



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : de Technologie

DEPARTEMENT : d'Électrotechnique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : BOUKOUNACHA Ahmed Yassine

DOMAINE : Sciences Technologie

FILIERE : Électrotechnique

OPTION : ÉLECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Thème

Etude Descriptive d'une Voiture Solaire

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
MEKHANET Mohammed	MCA	Président
MAHDJOUBI Abdelhalim	MCA	Encadreur
BIRAME M'hamed	MCA	Examineur

Promotion : 2020/2021

Dédicaces

Je dédie ce travail aux deux plus chères personnes
au monde mes parents, pour tous leurs amours,
encouragements, conseil, sacrifices, patiences et
confiance.

À mes frères et mes sœurs.

A toute ma famille sans oublier mes chers
amis

Remerciements

Toute ma parfaite gratitude et remerciement à Allah le plus puissant qui m'a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce projet.

Je tiens à remercier Monsieur MAHDJOUBI Abdelhalim pour son encadrement fructueux, ses conseils judicieux, son aide, sa patience et ses encouragements durant l'élaboration de ce projet.

Mes sincères remerciements s'adressent également à mes chers parents et à tous les membres de ma famille, qui m'ont aidé et pour leur soutien précieux plus qu'on ne peut le dire durant les longues années de ma formation, ce qui leur fait valoir ma grande reconnaissance.

Gratitude à mes enseignants du Département d'Electrotechnique qui m'ont donné leurs précieux conseils et qui m'ont orienté, assisté et aidé pour y arriver.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce projet de fin d'étude.

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Table des matières	iii
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	x
Liste des symboles	xi
Liste des abréviations	xii
Introduction générale	01

Chapitre I Développement de la voiture électrique dans la décennie précédente

I.1. Introduction	02
I.2. Préambule	02
I.3. Compagnies de voitures électriques	02
I.4. Marque TESLA Motors	03
I.4.1. Développement de la voiture électrique	03
I.4.2. Modèles de la voiture électrique Marque TESLA Motors	04
A. Roadster I	05
B. Model S	05
C. Model X	05
D. Roadster II	06
E. Model 3	07
F. Model Y	07
I.5. Conclusion	08

Chapitre II Principe de la voiture électrique

II.1. Introduction	09
II.2. Voiture purement électrique	09
II.2.1. Voiture électriques à batteries rechargeables par prise de courant	09

II.2.2. Voiture électriques à alimentation par pile à combustible	10
II.3. Différentes chaîne de traction des VE	10
II.3.1. Chaîne de traction monomoteur	10
II.3.1.1. Chaîne de traction avec boîte de vitesse mécanique	10
II.3.1.2. Chaîne de traction avec réducteur mécanique à rapport fixe	11
II.3.2. Chaîne de tractions multi-motrices	12
II.4. Structure et principe de fonctionnement de la chaîne de traction	13
II.5. Equipement du VE	15
II.5.1. Batterie de traction	15
a- Batteries au nickel-hydrure métallique (Ni-MH)	17
b- Batteries Lithium	17
II.5.2. Electronique de puissance dans un véhicule électrique	18
II.5.3. Recharge de VE	19
Exemples de chargeurs de batterie embarquée dans VE	20
II.5.3.1. Recharge à conduction	21
a- Normes de conception de charge du VE	21
b- Borne de recharge et types de prise du VE	22
II.5.3.2. Charge sans contact	24
II.5.4. Moteur électrique d'entraînement	25
II.5.4.1. Moteur synchrone	25
a- Moteur synchrone à aimants permanents	25
b- Moteur synchrone à rotor bobiné	27
II.5.4.2. Moteur à induction	28
II.5.5. Transmission mécanique	30
II.6. Dynamique du véhicule	30
II.6.1. Force de roulement	31
II.6.2. Force aérodynamique	32
II.6.3. Force d'inclinaison	33
II.6.4. Force d'accélération	33
II.7. Comportement énergétique d'un véhicule électrique	34
a. Accélération	34
b. Vitesse stabilisée	34

c. Durant un arrêt momentané	34
d. Freinage	35
II.8. Comparaison entre deux types de VE	37
II.9. Conclusion	37

Chapitre III Bilan énergétique de la voiture solaire

III.1. Introduction	38
III.2. Voiture solaire	38
III.3. Evolution des voitures solaires	38
a- Lightyear One	40
b- Voiture solaire ‘Sion’	41
III.4. Fonctionnement de VS	42
III.5. Composition du VS	43
III.6. Panneau photovoltaïque de VS	44
III.6.1. Composition et Principe de fonctionnement des panneaux photovoltaïques	44
III.6.2. Cellule photovoltaïque	45
III.6.3. Différents types de cellules PV	45
a- Cellules à silicium monocristallin	46
b- Cellules à silicium poly-cristallin	46
c- Cellules amorphes	46
III.6.4. Caractéristiques des types des panneaux photovoltaïques	47
III.7. Dimensionnement des panneaux photovoltaïque pour le VE	48
a- Calcul de l'énergie consommée par jour (E_c)	48
b- Calcul de l'énergie à produire (E_p)	48
c- Calcul de la puissance crête (P_c) des modules à installer	48
III.8. Emplacement des cellules photovoltaïque	49
III.9. Exemple d'application	50
III.9.1. Surface superficie de voiture	51
III.9.2. Calcul de la puissance crête produite par le GPV	51
III.9.3. Estimation de l'énergie produite par le module photovoltaïque par jour	51
III.9.4. Calcul du temps de charge de batterie de la voiture par les panneaux PV	52
III.9.5. Test des performances des panneaux PV de la VS	52

III.9.6. Calcul de l'autonomie offerte par les panneaux PV	53
III.10. Discussion sur la VS	54
III.11. Perspectives du transport électrique	55
III.11.1. Petites voitures urbaines propres	55
a- Exemples de petits véhicules urbains	56
b- Exemple de voiture solaire urbaine en Algérie	57
III.11.2. Parkings solaires	57
III.12. Conclusion	58
Conclusion générale	59

LISTE DES FIGURES

Chapitre I Développement de la voiture électrique dans la décennie précédente

Figure I.01 :	Organigramme de développement de la voiture électrique dans la décennie précédente Marque (TESLA Motors)	04
Figure I.02 :	Voiture Model S.	05
Figure I.03 :	Voiture Model X.	06
Figure I.04 :	Voiture Roadster II.	06
Figure I.05 :	Voiture Model 3.	07
Figure I.06 :	Voiture Model Y.	08

Chapitre II Principe de la voiture électrique

Figure II.01 :	Exemple de VE à batteries rechargeables par prise de courant	09
Figure II.02 :	Configuration monomoteur avec boîte de vitesse.	11
Figure II.03 :	Configuration monomoteur avec réducteur.	11
Figure II.04 :	Configuration multi-moteurs.	12
Figure II.05 :	Roue englobant un moteur.	13
Figure II.06 :	Structure de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique.	14
Figure II.07 :	Fonctionnement de la chaîne de traction.	14
Figure II.08 :	Vue interne d'une batterie.	15
Figure II.09 :	Pack de batterie.	15
Figure II.10 :	Blocks des cellules de pack de batterie.	16
Figure II.11 :	Protection en aluminium enveloppe le pack de batterie.	16
Figure II.12 :	Batterie NiMH de Toyota Prius 2 ^{ème} génération (1,3 kWh).	17
Figure II.13 :	Schémas représentant les différents designs de batteries Li-ion actuelles.	17
Figure II.14 :	Batteries au lithium polymère de Nissan.	18

Figure II.15 :	Exemples de chaînes de recharge de VE.	19
Figure II.16 :	Nissan Leaf 2013 et carter du chargeur.	20
Figure II.17 :	BMW i3 2016 et carter du chargeur.	20
Figure II.18 :	Borne de recharge.	22
Figure II.19 :	Types des Prises et socles de recharge.	23
Figure II.20 :	Charge par induction stationnaire et Recharge par induction dynamique d'un véhicule électrique.	24
Figure II.21 :	Moteur synchrone à aimants permanents.	26
Figure II.22 :	Quelques modèles très courants des voitures électriques (Leaf, BMW i3, Prius, Tesla model 3).	26
Figure II.23 :	Moteur à aimants de la Tesla model 3.	26
Figure II.24 :	Modèles des voitures utilisés le moteur à rotor bobiné (Renault Fluence ZE, Kangoo ZE et Zoé).	27
Figure II.25 :	Groupe moto propulseur Renault 5A Gen3.	27
Figure II.26 :	Modèles des voitures utilisés le moteur (Tesla model S P100D, Audi e-tron, Mercedes-Benz EQC 400).	28
Figure II.27 :	Moteur à induction de la Tesla model S.	29
Figure II.28 :	Groupe motopropulseur Audi APA250.	29
Figure II.29 :	Moteur Audi APA250.	29
Figure II.30 :	Emplacement de la transmission mécanique de la voiture.	30
Figure II.31 :	Bilan des forces agissant sur le véhicule.	31
Figure II.32 :	Force de roulement sur la roue.	32
Figure II.33 :	Récupération des énergies potentielles et cinétiques.	35

Chapitre III Bilan énergétique de la voiture solaire

Figure III.01 :	Première voiture solaire miniature (1955).	38
Figure III.02 :	Premier véhicule solaire pouvant transporter un être humain.	39
Figure III.03 :	Le modèle de voiture solaire la Citicar.	40
Figure III.04 :	Première VS commerciale (Lightyear One).	41
Figure III.05 :	Modèle de VS "Sion" (Sono Motors).	41

Figure III.06 :	Cellules sur la Sion (Sono Motors).	42
Figure III.07 :	Composition de VS.	43
Figure III.08 :	Le panneau photovoltaïque de la voiture solaire.	44
Figure III.09 :	Schéma de principe des panneaux photovoltaïques.	45
Figure III.10 :	Type des cellules solaires.	46
Figure III.11 :	L'orientation idéale du panneau solaire.	49
Figure III.12 :	L'emplacement du panneau sur la voiture.	50
Figure III.13 :	Voiture solaire 'Sion'.	50
Figure III.14 :	Voiture algérienne alimentée par l'énergie solaire.	57
Figure III.15 :	Parking de voiture électrique avec système de recharge photovoltaïque.	58

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II Principe de la voiture électrique

Tableau II.01 :	Comparaison entre la recharge par induction et la recharge par conduction	25
Tableau II.02 :	Comportement des pertes d'énergie	36
Tableau II.03 :	Comparaison entre la VE TESLA Modèle S et RENAULT (Kangoo ZE).	37

Chapitre III Bilan énergétique de la voiture solaire

Tableau III.01 :	Les caractéristiques des types des panneaux photovoltaïques.	47
Tableau III.02 :	Caractéristiques des panneaux PV.	50
Tableau III.03 :	Caractéristiques VS 'Sion'.	51
Tableau III.04 :	Résultat de calcul.	53
Tableau III.05 :	Quelques petites voitures électriques urbaines.	56

LISTE DES SYMBOLES

V	Vitesse du véhicule. (m/s)
F_{tot}	Effort de traction totale du véhicule. (N)
F_{res}	Résistance totale. (N)
M	Masse totale du véhicule. (Kg)
F_r	Force de résistance de roulement des roues. (N)
F_g	Force d'inclinaison. (N)
F_{acc}	Force d'accélération. (N)
F_a	Force aérodynamique. (N)
C_{rr}	Coefficient de roulement.
C_{rr-av}	Coefficient de roulement avant.
C_{rr-ar}	Coefficient de roulement arrière.
C_{rr-moy}	Coefficient de roulement moyen.
m_{av}	Masses portées par les roues avant. (Kg)
m_{ar}	Masses portées par les roues arrière. (Kg)
g	Accélération de la pesanteur. (m/s ²)
F_r	Force de roulement. (N)
ρ	Densité volumique de l'air. (Kg/m ³)
S_f	Section frontale du véhicule. (m ²)
C_x	Coefficient de pénétration.
V_{vent}	Vitesse du vent. (m/s)
α_p	Angle de gravir. (°)
γ	Accélération de véhicule. (m/s ²)
P	Puissance fournir par roues. (W)
C_{tot}	Couple de traction total. (Nm)
R	Rayon de la roue. (m)
C_r	Couple résistant appliqué au véhicule. (Nm)
F_R	Force de résistance totale. (N)
$W_{(roue)}$	Vitesse angulaire des roues. (Rad/s)
$E_{cinétique}$	Énergie cinétique emmagasinée dans le véhicule. (J)
E_c	Energie consommée par jour. (Wh/J)
N_H	Nombre d'heures d'utilisation.
P_f	Puissance de fonctionnement du récepteur. (W)
E_p	Energie à produire. (W)
K	Coefficient correcteur noté.
P_c	Puissance crête. (W_c)
R_{pv}	Rendements du panneau. (%)
β	Angle d'incidence. (°)

LISTE DES ABREVIATIONS

VE	Véhicule électrique
VTE	Voiture tout électrique
Renault ZE	Renault Zéro Émission
UCE	Unité de commande électrique
VEH	Voiture électrique hybride
MAS	Moteur asynchrone
DC	Courant continu (en anglais, Direct Current)
AC	Courant alternatif (en anglais, Alternating Current)
PHEV	Voiture hybride rechargeable (en anglais, Plug-in hybrid vehicle)
EVSE	Équipement du véhicule électrique (en anglais, Electric Vehicle Supply Equipment)
CHAdeMO	CHARGE de Move
IEEE	Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (en anglais, L'Institute of Electrical and Electronics Engineers)
CCS	Système de charge combiné (en anglais, <i>Combined Charging System</i>)
NFPA	Association nationale de protection contre l'incendie (en anglais, National Fire Protection Association)
IEC	Commission Electrotechnique Internationale (en anglais, International Electrotechnical Commission).
SAE	Société des ingénieurs automobiles (Society of Automotive Engineers).
Inc	Abréviation du mot « incorporation »
VS	Véhicule solaire.
PV	Photovoltaïque.
GPV	Générateur photovoltaïque.
CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelables.
ENP	Ecole Nationale Polytechnique.
INAPI	Institut National Algérien de la Propriété Industrielle.
TEG	Groupe d'énergie Tesla (en anglais, Tesla Energy Group)
USA	États-Unis d'Amérique

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le transport est d'une grande importance dans notre vie quotidienne et il a un rôle vital dans divers domaines car il est un moyen indispensable de développement et de prospérité.

Le nombre de véhicules en circulation continue d'augmenter, et même si les nouveaux moteurs thermiques sont moins polluants, ils contribuent encore de manière significative aux problèmes de pollution et aux gaz toxiques responsables du réchauffement climatique.

Outre le problème environnemental causé par ces voitures, il existe plusieurs autres problèmes parmi lesquels les ressources énergétiques qu'on constate en diminution et le fait que les véhicules à combustion interne ont un rendement très faible en ce qui concerne l'utilisation de combustibles fossiles. Cela oblige les constructeurs automobiles à proposer de nouvelles technologies qui rendent les véhicules moins polluants et plus économiques.

Le développement des véhicules électriques et des voitures solaires s'explique avant tout par les objectifs environnementaux fixés dans les cadres mondiaux de lutte contre le changement climatique et qui visent spécifiquement à réduire les émissions de gaz polluants. Alors que ces dernières années, les voitures propres ont connu un grand développement vis-à-vis les obstacles qui les entouraient et leur permettant de s'imposer dans le domaine des transports.

Ces dernières années, l'intérêt pour l'énergie solaire s'est accru, car l'objectif est que la voiture électrique soit un véhicule qui tire son énergie de sources renouvelables. Ce qui est l'objectif de ce mémoire.

Ce mémoire comporte par la suite d'une introduction générale, trois chapitres et on termine par une conclusion générale.

Le premier chapitre donne une idée sur le développement des voitures électriques au cours de la dernière décennie tout en citant quelques modèles avec un accent sur Tesla.

Le deuxième chapitre traite le principe de la voiture purement électrique, où nous montrant les différentes configurations de cette voiture, puis on illustre les différents éléments de cette voiture du chargeur de batterie jusqu'au mouvement des roues avec des exemples de chaque élément.

Le troisième chapitre se concentre sur la voiture solaire, où on donne un aperçu de son développement en présentant des exemples de voitures photovoltaïques actuelles. Ensuite, on calcule le bilan énergétique à l'aide de cellules photovoltaïques et en étudiant sa position dans la voiture.

A la fin, on donne des solutions pratiques pour les voitures solaires dans le domaine du transport urbain propre.

Chapitre I

Développement de la voiture électrique dans la décennie
précédente

I.1. Introduction

Un véhicule électrique est un véhicule dans lequel la seule énergie utilisée pour sa propulsion est l'électricité. Ce type de véhicules ne constitue en rien un concept nouveau puisque les premiers datent de la fin du 19^{ème} siècle et qu'en 1915, un grand nombre des véhicules en circulation aux Etats-Unis par exemple étaient électriques. Les véhicules électriques ont en fait une longue histoire, faite d'évolutions technologiques notables mais hélas aussi d'échecs commerciaux. Au cours de la dernière décennie, les voitures électriques ont beaucoup évolué, grâce aux entreprises pionnières dans ce domaine.

I.2. Préambule

Une voiture électrique est une automobile mue par un ou plusieurs moteurs électriques, généralement alimentés par une batterie d'accumulateurs voire une pile à hydrogène. Dans ce qui suit nous donnons un bref aperçu de l'histoire de la voiture électrique, puis mettons en évidence les entreprises leaders dans ce domaine, et nous nous concentrerons sur la marque Tesla en donnant un compte rendu historique de son développement au cours de la dernière décennie, puis ses sorties les plus marquantes. [I.01]

I.3. Compagnies de voitures électriques

De nos jours, il existe des compagnies fabriquant exclusivement des voitures électriques ou des grandes compagnies fabriquant des voitures électriques et à moteur essence. [I.02]

Parmi les grandes compagnies fabriquant les voitures électriques :

- TESLA MOTORS
- NISSAN leaf
- BMW
- Ford ELECTRIC VEHICLES
- DAIMLER
- VOLT
- PORSCHE
- E-Golf
- RENAULT

Parmi les modèles de chacune de ces filières, on peut citer la Tesla Model 3 et la Renault Zoe équipées de batteries et la Toyota Mirai dotée d'une pile à combustible. [I.03]

I.4. Marque TESLA Motors

Tesla Motors est un constructeur automobile de voitures électriques dont le siège social se situe à Palo Alto, en Californie, dans la Silicon Valley, aux États-Unis. L'entreprise a été fondée en 2003 par Martin Eberhard et Marc Tarpenning et son actuel dirigeant est Elon Musk, qui en a fait un constructeur d'automobiles électriques grand public. Elle tient son nom de l'inventeur Nikola Tesla.

La mission annoncée de Tesla est « d'accélérer la transition mondiale vers un schéma énergétique durable », notamment en stimulant la compétitivité automobile à motorisation électrique. La marque se distingue par les performances ainsi que par les technologies embarquées de ses véhicules. [I.04]

I.4.1. Développement de la voiture électrique

- La production en série du premier véhicule, le Tesla Roadster, a démarré en début d'année 2008. Le Roadster est une voiture sportive entièrement électrique. Les ventes se font par l'intermédiaire du site Internet de la société et des succursales présentes dans le monde. Ce site est appelé Star Gate et a enregistré la vente des 220 premiers modèles du Roadster en quatre mois. Le cours de l'action de cette start-up a plus que décuplé en quatre ans à peine
- La production 2008 et 2009, représentant environ 1 000 véhicules, a été réservée par une clientèle américaine, premier marché ouvert par la marque. Lors de son premier salon en Europe à Monaco, du 25 au 29 avril 2008, la marque Tesla a suscité l'intérêt de célébrités comme le Prince Albert et l'ancien champion du monde de Formule 1, Damon Hill. Les ventes du Roadster en Europe ont commencé en 2009 pour une première série limitée à 250 exemplaires intitulée Signature Edition.
- La société Tesla Motors a créé une division, TEG pour Tesla Energy Group, chargée de la conception et production des systèmes de stockage énergétiques (Energy Storage System) équipant les véhicules Tesla, mais aussi de la commercialisation de cette technologie à des partenaires tels que Daimler ou Toyota.
- En juin 2014, Elon Musk rend les brevets de Tesla accessibles à tous. Pour lui : « Si une entreprise dépend de ses brevets, c'est qu'elle n'innove pas ou alors qu'elle n'innove pas assez rapidement ».
- Le 30 avril 2015, Tesla se diversifie : Elon Musk annonce le Powerwall, une batterie conçue pour les habitations, en deux versions de 7 et 10 kWh ainsi qu'une version de 100 kWh prévue pour les entreprises.
- En mai 2016, après la présentation de la Tesla Model 3, le fabricant enregistre plus de 373 000 commandes, et plus d'un demi-million à fin juillet 2017, lors des premières livraisons.

- En octobre 2016, Tesla annonce que les voitures en production seront désormais équipées en matériel compatible à la conduite 100 % autonome. La partie «Logiciel» quant à elle viendra au fur et à mesure des années 2017-2018.
- Pour Tesla, 2017 est l'année de la Model 3. Le premier exemplaire est sorti de l'usine de Fremont début juillet, la production qui devait s'intensifier peu à peu souffre cependant de retard. En effet, la fabrication du bloc de batterie est plus difficile que prévu. Toujours dans l'optique de l'arrivée de la Model 3, le 11 juillet 2017.
- Le 28 février 2019, Tesla annonce la sortie en Amérique du Nord du modèle de base de la Model 3.
- En mars 2020, Tesla annonce la production de la millionième Tesla depuis le lancement de la marque. Il s'agit d'un Model Y de couleur rouge. [I.04]

I.4.2. Modèles de la voiture électrique Marque TESLA Motors

L'organigramme ci-dessous montre les types de voitures Tesla et leurs développements au cours de la dernière décennie.

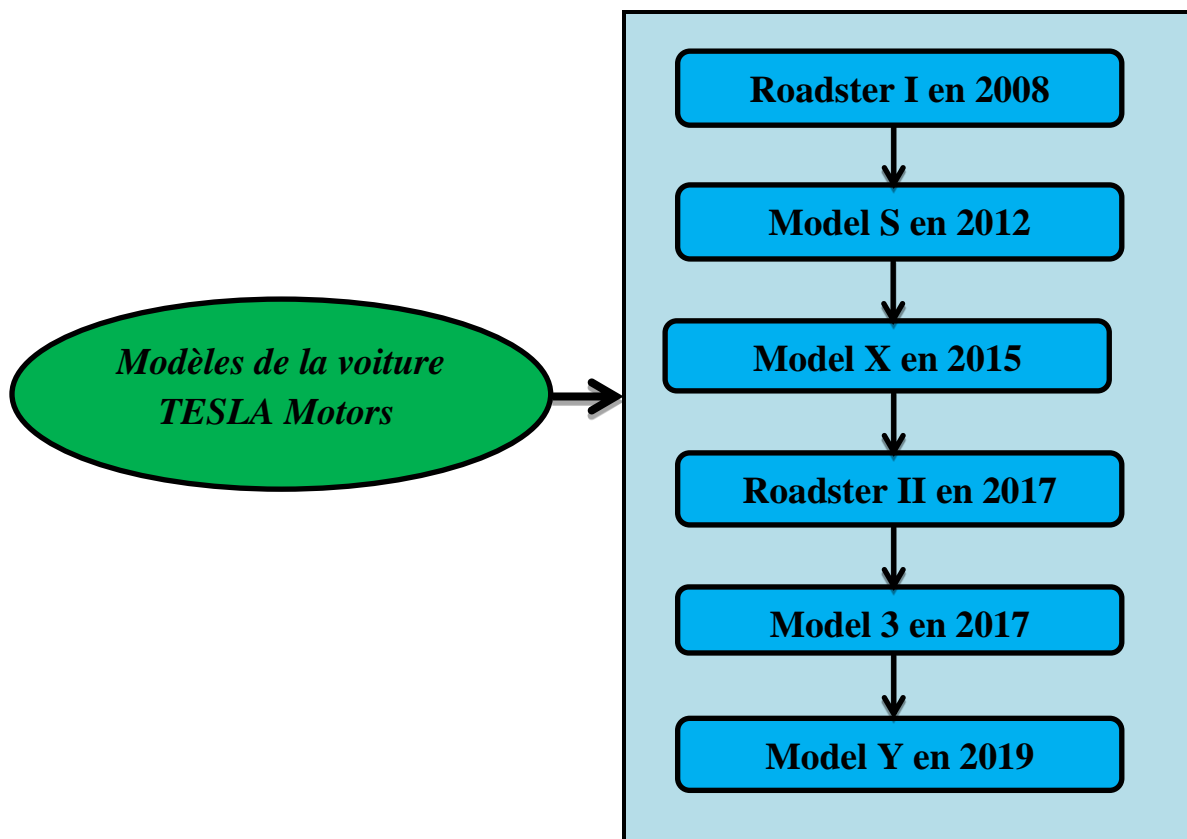


Figure I.01 : Organigramme de développement de la voiture électrique dans la décennie précédente Marque (TESLA Motors)

A. Roadster I

Les premiers modèles de la marque avaient un positionnement premium et une politique de prix très élevée, ce qui ne correspondait pas vraiment à l'objectif de la marque qui est de rendre accessibles les voitures électriques. Le premier modèle de Tesla, la Roadster, produite entre 2008 et 2012, et les ventes ont servi de source de financement pour les modèles suivants car les bénéfices engendrés par la Roadster ont servi à financer les coûts de recherche et développement des modèles suivants à plus bas coût. [I.05]

B. Model S

La Tesla Model S est la seconde voiture électrique produite par la marque californienne. Cette berline 5+2 places marque un pas supplémentaire vers la démocratisation des véhicules de Tesla puisqu'elle est mieux aboutie et moins chère que la désormais célèbre Tesla Roadster.

En France, sa commercialisation a débuté à l'été 2013. Jadis proposée avec plusieurs choix de batteries, la Tesla Model S se limite aujourd'hui à un pack de 100 kWh de capacité intégré à toutes les versions de la gamme. [I.06]



Figure I.02 : Voiture Model S. [I.06]

C. Model X

Le Tesla Model X est le 3^{ème} modèle du constructeur américain de voitures électriques. Ce type se base sur la même plateforme que la Model S et s'en distingue notamment grâce à ses portes très particulières et ses 7 vraies places. Sa commercialisation a démarré aux USA en 2015 et les premières livraisons en Europe ont démarré en France début 2016.

La Model X se dote pour cela d'une cinématique d'ouverture de porte inédite. Les portes s'ouvrent vers le haut, en se repliant afin de ne pas prendre trop d'espace latéral. C'est l'une des particularités de la voiture qui fait le plus parler d'elle. [I.07]



Figure I.03 : Voiture Model X. [I.07]

D. Roadster II

Révéle en 2017, le nouveau Tesla Roadster proposera près de 1000 km d'autonomie et une vitesse de pointe de 400 km/h. La première version du Roadster, qui marquait les débuts de Tesla, était basée sur la Lotus Elise, cette nouvelle déclinaison arbore des bases totalement nouvelles. Inspirés des modèles de la marque, il semble plus grand que son prédécesseur avec un gabarit qui semble proche de la Tesla Model S dont il pourrait partager le châssis.

Le Roadster est doté d'un toit amovible. Hormis le couple de 10.000 Nm et la présence de trois moteurs électriques, Tesla ne donne pas d'indications quant à la puissance de sa future sportive. [I.08]



Figure I.04 : Voiture Roadster II. [I.08]

E. Model 3

La Tesla Model 3 est très certainement la voiture électrique la plus attendue au monde. En France et en Europe, les premières livraisons clients de la Model 3 ont débuté en février 2019.

Le design de la Model 3 a officiellement été révélé le 31 mars. Esthétiquement, elle reprend les codes de la Model S tout en marquant sa différence avec des caractéristiques spécifiques. Vue de face, la berline n'est pas sans rappeler le design de Porsche. Une des caractéristiques de la voiture est son immense toit en verre qui est réalisé d'une seule pièce, du pare-brise à l'arrière de la voiture.

Il assure une bonne luminosité mais aussi un meilleur aérodynamisme. L'intérieur de la Tesla Model 3 tranche radicalement avec les autres véhicules du marché par son minimalisme. L'instrumentation de bord se résume à un immense écran tactile. [I.09]

En France, la Tesla Model 3 se décline en trois versions :

- la Model 3 « Standard plus ».
- la Model 3 « Grande Autonomie ».
- la Model 3 « Performance »



Figure I.05 : Voiture Model 3. [I.09]

F. Model Y

Quatrième voiture électrique de Tesla, le Tesla Model Y est un crossover 100 % électrique, il est commercialisé depuis mars 2019. Le Tesla Model Y s'avère extrêmement proche de la Tesla Model 3 avec laquelle il partage la plateforme. A la fois plus grand et plus spacieux, il permet de transporter jusqu'à 7 passagers.

Décliné en quatre versions, le Tesla Model Y reprend les mêmes configurations que la Tesla Model 3. Il s'avère toutefois moins vélocité que sa grande sœur, tant en termes de vitesse que d'accélération. [I.10]



Figure I.06 : Voiture Model Y. [I.10]

I.5. Conclusion

Au cours de la dernière décennie, les voitures électriques ont connu un grand développement grâce à la recherche continue dans certaines des entreprises leaders dans ce domaine, et parmi ces entreprises se trouve la marque TESLA Motors, qui a produit de nombreux modèles de voitures électriques.

Les voitures électriques sont aujourd'hui l'ambition et l'objectif de tous les constructeurs automobiles. Il connut un grand développement et cela est dû aux recherches menées dans ce domaine, est devenu une haute performance en termes d'autonomie et de temps de charge courte.

Chapitre II

Principe de la voiture électrique

II.1. Introduction

Par rapport aux voitures thermiques, la voiture électrique bénéficie d'une fabrication simple, et ne contient pas d'émission de gaz toxiques, ce qui contribue à réduire la pollution de l'environnement. Le seul inconvénient est son prix élevé.

Dans ce chapitre nous donnons un aperçu sur les véhicules purement électrique en montrant les différentes configurations des VE. On explique en détail la structure de la chaîne de traction du chargeur batterie jusqu'au mouvement des roues avec des exemples de chaque élément de la chaîne de traction. On explique aussi le mode dynamique du véhicule et son comportement énergétique.

II.2. Voiture purement électrique

Il s'agit d'une voiture qui ne dispose que d'un accumulateur comme source d'énergie, et les avantages du VTE sont l'absence totale d'émissions gazeuses, ce qui rend la voiture très écologique avec un niveau de bruit très faible pour le véhicule, en raison de ses roues qui roulent et éventuellement "sifflement" de l'alimentation à basse vitesse. [II.01]

En fonction de la source d'énergie utilisée pour alimenter le véhicule, il existe deux types de base des véhicules électriques :

- ✓ Voiture électriques à batteries rechargeables par prise de courant
- ✓ Voiture électriques à alimentation par pile à combustible

II.2.1. Voiture électriques à batteries rechargeables par prise de courant

Les véhicules électriques fonctionnant avec des batteries, constituent aujourd'hui l'essentiel du parc mondial des véhicules électriques. Une batterie est un système embarqué pouvant stocker de l'énergie électrique pour la restituer par la suite. C'est à ce jour le système le mieux adapté pour l'alimentation des VE. [II.02]

La figure (II.01 a et b) montre deux exemple de VE à batteries rechargeables par prise de courant



(a)-Kangoo ZE (RENAULT) [II.03] (b)-TESLA Model S. [II.04]

Figure II.01: Exemple de VE à batteries rechargeables par prise de courant

II.2.2. Voiture électriques à alimentation par pile à combustible

Les véhicules électriques à pile à combustible sont semblables aux autres véhicules électriques sauf qu'ils produisent leur propre électricité à bord. La source de cette électricité est la pile à combustible, un dispositif électrochimique semblable à une batterie à plusieurs égards. Plutôt que de stocker et relâcher l'énergie électrique comme une batterie, une pile à combustible produit toutefois de l'électricité par réaction chimique aussi longtemps qu'elle reste alimentée en carburant. [II.02]

II.3. Différentes chaîne de traction des VE

La transmission de puissance mécanique est de relier la source d'énergie, le(s) moteur(s) électrique(s), aux roues motrices du véhicule; il s'agit d'adapter la vitesse et le couple du moteur aux exigences fonctionnelles du véhicule. [II.05]

Nous pouvons donc envisager plusieurs possibilités d'associations d'éléments nécessaires à la transmission de la puissance qui sont le réducteur mécanique (à rapport fixe), la boîte de vitesses et éventuellement le différentiel.

Il existe quatre configurations pour la chaîne de traction du véhicule tout électrique :

- ❖ chaîne de traction monomoteur avec boîte de vitesse mécanique
- ❖ chaîne de traction monomoteur avec réducteur mécanique à rapport fixe
- ❖ chaîne de tractions multi-motrices à motoréducteur répartis
- ❖ chaîne de tractions multi-motrices à entraînement direct.

II.3.1. Chaîne de traction monomoteur

La voiture électrique monomoteur comporte une seule chaîne de traction.

II.3.1.1. Chaîne de traction avec boîte de vitesse mécanique

L'avantage essentiel de cette configuration est de permettre l'utilisation d'un moteur à plus faible couple, donc plus léger, pour une vitesse maximale donnée. Remarquons qu'entre deux changements de vitesse (petite plage), si le moteur possède une capacité de fonctionnement à puissance maximale constante, cela peut permettre également la suppression des fluctuations de puissance. [II.06]

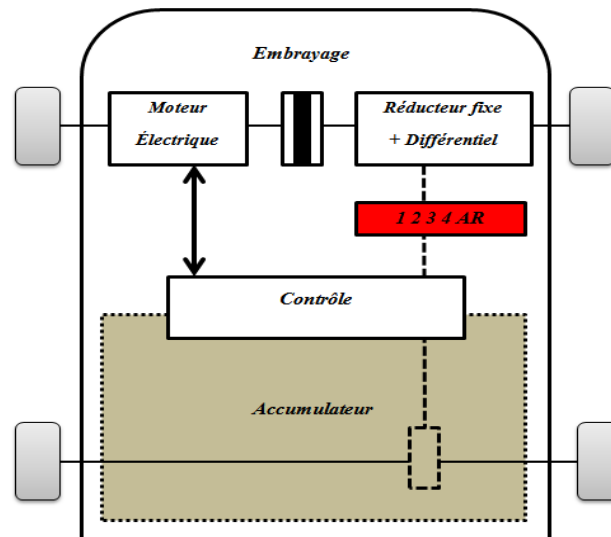


Figure II.02 : Configuration monomoteur avec boîte de vitesse.

Ce type contient 1 moteur électrique + boîte de vitesses + différentiel (4 roues motrices). Le moteur électrique, fournit un couple sur son arbre de sortie. Ce couple doit être transmis aux roues afin de permettre le déplacement de l'automobile. Les différents organes de transmissions (la boîte de vitesses, les ponts et le différentiel entre autres) assurent cette fonction.

Un différentiel est un système mécanique qui a pour fonction de distribuer une vitesse de rotation par répartition de l'effort cinématique, de façon adaptative, immédiate et automatique, aux besoins d'un ensemble mécanique. [II.30]

II.3.1.2. Chaîne de traction avec réducteur mécanique à rapport fixe

Le couple maximal que doit délivrer un tel moteur associé à un réducteur de rapport fixe est supérieur à celui que devrait produire un moteur associé à une boîte de vitesses. [II.06]

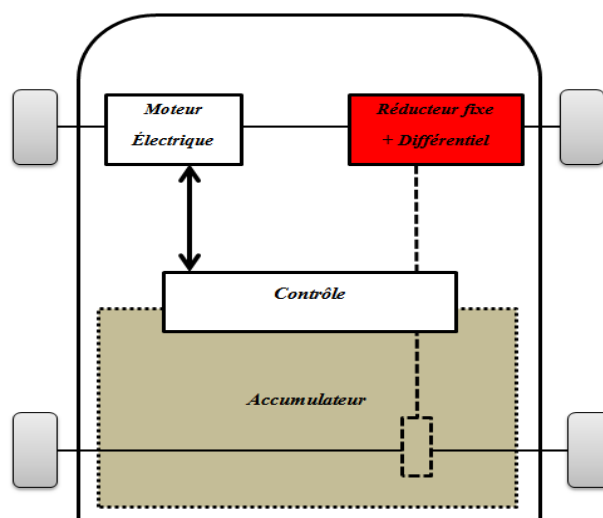


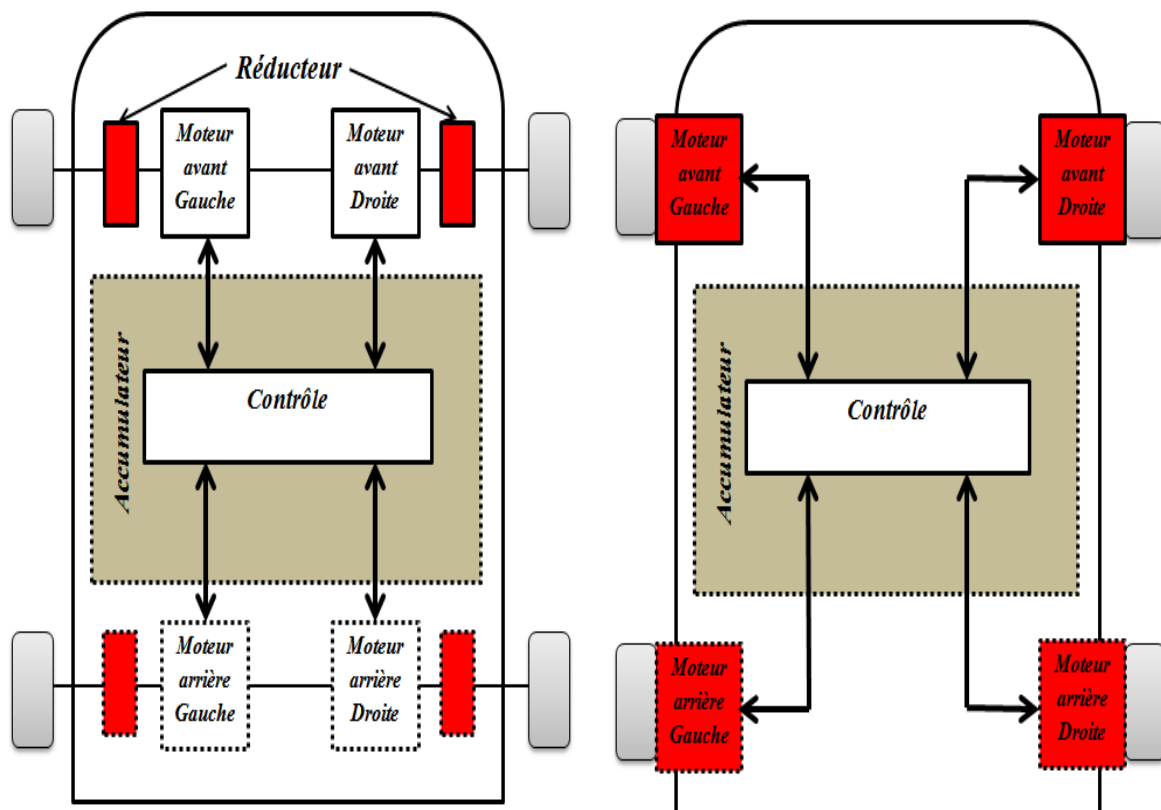
Figure II.03 : Configuration monomoteur avec réducteur.

Ce type contient un seul moteur électrique + réducteur fixe + différentiel. Le moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique générée à partir de la batterie, la force motrice est transmise aux roues par un moteur électrique commandé par un contrôleur selon la transmission mécanique (réducteur + différentiel).

II.3.2. Chaîne de tractions multi-motrices

La voiture électrique multi-motrice comporte plusieurs chaînes de traction indépendantes. Il peut à priori sembler intéressant de motoriser indépendamment les roues pour supprimer les organes de transmission mécanique comme le différentiel et les doubles joints de cardans, nécessaires dans les deux configurations précédentes. Cela constitue encore un pas, après la suppression de la boîte de vitesses et de l'embrayage, vers la simplification de la chaîne de transmission mécanique. On peut ainsi réaliser des solutions à deux roues motrices soit à l'avant, soit à l'arrière ou encore des solutions à quatre roues motrices.

La chaîne de traction dans ce cas est simplifiée en utilisant un moteur (avec réducteur ou moteur roue) pour chaque roue motrice. Ainsi le différentiel classique est remplacé par un différentiel électrique réalisé par un contrôle indépendant de chaque moteur. Pour ce cas, deux configurations sont possibles : avec réducteur (figure II.04.a) ou à entraînement direct (figure II.04.b). [II.06]



(a)-Motoréducteur répartis (b)-Entraînement direct.

Figure II.04 : Configuration multi-moteurs

Configuration avec réducteur: la batterie fournit de l'énergie électrique aux moteurs via la commande, les moteurs sont connectés aux roues via le réducteur.

Configuration avec entraînement direct: dans cette configuration, la batterie alimente les moteurs intégrés dans les roues via le contrôleur.

Moteur roue

Le moteur-roue intègre un moteur électrique et d'autres composants dans une configuration compacte qui peut s'insérer dans une roue de dimensions ordinaires. Les convertisseurs de puissance peuvent être installés soit à l'intérieur soit à l'extérieur de la roue. Il est montré sur la figure (figure II.05) à quoi ressemble ce type du moteur. Ce système permet d'une part de contrôler avec haute précision et indépendamment le couple appliqué à chaque roue et d'autre part de maximiser la capacité du freinage régénérateur. L'utilisation de ce type de moteur sur des roues directrices, permet la suppression de toutes les parties mécaniques liées à la transmission (différentiel, boîte de vitesse, embrayage, etc...), de commander indépendamment les roues et en même temps, de libérer de l'espace dans le véhicule, notamment utilisable par les batteries, ce moteur possède une structure inversée où le rotor est extérieur et le stator intérieur. [II.07]

Ce système intègre quatre éléments : le pneu, les freins, l'amortisseur et le moteur électrique. Les configurations pour un VE sont donc multiples : traction, propulsion ou quatre roues motrices. [II.08]

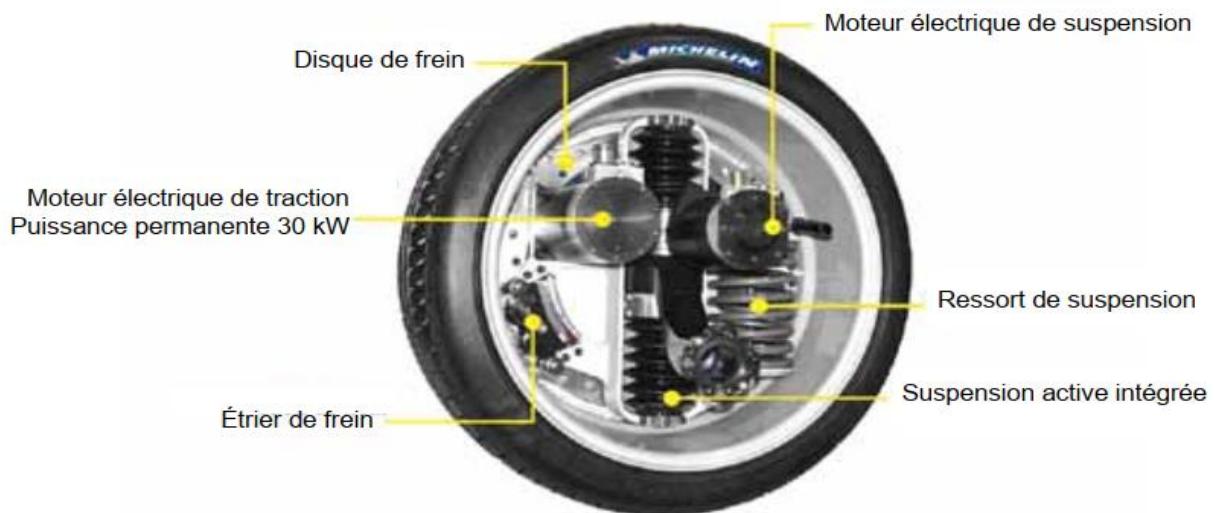


Figure II.05 : Roue englobant un moteur. [II.08]

II.4. Structure et principe de fonctionnement de la chaîne de traction

Structure de la chaîne de traction (figure II.06) d'un véhicule électrique sont composée du chargeur de batteries, de la batterie électrochimique de la source embarquée d'énergie électrique, de l'ensemble convertisseur statique du moteur électrique et le contrôle et, enfin, de la transmission mécanique dont la fonction est d'adapter la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur. [II.09]

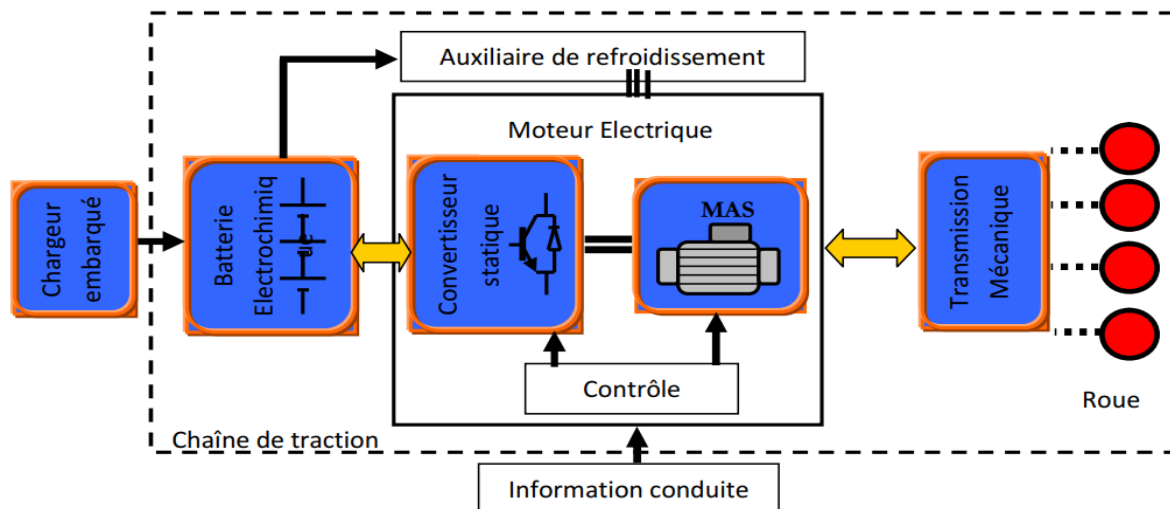


Figure II.06 : Structure de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique. [II.09]

La batterie est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur (figure II.07). Le régulateur sert à régler l'intensité du courant qui alimente le moteur. Son fonctionnement est assez simple : lorsque le conducteur du véhicule appuie sur la pédale de l'accélérateur, la batterie libère du courant. Le convertisseur transforme alors le courant continu (DC) de la batterie en courant alternatif (AC) pour alimenter le moteur (cas d'un moteur AC). Le convertisseur est une partie intégrante du moteur. Le point fort du véhicule électrique est la chaîne de transmission électromécanique. En effet, un véhicule a besoin d'un couple élevé à basses vitesses afin de pouvoir accélérer et d'un couple moins important à des vitesses de croisière. Ces spécificités sont celles d'un moteur électrique. [II.02]

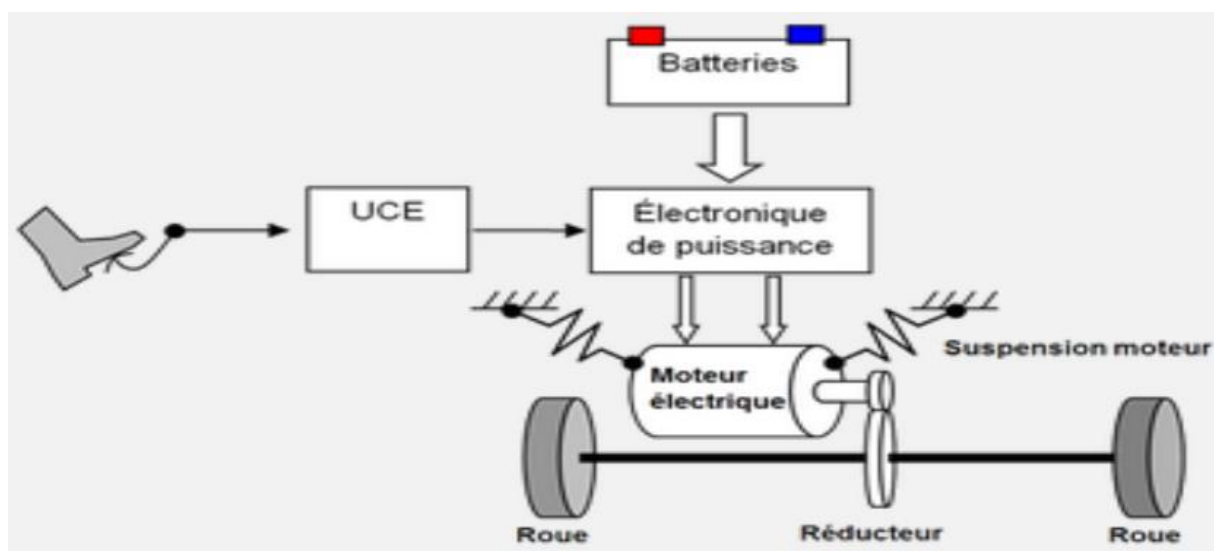


Figure II.07 : Fonctionnement de la chaîne de traction. [II.16]

Dans ce qui suit on va détailler les équipements et leur utilité dans le VE tout en expliquant le mode fonctionnel de chaque équipement.

II.5. Equipement du VE

II.5.1. Batterie de traction

Une batterie est un accumulateur électrochimique qui fonctionne grâce aux réactions électrochimiques aux électrodes (figure II.08). Ces dernières assurent la conversion de l'énergie électrique en un processus chimique réversible. L'accumulateur électrochimique a la caractéristique intéressante de fournir une tension à ses bornes peu dépendante de sa charge. Cette tension est de l'ordre de quelques volts pour un élément.

Comme en pratique des tensions plus élevées sont requises, typiquement 12V, 24V voire 48 V et plus, il suffit, pour augmenter la tension, de raccorder des éléments du même type en série au sein d'une batterie d'accumulateurs.[II.10]

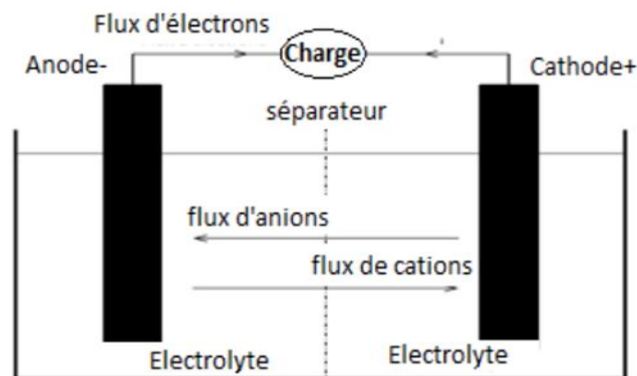


Figure II.08 : Vue interne d'une batterie. [II.11]

Exemple de source d'énergie de voiture tesla modèle S

Le pack de batterie (figure II.09) est composé de plus de 7000 cellules Panasonic de type NCR18650A 3,6V et 2,9 mAh de 45g chacune. [II.12]



Figure II.09 : Pack de batterie. [II.12]

Les cellules sont compartimentées dans des blocks (figure II.10). Au final le pack de batterie fait 85kW. Il délivre 375V en continue et son poids est d'environ de 544kg.

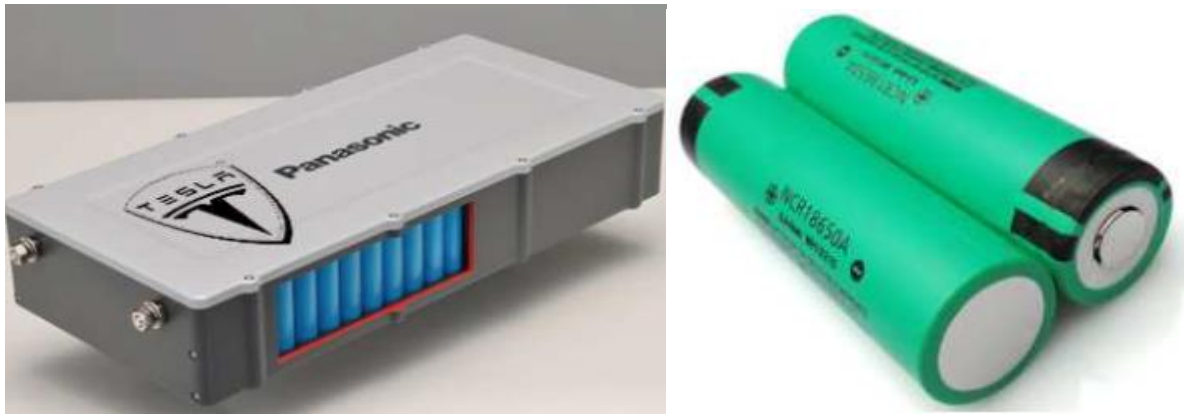


Figure II.10 : Blocks des cellules de pack de batterie. [II.12]

La figure II.11 apparait une protection en aluminium enveloppe le pack de batterie pour le sécurisé contre les chocs.



Figure II.11 : Protection en aluminium enveloppe le pack de batterie. [II.12]

Il existe des batteries de différentes formes selon leur structure ou technologie; par contre l'utilisation de ces différentes technologies dans les voitures électriques doit respecter certaines conditions parmi lesquelles : [II.07]

- Durée de vie élevée, calculée en nombre de cycles charge/décharge.
- Entretien faible et recyclable.
- Bonne énergie massique (Wh/kg) (bonne autonomie).
- Tension stable engendrant des performances régulières.
- Bonne puissance massique (rapport puissance /poids en W/kg) permettant des accélérations importantes.

a- Batteries au nickel-hydrure métallique (Ni-MH)

Les batteries nickel / métal hydrure sont largement utilisées à l'heure actuelle dans les VEH, et sont réputées avoir une longue durée de vie et une meilleure densité énergétique élevé. [II.13]

Avantage : Elles sont proches des Ni-Cad, elles souffrent moins de l'effet mémoire et bénéficient d'une meilleure autonomie.

Inconvénient : Elles sont plus onéreuses mais sont sujettes au phénomène d'auto-décharge [II.02].



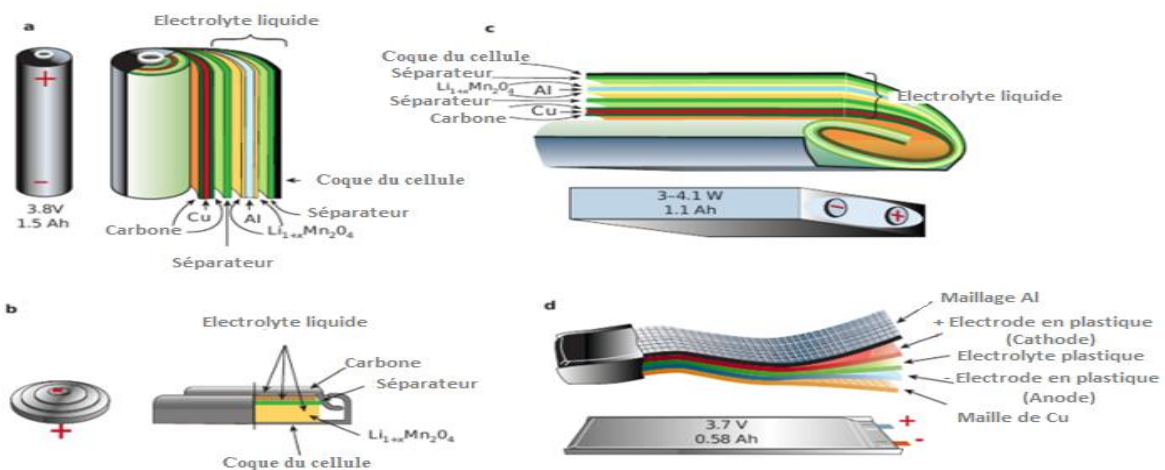
Figure II.12 : Batterie NiMH de Toyota Prius 2^{ème} génération (1,3 kWh). [II.14]

b- Batteries Lithium

Elles possèdent de très fortes densités énergétiques et une importante énergie massique, ce qui favorise leur utilisation dans le secteur du transport et particulièrement pour les véhicules électriques qui nécessitent des batteries à grande capacité. [II.13]

Avantage : légère, bonne autonomie, pas d'effet mémoire, grande variété de formes.

Inconvénient : batterie très onéreuses, s'use dans le temps même sans utilisation [II.02].



a).Cylindrique, b).plate, c).Prismatique, d).Mince et plate.

Figure II.13 : Schémas représentant les différents designs de batteries Lithium actuelles. [II.11]

Les différentes catégories qui composent la famille des batteries au Lithium sont : [II.15]

- ✓ **Lithium-ion - Li-ion** : les plus courantes pour les applications nomades de faible puissance.
- ✓ **Lithium Polymère - Li-Po** : plus légères que les Li-ion, elles sont aussi plus faciles à mettre en œuvre.
- ✓ **Lithium-phosphate - LiFePO4** : Elles combinent les avantages des Li-ion et Li-Po et une durée de vie élevée.
- ✓ **Lithium Métal Polymère - LMP** : fonctionne à température interne d'environ 85°C. Une technologie en cours de développement dont le promoteur est le groupe Bolloré



Figure II.14 : Batteries au lithium polymère de Nissan. [II.13]

II.5.2. Electronique de puissance dans un véhicule électrique

Dans la plupart des véhicules électriques, on se trouve confronté à la compatibilité des sources d'énergie à courant continu et à courant alternatif et à l'intérieur d'une même catégorie à des compatibilités entre les tensions des sources et des récepteurs.

Ce problème de compatibilité sous-entend la présence à bord des véhicules électriques de convertisseurs électroniques dont le rôle est de lever les incompatibilités de fonctionnement. [II.06]

On trouve ainsi dans un véhicule principalement trois types de convertisseurs. [II.15]

- ❖ Convertisseurs AC-DC : (Les redresseurs) adaptés le courant apporté par la prise de branchement à ce que la batterie électrique peut recevoir.
- ❖ Convertisseurs DC-DC : (Les hacheurs) ils sont nécessaires pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électroniques (l'éclairage intérieur, le poste radio, les tableaux de bord...), comme il est également utilisé pour alimenter et varier la tension aux bornes du moteur DC.
- ❖ Convertisseurs DC-AC : (Les onduleurs) il convertit le courant continu fourni par la batterie en courant alternatif pour alimenter le moteur électrique.

II.5.3. Recharge de VE

La recharge d'un véhicule électrique (VE) constitue un enjeu stratégique pour les constructeurs automobile. [II.17]

Dans le domaine des véhicules électriques nous pouvons distinguer deux types d'infrastructures de recharges :

- ❖ Charge quotidienne (infrastructure peu coûteuse, installée au domicile ou au travail) dite charge « lente » ou monophasée.
- ❖ Charge sur long trajet (borne de recharge rapide, déploiement à grande échelle).

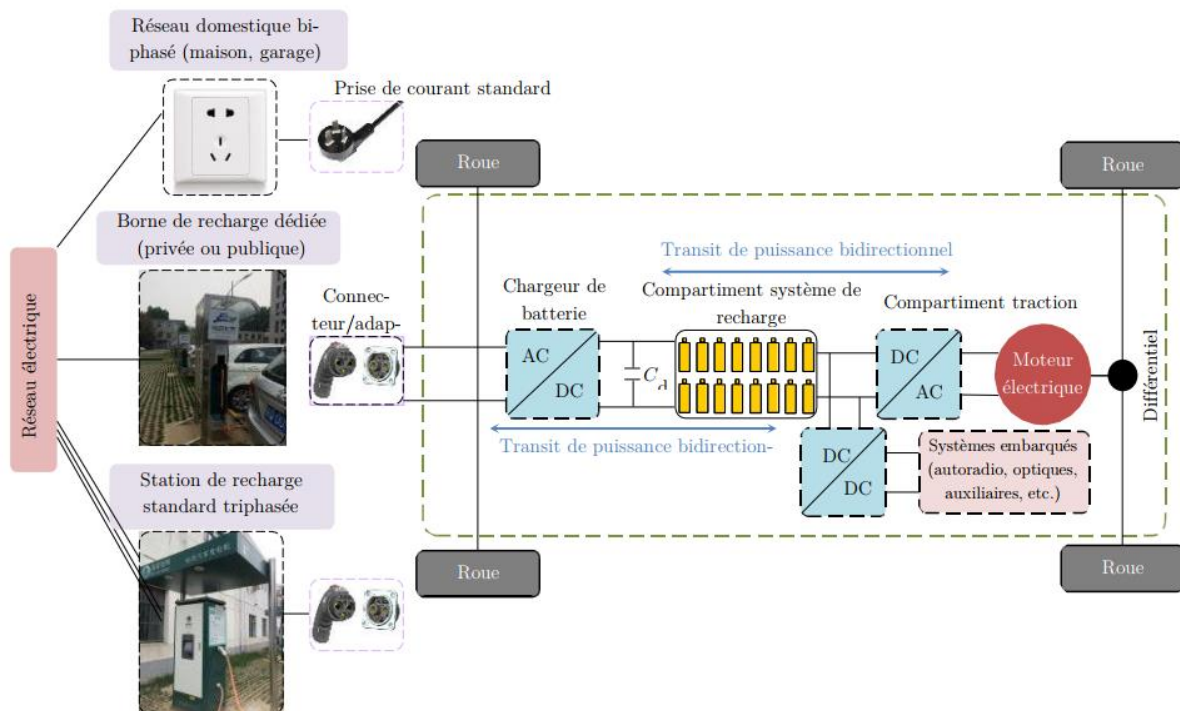


Figure II.15 : Exemples de chaînes de recharge de VE. [II.17]

Deux types de chaînes de recharges peuvent être distingués :

- ❖ Recharge par induction (dite sans contact)
- ❖ Recharge par conduction (dite à cordon).

Il existe deux types de chargeurs de batterie pour voitures électriques :

- ❖ Soit embarqués à bord du véhicule
- ❖ Soit présents au niveau des bornes de recharge

Exemples de chargeurs de batterie embarquée dans VE

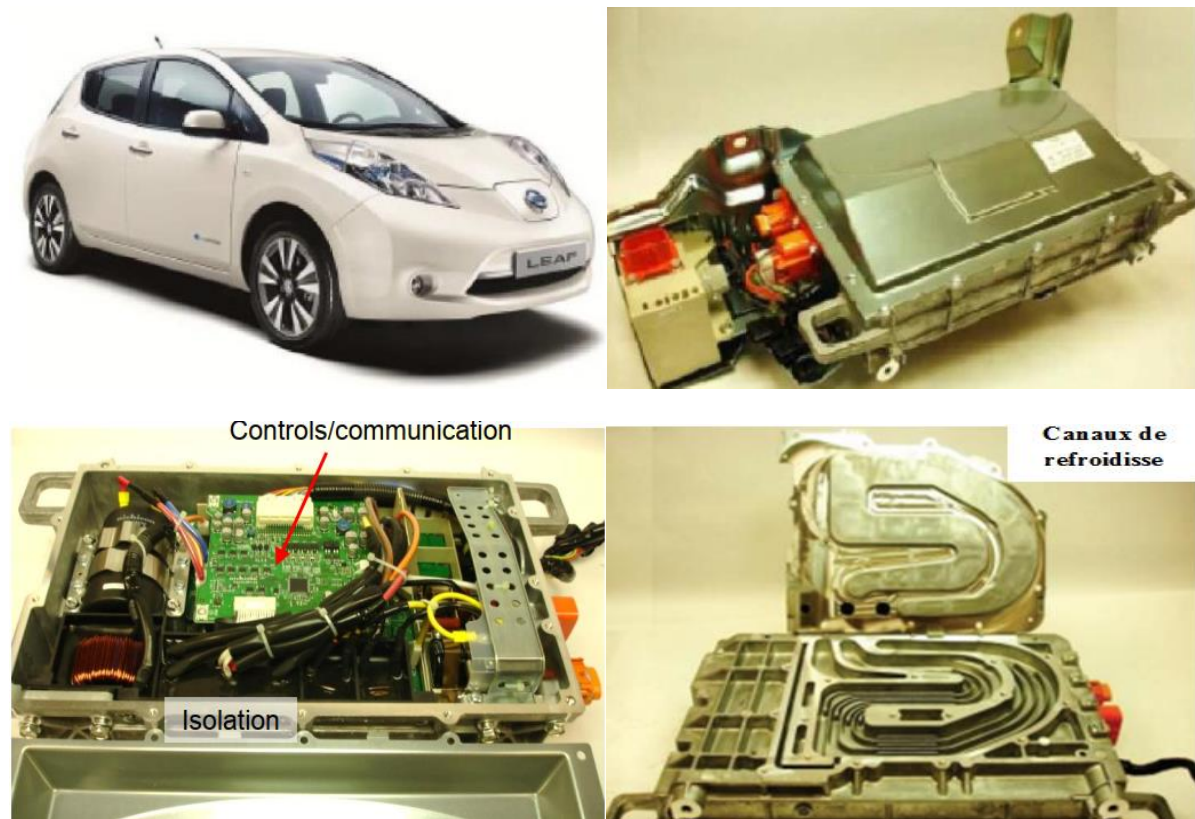


Figure II.16 : Nissan Leaf 2013 et carter du chargeur. [II.17]



Figure II.17 : BMW i3 2016 et carter du chargeur. [II.17]

II.5.3.1. Recharge à conduction

La charge par conduction est une connexion entre le connecteur du VE et l'entrée de charge à l'aide d'un câble spécifique respectant les normes de charge des VE. Cette connexion limite le contact au niveau de charge de forte puissance pour éviter des dommages. Il y'en a des différentes catégories de chargeurs par conduction en fonction de la densité de puissance nécessaire:[II.18]

- **Charge à faible puissance** charge de niveau 1 - prise standard de 120 V (à la maison ou au bureau) pour un taux de charge allant jusqu'à 1,9 kW. En règle générale, cela est limité à 12 ampères et à la charge de niveau 2 - borne de recharge de 240 V (privée ou publique) pour un taux de charge maximal de 19,2 kW. En règle générale, il s'agit de 32 ampères. Son avantage pour les services publics cherchant à minimiser l'impact sur les heures de pointe, par exemple vous pouvez recharger votre voiture à la maison la nuit où en station publique pendant votre travail, vos achats. Le temps de charge dépend de la quantité d'énergie demandée et des caractéristiques de chaque producteur. En général, pour charger un véhicule électrique au niveau 1, le temps de charge est compris entre 11 et 36 heures et pour le niveau 2, entre 2 et 6 heures. Pour le véhicule hybride rechargeable PHEV, le chargement avec le niveau 1 ne prend que 4 à 11 heures et le chargement d'un véhicule électrique avec le niveau 2 prend de 1 à 4 heures.
- **Charge rapide à haute puissance** charge rapide - station de charge de 400 V ou supérieure (réseaux de charge publics) jusqu'à 240 kW (400A). Ce type de charge ne convient que pour les batteries VE. Il augmente la demande, conduit à surcharger rapidement les équipements de distribution locale aux heures de pointe et renverse les conflits de flux d'énergie avec l'objectif fondamental de créer une connexion minimale, de disposer du temps voulu et de fournir une énergie conséquente aussi rapidement que possible. Le temps de charge requis pour 50 kW est compris entre 0,26 et 0,64 heure et seulement 0,37 heure pour 100 kW pour le Tesla roadster

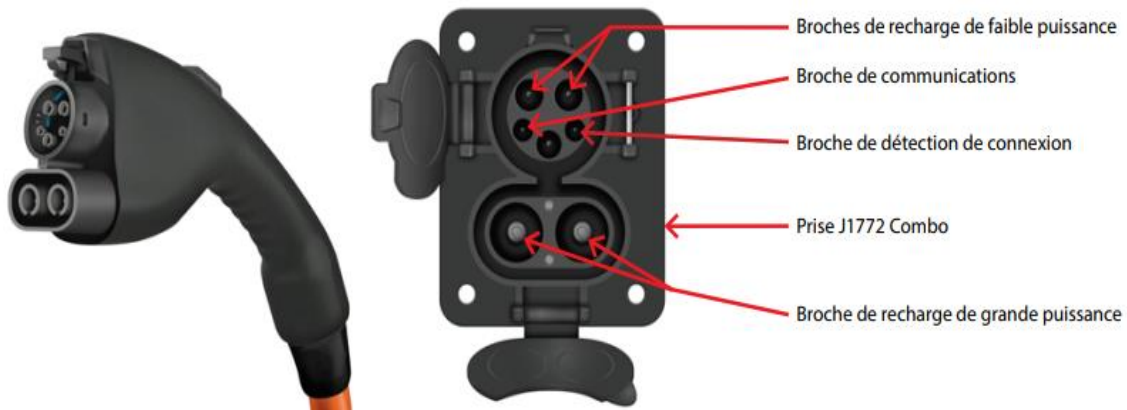
Les chargeurs de niveau 2 et 3 augmentent les pertes du transformateur de distribution, les variations de tension, les distorsions harmoniques et la charge thermique du réseau de distribution. Ils ont donc un impact sur le réseau de distribution.

a- Normes de conception de charge du VE

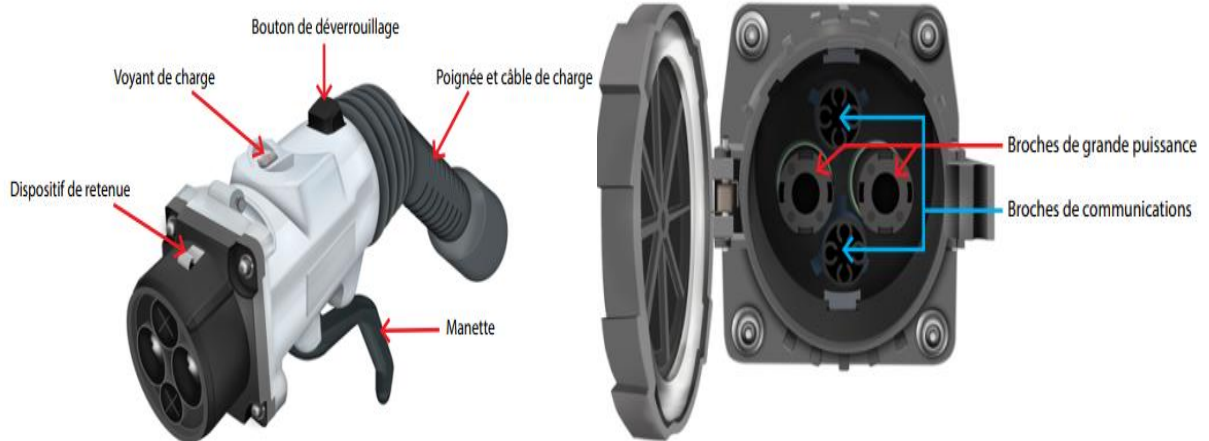
Les composants principaux de l'équipement d'alimentation des véhicules électriques EVSE sont les suivants: câble de charge pour véhicules électriques, supports de charge (résidentiels ou publics), fiches de connexion, prises de courant, connecteurs et protections de véhicules. On trouve deux configurations d'EVSE: le câble spécialisé et le boîtier mural ou piédestal.

Pour des raisons de sécurité, de multiples codes et normes de charge sont applicables dans le processus de charge des véhicules électriques au niveau international, ce qui pourrait donner lieu à des infrastructures de charge sophistiquées et coûteuses. Les normes les plus utilisées sont mentionnées ci-dessous.

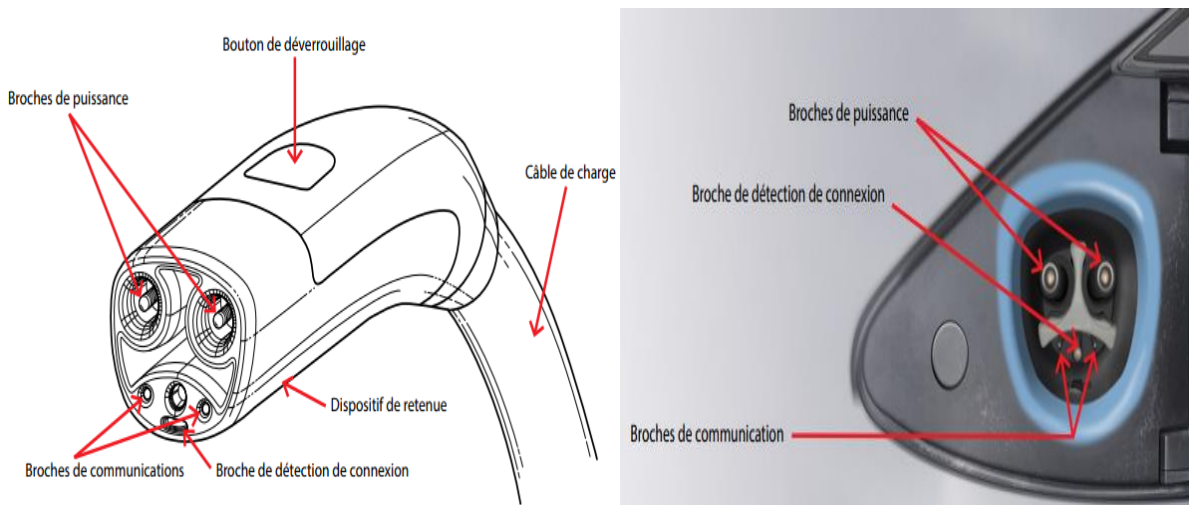
La forme de prise et socle de recharge pour certaines normes internationales dans le domaine des véhicules électriques représenté par la figure II.19 :



Prise et socle de recharge J1772 « Combo »



Prise et socle de recharge CHAdeMO.

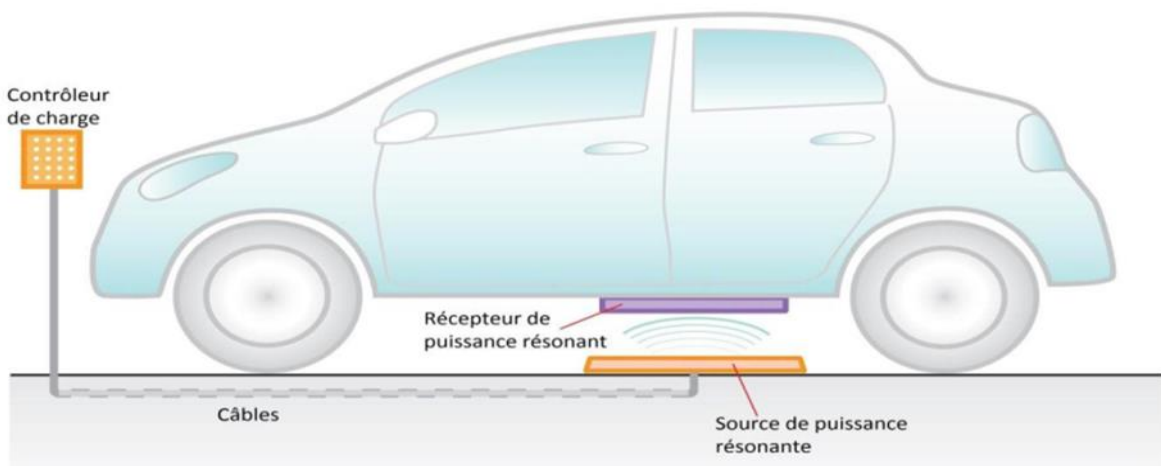


Prise et socle de recharge « Supercharger » de TESLA.

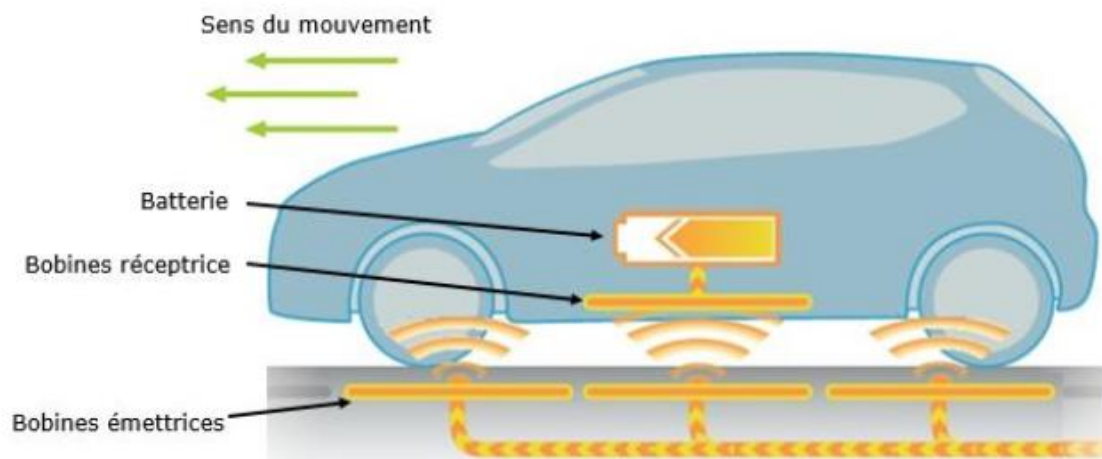
Figure II.19 : Types des Prises et socles de recharge. [II.19]

II.5.3.2. Charge sans contact

La multiplication des infrastructures dans le domaine public pose également le problème du risque de dégradations dû au vandalisme ou à des utilisateurs peu soigneux. Une solution consiste à développer des équipements de recharge sans contact (figure II.20) qui ne nécessitent pas de branchements de la part de l'utilisateur. Ces systèmes peuvent équiper des places de parking et l'utilisateur n'a alors qu'à placer son véhicule en vis-à-vis du plot de recharge. On parle dans cette configuration de recharge statique par induction. Une solution également envisagée pour améliorer l'autonomie et limiter le temps d'immobilisation du véhicule pendant sa phase de recharge consiste à équiper certains tronçons de voies avec des systèmes de recharge dynamique par induction. Alimenter le véhicule en roulant permet de répartir la charge le long du parcours et ainsi de réduire la puissance crête nécessaire à la recharge du véhicule. [II.20] [II.21]



(a)



(b)

(a). Charge par induction stationnaire; (b). Recharge par induction dynamique

Figure II.20 : Charge par induction d'un véhicule électrique. [II.20] [II.21]

Le tableau II.01 donne une comparaison entre la recharge par induction et la recharge par conduction.

Tableau II.01 : Comparaison entre la recharge par induction et la recharge par conduction.

Charge sans contact	Charge avec contact
<ul style="list-style-type: none"> - Peu d'énergie pendant la charge. - Durée de recharge plus longue. - Technologie complexe. - Technologie couteuse et peu écologique en vue du nombre de composants obligatoires - Confort d'utilisation. - Se débarrasser des fils, câbles, recharge facile de batterie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grande quantité d'énergie pendant la charge. - Durée de recharge courte. - Technologie facile. - Technologie moins cher - Problème de câblage et de prise - Risque d'électrocution

II.5.4. Moteur électrique d'entraînement

Le moteur électrique est un élément clé de la chaîne énergétique du véhicule. Il n'a cessé d'évoluer depuis sa création. Les premiers VE étaient pourvus de moteurs à courant continu à excitation séparée réglable. Ils ont été remplacés depuis la fin des années 1990 par des moteurs à courant alternatif, ceci grâce aux progrès réalisés en électronique de puissance et de commande. Par rapport à leurs prédécesseurs, ces moteurs sont beaucoup plus robustes, ont une puissance massique et volumique plus élevée, et un meilleur rendement. [II.22]

Deux technologies sont actuellement utilisées. Ce sont les machines synchrones et les machines à induction (ou asynchrones).

II.5.4.1. Moteur synchrone

Un moteur synchrone est un moteur à courant alternatif pour laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. [II.23]

a- Moteur synchrone à aimants permanents

Aujourd'hui, 93 % des moteurs de véhicules électriques sont à aimants permanents. Ce moteur est plébiscité par la grande majorité des constructeurs, principalement pour deux raisons.

- La première est que l'excitation magnétique créée par les aimants ne consomme pas d'énergie. Le moteur possède donc naturellement un bon rendement, du moins sur une certaine plage de vitesse et de couple. Pour une autonomie donnée, cela permet de mettre une batterie de moindre capacité, donc moins chère et moins lourde.

- La deuxième raison est sa compacité. Pour un couple et une puissance maximale donnée, le moteur est plus léger et moins volumineux que les autres technologies. [II.16]

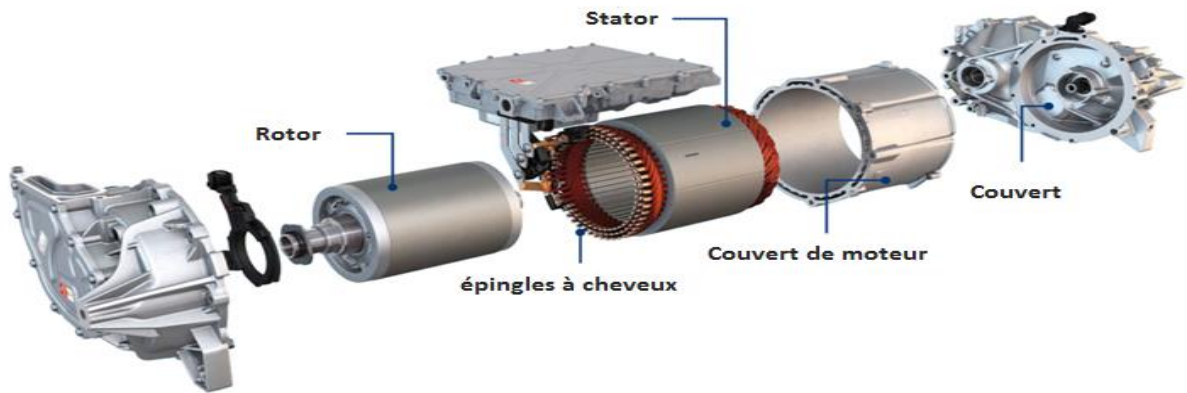


Figure II.21 : Moteur synchrone à aimants permanents. [II.24]

Citons comme exemples quelques modèles très courants tout électriques pourvus de ce moteur (figure II.22) : la Nissan Leaf, la BMW i3, la Toyota Prius, la Kia e-Niro, et la Tesla modèle3.



Figure II.22 Modèles des voitures utilisés le moteur à aimants permanents (Leaf, BMW i3, Prius, Tesla model 3). [II.22]

La figure II.23 montre le rotor à aimants de la Tesla model 3. Il y a 6 pôles et chaque pôle est formé par deux rangées d'aimants disposés en V. La puissance maximale du moteur est de 211 kW.

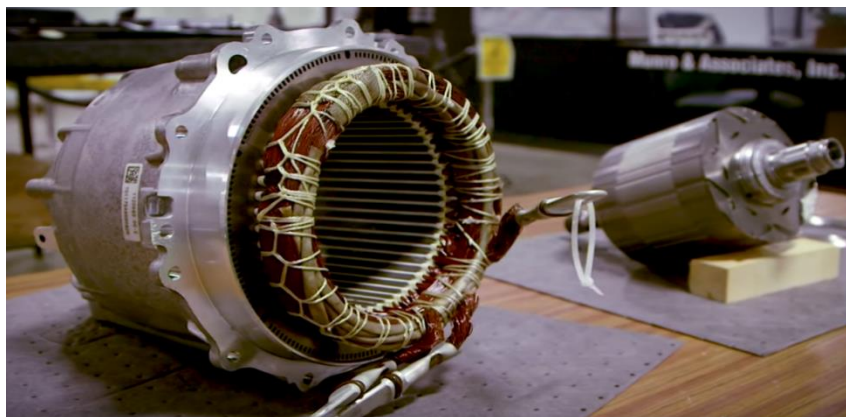


Figure II.23 : Moteur à aimants de la Tesla model 3. [II.25]

b- Moteur synchrone à rotor bobiné

Le constructeur Renault est aujourd'hui le seul à utiliser cette technologie. Au début, Renault avait fait appel à l'équipementier Allemand Continental pour la motorisation des véhicules Fluence ZE, Kangoo ZE, et la Zoé de première génération (figure II.24). Ces moteurs (nommés 5A Gen1 et 5A Gen2 pour la Zoé), à refroidissement liquide, avaient une puissance allant de 44 kW à 70 kW selon le véhicule, et un couple maximal de 220 / 226 Nm. Ils étaient dotés d'un rotor à 8 pôles. [II.22]



Figure II.24 : Modèles des voitures utilisés le moteur à rotor bobiné (Renault Fluence ZE, Kangoo ZE et Zoé). [II.22]

Les figures II.25 montrent le nouveau groupe moto propulseur Renault 5A Gen3. Pour la dernière version de la Zoé, sortie en 2019 (la Zoé ZE50, pour une batterie de 52 kWh), il y a deux versions de ce moteur selon la puissance développée (80 kW / 225 Nm ou 100 kW / 245 Nm).



Figure II.25 : Groupe moto propulseur Renault 5A Gen3. [II.22]

II.5.4.2. Moteur à induction

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif pour laquelle la vitesse de rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation de champ tournant.

Le stator consiste ensemble de trois bobinages parcourus par des courants triphasés induisent un champ tournant statorique, le rotor constitué de conducteurs (des bobinages ou barres métalliques) disposés le long du rotor et court-circuités. [II.23]

Citons comme exemples quelques modèles très courants tout électriques pourvus de ce moteur (figure II.26) Tesla, avec ses modèles S et X, ainsi que les constructeurs Allemands : Audi pour le SUV e-tron et Mercedes-Benz pour son nouveau EQC. [II.22]



Figure II.26 : Modèles des voitures utilisés le moteur à induction (Tesla model S P100D, Audi e-tron, Mercedes-Benz EQC 400). [II.22]

Les constructeurs Tesla, Audi, et Mercedes-Benz ont néanmoins choisi ce moteur car il est bien adapté pour le cahier des charges de leurs véhicules. Ce sont des véhicules dotés de grosses batteries (jusqu'à 100 kWh) donc de masse élevée (jusqu'à 2,5 t), ayant de très bonnes capacités d'accélération (0 à 100 km/h en moins de 5 s), et pouvant rouler à haute vitesse (jusqu'à 250 km/h). La puissance motrice maximale doit donc être très importante, ainsi que la puissance motrice devant être soutenue en régime continu. La transmission mécanique étant à rapport de réduction fixe, pour la vitesse maximale du véhicule, le moteur doit pouvoir tourner à un régime très élevé.

Tesla a donc développé pour ses modèles S et X un moteur à induction de forte puissance avec une densité de couple élevée, et équipé d'un rotor à cage en cuivre coulé sous pression (figure II.27). L'entreprise hérite de toute l'expérience accumulée dans le passé dans la conception de ces types de moteurs. L'intérêt d'un rotor à cage en cuivre par rapport à l'aluminium, métal le plus couramment utilisé, est sa plus faible résistivité, ce qui engendre moins de pertes par effet Joule au rotor. Par rapport à un moteur à cage aluminium, il est alors possible de diminuer les dimensions du moteur à rendement identique, ou d'augmenter le rendement à dimensions identiques, ou encore d'accroître la puissance continue à dimensions et rendement identiques. La contrepartie est sa plus forte masse et son prix plus élevé.



Figure II.27 : Moteur à induction de la Tesla model S. [II.26]

L'Audi e-tron est équipée de 2 moteurs à induction, un sur chaque train (exposé). La puissance peut donc être transmise à ces derniers en fonction des conditions d'adhérence et de la demande de puissance du conducteur. En condition de circulation normale, seul le moteur arrière fonctionne afin d'avoir un meilleur rendement global.

Le choix d'Audi pour ce moteur est clairement dicté par des considérations de puissances en régime continu assez importantes à tenir, en raison de la masse du véhicule, des possibilités d'accélération répétées, et d'un mode boost pendant 10 s.

La figure II.28 montre le groupe motopropulseur Audi monté sur le train avant de l'e-tron



Figure II.28 : Groupe motopropulseur Audi APA250. [II.22]

Ce groupe motopropulseur est constitué d'un moteur à induction à cage en aluminium (figure II.29).

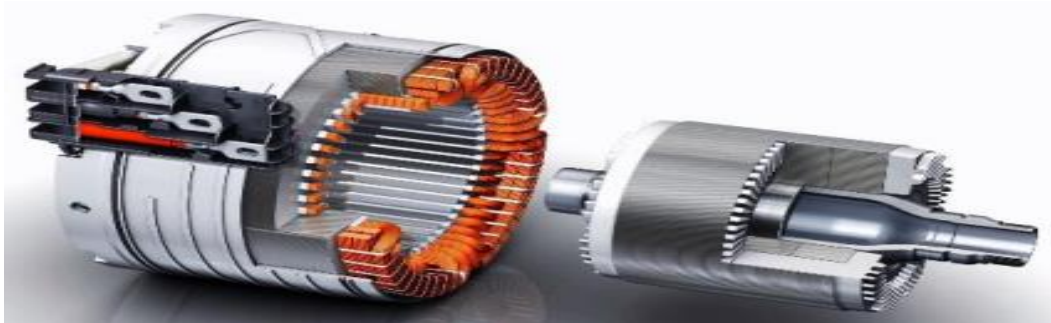


Figure II.29 : Moteur Audi APA250. [II.22]

II.5.5. Transmission mécanique

L'objet de la transmission mécanique est de relier la source d'énergie, le(s) moteur(s) électrique(s), aux roues motrices du véhicule (figure II.30) ; il s'agit d'adapter la vitesse et le couple du moteur aux exigences fonctionnelles du véhicule.

Un moteur électrique a un volume et une masse fonctions de son couple, aussi pour réduire la masse embarquée et le coût de la motorisation, on préfère généralement associer le moteur à un réducteur mécanique. Ceci permet de réduire le couple que doit fournir le moteur en augmentant sa vitesse de rotation. Ainsi, a priori, on a tout intérêt à maximiser la vitesse du moteur électrique sachant qu'il existe des limites de faisabilité et que la masse du réducteur reste généralement faible devant celle du moteur. Cependant, des problèmes technologiques difficiles se posent comme la réalisation des pignons à très grande vitesse et l'obtention de bons rendements avec de grands rapports de réduction. [II.09]

Les avantages de la transmission mécanique sont nombreux:

- Elle évite un surdimensionnement du moteur et permet donc de limiter les coûts du convertisseur statique et les batteries. En effet, le réducteur permet de réduire le couple que doit fournir le moteur et donc la masse et le coût de celui-ci.
- Elle autorise également des puissances massiques plus élevées.

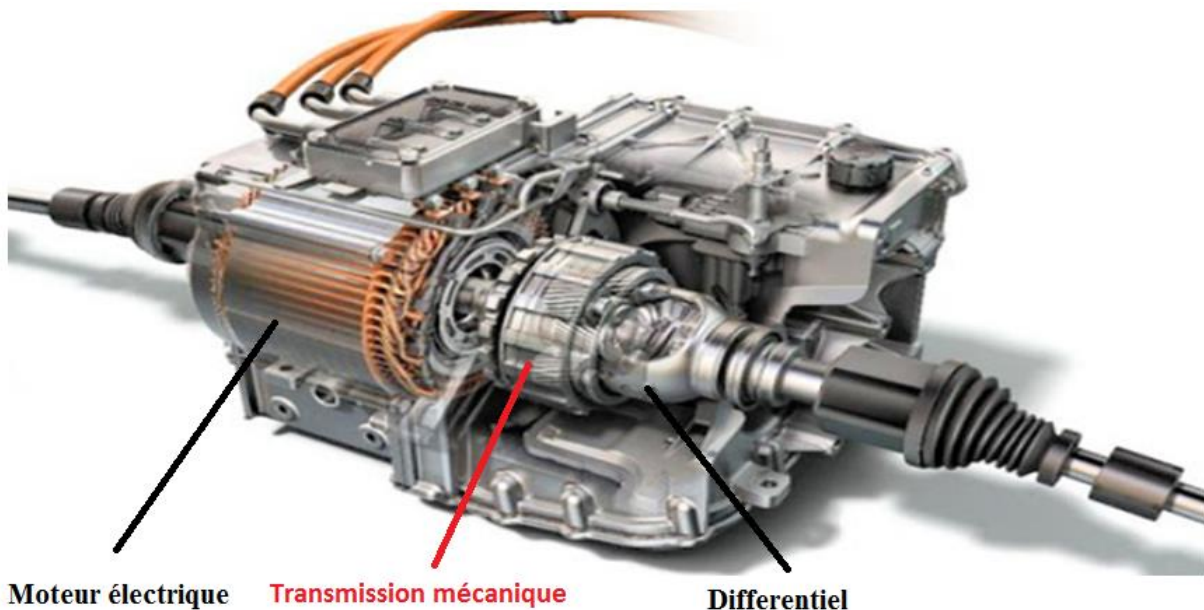


Figure II.30 : Emplacement de la transmission mécanique de la voiture. [II.29]

II.6. Dynamique du véhicule

Le mouvement électrique de la voiture est soumis aux facteurs suivants : des efforts de traction développés par ses actionneurs et des forces de résistance au déplacement. Le comportement d'un véhicule en mouvement le long de son sens de déplacement est déterminé par toutes les forces qui lui agissent dans cette direction. La figure (II.31) montre les forces agissant sur un véhicule dans une pente. [II.02]

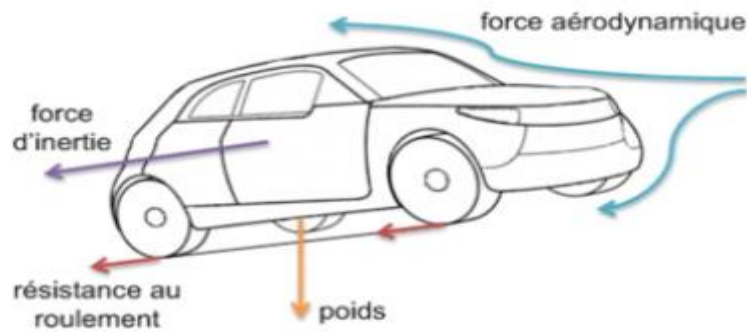


Figure II.31 : Bilan des forces agissant sur le véhicule.

Selon la deuxième loi de Newton, l'accélération du véhicule peut être écrite comme :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{F_{\text{tot}} - F_{\text{res}}}{M} \quad (\text{II.01})$$

Où :

V : Vitesse du véhicule.

F_{tot} : Effort de traction totale du véhicule

F_{res} : Résistance totale

M : Masse totale du véhicule.

- Effort total de traction d'un véhicule peut se décomposer en :

$$\vec{F}_{\text{tot}} = \vec{F}_r + \vec{F}_g + \vec{F}_{\text{acc}} + \vec{F}_a \quad (\text{II.02})$$

Ou :

F_r : Force de résistance de roulement des roues.

F_g : Force d'inclinaison.

F_{acc} : Force d'accélération

F_a : Force aérodynamique.

II.6.1. Force de roulement

La force de résistance de roulement F_r est produite par le pneu au contact de la surface de la chaussée, elle est liée au coefficient de roulement des roues. Pratiquement ce coefficient de roulement C_{rr} vaut environ 0.01, il dépend de la largeur des pneus et du revêtement routier.

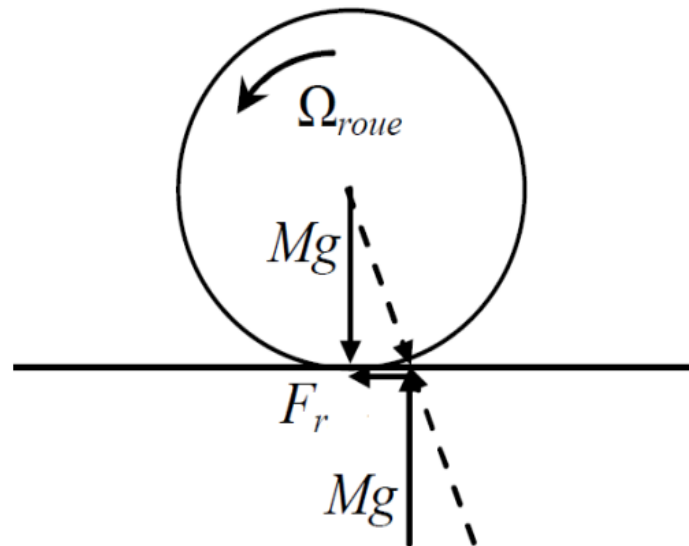


Figure II.32 : Force de roulement sur la roue.

Si les pneus avant sont différents des pneus arrière, ou leurs pressions de gonflage sont différentes, l'effort de résistance au roulement vaut : [II.06]

$$F_r = (C_{rr-av}m_{av} + C_{rr-ar}m_{ar})g \approx gMC_{rr-moy} \quad (\text{II.03})$$

m_{av} et m_{ar} : Sont les masses portées par les roues avant et arrière.

M : Masse totale du véhicule.

g : Accélération de la pesanteur

La résistance au roulement peut être minimisée en maintenant les pneus gonflés afin de réduire sa déformation.

II.6.2. Force aérodynamique

Cette force est proportionnelle à la masse volumique de l'air, au carré de la vitesse relative (compte tenu du vent) par rapport à l'air, à la section frontale du véhicule et à son coefficient de pénétration dans l'air. Ce coefficient C_x prend des valeurs entre 0.2 et 1.5 selon la carrosserie. La force aérodynamique est exprimée par la relation suivante : [II.02]

$$F_a = \frac{1}{2} \rho S_f C_x (V - V_{vent})^2 \quad (\text{II.04})$$

Avec :

ρ : Densité volumique de l'air (kg/m^3)

S_f : Section frontale de la voiture

V : vitesse de la voiture

V_{vent} : Vitesse du vent

II.6.3. Force d'inclinaison

C'est la force de résistance due à la pente d'angle α_p à gravir (force liée au profil de la route). elle est donnée par :

$$F_g = g \cdot M \cdot \sin(\alpha_p) \quad (\text{II.05})$$

II.6.4. Force d'accélération

La force due à l'accélération F_{acc} assure le comportement dynamique souhaité par le conducteur, cette force est obtenue par le produit entre la masse de véhicule et l'accélération imposée par le conducteur.

$$F_{\text{acc}} = M \frac{dV}{dt} = M\gamma \quad (\text{II.06})$$

Avec :

γ : Accélération de véhicule.

La puissance à fournir aux roues en fonction de la vitesse du déplacement est donnée par l'expression suivante :

$$P = F_{\text{tot}}V \quad (\text{II.07})$$

Le couple de traction total est lié à la force de traction par la relation :

$$C_{\text{tot}} = F_{\text{tot}}R \quad (\text{II.08})$$

Où :

R : Rayon de la roue.

Le couple résistant appliqué au véhicule s'écrit :

$$C_r = F_R \cdot R \quad (\text{II.09})$$

Avec :

$$F_R = F_r + F_{\text{acc}} + F_g \quad (\text{II.10})$$

Où :

F_R : Force de résistance totale.

La vitesse angulaire des roues $W_{(roue)}$ est liée à la vitesse du véhicule V par la relation :

$$W_{(roue)} = \frac{V}{R} \quad (\text{II.11})$$

II.7. Comportement énergétique d'un véhicule électrique [II.27]

a. Accélération

Lors de l'accélération d'un véhicule, le moteur doit fournir l'énergie mécanique afin :

- ✓ de vaincre les résistances au déplacement dues :
 - Aux pertes mécaniques et à la résistance au roulement ;
- A l'aérodynamisme du véhicule c_x (coefficient de pénétration dans l'air).
- ✓ d'emmagasiner l'énergie cinétique du véhicule.

Cette énergie cinétique emmagasinée dans le véhicule et dépend de la masse du véhicule et de sa vitesse, soit :

$$E_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} MV^2 \quad (\text{II.11})$$

M : Masse de véhicule.

V : Vitesse de véhicule.

b. Vitesse stabilisée

À vitesse stabilisée, le moteur fournit l'énergie nécessaire au déplacement du véhicule ; la puissance fournie dépend, quant à elle, de la déclivité de la route. Il est possible d'identifier trois phases principales de fonctionnement, qui dépendent du sens et de l'importance de la pente et conditionnent le comportement énergétique :

- Si la pente est ascendante, la puissance fournie par le moteur augmentera avec l'inclinaison jusqu'à atteindre la puissance maximum. La consommation d'énergie du moteur est relative à la puissance fournie par celui-ci.
- Si la pente est légèrement descendante, la puissance fournie par le moteur diminuera avec l'inclinaison jusqu'à devenir nulle. (le moteur nulle ne consomme rien)
- Si la descente devient plus importante, le moteur fournit un contre-couple « frein moteur ». L'énergie potentielle est transformée en énergie électrique et la stocke dans la batterie.

c. Durant un arrêt momentané

Lors d'un arrêt momentané (feu rouge, embouteillage, etc.), le moteur tourne au ralenti alors que le véhicule ne se déplace pas. La consommation d'énergie du moteur est égale à zéro.

d. Freinage

Lorsque l'on relâche la pédale d'accélérateur, le moteur ne fournit plus d'énergie au véhicule, c'est l'énergie cinétique qui continue à le faire avancer. Pour freiner, il faut convertir cette énergie cinétique en énergie électrique et la stocker dans la batterie.

La réversibilité des moteurs électriques permet de la récupération énergie mécanique pendant freinage en énergie électrique et stocké dans la batterie. (Figure II.33)

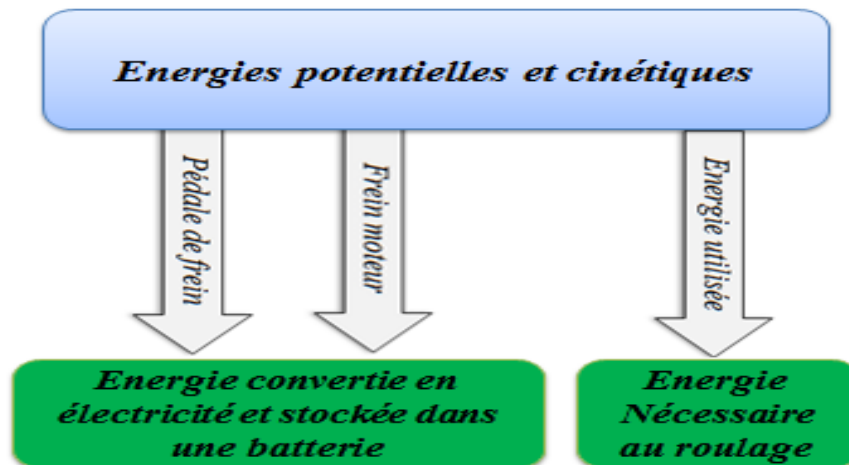


Figure II.33 : Récupération des énergies potentielles et cinétiques.

L'utilisation de la motorisation électrique permet de réduire considérablement les pertes énergétiques comme le montre le tableau II.02 ci-dessous :

Tableau II.02 : Comportement des pertes d'énergie

Phase de fonctionnement	Comportement énergétique relatif au moteur électrique
Accélération	Le moteur fournit l'énergie mécanique qui est nécessaire au stockage de l'énergie cinétique et qui permet de vaincre les résistances à l'avancement.
Vitesse stabilisée (déclivité nulle)	Le moteur fournit l'énergie mécanique nécessaire afin de vaincre les résistances à l'avancement.
Légère déclivité (puissance nulle)	Le moteur électrique à puissance nulle ne consomme rien.
Grande déclivité (frein moteur)	Le moteur devient générateur et transforme l'énergie potentielle en énergie électrique et la stocke dans la batterie de traction afin de maintenir la vitesse.
Décélération (frein moteur)	Le moteur devient générateur et transforme l'énergie cinétique en énergie électrique et la stocke dans la batterie de traction afin de diminuer la vitesse.
Freinage	La majeure partie de l'énergie cinétique est transformée en électricité, le reste est dissipé par les disques de frein. L'ensemble est piloté par un calculateur électronique.
Arrêts momentanés (feux rouges, etc.)	Le moteur électrique à l'arrêt ne consomme rien.

II.8. Comparaison entre deux types de VE

Où nous choisirons deux types de VE à batteries rechargeables par prise de courant (TESLA Modèle S et Kangoo ZE (RENAULT)) et comparerons leurs caractéristiques techniques.

Tableau II.03 : Comparaison entre la VE TESLA Modèle S et RENAULT (Kangoo ZE).
[II.28] [I.05]

Modèle		TESLA Modèle S	RENAULT (Kangoo ZE)
Caractéristique			
Commercialisation		2012	2011
Vitesse maximal (km/h)		322	130
Capacité énergétique de batterie (kWh)		100	33
Autonomie (km)		663	200
Recharge	Prise domestique (h)	31	17
	Borne de charge (h)	4,5-7	6

II.9. Conclusion

Au cours de la dernière décennie, la voiture électrique s'est débarrassée des problèmes qui entravaient son développement, et qui en termes d'autonomie et de temps de charge constituaient des obstacles majeurs à son développement.

Plusieurs architectures de véhicules électriques sont actuellement possibles et présentent des performances et des fonctionnalités variées.

Du côté moteur, vu les avantages qu'il a sur les autres types de moteurs électriques tournants, parmi lesquels nous pouvons citer : robustesse, prix relativement bas, entretien moins fréquent. Le moteur à induction semble le mieux placé pour la propulsion électrique du véhicule.

Les points qui bloquent l'arrivée complète du véhicule électrique sont aujourd'hui connus, les constructeurs proposent des solutions très performantes en termes de technologie et de puissance.

Chapitre III
Bilan énergétique de la voiture solaire

III.1. Introduction

L'alimentation du VE reste un enjeu majeur vu le temps de recharge et l'autonomie de la batterie. On cherche toujours une source facile à exploiter. Dans notre étude on donne une illustration sur l'utilisation de l'énergie solaire comme source d'électricité.

Dans ce chapitre on présente la voiture qui utilise des capteurs solaires et leur développement tout en donnant des exemples des voitures photovoltaïques actuelles. Le principe de fonctionnement ce type de voiture exige l'explication de quelques concepts sur les panneaux solaires, leurs types et caractéristiques ainsi que le dimensionnement des panneaux photovoltaïques. Puis on fait un calcul du bilan énergétique du VE ce qui nous une idée sur l'exploitation actuelle de ce type de VE.

III.2. Voiture solaire

La voiture solaire est un véhicule alimenté par des cellules photovoltaïques utilisée pour évoluer sur le réseau routier, il s'agit d'une innovation technologique qui permettra dans un futur proche de se déplacer en récupérant et en stockant l'énergie solaire pour la transformer en énergie électrique.

Les voitures solaires combinent des technologies typiquement utilisées dans les domaines de l'aérospatiale, des énergies alternatives et de la construction automobile. Le design d'un véhicule solaire est particulièrement contraint par la taille des capteurs solaires à cause de la quantité d'énergie dont la voiture a besoin. La plupart des véhicules solaires sont des prototypes expérimentaux construits dans le but de participer à des courses de voitures solaires. [III.01], [III.02]

III.3. Evolution des voitures solaires

Le premier véhicule solaire de l'histoire - la Sunmobile- est un modèle réduit de voiture inventé par William G. Cobb de General Motors (figure III.01). Elle est présentée la première fois à Chicago le 31 août 1955. Cette miniature est dotée de 12 cellules photovoltaïques en sélénium et d'un petit moteur électrique Pooley qui actionne une poulie faisant tourner les roues arrière. La Sunmobile, fabriquée en bois debalsa, mesure moins de 40 cm de longueur. Elle prouve néanmoins pour la première fois que l'énergie solaire est capable de faire se mouvoir un véhicule. [III.03]

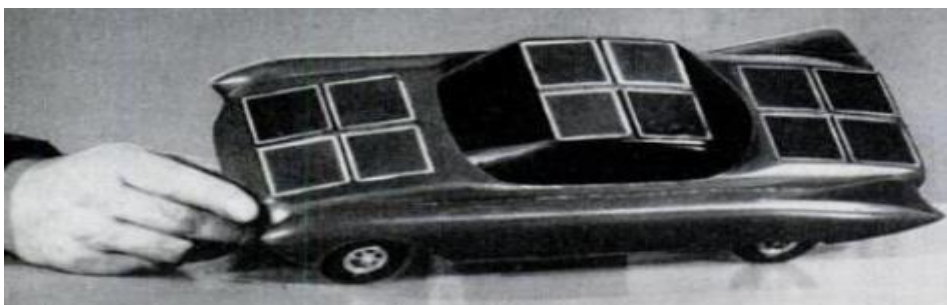


Figure III.01 : Première voiture solaire miniature (1955). [III.03]

Après 5 ans de travail en Californie, le premier véhicule solaire pouvant transporter un être humain est mis au point et présenté en 1960 à Rome par le physicien et chimiste américain Charles Escoffery. Il s'agit d'une ancienne Baker, une voiture électrique datant de 1912, équipée sur son toit de $2,42 \text{ m}^2$ de panneaux solaires amovibles comportant 10 640 cellules (figure III.02). Cette installation a une puissance de 200 W avec des conditions d'ensoleillement optimales mais, pratiquement, cette puissance dépasse rarement les 100 W pour un rendement des cellules atteignant seulement 5%. Partant d'une charge complète d'électricité, elle peut rouler durant 3 heures à une vitesse maximum de 32 km/h. Cette voiture solaire est présentée dans le monde entier par son concepteur afin de démontrer que l'énergie solaire permet une mobilité propre et économique



Figure III.02 : Premier véhicule solaire pouvant transporter un être humain. [III.03]

En 1980 on conçoit un modèle de voiture solaire, la Citicar (figure III.03). Le véhicule est composé d'un châssis de métal et possède des panneaux solaires sur son toit et son capot. Ceux-ci comprennent 432 cellules produisant 400 W de puissance de crête. La Citicar possède 8 batteries de 6 V chacune pour stocker l'énergie photovoltaïque. La Citicar pèse un peu moins de 600 kg, peut atteindre une vitesse de 65 km/h et a une autonomie de 80 km.



Figure III.03 : Le modèle de voiture solaire la Citicar. [III.03]

Actuellement quelques modèles sont en phase d'essais et peut être le futur proche entrent dans la phase de commercialisation. Parmi ces modèles, on cite :

- Lightyear One
- Voiture solaire 'Sion'

a- Lightyear One

Est le fruit d'une start-up hollandaise dont le prototype Stella a brillé sur les courses de voitures solaires type World Solar Challenge (remporté à 3 reprises). Son fondateur et dirigeant LexHoefsloot promet un véhicule mué par la seule énergie solaire grâce à ses 5m² de panneaux solaires recouvert d'une couche protectrice. Cette berline familiale de 5 places avec 780 litres de volume de coffre se rechargerait jusqu'à 12 km d'autonomie par heure pur alimenter ses 4 moteurs électriques. Un par roue. L'autonomie serait d'un minimum de 400 km et pourrait frôler les 800 km (la première voiture commerciale à longue autonomie alimentée à l'énergie solaire (figure III.04)). [III.04]

D'autre part, il peut se charger directement à partir du soleil, car sa consommation d'énergie est beaucoup plus faible, générant jusqu'à 20 000 km d'énergie par an grâce à ses panneaux solaires intégrés (50 à 70 km d'autonomie par jour). De plus, toutes les options de charge disponibles deviennent plus faciles à utiliser parce que vous obtenez beaucoup plus d'autonomie pour la même quantité d'énergie chargée.

Ainsi, vous chargez beaucoup plus rapidement à partir de n'importe quelle prise de courant. Vous pouvez charger jusqu'à 400 km par nuit à partir de prises 230 V ordinaires.



Figure III.04 : Première VS commerciale (Lightyear One). [III.04]

b- Voiture solaire ‘Sion’

La Sion, annoncée par la start-up allemande Sono Motors, est une voiture électrique qui peut être chargée via le réseau électrique et partiellement par ses cellules solaires. Les fondateurs de Sono Motors travaillent à la réalisation de la Sion depuis 2012 (figure III.05). [III.04]



Figure III.05 : Modèle de VS "Sion" (Sono Motors). [III.04]

- Berline compacte, la Sono Sion est une cinq portes capables d'embarquer jusqu'à 5 passagers.
- Longue de 4.11 m et large de 1.79 m, elle affiche un poids de 1400 kilos et, assez rare sur ce type de véhicule, dispose d'un attelage capable de tracter une remorque de moins de 750 kilos.
- En termes de design, la voiture électrique de Sono Motors se caractérise essentiellement par ses panneaux solaires (248 cellules photovoltaïques figure III.06) intégrés à la carrosserie et promettant de pouvoir récupérer jusqu'à 30 km d'autonomie par jour.
- Alimentée par un moteur électrique de 80 kW, la Sion puise son énergie d'un pack batteries de 35 kWh.
- Capable d'évoluer jusqu'à 140 km/h, la Sono Sion annonce 250 km d'autonomie avec une charge.
- Sono Motors affirme que son système solaire, portant le nom de vi Sono, permet de générer jusqu'à 5 800 km d'autonomie supplémentaires par an (soit environ 800kWh)

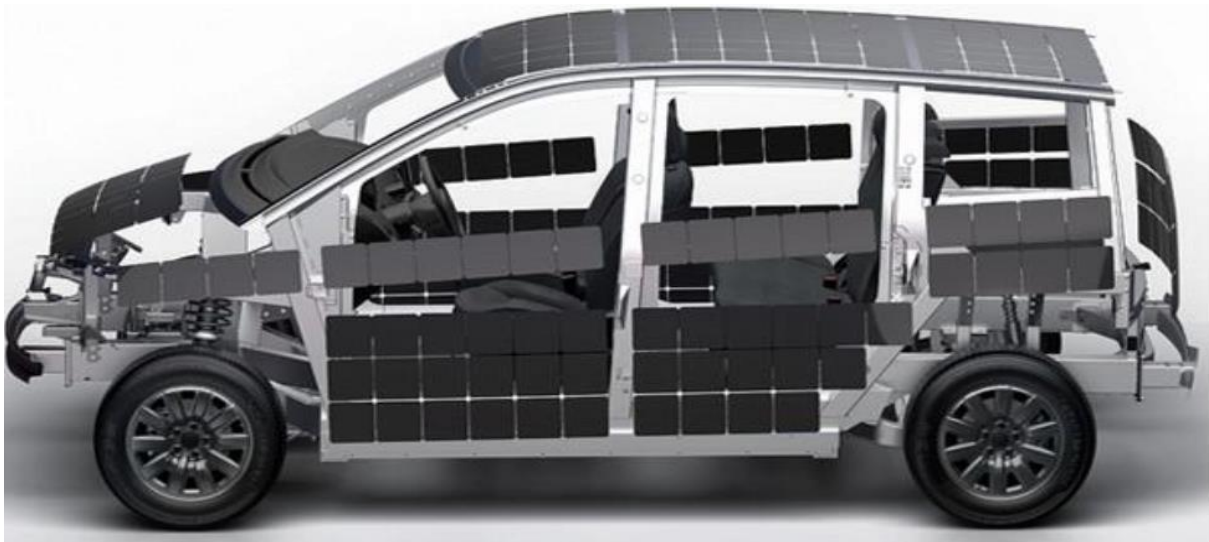


Figure III.06 : Cellules sur la Sion (Sono Motors). [III.04]

III.4. Fonctionnement de VS

Depuis l'apparition des cellules photovoltaïques, les professionnels de l'automobile souhaitent créer une voiture entièrement propulsée à l'aide de l'énergie solaire. L'intérêt de cette énergie est de profiter de la lumière solaire pour la transformer en énergie électrique. Pour faire cette modification on utilise des cellules photovoltaïques (panneau solaires) qui seront chargé de transformer les photons de lumière en électron (électricité). [III.02]

Les panneaux convertissent l'énergie solaire en énergie électrique stockée dans différentes sortes de batteries qui fournissent la puissance au moteur électrique. Ce dernier change l'énergie électrique en travail mécanique transmis aux roues. [III.05]

Une voiture que l'on qualifie de solaire fonctionne avant tout grâce au rendement des cellules photovoltaïques installées sur sa structure et à la capacité de stockage d'énergie de ses batteries.

Donc, pour faire fonctionner les voitures solaires, il faut que la plus grande surface possible soit recouverte si possible par des panneaux solaires. L'excès d'électrons alimente ensuite des batteries à chargement rapides, permettant au moteur électrique de fonctionner.

Comparées à la technologie des moteurs à combustion interne, le fonctionnement des voitures à par tir d'énergie solaire offre de multiples avantages tels que :

- Développement d'une mobilité durable.
- Réduction ou la suppression de la pollution de l'air et réduire les nuisances sonores.

III.5. Composition du VS

La voiture électrique à batterie rechargeable et la voiture solaire possède presque la même chaîne de traction, la différence que la voiture solaire contient un autre élément pour la charge de la batterie par des panneaux solaires, il est composée essentiellement des éléments suivant (figure III.07).

- Panneaux photovoltaïques produisent un courant électrique continu.
- Régulateur optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection.
- Batterie stocke l'énergie produite par les panneaux solaires pour alimenter le moteur et les composants secondaires de la voiture
- Onduleur transforme le courant continu en alternatif pour alimenter le moteur.
- Moteur électrique convertit l'énergie électrique en énergie mécanique pour tourner les roues de voiture. [III.05]

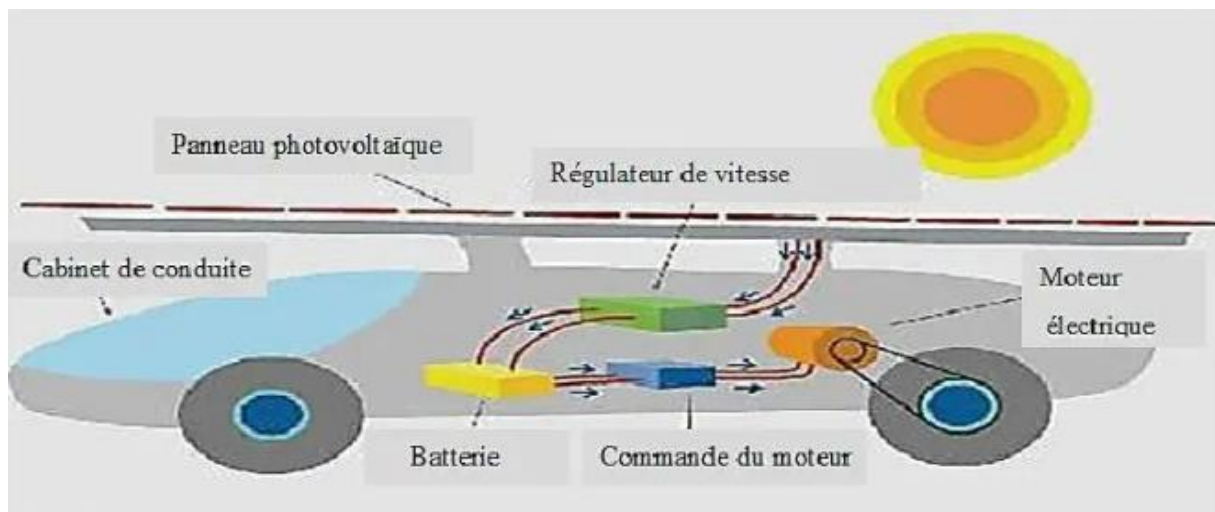


Figure III.07 : Composition de VS. [III.02]

III.6. Panneau photovoltaïque de VS

Les panneaux solaires sont destinés à récupérer l'énergie du rayonnement solaire pour la transformer en électricité.

Dans une voiture solaire, il est destiné principalement au chargement des batteries. Ce qui nécessite que le panneau solaire doit être puissant, flexible et d'un type convenable aux voitures solaires (rendement, résistance à l'environnement). En effet, il doit être monté dans un emplacement idéal pour capter le maximum d'énergie solaire, généralement, il est mis sur le toit ou le capot de la voiture. [III.02]



Figure III.08 : Le panneau photovoltaïque de la voiture solaire. [III.02]

III.6.1. Composition et Principe de fonctionnement des panneaux photovoltaïques

Le principal composant d'un panneau solaire photovoltaïque est un module qui permet de transformer l'énergie du soleil en électricité (figure III.09). Ce procédé est rendu possible par les cellules photovoltaïques qui composent le module. Chaque cellule est produite à l'aide d'un matériau semi-conducteur appelé le silicium. Ce matériau a un comportement assez spécifique lorsqu'il est exposé au rayonnement solaire. En effet, la lumière du soleil se compose de photons qui vont venir frapper la surface du panneau solaire photovoltaïque. Ils vont ensuite transmettre l'énergie qu'ils comportent aux électrons du matériau semi-conducteur, c'est-à-dire le silicium. Les électrons vont alors se mettre en mouvement et ce déplacement produit un courant électrique continu. Le système permet ensuite d'additionner les quantités d'électricité produite par les différentes cellules qui composent le panneau solaire photovoltaïque. [III.06]

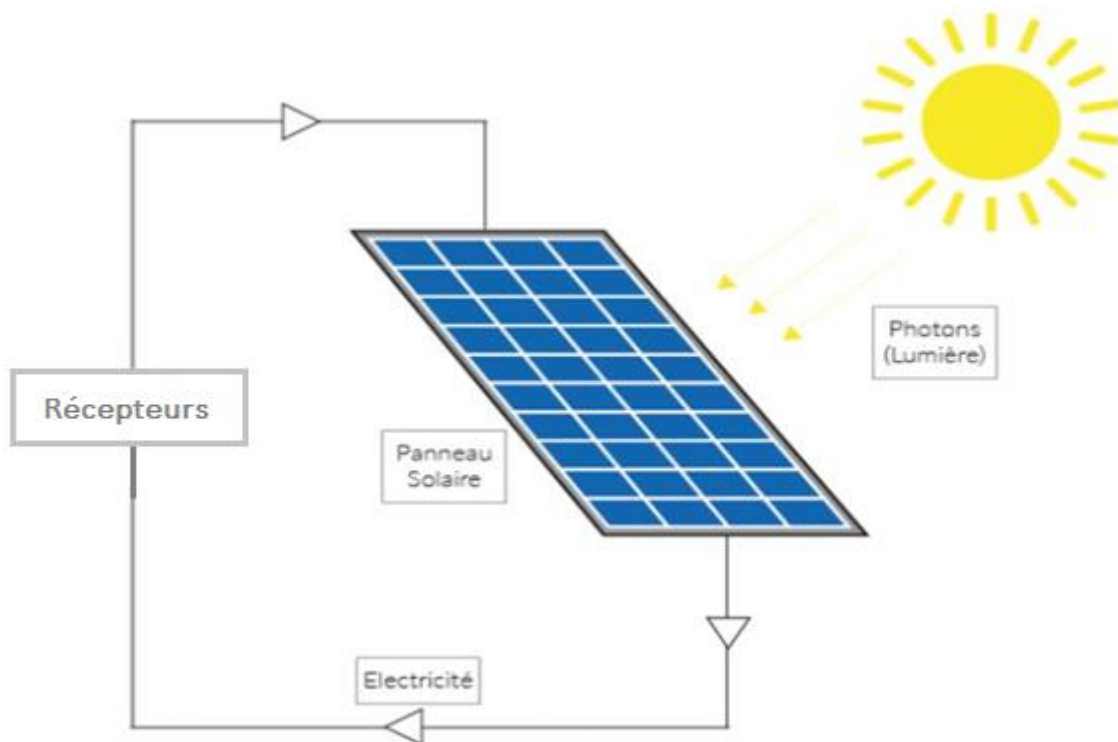


Figure III.09 : Schéma de principe des panneaux photovoltaïques. [III.06]

III.6.2. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule. [III.07]

La cellule photovoltaïque constitue la composante élémentaire d'un panneau solaire, Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont généralement insuffisantes pour alimenter les équipements électriques. Il faut associer les cellules en série pour obtenir une tension plus importante, ou en parallèle pour augmenter le courant électrique.

Notant que la puissance d'un panneau solaire est fonction de sa surface, c'est à dire du nombre de cellules photovoltaïques.

La puissance crête d'une installation photovoltaïque est la puissance maximale délivrée par un module dans les conditions optimales (orientation, inclinaison, ensoleillement,...), elle s'exprime en Watt crête (W_c). En première approximation, on estime qu'un module de $1 m^2$ produit $100 W_c$. [III.02], [III.08]

III.6.3. Différents types de cellules PV

Il existe différents types de cellules photovoltaïques en fonction des matériaux de fabrication utilisés. Nous citons, à titre d'exemple, silicium monocristallin, silicium polycristallines, et silicium amorphes. Ces différents types sont illustrés par la figure III.10. [III.09]

a- Cellules à silicium monocristallin

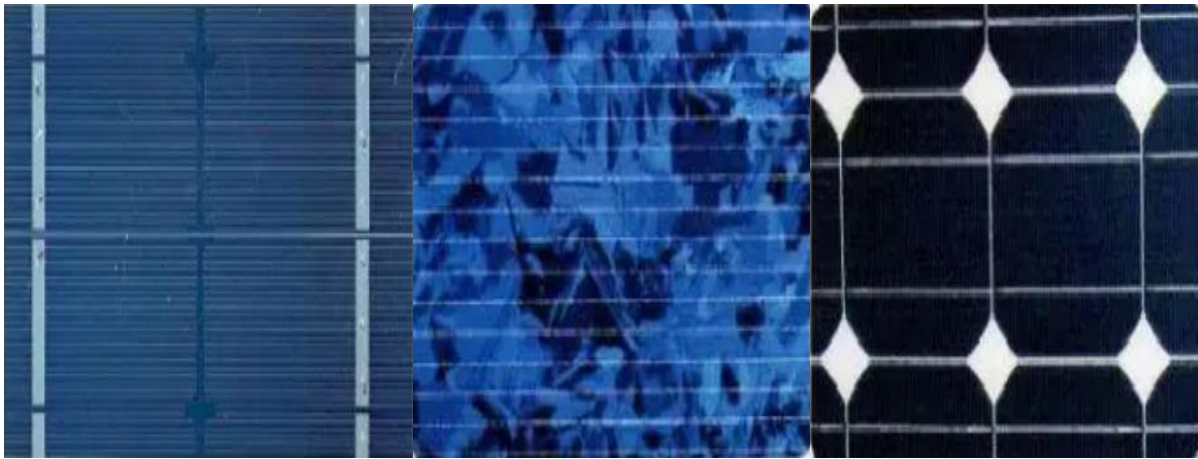
Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont formées d'un seul cristal. Elles sont en général d'un bleu uniforme. (Figure III-10-(a))

b- Cellules à silicium poly-cristallin

Elles sont constituées de plusieurs cristaux .la cellule à un aspect bleuté mosaïque (pas uniforme). (Figure III-10-(b))

c- Cellules amorphes

Le silicium est utilisé en couche mince, il n'est pas cristallisé. Il est déposé sur une plaque de verre. Ce type de cellule on le trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation (montre, calculatrice). (Figure III-10-(c)) [III.10]



a).Silicium monocristallin;

b).Silicium polycristallin;

c).Silicium amorphe.

Figure III.10 : Types des cellules solaires. [III.02]

III.6.4. Caractéristiques des types des panneaux photovoltaïques

Le tableau suivant présente les caractéristiques des panneaux photovoltaïques pour chaque type (monocristallin; polycristallin; amorphe).

Tableau III.01 : Les caractéristiques des types des panneaux photovoltaïques. [III.02]

Types	Mono cristallin	Poly cristallin	Amorphe
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> - Très bon rendement:14 à 20 %. - Durée de vie : Importante (30 ans) - Coût de fabrication : élevé. - Puissance : 100à150 W_c/m^2. - Rendement faible sous un faible éclairement. - perte de rendement avec l'élévation de la température. -Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal -Couleur bleue uniforme. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bon rendement : 11 à15 %. - Durée de vie : Importante (30 ans) - Coût de fabrication : Meilleur marché que les panneaux monocristallins - Puissance :100 W_c/m^2. - Rendement faible sous un faible éclairement. - perte de rendement avec l'élévation de la température. -Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. - Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement faible : 5 à9 %. - Durée de vie : assez importante (20 ans) - Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies - Puissance: 50W_c/m^2. - Fonctionnement correct avec un éclairement faible. - Peu sensible aux températures élevées. - Utilisables en panneaux souples. - Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium. - Rendement faible en plein soleil. - Performances diminuant avec le temps. - Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide
Part de marché	43%	47%	10%
Cellule et module			

III.7. Dimensionnement des panneaux photovoltaïque pour le VE

Le dimensionnement d'un système à panneaux photovoltaïques réside dans l'évaluation de l'énergie consommée par l'équipement d'usage de voiture solaire. Cette étape est importante car c'est le point de départ d'une étude de dimensionnement. Le dimensionnement d'un système photovoltaïque se fait en suivant une démarche par étapes que l'on peut résumer comme suit : [III.09]

a- Calcul de l'énergie consommée par jour (E_c)

Il s'agit de déterminer la quantité d'énergie consommée par la voiture solaire au cours d'une journée. Pour cela, deux paramètres sont importants, le nombre d'heures d'utilisation de VS dans une journée et la puissance de fonctionnement de celui-ci en Watts (W). La formule reliant ces trois paramètres est donnée par :

$$E_c = N_{Hj} \cdot P_f \quad (\text{III.01})$$

E_c : Energie consommée par jour en Wh/j

N_H : Nombre d'heures d'utilisation par jour

P_f : Puissance de fonctionnement du récepteur en W

b- Calcul de l'énergie à produire (E_p)

Une fois que l'énergie à consommer est connue, il faut déterminer la quantité d'énergie que les modules photovoltaïques devront produire. De manière générale, l'énergie à produire doit être supérieure à l'énergie à consommer car il y a des pertes dues au rendement des différents équipements (modules, batteries, régulateur, onduleur). Ces pertes sont dues aussi à l'incertitude météorologique, à l'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison. Ces pertes sont intégrées dans le calcul grâce à un coefficient correcteur noté k (ce facteur inférieurs à un).

$$E_p = E_c \cdot k \quad (\text{III.02})$$

c- Calcul de la puissance crête (P_c) des modules à installer

C'est l'unité de référence qui permet de comparer les performances des cellules ou des modules. La puissance crête est la puissance maximale délivrée dans les conditions suivantes :

- a) Ensoleillement permettant d'avoir $1000\text{W}/\text{m}^2$
- b) Température ambiante de $= 25^\circ\text{C}$,

La puissance crête des modules à installer pour un fonctionnement optimal dépend de l'énergie à produire mais aussi de l'ensoleillement moyen sur le site. Cette puissance de crête est donnée par :

$$P_c = \frac{E_p}{\text{Ensoleillement}} \quad (\text{III.03})$$

III.8. Emplacement des cellules photovoltaïque

Le panneau solaire c'est la source principale et exclusive d'énergie pour notre véhicule, il faut choisir un emplacement idéal sur la voiture pour le panneau avec l'inclinaison convenable, pour que ce dernier garanti une grande autonomie pour notre véhicule. [III.02]

Généralement, en ce qui concerne l'orientation du panneau, pour capter le maximum d'énergie, il faut que les rayons solaires rencontrent la surface du panneau à 90° . Voir la figure III.11.

L'angle d'incidence joue un rôle majeur pour les rendements du panneau. Il est défini selon l'équation suivante : [III.10]

$$R_{pv} = \sin \beta \times 100 \quad (\text{III.04})$$

Avec R le rendement en % et β l'angle d'incidence en $^\circ$.

Ainsi, le rendement est maximal lorsque les rayons arrivent perpendiculairement au panneau.

$$R_{pv} = \sin \beta \times 100.$$

$$R_{pv} = \sin 90^\circ \times 100.$$

$$R_{pv} = 100 \%$$

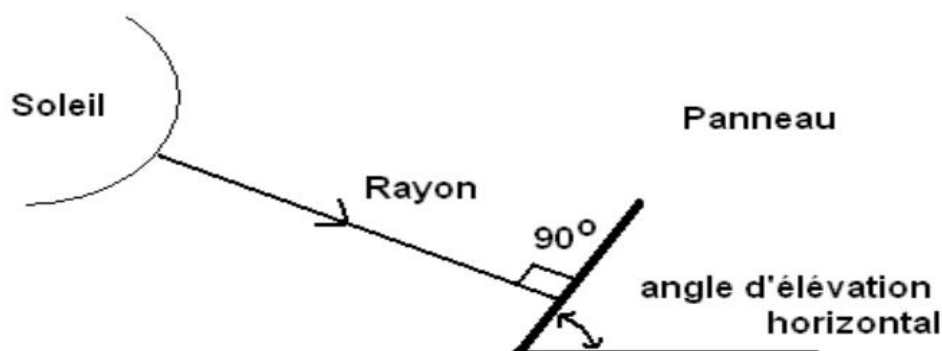


Figure III.11 : L'orientation idéale du panneau solaire.

Mais puisque la voiture change toujours sa direction, il ne faut pas fixer l'orientation du panneau. Après des études, on a conclu qu'on ne peut pas appliquer un suiveur de soleil (Traqueur) au-dessus d'une voiture, pour la raison que l'angle d'orientation du suiveur de soleil est limité à 180° , donc ça va risquer de poser le même problème, et le panneau peut être dans des cas opposé au soleil.

Donc l'emplacement pour que le panneau soit orienté vers le soleil dans tous les cas (pas toujours à 90°), c'est sur le toit de la voiture (figure III.12).

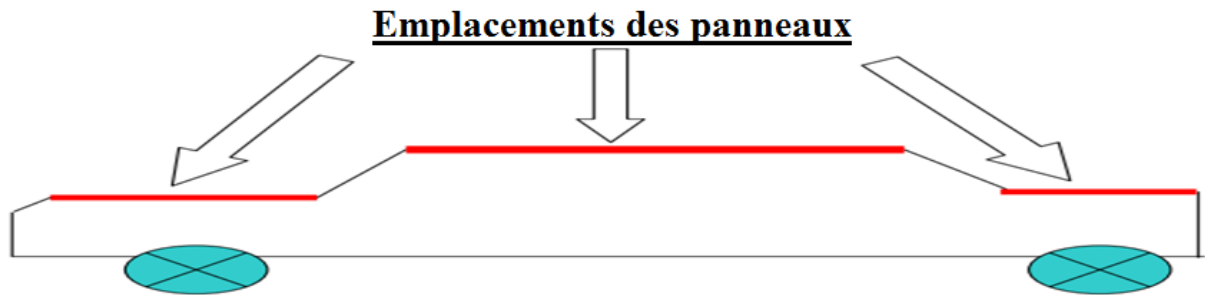


Figure III.12 : L'emplacement du panneau sur la voiture. [III.11]

III.9. Exemple d'application

Dans cet exemple, nous allons calculer le bilan énergétique de deux modèles à partir de panneaux solaires (Monocristallin, Polycristallin)

Ensuite, nous appliquons ces résultats à la Voiture 'Sion', où nous suffirons de placer les panneaux proposés sur la surface de cette voiture après avoir calculé sa superficie, puis calculons le temps de charge de la batterie à l'aide de panneaux solaires. finalement en calculer l'énergie récupérée par les panneaux PV dans une plage de distance de 240 Km.

- **Propriétés du panneau solaire utilisé**

Nous trouvons dans le cas traditionnel :

Tableau III.02 : Caractéristiques des panneaux PV. [III.12]

Monocristallin	Polycristallin
<ul style="list-style-type: none"> • Dimension module 1,7 m x 1 m. • Une puissance crête de 300 W_c. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimension module 1,7 m x 1 m. • Une puissance crête de 250 W_c.

- **Propriétés de la voiture Sion (Sono Motors)**



Figure III.13 : Voiture solaire 'Sion'. [III.04]

Le tableau III.03 donne les caractéristiques de voiture solaire Sion (Sono Motors) :

Tableau III.03 : Caractéristiques VS 'Sion'. [III.13]

Longueur	4.29m
Largeur (rétroviseurs repliés)	1.83m
Hauteur	1.67m
Poids	1400Kg
Puissance moteur	120KW
Vitesse max	140 Km/h
Batterie	35KWh
Autonomie	245Km

III.9.1. Surface superficie de voiture

La largeur de véhicule 1.83 m et la longueur totale de 4.29 m

Largeur théoriquement pour place les panneaux PV 1.7 m

Longueur théoriquement pour placer les panneaux PV 3.43 m

Cela permettra théoriquement d'avoir une superficie d'environ 5.83 m^2 pour placer les panneaux solaire.

III.9.2. Calcul de la puissance crête produite par le GPV

❖ Pour les panneaux monocristallins

$$1.7 \text{ m}^2 \rightarrow 300 W_c$$

$$5.83 \text{ m}^2 \rightarrow P_c$$

$$P_c = \frac{5.25 \times 300}{1.7} = 1028.82 W_c \qquad P_c = \mathbf{1028.82 W_c}$$

❖ Pour les panneaux polycristallins

$$1.7 \text{ m}^2 \rightarrow 250 W_c$$

$$5.83 \text{ m}^2 \rightarrow P_c$$

$$P_c = \frac{5.25 \times 250}{1.7} = 857.35 W_c \qquad P_c = \mathbf{857.35 W_c}$$

III.9.3. Estimation de l'énergie produite par le module photovoltaïque par jour

Pour un nombre d'heures d'ensellement 8 heure/jour avec une efficacité moyenne de 80%, l'énergie produite via le panneau solaire sera de l'ordre de :

L'énergie produite = puissance de PV x efficacités x nombre h/jour(Wh)

❖ Pour les panneaux monocristallins

$$E_p = 1028.82 \times 8 \times 0.8 = 6584.45 \text{ Wh} = 6.58 \text{ KWh} \qquad E_p = \mathbf{6.58 \text{ KWh}}$$

❖ Pour les panneaux polycristallins

$$E_p = 857.35 \times 8 \times 0.8 = 5487.04 \text{ Wh} = 5.48 \text{ KWh}$$

$$E_p = 5.48 \text{ KWh}$$

C'est l'énergie électrique moyenne produite au cours de la journée qui est approximativement égale au rayonnement moyen reçu dans la région méditerranéenne.

III.9.4. Calcul du temps de charge de batterie de la voiture par les panneaux PV

D'après le tableau l'énergie d'un pack de voiture 'Sion' égale à : 35KWh.

❖ Pour les panneaux PV monocristallin

$$8 \text{ h} \rightarrow 6.58 \text{ KWh}$$

$$X \text{ h} \rightarrow 35 \text{ KWh}$$

$$X = \frac{8 \times 35}{6.58} = 42.55 \text{ h}$$

Le temps pour charger le VS 'Sion' par panneau PV monocristallin égale a : **42.55 h**

❖ Pour les panneaux PV polycristallin

$$8 \text{ h} \rightarrow 5.48 \text{ KWh}$$

$$X \text{ h} \rightarrow 35 \text{ KWh}$$

$$X = \frac{8 \times 35}{5.48} = 51.09 \text{ h}$$

Le temps pour charger le VS 'Sion' par panneau PV polycristallin égale a : **51.09 h**

III.9.5. Test des performances des panneaux PV de la VS

Calculer l'énergie récupérée par les panneaux PV dans une plage de distance de 240 Km.

L'énergie stockée dans la batterie de voiture 'Sion' égale à 35 KWh capable de fournir une autonomie jusqu'à 240 Km.

Supposons que le conducteur roule à 60 km / h → Cela signifie que la distance sera parcourue dans les quatre heures.

$$1 \text{ h} \rightarrow 60 \text{ Km}$$

$$X \text{ h} \rightarrow 240 \text{ Km}$$

$$X = \frac{240}{60} = 4 \text{ h}$$

L'énergie produit par les panneaux PV dans ce temps (4h) avec une efficacité moyenne de 80%,

❖ Pour les panneaux PV monocristallin

$$E_p = 1028.82 \times 4 \times 0.8 = 3292.22 \text{ Wh} = 3.29 \text{ KWh}$$

$$E_p = 3.29 \text{ KWh}$$

❖ Pour les panneaux polycristallins

$$E_p = 857.35 \times 4 \times 0.8 = 2743.52 \text{ Wh} = 2.74 \text{ KWh}$$

$$E_p = 2.74 \text{ KWh}$$

L'énergie récupérée par les panneaux PV dans un temps de 4 heures égale à 3.29 KWh pour les panneaux monocristallins et 2.74 KWh pour les panneaux polycristallins

III.9.6. Calcul de l'autonomie offerte par les panneaux PV

❖ Pour les panneaux PV monocristallin

$$35 \text{ KWh} \rightarrow 245 \text{ Km}$$

$$3.29 \text{ KWh} \rightarrow X \text{ Km}$$

$$X = \frac{245 \times 3.29}{35} = 23.03 \text{ Km}$$

Les panneaux PV monocristallin fournir une énergie favorisant une autonomie de 23.03 Km approximativement par quatre heures avec une vitesse constante moyenne de 60Km/h.

❖ Pour les panneaux polycristallins

$$35 \text{ KWh} \rightarrow 245 \text{ Km}$$

$$2.74 \text{ KWh} \rightarrow X \text{ Km}$$

$$X = \frac{245 \times 2.74}{35} = 19.18 \text{ Km}$$

Les panneaux PV polycristallins fournir une énergie favorisant une autonomie de 19.18 Km approximativement par quatre heures avec une vitesse constante moyenne de 60Km/h.

On brièveté cette résultats du tableau au-dessous :

Tableau III.04 : Résultat de calcul.

	Monocristallin	Polycristallin
La puissance produit (W_c)	1028.82	857.35
Temps de charge de batterie de voiture 'Sion' (h)	42.55	51.09
L'énergie produite dans un temps de 4 heures (KWh)	3.29	2.74
L'autonomie qui offre par les panneaux PV dans un temps de 4 heures (Km)	23.03	19.18

À partir des résultats ci-dessus, nous concluons que les panneaux monocristallin sont meilleurs que les panneaux polycristallin car les panneaux monocristallin offrent plus d'énergie et offrent ainsi un plus d'autonomie.

III.10. Discussion sur la VS

Le temps nécessaire à une recharge complète de batterie de VE, dans les conditions normales, reste prohibitif (plusieurs heures). Ceci reste néanmoins gérable lors d'une immobilisation prolongée du véhicule (la nuit par exemple ou en parking) auquel cas une prise de courant alternatif normale (240 V, 32 A) peut suffire, le régulateur de charge étant intégré à la voiture.

Dans le cas contraire, une borne de recharge rapide (moins d'une heure) s'impose. Dans cette dernière la réduction du temps de recharge passe par une augmentation conséquente du courant de charge induisant de fait une augmentation notable de la puissance disponible (400 V, 100 A, par exemple). Des stations de ravitaillement offrant ce service à l'image des stations de ravitaillement en carburant d'aujourd'hui qui peuvent alors voir le jour.

Toutefois, il est à noter qu'en cas d'un emploi massif, l'énergie électrique globale de recharge risque de poser beaucoup de problèmes si celle-ci est exclusivement prélevée sur le réseau électrique.

Les énergies renouvelables émergent comme une solution potentielle à une production prometteuse, et il apparaît maintenant que le photovoltaïque est le mieux adapté et le plus efficace pour produire de l'électricité à partir de sources renouvelables pour tirer des véhicules électriques. Où l'incorporation de panneaux solaires dans la voiture électrique contribue à l'améliorer à travers:

- Donner une source d'énergie renouvelable et respectueuse de l'environnement
- Améliorer l'efficacité de la voiture en termes d'autonomie
- Réduisez l'utilisation de la prise du chargeur
- Augmenter le kilométrage du véhicule
- Réduire le coût de chargement de la batterie de la voiture
- Énergie disponible

Les véhicules électriques qui reposent sur des prises électriques et des panneaux photoélectriques sont une solution pour augmenter l'autonomie d'un véhicule électrique.

Le problème est que le rendement des panneaux solaires est faible et que la surface de la voiture est limitée.

Il convient également de noter que parmi les solutions prometteuses et proposées pour recharger la voiture, il y a l'adoption de stations qui reposent sur des panneaux solaires pour la production d'énergie.

III.11. Perspectives du transport électrique

III.11.1. Petites voitures urbaines propres

La mobilité électrique, basée sur l'usage de véhicules électriques (VE), présente des avantages pour l'environnement urbain (économie de bruit et de pollution) mais un surcoût d'acquisition pour les utilisateurs, ce qui contribue aussi à restreindre la demande. Par conséquent, il est nécessaire de rechercher des moyens de réduire le coût de possession d'une voiture électrique, c'est-à-dire de fournir des petites voitures à usage urbain, efficaces pour un usage quotidien et à la portée du pouvoir d'achat des citoyens, voire être incluses comme un investissement des propriétaires d'argent pour créer des stations de location de ce type de véhicule à usage urbain.

Quant aux entreprises de construction, très appréciées dans l'industrie de la voiture électrique, elles ont cherché à légaliser les véhicules utilitaires en milieu urbain et les flottes de véhicules courants pour les imposer sur le marché.





Comme il présente de nombreux avantages :

- Il est efficaces dans les endroits bondés, car les voitures sont de petite taille et prennent une petite place de parking
- Dans le futur proche, il se peut que le prix d'achat soit raisonnable
- Utilisez-le dans les services publics tels que la location
- Utilisez-le dans les services de livraison
- Coupleur a un temps de charge de batterie court avec une voiture électrique haute puissance, ce qui réduit la congestion dans les zones de charge
- Une voiture légère, autonome et petite.
- Idéale pour les petits trajets du quotidien : boulot, école, sport...
- Plupart de ces voitures utilisent de l'énergie verte (panneaux photovoltaïques). le solaire permet une plus grande autonomie que l'électrique classique

a- Exemples de petits véhicules urbains

Dans le tableau suivant, nous montrons quelques petites voitures urbaines :

Tableau III.05 : Quelques petites voitures électriques urbaines. [III.15], [III.16], [III.17], [III.18].

	Forme de voiture	Propriétés
La start-up Squad		<ul style="list-style-type: none"> • Voiture électrique solaire et rechargeable • Autonomie : 100Km. • Récupération des panneaux : 30 Km/j. • vitesse maximale : 45 km/h • Nombre de places : 2 • Type de batterie : lithium-ion • Disponibilité : 2021
Renault Twizy 45		<ul style="list-style-type: none"> • Voiture électrique rechargeable • Autonomie : 100Km. • vitesse maximale : 45 km/h • Nombre de places : 2 • Type de batterie : lithium-ion • Disponibilité : 2012
Citroën Ami		<ul style="list-style-type: none"> • Voiture électrique rechargeable • Autonomie : 75Km • vitesse maximale : 45 Km • Nombre de places : 2 • Type de batterie : lithium-ion • Disponibilité : 2020
Fiat Phylla		<ul style="list-style-type: none"> • Voiture solaire et à pile à combustible • Autonomie : 220Km • Récupération des panneaux : 18 Km/j. • Vitesse maximale : 130Km/h • Nombre de places : 4 • Type de batterie : lithium-ion • Disponibilité : 2010

b- Exemple de voiture solaire urbaine en Algérie

Le Centre de Développement des Énergies Renouvelables a présenté lors d'une conférence de presse une voiture électrique, le 20 avril 2017 au niveau de son siège à Bouzaréah, Alger, à l'occasion de la journée du savoir « Yawm El Ilm ». Cette voiture électrique a été réalisée par M. TOUABA Oussama, chercheur à l'Unité de Recherche en Énergies Renouvelables en Milieu Sahraïen rattachée au CDER sous la supervision du Professeur Ait Chikh de l'ENP.

Ce modèle convient aux zones urbaines avec zéro émission de polluants toxique et de gaz à effet de serre et une vitesse de 40km/h qui peut être améliorée pour atteindre 80km/h. Cette voiture 100% Algérienne comporte deux places (figure III.14), deux moteurs d'une puissance de 1,2 kilowatts (équivalente à 1.7 Chevaux) variable selon la puissance des batteries. Cette voiture électrique qui détient un brevet d'invention déposé à l'INAPI, est une suite des travaux du chercheur qui a déjà réalisé une voiture d'une place et trois roues, fonctionnant à l'énergie solaire. [III.19]



Figure III.14 : Voiture algérienne alimentée par l'énergie solaire. [III.19]

III.11.2. Parkings solaires

Les sources de recharge de la voiture électrique sont toujours polluées, et la voiture solaire est encore en cours de développement. Pour cela, l'alimentation en énergie solaire prend une importance vis-à-vis les autres sources d'électricité. On peut envisager à développer des Parking de recharge qui reposent sur les panneaux photovoltaïques (figure III.15), et cette solution est jusqu'à présent considérée comme l'une des meilleures solutions dans le domaine des voitures électriques. [III.20]



Figure III.15 : Parking de voiture électrique avec système de recharge photovoltaïque.

[III.20]

III.12. Conclusion

Jusqu'à présent, les constructeurs de véhicules électriques ont eu plusieurs possibilités à leur disposition pour améliorer les performances et l'indépendance de ce type de véhicule: le poids, l'aérodynamisme, l'efficacité du moteur et la capacité de puissance. Mais aujourd'hui, ils ont une autre possibilité: c'est l'utilisation d'énergies renouvelables, en particulier le photovoltaïque, et en l'insérant dans la voiture électrique ; donc, on peut dire qu'elle est devenue plus écologique.

Jusqu'à présent, les voitures ne sont pas à 100% solaires car elles dépendent de deux sources d'approvisionnement en énergie, la borne de recharge et les panneaux photovoltaïques, et l'objectif recherché est de s'appuyer entièrement sur les énergies renouvelables.

Les panneaux photovoltaïques ont une efficacité limitée, ainsi, en améliorant le rendement, l'autonomie du véhicule solaire est améliorée. La voiture solaire est donc toujours en développement.

Comme un projet à court terme qui utilise les VS 100%, on peut envisager des petites voitures utilisées pour un usage urbain ou extra-urbain.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Les véhicules électriques, étant écologiques et propres, vont certainement être le nouveau moyen de transport qui va prendre une place de plus en plus une importance au marché dans un avenir proche, et vont donc remplacer dans les prochaines années les voitures thermiques qui sont beaucoup trop polluantes.

La fabrication de batteries et de panneaux photovoltaïques est très polluante, et cela nous invite à dire que les voitures électriques et les voitures solaires ne sont pas respectueuses de l'environnement.

La conception de la voiture électrique s'articule autour d'une batterie, d'un moteur, d'un système de contrôle électronique, pour cela, elle se caractérise par une simplicité de configuration et c'est un point positif en sa faveur. Comme son moteur électrique, qui se caractérise par sa solidité et sa simplicité de fabrication. Il est capable de fournir de bonnes performances et des régimes élevés et n'émet pas de bruit, contrairement au moteur thermique, qui présente de nombreux inconvénients.

Les moteurs utilisés dans les voitures électriques sont des moteurs à courant alternatif, pour les adapter aux voitures électriques, il était nécessaire d'augmenter leur puissance avec le même poids, car il existe plusieurs possibilités pour y parvenir, notamment une vitesse de rotation plus élevée, un refroidissement plus efficace, des aimants plus puissants, meilleurs systèmes électroniques et contrôle par ordinateur Ces moteurs surpassent déjà les meilleurs moteurs à combustion interne.

La voiture électrique a surmonté le problème de l'autonomie car elle est capable de parcourir de grandes distances de plus de six cents kilomètres avec une seule charge, et c'est à cause de sa batterie puissante, il y a encore un obstacle lié à la batterie est son poids élevé.

Il existe plusieurs solutions permettant d'améliorer l'autonomie, par exemple en réduisant la résistance au mouvement vers l'avant grâce à l'aérodynamique ou au frottement des pneus. On constate aussi par l'augmentation de la puissance électrique à bord; la réduction de la consommation sur le trajet grâce à l'adaptation du style de conduite et l'avantage de la récupération d'énergie.

Du côté de la charge de la batterie, elle se caractérise par une variété de méthodes de charge telles que la charge rapide et la charge à domicile en plus de la charge sans contact, ce qui a grandement contribué à réduire le temps de charge, pour les stations de charge, les constructeurs automobiles cherchent à être disponibles tels que les stations de recharge thermique.

L'énergie électrique mondiale pour recharger les véhicules électriques a le potentiel de poser de nombreux problèmes si elle est prélevée exclusivement sur le réseau électrique. De plus, ils dépendent des combustibles fossiles, il faut donc trouver des alternatives, telles que des bornes de recharge qui dépendent de l'énergie solaire.

On ne peut pas dire que la voiture électrique est une voiture écologique, à moins que l'énergie utilisée ne provienne de sources renouvelables comme la voiture solaire.

La voiture solaire reste un prototype en développement, car elle a encore beaucoup de problèmes qui en font uniquement des voitures de course, pas pour la vie quotidienne. Le principal problème de ces voitures est que les panneaux photovoltaïques sont moins efficaces, car la surface de la voiture est également limitée. Le calcul du bilan énergétique de la voiture solaire nous a donné une idée sur l'autonomie de son utilisation.

L'un des problèmes de la voiture électrique est son prix élevé, et c'est l'une des raisons de son manque de diffusion, il faut donc chercher des solutions pour réduire son prix.

L'une des solutions prometteuses dans le domaine du transport urbain est de réduire la taille de la voiture pour être efficace en ville, à un prix raisonnable, et de la rendre accessible à tous. Les véhicules de transport urbain se caractérisent par leur faible poids et leur faible consommation de moteur.

Le développement des capteurs solaires augmente de jours en jours ce qui favorise l'utilisation de la voiture solaire à moyen et long terme pour le transport à grande distances et même pour une perspective des voitures électriques volantes.

Les perspectives pour les transporteurs sont d'abandonner les voitures thermiques et de les remplacer par des voitures électriques et solaires.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [I.01] Site web: https://fr.wikipedia.org/wiki/Voiture_%C3%A9lectrique
- [I.02] Site web: https://scholar.harvard.edu/files/nasar/files/voitures_electriques.pdf
- [I.03] Site web: https://fr.wikipedia.org/wiki/Voiture_%C3%A9lectrique
- [I.04] Site web: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Tesla_\(automobile\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tesla_(automobile))
- [I.05] Site web: <https://www.scribbr.fr/wp-content/uploads//2019/07/Etude-de-Cas-Tesla.pdf>
- [I.06] Site web: <https://www.automobile-propre.com/voitures/tesla-model-s/>
- [I.07] Site web: <https://www.automobile-propre.com/voitures/tesla-model-x/>
- [I.08] Site web: <https://www.automobile-propre.com/voitures/nouveau-tesla-roadster/>
- [I.09] Site web: <https://www.automobile-propre.com/voitures/tesla-model-3/>
- [I.10] Site web: <https://www.automobile-propre.com/voitures/tesla-model-y/>
- [II.01] ESPANET, Christophe. Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inversée-Application au moteur-roue. Thèse de doctorat.Université de Franche-Comté. 1999.
- [II.02] MARIF, Ismail. La commande en vitesse d'un véhicule électrique. Mémoire master. Université de Tlemcen. 2019.
- [II.03] DELOBEL, Bruno, GORDON, I. Jimenez, et LEVEAU, L. ZOE batterydurability, fieldexperience and future vision. Renault BatteryDevelopmentDepartment, 2017.
- [II.04] GUIDE D'INTERVENTION D'URGENCE. Tesla modèle S. 2014
- [II.05] Bernard Multon, Laurent Hirsinger. Problème de la motorisation d'un véhicule électrique, 2ème partie. La Revue 3 E. I, Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication, 1996.
- [II.06] BENARIBA, Hassan. Contribution à la commande d'un véhicule électrique. Thèse de doctorat.UniversitéAboubakeurBelkaïd Tlemcen.2019.
- [II.07] NOUH, Aiman. Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers. Thèse de doctorat. Besançon. 2008
- [II.08] Site web: <http://www.voiture-electrique-populaire.fr/enjeux/technologie/moteur>
- [II.09] M, T, ROUBACHE. Simulation Numérique D'une Chaine De Traction D'un Véhicule Electrique. Mémoire master. UNIVERSITE DE M'SILA. 2012.

- [II.10] NEFFATI, Ahmed. Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source: décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier. 2013.
- [II.11] SABRINA, Sabrina Meziani, CHARIKH, A., ZAOUZAOU, Sabrina, et al. Etude et simulation des convertisseurs statiques existant dans un véhicule électrique. Mémoire master. Université Abderrahmane Mira Bejaia. 2017.
- [II.12] Site web Le Model S TESLA MOTORS : https://nanopdf.com/download/presentation-technique-model-s_pdf
- [II.13] HASSAINE, Zakaria, et al. Commande latérale d'un véhicule électrique. Mémoire master. Université Abou BekrBelkaïd de Tlemcen. 2020.
- [II.14] Toyota Prius: https://fr.wikipedia.org/wiki/Toyota_Prius
- [II.15] KCHAOU, Yassine. Etude d'industrialisation de véhicules électriques en Tunisie. Mémoire master. Université Virtuelle de Tunis. 2013.
- [II.16] AHMED, Becheur et MOHAMED, Djouder. Modélisation et commande d'un véhicule électrique à base d'une machine synchrone à aimants permanents. Mémoire master. Université Mouloud Mammeri. 2015.
- [II.17] ROUHANA, Christelle SABER–Najib. Chargeurs de batteries de véhicule électrique. 2020.
- [II.18] JARRAYA, Fatma. Étude et modélisation d'un convertisseur double pont actif triphasé pour application chargeur de batterie d'un véhicule électrique. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure. 2019.
- [II.19] QUEBEC, Hydro. Bornes de recharge pour véhicules électriques. Guide Technique d'Installation. deuxièmeÉdición, 2015.
- [II.20] LABOURÉ Éric, Recharge sans contact des véhicules électriques. 2020
- [II.21] GUIOUS, Issam, FOUL, Mustapha, et MOHDEB, Naamane Encadreur. Calcul analytique en 3D des inductances mutuelles dans les systèmes de recharge sans contact pour le véhicule électrique. Mémoire master. Université de Jijel. 2019.
- [II.22] XAVIER, R. A. I. N. Les solutions actuelles de motorisations pour véhicules électriques. 2020.
- [II.23] OUBIDAR, Mouad et BENDAOUD, Sedik. Machine synchrone/asynchrone. Mémoire d'Ingénieur en génie électromécanique, Université de Québec, 2010.
- [II.24] Site web: <http://acti-ve.org/vw-id-3-voici-comment-fonctionne-le-moteur-electrique/pollution/2019/11/>
- [II.25] Site web: <https://it.quora.com/Che-aspetto-ha-il-motore-elettrico-di-unauto-Tesla>

- [II.26] STATON, David et GOSS, James. Open source electric motor models for commercial EV & Hybrid traction motors. In : CWIEME. 2017.
- [II.27] MICHEL Wastraete. Véhicules électriques et hybrides. dossier technique ANFA. 2011
- [II.28] Site web Automobile propre Renault Kangoo électrique: <https://www.automobile-propre.com/voitures/renault-kangoo-express-ze/>
- [II.29] CAILLARD, Pierre. Conception par optimisation d'une chaîne de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille. 2015.
- [II.30] Arif Ali. Amélioration des performances d'un véhicule électrique alimenté par une source photovoltaïque. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra. 2013.
- [III.01] Site web Voiture solaire: https://fr.wikipedia.org/wiki/Voiture_solaire
- [III.02] Benmansour, Saad. Barbara, Sara. Conception et réalisation d'une voiture solaire. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah. 2019.
- [III.03] Raphaëlle JAVET. Histoire des véhicules et des aventures solaires. Fondation SolarPlanet, en partenariat avec l'ADNV et De Witt. 2016
- [III.04] Site web VOITURE SOLAIRE-Maison de l'Energie : https://www.maisondelenergie.fr/sites/maisondelenergie.fr/files/voiture_solaire.pdf
- [III.05] MANEL, B. I. D. I. Conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures. Mémoire master. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA. 2019.
- [III.06] Site web: <https://www.hellowatt.fr/blog/fonctionnement-panneau-solaire-photovoltaïque/>
- [III.07] AMMI, Houssein, BOUCHARBEB, Amina, et BOUCHERIBA, Fouzia. Intégration du système solaire dans un projet architectural et son impact sur sa consommation énergétique. 2016.
- [III.08] MULTON, Hélène HORSIN MOLINARO–Bernard. Energie électrique: génération photovoltaïque. 2020
- [III.09] MKAHL, Rania. Contribution à la modélisation, au dimensionnement et à la gestion des flux énergétiques d'un système de recharge de véhicules électriques: étude de l'interconnexion avec le réseau électrique. Thèse de doctorat. Belfort-Montbéliard. 2015.
- [III.10] ZERROUKI, Zolikhha, and Rym BEREKSI REGUIG. Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome. Diss. 2017.
- [III.11] Matthys Frédéric, Soraya Himour et Sandra Thorez : dossier de voiture solaire TPE 2007

[III.12] Site web : <https://www.insunwetrust.solar/blog/le-solaire-et-vous/monocristallin-polycristallin/#:~:text=Un%20panneau%20solaire%20monocristallin%20traditionnel,il%20fa%20ut%20donc%2030%20panneaux.&text=Un%20panneau%20polycristallin%20de%20la,peu%20plus%20de%2060%20m%C2%B2.>

[III.13] Site web: <https://www.automobile-propre.com/voitures/sono-sion/>

[III.14] Etude et réalisation d'une station solaire autonome destinée à recharger les batteries d'un véhicule électrique

[III.15] Site web: <https://www.automobile-propre.com/breves/squad-cette-petite-voiture-electrique-solaire-coute-moins-de-7-000-e/>

[III.16] Site web: Guide pour les Services de Secours. RENAULT TWIZY Véhicule électrique.2012

[III.17] Site web: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Citro%C3%ABn_Ami_\(2020\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Citro%C3%ABn_Ami_(2020))

[III.18] Site web: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Phylla>

[III.19] Site web: <https://www.cder.dz/spip.php?article3132>

[III.20] Convergences entre photovoltaïque et mobilité électrique

المخلص

الهدف من هذه المذكرة دراسة لسيارة كهربائية تستخدم الألواح الشمسية. سنتطرق الى اعطاء فكرة عن تطورات السيارة الكهربائية خلال العقد الماضي ونستشهد بذلك بسيارة Tesla Motors. و من ثم شرح بمبدأ السيارة الكهربائية من خلال دراسة عناصر سلسلة الجر من شاحن البطارية إلى حركة العجلات مع التركيز في الأخير على حساب ميزان توازن الطاقة باستخدام الألواح الكهروضوئية لسيارة تعمل بالطاقة الشمسية. كنظرة مستقبلية قصيرة المدى ارتأينا إمكانية تطبيق سيارات تعمل بالطاقة الشمسية في النقل الحضري.

الكلمات المفتاحية السيارات الكهربائية، الطاقة الشمسية، الألواح الشمسية.

Résumé

L'objectif de cette mémoire est d'étudier une voiture électrique qui utilise des panneaux solaires. Nous donnerons une idée de l'évolution de la voiture électrique au cours de la dernière décennie, en citant comme exemple la voiture Tesla Motors. On explique le principe de la voiture électrique en étudiant les éléments de la chaîne de traction, du chargeur de batterie au mouvement de la roue, en insistant dans cette dernière sur le calcul du bilan du bilan énergétique à l'aide de panneaux photovoltaïques pour une voiture à énergie solaire. une vision d'avenir à court terme, nous avons vu la possibilité d'appliquer les voitures à énergie solaire dans les transports urbains

Mots clé Voiture électrique, énergie solaire, panneaux solaires.

Abstract

The objective of this thesis is to study an electric car that uses solar panels. We will give an idea of the evolution of the electric car over the last decade, citing the Tesla Motors car as an example. The principle of the electric car is explained by studying the elements of the traction chain, from the battery charger to the movement of the wheel, insisting in the latter on the calculation of the balance of the energy balance using photovoltaic panels for a solar powered car. A short-term vision for the future, we saw the possibility of applying solar-powered cars in urban transport.

Keywords Electric car, solar energy, solar panels.