux d'autodécharge, la capacité énergétique, la disponibilité des matériaux et les besoins en maintenance.

Les batteries de traction jouent un double rôle : elles servent de dispositifs de stockage et de générateurs réversibles, permettant ainsi aux véhicules électriques de récupérer et de stocker l'énergie cinétique convertie lors des phases de freinage. L'évolution et les performances des moyens de transport électrique, quel que soit leur type, dépendent étroitement des progrès réalisés dans les systèmes de stockage embarqués. Il convient de noter qu'une batterie est généralement définie par trois paramètres principaux [34][29].

- ➔ **La puissance de fonctionnement** : cette puissance est de vrai être égale ou supérieure à la Puissance demandée par le moteur afin qu'elle puisse l'alimenter.
- ➔ **L'énergie magasinée** : correspond à l'autonomie du véhicule qui sera définir à partir de la quantité d'énergie stockée en kWh.

- **État de charge** : State of charge (SOC) autrement dit en anglais qui donne l'état de charge de la batterie à l'instant t en pourcentage %. Aujourd'hui on trouve sur le marché plusieurs types de batterie dédiée à l'électrification des VE.

1.3.3.4 Les récents développements des batteries de traction

Le développement des véhicules électriques est étroitement lié aux progrès réalisés dans les systèmes de stockage embarqués. En effet, bien que les batteries aient connu de nombreuses améliorations, la densité énergétique des carburants reste nettement supérieure à celle des accumulateurs actuels. Les batteries se distinguent encore par une autonomie limitée, un coût relativement élevé et un temps de recharge nettement plus long qu'un simple plein de carburant, ce qui constitue un frein majeur à leur adoption massive. Pour surmonter ces limites, plusieurs équipes de recherche travaillent activement au développement de nouvelles technologies et modèles de batteries, parmi lesquels on peut citer [35] .

- **Le Massachusetts Institute of Technology (MIT)**, à travers son équipe A123 Systèmes, a développé un modèle de batterie au **Lithium-Nanophosphate**. Cette technologie repose sur l'utilisation des nanomatériaux, offrant une meilleure performance et une sécurité accrue.
- **Toshiba et AltairNano**, quant à eux, ont mis au point une batterie au **Lithium-Titanate**. Ce modèle se distingue par son large intervalle de température de fonctionnement, allant de **-50 °C à 75 °C**, ainsi que par une durée de vie dépassant **5 000 cycles**, pouvant atteindre **20 ans**. Il se caractérise également par un **temps de recharge exceptionnellement court**, de l'ordre de **10 minutes pour une charge complète**. Plus récemment, le professeur Gerbrand Ceder de l'institut MIT travail sur deux nouveaux modèles qui sont:

- **La batterie Cambridge Crude semi liquide** : Grâce à la découverte que les Ions pourraient se déplacer rapidement avec des nouvelles structures des batteries qui vont permettront une charge/décharge extrêmement rapide [31]. Cette batterie sera la solution clé en ce qui concerne le temps de recharge (équivalent à une recharge rapide), notamment le véhicule n'aura plus besoin de chargeur embraqué grâce à cette nouvelle technique. Le principe est de remplacer le liquide déchargé de la batterie par un autre liquide chargé, en utilisant un appareil de pompage.[32]

- ➔ **La batterie Lithium-air ou Lithium-oxygène** : Cette batterie est caractérisée par son faible poids, alors qu'il est à quatre fois inférieur qu'une batterie Lithium traditionnelle, le principe est d'utiliser des nanotechnologies afin de limiter la quantité de carbone [32].

1.3.3. 5 Bloc-batterie et système de gestion de batterie (BMS)

Le pack batterie est un assemblage de plusieurs batteries (cellules) afin de fournir l'énergie voulue par le moteur, comme est montré dans la figure (1.16). Ce dernier devrait se protéger par un boîtier en métal contre les dommages possibles, de même il est indispensable d'occuper le pack batterie par un système de contrôle comme le système de surveillance BMS.

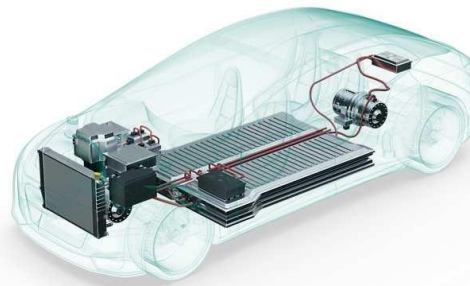


Figure 1.16 : Pack de batterie pour VE.[32]

- ➔ **Système de gestion de la batterie BMS** :

Le BMS (Battery Management System) est un système de contrôle conçu et intégré dans les VE afin de contrôler plusieurs paramètres comme : la température, l'état de charge et de décharge des batteries ainsi que l'énergie disponible, etc. [33]

- ➔ **La recharge des batteries** :

La recharge des batteries est une fonctionnalité assez importante considérée par les conducteurs des VE et hybride rechargeables. Actuellement, il existe plusieurs moyens de recharge à savoir : la recharge par inductance magnétique, la recharge par un chargeur externe ou embarqué et la possibilité d'échanger la batterie déchargée par une autre chargée.[34]

- ➔ **L'échange de batterie** : cette solution permettra au conducteur de changer sa batterie épuisée par une autre rechargée dans une station dédiée dans quelques minutes. Ce type de station existe déjà au Japon comme la compagnie Bette Place [35].

- ➔ **La recharge par inductance magnétique** : la figure (1.17) illustre un exemple d'une recharge par inductance d'un VE. Le principe est clairement simple qui consiste à placer le VE au-dessus de l'inductance afin que les deux bobines puissent se connecter à travers un champ électromagnétique.

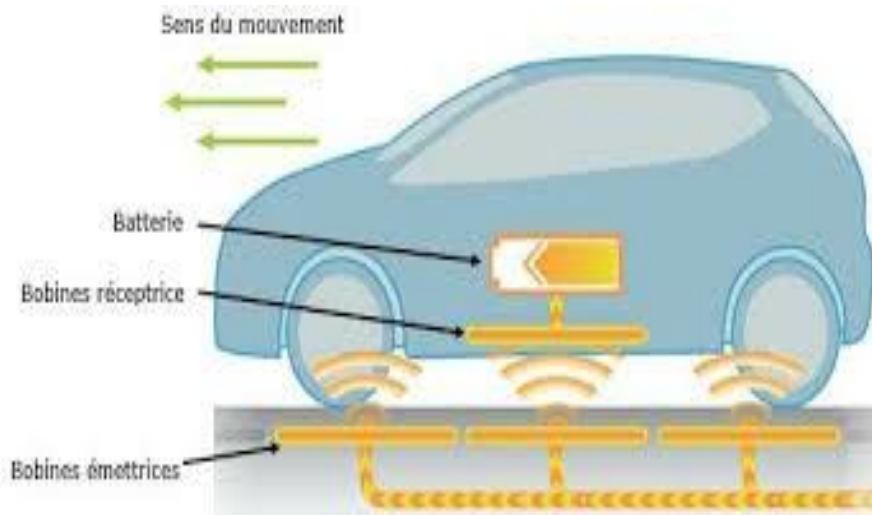


Figure 1.17: La recharge par inductance d'un VE.[36]

- ➔ **La recharge par chargeur externe ou embarqué** : un chargeur embarqué on le trouve déjà installé par le constructeur automobile, alors que le chargeur externe est un dispositif de recharge raccordé par un câble électrique qui se trouve dans les stations de service et/ou domestique [37][48].

Notons que les deux types de chargeurs assurent la conversion AC/DC, on distingue plusieurs niveaux de recharge 1,2 et 3 ainsi que différents modes de recharges [38] [48].

- La recharge lente : Sont les chargeurs
- La recharge lente : Sont les chargeurs à moyenne puissance 3kw, le temps de recharge de cette catégorie peut atteindre les 8 heures, sinon une recharge accélérée de 1 heure à 4 heures. Généralement ce mode est de niveau 1 correspond aux chargeurs intégrés et les prises de courant conventionnel AC [39] [40].
- La recharge rapide : Sont des chargeurs avec une puissance supérieurs à 11 kw, ce type de chargeurs se trouve dans les stations de service avec différents niveaux 2 et 3. Notons que le niveau 3 correspond à un chargeur à courant continu DC [41], comme est représenté dans Figure (1. 18).

Différents types de charge pour un VE :

	Courant AC			Courant DC	Courant AC	Courant DC
	De 3 à 43kVA			50kVA	43kVA	50kVA
Véhicule	Type 1	Type 2		Type 4	Combo	
Phase	Mono	Mono	Tri	DC	Mono	Tri
Courant max	32A	70A	63A	125A	70A	63A
Tension max	250 V AC	500 V AC		500 V DC	500V	
Nombre de broches	5	7		10	7	
Prises						

Courant AC : courant alternatif
 Courant DC : courant continu
 Mono : monophasée
 Tri : Triphasée

Figure 1.18: Différents types de charge pour un VE.[42]

On constate que plus la puissance de charge n'est élevée, plus le temps de recharge n'est réduit. Cependant, la recharge lente est généralement recommandée, car les recharges rapides peuvent nuire à la durabilité des batteries. Il est important de noter que la longévité d'une batterie dépend étroitement de la manière dont elle est chargée et déchargée.

1.3.3.6 Convertisseurs de puissance

Les véhicules électriques sont équipés de convertisseurs de puissance afin d'assurer diverses fonctions essentielles. On distingue principalement trois types de convertisseurs : les hacheurs, les onduleurs et les redresseurs.

- Hacheur : il s'agit d'un convertisseur DC-DC qui permet d'adapter la tension entre la batterie et un moteur à courant continu, tout en alimentant certains accessoires fonctionnant également en courant continu.
- Onduleur : le convertisseur DC-AC assure la liaison entre la batterie et les moteurs à courant alternatif.
- Redresseur : un convertisseur AC-DC qui transforme le courant alternatif en courant continu que l'en trouve généralement dans les stations de recharge des VE.

1.3.4 Infrastructure de recharge des VE :

Un véhicule électrique peut être rechargé à partir de différentes sources d'énergie, qu'elles soient renouvelables ou non renouvelables. Avec l'augmentation du nombre de VE en circulation, il devient essentiel de disposer d'un réseau d'infrastructures de recharge suffisamment développé [43]. Une station de recharge pour VE peut être alimentée directement par le réseau électrique, par des sources d'énergie renouvelable, ou par une combinaison des deux, afin d'optimiser l'efficacité et la disponibilité de la recharge.

Une station de recharge pour VE peut être alimentée par le réseau électrique, par des énergies renouvelables ou par une combinaison entre le réseau et les sources renouvelables.



Figure 1.19 : Exemple des stations de recharge pour VE. [45]

1.3.5 Exemples de quelques véhicules électriques récents

Aujourd'hui les constructeurs automobiles sont en compétition entre eux afin qu'ils offrent le meilleur moyen de transport en ce qui concerne les performances, la fiabilité, l'autonomie, la puissance et le prix. On trouve sur le marché plusieurs marques et modèles avec des caractéristiques différentes d'un constructeur à l'autre [46].

- *Constructeur BMW a proposé l'année 2018 une nouvelle motorisation sportive, la i3s avec une autonomie électrique atteindre les 201 km.*
- *La récente Chevrolet Volt une voiture électrique merveilleuse avec un prix adorable par rapport à son autonomie électrique qui dépasse les 383 km*
- *La Ioniq cette voiture est commercialisée par Hyundai, ce modèle offre en mode hybride rechargeable aussi. L'autonomie de cette voiture atteindre les 200 km avec un prix d'achat de 35649 Dollars.*

- *La Nissan Leaf une voiture 2019 qui peut parcourir 242 km sans être besoin de recharger, dispose d'une batterie de capacité 40 kWh.*
- *Tesla, un cas particulière de la Californie qui devenue la référence de jour pour cette gamme des VE. Les différents modèles disponibles sur le marché sont : la Tesla modèle S, modèle X et modèle 3, ces VE sont des voitures de rêve et qui n'ont même pas besoin de présentation concernant: l'autonomie, la technologie, le confort et la puissance.*

1.4 Conclusion :

Ce premier chapitre a permis de dresser une vue d'ensemble complète sur les véhicules hybrides et électriques, en retraçant leur évolution, leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs différentes architectures. Les véhicules hybrides ont été présentés comme une solution intermédiaire essentielle dans la transition énergétique, combinant intelligemment moteur thermique et moteur électrique afin de réduire la consommation de carburant et les émissions polluantes. Leur diversité technologique – micro hybrides, mild-hybrides, full-hybrides et plug-in hybrides – illustre la variété des stratégies adoptées par les constructeurs pour répondre aux contraintes environnementales et aux exigences de performance.

Le chapitre a également mis en évidence les fondements des véhicules électriques, depuis leur histoire jusqu'à leurs composants clés, notamment le moteur électrique, les convertisseurs de puissance, le chargeur embarqué ainsi que la batterie de traction, véritable cœur énergétique du véhicule. Les progrès réalisés dans les technologies de stockage – batteries lithium-ion, lithium-titanate, lithium-air ou encore solutions innovantes comme les systèmes semi-liquides – témoignent de l'effort intense de recherche visant à améliorer l'autonomie, la sécurité, le temps de charge et la durée de vie des VE.

Enfin, l'étude de l'infrastructure de recharge souligne l'importance d'un écosystème technologique complet pour accompagner l'essor de la mobilité électrique : bornes lentes, accélérées ou rapides, recharge inductive, échange de batteries, ou encore intégration des énergies renouvelables.

Ainsi, ce chapitre offre une base solide pour comprendre les enjeux, les défis et les perspectives prometteuses de l'électrification des transports. Il constitue un point de départ essentiel pour aborder, dans les chapitres suivants, les aspects plus techniques et approfondis liés à la chaîne de traction, à la commande, à la gestion énergétique et aux technologies émergentes du domaine.

Références

- [1] R.B. Lokapure, A.S. Raut, S.B. Patil, “Hybrid Electric Vehicles (HEV),” ResearchGate.
- [2] Green.org, “Exploring different types of hybrid cars,” Jan. 2024.
- [3] Automag.be, “Histoire de l’usine Pieper–Imperia.”
- [4] D.L.B. Mbemba, Modélisation, Conception et Expérimentation d’un véhicule hybride léger pour usages urbains, Univ. Franche-Comté.
- [5] CarJager, “Toyota Prius XW10 : la pionnière.”
- [6] Wikipedia Commons, “Honda Insight I,” image source.
- [7] ResearchGate, “Impacts of Hybrid Vehicles on Environment,” 2020.
- [8] N. Marc, Méthodologie de dimensionnement d’un véhicule hybride électrique sous minimisation des émissions de CO₂, Univ. Orléans, 2013.
- [9] Agliany et al., “Gains apportés par l’hybridation full-hybrid sur la Peugeot 3008 Hybrid4,” 2012.
- [10] AFDC Energy.gov, “How Plug-in Hybrid Electric Cars Work.”
- [11] ResearchGate, “Hybrid Electric Vehicles (HEV),” 2023.
- [12] Green.org, “Exploring different types of hybrid cars,” duplicate but cited again (kept intentionally).
- [13] Hybrid Electric Vehicles – Review of Existing Configurations (ResearchGate PDF).
- [14] Hybrid_Electric_Vehicles_A_Review_of_Existing_Conf.pdf, ResearchGate.
- [15] R. León, C. Montaleza, J.L. Maldonado, M. Tostado-Véliz, F. Jurado, “Hybrid Electric Vehicles: Review and Thermodynamic Cycles.”
- [16] Destiny Loukakou, Christophe Espanet, F. Dubas, Modélisation, Conception et Expérimentation d’un véhicule urbain hybride léger, 2012.
- [17] R.B. Lokapure, A.S. Raut, S.B. Patil, “Hybrid Electric Vehicles (HEV)” (second part).
- [18] Educauto.org, “Véhicules électriques,” 2018.
- [19] A. Daanoune, Étude et Optimisation d’une Machine Synchrone à Double Excitation pour VE Hybrides, Univ. Grenoble, 2012.
- [20] VoitureElectrique.net, 2018.
- [21] S. Sadeghian, “Développer la mobilité électrique : des projets d’acteurs au projet de territoire,” Univ. Paris-Est, 2013.
- [22] France-Pittoresque.com (plusieurs figures historiques).

- [23] France-Pittoresque, “La Jamais Contente.”
- [24] France-Pittoresque, “Voiture électrique W.P. 1902.”
- [25] France-Pittoresque, “Anderson Electric Car 1918.”
- [26] Evea-solutions.com, “Architecture des véhicules électriques.”
- [27] N. Marc, dimensionnement des moteurs électriques, Univ. Orléans.
- [28] D.L.B. Mbemba, “Véhicule hybride urbain,” 2012.
- [34] — Cité dans la partie batteries (document interne Souffran).
- [35] G. Souffran, Dimensionnement chaîne de traction VE hybride, Univ. Nantes, 2012.
- [36] Kevin Tanguy, “Recharge bidirectionnelle des VE,” 2013.
- [37] Infineon.com, “High-voltage automotive BMS.”
- [38] N. Marc, BMS (réutilisé du même document de 2013).
- [39] M. Marzouk, Développement de chargeurs intégrés pour véhicules hybrides plug-in, Univ. Grenoble, 2015.
- [40] BetterPlace, stations d’échange de batteries.
- [41] M. Marzouk, “Chargeur embarqué AC/DC,” 2015.
- [42] M. Marzouk, “Modes de recharge VE,” 2015.
- [43] B. Destraz, “Assistance énergétique avec supercondensateurs,” 2008.
- [44] B. Destraz, “Recharge rapide DC,” 2008.
- [45] IPCOCO, “Infrastructure de recharge VE,” Journal IGEEE.
- [46] Frandroid, “Réseaux de recharge VE,” 2024.
- [47] Journal de Montréal, “Top voitures électriques 2019.”
- [48] ResearchGate, “Coupleur magnétique pour recharge inductive VE .



Chapitre 2 :
Généralité sur les systèmes photovoltaïques



Chapitre 2 : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

2.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) constitue l'une des principales applications des énergies renouvelables (ENR). Elle est produite à partir du Rayonnement solaire, une source naturelle et durable. Ce type d'énergie repose sur l'utilisation de Cellules photovoltaïques, qui convertissent la lumière en électricité selon le Principe de l'effet photoélectrique, un phénomène physique par lequel un courant électrique est généré lorsque des photons frappent un matériau semi-conducteur.

Ce chapitre expose les principes fondamentaux des systèmes photovoltaïques solaires, en présentant la classification de leurs différents types ainsi que le fonctionnement et les modèles de représentation associés. Il traite également des paramètres techniques qui influencent leurs performances, ainsi que des méthodes d'assemblage des modules photovoltaïques, que ce soit en série pour augmenter la tension ou en parallèle pour augmenter le courant dans le but d'optimiser la production d'énergie.

2.2 Concepts généraux des systèmes photovoltaïques

2.2.1. Énergie solaire photovoltaïque

La lumière et la chaleur émises par le soleil sont appelées énergie solaire, et elles représentent l'une des sources les plus importantes d'énergie renouvelable. L'énergie solaire peut être exploitée grâce à plusieurs technologies classées en deux grandes catégories :

- Les technologies solaires actives, telles que les systèmes photovoltaïques.
- Les technologies solaires passives, qui comprennent une large variété de techniques comme l'orientation des bâtiments vers le soleil afin d'en maximiser le Rayonnement [57].

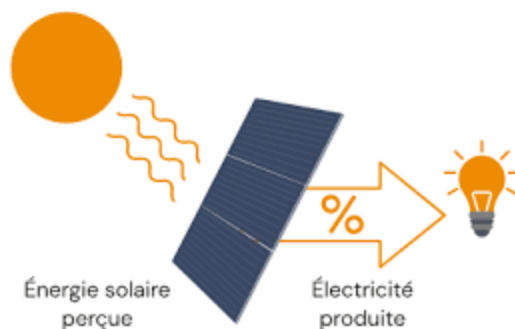


Figure 2.1 : Schéma unifilaire photovoltaïque.

2.2.2. Rayonnement solaire

La source principale d'énergie qui anime l'atmosphère est le Soleil. Cette énergie se propage sous forme d'ondes électromagnétiques, dont la longueur d'onde varie approximativement entre 0,2 et 4 μm . La plus petite quantité mesurable d'un champ électromagnétique est appelée photon. La définition moderne du photon découle des recherches d'Albert Einstein entre 1900 et 1920, s'appuyant sur les travaux du physicien allemand Max Planck. En 1926, le terme « photon » a été popularisé par Gilbert Lewis dans une lettre adressée à la revue Nature.

La puissance solaire reçue sous forme de rayonnement électromagnétique par unité de surface pendant une période donnée est appelée irradiance solaire (solar irradiance) et se mesure en W/m^2 selon le Système international d'unités (SI).

Cette irradiance peut être mesurée soit dans l'espace, soit à la surface de la Terre, après avoir été partiellement absorbée et diffusée par l'atmosphère. À la surface terrestre, la valeur de l'irradiance dépend de plusieurs facteurs :

- La **hauteur du soleil** au-dessus de l'horizon,
- Les conditions atmosphériques.

L'irradiance du soleil à la surface de la Terre est représentée par deux composantes principales :

- L'**irradiance directe normale (DNI)**.
- L'**irradiance globale horizontale (GHI)** [58].

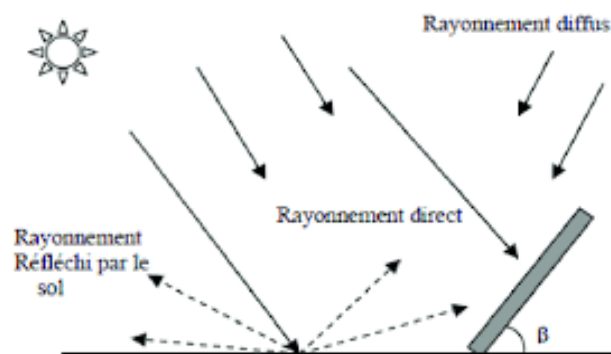


Figure 2. 2 : Schéma rayonnement-solaire.

2.2.3. Cellules solaires

Le terme « cellule solaire » a déjà été mentionné dans l'histoire du photovoltaïque. En réalité, une cellule solaire désigne tout dispositif qui convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. La grande majorité des cellules solaires sont fabriquées à partir de silicium,

avec une efficacité croissante et un coût décroissant selon que le matériau est amorphe (non cristallin), poly cristallin ou monocristallin (cristal unique).

Les cellules solaires, contrairement aux batteries ou aux piles à combustible, n'utilisent pas de réactions chimiques ni de carburant pour produire de l'électricité, et, comparées aux générateurs électriques, elles ne comportent aucune pièce mobile [59].

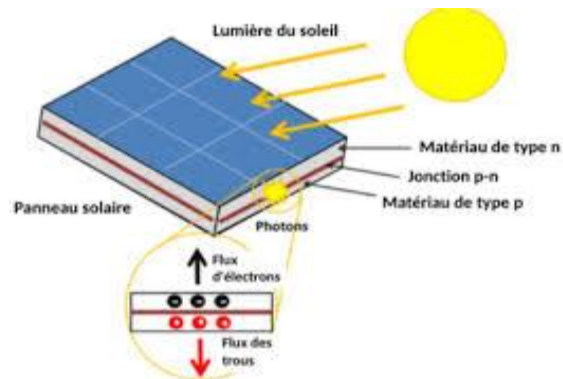


Figure 2.3: Schéma Cellules solaires.

2.3 Principe de fonctionnement de l'énergie photovoltaïque

2.3. 1. La conversion de la lumière en électricité :

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

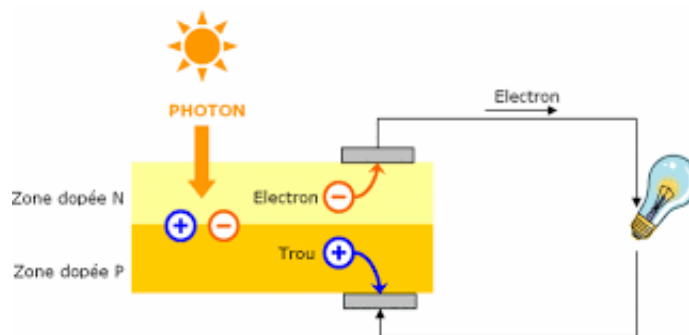


Figure 2.4: Schéma La conversion de la lumière en électricité

- ➔ **Isolant électrique** : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.
- ➔ **Conducteur électrique** (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.
- ➔ **Semi-conducteur** : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il y a donc courant électrique sous l'exposition à la lumière. [60]

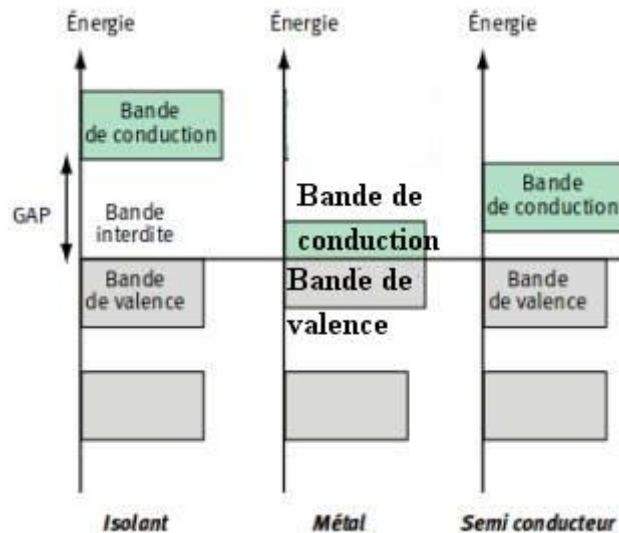


Figure 2.5:Schéma Diagramme des bandes d'énergie

Pour assurer une conversion efficace de l'énergie solaire en électricité, le processus doit passer par quatre étapes fondamentales :

- a) Absorption des photons à l'aide d'un matériau approprié (semi-conducteur).
- b) Génération des porteurs de charge (paires électron-trou).
- c) Séparation des porteurs de charge de signes opposés avant leur recombinaison.
- d) Collecte ou transport des porteurs de charge photo générés à travers des contacts électriques et leur passage dans un circuit externe pour produire un courant électrique utile.

2.3.2. L'absorption de la lumière dans le matériau

L'élément principal qui influence la capacité d'absorption des semi-conducteurs est l'énergie de gap (E_g), qui représente la différence entre l'énergie maximale de la bande de valence (BV) et l'énergie

minimale de la bande de conduction (BC). La bande de valence est entièrement remplie d'électrons, tandis que la bande de conduction est totalement vide. Les semi-conducteurs sont classés en deux grandes catégories selon la nature de leur bande interdite :

- Les semi-conducteurs à bande interdite directe,
- Les semi-conducteurs à bande interdite indirecte.

La Figure 2. 5 illustre les courbes de dispersion correspondant à ces deux types de semi-conducteurs : l'un présentant une bande interdite directe, et l'autre une bande interdite indirecte.

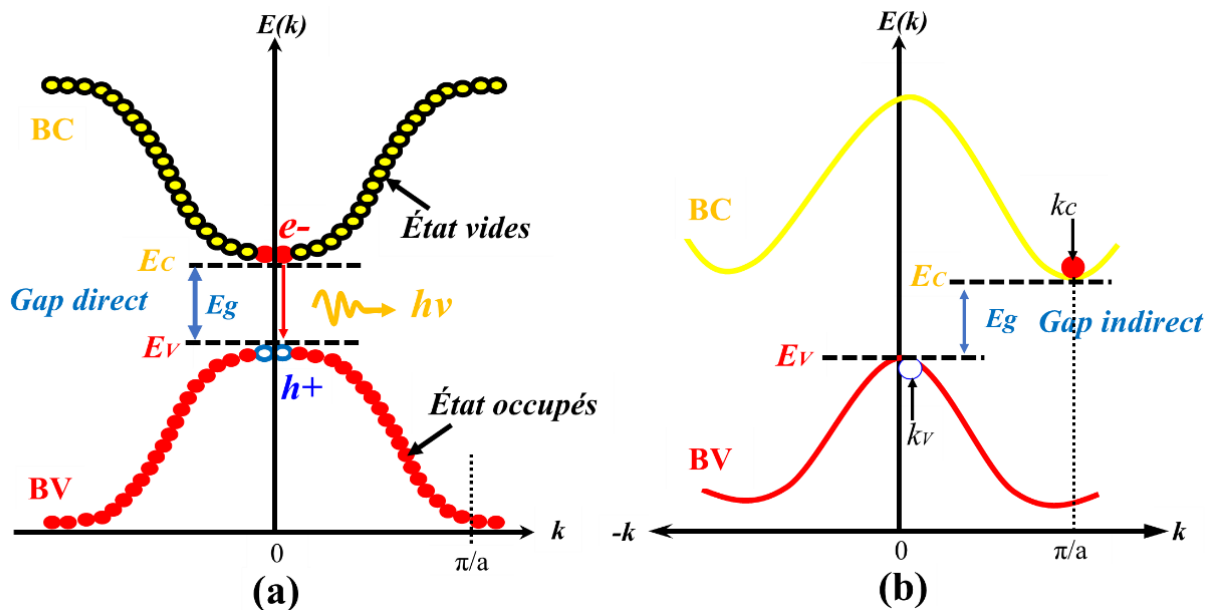


Figure 2. 6: Structure de bande d'un semi-conducteur à gap (a) : direct et (b) : indirect

Le gap direct est défini lorsque le minimum de la bande de conduction (BC) et le maximum de la bande de valence (BV) se situent au même vecteur d'onde (k). Dans ce cas, les transitions inter bandes se produisent verticalement dans le diagramme énergie-vecteur d'onde, ce qui signifie qu'elles sont radiatives (elles émettent ou absorbent de la lumière). Les semi-conducteurs tels que GaInP et GaAs, possédant respectivement des bandes interdites de **1,9 eV** et **1,42 eV**, appartiennent à la catégorie des matériaux à gap direct. En revanche, dans le cas d'un gap indirect (Figure 2.9.b), les extrémités des bandes le minimum de la BC et le maximum de la BV ne correspondent pas au même vecteur d'onde. La transition se fait alors de manière oblique, et elle n'est pas radiative.

Pour qu'un photon soit absorbé lorsque son énergie E_{ph} est égale ou légèrement supérieure à celle du gap E_g , l'intervention d'un phonon (quantum de vibration du réseau cristallin) est nécessaire afin de conserver la quantité de mouvement. Cette exigence supplémentaire diminue fortement la probabilité d'absorption.

Lorsque l'énergie du photon ($h\nu$) est inférieure au gap du matériau ($E_{ph} < E_g$), la transition n'est pas possible et le photon n'est pas absorbé. En revanche, lorsque le photon a une énergie suffisante ($h\nu \geq E_g$), l'interaction entre le photon et le semi-conducteur se traduit par la génération d'une paire électron-trou (e^-h^+), ce qui modifie localement la conductivité du matériau.

2.3.3. Génération de l'énergie solaire

La génération de l'énergie solaire repose sur le principe fondamental de l'effet photovoltaïque (**PV**), qui décrit l'interaction entre la lumière et la matière dans un semi-conducteur. Lorsque celui-ci est exposé à la lumière, les photons dont l'énergie est suffisante sont absorbés par le matériau, provoquant la création de paires électron-trou (e^-/h^+). Ce phénomène se produit lorsque des électrons sont excités de la bande de valence (**BV**) vers la bande de conduction (**BC**). Pour que l'effet photovoltaïque soit efficace, il est indispensable d'assurer une séparation rapide de ces paires électron-trou. En effet, si cette séparation n'a pas lieu, les porteurs de charge risquent de se recombiner, ce qui entraîne l'émission d'un phonon (chaleur) ou d'un photon (lumière), comme illustré dans la (Figure 2. 6), et provoque ainsi une perte d'efficacité dans la conversion énergétique.

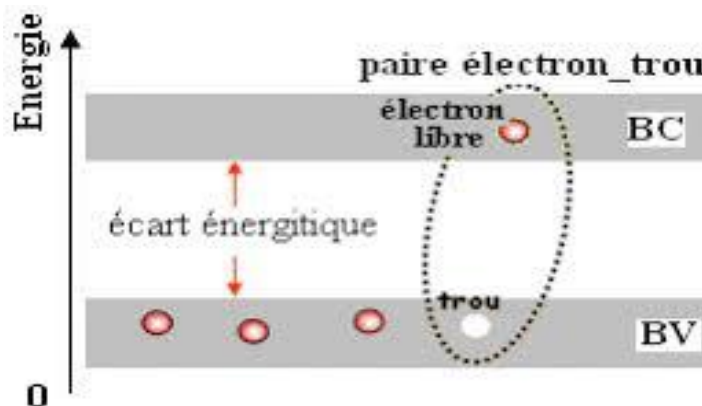


Figure 2.7 : Génération de paires électron-trou.

La séparation réussie des paires (e^-h^+) permet alors de générer un courant électrique continu, exploitant ainsi efficacement l'énergie lumineuse absorbée par le semi-conducteur [61].

2.3.4. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Pour optimiser le rendement d'une cellule solaire (CS), il est primordial de réduire au maximum les recombinaisons entre les électrons (e^-) et les trous (h^+), tout en assurant leur migration vers des faces opposées du matériau. Cette séparation des charges induit une différence de potentiel électrique, à l'origine du photo-courant. Afin d'obtenir cette séparation efficace, on crée généralement un champ électrique interne permanent au sein du semi-conducteur grâce à la formation d'une jonction PN. Cette jonction résulte de l'association de deux couches de semi-conducteurs — l'une dopée de type P et l'autre dopée de type N (comme illustré dans la Figure 2.11). Le rôle principal de la jonction PN est de diriger sélectivement les électrons et les trous dans des directions opposées, ce qui favorise la génération d'un courant électrique continu lorsque la cellule photovoltaïque est soumise à un rayonnement lumineux

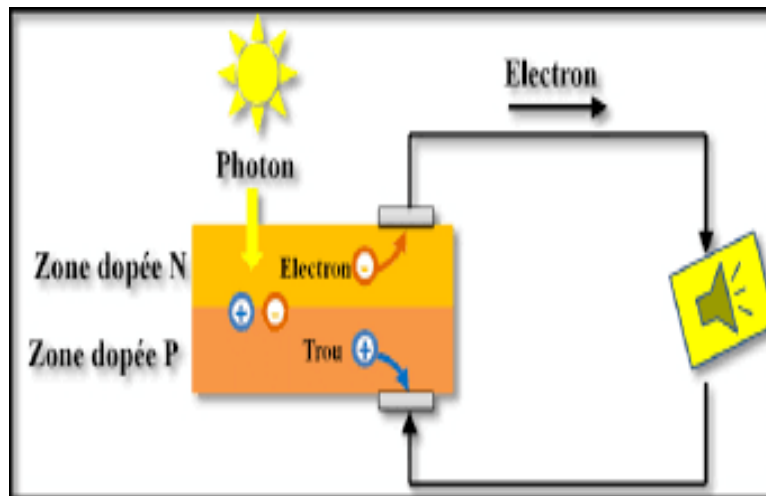


Figure 2. 8:Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Lorsqu'un semi-conducteur dopé de type P entre en contact avec un semi-conducteur dopé de type N, un phénomène de diffusion se produit au niveau de leur interface. Les électrons majoritaires (e^-) de la région N migrent vers la zone P, tandis que les trous majoritaires (h^+) de la région P se déplacent en sens inverse, vers la zone N. À l'interface, ces porteurs de charge se recombinent, formant ainsi une région dépourvue de porteurs libres, appelée zone de charge d'espace

(ZCE). Cette recombinaison engendre une différence de potentiel et crée un champ électrique interne orienté de la région N vers la région P.

Le champ électrique interne présent dans la ZCE assure la séparation spatiale de ces porteurs photo générés : les électrons (e^-) sont attirés vers la couche N, tandis que les trous (h^+) sont dirigés vers la couche P, permettant ainsi la génération d'un courant électrique lorsque le circuit est fermé.

2.4. Paramètres fondamentaux d'une cellule solaire

Le modèle représente le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle et est connu comme un modèle à cinq paramètres (I_0 , n , R_s , R_p , I_{ph}), car il décrit avec précision son comportement électrique. La résistance R_s représente les pertes internes, tandis que La résistance R_p traduit les courants de fuite de la cellule.

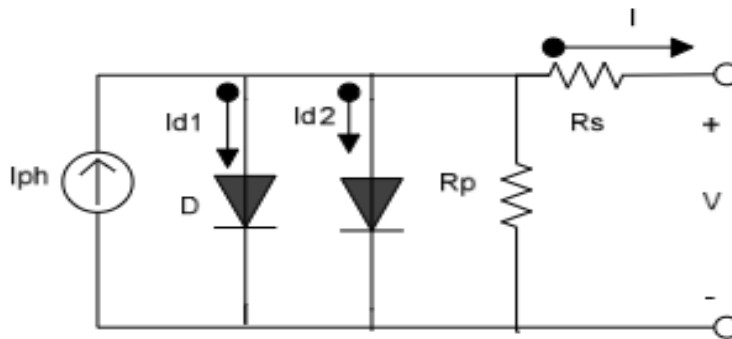


Figure 2. 9 : Modèle à deux diodes.

Il s'agit d'une forme modifiée du circuit à diode unique, qui prend en compte l'effet de recombinaison en introduisant une seconde diode en parallèle.

$$I = I_{PH} - I_{O1} \left(e^{\frac{v+IR_s}{n_s1vT}} - 1 \right) - I_{O2} \left(e^{\frac{v+IR_s}{n_s2vT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Cependant, il y aura désormais deux facteurs de qualité de diode inconnus. Ainsi, le nombre d'équations et de paramètres inconnus augmente également à deux, ce qui rend les calculs un peu plus complexes. Les faibles niveaux d'irradiance et à basses températures, le modèle photovoltaïque à deux diodes présente une meilleure précision dans la représentation des caractéristiques courant-tension ($I-V$) et puissance-tension ($P-V$) que le modèle à une seule diode. Cependant, quelle que soit la complexité du modèle utilisé, les grandeurs physiques essentielles de la cellule solaire (CS) restent déterminées à partir de sa caractéristique $I(V)$.

- **Tension V_{co}** : La tension de circuit-ouvert V_{co} est la tension maximale aux bornes de la CS lorsque le courant qui la traverse est nul (circuit ouvert), elle dépend particulièrement de l'éclairement solaire ainsi que de la température de la CS :

$$0 = I_{PH} - I_{sat}(\exp(\frac{V_{co}}{V_t}) - 1) - \frac{V_{co}}{R_p} \quad (2.2)$$

$$V_{co} = \frac{nKT}{q} \ln \frac{(I_{cc} + I_{sat}(T))}{I_{sat}(T)} = V_t \ln(1 + \frac{I_{cc}}{I_{sat}(T)}) \quad (2.3)$$

- **Courant de court-circuit:** Le courant de court-circuit est le courant fourni par la cellule solaire à un circuit ayant une résistance nulle (par exemple, un fil métallique). D'après l'expression générale du courant, le courant de court-circuit s'écrit pour $V = 0$ comme suit :

$$I_{cc} = \frac{R_p}{R_s + R_p} (I_s [\exp(\frac{qIR_s}{nKT}) - 1] - I_{ph}) \quad (2.4)$$

- **Puissance P_m** : La puissance maximale P_m est le point de fonctionnement optimal d'une CS où elle atteint sa puissance maximale. Cela se produit lorsque la cellule génère le meilleur compromis entre le courant et la tension. Au point de puissance maximale (I_m , V_m).

$$\frac{I_m}{V_{mp}} = -(\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}) \quad (2.5)$$

- **Facteur de remplissage FF** : Ou facteur de forme est un Paramètre important pour définir la qualité d'une CS, et indique le rapport entre puissance P_m sur le produit de courant ICC et la tension VCO .

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \text{ avec } P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad (2.6)$$

Rendement de conversion (η) : L'efficacité η est exprimée en pourcentage et indique la quantité d'énergie solaire capturée par la cellule qui est effectivement convertie en courant électrique. Elle est calculée par le rapport entre la puissance P_{max} et la puissance lumineuse incidente P_{in} sur la cellule PV.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (2.7)$$

2.5. Assemblage des modules photovoltaïques

Les panneaux solaires sont des composants essentiels des systèmes d'énergie solaire, et leur raccordement correct constitue un facteur clé pour atteindre le rendement souhaité.

Il existe trois principales méthodes de connexion des panneaux solaires : la connexion en série, la connexion en parallèle et la connexion mixte (ou hybride). Chaque méthode influence différemment la tension, le courant et la puissance totale du système. Le choix du type de connexion dépend de la nature et des exigences du système solaire [62].

2.5.1. Assemblage en série

La connexion en série consiste à relier la borne positive d'un panneau solaire à la borne négative du panneau suivant, et ainsi de suite. Dans ce type de connexion, la tension totale du système est égale à la somme des tensions de chaque panneau, tandis que le courant reste identique dans l'ensemble des panneaux. Cette méthode est couramment utilisée dans les systèmes nécessitant une tension élevée, tels que : ceux raccordés à des onduleurs ou à des régulateurs de charge conçus pour 48 V ou plus. Cependant, la connexion en série présente un inconvénient majeur : si un panneau est ombragé ou défectueux, cela affecte les performances de l'ensemble de la chaîne [63]

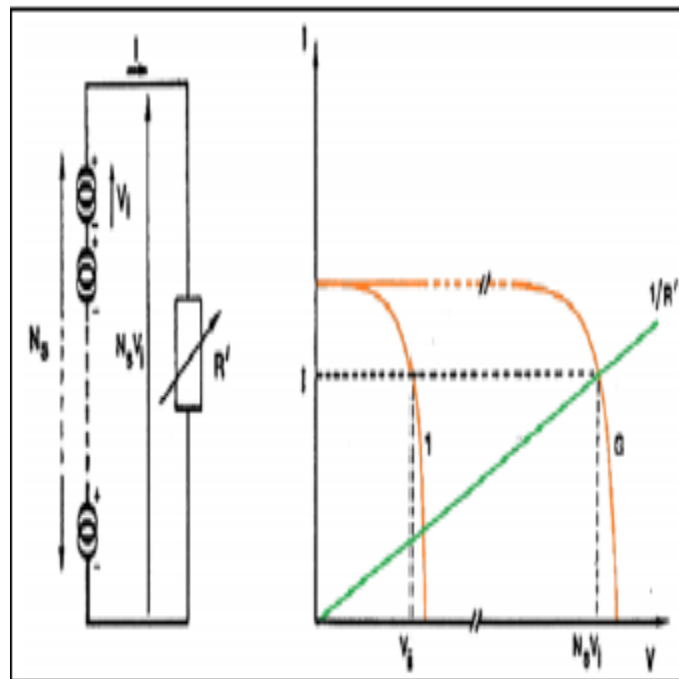


Figure 2.10 :Schéma Assemblage en série.

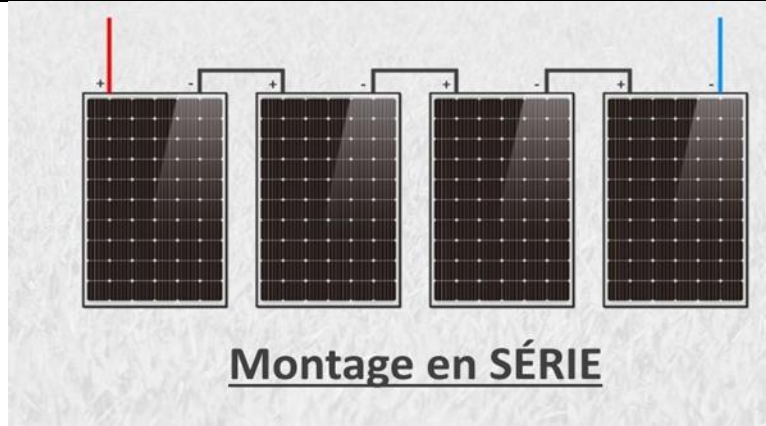


Figure 2. 11: Schéma Assemblage des panneaux en série

2.5.2. Assemblage en parallèle

La connexion en parallèle consiste à relier ensemble toutes les bornes positives des panneaux solaires, ainsi que toutes les bornes négatives. Dans cette configuration, la tension du système reste identique à celle d'un seul panneau, tandis que le courant total correspond à la somme des courants produits par chaque panneau. Cette méthode est particulièrement adaptée lorsque l'on souhaite obtenir un courant élevé avec une tension relativement faible, comme dans les systèmes de 12 V ou 24 V.

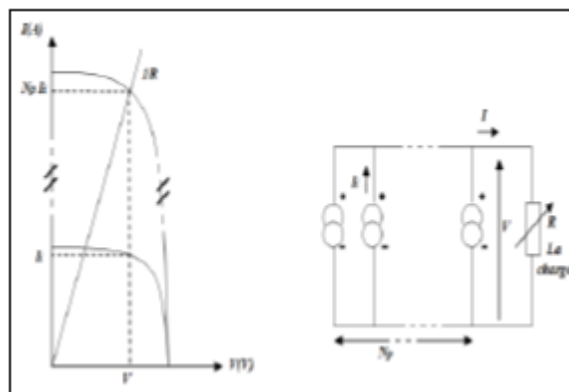


Figure 2. 12: Schéma Assemblage en parallèle.

L'un des principaux avantages de la connexion en parallèle est qu'elle est moins sensible à l'ombrage : si un panneau est partiellement ombragé, les autres continuent de fonctionner avec un impact minimal sur les performances globales. Cependant, comme le courant total augmente, il est nécessaire d'utiliser des câbles de plus grande section afin d'éviter la surchauffe et les pertes de puissance [64].

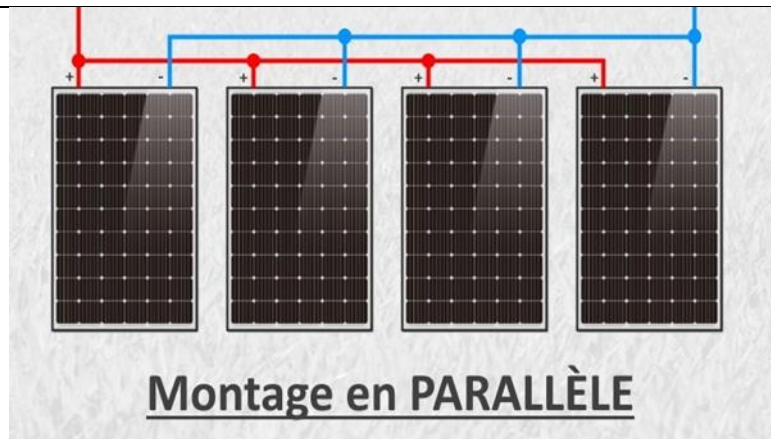


Figure 2. 13: Schéma Assemblage DES PANNEAUX en parallèle.

2.5.3. Assemblage en série / parallèle

La connexion mixte (ou hybride) combine à la fois les méthodes de connexion en série et en parallèle. Par exemple, plusieurs panneaux sont d'abord connectés en série pour former un groupe, puis plusieurs de ces groupes sont raccordés en parallèle. Cette méthode est couramment utilisée dans les systèmes de grande taille ou avancés, tels que les centrales solaires ou les installations industrielles, car elle offre un équilibre entre la tension et le courant tout en apportant une flexibilité dans la conception du système. Elle permet également de réduire l'impact de l'ombrage partiel ou de la défaillance d'un panneau individuel [65].

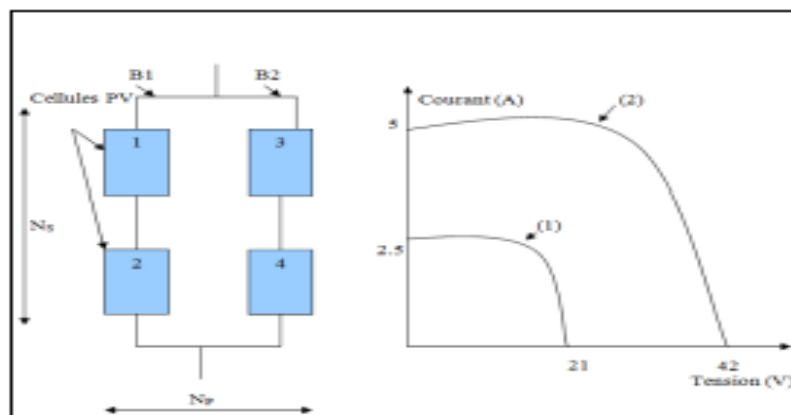


Figure 2.14: Schéma Assemblage en série / parallèle.

Le choix du type de connexion dépend de plusieurs facteurs, notamment la conception du système solaire, le type de charges, les spécifications du régulateur de charge, ainsi que l'espace disponible. La connexion en série permet d'obtenir une tension plus élevée, la connexion en parallèle fournit un courant plus important, tandis que la connexion mixte offre une solution équilibrée et flexible. Chaque méthode présente ses propres avantages et doit être choisie avec soin afin d'optimiser les performances globales du système [66].

2.6. Conclusion

Ce chapitre présente les systèmes photovoltaïques. Il commence par une introduction générale, puis expose les concepts fondamentaux de ces systèmes, notamment l'énergie solaire photovoltaïque, les caractéristiques du rayonnement solaire et les cellules solaires. Ensuite, il explique les principes de fonctionnement des cellules photovoltaïques, depuis la conversion de la lumière en électricité, en passant par l'absorption de la lumière dans le matériau, jusqu'à la génération d'énergie solaire et le fonctionnement de la cellule. Le chapitre aborde ensuite la modélisation des cellules photovoltaïques pour mieux comprendre leur comportement électrique, ainsi que les paramètres techniques essentiels à l'évaluation des performances. Enfin, il décrit les méthodes d'assemblage des modules photovoltaïques, que ce soit en série, en parallèle ou en configuration mixte série/parallèle, en mettant l'accent sur l'effet de chaque méthode sur l'optimisation de la production d'énergie selon les besoins du système.

Références

- [57] Aghaei, M., Nedaei, A., Eskandari, A., & Milimonfared, J. (2022). Introductory chapter: solar photovoltaic energy. In *Solar Radiation-Measurement, Modeling and Forecasting Techniques for Photovoltaic Solar Energy Applications*. IntechOpen.
- [58] Aghaei, M., Nedaei, A., Eskandari, A., & Milimonfared, J. (2022). Introductory chapter: solar photovoltaic energy. In *Solar Radiation-Measurement, Modeling and Forecasting Techniques for Photovoltaic Solar Energy Applications*.
- [59] Solar Cell | Definition, Working Principle, & Development | Britannica. Available from: <https://www.britannica.com/technology/solar-cell>. [Accessed: 01 June 2022]
- [60] S. Adachi, "GaAs, AlAs, and Al_xGa_{1-x}As: Material parameters for use in research and device applications", *Journal of Applied Physics*, 58(3), R1-R29, 1985
- [61] L.djedoui, Goldberg, "Gallium indium phosphide (Ga_xIn_{1-x}P) ", *Handbook Series on Semiconductor Parameters: Volume 2: Ternary and Quaternary III-V Compounds*, 37-61, 1996.
- [62] Solanki, C. S., *Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and Applications*
- [63] Solar Energy International, *Photovoltaics: Design and Installation Manual*
- [64] NREL, www.nrel.gov – Photovoltaic System Basics
- [65] “Design of Hybrid PV Array Connections for Optimization in Solar Farms”
- [66] Solanki, C. S., and SEI Manual



Chapitre 3 :
Réalisation expérimentale du système de recharge
pour le véhicule électrique



Chapitre 3 : Réalisation expérimental du système de recharge pour le véhicule électrique

3.1 Introduction

Ce chapitre est destiné à la présentation des étapes de réalisation expérimentale du système de recharge intelligent pour le véhicule électrique. La première partie est consacrée à l'intégration de partie logicielle liée à l'application mobile, qui permet de surveiller la recharge en temps réel via Firebase, d'afficher les paramètres électriques, de gérer les sessions de charge et de sélectionner le mode de fonctionnement approprié. L'échange d'informations entre Arduino, ESP32 et l'application est détaillé afin d'expliquer comment les données sont collectées, transmises et visualisées par l'utilisateur. La deuxième partie de ce chapitre est dédiée à la conception globale du fonctionnement conjoint des composants électroniques et de l'interface logicielle, démontrant la cohérence et l'efficacité du système dans la réalisation d'une recharge intelligente, sûre et optimisée.

3. 2 Définition complète du dispositif NBM EV Smart Charger

Le NBM EV Smart Charger est un système électronique intelligent conçu pour la recharge sécurisée, contrôlée et connectée des véhicules électriques. Il s'agit d'un dispositif combinant électronique embarqué, communication sans fil et supervision intelligente, afin d'assurer un fonctionnement fiable et évolutif. Le chargeur repose sur une architecture modulaire permettant l'interaction entre plusieurs sous-systèmes :

- *Un microcontrôleur principal (Arduino Pro Mini) chargé de la mesure du courant, de la tension et de la température, ainsi que du contrôle des relais de puissance ;*
- *Un microcontrôleur secondaire (ESP32) dédié à la connectivité Wi-Fi, à la communication avec la base de données (serveur cloud), et à la gestion de l'affichage sur écran TFT ;*
- *Les capteurs analogiques et numériques pour la surveillance en temps réel des paramètres électriques ;*
- *Les modules de protection assurant la sécurité de l'utilisateur et du véhicule pendant la charge.*

Le rôle principal du système est d'assurer :

- *La mesure en temps réel du courant, de la tension et de la puissance délivrée au véhicule ;*
- *La gestion automatique de la charge, selon les conditions programmées (température, durée, intensité maximale, etc.) ;*

- *La protection contre les anomalies électriques, telles que la surintensité, la surchauffe, le défaut de terre ou les fuites de courant ;*
- *La communication sans fil avec une application mobile ou un site web, permettant la supervision et le contrôle à distance ;*
- *L'assistance intelligente, grâce à l'intégration d'algorithmes d'optimisation et à la localisation des bornes de recharge via carte interactive.*

Grâce à cette conception, le NBM EV Smart Charger garantit une expérience utilisateur complète

:

- 1) *L'utilisateur peut suivre sa recharge, consulter l'historique de consommation, activer ou désactiver le système à distance, et même planifier les cycles de charge selon les tarifs ou la disponibilité énergétique (par exemple en mode solaire).*
- 2) *Le dispositif est distingué par sa simplicité d'utilisation, sa sécurité renforcée et sa connectivité intelligente, faisant de lui un exemple concret de l'intégration réussie entre l'électronique embarquée, l'internet des objets (IoT) et l'intelligence artificielle appliquée à la mobilité électrique.*

3.3 Protocole de charge des véhicules électriques

Le protocole de charge définit les règles de communication entre le chargeur et le véhicule électrique afin d'assurer une charge sûre, efficace et intelligente. Il permet l'échange d'informations telles que le courant maximal autorisé, l'état de connexion, la température ou encore la fin du processus de charge. Dans le cas du Mode 3 (norme IEC 61851) utilisé pour la charge en courant alternatif (AC), la communication repose sur deux lignes principales :

- **CP (Control Pilot)** : *Ligne de commande envoyée par le chargeur vers le véhicule. Elle transporte un signal PWM à 1 kHz dont le rapport cyclique indique le courant maximal disponible (par exemple 16 A ou 32 A). Ce signal permet également de détecter la présence du véhicule et d'autoriser ou d'interrompre la charge.*
- **PP (Proximity Pilot)** : *cette ligne identifie le type de câble utilisé grâce à une résistance intégrée, garantissant que le courant ne dépasse pas la capacité du câble.*

Le protocole définit aussi plusieurs états de fonctionnement :

- ➔ **État A** : aucun véhicule connecté.
- ➔ **État B** : véhicule connecté, prêt à charger.

- ➔ **État C** : charge en cours.
- ➔ **État D** : charge avec ventilation requise.
- ➔ **État E/F** : défaut ou erreur de connexion.

Dans les systèmes plus avancés, comme le CCS (Combined Charging System), la communication devient numérique grâce au PLC (Power Line Communication), permettant l'échange d'informations détaillées : tension, courant, température, et état de la batterie.

Dans notre projet, la carte Arduino génère le signal CP (PWM) et lit les signaux de sécurité, tandis que le module ESP32 assure la supervision via Wi-Fi ou Bluetooth et transmet les données vers l'application mobile. Ensemble, ils reproduisent une architecture conforme au protocole IEC 61851, garantissant une gestion fiable et sécurisée de la charge.

3.4 Processus complet de conversion de l'énergie des PV en courant alternatif pour la recharge d'une VE

Le processus de production d'une alimentation alternatif $V=230V$ et $I=30A$, destinée à la recharge d'un véhicule électrique, à partir de l'énergie solaire, repose sur une chaîne cohérente et complémentaire de composants photovoltaïques et électroniques. Chaque étape joue un rôle essentiel pour garantir une puissance suffisante, une stabilité énergétique et un niveau de sécurité conforme aux normes internationales.

3.4.1 .Panneaux solaires photovoltaïques

Les panneaux solaires photovoltaïques (PV) constituent la source primaire du système. Ils assurent la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique continue (DC). Chaque panneau fournit généralement une tension comprise entre 30 et 50 V DC et un courant de 8 à 12 A, selon la technologie utilisée (mono, poly, half-cut...). Pour obtenir une puissance globale d'environ 7 kW, les panneaux sont assemblés de manière adaptée :

- *En série pour augmenter la tension.*
- *En parallèle pour augmenter le courant.*

Avec : La configuration requiert typiquement 15 à 18 panneaux de 450 W chacun.

3.4.2 Régulateur de charge Maximum Power Point Tracking

Le régulateur Maximum Power Point Tracking (MPPT) est l'un des composants les plus importants du système. Ses fonctions principales sont :

- *Optimiser en permanence la puissance extraite des panneaux.*

- *Stabiliser la tension et le courant.*
- *Assurer la charge efficace et sécurisée des batteries.*

Il reçoit du courant continu variable et instable provenant des panneaux et délivre un courant DC régulé, parfaitement adapté aux batteries de stockage.

3.4.3 Batteries de stockage

Les batteries constituent le réservoir énergétique de l'installation. Elles stockent l'énergie fournie par le MPPT afin de garantir une réserve suffisante, même en absence de soleil. Les configurations les plus courantes sont :

- *24V*
- *48V (fortement recommandée pour les fortes puissances)*

Leur rôle est de :

- *Fournir un courant important au moment de la demande.*
- *Assurer une alimentation stable pour l'onduleur.*
- *Permettre un fonctionnement continu du chargeur.*

3.4.4 L'onduleur de tension

L'onduleur de tension est l'élément central pour générer une tension alternative 230V AC capable d'alimenter un chargeur de véhicule électrique. Il reçoit :

- *Du 48V DC (ou 24V selon la configuration) provenant des batteries.*

Et délivre :

- *Du 230V AC, avec une puissance pouvant atteindre 7 kW.*

Pour atteindre un courant disponible de 30A, l'onduleur doit offrir une puissance minimale de :

$$P=230V \times 30A \approx 6900WP$$

Ainsi, un onduleur de 7 kW, voire 8 kW pour une marge de sécurité, est indispensable.

3.4.5 Tableau de protection électrique

Le système de sécurité inclut plusieurs éléments, telle que :

- **Disjoncteurs DC** (entre les panneaux et le MPPT) ;
- **Disjoncteurs DC** (entre le MPPT et les batteries) ;
- **Disjoncteurs AC** (entre l'onduleur et le chargeur) ;
- **Fusibles** ;
- **Parafoudre.**

Ces éléments de protections assurent :

- *L'isolation des défauts,*
- *La coupure rapide en cas de court-circuit,*
- *La prévention des incendies,*
- *La protection contre les surtensions et la foudre.*

3.4.6 Principe de connections de chargeur

Après toutes ces étapes :

- *L'onduleur fournit un courant alternatif stable.*
- *Le chargeur EV (EVSE) régule l'intensité transmise au véhicule.*
- *Le courant final disponible peut atteindre 30A, selon la capacité de l'onduleur et des batteries.*

Le chargeur utilise le protocole CP/PWM pour communiquer avec le véhicule et définir l'intensité maximale autorisée, garantissant un fonctionnement sûr et conforme aux normes IEC 61851.

Un système destiné à produire 230V/30A de type AC à partir de l'énergie solaire repose sur une succession de modules photovoltaïques et électroniques formant une chaîne énergétique cohérente. Le processus débute par les panneaux solaires PV, qui assurent la conversion du rayonnement solaire en énergie continue. Cette énergie est ensuite optimisée par un régulateur MPPT, chargé de stabiliser la tension et d'assurer une charge efficace des batteries 48V à haute capacité. Les batteries jouent le rôle d'un stockage intermédiaire capable de fournir un courant important et constant.

L'onduleur transforme ensuite le courant continu en 230V AC, avec une puissance pouvant atteindre 7 kW, valeur nécessaire pour alimenter un chargeur de véhicule électrique. Une carte de protection regroupant disjoncteurs, fusibles et parafoudre garantit la sécurité de l'ensemble de l'installation. Enfin, le chargeur EV utilise ce courant alternatif pour fournir jusqu'à 30A au véhicule, grâce au protocole CP/PWM qui régule automatiquement le courant admis par la batterie du véhicule conformément aux normes internationales.

3.5 Les composants principaux de chargeur

Le dispositif NBM EV Charger, cœur du système EV Smart Charger, repose sur un ensemble de composants électroniques soigneusement sélectionnés pour assurer performance, fiabilité et sécurité.

Chaque élément joue un rôle essentiel dans la gestion intelligente du processus de charge. Ci-dessous sont présentés les principaux composants utilisés dans la conception.

3.5.1 Tableau des composants :

Tableau 3. 1 : Rôle des composants électroniques

Les composants électroniques	Rôle
Arduino mini pro	Assure le contrôle principal du système et gère les capteurs et la sécurité.
Esp 32 woorm 32	Gère la communication Wi-Fi, l'application mobile, le GPS et le RFID.
NE555	Génère un signal stable ou un timing utilisé dans le circuit de commande.
Convertisseurs	Fournissent les tensions stables nécessaires pour alimenter les modules électroniques.
Relais	Permettent la commutation de puissance pour activer ou couper le 230V vers la voiture.
ACS750	Mesure le courant consommé pour le contrôle et la protection.
LM35LCZ	Mesure la température du chargeur ou du câble pour éviter la surchauffe.
ICL7660	Génère une tension négative pour certains circuits analogiques.
LM7805CTNOPB	Régule la tension à 5V pour alimenter les composants sensibles.
GPS	Fournit la localisation en temps réel si nécessaire dans le système.
RFID	Gère l'identification de l'utilisateur
TFT 2.8 INCH	Affiche les données, états du système et informations de charge.
1N749A	Diode Zener utilisée pour la régulation et la protection de tension.
1N4007	Diode redressement

RGB	Indique l'état du chargeur
Pcb carte	Support physique
Cable connecteur male/ femelle 1pin	Les composants sont reliés entre eux de manière organisée et facile à entretenir.
USB ttl	Il permet de programmer Arduino et de transférer des données via un numéro de série.
Cable USB	Il est utilisé pour l'alimentation électrique, la programmation ou la communication informatique.

3.6 Description et rôle des sous-blocs

3.6.1 Bloc de production d'énergie solaire



Figure 3.1 : mppt solar.

Ce bloc représente la source d'énergie principale lorsque le système fonctionne en mode photovoltaïque

Éléments :

- Panneaux solaires (PV) : convertissent l'énergie lumineuse du soleil en courant continu (DC).
- Régulateur MPPT : optimise le point de puissance maximale pour extraire le maximum d'énergie des panneaux.
- Onduleur (Inverter) : convertit le courant continu provenant des panneaux en 230 V AC, compatible avec le chargeur et avec les appareils domestiques

Rôle : Il fournit une énergie propre et stabilisée qui sera utilisée soit directement par le chargeur, soit injectée dans le réseau.

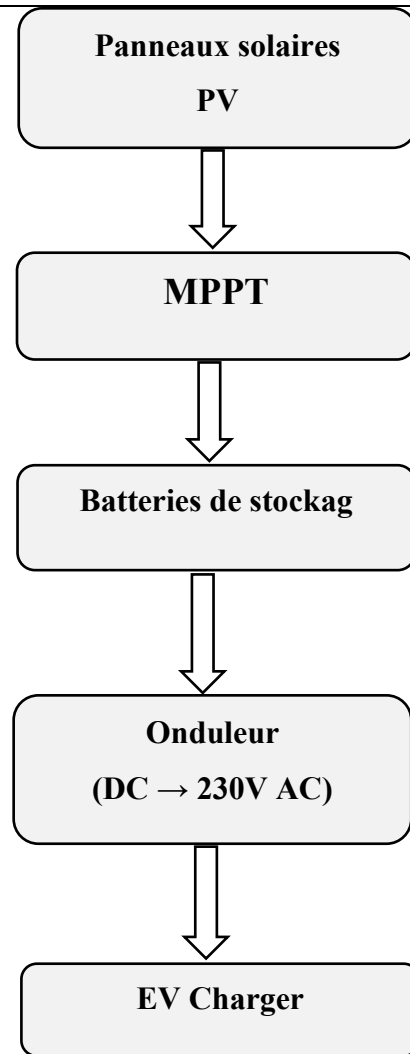


Figure 3.2 : Diagramme d'énergie solaire.

3.6.2 Bloc d'alimentation

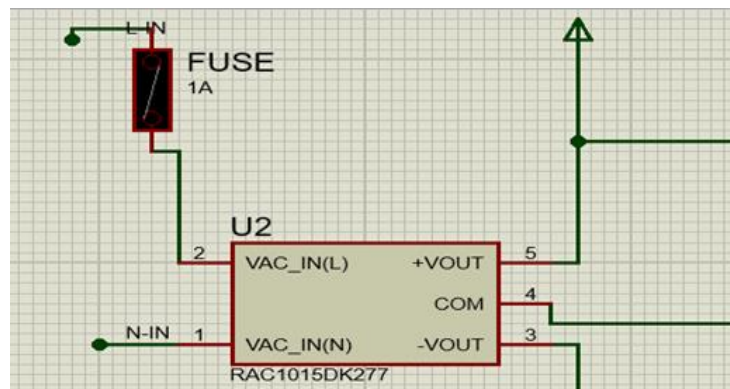


Figure 3.3 : Schéma de conversion.

Ce bloc assure la conversion de la tension du réseau (230V) en tensions continues adaptées au fonctionnement des cartes électroniques (12V /-12V et 5V/3.3V). Il comprend les éléments de protection et de régulation nécessaires à la stabilité du système.

Sa fonction principale est de garantir une alimentation sûre, stable et isolée pour l'ensemble du dispositif.

3.6.3 Bloc de sécurité et de commande

Le bloc de sécurité joue un rôle essentiel dans la protection de l'utilisateur, du véhicule et du chargeur contre les anomalies électriques. Il regroupe plusieurs dispositifs qui assurent la **surveillance, la coupure et la protection** du circuit :

- **Relais de puissance** : Permet de connecter ou de déconnecter la tension 230 V vers le véhicule. Il agit comme un interrupteur contrôlé par l'Arduino selon les conditions de sécurité.
- **GFCI (Ground Fault Circuit Interrupter)** : Détecte toute fuite de courant vers la terre (par exemple si un conducteur touche une partie métallique reliée au sol) et coupe instantanément l'alimentation. En cas de fuite à la terre (même de quelques mA), un déséquilibre apparaît, générant une tension de sortie au secondaire du tort. **Varistances (MOV)** : protègent contre les surtensions provenant du réseau électrique (foudre, pics de tension).
- **Fusibles et disjoncteurs** : Coupent le circuit en cas de surintensité ou de court-circuit.
- **Capteur de température** : arrête le processus si la température interne dépasse le seuil de sécurité.
- **PWM (Pulse Width Modulation)** : Contrôle la valeur du courant de charge envoyé au véhicule en ajustant le rapport cyclique, ce qui contribue à la sécurité thermique et énergétique.

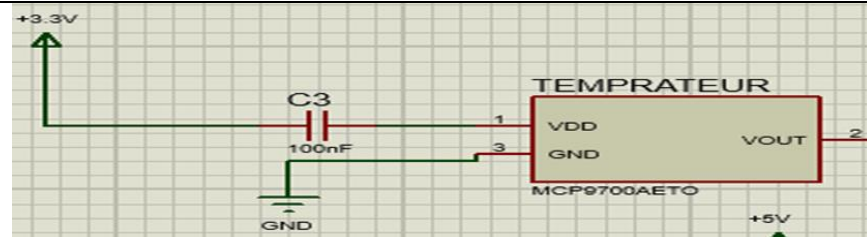


Figure 3.4 : Capture de température.



Figure 3.5 : Capture de courant.

3.6.4 Unité de commande (Arduino Pro Mini)

Le système de contrôle du chargeur repose sur une carte Arduino Pro Mini qui reçoit et traite les données de plusieurs capteurs essentiels afin de garantir un fonctionnement sûr et efficace. Un capteur de température surveille la température du câble et du connecteur, et interrompt automatiquement la charge en cas de température anormale. Un capteur de courant mesure le courant réellement consommé par le véhicule, permettant à l'Arduino d'ajuster précisément la puissance de sortie. Un capteur GFCI dédié, conçu pour détecter les fuites de courant à la terre, assure une protection essentielle en coupant immédiatement la charge en cas de défaut d'isolation. De plus, un bouton d'arrêt d'urgence permet à l'utilisateur d'interrompre manuellement la charge à tout moment.

L'Arduino génère également un signal PWM (modulation de largeur d'impulsion) et l'envoie au véhicule via la ligne CP (Control Pilot) pour l'informer du courant maximal admissible. La valeur PWM (Power-On-Motion) représente le courant maximal selon les valeurs standard, telles que :

- 10 % PWM $\approx 6 A$
- 25 % PWM $\approx 16 A$
- 50 % PWM $\approx 32 A$
- 85 % PWM $\approx 60 A$.

Le signal PWM sert ainsi de principal moyen de communication entre le chargeur et le véhicule pour déterminer les limites de courant. La ligne PP (Proximity Pilot) permet d'identifier le type de câble et son intensité maximale admissible grâce à une résistance standard intégrée à la prise de charge. Le véhicule lit cette résistance pour déterminer le courant maximal (par exemple, 16 A ou 32 A), évitant ainsi toute utilisation incorrecte ou surcharge du câble.

L'Arduino reçoit également des commandes de lancement de charge de l'application mobile via une communication série avec l'ESP32, comme un niveau de charge actuel de 20 % et un objectif de 80 %. À partir de ces données, l'Arduino calcule la puissance nécessaire pour atteindre le niveau souhaité et détermine le courant optimal en fonction de la valeur PWM et de la puissance admissible du câble (PP). Après avoir vérifié que tous les critères de sécurité sont respectés (absence de fuite, température appropriée, câble fonctionnel et limites de courant admissibles), l'Arduino active le relais de puissance pour permettre l'alimentation du véhicule en 230 V CA.

Le système comprend également une LED RGB dont la couleur varie selon l'état de charge, offrant ainsi une indication visuelle rapide et claire à l'utilisateur :

- *Vert fixe : Chargeur prêt et aucune erreur détectée ;*
- *Bleu : Véhicule connecté, mais la charge n'est pas en cours ;*
- *Jaune : Phase de négociation via CP/PWM ;*
- *Vert clignotant : La charge se déroule normalement ;*
- *Rouge : Erreur (défaut de mise à la terre, surchauffe ou arrêt d'urgence ;*
- *Blanc : Synchronisation des données ou connexion Wi-Fi.*

La carte Arduino, véritable cerveau du système, gère la protection électrique, communique avec le véhicule via CP, PP et PWM, contrôle le relais et la LED RGB, et traite les commandes de l'ESP32. Elle garantit ainsi un processus de charge intelligent, sûr et fiable pour les véhicules électriques.

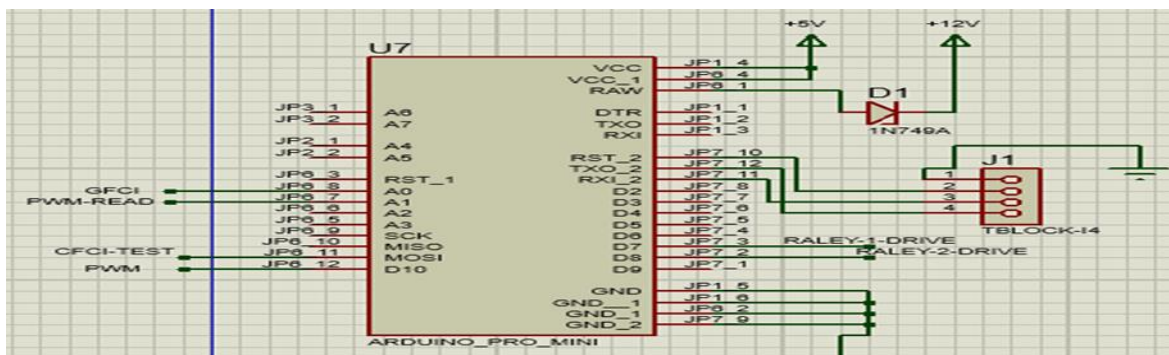


Figure 3.6 : Arduino Pro Mini.

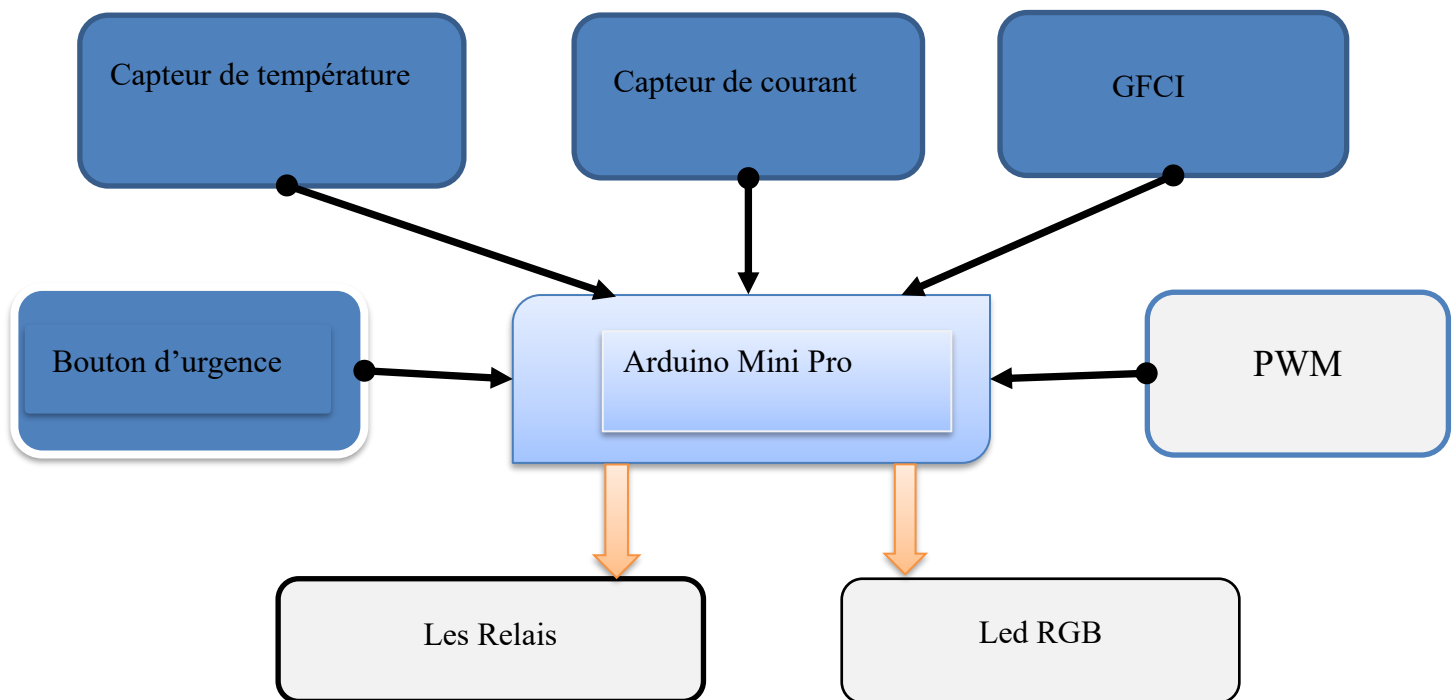


Figure 3.7 : Diagramme d'commande.

3.6.5 Bloc Unité de communication (ESP32)

➤ IN Schéma électronique

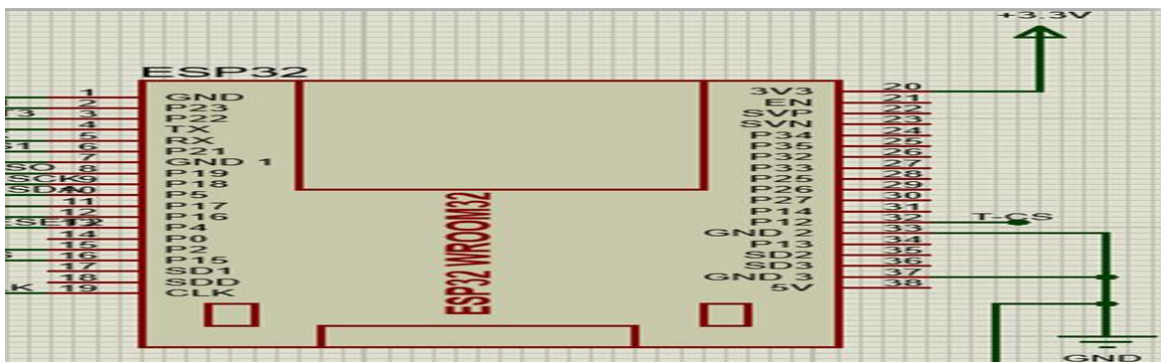


Figure 3.8 : esp woorm 32.

➤ Code de test de esp32

```

01:01:18.346 -> == ESP32 NBM Charger Starting ==
01:01:18.346 -> [x] Preferences cleared!
01:01:18.379 -> [i] New Charger ID generated: CHG_10A6B4FC
01:01:18.379 -> [i] No stored Wi-Fi. Starting portal...
01:01:18.379 -> [i] Starting Captive Portal...
01:01:18.562 -> [x] Access Point forced ON
01:01:18.596 -> AP IP: 192.168.4.1
01:01:18.596 -> [i] Sending JSON to Firebase: {"current":16,"voltage":220,"temperature":34,"timestamp_iso":"1970-01-01T00:02:23Z"}
01:01:18.596 -> [w] Cannot send: WiFi disconnected
  
```

Figure 3.9: Test de ESP32.

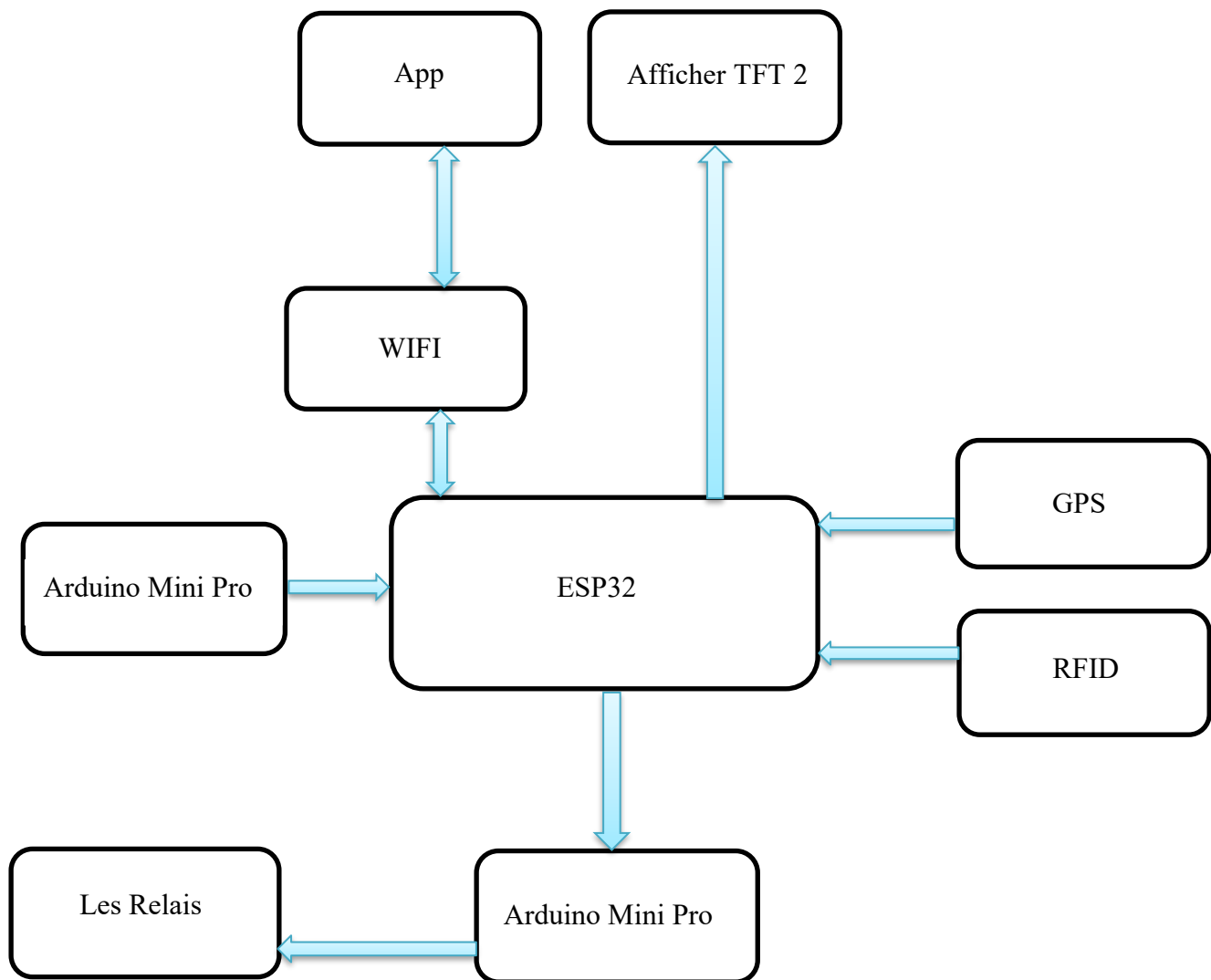


Figure 3. 10: Diagramme d'communication.

L'ESP32 joue le rôle d'unité de communication et de gestion intelligente dans le chargeur NBM. Il reçoit les données du Arduino Pro Mini (courant, tension, température, état du relais) et les envoie via le Wi-Fi vers l'application mobile ou le serveur cloud et l'application envoie via le WIFI La capacité de charge souhaitée par l'utilisateur. En parallèle, il affiche ces informations sur l'écran TFT, se connecte au module GPS pour localiser la borne de charge, et communique avec le lecteur RFID pour identifier l'utilisateur et autoriser la charge. Une fois l'utilisateur validé et les conditions de sécurité vérifiées, l'ESP32 envoie un ordre à l'Arduino pour activer le relais et démarrer la charge. Ainsi, l'ESP32 assure

la liaison entre la partie électronique locale et la plateforme de supervision à distance, garantissant une gestion intelligente, connectée et sécurisée du processus de charge.

3.6.6 Bloc interface utilisateur

Permet de visualiser et de contrôler l'état du système. Les éléments est :

- **Écran TFT** : Affichage local (Dashboard, puissance, température).
- **LED RGB** :
 - Bleu = prêt
 - Vert = en charge
 - Rouge = erreur
- **Application mobile** :
 - Page Accueil : Etat du chargeur ;
 - Dashboard : Données électriques (I, V, Temp, kWh) ;
 - GPS Map : Localisation du point de charge ;
 - RFID User : Utilisateur connecté ;
 - Sessions : Historique de charge ;
 - Paramètres : Courant maximal, mode solaire, horaires.
- **In Affichage TFT.**

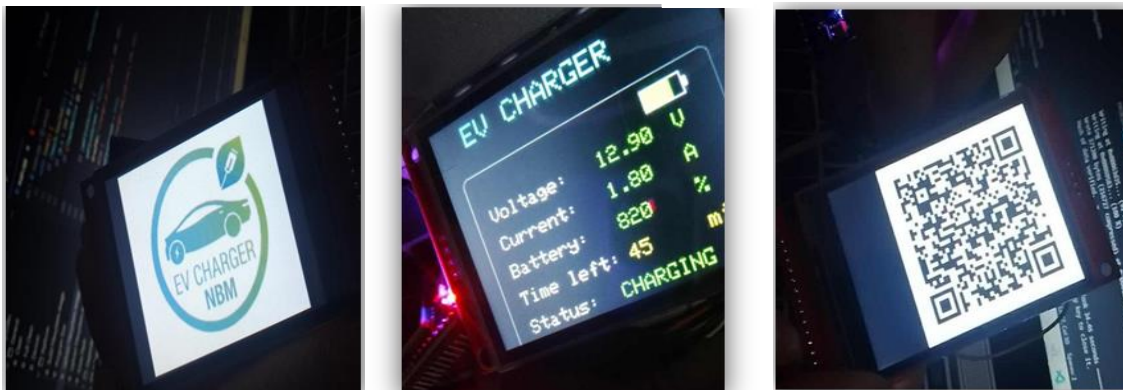


Figure 3. 11: Affichage de TFT.

3.6.7 Bloc véhicule électrique (LOAD)

Bloc véhicule électrique est reçoit l'énergie. Les éléments est :

- ❖ **Prise Type 2**
- ❖ **Broches CP (Control Pilot) et PP (Proximity Plug)**

- ❖ **Le rôle :** Communiquer la demande de courant et contrôler le démarrage de la charge

3.7 Schéma électronique global du charger

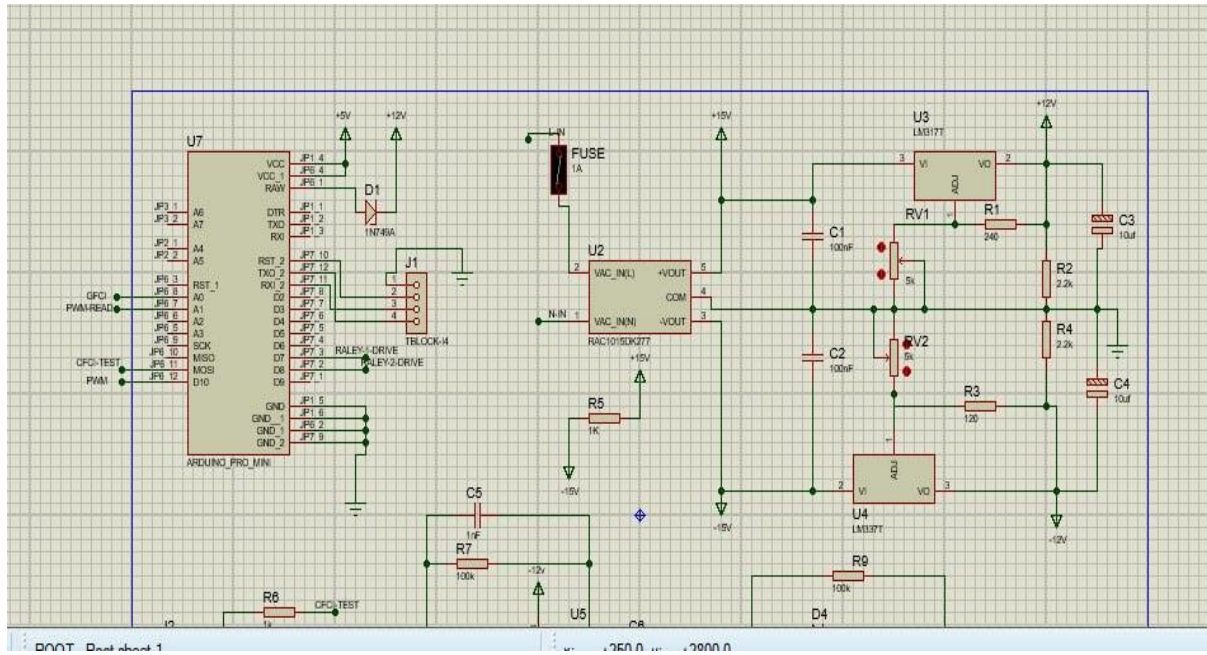


Figure 3. 12 : Schéma électronique global.

3.8 Étapes générales de fabrication d'une carte électronique (PCB)

3.8.1 Conception du schéma électronique

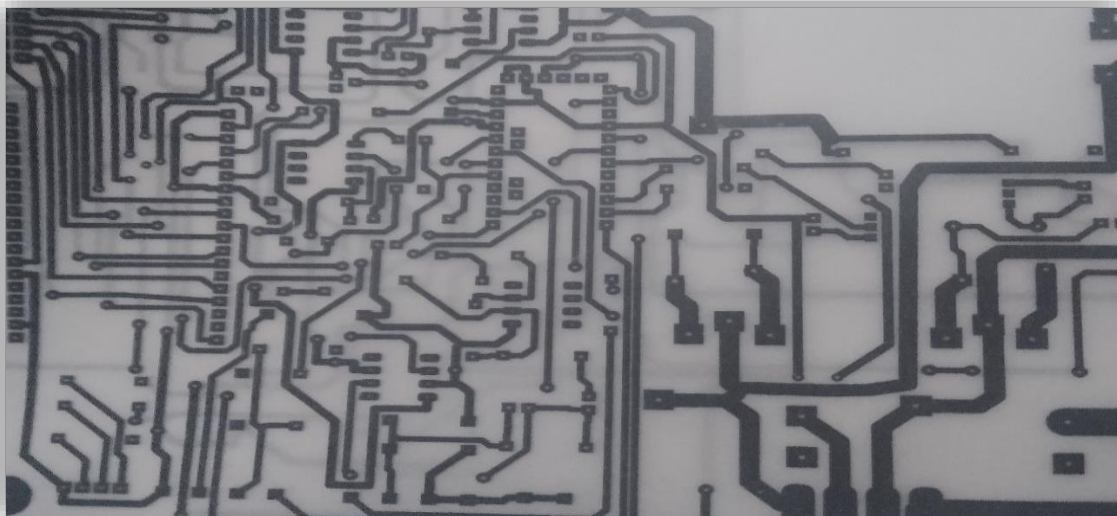


Figure 3. 13 : Schéma circuit imprimé.

3.8.2 Impression du circuit sur un transparent



Figure 3.14 : Impression du circuit sur un transparent.

3.8.3 Gravure du cuivre

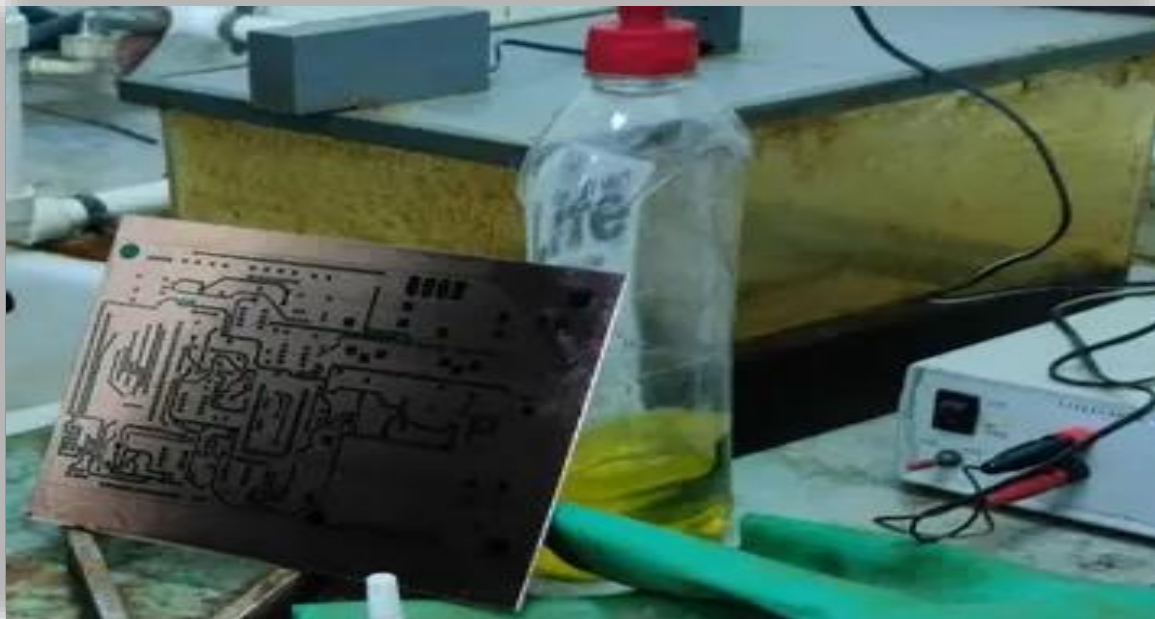


Figure 3.15 : Gravure.

3.8.4 Etape de perçage de la carte



Figure 3.16 : Perçage de la carte.

3.8.5 Soudure des composants (Assemblage)

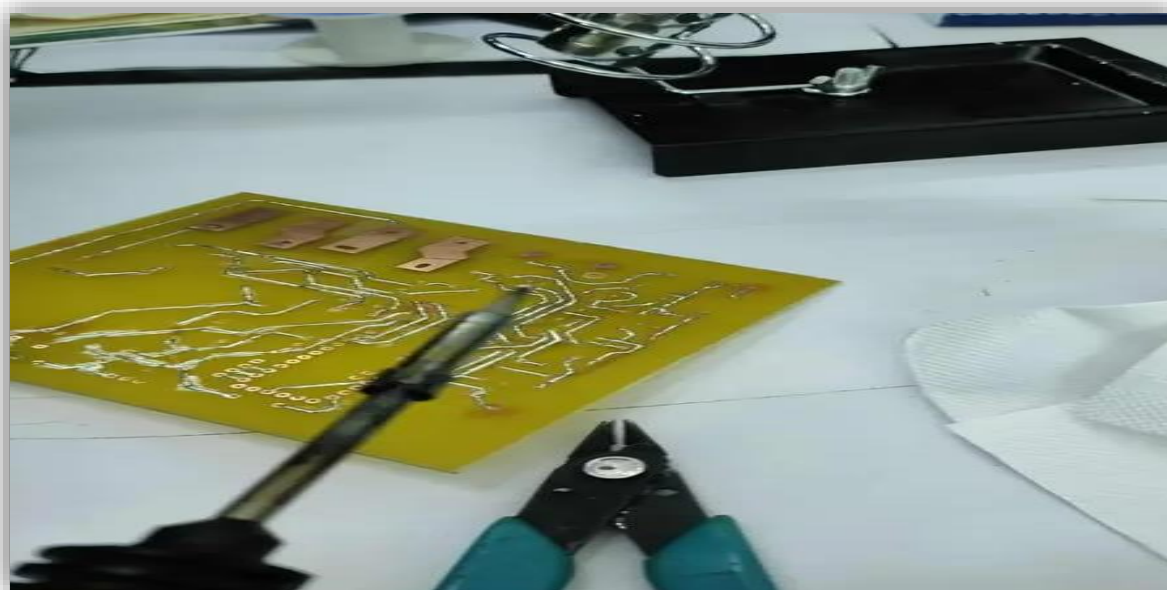


Figure 3.17 : Soudure des éléments électroniques.

3.8.6 Le support de la carte électronique (PCB)

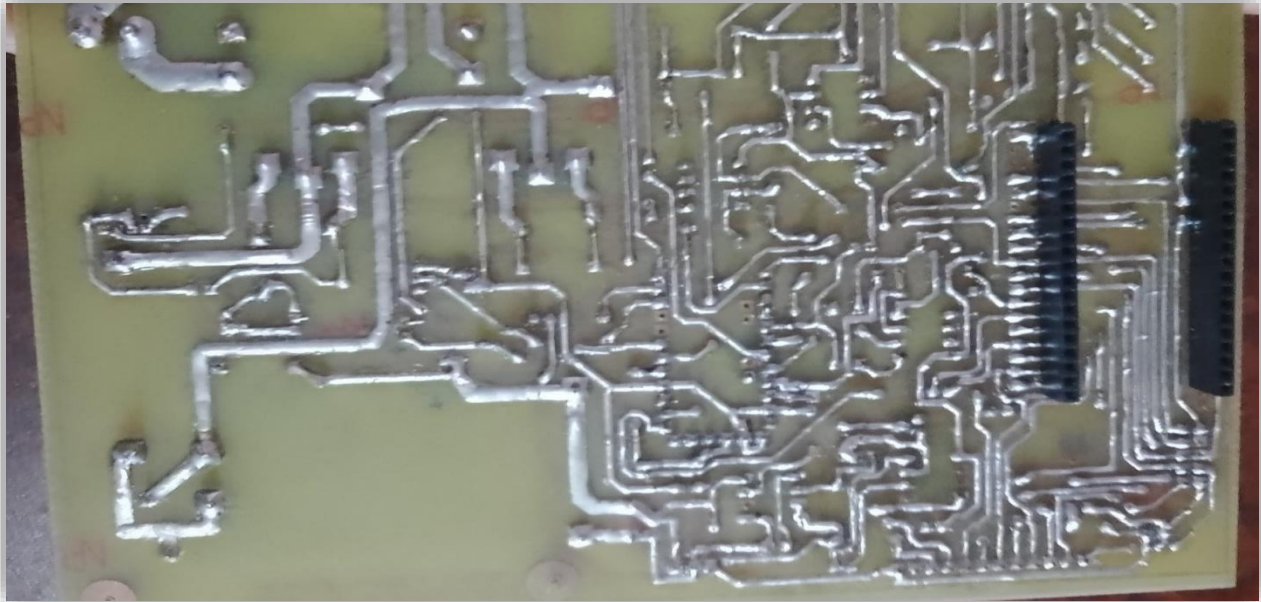


Figure 3.18 : Le support de la carte PCB.

3.9 Produit final



Figure 3.19 : Prototype final.

3.10 Application mobile et interface utilisateur

L'application mobile représente un élément central du système de recharge intelligent développé dans ce projet. Elle constitue le point d'accès principal pour l'utilisateur, permettant la supervision complète du chargeur, la visualisation des paramètres en temps réel, la gestion de l'accès via RFID, ainsi que la consultation de l'historique et de la localisation GPS. Grâce à la connectivité du module ESP32, l'application communique directement avec la borne à travers le protocole Wi-Fi, assurant un échange rapide, fiable et sécurisé des informations.

3.10.1 Architecture logicielle de l'application

Pour garantir un fonctionnement fiable, l'application s'appuie sur une architecture moderne comprenant :

- *Une API Web permettant la communication avec l'ESP32.*
- *Le protocole MQTT/HTTPS assurant un échange rapide et sécurisé des données.*
- *Une interface graphique (UI/UX) optimisée pour la lisibilité des valeurs et des alertes en temps réel.*

3.10.2 Étapes de développement de l'application

Le développement de l'application s'est déroulé suivant un processus structuré :

- Analyse des besoins

L'identification des fonctionnalités essentielles nécessaires pour le contrôle et la supervision du chargeur.

- Choix de la plateforme

L'adoption de **Flutter** pour une compatibilité Android/iOS ou Android Studio pour une solution native.

- Conception UI/UX

La création d'écrans simples, clairs, intégrant des indicateurs graphiques, jauges de puissance et icônes d'état.

- Mise en place de la communication Wi-Fi

Configuration de l'ESP32 pour transférer les données au format JSON via HTTP ou MQTT.

- Construction de la base de données

L'enregistrement des utilisateurs RFID, logs de sessions, coordonnées GPS et paramètres du chargeur.

➤ Intégration GPS et RFID

Synchronisation des données GPS pour la cartographie et connexion du module RFID pour l'accès sécurisé.

➤ Phase de tests

Les tests en situation réelle : vitesse de communication, réactivité, affichage en temps réel, gestion des erreurs, déconnexions réseau.

➤ Optimisation et finalisation

L'amélioration des performances, sécurisation des échanges, stabilisation de l'interface graphique et préparation du système pour une utilisation réelle.

3.11 Application NBM EV

3.11.1 Démarrer une nouvelle session

La page "Démarrer une nouvelle session" permet à l'utilisateur d'entrer le niveau de batterie actuel et le niveau cible souhaité afin de calculer automatiquement l'énergie, la durée et le coût approximatif nécessaires pour la session. Ces informations sont ensuite envoyées à Firebase, puis récupérées par l'ESP32 qui transmet les commandes à l'Arduino pour démarrer le processus de charge. Cette interface constitue le point de départ de chaque session et offre une gestion efficace, automatisée et transparente de la recharge du véhicule électrique

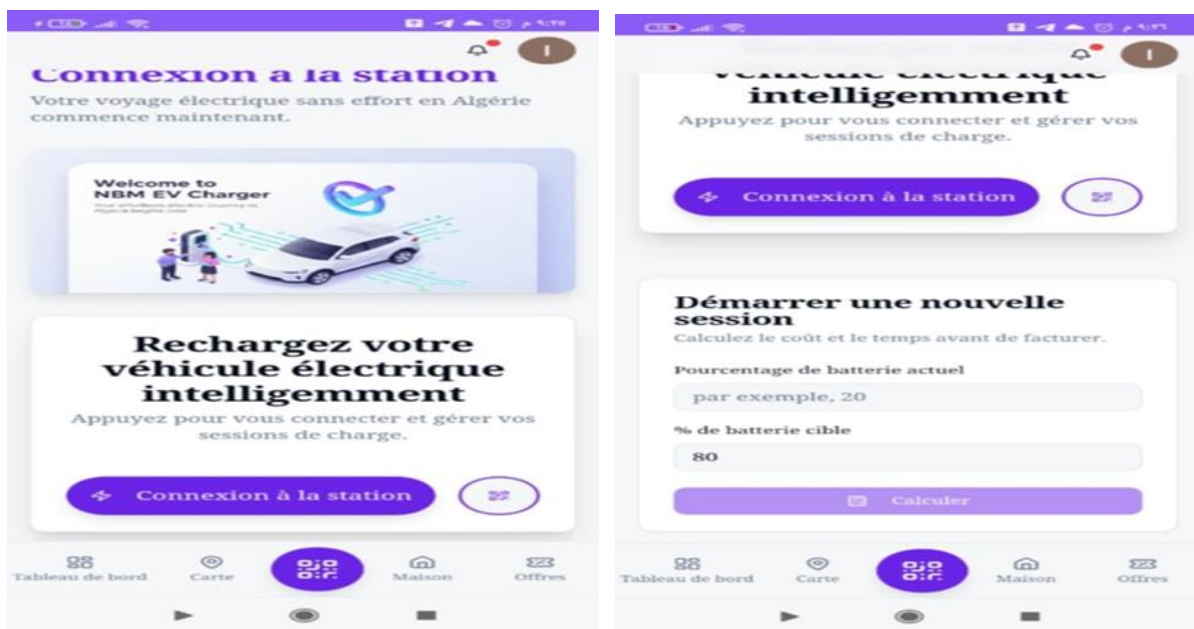


Figure 3. 20: Interface de Application.

3.11.2 Mode de charge

La page « Mode de charge » permet à l'utilisateur de sélectionner la source d'énergie utilisée pour recharger son véhicule. Trois modes sont disponibles :

- ➔ *Hybride (solaire + réseau),*
- ➔ *Solaire uniquement,*
- ➔ *Grille uniquement.*

Chaque mode déclenche une commande envoyée par l'application à Firebase, puis au module ESP32, qui transmet les instructions au microcontrôleur Arduino. Celui-ci ajuste ensuite le courant de charge via PWM et contrôle le relais pour activer la source choisie. Cette interface offre une gestion flexible, intelligente et optimisée de la recharge selon les besoins de l'utilisateur.

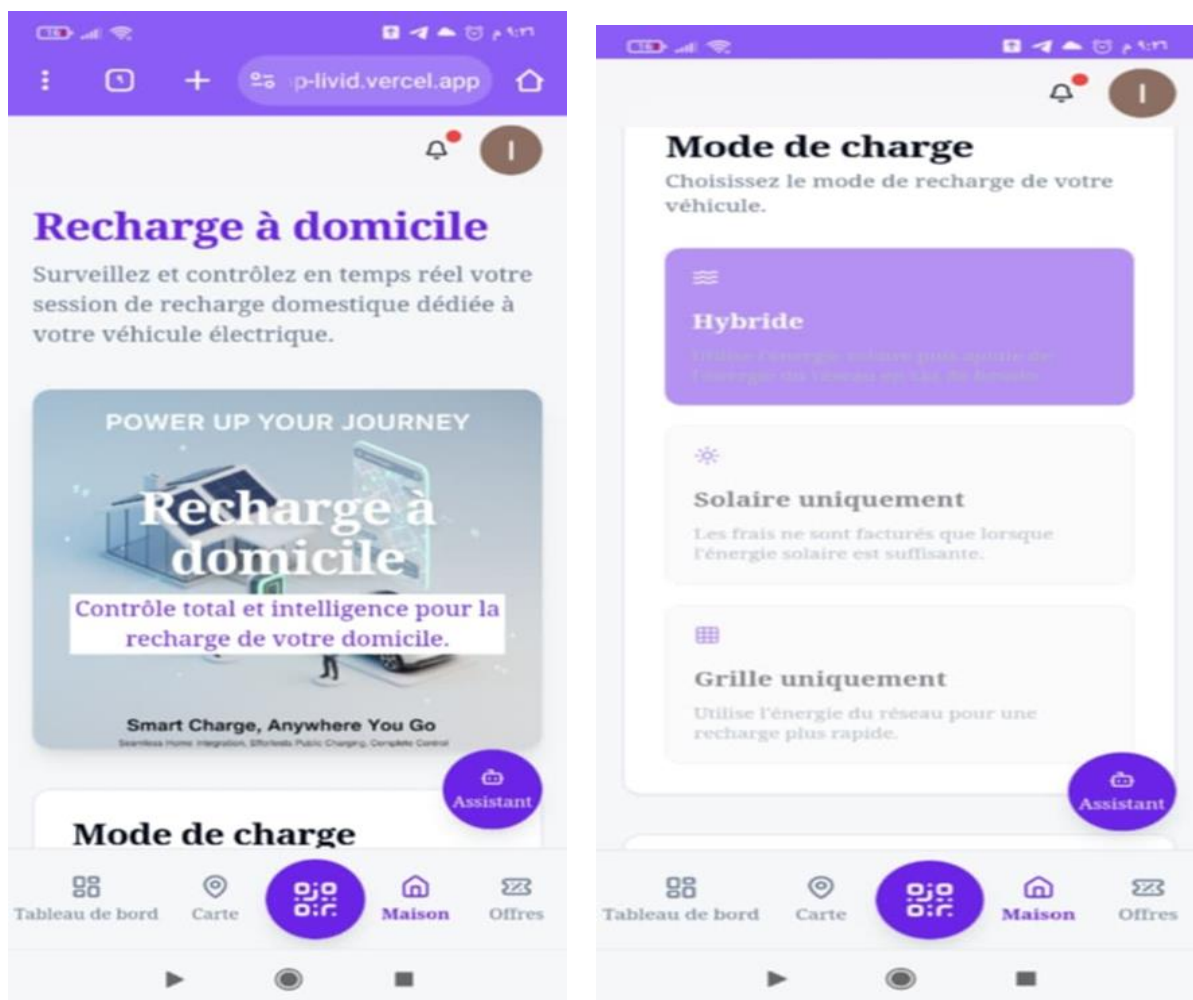


Figure 3.21 : Interface maison.

3.11.3 Tableau de bord

La page “Dashboard” permet d’afficher en temps réel les principales données électriques du chargeur, notamment la puissance instantanée et l’énergie consommée au cours de la journée. Ces informations, mesurées par l’Arduino et transmises via l’ESP32 à Firebase, sont ensuite affichées de manière claire dans l’application. Cette page joue un rôle central dans le suivi énergétique et offre à l’utilisateur une compréhension précise du fonctionnement du chargeur.

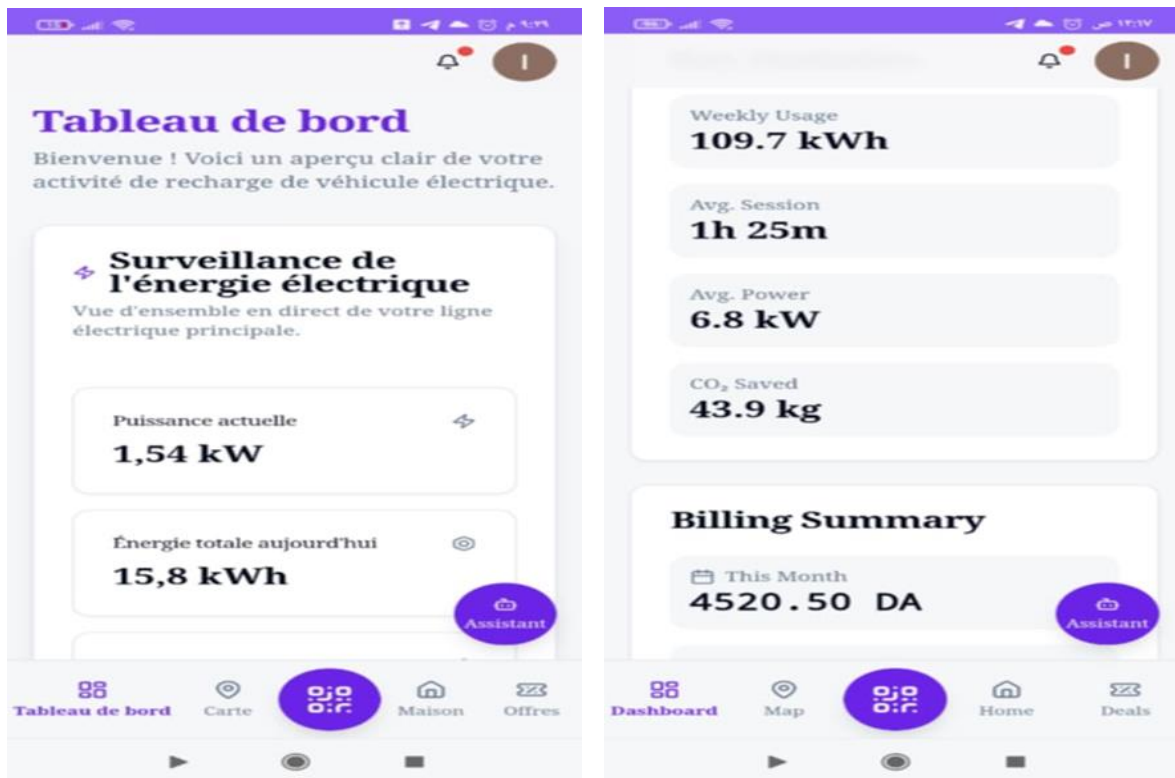


Figure 3.22 : Interface Tableau de bord.

3.11.4 Mapp

La Mapp Cette page affiche la position géographique du chargeur via GPS et indique son état : disponible, en cours d’utilisation, ou hors service. L’utilisateur peut cliquer sur un chargeur pour voir des détails comme le niveau de charge ou l’identifiant. Les données sont envoyées depuis l’ESP32, puis vers Firebase, permettant une mise à jour en temps réel dans l’application. Cela aide l’utilisateur à localiser rapidement le chargeur le plus proche et à optimiser la recharge en toute sécurité.

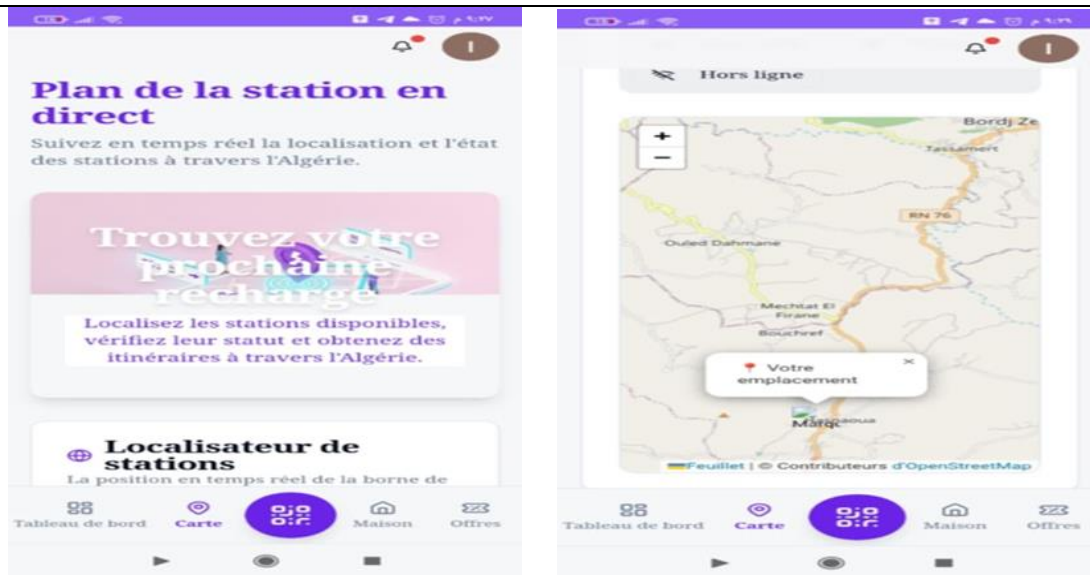


Figure 3.23 : Interface Mapp.

3.11.5 Offres

La Page Offres (Binfit) : Cette page présente toutes les promotions et offres disponibles pour l'utilisateur, comme des réductions, des forfaits gratuits ou des points de fidélité. Chaque offre indique sa durée, ses conditions et son type. Les offres actives et expirées sont facilement distinguables grâce aux couleurs ou icônes, et l'utilisateur peut cliquer pour voir plus de détails ou activer l'offre. Cette page permet d'informer rapidement l'utilisateur, d'encourager l'usage du chargeur et d'améliorer son expérience.

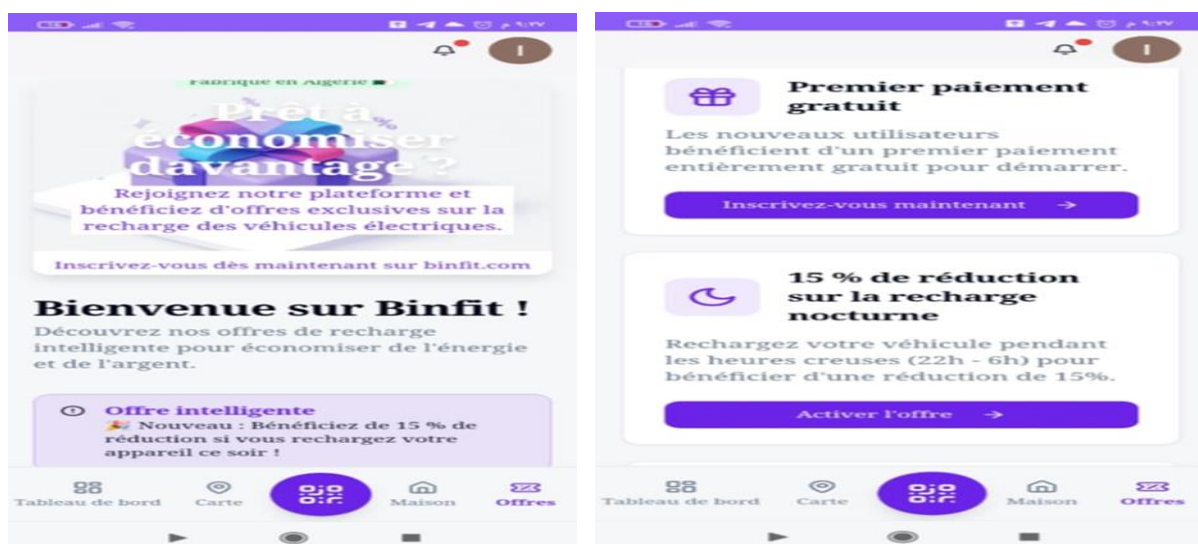


Figure 3.24 : Interface offres.

3.11.6 Paramètres

La Page de paramètres (Settings) : Cette page permet à l'utilisateur de personnaliser l'application selon ses préférences. Il peut changer la couleur du thème (clair, sombre ou personnalisé), choisir la langue de l'interface, modifier les informations de profil comme le nom, l'email et le téléphone, et gérer les notifications liées aux offres, aux alertes de sécurité ou à l'état de la recharge. Cette page améliore l'expérience utilisateur et rend l'application plus confortable et adaptée.

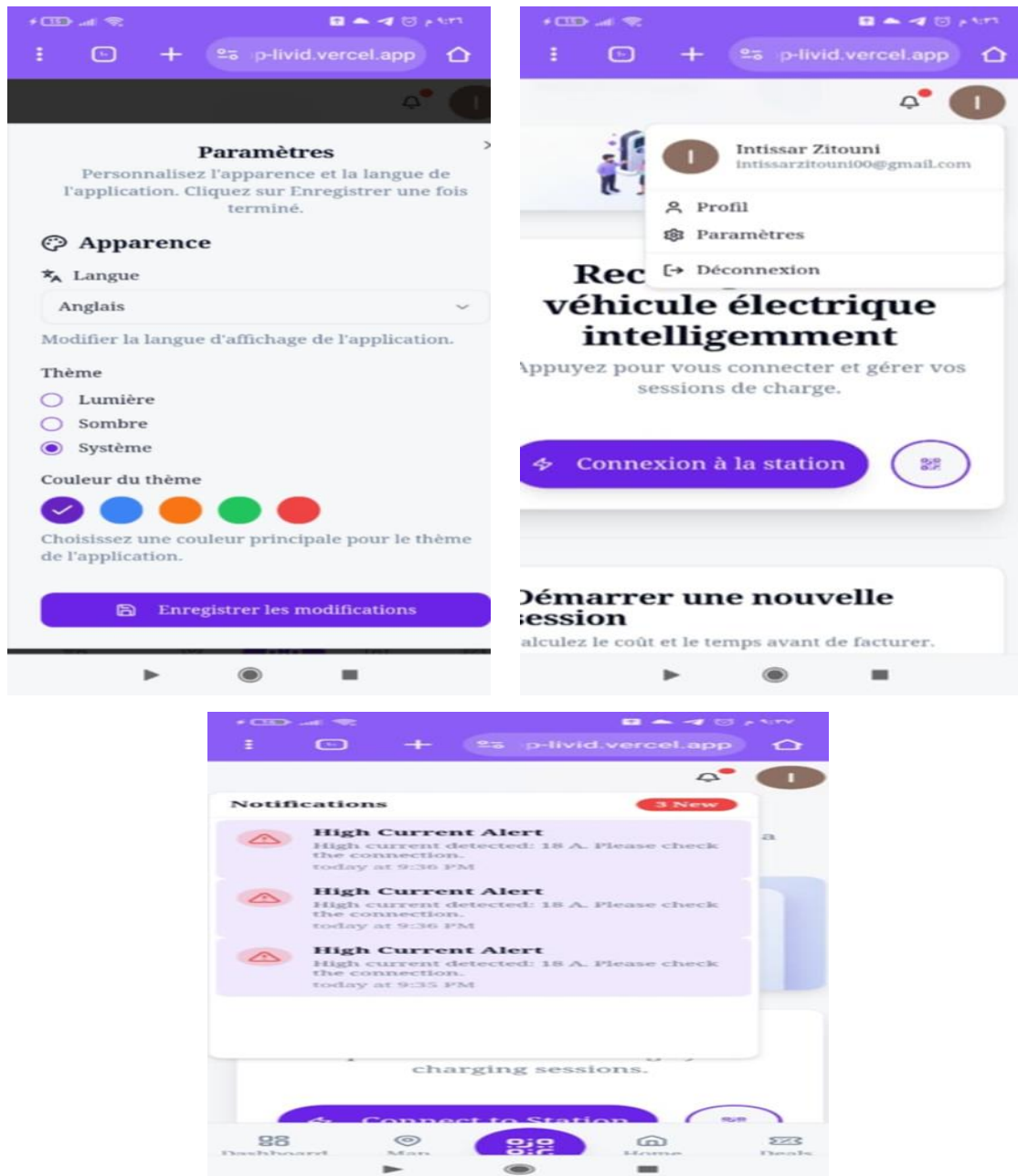


Figure 3. 25: Interface App Paramètres.

3.12 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la présentation d'une vision complète et cohérente de l'architecture électronique du système de recharge intelligent pour véhicules électriques. L'étude des différents blocs allant du traitement de l'énergie aux modules de mesure, de commande et de sécurité a permis de mettre en avant l'importance de l'intégration matérielle pour garantir un fonctionnement stable, fiable et sécurisé du chargeur.

L'analyse du rôle de l'Arduino et de l'ESP32 a montré comment ces deux microcontrôleurs collaborent afin de collecter, traiter et transmettre les données essentielles au bon déroulement de la recharge, tout en assurant une réaction rapide en cas d'anomalie. De plus, la présentation de l'application mobile a souligné son apport fondamental en matière de supervision en temps réel, d'affichage des paramètres électriques, de gestion des sessions et de contrôle des modes de charge via la connexion à Firebase. Ainsi, l'ensemble du système démontre une synergie efficace entre la partie électronique et la partie logicielle, offrant une solution de recharge intelligente, performante et adaptée aux exigences actuelles de la mobilité électrique, tout en garantissant le niveau de sécurité attendu pour l'utilisateur et son véhicule.



Conclusion générale



Conclusion générale

Ce mémoire s'inscrit dans un contexte mondial marqué par la transition énergétique et la nécessité d'adopter des solutions de mobilité plus propres, plus efficaces et plus intelligentes. L'objectif principal de ce travail était de concevoir et de réaliser un système complet de recharge intelligente pour véhicule électrique, intégrant à la fois les aspects théoriques, technologiques et pratiques indispensables à sa mise en œuvre. Le premier chapitre a permis de poser les bases en présentant les véhicules hybrides et électriques, leurs architectures internes, leurs composants essentiels et les avantages qu'ils apportent en matière de performance, d'économie d'énergie et de réduction de l'impact environnemental. Cette étude a mis en évidence l'importance stratégique de ces véhicules dans la transition vers une mobilité durable. Le deuxième chapitre s'est concentré sur les systèmes photovoltaïques, une source d'énergie renouvelable particulièrement adaptée pour alimenter les systèmes de recharge. Les principes de l'effet photovoltaïque, les caractéristiques du rayonnement solaire, la structure et la modélisation des cellules solaires, ainsi que les méthodes d'assemblage des panneaux ont été analysés en détail. Ces notions ont constitué un socle essentiel pour comprendre comment intégrer l'énergie solaire dans le processus de recharge. Le troisième chapitre a présenté la réalisation expérimentale du chargeur intelligent NBM EV Smart Charger, en détaillant l'architecture électronique, les différents blocs fonctionnels, les composants matériels, le rôle des microcontrôleurs Arduino et ESP32, les dispositifs de sécurité, la communication CP/PWM conforme à la norme IEC 61851, ainsi que l'interface mobile connectée à Firebase. Les étapes de fabrication du PCB et l'intégration logicielle ont démontré la faisabilité du système et sa capacité à offrir une gestion intelligente, connectée et sécurisée du processus de recharge. Au terme de ce travail, nous avons pu démontrer qu'il est possible de concevoir un chargeur intelligent complet, fiable et accessible, capable d'assurer la surveillance, la protection, la communication et le contrôle d'un véhicule électrique. De plus, l'intégration potentielle d'une alimentation photovoltaïque renforce l'intérêt de ce système en matière d'autonomie énergétique et de durabilité.

Cependant, certaines perspectives restent ouvertes pour améliorer et enrichir ce projet : L'intégration d'un système ;

- L'ajout d'algorithmes d'optimisation basés sur l'intelligence artificielle ;

- L'amélioration de l'interface utilisateur mobile ;
- L'augmentation de la puissance de charge et le support des protocoles rapides DC ;
- L'extension du système à une plateforme de gestion multi-bornes pour parkings et installations solaires.

En conclusion, ce mémoire démontre la convergence réussie entre énergie renouvelable, électronique embarquée et systèmes intelligents, ouvrant la voie à une nouvelle génération d'infrastructures de recharge adaptées aux exigences actuelles et futures de la mobilité électrique.