



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued



Faculté de Technologie
Département de génie mécanique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER

Spécialité : Électromécanique

Présenté par :

- Nouara Khedir
- Mellak Guerrah
- Hend Houamdi

Intitulé :

**Amélioration de performance du moteur électrique
applique au système embarque**

Soutenue le : 4 /6 /2024

Devant le jury composé de :

Dr : Chabani Mohammed Saci	Président	Université
Dr : Ali Bebboukha	Examineur	Université
Dr : Zine Bachir	Encadreur	Université

Année académique : 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Table de matières

Table de matières

	Matières	Page
	Table de matières	I
	Liste de symboles	II
	Liste des abréviations	III
	Liste des tableaux	IV
	Liste des figures	V
	Remerciement	VI
	Dédicace	VII
	Introduction générale	1
	CHAPITRE I : État de l'art sur les véhicules électriques	
I.1	Introduction	2
I.2	Histoire de véhicules électriques	2
I.3	Types de Véhicules Électriques	7
I.3.1	Classification des véhicules électriques	7
a	Véhicule électrique à batterie	7
b	Véhicule hybride	7
c	Véhicule hybride rechargeable	7
I.3.2	Avantages et inconvénients des différents types des véhicules électriques	8
I.4	Composants des Véhicules Électriques	8
a	Le Variateur de vitesses	9
b	Le moteur de traction électrique	9
c	Le chargeur embarqué	11
d	Le système de gestion thermique	11
e	La batterie	11
f	Le convertisseur DC/DC	12
g	Le calculateur de bord	13
I.5	L'architecture de véhicule électrique	13
1.5.1	Architecture série	13
1.5.2	Architecture parallèle	13

1.5.3	Architecture série-parallèle	14
I.6	La technologie des batteries pour les véhicules électriques	15
I.7	Analyse des améliorations en termes de densité énergétique, de vitesse de charge et de durabilité des batteries	16
I.8	Performance et autonomie des véhicules électriques	17
I.8.1	Évaluation des performances des véhicules électriques	17
I.8.2	Facteurs influençant l'autonomie des véhicules électriques et stratégies pour optimiser l'efficacité énergétique	19
I.9	Infrastructure de Recharge	19
I.9.1	Bornes de Recharge Publiques	20
I.9.2	Bornes de recharge à domicile	22
I.9.3	Défis et opportunités liés à l'extension et à l'amélioration de l'infrastructure de recharge pour les véhicules électriques	23
I.10	Tendances du Marché et Taux d'adoption	23
I.10.1	Tendances du Marché Mondiales et Régionales	23
a	Tendances du Marché Mondiales	23
b	Tendances du Marché Régionales	24
I.11	Défis et Obstacles à l'Adoption Généralisée	26
I.12	Conclusion	26
	CHAPITRE II : Modélisation des organes du véhicule électrique	
II.1	Introduction	27
II.2	Les batteries	27
II.2.1	Différents types de Batteries	27
a	Batterie plomb	27
b	Batterie Lithium-Ion (Li-Ion)	28
II.2.2	Comparaison entre les différents types de batteries	29
II.2.3	Modèle électrothermique	30
II.2.4	Modélisation de la batterie	32
A	Etat de l'art sur le modèle de la batterie utilisé	33
B	Modèle de Shepherd	35
C	Le modèle de décharge	35

D	Les équations charge /décharge de ce modèle dans Matlab Simulink 2013b	36
II .3	Modélisation d'hacheur	37
II.3.1	Différents types de convertisseur DC/DC	38
II.3.1.1	Hacheur série (abaisseur ou dévolteur ou buck)	38
II.3.1.2	Hacheur parallèle (élevateur ou surélever ou boost)	40
II.3.1.3	Hacheur série-parallèle (Buck_boost)	42
II.4	Moteur à courant continu (DC)	44
II.4.1	Constitution de la machine à courant continu	44
a	Stator (inducteur)	44
b	Rotor (Induit)	45
c	Collecteur et balais	45
II.4.2	Principe de fonctionnement MCC	46
II.4.3	Types de moteurs à courant continu	47
a	Moteur à excitation séparée	47
b	Moteur à excitation série	48
c	Moteur à excitation parallèle (shunt)	49
d	Moteur à excitation composée	51
II.4.4	Modélisation du moteur à courant continu	53
II.4.5	Régulation dans la puissance délivrée aux moteurs électriques	55
II.4.6	Différents modes de réglage de la vitesse d'un moteur à courant	56
II.4.7	Des aspects importants à modéliser pour représenter son comportement dans un système de propulsion	56
II.4.8	Moteur à courant continu à vitesse variable	57
II.4.9.	Choix du type de convertisseurs	58
II.4.10	Les capteurs	58
a	Capteurs de courant	58
b	Capteurs de vitesse	59
II.4.11	Boucle de réglage de la vitesse du MCC	59
a	Problèmes de régulation de vitesse	59
b	Boucle de courant (Boucle interne)	59
c	Boucle de Vitesse (Boucle externe)	60

II.5.	Conclusion	61
	CHAPITRE III : Résultats expérimentaux de simulation et commentaires	
III.1	Introduction	62
III.2	Présentation du system étude	62
III.2.1	La Batterie	62
III.2.1.1	Application (Extraire les paramètres de la batterie à partir de datasheet)	63
II.2.1.2	Expérimentation et validation des résultats	63
A	Spécification de la batterie	63
B	Description du banc d'essais	65
C	Déroulement des essais	65
D	Résultats et commentaire batterie	66
III.2.2	Convertisseur DC/DC (hacheur série)	68
A	Composants du hacheur DC/DC	69
a	Transistors (N-Channel 60V (D-S) MOSFET	69
b	TIMERE	70
c	Condensateurs	70
B	Les essais expérimentaux du hacheur	71
III.2.3	Moteur à courant continu	75
A	Résultats et commentaires : régulation de la vitesse du MCC	77
III.3	Conclusion	82
	Conclusion général	83
	Annexe	84
	Référence	87
	Résumé	93

Liste des symboles

Liste des symboles

Symboles	Signification
R_0	Élément résistif d'ordre 0
V_{DC}	Tension de source
I_{cell}	courant d'une cellule
R_n	Valeur de l'élément résistif n d'un filtre RC d'ordre N
C_n	Valeur de l'élément capacitif n d'un filtre RC d'ordre N
R	Résistance
C	Capacité
R^*_0	Résistance interne corrigée
f_{DCIR}	Facteur de correction de la résistance interne
V_{batt}	la tension de la batterie (V)
E_0	la tension constant de la batterie (V)
K	polarisation constante (V/(Ah)) ou polarisation de la résistance (Ω)
Q	capacité de la batterie (Ah)
$it = \int Idt$	la charge actuel de la batterie (Ah)
A	la tension exponentielle (V)
B	la capacité exponentielle (Ah) -1
R	la résistance interne (Ω)
I	le courant de la batterie (A)
i^*	le courant filtré (A)
V_0	La tension de sortie
V_L	la tension aux bornes de L'inductance
V_i	La tension d'entrée
T	Période de découpage du signal de commande de l'interrupteur
α	Rapport cyclique du signal de l'interrupteur
I_L	Le courant dans l'inductance
I_{Lmin}	Le courant minimum dans l'inductance
I_{Lmax}	Le courant maximum dans l'inductance
ΔI_L	Ondulation de courant dans l'inductance
E	La tension d'entrée
i_L	le courant dans la bobine L
R	la résistance de la charge

U	Tension d'alimentation d'induit (en V).
R	Résistance d'induit
E	f.é.m induite.
K	Grandeur constante propre au moteur
P	Nombre de pair de pôles de la machine
a	Nombre de paires de voies de l'enroulement entre les deux balais.
N	Nombre de conducteurs actifs de la périphérie de l'induit
Ω	Vitesse angulaire de l'axe du moteur (en rd/s).
ϕ	Flux sous un pôle de la machine (en Wb)
J	Moment d'inertie du moteur à courant continu (en Kg.m ²)
C_m	Le couple mécanique (utile) du moteur (en Nm)
C_r	Le couple résistant du la charge (en Nm)
f	Coefficient de frottement crée par la rotation du moteur
ζ	Coefficient d'amortissement
$FTBF_{\Omega}$	La fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée.
$FTBO_d$	La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte
Reg_d	Le régulateur
$\Omega(s)$	La vitesse

Liste des abréviations

Liste des abréviations

VEB	Véhicule électrique à batterie
VHR	Véhicule hybride rechargeable
VH	Véhicule hybride
VE	Véhicule électrique
DC	Courant continu
AC	Courant alternatif
MCC	Machine à courant continu
MAS	Machine asynchrone
MSI	Medium-scale integration
MSAP	Machine synchrone à aimant permanent
MRV	Moteur à reluctance variable
Li-ion	Lithium-ion
R&D	Recherche et Développement
TCAC	Taux de croissance annuel composé
Ni-Mh	Nickel-Hydrure Métallique
SOC	State Of Charge
HEVs	Véhicules Électriques Hybrides
CEE	Certificats d'Économies d'Énergie
NiCd	Nickel-Cadmium
BS	battery storage
OCV	Tension de Circuit Ouvert (Open Circuit Voltage)
PCM	Matériau à changement de phase
f.é.m	force électromotrice
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
PWM	Modulation de Largeur d'Impulsion (Pulse Width Modulation)
VRLA	Batterie Régulée par Soupape (Valve-Regulated Lead-Acid)
DoD	Profondeur de Décharge (Depth of Discharge)
SOH	État de Santé (State of Health)

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableaux	Table	Page
Tableau.I.1	Avantages et Inconvénients le types véhicules Électriques	8
Tableau.I.2	Types de moteurs électriques	10
Tableau.I.3	Exemples de voitures internationales	18
Tableau.I.4	La différence entre les véhicules électriques mondiaux	21
Tableau.I.5	La différence entre les véhicules électriques mondiaux	26
Tableau.II.1	Comparaison les différents types de batteries	29
Tableau.II.2	Paramètres du modèle électrique	31
Tableau.II.3	Comparaison les principaux convertisseurs DC-DC	43
Tableau III.1	Paramètres de la batterie utilisé à la simulation avec un courant de décharge de 7A	63
Tableau III.2	Spécifications dans notre modèle de la batterie.	64
Tableau.III.3	1 ^{ère} essai Le hacheur série sans charge ($V=24\text{ V}$).	72
Tableau.III.4	1 ^{ème} essai Le hacheur série sans charge ($V=30\text{V}$).	73
Tableau.III.5	2 ^{ème} essai le hacheur série avec charge $V=3.3\text{V}$, $I=1\text{A}$.	74
Tableau.III.6	2 ^{ème} essai l' hacheur série avec charge $V=5.2\text{V}$, $I=2\text{A}$.	74
Tableau.III.7	Caractéristiques du moteur	75

Liste des figures

Liste des figures

	Figures	Page
Figure.I.1	Première voiture électrique.	3
Figure.I.2	La Jamais Contente.	3
Figure.I.3	La Buick Skylark de GM (General Motors).	4
Figure.I.4	La Prius (Toyota 1997).	5
Figure.I.5	La Nissan LEAF.	6
Figure.I.6	Composants de véhicules électriques.	9
Figure.I.7	Le moteur de traction électrique pour véhicules électriques.	10
Figure.I.8	Chargeur embarqué du véhicule électrique.	11
Figure.I.9	Batterie lithium-ion.	12
Figure.I.10	Convertisseur de tension DC/DC.	12
Figure.I.11	Architecture série d'un véhicule hybride.	13
Figure.I.12	Architecture parallèle d'un véhicule hybride.	14
Figure.I.13	Architecture série-parallèle d'un véhicule hybride.	15
Figure I.14	Types de socles de prise et caractéristiques principales.	20
Figure I.15	Courbes de recharge AC et DC.	22
FigureI.16	L'évolution du nombre de véhicules vendus en France.	24
Figure.I.17	Répartition des ventes de véhicules électriques dans les 3 marches majeurs.	25
Figure II.1	Recharge et décharge d'une batterie au plomb.	28
Figure II.2	Schéma fonctionnement batterie lithium.	28
Figure.II.3	Diagramme de ragone des batteries.	30
Figure.II.4	Modèle de circuit électrique équivalent.	30
Figure.II.5	Modèle de charge/ décharge de la batterie.	36
Figure.II.6	Symbole d'un convertisseur DC/DC.	38

Figure.II.7	Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.	39
Figure.II.8	Schéma de principe d'un convertisseur Boost.	41
Figure.II.9	Schéma de principe du convertisseur dévolteur-survolteur.	42
Figure.II.10	Schéma général de la machine à courant continu.	44
Figure.II.11	Inducteur à aimants permanents.	45
Figure.II.12	Inducteur bobiné.	45
Figure.II.13	Induit.	45
Figure.II.14	Collecteur.	46
Figure.II.15	Les balais.	46
Figure.II.16	Schéma d'une machine à courant continu.	46
Figure.II.17	Moteur à excitation séparée.	47
Figure.II.18	Caractéristique du moteur à excitation séparé.	48
Figure.II.19	Moteur à excitation série.	48
Figure.II.20	Caractéristiques de la machine à excitation série.	49
Figure.II.21	Moteur à excitation parallèle (shunt).	49
Figure.II.22	Caractéristique de la machine à excitation shunt.	50
Figure.II.23	Moteur compound à flux additif.	51
Figure.II.24	Caractéristiques du moteur composé à flux additif.	52
Figure.II.25	Schéma électrique du moteur compound à flux soustractif.	52
Figure.II.26	Caractéristique du moteur composé à flux soustractif.	53
Figure.II.27	Schéma électrique du moteur à courant continu.	54
Figure.II.28	Schéma fonctionnel du MCC.	55
Figure.II.29	Schémas équivalents du convertisseur.	58
Figure.II.30	Schéma équivalents du Capteur de courant.	59
Figure.II.31	Schéma équivalents du Capteur de Vitesse.	59
Figure .III.1	Schéma fonctionnement du véhicule électrique.	62
Figure .III.2	Image de la batterie 12V7Ah /20HR.	62

Figure.III.3	Banc d'essais.	65
Figure III.4	Tension de décharge à 1C en fonction du temps.	67
Figure III.5	Tension de charge en fonction du temps.	68
Figure. III.6	Schémas réels d'un convertisseur DC/DC.	68
Figure.III.7	Transistors (N-Channel 60V (D-S) MOSFET.	69
Figure. III.8	Schémas de TIMERE.	70
Figure.III.9	Condensateurs.	71
Figure.III.10	1 ^{ère} essai l'hacheur série sons charge.	72
Figure.III.11	2 ^{ème} essai le hacheur série avec charge.	72
Figure. III.12	Moteur universel monophasé.	75
Figure III.13	La vitesse de la rotation et sa référence du MCC en fonction du temps.	77
Figure III.14	Zoom.1.la vitesse de la rotation du MCC en fonction du temps.	78
Figure III.15	Zoom.2.la vitesse de la rotation du MCC en fonction du temps.	78
Figure III.16	le courant d'induit et sa référence du MCC en fonction du temps.	79
Figure III.17	Zoom.1.le courant d'induit et sa référence du MCC en fonction du temps.	80
Figure III.18	Zoom.2.le courant d'induit et sa référence du MCC en fonction du temps.	80
Figure III.19	La tension d'induit du MCC en fonction du temps.	81

Remerciement

Remerciement

Nous remercions Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné le pouvoir, le courage, la volonté. Patience et bien-être après toutes ces années, et que, grâce à lui ce travail a pu être achevé.

Avant tout, nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre superviseur, le Dr Zine Bachir, pour son soutien continu à notre étude de cette thèse et à nos recherches, ainsi qu'au Dr Labiod Chouaib et au Dr Zennina Mohamed Laid pour leur soutien et leur assistance envers nous, pour leur patience, leur motivation, leur enthousiasme et leurs immenses connaissances. Ils nous ont guidés dans nos recherches.

Nous tenons également à remercier nos membres du jury de cette thèse pour avoir accepté de juger ce travail et pour leurs commentaires et leurs corrections perspicaces.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de notre travail de près ou de loin.

Dédicace

Dédicace

Nous dédions cette modeste thèse à nos parents qui ont su nous soutenir tout au long de nos études, parfois nous reconforter dans les moments difficiles, et sans qui nous n'aurions pas pu faire ce travail. Nous dédions ce modeste travail :

À nos frères et sœurs.

À toute notre famille.

À tous nos amis fidèles.

À tous nos enseignants depuis l'enfance.

À toute la promotion de 2024.

Notre dévouement va également à ceux qui ont participé directement ou indirectement à la culmination de nos efforts.

Introduction Générale

Introduction Générale

L'amélioration des performances des moteurs électriques dans les véhicules électriques est essentielle pour répondre aux exigences croissantes en matière d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cette thèse s'inscrit dans cette dynamique en se concentrant sur l'optimisation d'un système de propulsion électrique pour le véhicule électrique.

La thèse est divisée en trois chapitres principaux, chacun abordant un aspect crucial de l'amélioration des performances des moteurs électriques.

- ❖ Chapitre 1 : État de l'art sur les véhicules électriques : ce chapitre explore les avancées récentes et les technologies actuelles des véhicules électriques. Nous passerons en revue les différentes configurations des chaînes de traction électrique, les types de moteurs électriques couramment utilisés, et les défis associés à leur performance et efficacité. Une attention particulière sera portée aux innovations récentes visant à améliorer l'autonomie et la fiabilité du véhicule électrique.
- ❖ Chapitre 2 : Modélisation des organes de véhicule électrique : dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur la modélisation des principaux composants d'un véhicule électrique, à savoir la batterie comme source principale d'énergie, le hacheur comme adaptateur de puissance, et le moteur à courant continu comme élément de traction. La modélisation théorique permettra de comprendre le comportement dynamique de chaque composant et leurs interactions au sein de la chaîne de traction.
- ❖ Chapitre 3 : Résultats expérimentaux, des simulations, et commentaires : ce chapitre présente les résultats des tests expérimentaux et des simulations réalisées. Les essais expérimentaux comprennent le test de charge et de décharge de la batterie, les tests de le hacheur avec variation de la résistance variable et du rapport cyclique, et l'étude de simulation pour le réglage de la vitesse du moteur, étant donné que le moteur n'a pas fonctionné comme prévu lors des essais pratiques. Les résultats obtenus seront analysés et discutés pour identifier les améliorations potentielles et les meilleures pratiques pour l'optimisation des performances du moteur électrique.

Cette thèse vise à fournir des contributions significatives à l'amélioration des performances des moteurs électriques dans les véhicules électriques, en combinant des études théoriques et expérimentales pour une compréhension approfondie et une application pratique des concepts étudiés.

CHAPITRE I

État de l'art sur les véhicules électriques

I.1. Introduction

Au cours des dernières années, les voitures électriques ont connu un développement majeur dans l'industrie, ce qui a accru l'intérêt du public pour elles car elles constituent une solution durable, respectueuse de l'environnement.

Dans ce premier chapitre, nous aborderons l'état de l'art sur les véhicules électrique de tel sut que de focaliser sur l'histoire des véhicules électriques, les différents types de véhicules électriques , Les composants et l'architecture des véhicules électriques et les performances et l'autonomie des véhicules électriques.

I.2. Histoire des véhicules électriques

De nos jours, la question des véhicules propres est au cœur des préoccupations de nombreux acteurs de l'industrie automobile, cherchant ainsi à répondre aux défis posés par la pollution atmosphérique. La voiture électrique, souvent présentée comme "la solution" à la pollution des échappements, n'est pas une invention récente. Déjà à la fin du 19^{ème} siècle, aux débuts de l'automobile, plusieurs modes de propulsion étaient en concurrence, incluant le moteur électrique, le moteur à vapeur et le moteur thermique. Les premiers prototypes de véhicules électriques n'étaient pas en reste en termes de performances par rapport à leurs homologues à propulsion thermique de l'époque

L'apparition du premier véhicule électrique remonte aux années 1830 (1832-1839). Robert Anderson, un homme d'affaires écossait, est crédité de l'invention de la première voiture électrique, bien qu'il s'agissait davantage d'une carriole électrique. Vers 1835, l'Américain Thomas Davenport a construit une petite locomotive électrique. [1]

Environ trois ans plus tard, l'Écossais Robert Davidson a présenté un modèle similaire capable de rouler jusqu'à 6 km/h. En 1859, le Français Gaston Planté a inventé la batterie rechargeable au plomb-acide, qui a été améliorée par Camille Faure en 1881. En 1884, Thomas Parker est photographié assis dans la première voiture électrique du monde, comme illustré dans (figure.I.1).



Figure .I.1 : Première voiture électrique [2]

En 1899, en Belgique, une société a construit "La Jamais Contente", la première voiture électrique à dépasser les 100 km/h, atteignant une vitesse de 105 km/h. La voiture, en forme de torpille, était pilotée par le Belge Camille Jenatzy (figure.I.2).

À partir de 1900, la voiture électrique connaît son âge d'or. Plus du tiers des voitures en circulation sont électriques, les autres étant des voitures à essence et à vapeur. Cependant, dans les années 1920, plusieurs facteurs conduisent au déclin de la voiture électrique. Parmi ces facteurs, on note leur faible autonomie, leur vitesse réduite, leur manque de puissance, la disponibilité accrue du pétrole, et leur coût deux fois plus élevé que celui des voitures à essence. [1]



Figure.I.2 : La Jamais Contente [3]

En 1966, les préoccupations environnementales commencent à émerger. Le Congrès américain recommande alors la construction de véhicules électriques pour réduire la pollution de l'air. Cette idée est largement soutenue par l'opinion publique américaine, d'autant plus que le prix de l'essence augmente en 1973, lors du premier choc pétrolier. Ce choc aurait pu favoriser l'utilisation de l'énergie électrique, mais en pratique, peu de progrès ont été réalisés dans ce domaine.

En 1972, Victor Wouk, considéré comme le parrain du véhicule hybride, construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de General Motors (GM), illustrée à (figure.I.3).

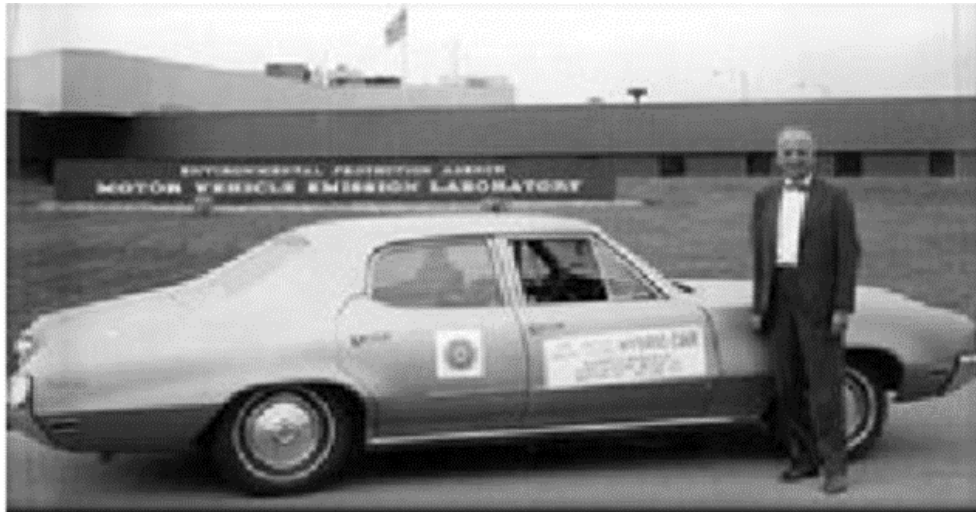


Figure.I.3: La Buick Skylark de GM (General Motors) [4]

En 1976, le Congrès américain adopte la loi intitulée « Electric and Hybrid Vehicle Research, Development and Demonstration Act », visant à promouvoir le développement de nouvelles technologies pour les batteries, les moteurs et les composants hybrides.

À partir de 1988, la société automobile General Motors initie un projet de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique, qui deviendra l'EV1. Ce modèle sera produit entre 1996 et 1998.

En 1997, Toyota lance la Prius, la première voiture hybride commercialisée en série. Au cours de la première année, 18 000 exemplaires sont vendus au Japon. En 2006, Toyota atteint un jalon significatif avec plus de 500 000 unités de sa célèbre Prius vendues dans le monde entier (figure.I.4).



Figure.I.4 : La Prius (Toyota 1997) [5]

De 1997 à 2000, de nombreux constructeurs lancent des modèles de voitures hybrides électriques : la Honda EV Plus, la GM EV1, le pickup Ford Ranger EV, la Nissan Altra EV, la Chevy S-10 EV et le Toyota RAV4 EV.

Cependant, à partir de 2000, la popularité des voitures électriques décline de nouveau. En 2004, c'est la fin de l'EV1 ; GM récupère tous les véhicules EV1 pour les détruire, malgré plusieurs mouvements de protestation, accusée de céder aux pressions des sociétés pétrolières.

En juillet 2009, Mitsubishi lance la i-Mi EV au Japon pour les professionnels, suivie de la commercialisation pour les clients individuels en avril 2010, puis pour le grand public à Hong Kong en mai 2010.

En décembre 2010, Nissan commercialise la LEAF (Leading, Environmentally Friendly, Affordable, Family car), une voiture électrique à cinq places annoncées en 2009, au Japon et aux États-Unis. La Nissan LEAF devient disponible dans toute l'Europe à partir de fin 2011.

Aujourd'hui, la voiture entièrement électrique commence à se faire une place sur le marché, avec une autonomie en constante évolution. De nombreux modèles sont désormais disponibles à la vente. L'engagement des villes dans la protection de l'environnement joue également un rôle crucial : les villes développent des réseaux de bus électriques et, plus récemment, des services de location de voitures électriques (comme Autolib à Paris, lancé fin 2011), offrant ainsi une visibilité accrue aux véhicules électriques.

À l'heure actuelle, les véhicules électriques proposés par les constructeurs ont une autonomie comprise entre 70 km et 200 km. Cependant, de nouvelles perspectives se dessinent avec l'utilisation de la pile à combustible, qui permet d'augmenter considérablement l'autonomie à des valeurs proches de celles des véhicules thermiques classiques, atteignant actuellement entre 400 et 450 km.



Figure.I.5 : La Nissan LEAF [4]

Ces dernières années, le progrès des véhicules électriques a été remarquable, grâce à la prise de conscience mondiale des enjeux environnementaux et à l'engagement des constructeurs automobiles en faveur de la transition énergétique et technologique. Depuis 2010, de nombreuses entreprises ont lancé la commercialisation de leurs modèles de véhicules électriques, la plupart étant de petite taille pour minimiser la consommation d'énergie. Ils représentent une alternative attrayante aux véhicules essence et diesel pour un usage urbain, à l'instar de la Bluecar, équipée d'une batterie Lithium Métal Polymère offrant une autonomie de 250 km et une recharge complète en 8 heures. Renault propose trois méthodes de recharge pour la Fluence. ZE : la charge lente sur secteur (environ 8 heures), la charge partielle rapide sur bornes (environ 80 % en 20 minutes environ) et un système d'échange rapide de batteries appelé "Quickdrop", permettant de remplacer la batterie en seulement 3 minutes. Pour ce type de véhicule, l'autonomie annoncée est de 160 km. [6]

I.3. Types de véhicules électriques

I.3.1. Classification des véhicules électriques

a. Véhicule électrique à batterie

Les véhicules électriques à batterie (VEB) fonctionnent exclusivement avec l'électricité stockée dans une batterie de grande capacité, rechargeable sur le réseau électrique. Leur autonomie varie entre 100 et 400 km selon la capacité de la batterie. Le temps de recharge d'un VEB dépend de la taille de la batterie et de l'utilisation ou non d'une borne de recharge rapide. De plus, ce temps de recharge est influencé par des facteurs tels que la température ambiante et l'autonomie restante de la batterie au moment de la recharge.

Exemples : la LEAF de Nissan, l'i-Mi EV de Mitsubishi, la Model S de Tesla et le Soul EV de KIA. [7]

b. Véhicule hybride

Les véhicules hybrides (VH) sont dotés d'un double motorisation, à la fois thermique et électrique. Habituellement équipés d'une batterie de capacité réduite, cela limite considérablement leur autonomie et leur vitesse maximale en mode électrique. Ils ne peuvent pas être rechargés sur le réseau électrique et ne sont donc pas pris en compte dans le présent guide [7].

Exemples : la Prius de Toyota et la CR-Z de Honda. [7]

c. Véhicule hybride rechargeable

Les VHR sont des véhicules hybrides qui se connectent au réseau électrique pour recharger leur batterie. Ils sont généralement équipés d'une batterie de capacité moyenne qui leur confère une autonomie de plusieurs dizaines de kilomètres en mode entièrement électrique, permettant des accélérations et des vitesses de pointe comparables à celles d'une voiture à essence.

Exemples : la LEAF de Nissan, l'i-Mi EV de Mitsubishi, la Model S de Tesla et le Soul EV de KIA. [7]

I.3.2. Avantages et inconvénients des différents types des véhicules électriques

Pour (tableau.I.1) nous avons clarifié les éléments suivants :

Tableau.I.1 : Avantages et inconvénients des différents types des véhicules électriques. [8-9]

<i>Types de véhicules électriques</i>	<i>Véhicules hybrides</i>	<i>Véhicules électriques à batterie</i>	<i>Véhicules hybrides rechargeables</i>
Avantages	• Réduction des émissions de CO2 • Autonomie prolongée grâce au moteur à combustion	• Zéro émission de CO2 lors de l'utilisation • Économique à l'utilisation • Peu d'entretien	• Zéro émission de CO2 lors de l'utilisation en mode électrique • Possibilité de rouler en mode électrique à faible vitesse
Inconvénients	• Coûts d'achat plus élevés que les véhicules traditionnels • Complexité accrue due à la présence de deux moteurs	• Coûts d'achat plus élevés que les véhicules traditionnels • Disponibilité de la recharge limitée dans certaines régions	• Coûts d'achat plus élevés que les véhicules traditionnels • Augmentation du poids en raison de la présence de deux moteurs

I.4. Composants des véhicules électriques

Il est crucial de comprendre les principaux composants techniques qui constituent ces véhicules et équipements électriques. Contrairement aux véhicules à combustion interne traditionnels, les véhicules et équipements électriques utilisent divers composants spécifiques pour assurer un fonctionnement optimal et garantir la sécurité des utilisateurs. Voici un aperçu des principaux composants techniques des VE et des équipements électriques.

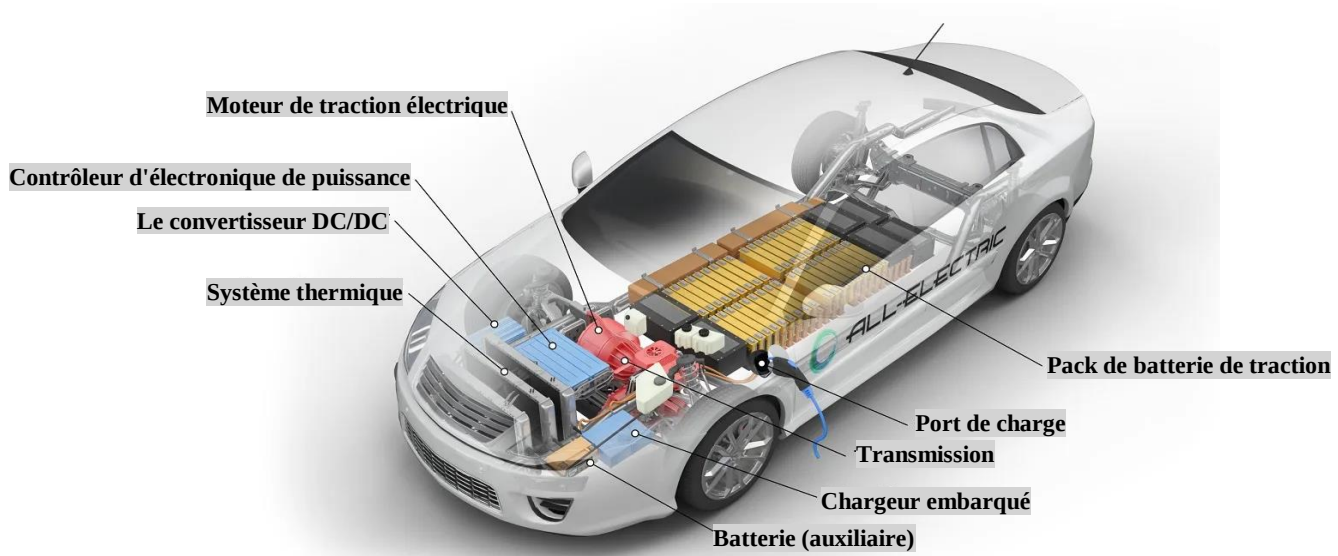


Figure.I.6 : Composants de véhicules électriques [10]

a. Le Variateur de vitesses

C'est un composant crucial des véhicules et équipements électriques, car il convertit le courant continu (DC) de la batterie en courant continu (DC) ou alternatif (AC) pour alimenter et contrôler le moteur électrique. Ce processus s'inverse également lors du freinage régénératif, où l'énergie cinétique est reconvertie en électricité et renvoyée à la batterie. [10]

b. Le moteur de traction électrique

Le moteur de traction électrique convertit l'énergie électrique en force mécanique, propulsant le véhicule ou actionnant l'équipement. Les moteurs électriques sont généralement plus légers, plus compacts et plus silencieux que les moteurs à combustion interne, ce qui améliore l'efficacité globale et la dynamique de conduite. [10]

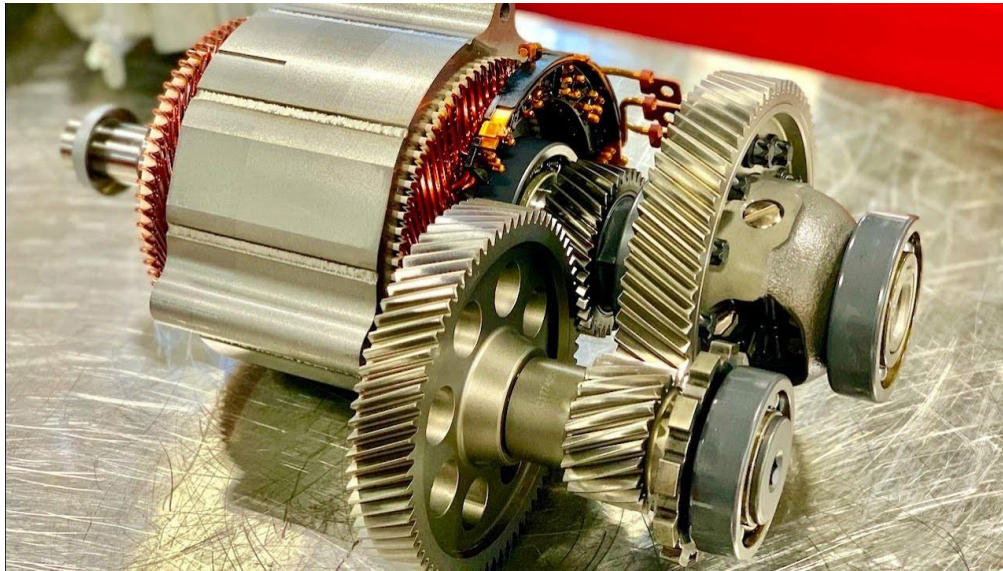


Figure.I.7 : Le moteur de traction électrique pour véhicules électriques [11]

Dans (le tableau.I.2), nous avons effectué des comparaisons entre différents types de moteurs électriques appliqués aux véhicules électriques (VE).

Tableau.I.2 : Types de moteurs électriques. [12]

	MCC	MAS	MSI	MSAP	MRV
Construction	Simple	Simple	Complexe	Assez complexe	Assez complexe
Rendement	Moyen	Bon	Bon	Très Bon	Bon
Vitesse maximale	Passable	Bon	Bon	Bon	Bon
Fiabilité	Bonne	Excellente	Bonne	Bonne	Bonne
Coût du moteur	Passable	Bon	Moyen	Moyen	Très Bon
Coût électronique de puissance	Très Bon	Moyen	Moyen	Moyen	Bon

c. Le chargeur embarqué

Le chargeur embarqué convertit le courant alternatif (AC) fourni par une station de charge externe en courant continu (DC) afin de charger la batterie du véhicule ou de l'équipement. [10]



Figure.I.8 : Chargeur embarqué du véhicule électrique [13]

d. Le système de gestion thermique

Puisque les moteurs et les variateurs génèrent de la chaleur pendant leur fonctionnement, il est essentiel d'avoir un système de gestion thermique efficace pour maintenir une température optimale. Ce système intègre généralement trois méthodes de refroidissement : le refroidissement par liquide, la convection naturelle et le refroidissement par air forcé, garantissant ainsi la durabilité et la sécurité des composants. [10]

e. La batterie

La batterie constitue le noyau de tout véhicule électrique et équipement électrique, agissant en tant que principale source d'énergie. Elle stocke l'énergie sous forme de courant continu et la distribue aux divers composants du véhicule ou de l'équipement. Actuellement, les batteries au lithium-ion dominent le marché en raison de leur densité énergétique élevée, de leur longue durée de vie et de leur faible taux de décharge au fil du temps. [10]

f. Le convertisseur DC/DC

Le convertisseur DC/DC est un composant essentiel qui relie la haute tension de la batterie à l'accessoire basse tension du véhicule ou de l'équipement. Il réduit la tension de la batterie haute tension à un niveau compatible avec les accessoires (généralement 12 ou 24V),



Figure.I.9 : Batterie lithium-ion. [14]

tels que les feux, les essuie-glaces et les systèmes audio, tout en optimisant l'efficacité énergétique. [10]

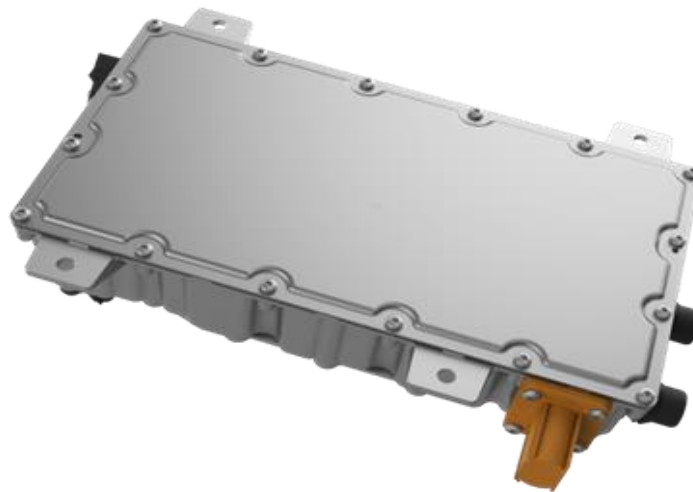


Figure.I.10 : Convertisseur de tension DC/DC. [15]

g. Le calculateur de bord

Le calculateur de bord est l'unité de contrôle centrale qui supervise l'ensemble des opérations électriques du véhicule ou de l'équipement. Il gère la répartition de l'énergie entre la batterie, l'onduleur et le moteur électrique, tout en prenant en compte les commandes du conducteur telles que l'accélérateur et les freins, afin d'assurer une expérience de conduite agréable et sécurisée. [10]

I.5. l'architecture de véhicule électrique

1.5.1. Architecture série

Dans cette architecture hybride, la conception est simplifiée au maximum. Dans le schéma série, la propulsion est entièrement assurée par un moteur électrique. Le moteur thermique est mécaniquement désolidarisé des roues et directement couplé à une génératrice à vitesse constante via une jonction mécanique. Cette génératrice assure alors la charge de la batterie. Cette dernière peut ensuite alimenter un moteur électrique connecté aux roues. Avec les deux moteurs fonctionnant en série, il est possible de choisir une vitesse du moteur thermique afin d'obtenir un rendement maximal. Le schéma de principe d'un tel véhicule hybride est représenté dans (la figure.I.11) [16]

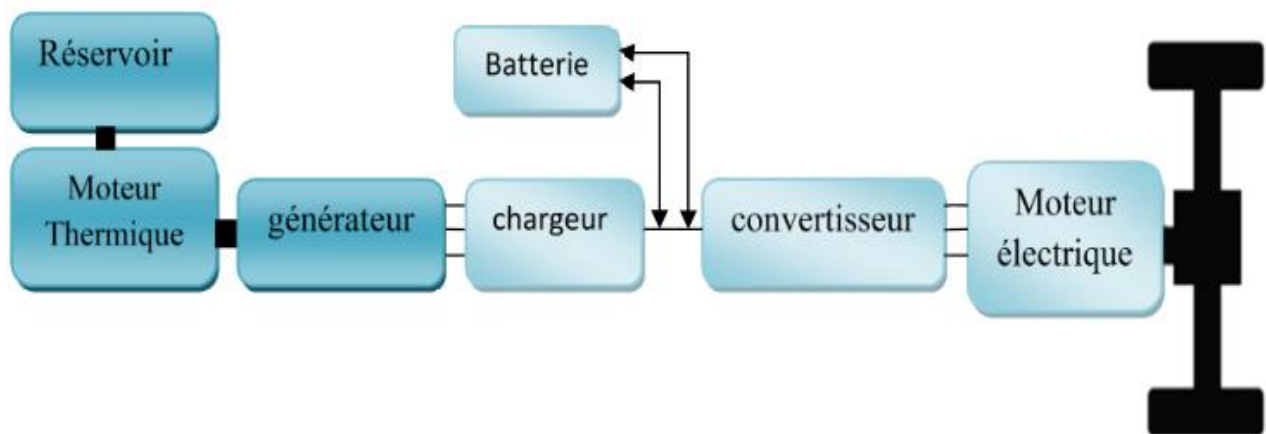


Figure.I.11 : Architecture série d'un véhicule hybride [16]

1.5.2. Architecture parallèle

Les deux moteurs peuvent être utilisés séparément, ce qui permet de résoudre le problème écologique du moteur thermique en milieu urbain en utilisant le mode électrique, et celui de l'autonomie du véhicule électrique pour les longs trajets en utilisant le mode thermique. Le point de jonction entre les différentes chaînes de traction est mécanique. Dans cette configuration parallèle, les moteurs thermique et électrique sont directement connectés à la transmission, et donc aux roues. Les deux moteurs peuvent ainsi contribuer parallèlement au déplacement du véhicule en transmettant chacun une puissance mécanique aux roues. Le schéma de principe d'un tel véhicule parallèle est illustré dans (la figure.I.12). [16]

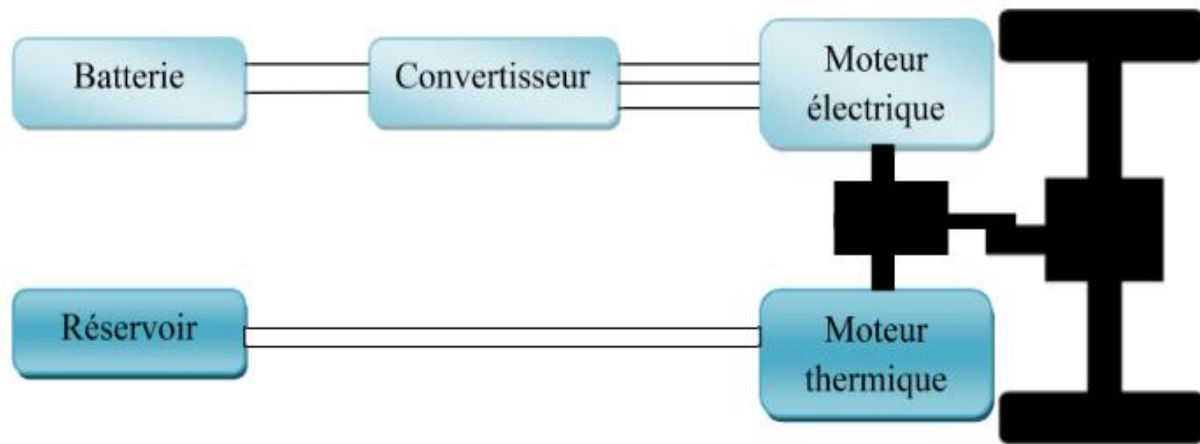


Figure.I.12 : Architecture parallèle d'un véhicule hybride [16]

1.5.3. Architecture série-parallèle

Finalement, une famille de structures combine les avantages des hybrides série et parallèle, appelés hybrides mixtes ou à dérivation de puissance. Cette architecture série-parallèle combine les modes de fonctionnement des deux types d'architectures. Elle utilise un train planétaire et une première machine électrique pour amener le moteur dans ses zones de fonctionnement optimales où il offre le meilleur rendement, tandis qu'une deuxième machine participe à la traction.

Dans ces configurations, une partie de l'énergie fournie par le moteur thermique est transmise mécaniquement aux roues. Simultanément, les machines électriques prélèvent ou fournissent de l'énergie à la transmission pour répondre aux objectifs spécifiques tels que l'accélération, la charge ou la décharge de la batterie, ainsi que la consommation optimale du moteur thermique. Dans la plupart des cas, deux machines électriques sont présentes, chacune pouvant fonctionner soit comme moteur soit comme générateur. Cette configuration permet donc au moins quatre modes de fonctionnement, chacun présentant certains avantages. Une illustration de cette architecture est fournie dans (la figure.I.13). [16]

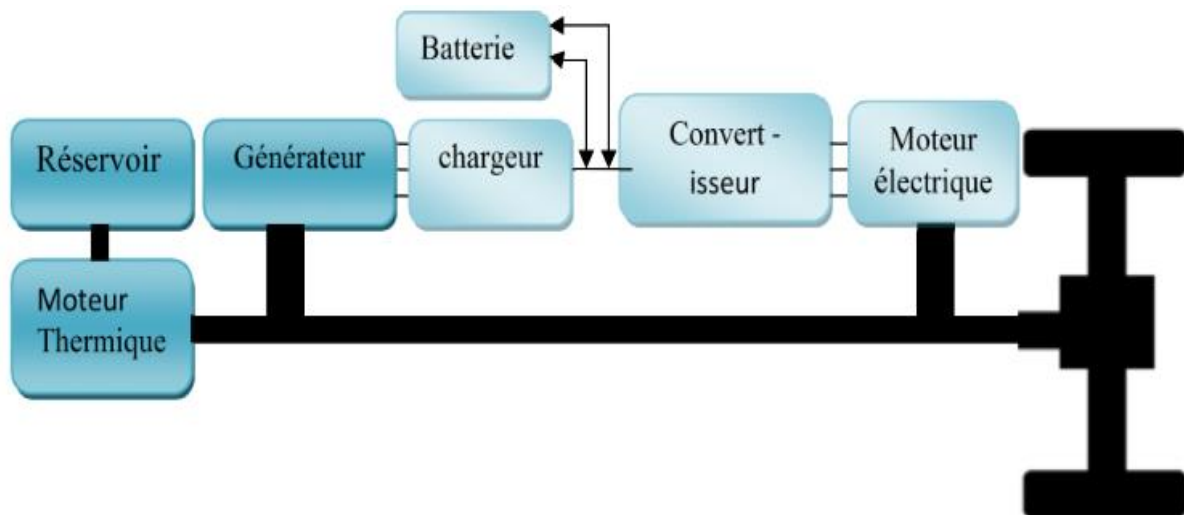


Figure.I.13 : Architecture série-parallèle d'un véhicule hybride [16]

I.6. La technologie des batteries pour les véhicules électriques

Les recherches sur de nouvelles technologies de batteries, visant à permettre aux véhicules électriques d'atteindre le seuil tant attendu de 1000 km d'autonomie, progressent rapidement. « Une course à l'innovation dans le domaine des batteries est en cours, car l'autonomie optimale actuelle de 700 km pour certains modèles constitue toujours un obstacle pour les automobilistes », explique Clément Le Roy, associé au cabinet de conseil Wavestone, spécialisé dans la transition énergétique. [17]

Atteindre une telle autonomie nécessite d'augmenter la densité énergétique des batteries pour les rendre plus puissantes, tout en miniaturisant leurs composants. « Si l'objectif technologique est de parcourir 1000 km sans recharger, l'objectif commercial consiste à développer des batteries plus petites, plus puissantes, moins lourdes et moins coûteuses », souligne Jean-Michel Pinto, associé au cabinet de conseil Monitor Deloitte, spécialisé dans l'automobile. [17]

➤ Améliorer la technologie existante

Pour atteindre cet objectif, les fabricants de batteries et les start-up cherchent d'abord à améliorer la technologie lithium-ion actuelle à électrolyte liquide. L'entreprise américaine 24M Technologies, qui se concentre sur l'amélioration de l'électrolyte liquide, a développé une technologie qui réduit de 40 % le coût du processus de production des batteries, augmente la performance de leur cycle de vie et garantit une autonomie de 1000 km. [17]

Cette innovation a suscité l'intérêt de Volkswagen, qui a acquis en 2022 une participation de 25 % dans le capital de 24M Technologies. Les ingénieurs de Volkswagen testent actuellement l'intégration de ce nouveau type de batterie lithium-ion dans leurs véhicules. Le constructeur pourrait ainsi lancer la commercialisation de voitures électriques à grande autonomie d'ici 2028-2030, notamment sous les marques Porsche et Audi, deux enseignes du groupe allemand qui visent à devenir leaders en matière d'autonomie. [17]

➤ **La piste des batteries solides**

D'autres initiatives de R&D et de prototypes émergent en Corée du Sud et en Chine. Le coréen Samsung, l'un des plus grands fabricants de batteries au monde, concentre ses recherches sur les batteries lithium-ion à électrolyte solide. « Les batteries solides promettent un rechargement rapide et une autonomie accrue, allant de 1000 à 1200 km », souligne Clément Le Roy. Le constructeur chinois Nio s'engage également dans cette direction. [17]

À la fin de 2023, la nouvelle berline électrique Nio ET7, équipée d'une batterie semi-solide de 150 kWh, a parcouru plus de 1000 km sur route sans nécessiter de recharge.

« Toutes les recherches actuelles sur les nouvelles batteries en sont encore à leurs débuts. Leur généralisation n'est pas attendue avant 2030 à 2035 », conclut Clément Le Roy. [17]

1.7. Analyse des améliorations en termes de densité énergétique, de vitesse de charge et de durabilité des batteries

L'amélioration des performances énergétiques (densités volumique et massique d'énergie) vise à stocker davantage d'énergie dans un volume réduit et sous des formes plus légères. Pour qu'un véhicule électrique puisse parcourir les 800 km nécessaires pour être compétitif par rapport à une voiture thermique, il pourrait être envisageable d'augmenter le nombre de cellules. Cependant, sans une avancée technologique majeure, l'utilisation des cellules actuelles entraîne une augmentation des coûts et du poids. Une autre approche consiste à accroître la quantité d'énergie stockée dans un même volume tout en augmentant la part de l'énergie restituée. De nouvelles technologies, telles que les cellules métal-air, sont ainsi en cours de recherche pour améliorer la densité de puissance des batteries intégrant ces cellules, ou encore comme la conception de cellules lithium-soufre. [18-19]

Les améliorations dans le domaine de la vitesse de charge des batteries sont essentielles pour rendre les véhicules électriques plus pratiques et attrayants pour les consommateurs. Nous mentionnons quelques-unes des avancées récentes dans ce domaine :

- **Technologie de charge rapide** : les fabricants de batteries et les entreprises technologiques travaillent sur des innovations telles que les cellules de batterie à haute densité énergétique et les systèmes de gestion thermique avancés pour permettre des taux de charge plus rapides tout en maintenant la sécurité et la durabilité des batteries. [20]
- **Contrôle de la tension et du courant de charge** : un contrôleur de charge avancé peut réguler la tension et le courant de charge pour optimiser la vitesse de charge tout en protégeant la batterie. Les principales fonctions sont [21]:
 - Compenser les variations de tension du réseau pour maintenir une tension de charge stable.
 - Limiter le courant de charge en cas de surtension pour éviter une élévation de température.
 - Réguler le temps de charge en cas de sous-tension.
 - Fournir une tension constante à la charge, soit depuis le réseau soit depuis la batterie en simulant ce type de contrôleur, les auteurs montrent qu'il permet d'améliorer significativement la charge des batteries.

Les batteries solides présentent une durabilité améliorée car elles sont moins vulnérables aux variations de température et possèdent un risque moindre d'embrasement ou d'explosion. Une équipe de chercheurs a développé un nouveau type d'électrode positive composée de titanate de lithium et de dioxyde de lithium vanadium, permettant de maintenir une taille constante des ions lithium et donc d'éviter la détérioration de la batterie. Les tests ont montré qu'aucune dégradation n'avait été observée après plus de 400 cycles de charge et décharge. [22]

I.8. Performance et autonomie des véhicules électriques

I.8.1. Évaluation des performances des véhicules électriques

Les performances des véhicules électriques incluent notamment l'accélération, la vitesse maximale et l'autonomie. Dans quelque (tableau.I.3) informations sur ces aspects pour différents modèles du VE.

Tableau.I.3 : Exemples de voitures internationales. [23]

Modèles des véhicules électriques	Accélération	Vitesse maximale	Autonomie	prix
 Hyundai Ioniq 6	0 à 100 km/h Abattus en 7,4 secondes	185 km/h	610 km	52 200 €
 Mercedes EQS	0 à 100 km/h abattus en 6,2 secondes	210 km/h	770 km	135 850 €
 Tesla Model 3	0 à 100 km/h abattus en 4,4 secondes	201 km/h	678 km	42 990 €
 BMW i4 eDrive 40	0 à 100 km/h abattus en 5,7 secondes	190 km/h	585 km	53 550 €

 Toyota BZ4X	0 à 100 km/h en 7,7 s	160km/h	450 km	39 900 €
---	--------------------------	---------	--------	----------

I.8.2. Facteurs influençant l'autonomie des véhicules électriques et stratégies pour optimiser l'efficacité énergétique

- Les facteurs influençant l'autonomie des véhicules électriques sont multiples et comprennent [24] :
 - Le poids total du véhicule.
 - La météo.
 - Les équipements à bord.
 - L'usure des batteries.
 - Le style de conduite.
- Stratégies pour optimiser l'efficacité énergétique des véhicules électriques [25] :
 - Climatisation.
 - Conduite économique.
 - Planification des itinéraires.
 - Mobilité durable.
 - Maison connectée.
 - Recharge intelligente.
 - Mises à jour logicielles.
 - Entretien régulier.

I.9. Infrastructure de Recharge

L'infrastructure des stations de recharge est un élément vital dans le développement du marché des voitures électriques. À l'heure actuelle, la majorité des stations de recharge publiques en Europe (62%) se trouvent en Allemagne, aux Pays-Bas, en France, en Espagne et

en Angleterre. Tout comme les voitures traditionnelles nécessitent du carburant, les voitures électriques ont besoin de se recharger en électricité. Il existe deux options de recharge [26] :

I.9.1. Bornes de Recharge Publiques

Ces stations sont principalement situées dans les parkings publics, le long des routes et à proximité des commerces. Elles offrent la possibilité de recharge lente, semi- rapide ou rapide, selon le type de courant utilisé. La recharge depuis ces stations est plus sûre et offre des courants plus élevés, réduisant ainsi le temps de recharge. [26]

Les stations de recharge peuvent être classées selon trois critères :

- Type de prise
- Mode de recharge
- État de la recharge (comprenant les différentes configurations de recharge possibles)

À l'heure actuelle, il y a 6 variétés de prises électriques, avec les détails principaux présentés dans (la figure. I.14) [26]

	Recharge lente	Recharge semi-rapide	Recharge rapide	Disponible en Europe
Type 1	●			Japon
Type 2	●	●	● (CA ⁽¹⁾)	●
Type 3	●	●		●
Type 4			● (CC ⁽¹⁾)	●
Domestique	●			●
Combo coupler			●	en développement

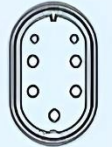
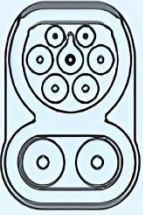
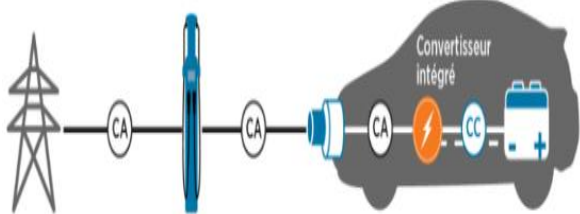
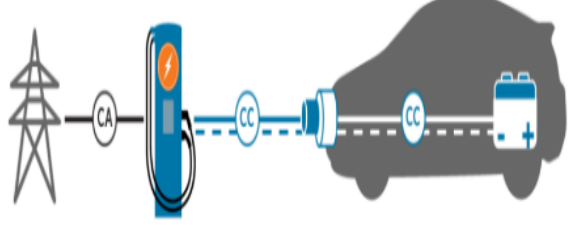
	T1 Type 1	T2 Type 2	T3 Type 3	T4 Type 4	Do Domestique	Combo Coupler
Socle de prise						
	YAZAKI	MENNEKES	EV Plug Alliance	CHADEMO		
Puissance	3 à 7kW AC (monophasé)	3 à 43kW AC (triphasé)	3 à 22kW AC (triphasé)	50kW DC	3kW AC (monophasé)	3 à 43 kW AC (triphasé) 150 kW DC
Mode de charge	Mode 3	Mode 3	Mode 3	Mode 4	Mode 1 et 2	Mode 3 (AC)
Application	Véhicule	Véhicule & infrastructure	Infrastructure	Véhicule	Infrastructure	Véhicule
Obturbateurs	Non	Non	Oui	Non	Oui	Non

Figure.I.14 : Types de socles de prise et caractéristiques principales [26]

Les bornes de recharge pour véhicules électriques se divisent en deux types principaux : Les bornes en courant alternatif (AC) et celles en courant continu (DC), (Le tableau I.4) suivant illustre la différence entre eux

Tableau.I.4 : La différence entre les stations de recharge générales AC et DC.

Borne de recharge (AC)	Borne de recharge DC
<i>Les bornes de recharge en courant alternatif (AC) sont les plus répandues et les moins coûteuses. Elles permettent de recharger la batterie à une vitesse moyenne de 6 à 8 kilomètres par heure, ce qui signifie qu'il faudrait environ 20 à 25 heures pour recharger complètement la batterie d'une voiture parcourant environ 160 kilomètres.</i>	<i>Les bornes de recharge DC offrent une recharge rapide, idéale pour les trajets longue distance, mais elles sont plus volumineuses, coûteuses à produire et nécessitent une intensité élevée du réseau électrique. Elles permettent de recharger un véhicule électrique à 80 % en une trentaine de minutes seulement, avec une vitesse de recharge de 200 kilomètres par heure.</i>
	

(Figure.I.15) l'image illustre la différence entre les courbes de charge en courant alternatif (AC) et en courant continu (DC).

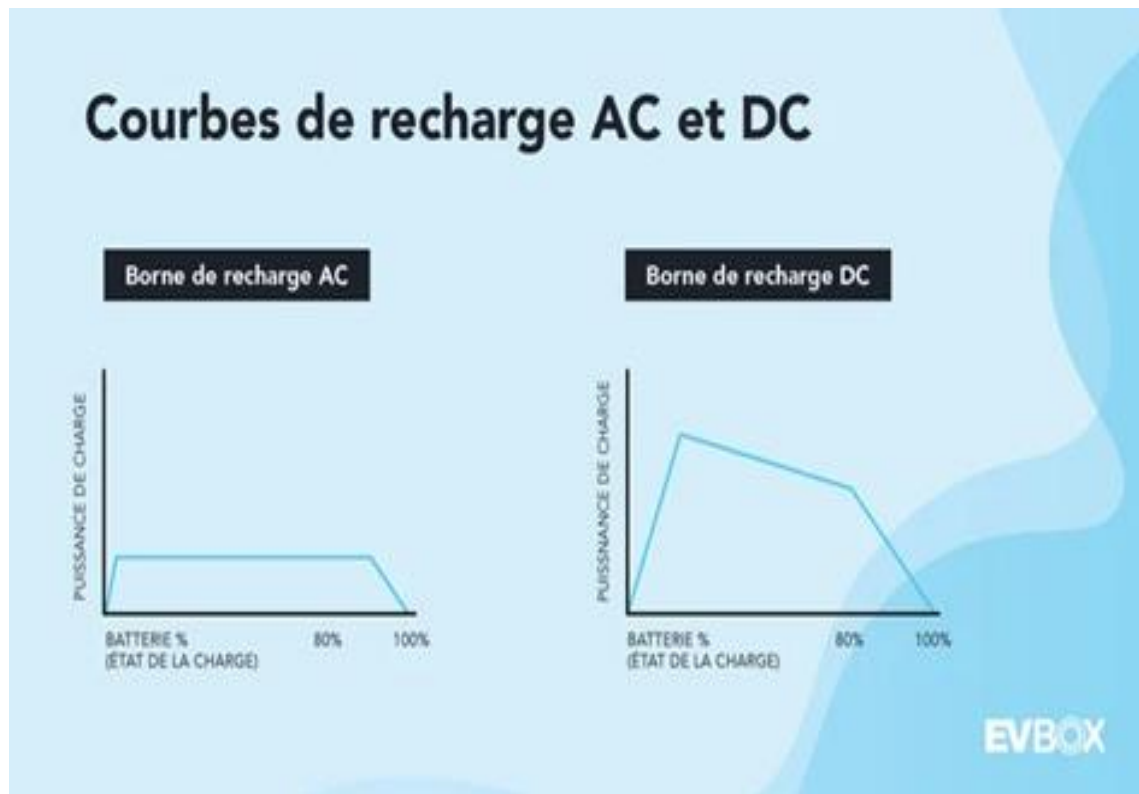


Figure.I.15 : Courbes de recharge AC et DC [27]

D'après cette figure, nous avons remarqué que la recharge de la batterie par la borne DC est légèrement plus rapide que par la borne AC.

I.9.2. Bornes de recharge à domicile

La recharge des véhicules électriques à domicile est considérée comme une solution essentielle pour en favoriser une plus large diffusion. Cela se fait en utilisant la prise électrique standard dans les maisons avec les câbles fournis avec la voiture, ou en utilisant des "unités de recharge murales". Cependant, la capacité disponible via les câbles fournis avec la voiture peut être limitée. La recharge à domicile rencontre plusieurs défis tels que la durée de charge, les problèmes de connexion et les processus d'installation, entre autres. [26]

Par conséquent, consulter les conseils d'administration des immeubles qui ont réussi à installer une infrastructure de recharge de véhicules électriques dans leurs bâtiments est une étape cruciale pour promouvoir les solutions de recharge à domicile. En communiquant avec les personnes ayant de l'expérience dans ce processus, vous pouvez obtenir des conseils précieux et partager des expériences, facilitant ainsi le processus d'installation et augmentant votre compréhension des défis et des exigences liés à la fourniture de solutions de recharge à domicile. Ainsi, ces expériences peuvent être une source d'inspiration pour améliorer et

développer des modèles de recharge dans d'autres bâtiments, contribuant ainsi à promouvoir la transition vers une énergie propre et durable dans la société. [28]

I.9.3. Défis et opportunités liés à l'extension et à l'amélioration de l'infrastructure de recharge pour les véhicules électriques

✓ Défis [29] :

- **Densité insuffisante** : Le manque de bornes de recharge dans les villes et les zones rurales limite l'intérêt pour les véhicules électriques.
- **Charge et puissance limitées** : Certains modèles de bornes ne fournissent pas assez de puissance, notamment pour les longs trajets.
- **Coûts d'installation et de maintenance** : Les coûts élevés associés à l'installation et à l'entretien des bornes peuvent freiner le déploiement de l'infrastructure.
- **Intégration des énergies renouvelables** : L'intégration des énergies renouvelables dans les bornes de recharge peut poser des défis, augmentant la dépendance aux réseaux traditionnels.

✓ Opportunités [30] :

- **Marché en croissance** : L'augmentation de la demande pour les véhicules électriques offre de grandes opportunités pour les acteurs du secteur.
- **Synergies entre acteurs** : La collaboration entre les secteurs public et privé pourrait accélérer le déploiement de l'infrastructure.
- **Normalisation et interopérabilité** : La normalisation des bornes et des standards communs faciliterait l'adoption des véhicules électriques.
- **Technologies innovantes** : L'introduction de technologies innovantes comme les bornes ultra-rapides et intelligentes pourrait améliorer l'expérience des conducteurs.
- **Financement et soutien institutionnel** : Les gouvernements et autres organismes soutiennent activement le déploiement de l'infrastructure de recharge.

I.10. Tendances du Marché et Taux d'adoption

Une analyse des tendances mondiales et régionales révèle plusieurs points significatifs

I.10.1. Tendances du Marché Mondiales et Régionales

a. Tendances du Marché Mondiales

- Les tendances actuelles du marché des véhicules électriques montrent une croissance significative à l'échelle mondiale et régionale. À l'échelle mondiale, le marché des véhicules électriques devrait atteindre 693,70 milliards de dollars d'ici 2030, avec un taux de croissance annuel composé de 17,3%. [31]
- En Europe, les ventes de voitures électriques ont augmenté de manière remarquable, avec des pays comme la Norvège, l'Islande, la Suède, le Danemark et la Finlande montrant des taux d'adoption élevés, contribuant à l'essor de la mobilité électrique. [32]
- En France, le marché des véhicules électriques est en pleine effervescence, passant de 11% à 22% de parts de marché entre 2020 et 2022, avec une augmentation significative des immatriculations et une forte intention d'achat pour les véhicules hybrides rechargeables et hybrides. Les ventes de véhicules électriques en France ont augmenté de manière remarquable, passant de 185 499 en 2020 à 459 212 en 2022. [33]

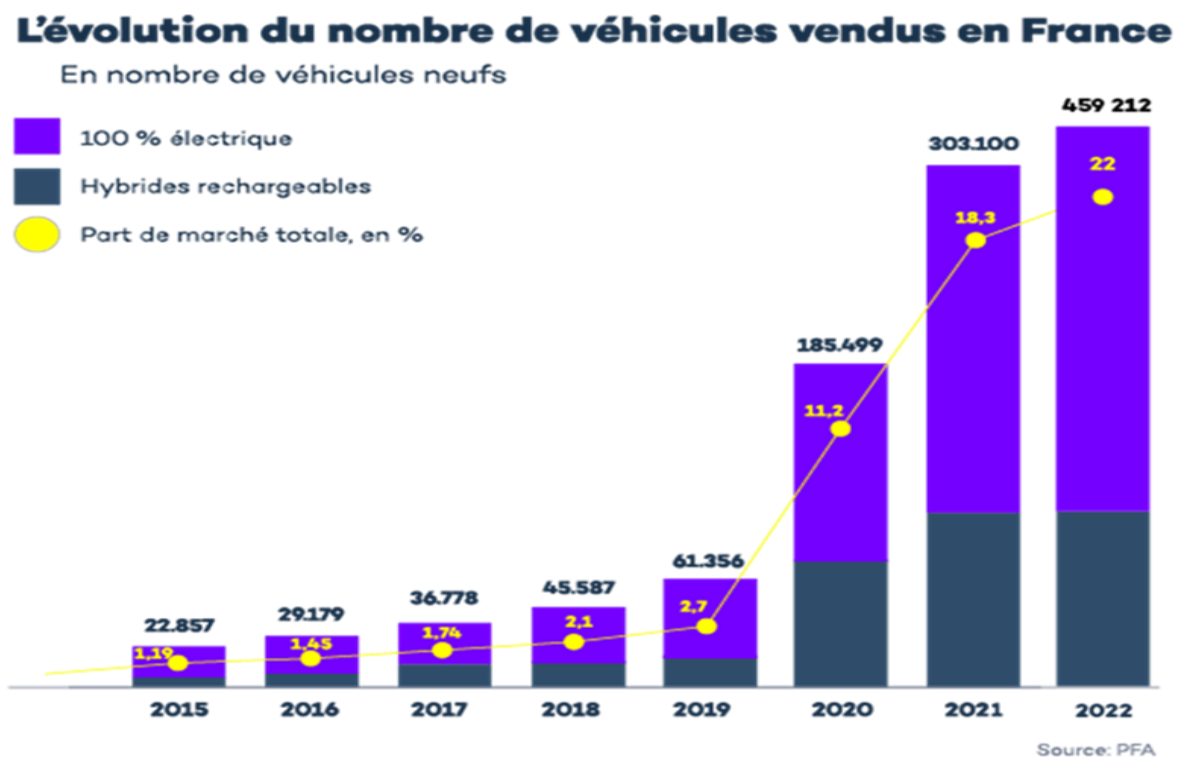


Figure. I.16 : L'évolution du nombre de véhicules vendus en France [33]

b. Tendances du Marché Régionales

- Les tendances actuelles du marché des véhicules électriques à l'échelle régionale montrent une croissance significative, avec des projections futures prometteuses. En Europe, le

marché des véhicules électriques devrait dépasser 383 789,43 millions de dollars d'ici 2030, contre 141 848,91 millions de dollars en 2022. [34]

- . En Asie-Pacifique, notamment en Chine, le marché des véhicules électriques est en plein essor, avec des projections de croissance importantes. La Chine devrait atteindre 305,57 milliards de dollars en 2024 et croître à un TCAC de 17,15 %. [35]
- . Les marques chinoises dominent les ventes de véhicules électriques dans de nombreux pays d'Asie du Sud et d'Amérique du Sud, soulignant l'impact croissant de la Chine sur le marché mondial des véhicules électriques. [36]
- Selon les résultats de recherche, les ventes de véhicules électriques aux États-Unis ont augmenté de 50% en 2023 [37], Le marché des véhicules électriques à haute performance aux États-Unis est en train de croître à un taux de croissance annuel composé de plus de 15% jusqu'en 2027. [35]
- L'adoption des véhicules électriques en Afrique reste limitée en raison de défis tels que les coûts initiaux élevés et le manque d'infrastructures. Cependant, des startups locales commencent à produire des véhicules adaptés aux routes africaines pour stimuler l'adoption.

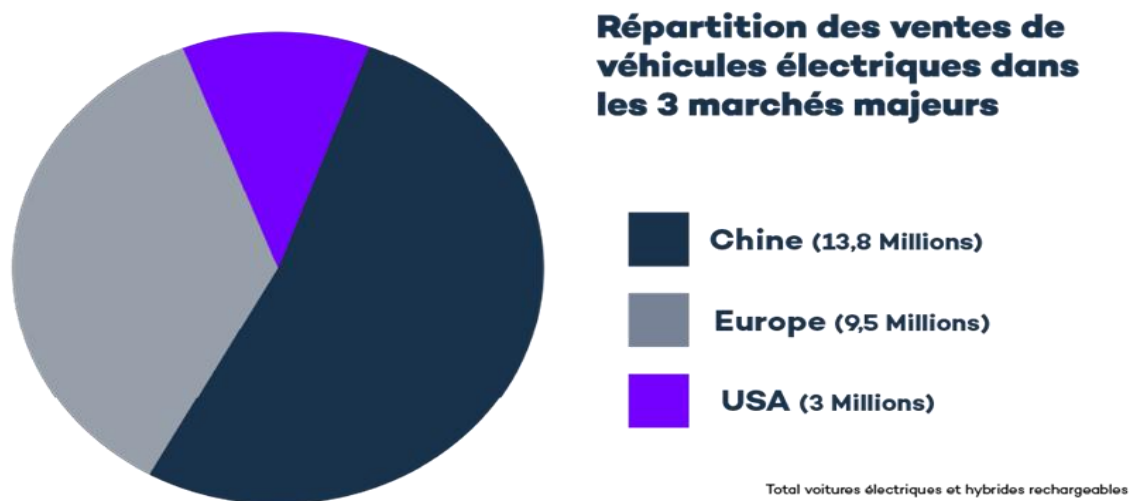


Figure.I.17 : Répartition des ventes de véhicules électriques dans les 3 marchés majeurs [33]

Ce (tableau. I.5) permet de visualiser rapidement les variations entre les modèles de VE proposés par divers fabricants dans le monde.

Tableau.I.5 : La différence entre les véhicules électriques mondiaux. [37]

Fabricant	BMW (BMW i3)	Tesla Chine (Tesla modèle 3)	GAC Honda (Honda : NP1)	SAIC Volkswagen (VW ID3)
Année modèle	2023	2023	2023	2023
Capacité de la batterie (kWh)	78.92	60	53.6	52.8
Portée (km)	592	554	420	450
Puissance du moteur (KW)	250	194	134(128Ps)	125
Modèle de conduite	Propulsion	Propulsion	FWD	Propulsion
Accélération(s) de 0 à 100 km/h	5.6	6.1	5.92	3

I.11. Défis et Obstacles à l'Adoption Généralisée des VE

- Coût élevé : Le prix des véhicules électriques reste un obstacle majeur pour de nombreux consommateurs.
- Autonomie limitée : Malgré les progrès, l'autonomie des batteries reste inférieure à celle des véhicules à essence.
- Manque d'infrastructures de recharge : L'insuffisance des bornes de recharge publiques peut dissuader les acheteurs potentiels.
- Dépendance aux subventions : La nécessité de subventions gouvernementales pour rendre les véhicules électriques plus attractifs financièrement. [38]

I.12. Conclusion

Plusieurs aspects importants ont été discutés dans ce chapitre, commençant par l'histoire et l'évolution des voitures électriques, passant par leur conception et leurs différentes variétés, et allant jusqu'aux technologies de chargement qui leur sont associées. L'importance de l'infrastructure de chargement a été soulignée pour permettre une utilisation plus efficace de ces voitures. De plus, l'accent a été mis sur les progrès technologiques continus dans ce domaine, qui jouent un rôle majeur dans l'impact positif sur l'environnement et l'économie, entraînant ainsi une augmentation de la diffusion des voitures électriques dans le monde entier.

CHAITRE II

Modélisation des organes du véhicule électrique

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons la modélisation des organes de véhicules électrique, qui sont utilisées pour prédire le comportement de la voiture dans différentes situations, améliorant ainsi sa conception, réduisant les coûts de développement et identifiant les problèmes potentiels.

Ces techniques permettent de créer une représentation mathématique du système, en prenant en compte les différents composants tels que la batterie, le moteur électrique et le système de transmission, etc.

II.2. Les batteries

Les batteries constituent l'élément-clé limitatif du développement des véhicules électriques et hybrides. Une batterie ou une batterie d'accumulateurs, est un ensemble d'accumulateurs électrochimiques reliés entre eux de façon à créer un générateur de courant continu de capacité et de tension données. Ces accumulateurs sont parfois appelés éléments de la batterie ou cellule. En fonction du nombre de cellules choisi et de leur agencement (série, parallèle ou série-parallèle), nous avons la possibilité d'avoir la configuration de batterie désirée en termes de tension en sortie et de capacité.

II.2.1. Différents types de Batteries

a. Batterie plomb

La batterie au plomb est la plus ancienne et la moins coûteuse des technologies de batteries. Inventée en 1859 par le français Gaston Planté et améliorée en 1881 par le luxembourgeois Henri Owen Tudor, elle a été rendue plus robuste et efficace en remplaçant les feuilles de plomb immergées dans de l'acide sulfurique par des plaques de plomb recouvertes d'une pâte active. Pendant la charge, cette batterie libère de l'oxygène et de l'hydrogène. Comme la boîte n'est pas totalement hermétique, la batterie doit être maintenue à plat et le niveau d'eau doit être régulièrement vérifié. De plus, les vapeurs et/ou projections d'acide sulfurique peuvent provoquer de la corrosion si la batterie n'est pas entretenue (avec de l'eau et du bicarbonate de soude). Ce type de batterie supporte très mal la décharge complète et la surcharge ; elles sont conçues pour rester chargées en permanence. [39]

Le fonctionnement de la batterie repose sur la réaction d'oxydoréduction suivante :



décharge ← / *Charge* →

PbO₂ est l'électrode positive pôle (+), Pb l'électrode négative pôle (-) tant qu'en charge ou en décharge, son électrolyte est de l'acide sulfurique (H₂SO₄)

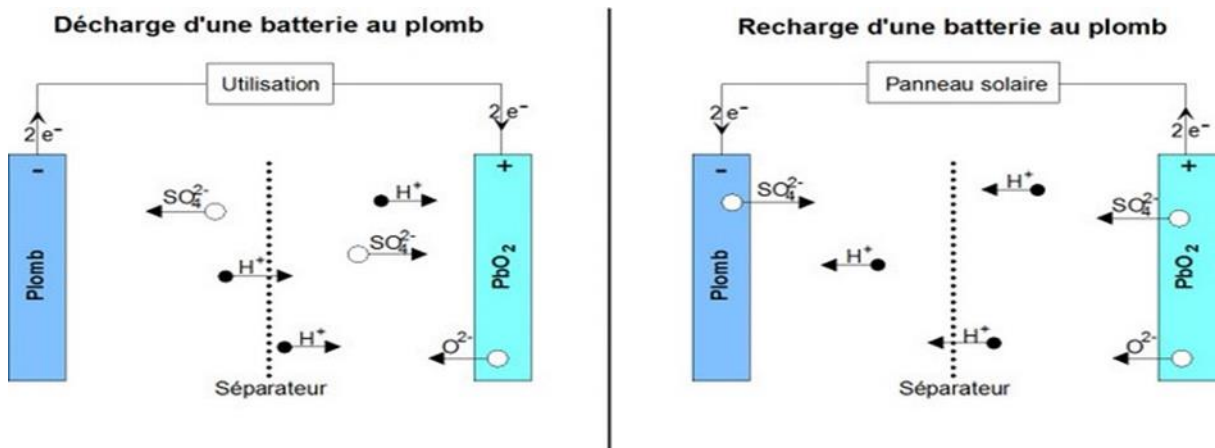


Figure .II.1 : Recharge et décharge d'une batterie au plomb [39]

b. Batterie Lithium-Ion (Li-Ion)

Même si le concept était connu dès les années 1980, les premières batteries rechargeables au lithium n'ont été commercialisées qu'en 1991. Cette situation était due à l'instabilité du lithium métallique lors de la charge, un problème résolu en utilisant des ions de lithium. Les batteries au lithium-ion (Li-ion) ne représentent pas de danger si elles sont correctement chargées, mais elles peuvent surchauffer voire exploser si elles sont chargées dans des conditions inappropriées. Pour pallier ce risque, la plupart des fabricants équipent leurs batteries de circuits de protection. Malgré leur faible taux de décharge dans le temps et l'absence d'effet mémoire, les batteries Li-ion offrent une densité énergétique élevée (environ le double de celle des batteries Ni-Mh), mais leur durée de vie est généralement plus courte que celle des batteries Ni-Mh. [39]

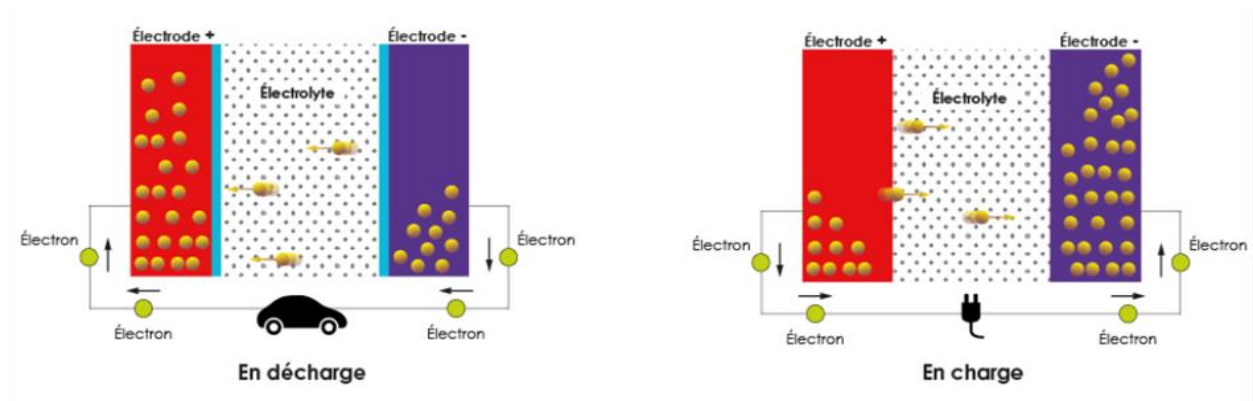


Figure .II.2 : Schéma fonctionnement batterie lithium [39]

II.2.2. Comparaison entre les différents types de batteries

Dans le (tableau.II.1) une Comparaison entre les différents types de batteries est réalisé :

Tableau.II.1 : Comparaison entre les différents types de batteries [40]

	Plomb Acide	Ni/Cd	Ni/MH	Li ion	Li polymère
Energie massique [Wh/kg]	30-50	45-80	60-110	150-190	150-190
Puissance massique [W/kg]	90	200	220	220-330	220-330
Nombre de cycle (charge/décharge)	400-1200	2000	1500	500-1000	200-300
Température opératoire [°C]	-20 à 60	-40 à 60	-20 à 60	-20 à 60	0 à 60
Tension nominale d'une cellule [V]	2	1.2	1.2	3.9	3.7
Prix en €/kWh	200 à 250	600	1500 à 2000	2000	1500 à 2000

Cette la (figure.II.3) présente une comparaison entre différents types de batteries et de supercondensateurs en termes d'énergie spécifique (Wh/kg) et de puissance spécifique (W/kg).

Les données illustrent la variation des performances entre les différentes technologies de stockage d'énergie.

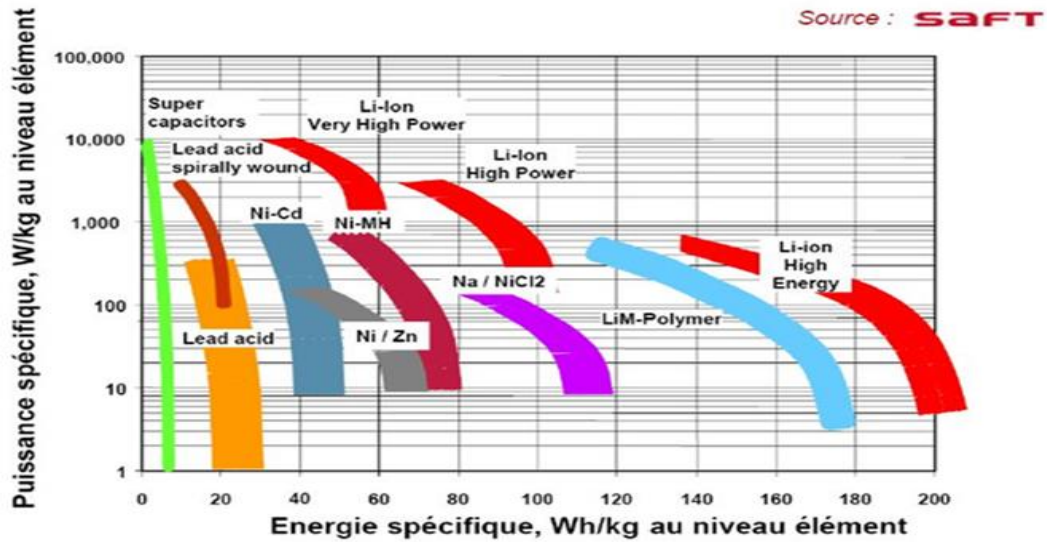


Figure.II.3 : Diagramme de ragone des batteries [41]

Les données indiquent que les batteries lithium-ion offrent un bon équilibre entre l'énergie et la puissance spécifique par rapport aux autres technologies.

II.2.3. Modèle électrique

Le schéma électrique équivalent (figure.II.4) est largement préféré en raison de sa facilité de mise en œuvre par rapport à d'autres méthodes. Il comprend une source de tension variable en fonction de l'état de charge V_{oc} , une résistance R_0 pour représenter les effets résistifs, ainsi qu'un condensateur C_n en parallèle avec une résistance R_n , où n est l'ordre du filtre, pour capturer les effets de polarisation transitoires. Les caractéristiques propres à la cellule étudiée sont répertoriées dans le (tableau.II.2), fournies par "Allcell Technologies" pour une cellule similaire à celle utilisée dans le chapitre précédent. La résistance en courant continu de la cellule est égale à la somme des éléments résistifs du (tableau.II.2). [42]

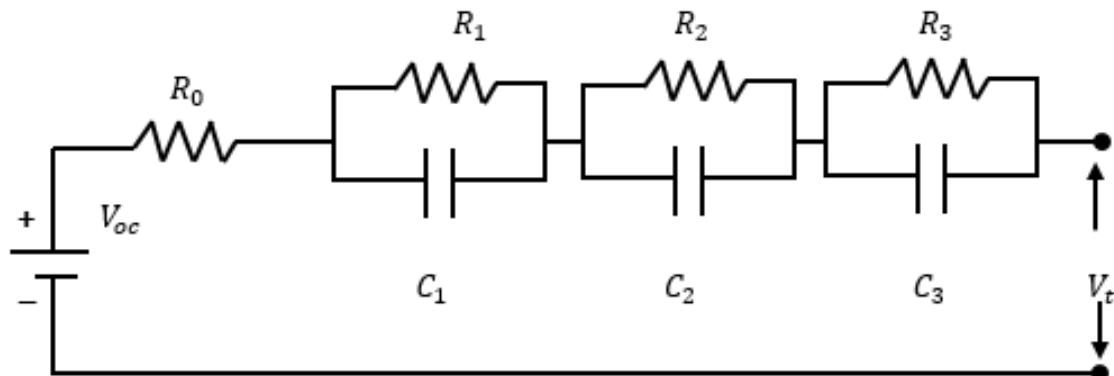


Figure.II.4 : Modèle de circuit électrique équivalent [42]

Le (tableau.II.2) donner Paramètres du modèle électrique

Tableau.II.2 : Paramètres du modèle électrique.

Paramètre	Résistance [Ω]	Paramètre	Capacité [F]
R0	0.0365	-	-
R1	0.021	C1	16841
R2	0.024	C2	1755
R3	0.032	C3	281208

La tension de polarisation de chaque paire RC est donnée par (l'équation II.2) alors que la chute de tension de la résistance directe R_0 est donnée par la loi d'Ohm (eq. II.2).

$$V_{DC} = R_0 I_{cell} \quad (II.2)$$

$$v_n = \frac{-V_n}{R_n C_n} + \frac{I_{cell}}{C_n} \quad (II.3)$$

Puisque le modèle est programmé dans l'environnement MATLAB/Simulink®, l'équation (II.4) doit être transformée en sa fonction de transfert dans le domaine de Laplace :

$$V_n = \frac{R_n}{R_n C_n s + 1} I_{cell} \quad (II.4)$$

Le niveau de charge SOC (State Of Charge) d'une cellule est le rapport entre la quantité de charge disponible et la capacité totale de la cellule Q_{cell} exprimée en Coulombs. La quantité de charge disponible est déterminée par l'intégrale du courant I_{cell} , en tenant compte de son signe.

La tension nominale de la cellule V_{oc} est déterminée en interpolant le SOC (état de charge) le long de la courbe de décharge représentée dans la (figure.II.4). Dans ce modèle, La réduction de la capacité à basse température est négligeable, car celui-ci est prévu pour fonctionner entre 0 et 60°C.

En utilisant le SOC au lieu de la capacité [Ah] de la cellule comme référence pour l'interpolation de V_{oc} , la relation devient indépendante de la capacité totale de la cellule. Par conséquent, la tension instantanée mesurée aux bornes de la cellule est donnée par (l'équation.II.5). [42]

$$v_t = v_{oc} + \sum_{n=1}^{nRC} v_n + v_{DC} \quad (II.5)$$

La (figure.II.4) analyse la réponse de chaque composant du circuit équivalent à un échelon de courant constant de 10 secondes. Les paramètres utilisés pour construire le modèle proviennent de données spécifiques. Le graphique de la (figure .II.4) illustre la tension de circuit ouvert V_{oc} , qui dépend de l'état de charge, ainsi que la tension de sortie totale V_t .

Dans la (figure.II.4), il est remarqué que la chute de tension V_0 due à la résistance R_1 , R_2 , R_3 reste constante pendant toute la durée de l'échelon de courant constant. Les chutes de tension V_1 , V_2 , , et V_3 , sont provoquées par le passage du courant à travers les résistances R_1 , R_2 , R_3 et la charge lente des condensateurs C_1, C_2, C_3 .

La résistance interne corrigée R_0^* est déterminée en ajustant la résistance directe R_0 à l'aide d'un facteur de correction f_{DCIR} , afin de prendre en compte les différents états de la cellule, comme indiqué dans (l'équation.II.6) [42] :

$$R_0^* = R_0 \cdot f_{DCIR}(SOC, T) \quad (II.6)$$

II.2.4. Modélisation de la batterie

La modélisation des accumulateurs s'avère un outil essentiel pour comprendre et prédire leur fonctionnement dans un système aussi délicat que les HEVs et EVs. Elle aide à développer des outils théoriques et pratiques nécessaires pour la compréhension et la caractérisation des accumulateurs, siège de différents phénomènes électrochimiques complexes. Ce modèle doit s'adapter à n'importe quel profil de charge sur une large variation du SOC de l'accumulateur et à différentes températures de fonctionnement. On distingue trois types de modélisations sont: [43]

➤ Boîte Blanche

Il s'agit des modèles physico-chimiques. Ce sont les modèles les plus précis et les plus utilisés par les concepteurs d'accumulateurs pour optimiser les performances d'un accumulateur. Toutefois, ils sont également les plus lents et les plus difficiles à configurer (paramètres basés sur la connaissance de la structure, la chimie, la composition, la capacité, la température, et d'autres caractéristiques de l'accumulateur). [43]

➤ Boîte noire

Il s'agit des modèles empiriques consistant à établir une relation directe entre les conditions d'usage et les performances de l'accumulateur (capacité, énergie, ...). Ces modèles sont les plus faciles à configurer mais sont difficilement extrapolables. Les paramètres utilisés n'ont pas de

signification physique, ce qui limite sérieusement l'analyse du comportement de l'accumulateur, ce dernier est décrit par des relations sans aucun lien direct avec les phénomènes physico-chimiques qui s'y déroulent. Par conséquent, l'interprétation physique des résultats demeure difficile. [43]

➤ **Boîte grise**

Il s'agit en particulier de la modélisation des accumulateurs par des circuits électriques équivalents (CEEs) qui constitue un outil essentiel pour les professionnels du génie électrique. De tels circuits permettent de traduire le comportement électrique fréquentiel et temporel des accumulateurs. Grâce à l'analogie entre les différents domaines de la physique-chimie et le domaine de l'électricité, les circuits électriques peuvent, sous certaines conditions de linéarité, approcher les différents phénomènes physico-chimiques présents dans un accumulateur au moyen d'éléments passifs (résistances, capacités, inductances) et actifs (force électromotrice, source de courant...). [43]

A. Etat de l'art sur le modèle de la batterie utilisé

Dans [44], Olivier Tremblay et Louis-A. Dessaint sont présente une modèle dynamique de la batterie améliorée et facile à utiliser. La dynamique du cette modèle est validée expérimentalement avec quatre types de batteries (NiMH, NiCd, plomb et lithium-ion) pendant la charge et la décharge. Une caractéristique intéressante de ce modèle est la simplicité pour extraire les paramètres des modèles dynamiques à partir de datasheets (les fiches techniques) des batteries.

Seuls trois points sur la courbe de décharge du fabricant dans l'état d'équilibre sont nécessaires pour obtenir les paramètres du modèle. Le modèle de la batterie est inclus dans le logiciel de simulation SIM Power Systems (Matlab) et utilisé en détail dans une simulation d'un véhicule électrique sur la base d'une source d'énergie hybride d'une pile à combustible et d'une batterie. Olivier Tremblay et Louis-A. Dessaint sont montrés que cette modèle peut représenter précisément le comportement dynamique de la batterie.

Ahmad Darabi et al dans [45] sont utilisé un nouveau modèle basé sur l'équation mathématique de Shepherd pour la modélisation de la banque de la batterie dans le système de stockage d'énergie. Ils sont dits que selon les données de l'entreprise, les résultats de simulation montrent que ce modèle est correct.

Dans [46] S. Wijewardana est présentée une modèle dynamique de la batterie appropriée pratique, qui peut être utilisé pour modéliser un système général de stockage de batterie (battery storage) BS. Le modèle proposé est un nouveau modèle dynamique modifiée (basé sur le modelé de Shepherd modifiée) de la batterie acide au plomb compte tenu de l'effet de la température et les effets du cycle de la charge et de la décharge. Simulink a été utilisé pour étudier les caractéristiques du système et le système proposé est être prouvé très efficace car les résultats de simulation ont été très bons.

Dans [47] Sergei Melentjev et Deniss Lebedev sont utilisé le modèle de Shepherd modifier et ils ont fait la simulation de trois technologies des batteries .ils ont conclure que les paramètres de la batterie doivent être calculés en fonction de la mesure réelle, et non sur les données du fabricant. Certains fabricants fournissent des données inexactes, et certains paramètres non conventionnels sont estimés juste à peu près. Pour être en mesure de tirer pleinement parti du modèle, la détérioration du cycle de vie devrait être introduite, ainsi que les effets de la température.

P.Vyroubal et al dans [48] sont utilisé le modèle existe dans Simulink (Mtlab 2012) et compare le résultat de simulation, datasheet et le mesures réelles de la batterie en lithium – ion dans la phase de décharge avec deux taux du courant de décharge déférentes 0.2C et 0.5C. Ils ont trouvé que cette modèle représente correctement la caractéristique de la décharge de la batterie lithium-ion.

Dans [49] le travail d'Essam M. Allam porte sur les caractéristiques et les spécifications relatives au système de surveillance de la batterie. Le système de surveillance de la batterie développé est utilisé pour empêcher les gens d'être bloqués. Cet appareil fait en sorte que peu importe ce que, une voiture sera en mesure de démarrer et qu'une personne ne sera pas laissé avec une batterie morte. Il est présenté le modèle de la batterie qui été réalisé dans les logiciels Matlab / Simulink. Le bloc de la batterie implémente un modèle dynamique générique paramétré pour représenter les types les plus populaires de batteries rechargeables. Dans ce cas, les paramètres du modèle de la batterie ne sont pas exactement les mêmes que celles de la batterie électrique du véhicule, mais il est néanmoins possible d'étudier avec une bonne précision les phénomènes causés par la batterie.

Ce modèle permet de développer le système de gestion de l'énergie (EMS) qui contrôle le flux d'énergie entre les panneaux solaires et la batterie par exemple. Il est possible de contrôler la charge et la décharge de la batterie avec une précision. Les résultats qu'ils sont l'obtenus montrent que l'utilisation de ce modèle permet de représenter correctement les états

transitoires, et montrer que ce modèle représente avec précision le comportement général de la batterie.

B. Modèle de Shepherd

Shepherd développe une équation pour décrire le comportement électrochimique de la batterie directement avec les termes suivants: la tension terminale, la tension du circuit ouvert la résistance interne, le courant de décharge et l'état de charge, ce modèle est appliqué à la décharge et à la charge.

Le modèle de Shepherd est intéressant mais cause un problème de boucle algébrique (algebraic loop) dans la simulation en boucle fermée du modèle modulaire [50].

[51] Alors que la version modifiée du modèle de Shepherd utilisé dans [50] consiste à utiliser la polarisation de tension au lieu de polarisation de résistance pour enlever le problème de la boucle algébrique dû à la simulation des systèmes électriques dans Simulink. Il est validé dans l'état permanent (courant constant) mais ce modèle produit des résultats faux lorsque le courant varie.

Le modèle proposé par [52] est le même modèle disponible dans Matlab-Simulink R2013

C. Le modèle de décharge

Le modèle de décharge est similaire au modèle de Shepherd mais il peut représenter avec précision la tension dynamique lorsque le courant varie et tenir compte la tension de circuit ouvert (OCV) en fonction du SOC. Un terme concernant de la polarisation de tension est ajouté, pour mieux représenter le comportement de l'OCV et le terme concernant la polarisation de la résistance est légèrement modifié. La tension de la batterie est donnée par l'équation suivant:

$$V_{batt} = E_0 \underbrace{-K \frac{Q}{Q-it}}_{\text{Pol. Tension}} \cdot it - R \cdot I + \underbrace{A \cdot \exp(-B \cdot it)}_{\text{Pol. Résistance}} - K \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* \quad (\text{II.2})$$

La particularité de ce modèle est l'utilisation du courant filtré (i^*) à travers la résistance de polarisation. Ce courant filtré résout le problème de la boucle algébrique dû à la simulation des systèmes électriques dans Simulink. Enfin, la OCV varie non linéairement avec le SOC. Ce phénomène est modélisé par le terme de la polarisation de tension.

D. Les équations charge /décharge de ce modèle dans Matlab Simulink 2013b

Le block da la batterie implémente le modèle dynamique paramétré qui représente différents types des batteries rechargeables :

- Modèle au plomb
- Modèle au Lithium-ion
- Modèle Nickel-Cadmium
- Modèle Nickel-Métal-Hydrure

Le modèle général de la charge et de la décharge est de cette forme :

$$E_{charge} = f_1(it, i^*, exp, type\ de\ batt)$$

$$Et \quad E_{décharge} = f_2(it, i^*, exp, type\ de\ batt)$$

Tels que E_{charge} et $E_{décharge}$ sont fonction de it , i^* , exp (la zone dynamique exponentiel (V) et $batt\ type$ (type de la batterie).

La (figure .II.5) montre le circuit électrique équivalent de la batterie dans Matlab Simulink

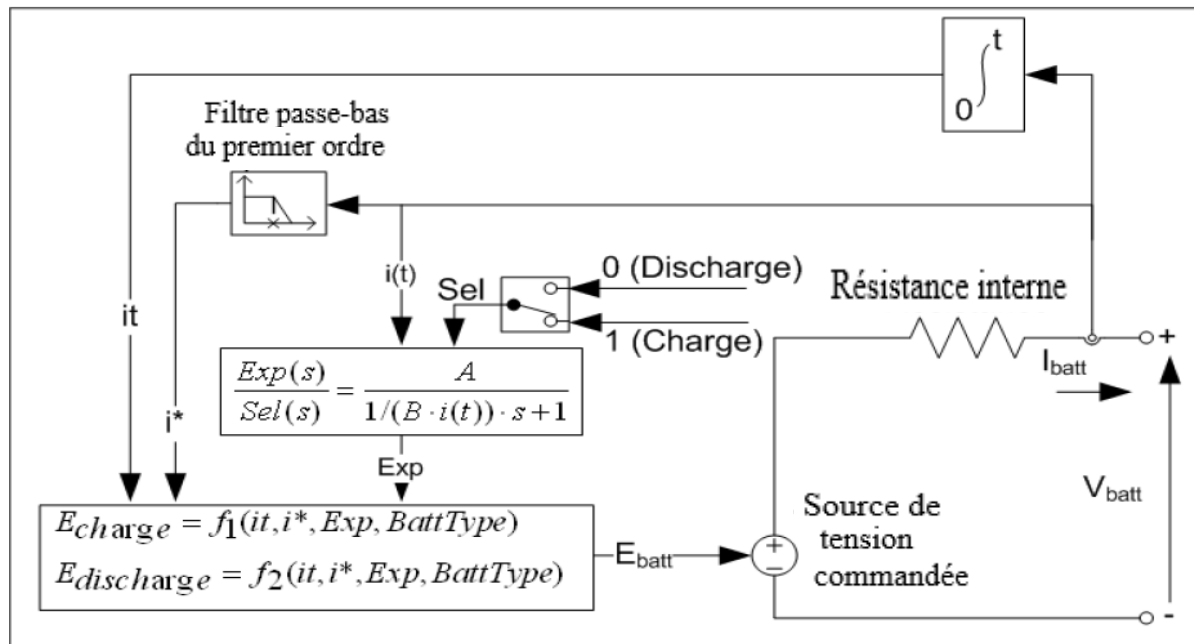


Figure. II.5 : Modèle de charge/ décharge de la batterie

Dans la (figure .II.5), $Exp(s)$ est la zone dynamique exponentielle (V), $Sel(s)$ représente le mode de la batterie. $Sel(s) = 0$ pendant la décharge de la batterie, $Sel(s) = 1$ pendant la charge de la batterie et E_{batt} est la tension non linéaire de la batterie (V).

$Exp(s)/Sel(s)$ c'est la fonction de transfert qui représente le phénomène d'hystérésis pour les batteries au Plomb, NiMH et NiCd pendant les cycles de la charge et de la décharge.

La tension exponentielle augmente lorsque la batterie est chargée et diminue immédiatement lorsque la batterie est déchargée.

Nous avons utilisé la batterie au plomb ce choix correspond aux batteries qui sont disponibles dans notre laboratoire de commande, afin de comparer les résultats théoriques et expérimental.

a) Le modèle de la batterie au plomb

✓ Modèle de charge ($i^* < 0$)

$$f_1(i_t, i^*, \exp, \text{type de batt}) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{i_t - 0.1Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{i_t - Q} \cdot i_t + \exp(t)$$

✓ Modèle de décharge ($i^* > 0$)

$$f_2(i_t, i^*, \exp, \text{type de batt}) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{i_t - Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{i_t - Q} \cdot i_t + \exp(t)$$

Ce modèle se base sur des hypothèses et possède des limitations.

➤ les hypothèses

- ✚ La résistance interne est supposée constante pendant les cycles de charge et de la décharge, elle ne varie pas avec l'amplitude du courant.
- ✚ Les paramètres du modèle sont déduits à partir des caractéristiques de la décharge et supposés les mêmes pour la charge.
- ✚ La capacité de la batterie ne change pas avec l'amplitude du courant (pas d'effet du Peukert).
- ✚ Pas d'effet de la température dans le comportement du modèle.
- ✚ L'autodécharge de la batterie n'est pas représentée.
- ✚ Pas d'effet mémoire de la batterie.

➤ Les limitations de ce modèle

- ✚ Le minimum de la tension de la batterie sans charge (load) est 0 V et le maximum de celui-ci est $2 \cdot E_0$.
- ✚ Le minimum de la capacité de la batterie est de 0Ah et le maximum de la capacité est de Q.

En conséquence, le maximum de SOC ne peut pas dépasser 100% si la batterie est surchargée.

II.3. Modélisation d'hacheur

Le hacheur est un dispositif de conversion de courant continu qui permet de transformer une énergie continue à un niveau de tension (ou de courant) donné en une énergie continue à

un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation est essentielle pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries ou pour alimenter une charge continue.

Un hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans des conditions idéales, ces composants ne consomment aucune puissance active, ce qui contribue à des rendements élevés dans les hacheurs.

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui fonctionnent en régulant une grandeur d'entrée continue, soit en tension soit en courant, pour produire une sortie également continue ou avec une faible ondulation.

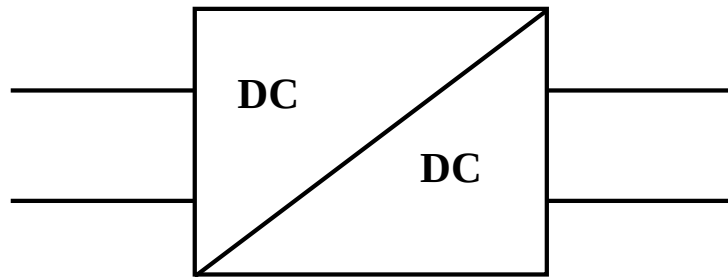


Figure.II.6 : Symbole d'un convertisseur DC/DC [53]

II.3.1. Différents types de convertisseur DC/DC

Il existe différents types de hacheurs, chacun ayant ses propres caractéristiques et applications. Les principaux types de hacheurs sont les suivants :

II.3.1.1. Hacheur série (abaisseur ou dévolteur ou buck)

Le convertisseur abaisseur est souvent appelé hacheur Buck ou hacheur série dans la littérature. La (figure.II.7) illustre le schéma de principe d'un convertisseur abaisseur. Son utilisation typique consiste à réduire la tension d'entrée V_i pour obtenir une tension de sortie V_o inférieure. Le taux de conversion varie en fonction du rapport cyclique $M = \frac{V_o}{V_i}$ de l'interrupteur. [54]

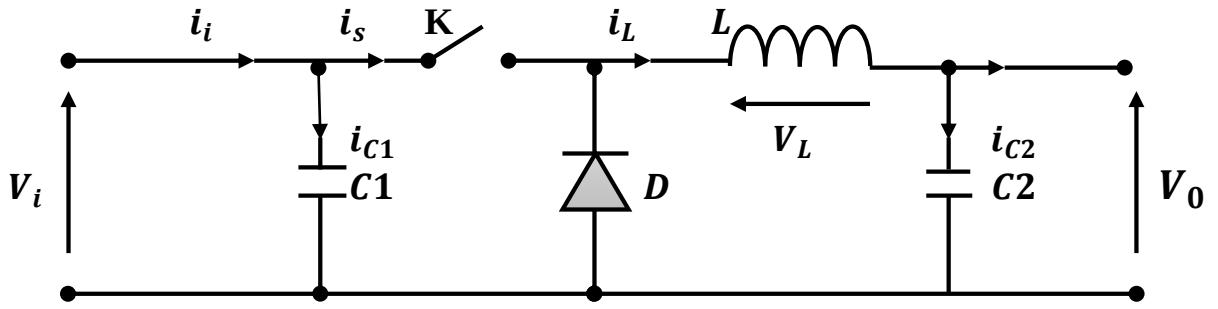


Figure.II.7 : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur [54]

➤ Principe de Fonctionnement

Lorsque l'interrupteur K_1 est fermé pendant une fraction αT de la période de commutation T , l'énergie est fournie par la source d'entrée à la charge R à travers l'inductance L . Lorsque le courant du transistor est bloqué, l'interrupteur K_2 assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie stockée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle. La tension de sortie est calculée par la relation suivante :

$$V_0 = V - V_L = V_0 = \alpha \times V_i \quad (\text{II.7})$$

Selon la définition, $0 \leq \alpha \leq 1$, ce qui signifie que le circuit réduit la tension.

V_0 ET V_i :Tension aux bornes de la charge et de la source.

➤ Modèle mathématique du convertisseur Buck

La modélisation de ce convertisseur implique l'analyse des différentes séquences de fonctionnement, supposées avoir des durées fixées par la commande u . Lorsque l'interrupteur est fermé, $u=1$, et lorsqu'il est ouvert, $u=0$. L'interrupteur contrôlable K peut être soit fermé (passant) soit ouvert (bloqué), ce qui nous permet de définir le rapport cyclique. Ce dernier, α , est défini comme le rapport entre le temps T_{on} pendant lequel l'interrupteur K est fermé et la période de fonctionnement du montage T , soit :

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T} \quad (\text{II.8})$$

De plus, le temps pendant lequel l'interrupteur K est ouvert (bloqué) est défini par :

$$T_{off} = T - T_{on} \quad (\text{II.9})$$

- Dans Le 1er temps $0 < t < \alpha T$

$$\frac{LdI_L(t)}{dt} = V_i - V_0 \quad (\text{II.10})$$

Donc
$$I_L(t) = \frac{V_i - V_0}{L} t + I_L \min \quad (\text{II.11})$$

t : tend vers
$$T_{on} = \frac{L \cdot \Delta I_L}{V_d - V_0} \quad (\text{II.12})$$

- Pour le 2^{ème} temps $\alpha T < t < T$

$$V_0 = -L \frac{dI_L(t)}{toff} = -L \frac{dI_L(t)}{1-\alpha} \quad (\text{II.13})$$

Et
$$I_L(t) = -\frac{V_0}{L} t + I_L \max \quad (\text{II.14})$$

T tend vers
$$T_{off} = (1-\alpha)T \quad (\text{II.15})$$

$$I_L \min = -\frac{V_0}{L} (1-\alpha)T + I_L \max \quad (\text{II.16})$$

$$T_{off} = \frac{L \Delta I_L}{V_0} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$$V_0 = \alpha \cdot V_i \quad (\text{II.18})$$

$$I_i = \alpha \cdot I_0 \quad (\text{II.19})$$

II.3.1.2. Hacheur parallèle (élevateur ou surélever ou boost)

Il s'agit d'un convertisseur élévateur, également connu sous le nom de "boost" ou hacheur parallèle, dont le schéma de principe est représenté dans la (figure.II.8) Son application typique consiste à augmenter la tension d'entrée pour obtenir une tension de sortie supérieure.

[53]

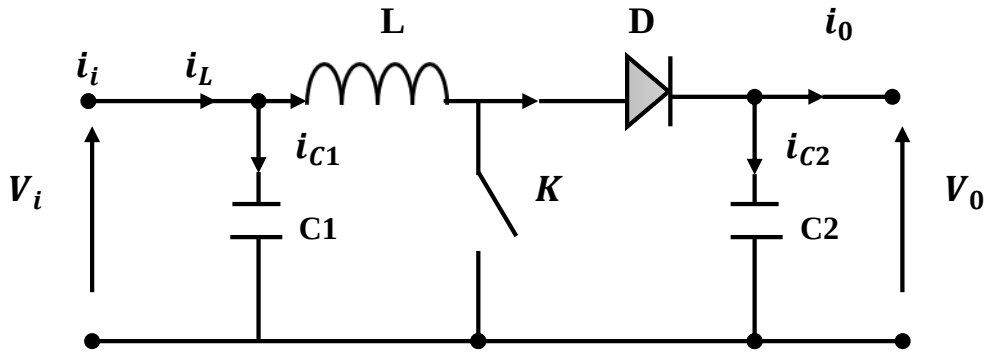


Figure.II.8 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost [54]

➤ Principe de Fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur sur élévateur (Boost) peut être divisé en deux phases distinctes. Tout d'abord, lorsqu'il est actif (en état passant), l'IGBT entraîne une augmentation du courant dans l'inductance, ce qui permet de stocker de l'énergie sous forme magnétique. Pendant cette phase, la diode D est bloquée et la charge est déconnectée de l'alimentation. Ensuite, lorsque l'IGBT est ouvert, l'inductance se trouve en série avec le générateur et sa force électromotrice (f.é.m.) s'additionne à celle du générateur (effet surélevé). Le courant traversant l'inductance passe ensuite à travers la diode D , le condensateur C et la charge R , permettant ainsi un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur. Dans le cas où le convertisseur Boost fonctionne en mode de conduction continue, le courant i_L traversant l'inductance ne s'annule jamais. La tension de sortie est calculée comme suit (en supposant des composants parfaits) : lorsque l'IGBT est fermé et actif, entraînant une augmentation du courant.

➤ Modèle mathématique du convertisseur Boost

Le modèle mathématique de le hacheur parallèle est dérivé en appliquant les lois de Kirchhoff au schéma de base de le hacheur, tel qu'illustré dans la figure II.8 en tenant compte du mode de fonctionnement et de l'état de l'interrupteur.

$$L \frac{di_L}{dt} = E - V_0(1 - u) \quad (\text{II.20})$$

$$C \frac{dV_0}{dt} = i_L(1 - u) - \frac{V_0}{R} \quad (\text{II.21})$$

II.3.1.3. Hacheur série-parallèle (Buck_boost)

Le convertisseur abaisseur-survolteur combine les caractéristiques des deux convertisseurs précédents et est utilisé pour convertir la tension d'entrée imposée en une tension de sortie souhaitée. Son schéma de principe est présenté dans la (figure.II.9)

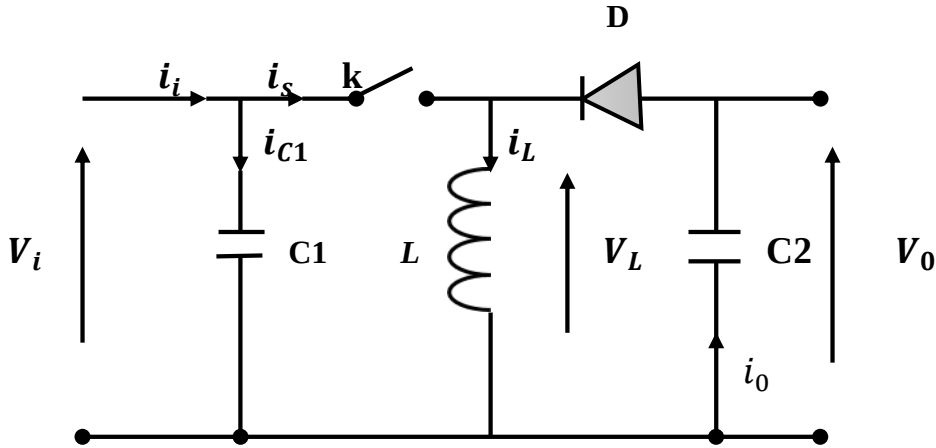


Figure.II.9 : Schéma de principe du convertisseur dévolteur-survolteur [54]

➤ Principe de Fonctionnement

Pendant une fraction αT de la période de commutation T , l'interrupteur K_1 est activé, permettant à la source d'entrée de fournir de l'énergie à l'inductance L . La charge est déconnectée du circuit (diode K_2 bloquée). Lorsque le transistor est bloqué, la diode K_2 assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie stockée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. En régime permanent, la moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, ce qui donne lieu à la relation suivante [55] :

➤ Modèle mathématique du convertisseur Buck-Boost

La description du fonctionnement de ce type de convertisseur à l'aide d'équations mathématiques doit tenir compte de l'état de l'interrupteur S représenté dans la (figure.II.9).

Lorsque l'interrupteur est en état passant, la durée T_{on} est égale à $\alpha * T_s$, ce qui entraîne une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance. Lorsque S est bloqué, la durée T_{off} est égale à $(1 - \alpha) * T_s$ et l'énergie accumulée dans l'inductance est transférée vers le condensateur et la charge.

$$L \frac{di_L}{dt} = uE - V_0(1 - u) \quad (II.22)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_L(1 - u) - \frac{V_{dc}}{R} \quad (II.23)$$

Dons (tableau.II.4) avons faisons Comparaison entre les principaux convertisseurs DC-DC.

Tableau.II.4 : Comparaison les principaux convertisseurs DC-DC [53]

Type d'hacheur	Schéma équivalent	Rapport de transformation	Application
Hacheur série (Buck)		α	Transforme la tension d'entrée en une tension de sortie réduite.
Hacheur parallèle (boost)		$\frac{1}{1 - \alpha}$	Convertie une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur
Hacheur série-parallèle (buck_boost)		$\frac{-\alpha}{1 - \alpha}$	Lorsque la machine fonctionne en moteur lorsqu'elle est alimentée par le hacheur série ou en génératrice La machine fonctionne en génératrice

II.4. Moteur à courant continu (DC)

Un moteur à courant continu est une sorte de moteur électrique qui opère en transformant l'énergie électrique en mouvement mécanique rotatif est souvent utilisé pour sa capacité à fournir un contrôle précis de la vitesse, du couple et de la direction de rotation.

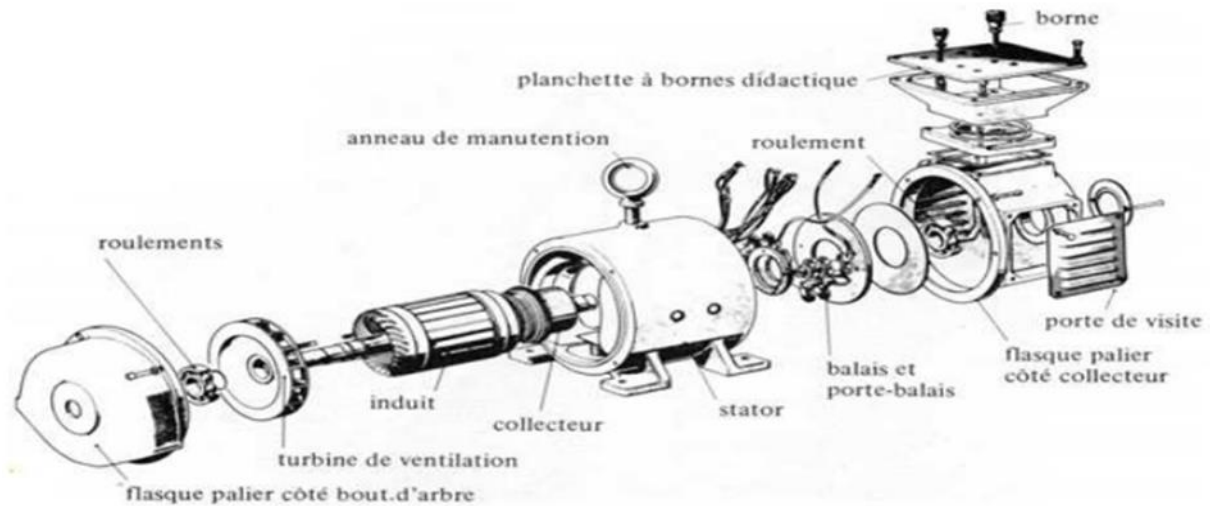


Figure.II.10 : Schéma général de la machine à courant continu [56]

II.4.1. Constitution de la machine à courant continu

Le moteur à courant continu est constitué de deux parties principales :

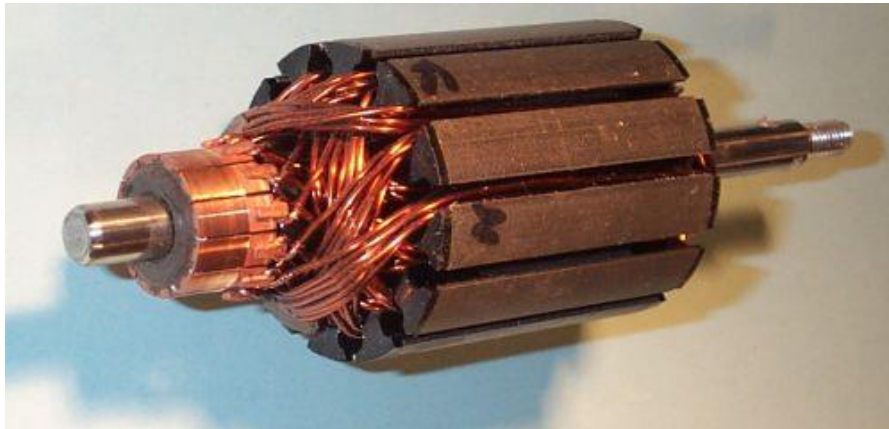
- **Partie fixe** : stator (inducteur).
- **Partie mobile** : rotor (induit).

a. Stator (inducteur)

Le stator génère un champ magnétique (champ d'excitation) à partir des enroulements. Alimenté par courant continu ou par aimants permanents fixés à l'intérieur du stator. La direction de l'écoulement de l'eau va du pôle Nord vers le pôle Sud. Les bobines d'excitation multipolaires sont connectées de telle sorte que les pôles adjacents Avoir une polarité magnétique opposée.

**Figure.II.11 : Inducteur à aimants permanents [57]****Figure.II.12 : Inducteur bobiné [58]****b. Rotor (Induit)**

Le rotor est la partie mobile du moteur est composé d'un noyau métallique avec des bobinages reliés à un collecteur rotatif qui permet de maintenir les bobines du rotor.

**Figure.II.13: Induit [57]****c. Collecteur et balais**

Dans les moteurs à courant continu traditionnels, le collecteur et les balais sont utilisés pour transmettre l'énergie électrique au rotor. Cependant, les moteurs bushes n'ont pas de balais et de collecteur, ce qui réduit l'usure et les pertes d'énergie.

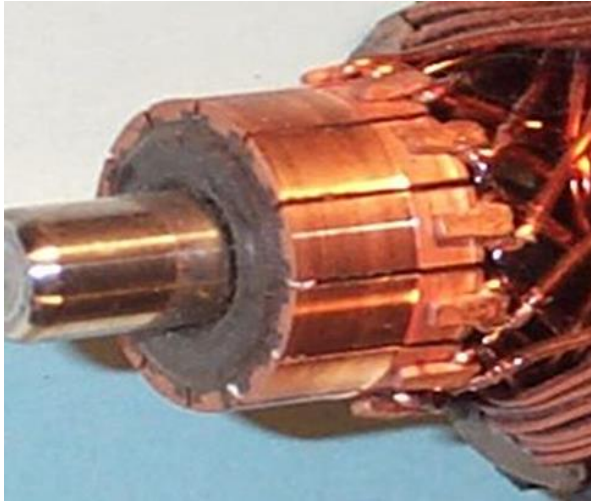


Figure.II.14 : Collecteur [57]

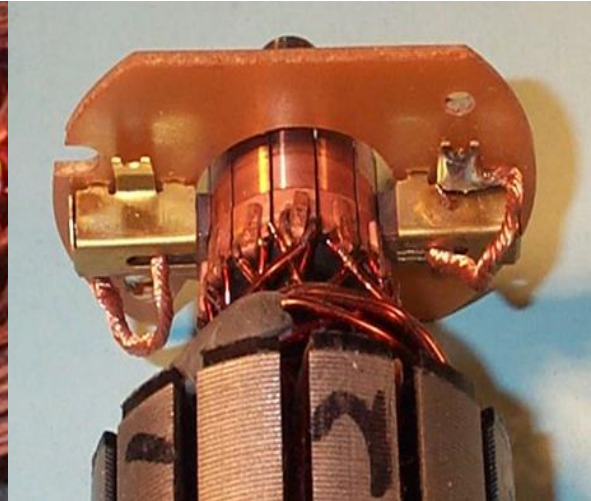


Figure.II.15 : les balais [57]

II.4.2. Principe de fonctionnement MCC

Les moteurs à courant continu sont capables de fonctionner aussi bien en tant que moteur qu'en tant que générateur, ce qui les rend réversibles. Lorsqu'une boucle de fil parcourue par un courant est placée dans un champ magnétique, elle subit un couple de forces qui engendre une rotation. Ce couple diminue progressivement au cours du déplacement jusqu'à s'annuler après une rotation de 90 degrés, lorsque la boucle se trouve dans la zone neutre, orientée horizontalement et perpendiculairement aux aimants naturels. Pour obtenir une rotation sans à-coups, l'enroulement de l'induit doit être composé d'un grand nombre de boucles similaires, réparties de manière uniforme autour du rotor.

De manière à obtenir un couple indépendant de l'angle de rotation du courant de la partie fixe à la partie tournante du moteur [59].

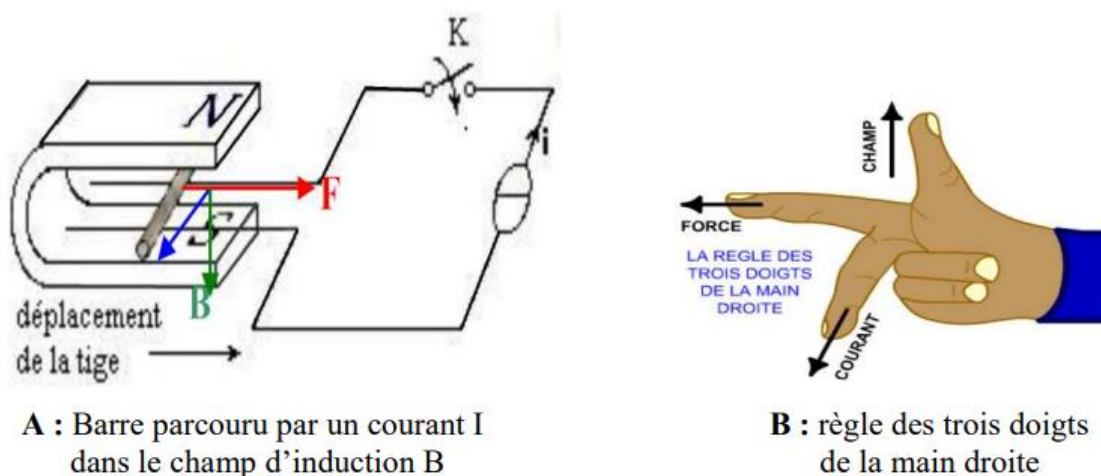


Figure.II.16 : Schéma d'une machine à courant continu [56]

II.4.3. Types de moteurs à courant continu

Il existe plusieurs types de moteurs à courant continu, notamment :

a. Moteur à excitation séparée

Dans ce type de moteur, le champ magnétique est généré par une source de courant externe indépendante de l'armature. Cela permet un contrôle plus précis du couple et de la vitesse.

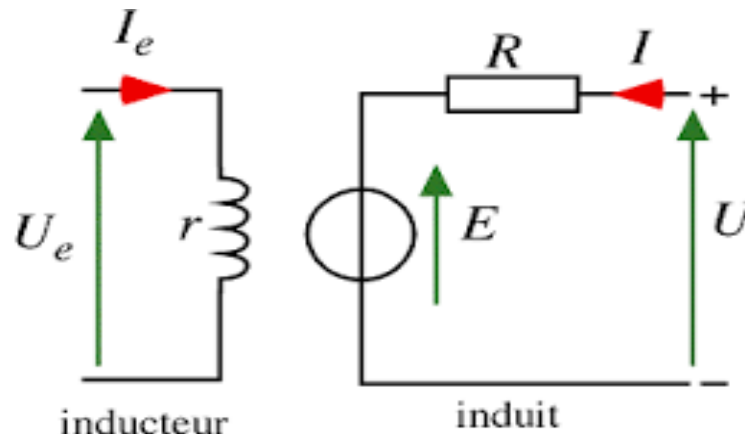


Figure. II.17 : Moteur à excitation séparée [58]

Caractéristiques :

- Réglage de la vitesse par tension, indépendamment de la charge.
- En utilisant un convertisseur statique (hacheur) pour ajuster la tension, la gamme de variation de vitesse est considérablement étendue.
- Il offre un couple significatif à basse vitesse (machines-outils, levage). À faible puissance, il est fréquemment employé en tant que servomoteur avec une régulation de la vitesse.
- Le moteur est conçu pour fonctionner en mode récepteur.
- Une large gamme de vitesses est disponible (> 1000 dans la boucle de régulation).
- Il offre un couple de démarrage élevé, parfait pour entraîner des charges avec une forte inertie.
- Rapport volume/puissance très supérieur à toutes les autres technologies.
- Rendement élevé.
- Linéarité tension/vitesse, couple/courant.
- Prix élevé.
- Coûts d'entretien coûteux (remplacement des balais en graphite, usure du collecteur).
- Deux alimentations sont nécessaires : une pour l'inducteur et une autre pour l'induit.

- Grande flexibilité des commandes.
- Large plage de vitesse.
- Utilisé en milieu industriel, associé aux transmissions électroniques, notamment Lorsque le servomoteur est en marche (machine-outil : moteur de broche machines spéciales, axes, etc.). [58]

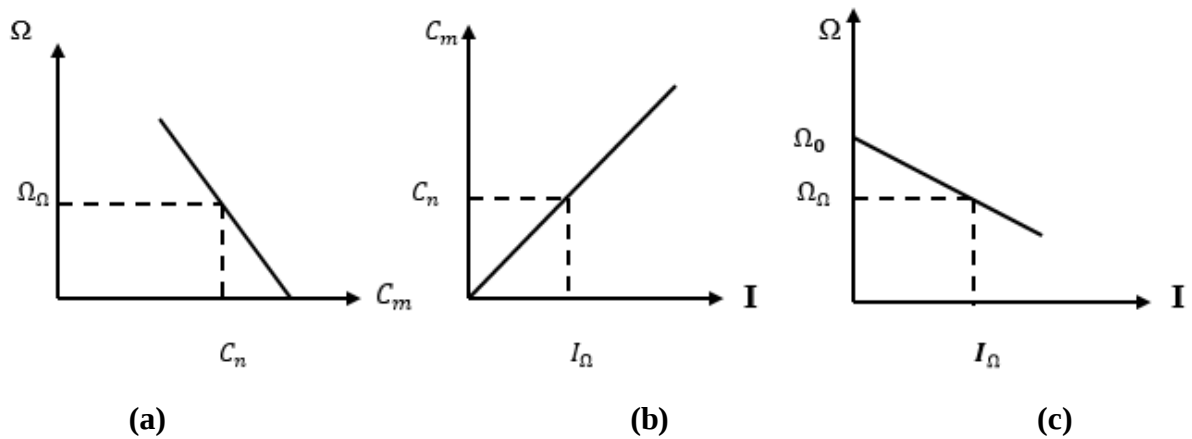


Figure. II.18 : Caractéristique du moteur à excitation séparée [48]

(a) : Caractéristique mécanique du moteur à excitation séparée.

(b) : Caractéristique électromécanique du moteur à excitation séparée .

(c) : Caractéristique de vitesse en fonction de courant du moteur à excitation séparée.

b. Moteur à excitation série

Dans ce type de moteur, l'armature et le champ magnétique sont connectés en série, ce qui permet d'obtenir un couple élevé au démarrage. Ces moteurs sont souvent utilisés dans les applications nécessitant un démarrage rapide et un couple élevé, comme les locomotives électriques.

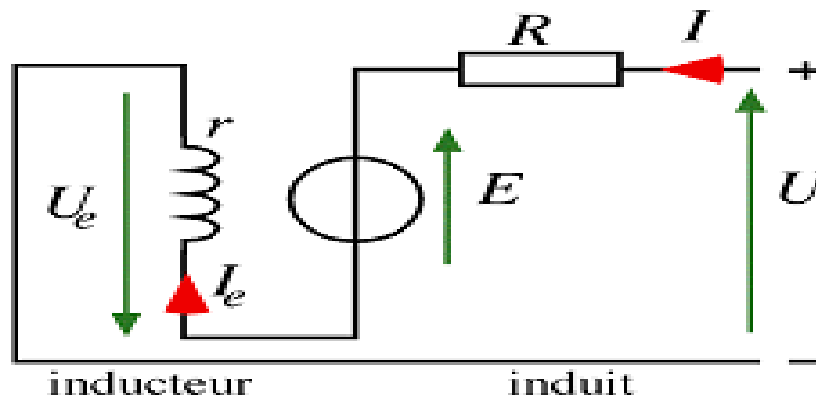
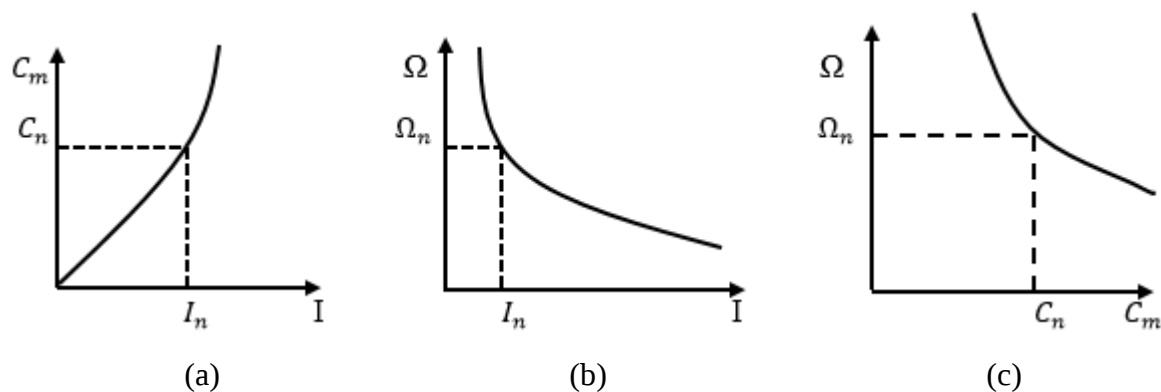


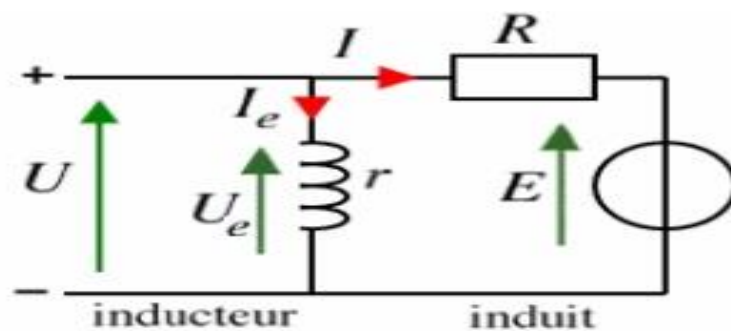
Figure.II.19 : Moteur à excitation série [58]

Caractéristiques :

- L'inducteur est divisé en deux parties, une partie est connectée en série et l'autre partie est connectée en parallèle.
- Entraînements à forte inertie.
- Le couple varie considérablement avec la vitesse.
- Pour les petits moteurs à démarrage direct, ventilateurs, pompes, machines.
- Laminioir, volant d'inertie.

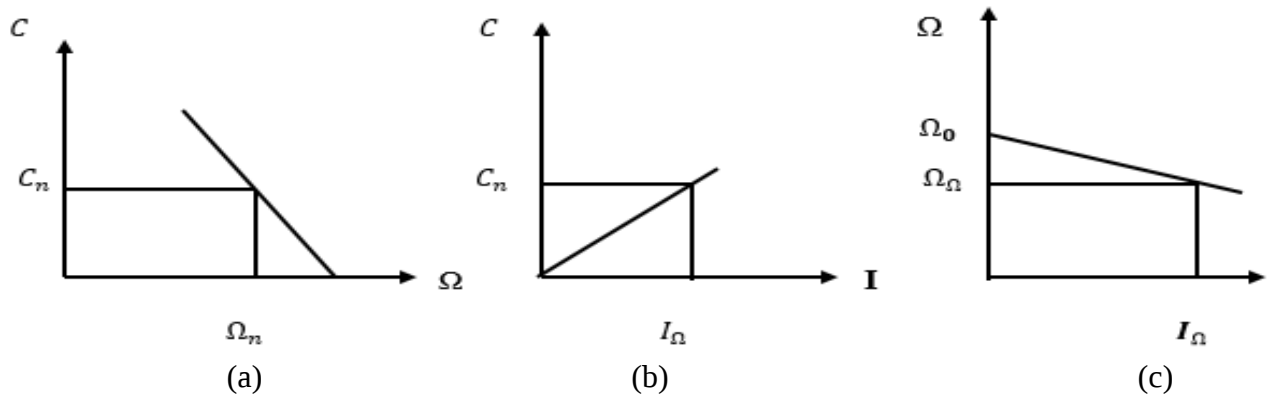
**Figure.II.20 : Caractéristiques de la machine à excitation série [60]****(a) :** Caractéristique électromécanique du moteur série.**(b) :** Caractéristique de vitesse en fonction du courant du moteur série.**(c) :** Caractéristique mécanique du moteur série.**c. Moteur à excitation parallèle (shunt)**

Dans ce type de moteur, l'armature et le champ magnétique sont connectés en parallèle, ce qui permet d'obtenir une vitesse de rotation élevée. Ces moteurs sont souvent utilisés dans les applications nécessitant une vitesse élevée, comme les outils électriques portatifs.

**Figure.II.21 : Moteur à excitation parallèle (shunt) [57]**

Caractéristiques :

- Couple de démarrage élevé.
- Idéal pour obtenir dans des zones de forte puissance (1 à 10 MW).
- Fonctionnement satisfaisant à basse vitesse (tracteurs, laminoirs).
- Utilisé comme démarreur pour les moteurs à combustion interne à faible puissance.
- L'inducteur est en série avec l'induit donc le flux de champ Φ est implicite.
- Sous réserve du couple fourni.
- Dans ce cas, l'enroulement inducteur a un petit nombre de tours, mais il est utilisé.
- Fil de gros diamètre (robustesse).
- Le moteur série est un autorégulateur de puissance.
- Fort couple de démarrage, mais il existe un risque de perte de contrôle à vide.
- Le couple d'un moteur série ne dépend pas de la tension d'alimentation.
- Le couple résistant augmente rapidement avec la vitesse.
- La vitesse diminue avec l'augmentation de la charge.
- Supporte bien la surcharge.
- Pour équipements de levage (grues, palans, ponts roulants), ventilateurs, pompes.
- Centrifuge, à traction. [58]

**Figure.II.22 : Caractéristique de la machine à excitation shunt [60]**

(a) : Caractéristique mécanique du moteur shunt.

(b) : Caractéristique électromécanique du moteur shunt.

(c) : Caractéristique vitesse en fonction du courant.

d. Moteur à excitation composée

Un moteur à excitation composée possède deux enroulements d'excitation en série et en parallèle. Les caractéristiques de ce type de moteur se situent entre celles des moteurs série et parallèle. Suivre la connexion des enroulements inducteurs parallèles, on peut avoir deux types de cette composition Supplémentaire ou distinctif.

- **Moteur compound à flux additif**

Le moteur compound à flux additif est alimenté par une source de tension continue U et un courant I . Le même courant traverse l'inducteur série, qui comprend une résistance et une inductance, ainsi que l'induit, qui comprend respectivement une résistance, une inductance et une force contre-électromotrice L_a, R_a, E . L'inducteur shunt, avec une résistance et une inductance L_{of} est traversé par un courant I_f comme illustré dans la (figure.II.23) [61].

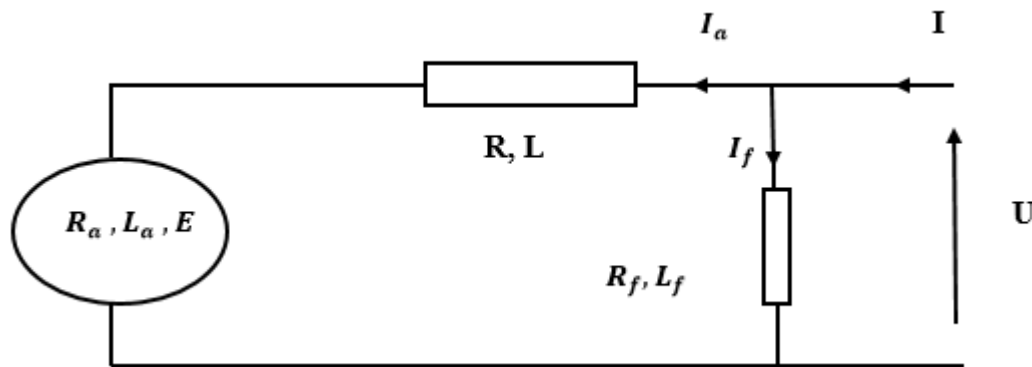


Figure.II.23 : Moteur compound à flux additif [60]

Caractéristiques :

En se référant aux caractéristiques présentées dans la (figure.II.23), on observe que le moteur compound à flux additif combine les caractéristiques du moteur série et du moteur shunt, bénéficiant ainsi des avantages des deux types de moteurs. Il offre un couple de démarrage plus élevé que le moteur shunt, tout en étant capable de fonctionner à faible charge sans risque de surtension, ce qui lui confère une meilleure stabilité par rapport aux deux autres types de moteurs. Cependant, il est conçu uniquement pour entraîner des charges à une vitesse strictement constante [62].

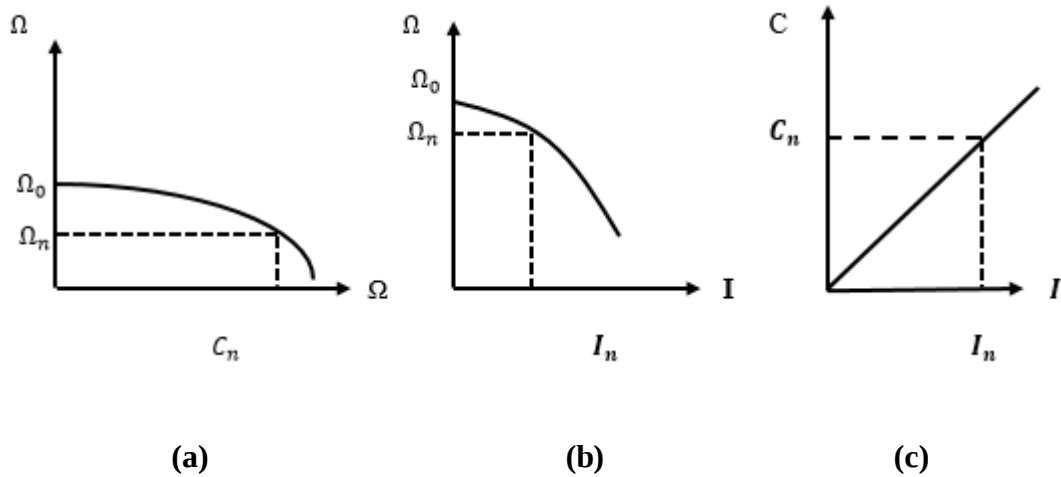


Figure.II.24 : Caractéristiques du moteur composé à flux additif [60]

(a) : Caractéristique mécanique du moteur compound à flux additif.

(b) : Caractéristique de vitesse en fonction de courant du moteur compound à flux additif.

(c) : Caractéristique électromécanique du moteur compound à flux additif.

- **Moteur compound à flux soustractif**

Le moteur compound à flux soustractif est alimenté par une source de tension continue U et un courant I . Le courant d'alimentation traverse l'inducteur série, qui comprend une résistance R et une inductance L . L'induit du moteur est constitué d'une résistance R_a d'une inductance L_a et d'une force contre-électromotrice E . L'inducteur shunt, quant à lui, est équipé d'une résistance L_f et d'une inductance L_f est, et est traversé par un courant I_f [61]

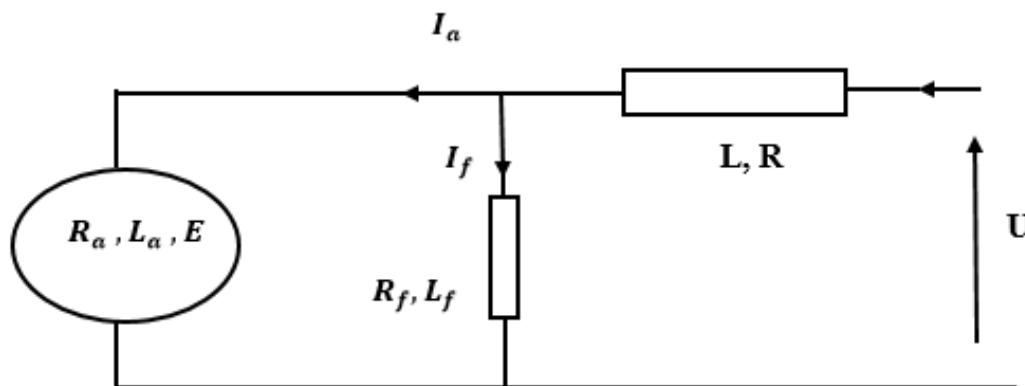


Figure.II.25 : Schéma électrique du moteur compound à flux soustractif [60]

Caractéristiques :

Le moteur compound à flux soustractif présente une caractéristique mécanique très particulière, à savoir une indépendance de la vitesse par rapport à la charge. Cependant, cette particularité le rend extrêmement dangereux, car sa vitesse augmente avec l'augmentation du couple, ce qui peut potentiellement entraîner la destruction du moteur, car sa vitesse peut croître indéfiniment. En raison de cette grande instabilité et du risque d'emballement résultant de l'annulation du flux provenant des enroulements série et shunt, ce type de moteur est pratiquement abandonné et n'est plus utilisé. [62]

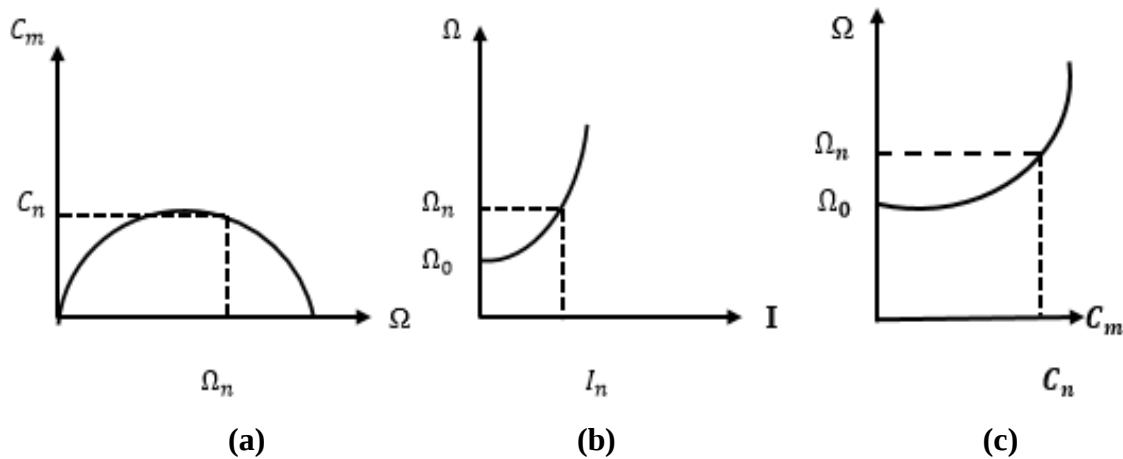


Figure.II.26 : Caractéristique du moteur composé à flux soustractif [60]

(a): Caractéristique électromécanique du moteur compound à flux soustractif.

(b): Caractéristique de la vitesse en fonction de courant du moteur compound à flux soustractif.

(c): Caractéristique mécanique du moteur compound à flux soustractif.

II.4.4. Modélisation du moteur à courant continu

Le modèle électrique d'un moteur s'exprime en termes de force électromotrice. "E", résistance interne R et inductance d'induit L.

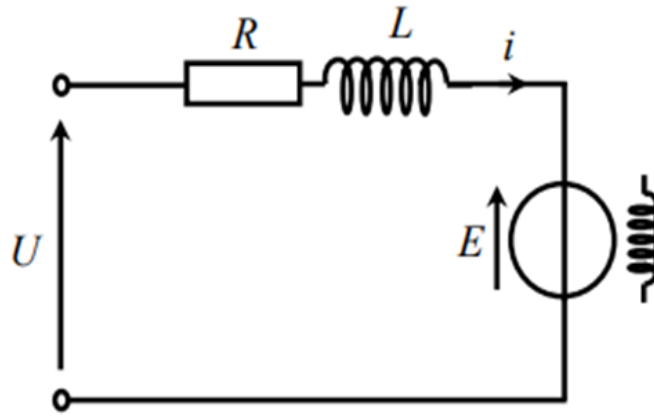


Figure.II.27 : Schéma électrique du moteur à courant continu [56]

A. Equations électriques

la tension d'induit (en convention récepteur) :

$$U(t) = R \cdot I + E \quad (\text{II.24})$$

Cette expression est également connue sous le nom de « caractéristiques électriques actuelles du moteur ». en continu"Le f.é.m « E » entre les pinceaux est le résultat de toute la FEM induite conducteurs actifs (situés dans les fentes de l'armature) pendant le mouvement du champ l'induction « B » suit les lois suivantes [56] :

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (\text{II.25})$$

Où :

$$K = \frac{P}{2\pi \cdot a} \cdot N \quad (\text{II.26})$$

B. Equation mécaniques

La caractéristique mécanique du moteur a courant continu est la suivant [56]:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{II.27})$$

Où :

$K \cdot \Phi \cdot I = C_{em}$: est le couple électromagnétique développé par la machine.

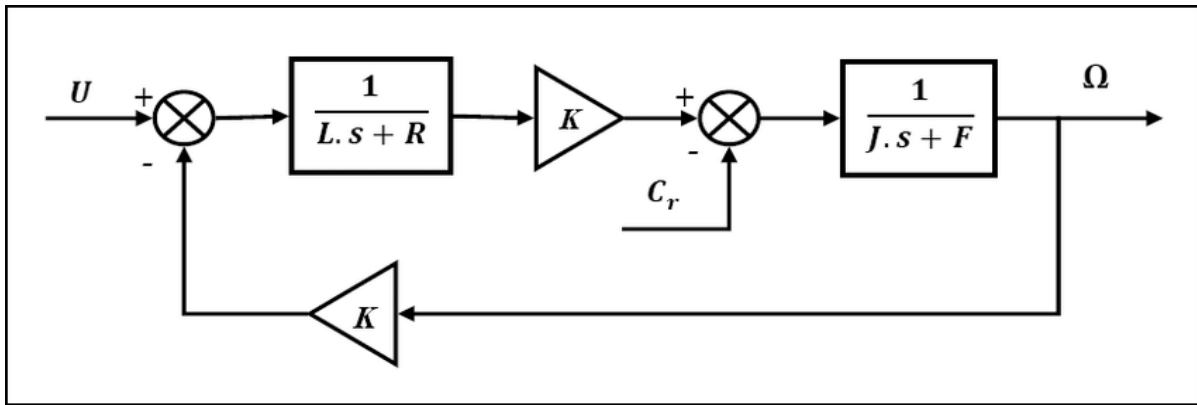


Figure.II.28: Schéma fonctionnel du MCC.

II .4.5. Régulation dans la puissance délivrée aux moteurs électriques

Le rôle de la régulation dans la puissance délivrée aux moteurs électriques est crucial pour assurer un fonctionnement efficace et sûr de ces moteurs. La régulation de la puissance électrique fournie aux moteurs électriques permet de contrôler leur vitesse, leur couple et leur direction de rotation selon les besoins de l'application.

Voici quelques aspects du rôle de la régulation dans la gestion de la puissance délivrée aux moteurs électriques :

- a) **Contrôle de la vitesse** : En ajustant la puissance électrique fournie au moteur, la régulation permet de contrôler sa vitesse de rotation. Cela est essentiel dans de nombreuses applications où une vitesse spécifique est requise.
- b) **Contrôle du couple** : La régulation peut également ajuster la puissance électrique pour contrôler le couple exercé par le moteur. Cela est particulièrement important dans les applications où un couple élevé est nécessaire pour surmonter des charges importantes.
- c) **Gestion de la direction de rotation** : Certains systèmes de régulation peuvent inverser la direction de rotation du moteur électrique en ajustant la puissance électrique fournie. Cela permet une flexibilité accrue dans diverses applications.
- d) **Optimisation de l'efficacité énergétique** : En régulant précisément la puissance électrique, la régulation peut contribuer à optimiser l'efficacité énergétique des moteurs électriques, en réduisant les pertes d'énergie et en minimisant la consommation d'électricité.

- e) **Protection contre les surcharges** : Certains systèmes de régulation intègrent des dispositifs de protection qui surveillent la puissance délivrée aux moteurs électriques pour éviter les surcharges et les dommages associés.

Objectif de la régulation

L'objectif de la régulation est de garantir le fonctionnement d'un processus selon des critères préétablis par un cahier des charges (incluant la sécurité du personnel et des installations, la gestion de l'énergie et le respect de l'environnement). Ce cahier des charges établit des critères qualitatifs à respecter, notamment :

- Augmentation de la stabilité.
- Amélioration de la précision.
- Extension de la bande passante.
- Réduction du temps de réponse.

Les grandeurs physiques contrôlées varient de manière continue dans le temps. Pour celles qui ne présentent que deux états (système binaire ou "tout ou rien", telles que les feux de signalisation, les commandes d'ascenseurs, le transfert de pièces par convoyeurs, etc.), une approche différente de la structure de la boucle utilisée dans la plupart des systèmes est utilisée. Les systèmes automatiques remplissent en réalité deux types de fonctions :

- Maintien de la grandeur contrôlée (réglée) à une valeur de référence en présence de perturbations ; on parle alors de régulation au sens strict.
- Réponse aux changements d'objectif tels que la poursuite d'une cible ; on parle alors d'asservissement. [58]

II.4.6. Différents modes de réglage de la vitesse d'un moteur à courant

En tenant compte des liens entre la vitesse, le flux et la force électromotrice, il est envisageable de modifier la vitesse n du moteur de diverses manières:

- a. Par ajustement du rhéostat.
- b. En contrôlant la tension d'induit.
- c. En régulant le flux (par défluxage).
- d. À l'aide d'un régulateur de vitesse.
- e. Via un convertisseur DC/DC.

II.4.7. Des aspects importants à modéliser pour représenter son comportement dans un système de propulsion

Pour modéliser le comportement d'un moteur DC dans un système de propulsion, voici quelques aspects importants à prendre en compte :

- **Caractéristiques électriques:** la tension d'alimentation, la résistance et l'inductance du moteur, ainsi que la résistance interne de la batterie.
- **Caractéristiques mécaniques:** le couple et la vitesse de rotation du moteur, ainsi que la charge mécanique à laquelle il est soumis.
- **Perte de puissance:** les pertes dans le moteur dues à la résistance et à l'inductance, ainsi que les pertes dans le système de transmission.
- **Effet des variations de tension:** la façon dont le moteur réagit aux variations de tension d'alimentation, telles que les pics et les creux.
- **Effet des variations de température:** la façon dont le moteur se comporte à différentes températures, en particulier lorsqu'il chauffe pendant une utilisation prolongée.
- **Contrôle de la vitesse:** la façon dont le moteur est contrôlé pour maintenir une vitesse constante, par exemple en utilisant une commande de vitesse PWM.
- **Effet des perturbations:** la façon dont le moteur réagit aux perturbations, telles que les chocs et les vibrations.
- **Effet de la durée de vie:** la façon dont le moteur se dégrade avec le temps, en particulier en termes de perte de couple et de vitesse de rotation.

II.4.8. Moteur à courant continu à vitesse variable

L'industrie en général et les transports, ont de plus en plus besoin de systèmes à vitesse variable continûment, doués de souplesse et de précision.[63]

La généralisation de l'usage de la vitesse variable aura donc pour objectif de réaliser des économies (ne dit-on pas que *"l'argent est le nerf de la guerre"*). Ces économies concernent.

- La consommation d'énergie
- La consommation de matières premières (amélioration de la qualité de production, moins de rebuts).

- La consommation du temps (augmentation des cadences de fabrication, optimisation des temps d'utilisation des machines).**[63]**

Ces trois termes d'économie : **Energie - Matière première – Temps**

Permettent de résumer ce domaine nouveau d'application de la vitesse variable.

VITESSE VARIABLE = GAIN DE PRODUCTIVITE

C'est l'équation qui définit le nouveau domaine d'application de la vitesse variable.[46]

- **Exemples d'Associations**

- Pont de Graetz
- Machine C.C
- Hacheur
- Machine C.C/ Machine asynchrone (brushless)

II.4.9. Choix du type de convertisseurs

La variation de vitesse s'effectue, le plus souvent par variation de la tension d'induit, complétée éventuellement, par la variation de la tension d'excitation. Les alimentations sont des amplificateurs commandables par des tensions de faibles niveaux et constitués par des convertisseurs statiques dont les composants (thyristors, transistors) travaillent en commutation. Les tensions obtenues présentent des discontinuités et les courants doivent être filtrés. Ce filtrage est naturellement créé par l'inductance du moteur, si elle est suffisante, sinon par une inductance additionnelle. Le choix du convertisseur et de son environnement est effectué à partir de considérations sur les paramètres suivant [63] :

- ✓ Réversibilité
- ✓ La nature de la source
- ✓ La puissance à fournir et la bande passante.

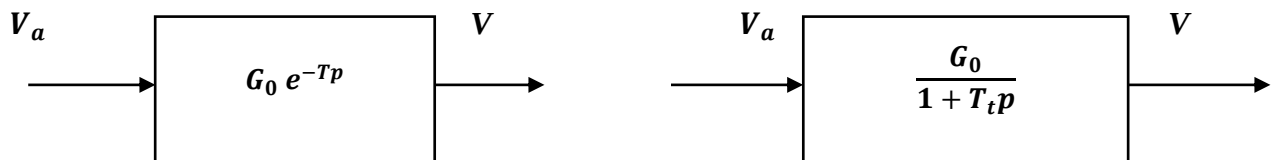


Figure.II.29 : Schémas équivalents du convertisseur [63]

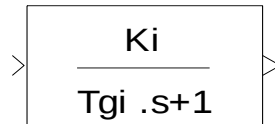
II.4.10. Les capteurs

Les variateurs de vitesse comprennent le plus souvent des capteurs de courant et de vitesse. Pour les commandes en position, un capteur supplémentaire est nécessaire.

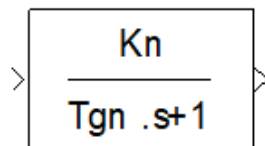
a) Capteurs de courant

- + Résistifs (résistances peu inductif) : la mesure n'est pas isolée galvaniquement.
- + Transformateurs de courant, un circuit électronique reconstitue le courant redressé.
- + Sondes à effet de hall, ce sont les capteurs les plus performants (isolation galvanique, bande passante élevée).[63]

filtre de courant

**Figure.II.30** : Schéma équivalents du Capteur de courant [63]**b) Capteurs de vitesse**

- + Génératrice tachymétrique : délivre une tension de sortie continue proportionnelle à la vitesse.
- + Les capteurs incrémentaux : sont en fait des capteurs de position, on déduit la vitesse par comptage des impulsions pendant un temps donné ou par mesure du temps séparant deux impulsions. [63]



capteur de vitesse

Figure.II.31 : Schéma équivalents du Capteur de Vitesse [63]**II.4.11. Boucle de réglage de la vitesse du MCC****a) Problèmes de régulation de vitesse**

- Cahier de charges :
 - ✓ Pas d'erreur statique
 - ✓ Dépassements faible quelque %
 - ✓ Réponse la plus rapide possible
 - ✓ Contraintes (I_{max}) : contrainte thermique à affiner par le modèle thermique + pouvoir de commutation. [63]

b) Boucle de courant (Boucle interne)

Le schéma fonctionnel du contrôle de flux est donné par [63] :

$$F_d(s) = \frac{\frac{1}{R_s}}{1+T_{ds}s} = \frac{I_{sd}}{V_{sd}} \quad / \quad T_{ds} = \frac{L_{ds}}{R_s} \quad (\text{II.28})$$

Le régulateur (Reg_d) est choisit comme étant un régulateur proportionnel et intégral , avec la fonction de transfert de la forme suivante [51] :

$$C(s) = Reg_d(s) = \frac{K_{id}}{s} \left(1 + \frac{K_{qd}}{K_{id}} s\right) \quad (\text{II.29})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$FTBO_d = \frac{K_{id}}{s} \left(1 + \frac{K_{qd}}{K_{id}} s\right) \frac{1}{1+T_{ds}s} \quad (\text{II.30})$$

La démarche à suivre consiste à procéder à la compensation de la constante de temps du système : $\frac{K_{qd}}{K_{id}} = T_{ds}$

Ce qui ramène les fonction de transfert des courants en boucle fermée aux expressions suivantes [46] :

$$FTBO_d = \frac{1}{1+\tau_d s} = \frac{I_{id}}{I_{id \text{ ref}}} \quad (\text{II.31})$$

Avec: $\tau_d = \frac{R_s}{K_{id}}$

En choisissant ($\tau_d = T_{ds}$), donc : $K_{id} = \frac{R_s}{T_{ds}} = \frac{R_s^2}{L_d}$ /d'où : $K_{pd} = K_{id} \cdot T_d \cdot []$

c) Boucle de Vitesse (Boucle externe)

$$K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p}{s} \left(s + \frac{K_i}{K_p}\right) \quad (\text{II.32})$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par ($C_r = 0$) :

$$FTBF_\Omega = \frac{K_p}{s} \left(s + \frac{K_i}{K_p}\right) \frac{1}{j s + f} \quad (\text{II.33})$$

En adoptant la méthode de placement de pôle et la fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée est donnée par :

$$FTBF_\Omega = \frac{\Omega(s)}{\Omega_{\text{ref}}(s)} = \frac{K_p \left(s + \frac{K_i}{K_p}\right)}{J_s^2 + (f + K_p)s + K_i} \quad (\text{II.34})$$

La $FTBF_\Omega$ possède une dynamique de 2^{ème} ordre, par identification à la forme canonique du 2^{ème} ordre l'équation caractéristique peut être représentée comme suit [63] :

$$\frac{1}{\omega_0} s^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0}\right) s + 1 \quad (\text{II.35})$$

Alors : $\frac{J}{K_i} = \frac{1}{\omega_0^2}$

$$\frac{f+K_p}{K_i} = \frac{2\xi}{\omega_0} \quad (\text{II.36})$$

On choisit alors le coefficient d'amortissement ξ et ω_0 on déduit K_i et K_p :

Avec : $K_i = J \omega_0^2$

$$K_p = \frac{2\xi K_i}{\omega_0} - f \quad (\text{II.37})$$

Donc
$$\begin{cases} K_i = \frac{4J}{\tau^2} \\ K_p = K_i \tau \end{cases} \quad \text{avec :} \quad \tau = \frac{L_q}{R_s}$$

II.5. Conclusion

Dans cette partie, nous avons traité la conception de différents composants d'un véhicule électrique, que nous pouvons simuler à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink®,

En plus, les résultats de simulation et des tests expérimentaux seront fournis dans le prochain chapitre.

CHAPITRE III

Résultats expérimentaux de simulation et commentaires

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur les mesures de la tension et du courant de la batterie et du hacheur série en fonction du rapport cyclique α .

De plus, nous aborderons les résultats de simulation de la régulation du MCC.

III.2. Présentation du system étude

Notre système à étudier est composé des éléments suivants :

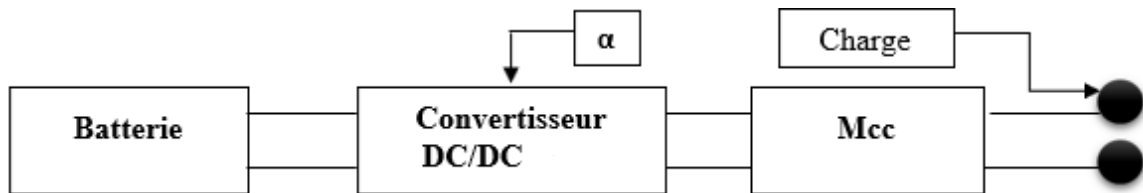


Figure .III.1: Schéma fonctionnement du véhicule électrique

III.2.1. La Batterie

Est la source principale source d'énergie pour le véhicule électrique (VE).



Figure .III.2: Image de la batterie 12V7Ah /20HR.

Il s'agit d'une batterie au plomb scellée (SLA). La batterie SLA est composée de cellules au plomb hermétiquement fermées qui ne nécessitent pas d'entretien. Cette batterie se distingue par son étanchéité et sa résistance aux vibrations. Puisque la batterie génère 12 volts, nous avons connecté deux batteries en série pour obtenir 24 volts.

III.2.1.1. Application (Extraire les paramètres de la batterie à partir de datasheet)

Les paramètres du (tableau. III.1) sont extraits à partir de la courbe de décharge qui est donnée par le constructeur (annexe A).

Tableau.III.1 : Paramètres de la batterie utilisé à la simulation avec un courant de décharge de 7A

Nominal voltage(V)	12
Rated capacity(Ah)	7
Initial State of charge(%)	100
Maximum capacity(Ah)	4.025
Fully charged voltage (V)	12.94
Nominal discharge current(A)	7
Internal resistance (ohms)	0.0205
Capacity(Ah)@nominal voltage	0.7
Exponential zone [voltage(V), capacity(Ah)]	[12.17 0.116]

III.2.1.2. Expérimentation et validation des résultats

A. Spécification de la batterie

La batterie utilisée dans cette recherche est de type plomb-acide à régulation par valve (VRLA) avec une tension nominale de 12V et une capacité nominale de 7Ah. La tension recommandée lors de la charge initiale et pendant l'utilisation est de 2,3V par cellule (6 cellules en série). Les autres caractéristiques de cette batterie sont présentées dans (le tableau III.2).

Tableau.III.2 : Spécifications dans notre modèle de la batterie.

Volts		12V	
Capacité (25° C)		20 taux horaire (0.35A)	7Ah
		20 I ₂₀ taux (7A, 27min)	36min
		60 I ₂₀ taux (21A, 7min)	8min
Résistance interne		Batterie complètement chargée 25° C	20.5mΩ
Capacité affectée par la température		40° C	104%
		25° C	100%
		0° C	83%
		-15° C	65%
Capacité résiduelle (25° C)		Capacité après 3 mois stockage	91%
		Capacité après 6 mois stockage	82%
		Capacité après 12 mois stockage	65%
Charge (tension constante)	Cycle (25° C)	Courant de charge initial inférieur à 2.1A Tension 14.5-14.9V	
	Flottant (25° C)	Tension de charge 13.6-13.8V	
Poids (approximatif)			2.09Kg

B. Description du banc d'essais

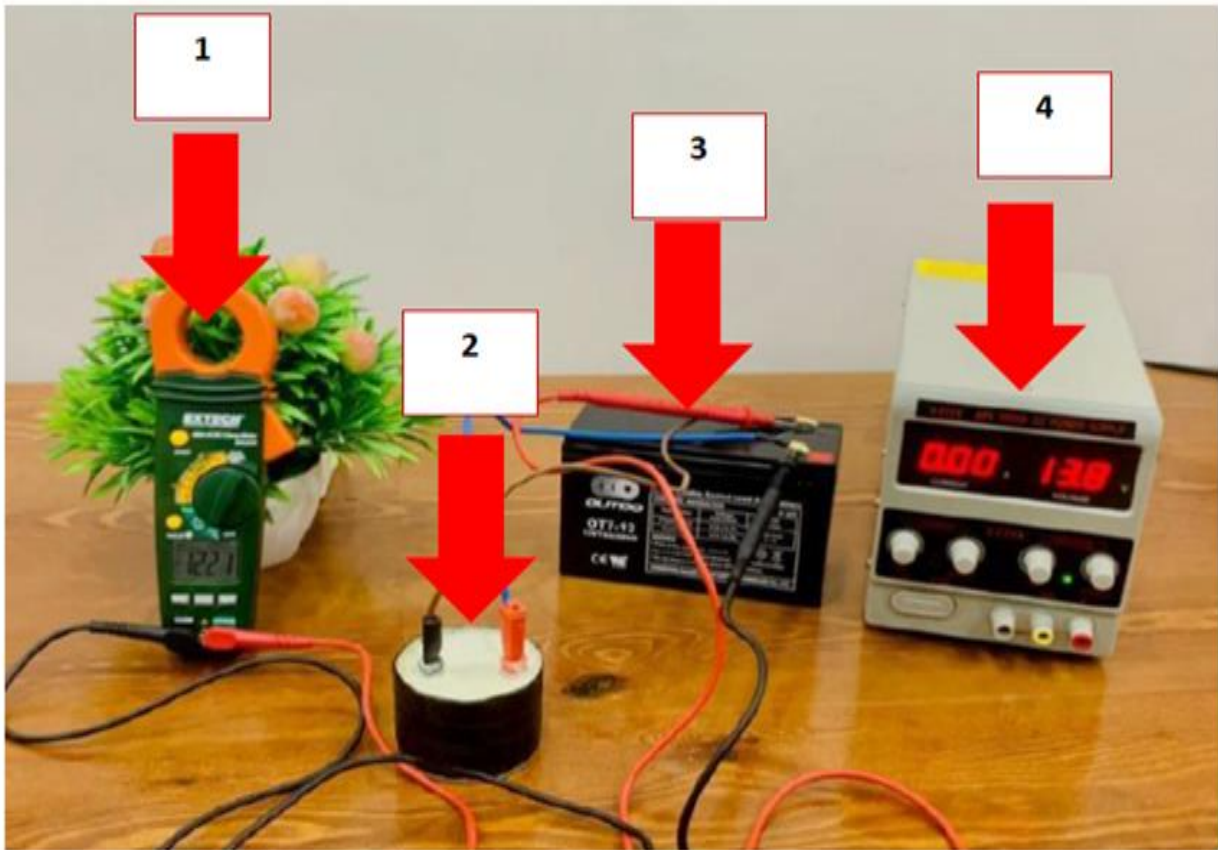


Figure.III.3 : Banc d'essais

1. un multimètre
2. une résistance
3. une batterie
4. une alimentation stabilise

C. Déroulement des essais

➤ L'essais en charge

La batterie est chargée via une alimentation électrique DC externe, et la tension initiale au moment du test est fixée à 12,7V. La limite maximale de courant est fixée à 1,4 A (c'est la valeur maximale disponible). La batterie est connectée à l'alimentation électrique et laissée jusqu'à ce qu'elle soit complètement chargée. La tension et le courant sont mesurés à l'aide d'un voltmètre et d'une pince ampérométrique toutes les 10 minutes. La tension de fin de charge est $V_{finish-ocv} = 13,82$ V et le courant de fin de charge (la valeur minimale du courant à proximité de la pleine charge) est $I_{min} = 0,02$ A. Lorsque le courant de charge atteint la valeur minimale

de 0,02 A, la batterie est déconnectée et l'alimentation électrique DC est éteinte. Ce test a duré 22 heures, la durée de ce test est donc $T_{ch} = 1320$ minutes ou $T_{ch} = 22$ heures.

➤ **L'essai en décharge**

Une résistance variable est connectée (pour ajuster les taux C variables, c'est-à-dire pour atteindre un courant de décharge à 1 C) avec la batterie. Par conséquent, la tension et le courant de décharge sont mesurés après chaque 5 minute en utilisant une pince ampérométrique. Après 60 minutes, il atteint la limite inférieure permise de tension de décharge (tension de coupure) 9,7 V. Ensuite, la résistance de décharge est déconnectée. La résistance de décharge équivalant à $R_{disch} = [1,7-1,8] \Omega$, avec une température ambiante $T = 26,7$ °C.

D. Résultats et commentaire batterie

Comme illustré dans la Figure III.4, la tension de décharge à 1 C diminue à 9,5 V, pendant 32 minutes. Cette valeur est appelée tension de coupure, c'est-à-dire lorsque la tension de décharge de la batterie a atteint la valeur la plus basse permise. À ce stade, la batterie est déconnectée pour éviter tout dommage permanent. Les valeurs de 9,5 V ne sont pas indicatives de la décharge totale (SOC = 0 %), mais correspondent à la valeur SOC minimale à proximité de 20 %, également connue sous le nom de profondeur de décharge (DoD) [66].

On peut observer que la courbe de décharge expérimentale est très proche de celle simulée, à l'exception du bruit du capteur et de l'écart dans les points collectés. Cette différence montre que la puissance de la batterie varie en fonction des conditions de fonctionnement et des paramètres utilisateur (mode de charge, température ambiante, courant de décharge, etc.). Il convient de noter que les données fournies par le fabricant correspondent généralement à des conditions idéales ($T = 25$ °C, $I_{disch} = 7$ A) et à l'état de vieillissement de la batterie (SOH = 100 %), ce qui signifie une batterie neuve. Ainsi, au cours des expériences, il est constaté que les trois ensembles de données (fiche technique, simulée et expérimentale) sont proches, ce qui indique que le modèle de batterie utilisé présente une très grande précision dans la phase de décharge de la batterie.

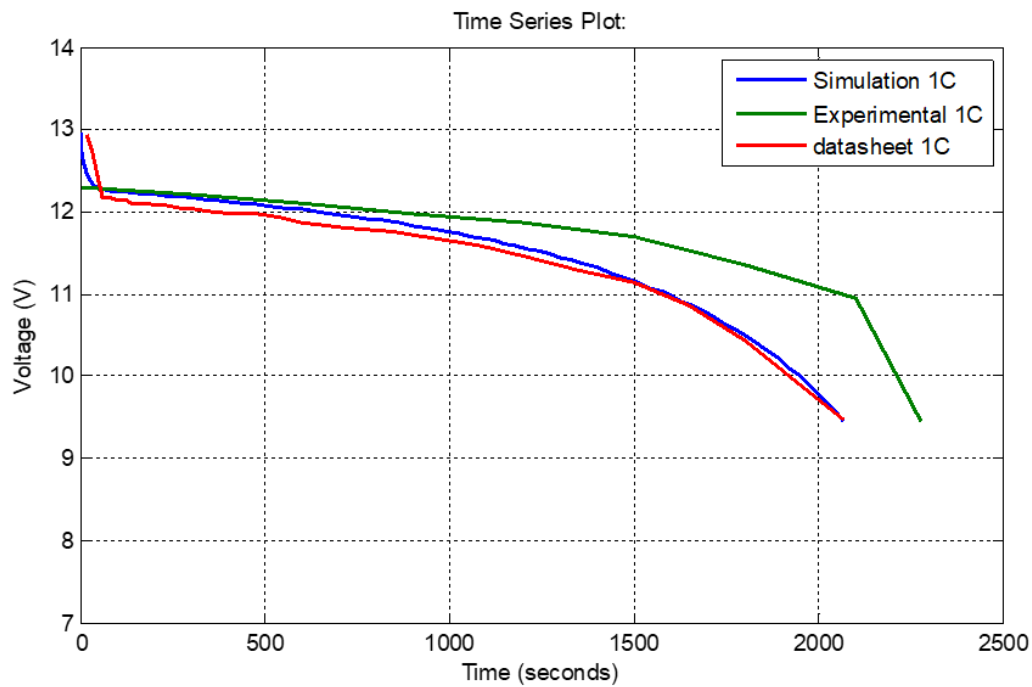


Figure.III.4 : Tension de décharge à 1C en fonction du temps

(La figure.III.5) indique que la tension de la batterie au début de ce test est réglée à 12,6 V dans les deux courbes (expérimentale, fiches techniques). De plus, la condition de charge initiale est $\text{SOC}_0 = 20\%$ [64]. On peut observer que la tension de charge monte rapidement jusqu'à 13,8 V et se stabilise à cette valeur, c'est-à-dire que les zones de courbe sont distinguées où la première est de $[0 \text{ à } 1,25] \text{ h}$ dans la courbe de la fiche technique, et de $[0 \text{ à } 0,7] \text{ h}$ dans la courbe expérimentale, destinée au mode de charge à courant constant (CC) [65]. La deuxième zone distinguable est de $[1,25 \text{ à } 20] \text{ h}$ destinée au mode de charge utilisant un mode de tension constante (CV).

La seule différence entre les deux courbes (expérimentale et fiches techniques) réside dans la zone de charge à courant constant (la durée de cette phase est différente, dans la fiche technique elle est de 1,25 h et dans l'expérimentale elle est de 0,7). Après tout, la phase de charge dépend de nombreux facteurs tels que le mode de charge, le SoC initial et la température ambiante. Cela conduit à une période de charge de 22 h lorsque le courant de fin de charge est égal à 0,02 A pour éviter une surcharge en éteignant l'alimentation en courant continu.

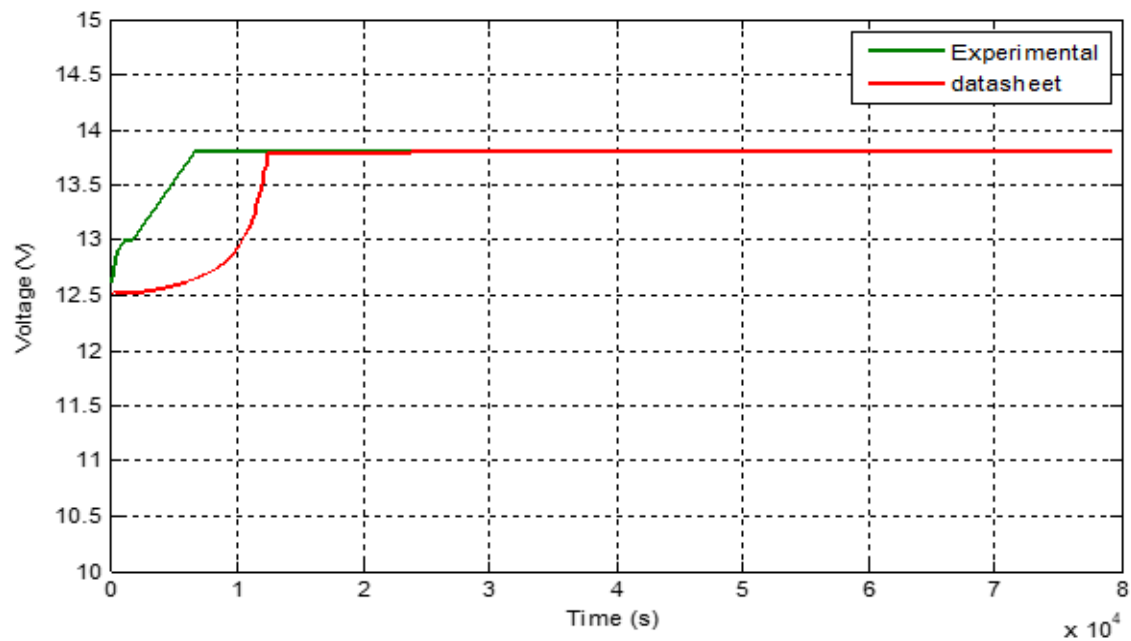


Figure.III.5 : Tension de charge en fonction du temps

III.2.2.Convertisseur DC/DC (hacheur série)

Le convertisseur élévateur (également connu sous le nom de hacheur boost) est utilisé pour augmenter la tension de la source (la batterie) dans le but de réduire le poids total des batteries dans la voiture. Cela peut être utile pour améliorer l'efficacité du système et réduire la taille et le poids des composants.

Un convertisseur DC-DC est utilisé pour convertir la tension continue (DC) d'un niveau à un autre. Dans le cas de la recharge de la batterie d'un véhicule électrique (VE) .

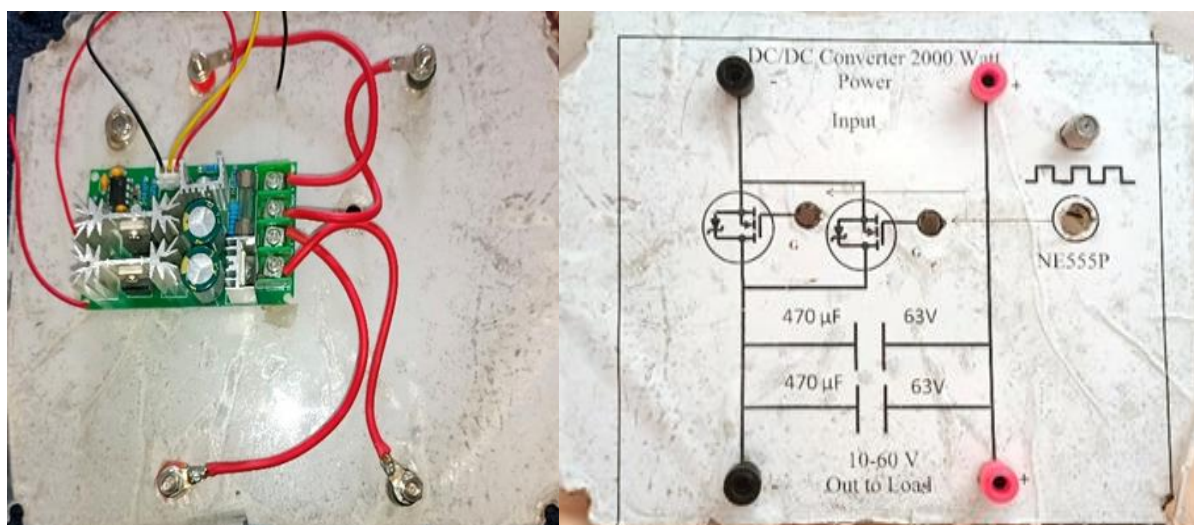


Figure.III.6 : Schémas réels d'un convertisseur DC/DC

Voici un schéma de principe d'un convertisseur DC/DC d'une puissance de 2000 watts. Ce convertisseur fonctionne en commutant la tension d'entrée DC en position marche et en position arrêt à une fréquence élevée. La fréquence de commutation est déterminée par le circuit intégré NE555P (résistance variable). Le temps de marche et le temps d'arrêt du signal de commutation sont ajustés pour réguler la tension de sortie.

La tension d'entrée DC est commutée par des MOSFET de puissance. Les MOSFET sont connectés dans une configuration de pont complet, ce qui signifie qu'ils sont commutés par paires. Cela crée une tension continue pulsée à la sortie du pont.

La tension continue pulsée est ensuite filtrée par une inductance et un condensateur pour créer une tension de sortie DC lisse.

A. Composants du hacheur DC/DC

a) Transistors (N-Channel 60V (D-S) MOSFET

Dans votre schéma, les transistors MOSFET fonctionnent comme des commutateurs électroniques qui contrôlent le flux de courant dans le circuit du convertisseur DC-DC. Ils fonctionnent en fonction de la tension appliquée à leur borne de grille (marquée "G" sur le schéma).

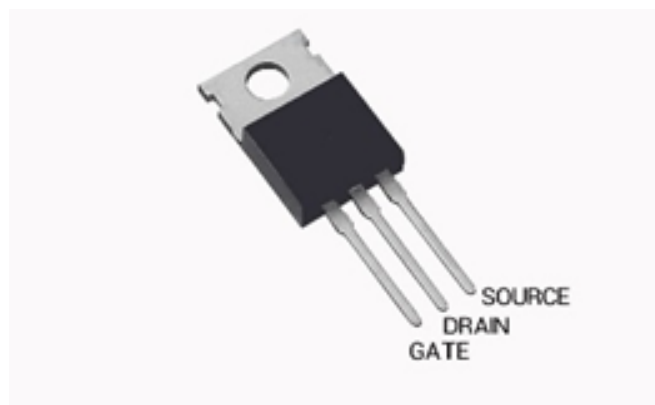


Figure.III.7: Transistors (N-Channel 60V (D-S) MOSFET

➤ Mécanisme de commutation

Lorsqu'une tension est appliquée à la grille, elle crée un champ électrique à l'intérieur du MOSFET, permettant au courant de circuler entre les bornes de source et de drain. Cela active le transistor MOSFET "on" et se comporte comme un interrupteur fermé.

À l'inverse, si aucune tension n'est appliquée à la grille, ou si une tension très basse est appliquée, le champ électrique est faible et un courant minimal circule entre le drain et la source. Cela désactive le transistor MOSFET "off" et agit comme un interrupteur ouvert.

➤ Rôle dans le convertisseur DC-DC

En activant et désactivant rapidement les transistors MOSFET (à des fréquences élevées déterminées par le circuit temporisateur NE555), ils régulent efficacement la tension moyenne qui apparaît à la sortie.

Les temps de marche et d'arrêt sont soigneusement contrôlés pour obtenir la tension de sortie souhaitée (généralement 63 V dans votre schéma) à partir de la tension d'entrée variable (10-60 V).

b) TIMERE

Dans certains cas, des temporisateurs peuvent être utilisés dans les convertisseurs DC/DC pour accomplir des fonctions spécifiques. Par exemple, un temporisateur peut être utilisé pour déterminer la durée de connexion d'un transistor à effet de champ MOSFET ou IGBT, ce qui affecte la tension de sortie du convertisseur. Cependant, tous les convertisseurs DC/DC n'utilisent pas de temporisateurs.

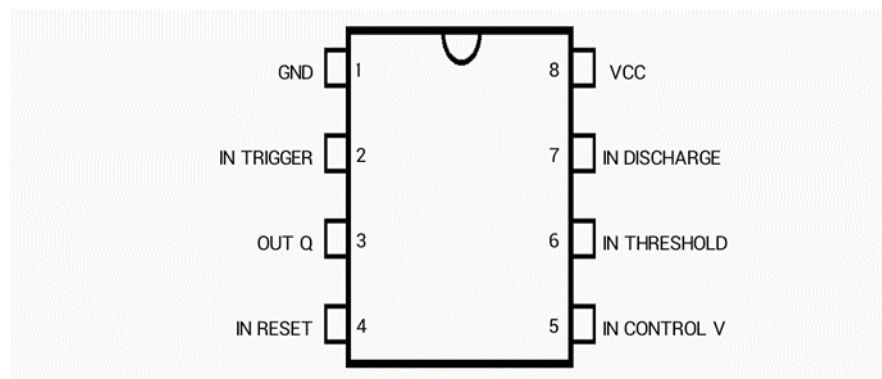


Figure.III.8 : Schémas de TIMERE.

c) Condensateurs

Les condensateurs électriques jouent un rôle crucial dans les convertisseurs DC/DC, où ils effectuent plusieurs fonctions nécessaires au bon fonctionnement du convertisseur. Principales fonctions des condensateurs dans les convertisseurs DC/DC :

- **Stockage d'énergie :** Les condensateurs stockent l'énergie électrique sous forme de champ électrique. Dans un convertisseur DC/DC, le condensateur se charge pendant le fonctionnement du convertisseur, puis se décharge ultérieurement pour fournir une énergie continue en sortie du convertisseur. Cela aide à réduire les fluctuations de tension de sortie et à améliorer sa stabilité.

- **Filtrage du courant** : Les condensateurs filtrent le courant électrique en éliminant les composantes à haute fréquence du courant. Cela aide à réduire le bruit électrique et à améliorer l'efficacité du convertisseur.
- **Protection du convertisseur** : Les condensateurs protègent le convertisseur DC/DC contre les augmentations soudaines du courant ou de la tension d'entrée. Ils agissent comme un réservoir d'énergie, absorbant le courant excédentaire et prévenant ainsi les dommages aux composants du convertisseur.
- **Support de fonctions spécifiques** : Dans certains cas, les condensateurs peuvent être utilisés pour soutenir des fonctions spécifiques dans un convertisseur DC/DC. Par exemple, un condensateur peut être utilisé pour créer un circuit oscillant pour le contrôle du convertisseur.



Figure.III.9 : Condensateurs

B. Les essais expérimentaux du hacheur

- 1^{ere} essai : Le hacheur série sans charge

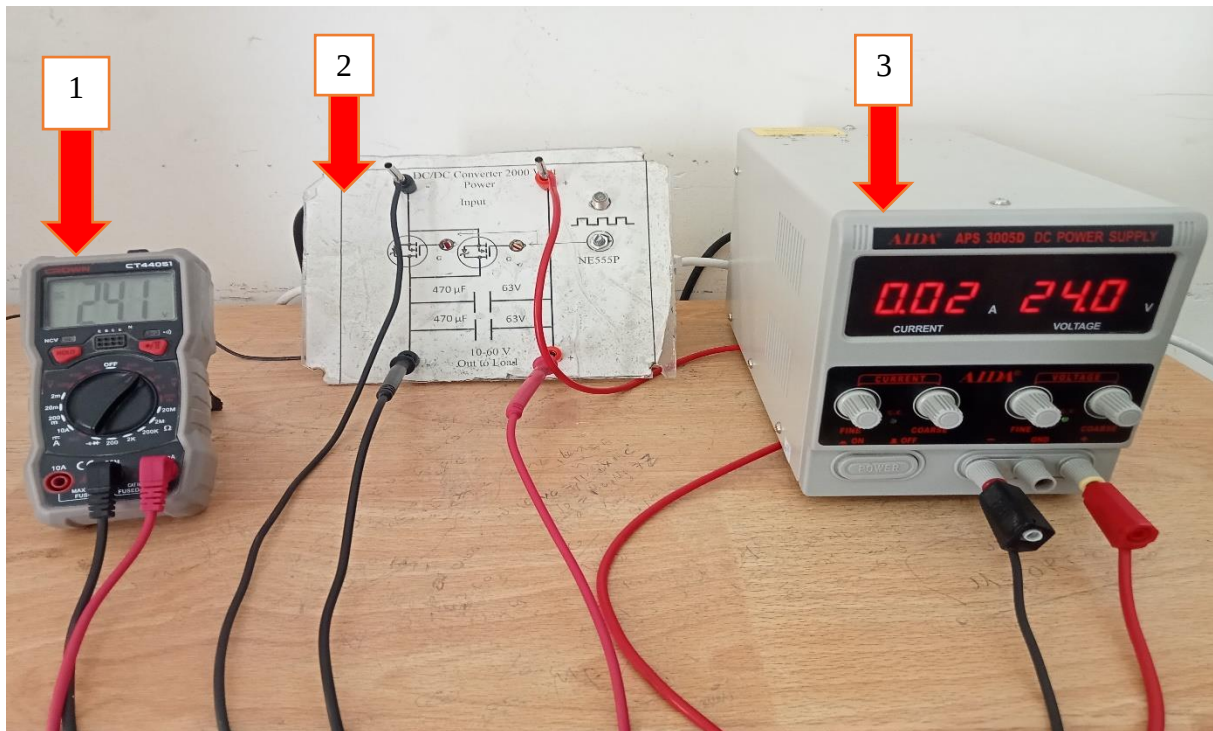


Figure.III.10 : 1^{ère} essai l'hacheur série sans charge.

- 1 : Alimentation stabilise 30V/5A
- 2 : L'hacheur série
- 3 : Multimètre digital 10A 600V LCD CROWN

Les résultats de ces essais sont donnés dans (le tableau.III.3) et(tableau.III.4)

Tableau.III.3 : 1^{ère} essai Le hacheur série sans charge (V=24 V).

Input	Out to load	Résistance variable
Tension d'entrée	Tension de sortie	
24 (V)	24.05 (V)	Position 1
24 (V)	24.06 (V)	Position 2
24 (V)	24.13 (V)	Position 3
24 (V)	24.19 (V)	Position 4
24 (V)	24.27 (V)	Position 5

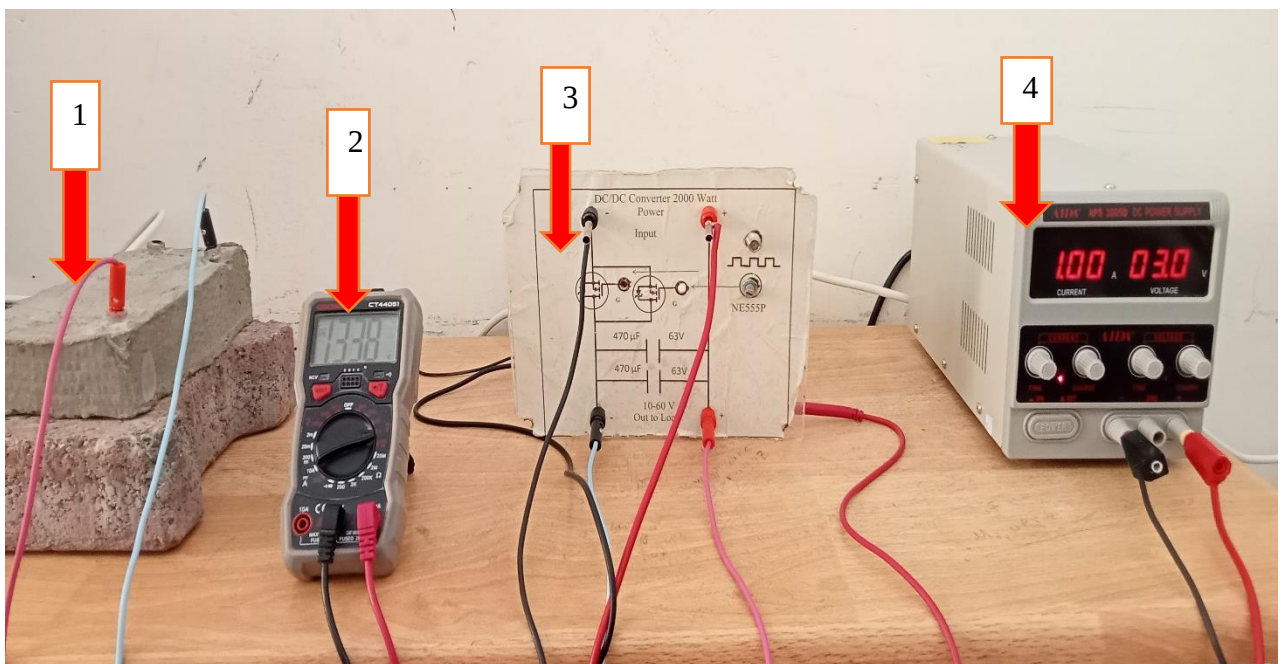
Tableau.III.4 : 1^{ème} essai Le hacheur série sans charge (V=30V).

Input	Out to load	Résistance variable
Tension d'entrée	Tension de sortie	
30 (V)	30.14 (V)	Position 1
30 (V)	30.16 (V)	Position 2
30 (V)	30.20 (V)	Position 3
30 (V)	30.25 (V)	Position 4
30 (V)	30.36 (V)	Position 5

En présence d'une tension d'entrée de 24 V dans le premier tableau ou de 30 V dans le deuxième tableau, nous remarquons un très léger changement (augmentation) de la tension à la sortie avec un changement de position de la résistance variable.

Lorsque la tension d'entrée passe de 24 V à 30 V, nous remarquons un changement dans la différence de tension à la sortie lorsque la position de la résistance est modifiée.

➤ 2^{ème} essai l' hacheur série avec charge

**Figure.III.11 : 2^{ème} essai le hacheur série avec charge.**

1. La charge.

2. Multimètre digital 10A 600V LCD CROWN

3. Le hacheur série

4. Alimentation stabilise 30V/5A

Les résultats de ces essais sont donnés dans(le tableau.III.5) et (tableau.III.6).

Tableau.III.5 : 2^{ème} essai le hacheur série avec charge V=3.3V, I=1A.

Input ('entrée)		Out to load (Le sortie)		Résistance variable	Rapport cyclique (α)
Tension	Courant	Tension	Courant		
3.3 (V)	1 (A)	1.365 (V)	1 (A)	Position 1	0.413
3.3 (V)	1 (A)	1.364 (V)	1 (A)	Position 2	0.413
3.3 (V)	1 (A)	1.360 (V)	1 (A)	Position 3	0.412
3.3 (V)	1 (A)	1.359 (V)	1 (A)	Position 4	0.411
3.3 (V)	1 (A)	1.358 (V)	1 (A)	Position 5	0.411

Tableau.III.6 : 2^{ème} essai l' hacheur série avec charge V=5.2V, I=2A.

Input (L'entrée)		Out to load (Le sortie)		Résistance variable	Rapport cyclique (α)
Tension	Courant	Tension	Courant		
5.2 (V)	2 (A)	2.708 (V)	2 (A)	Position 1	0.520
5.2 (V)	2 (A)	2.700 (V)	2 (A)	Position 2	0.519
5.2 (V)	2 (A)	2.701 (V)	2 (A)	Position 3	0.519
5.2 (V)	2 (A)	2.697 (V)	2 (A)	Position 4	0.518
5.2 (V)	2 (A)	2.697 (V)	2 (A)	Position 5	0.518

Nous définissons le rapport cyclique comme la valeur de la tension de sortie sur la valeur de la tension d'entrée $\alpha = \frac{V_s}{V_e} = \frac{V_{out}}{V_{inp}}$ (III.1)

Lors de l'ajout de la charge, nous observons une diminution de la tension de sortie d'environ la moitié de la tension d'entrée à courant constant.

Nous remarquons que lorsque nous augmentons le courant, la valeur de la tension augmente.

Nous remarquons qu'un changement dans la position de la résistance entraîne une diminution de la différence de tension à la sortie.

III.2.3. Moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est utilisé pour la traction des véhicules électriques , Le choix du moteur à courant continu est justifié par la simplicité de sa commande par rapport à celle des moteurs synchrones.



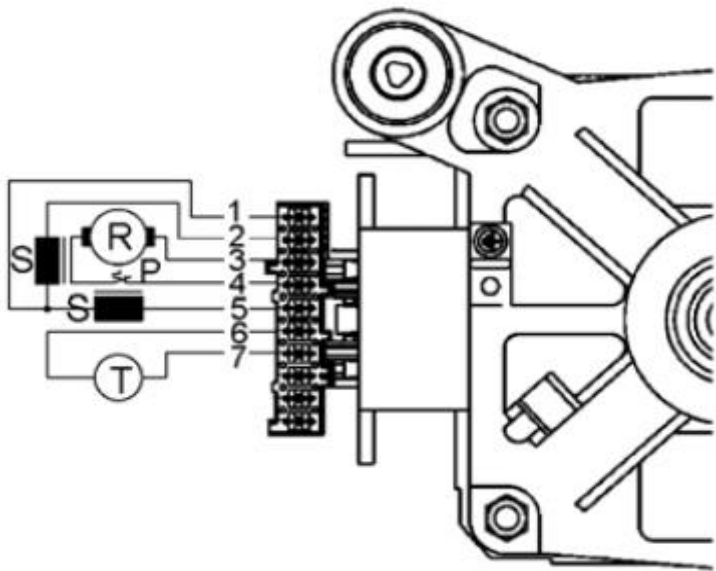
Figure.III.12 : Moteur universel monophasé.

Ce (tableau.III.7) présente les caractéristiques de base d'un moteur universel monophasé, y compris les détails qui le rendent adapté à une variété d'applications industrielles et domestiques.

Tableau.III.7 : Caractéristiques du moteur

TERMINALS ON MOTOR TERMINAL BLOCK	CHECKS	FAN MOTOR				
		Spar Part numbers	Volt	Hz	W	Ohm
6-7	Winding of tachometric generator (Ω)	12482530...	230/240	50	90	17,5 $\pm$ 7%

2-5	Stator winding (full field) (Ω)					
3-4	Rotor (Ω)					
1-5	Stator winding (tapped field) if terminal 1 is present (Ω).					



P = Protecteur de moteur
R = Rotor
S = Stator
T = Générateur tachymétrique

A. Résultats et commentaires : régulation de la vitesse du MCC

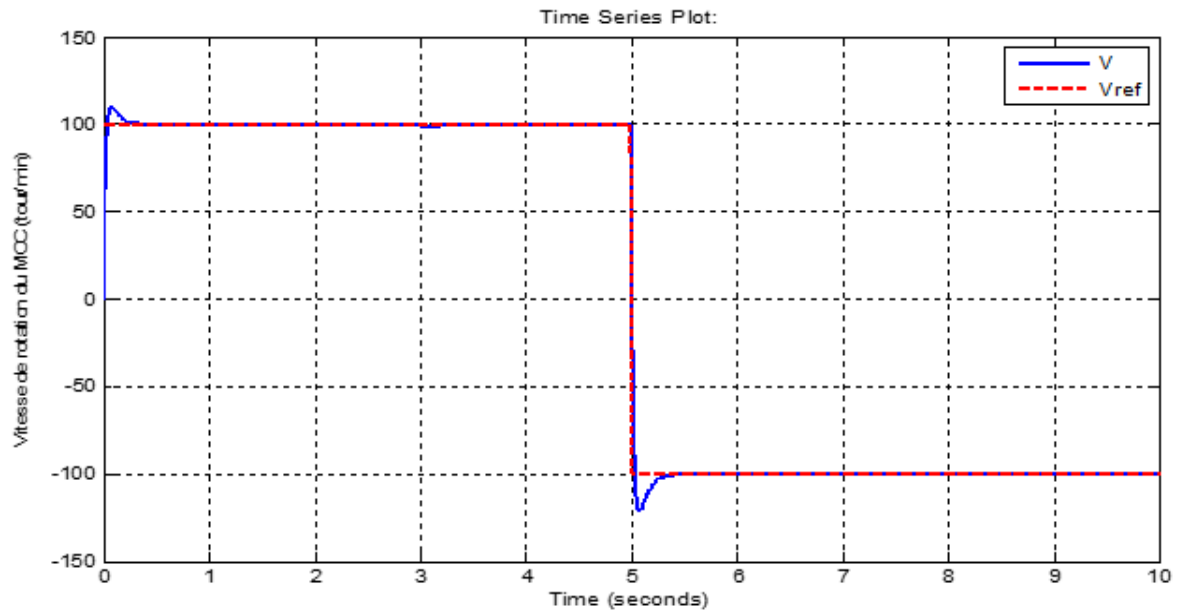


Figure.III.13 : La vitesse de la rotation et sa référence du MCC en fonction du temps

(La figure.III.13) montre que la vitesse de rotation du moteur suit précisément sa référence tout au long de la simulation. Cela signifie que le moteur parvient à atteindre la vitesse désirée, indiquée par la référence, de manière constante et sans déviation significative.

À l'instant 5 secondes, la référence de vitesse change brusquement de 100 tours par minute (tpm) à -100 tpm. La courbe de la vitesse de rotation montre que le moteur parvient à suivre ce changement rapide de manière efficace. Cela démontre que le système de contrôle est capable de gérer des transitions rapides et importantes dans la consigne de vitesse.

La capacité du moteur à suivre fidèlement la référence, même lors de changements abrupts, indique que le régulateur de vitesse utilisé dans le système est robuste. Un régulateur robuste est capable de maintenir les performances du système malgré les perturbations et les variations rapides de la consigne.

Le fait que la vitesse de rotation reste alignée avec la référence tout au long de la simulation suggère une grande précision du régulateur de vitesse. Un tel niveau de précision est crucial dans de nombreuses applications industrielles et techniques où la performance du moteur doit être strictement contrôlée.

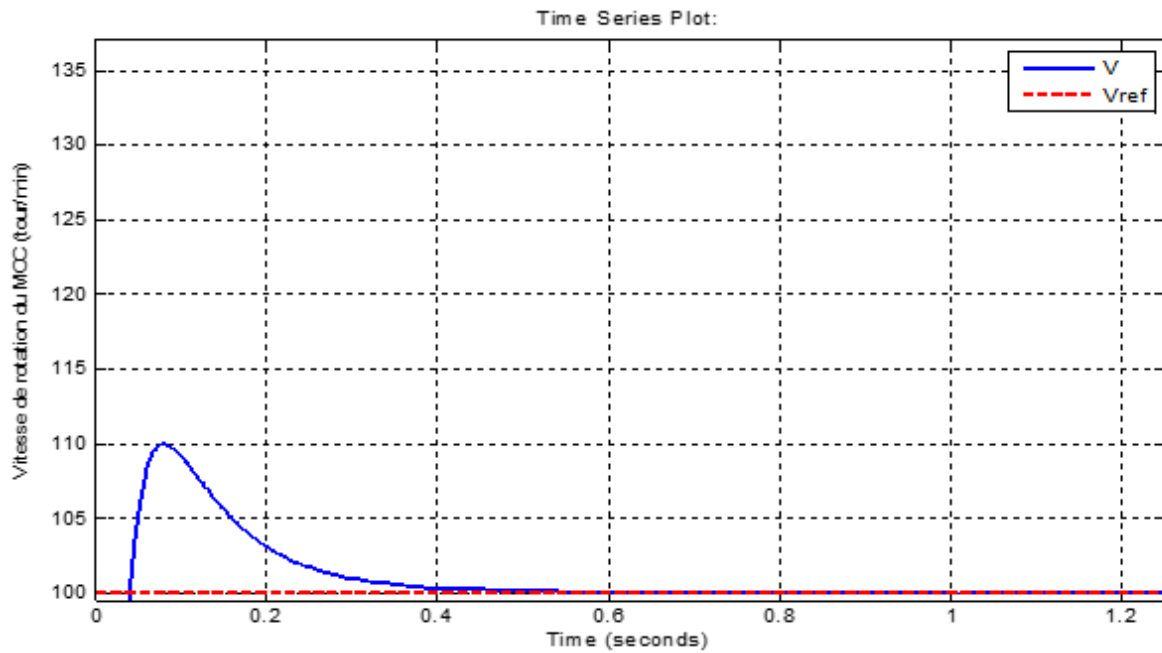


Figure.III.14 : Zoom.1.la vitesse de la rotation du MCC en fonction du temps

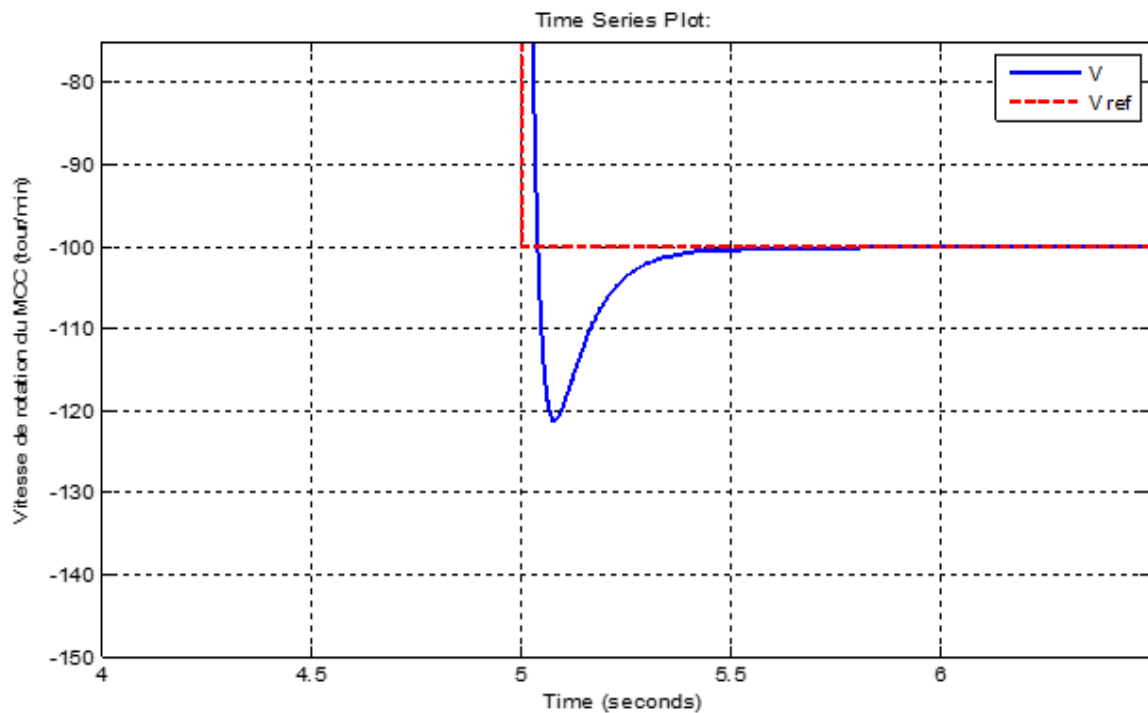


Figure.III.15 : Zoom.2.la vitesse de la rotation du MCC en fonction du temps

(Les figures.III.14 et III.15) montrent que le dépassement de la vitesse par rapport à la référence atteint ± 10 tours par minute (tpm). Ce dépassement représente la différence maximale entre la vitesse réelle du moteur et la consigne. Un dépassement de ± 10 tpm est souvent

considéré comme acceptable, surtout dans des systèmes où des variations minimales peuvent être tolérées sans impact significatif sur les performances globales.

Le temps de réponse, défini comme le temps nécessaire pour que la vitesse du moteur atteigne et reste proche de la nouvelle consigne après un changement, est de moins de 0,4 seconde. Ce temps de réponse rapide est un indicateur de l'efficacité du régulateur de vitesse.

Un temps de réponse inférieur à 0,4 seconde est généralement très bon, car il montre que le système peut rapidement s'ajuster aux changements de consigne, ce qui est crucial pour des applications nécessitant des adaptations rapides.

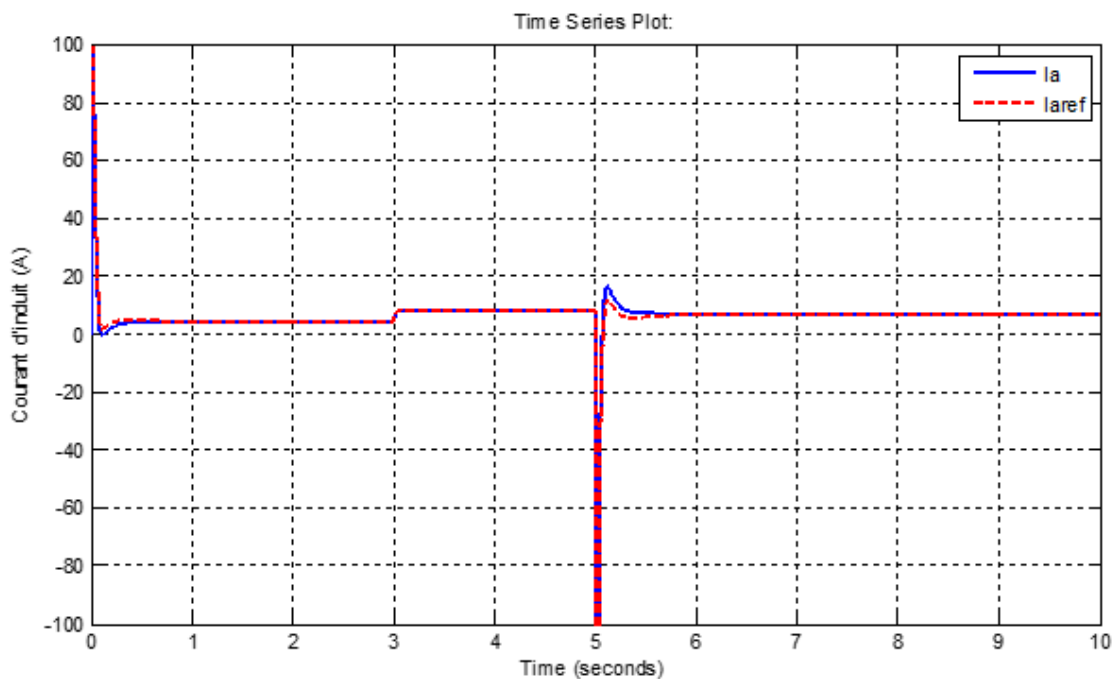


Figure.III.16 : Le courant d'induit et sa référence du MCC en fonction du temps

(La figure.III.16) montre que le courant d'induit suit globalement sa référence, ce qui signifie que le système de régulation parvient à maintenir le courant proche de la consigne malgré les perturbations.

Bien que le courant d'induit présente certaines perturbations, il reste en phase avec la référence. Ces perturbations peuvent être dues à diverses causes telles que des variations de charge, des fluctuations de tension, ou des transitoires dans le système.

La capacité du système à suivre la référence de courant malgré les perturbations indique que le régulateur de courant est robuste. Un régulateur robuste peut gérer les variations et les perturbations sans dévier significativement de la consigne.

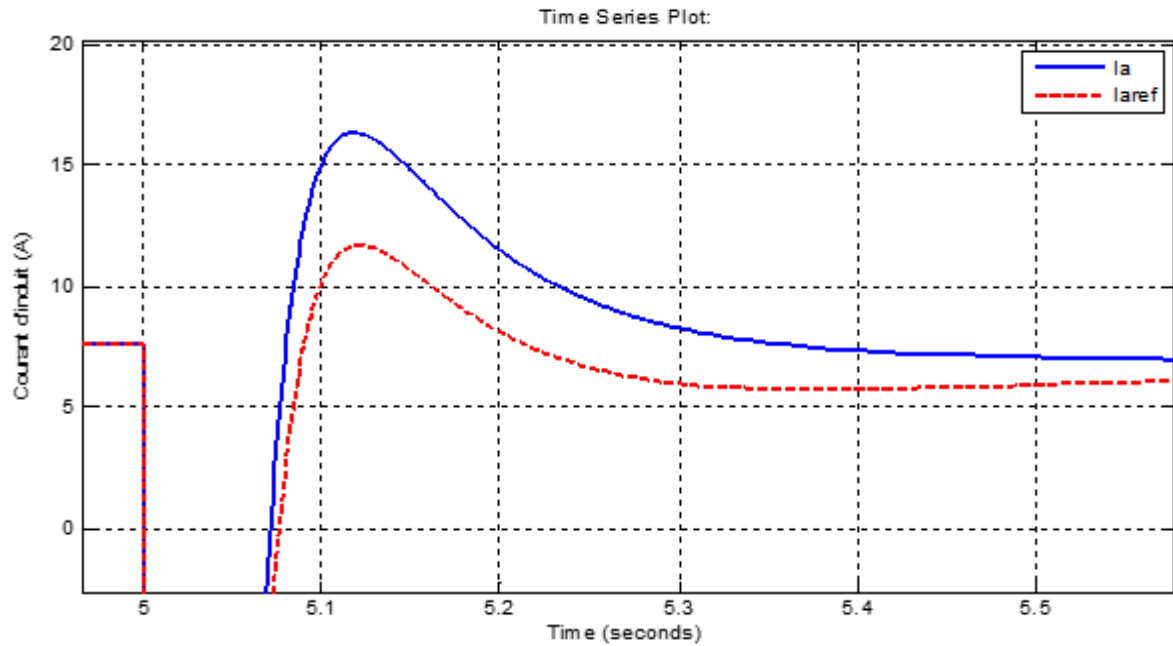


Figure.III.17 : Zoom.1.le courant d'induit et sa référence du MCC en fonction du temps

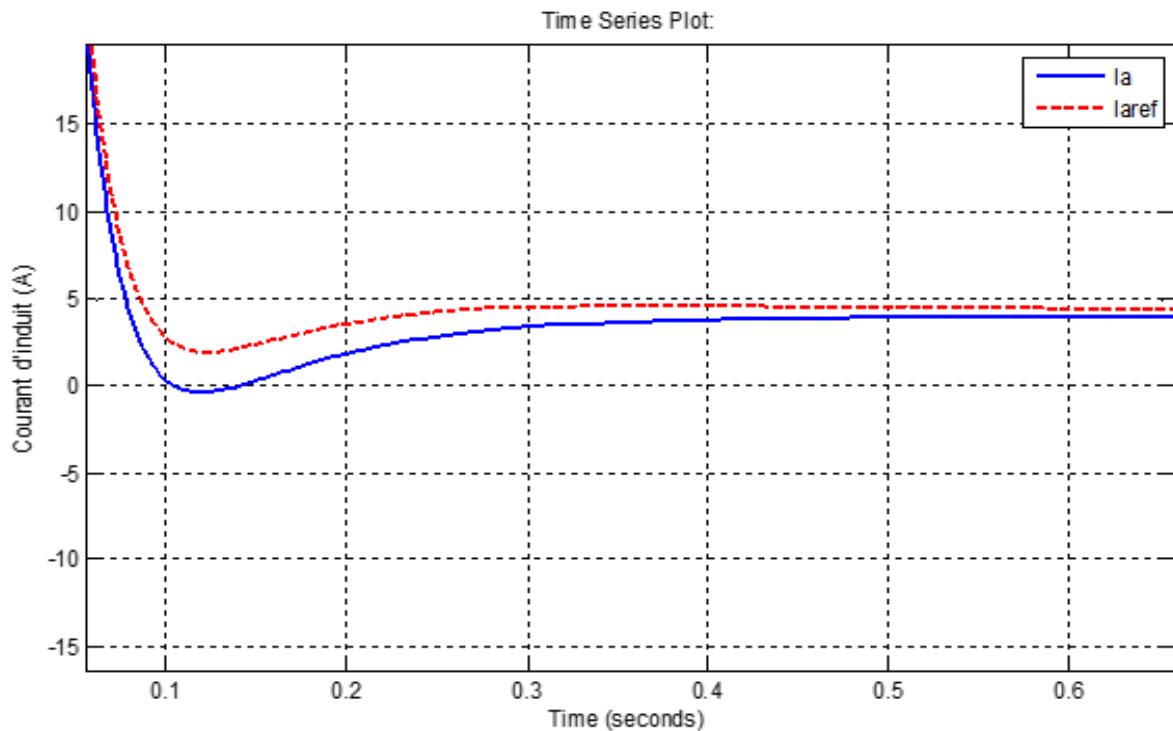


Figure.III.18 : Zoom.2.le courant d'induit et sa référence du MCC en fonction du temps

(Les figures.III.17 et III.18) montrent que le dépassement du courant par rapport à sa référence atteint ± 10 ampères (A). Ce dépassement représente la différence maximale entre le

courant réel d'induit et la consigne. Un dépassement de ± 10 A est souvent considéré comme acceptable, surtout dans des systèmes où des variations minimales peuvent être tolérées sans impact significatif sur les performances globales.

Le temps de réponse, défini comme le temps nécessaire pour que le courant d'induit atteigne et reste proche de la nouvelle consigne après un changement, est de 0,41 seconde. Ce temps de réponse rapide est un indicateur de l'efficacité du régulateur de courant. Un temps de réponse de 0,41 seconde est généralement très bon, car il montre que le système peut rapidement s'ajuster aux changements de consigne, ce qui est crucial pour des applications nécessitant des adaptations rapides.

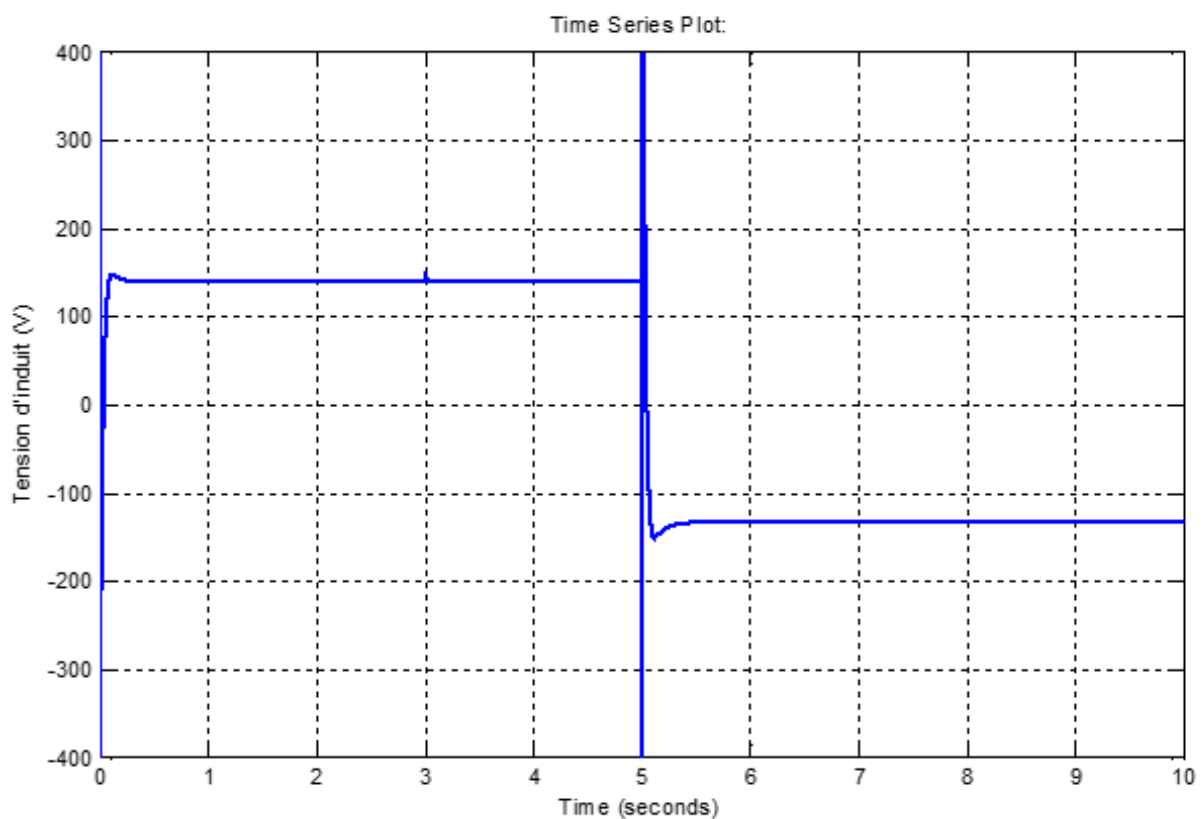


Figure.III.19 : La tension d'induit du MCC en fonction du temps

Le fait que la tension d'induit se maintienne à des valeurs spécifiques de 140 V et -140 V, respectivement, montre que le régulateur de tension fonctionne efficacement pour maintenir les valeurs souhaitées. Cela est essentiel pour garantir que le moteur fonctionne de manière optimale dans les différentes phases de son fonctionnement.

La capacité du système à maintenir la tension stable malgré les perturbations mineures montre la robustesse du régulateur de tension. Un régulateur robuste peut gérer les petites variations et maintenir la stabilité, ce qui est crucial pour le bon fonctionnement du moteur.

III.3. Conclusion

Dans ce troisième et dernier chapitre, qui représente la partie appliquée de notre travail, nous avons réalisé deux expériences principales pour évaluer les performances du système.

Lors de la première expérience, la batterie a été déchargée en utilisant une résistance variable.

Les résultats ont montré une stabilité des performances de la batterie, avec une tension descendant à 9,7 volts après 60 minutes, sous une résistance comprise entre 1,7 et 1,8 ohms et une température constante de 26,7 degrés Celsius.

Lors de la deuxième expérience, nous avons étudié la régulation de la vitesse du moteur à courant continu (MCC). Les résultats ont montré que la vitesse de rotation du moteur et le courant suivent précisément la référence définie, avec des dépassements mineurs acceptables. L'expérience a également démontré l'efficacité du régulateur de tension à maintenir les valeurs souhaitées pour garantir des performances optimales du moteur.

Ces résultats confirment l'efficacité et la stabilité du système, ce qui améliore notre compréhension des performances de la batterie et du moteur dans des conditions de fonctionnement spécifiques, et permet d'optimiser les systèmes électriques dans des applications pratiques.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette thèse a exploré les différentes facettes de l'amélioration des performances des moteurs électriques dans les véhicules électriques, en se concentrant sur une chaîne de traction composée d'une batterie, d'un hacheur et d'un moteur à courant continu. Les principales conclusions et contributions de cette recherche sont les suivantes :

- **Avancées technologiques et défis du véhicule électrique:** l'état de l'art a révélé les technologies actuelles et les défis des véhicules électriques, soulignant la nécessité d'améliorations continues pour augmenter l'autonomie et la fiabilité du véhicule électrique.
- **Modélisation des Composants:** la modélisation des principaux organes d'un véhicule électrique a permis de comprendre les comportements dynamiques de la batterie, du hacheur et du moteur à courant continu. Cette compréhension est cruciale pour optimiser la performance globale de la chaîne de traction.
- **Résultats expérimentaux et simulations:** les tests expérimentaux ont permis d'évaluer individuellement chaque composant. Les essais de charge et de décharge de la batterie et les tests du hacheur avec variation de la résistance variable ont fourni des données précieuses pour l'optimisation. Malgré l'échec des tests pratiques du moteur, les simulations ont offert des solutions pour le réglage de la vitesse, démontrant l'efficacité de la modélisation théorique.
- **Problèmes rencontrés et solutions proposées:** l'échec du moteur lors des tests pratiques souligne l'importance de simulations robustes et de calibrations précises pour chaque composant. Les résultats suggèrent des voies d'amélioration pour l'intégration des composants et l'optimisation des performances du moteur.

En conclusion, cette thèse apporte une contribution significative à l'amélioration des performances des moteurs électriques pour les véhicules électriques. Les études théoriques et expérimentales menées offrent des perspectives pour le développement futur de chaînes de traction plus efficaces et fiables. Les résultats obtenus et les méthodologies développées dans cette recherche constituent une base solide pour des travaux futurs visant à perfectionner les systèmes de propulsion électrique du véhicule électrique.

Annexes

Annexe A : les paramètres de MCC

$R_a=0.5$; % Paramètres de la MCC

$L_a=0.05$;

$J_m=0.08$;

$f=0.015$;

$T_m=J_m/f$; ; Cst de temps électrique

$U_n=240$;

$I_n=50$;

$I_{max}=2 \cdot I_n$;

$N_n=157$; % la vitesse nominale

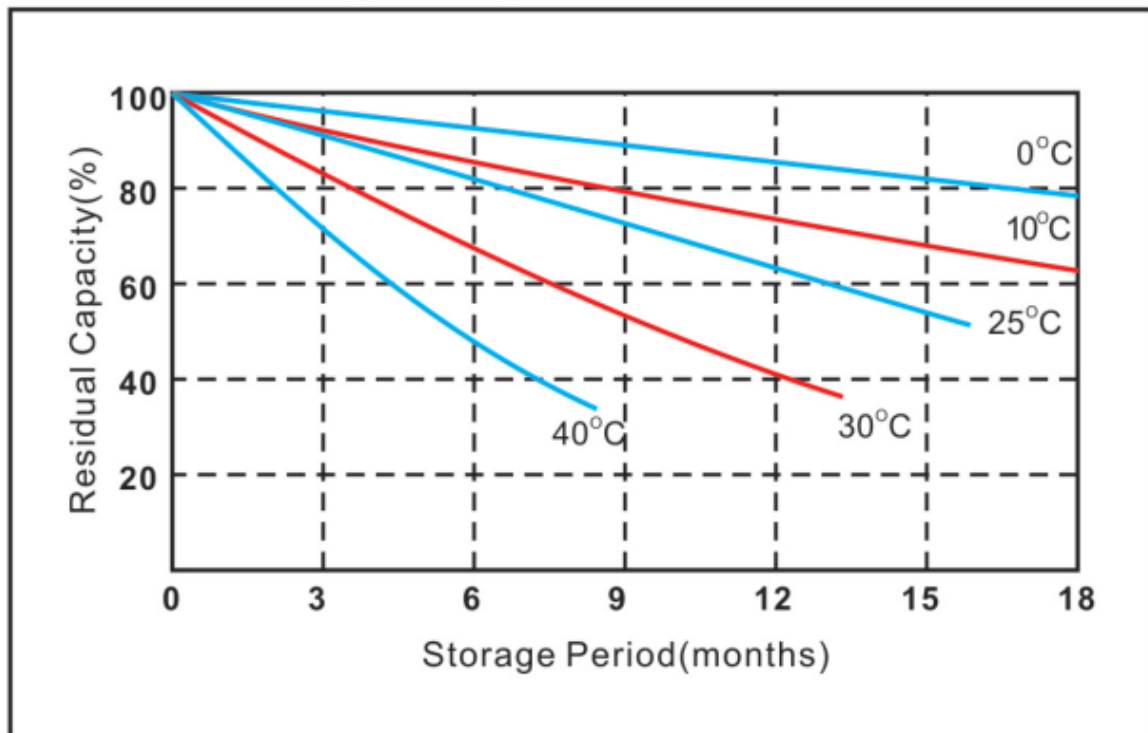
$N_{max}=209$;

$K_t=(U_n-R_a \cdot I_n)/N_n$; % Cst de La FCEM

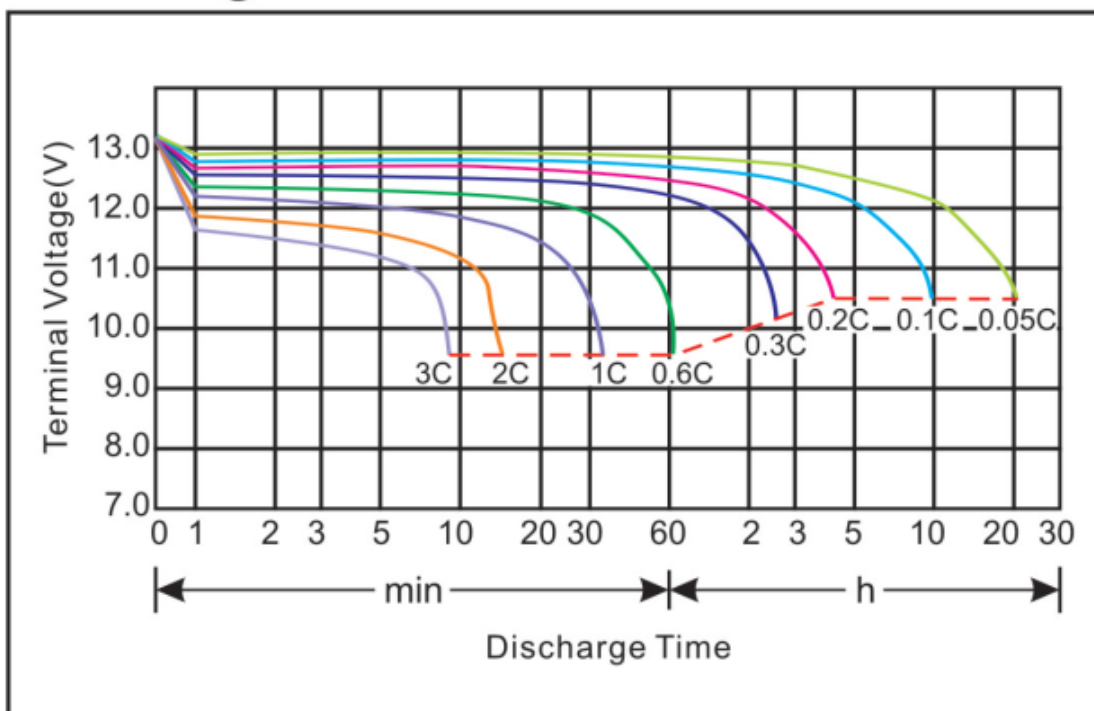
$T_{ak}=L_a/R_a$; % Cst de temps électrique

Annexe B : Les courbes de décharge de la batterie

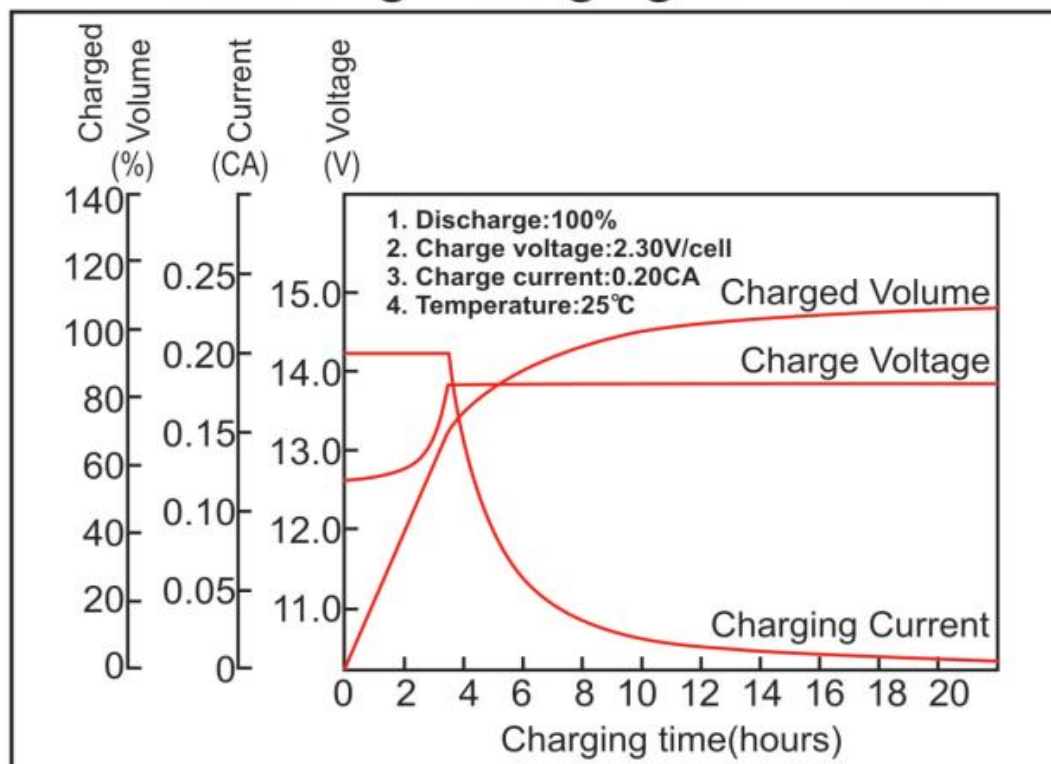
Residual Capacity



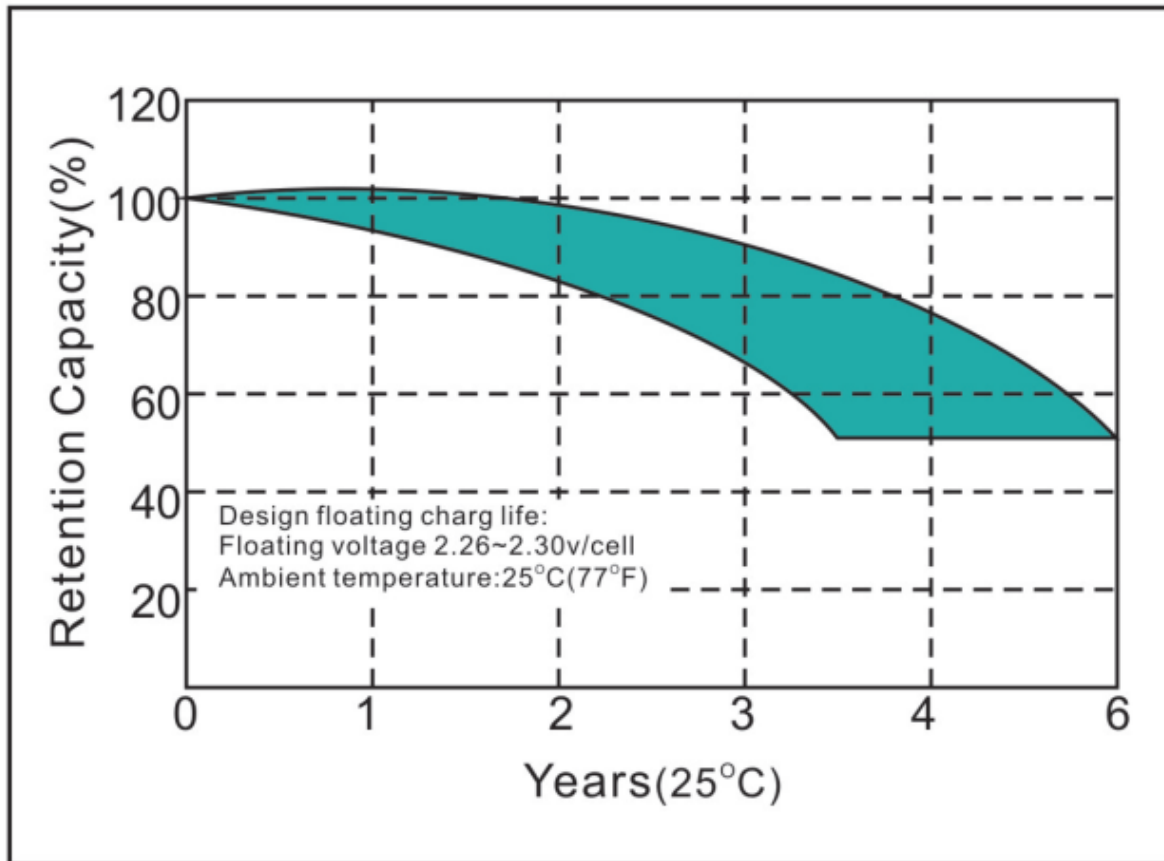
Discharge Current 25°C



Constant voltage charging characteristics



Float Life



Références

Références

- [1] A. Daanoun ; "Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides, Thèse doctorat, Université de Grenoble", décembre 2012.
- [2] Daanoun A ; "Contribution à l'étude et à l'optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides. Thèse de doctorat, université de Grenoble", 2012.
- [3] S. Lacroix ; "Modélisation et commande d'une chaîne de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries", Thèse doctorat, Université Paris-Sud, Mai 2013.
- [4] Y. Kchaou ; "Etude d'industrialisation de véhicules électriques en Tunisie, Mémoire de Master professionnel", Université Virtuelle de Tunis, Juillet 2013.
- [5] K. Houacine ; "Commande neuro-floue d'une machine asynchrone dans une chaîne de propulsion d'un véhicule électrique", Thèse doctorat, Université Mouloud Mammeri, Juin 2016.
- [6] Redah SADOON ; « Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage », thèse de doctorat ECOLE CENTRALE DE LILLE, France, 2013.
- [7] Hydro-Québec et les autres ; « BORNES DE RECHARGE POUR VÉHICULES ÉLECTRIQUES » , Août 2015.
- [8] Rochdi TRIGUI ; « Approche systématique pour la modélisation, la gestion de l'énergie et l'aide au dimensionnement des véhicules hybride thermique-électrique », thèse de doctorat, université des sciences et technologie de Lille, 2011.
- [9] A.NOUH ; "Contribution Au Développement D'un Simulateur Pour Les Véhicules Electriques Routiers", Thèse doctorat, Université de technologie Belfort Montbéliard, France, 2008.
- [10] EVEA ; «Architecture et composition des véhicules électriques», lundi, février 19, 2024.
- [11] <https://www.omazaki.co.id/en/electric-vehicle-components/>

- [12] R. TRIGUI ; « Approche systémique pour la modélisation, la gestion de l'énergie et l'aide au dimensionnement des véhicules hybrides thermiques-électriques », HDR, l'Université Lille 1, Sciences et Technologies, 2011.
- [13] Autocar Prom; « BorgWarner introduces onboard battery charger for EVs », 16 May 2019.
- [14] L'Averre- France ; « L'impact du mix énergétique sur la production des batteries mesuré dans une nouvelle étude », 17 juin 2020.
- [15] Valeo; « High Voltage DC/DC Converter », 05 Sep 2023.
- [16] AMROUCHE Bissam ; « Étude et commande des véhicules hybrides parallèles », Mémoire de fin d'études, Université A.MIRA Bejaïa, Juin 2013.
- [17] Bruno Moolay ; « Batteries nouvelle génération : 1.000 kilomètres d'autonomie d'ici à 2035», 18 mars 2024.
- [18] J. MARTIN; V. NEBURCHILOV; H. WANG; AND W. QU; Air cathodes for metal-air batteries and fuel cells, in Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2009 IEEE, Montreal, QC, 2009, pp. 1–6.
- [19] CEA-TECH ; « La batterie lithium-soufre passe à l'échelle supérieure », consulté le 25 août 2017.
- [20] Battery University; « Charging Electric Vehicles», 24-Apr-2019.
- [21] ORIGINAL RESEARCH; «Battery charger load-following controller for over-voltage and under-voltage conditions», 20 September 2023.
- [22] Victron Energy ; «Optimiser la vie des batteries plomb - Leçon V02 Bis.docx», Margriet Leeftink, Jacques Noël.
- [23] <https://www.frandroid.com/survoltes>.
- [24] Maxime Pasture ; «Les 5 facteurs qui influencent l'autonomie d'une voiture électrique», 12 févr, 2021.
- [25] Miio ; «8 conseils pour optimiser la batterie de votre voiture électrique», 05/03/24.
- [26] Emanuel De Jaeger ; Bruno Colmant ; " Ampact du développement du parc automobile électrique sur les réseaux électriques belges, pour la recharge dans le secteur résidentiel" -2016.

- [27] EVBox (entreprise) ; " Quels sont les différents modes de recharge électrique ?", 15/12/2022.
- [28] A. Chaimaa ; B. Khadidja ; " Évaluation des infrastructures de charges des véhicules électriques sur le réseau électrique pour la recharge dans le secteur résidentiel " 2 / 07 /2021.
- [29] Amalec Business ;"Les défis et solutions pour le déploiement des infrastructures de recharge",15 août 2023 , Disponible sur LinkedIn.
- [30] Amalec Business ; "Défis et opportunités des infrastructures de recharge pour les véhicules électriques en Belgique : Un aperçu des aspects réglementaires et législatifs ", 18 juil. 2023, Disponible sur LinkedIn.
- [31] Tridens technology ; "mondiales de voitures électriques et statistiques sur les véhicules électriques (2024) " ,5 mai 2023.
- [32] heliox,"L'électrification de l'Europe : Explorer l'adoption croissante des véhicules électriques " 21 février 2024.
- [33] Virta, "PANORAMA DU MARCHÉ FRANÇAIS DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES : STATISTIQUES ET PRÉDICTIONS " ,2024.
- [34] The insight partners ; Marché européen des véhicules électriques analyse des tendances et de la croissance /Année de prévision 2030" , jan 2024
- [35] Mordor intelligence; "Analyse de la taille et de la part du marché chinois des véhicules électriques – Tendances et prévisions de croissance (2024-2029) ", 2023, July.
- [36] Suvrat Kothari ; "Les voitures électriques chinoises conquièrent l'Asie et l'Amérique du Sud", Nov 14, 2023.
- [37] Pierre-Yves Dugua ; "Quand les divisions politiques freinent la voiture électrique aux Etats-Unis",17/11/2023.
- [38] Deloitte ; " Les défis du passage à la mobilité électrique", France.
- [39] Mr. LAMKADMI Mouloud ; Mr. MIMOUNI Ali ; "Etude et simulation du Systems de commande d'un moteur à courant continu pour véhicule électrique", 2023.
- [40] Daniel Chatroux ;" Accumulateurs Lithium-ion et véhicules électriques". Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France.

- [41] Daniel Chatroux ; "Accumulateurs Lithium-ion et véhicules électriques" SGE 2020 - Symposium de Génie Electrique ; Jul 2021 ; Nantes. France ; cea-03344278
- [42] j.Trovà ; M.Dubois ; "Méthode de dimensionnement et modélisation de batteries lithium-ion " ; 28 avril 2017.
- [43] F. Huet, "A review of impedance measurements for determination of the state-of charge or state-of-health of secondary batteries", Journal of Power Sources, 1998.
- [44] Olivier Tremblay ET Louis-A. Dessaint ; "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications"; World Electric Vehicle Journal, AVERE; EVS24 Stavanger Norway, May 13 - 16, 2009.
- [45] Ahmad Darabi et al; «Modeling of Lead-Acid Battery Bank in the Energy Storage Systems»; International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Website: www.ijetae.com, 2013.
- [46] S. Wijewardana; "New Dynamic Battery Model for Hybrid Vehicles "; International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Website: www.ijetae.com, 2014.
- [47] Sergei Melentjev et Deniss Lebedev; "Overview of Simplified Mathematical Models of Batteries"; Tallinn University of Technology (Estonia); Publication of Doctoral School of Energy and Geotechnology, Pärnu 2013.
- [48] P.Vyroubal et al, "Simulation of the Behavior of the Lithium Ion Battery"; Advances in Military Technology , AiMT ; Vol. 9, No. 1, June 2014.
- [49] Essam M. Allam, «Study Vehicle Battery Simulation and Monitoring System»; American Journal of Modeling and Optimization, 2015.
- [50] Olivier Tremblay et al ; "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles", IEEE, 2007.
- [51] Olivier Tremblay et Louis-A.Dessaint, "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications"; EVS24 Stavanger, Norway, World Electric Vehicle Journal AVERE, 2009.
- [52] Valer Pop; Henk Jan Bergveld ; Dmitry Danilov ; Paul P.L. Regtien and Peter H.L. Notten ; "Battery Management Systems; Accurate State-of-Charge Indication for Battery

Powered Applications”; Philips Research Laboratories; Eindhoven University of Technology; The Netherlands; Springer 2008.

[53] Tarfaya Yazid ; Siad Haythem ; “ REGLAGE ET STABILISATION DE LA TENSION D’UNE BATTERIE DANS UN SYSTEME PV Présenté ” 2019.

[54] HAIK Ammar ; "Etude et simulation du diagnostic des défauts et anomalies d’un générateur photovoltaïque", Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, thèse de Master, 2020, 90p.

[55] Cours d’Electronique De Puissance IUT GEII – 2ième année – Option EEP, disponible sur ; www.thierry-lequeu.fr/data/2005-2006-IUT-EDP-9.pdf

[56] K. Fatma ; T. Taher ; " Modélisation et commande en vitesse d’un moteur à courant continu alimenté par un hacheur MLI " 13/10/2015.

[57] B. Alaeddine ; " Conception d’une Architecture d’Instrumentation en vue de la Modélisation et de la Surveillance d’un Moteur à Courant Continu "

[58] D. Bochra ; “Modélisation et simulation de la commande d ’ un moteur à courant continu,” 09/09/2020.

[59] A. Boubaker, " Etude d’un Moteur à Courant continu et Simulation, mémoire de licence", 2017, 23p.

[60] B. Hassiba ; B. Fadhila ; "Modélisation et simulation d’une régulation de la machine à courant continu ",27/09/2018

[61] Guy Segulier ; Francis Notelet ; «Electrotechnique Industrielle », Technique et documentation Lavoisier, 5e tirage revu, 1987.

[62] K.RAFIL, M.MEZIANI « Etude de la commande et de la régulation d’un moteur à courant continu », Mémoire d’ingénieur d’état en Machines électriques, UMMTO, 2006.

[63] Hydro-Québec et les autres ; "BORNES DE RECHARGE POUR VÉHICULES ÉLECTRIQUES " , Août 2015.

[64] Gismero, A.; Schaltz, E.; Stroe, D.-I. Recursive State of Charge and State of Health Estimation Method for Lithium-Ion Batteries Based on Coulomb Counting and Open Circuit Voltage. *Energies* 2020, 13, 1811.

- [65]** Hinz; H. "Comparison of Lithium-Ion Battery Models for Simulating Storage Systems in Distributed Power Generation. Inventions" ; 2019, 4, 41.
- [66]** Ren, G.; Wang, H.; Chen, C.; Wang, J. An energy conservation and environmental improvement solution-ultra-capacitor/battery hybrid power source for vehicular applications. Sustain. Energy Technol. Assess. 2021; 44, 100998.

Résumé

Résumé

Titre du mémoire : Amélioration de performance du moteur électrique applique au système embarque.

Auteur : Nouara Khedir. Gherrah Mellak. Houamdi Hend.

Mots clés : Véhicule électrique, Batterie, Moteur électrique, Performance.

Résumé : Le véhicule électrique est un véhicule qui fonctionne à l'énergie électrique stockée dans une batterie plutôt qu'un moteur à combustion interne fonctionnant à l'essence ou au diesel, ce qui ne représente aucun danger pour l'environnement.

Cependant, l'objectif est d'améliorer les performances du moteur électrique pour obtenir les meilleures performances possibles. Pour cela, nous avons choisi un moteur qui réduit les coûts par rapport à d'autres types de moteurs, et qui est simple dans sa conception, ce qui le rend facile à entretenir et à réparer.

Thesis title: Performance improvement of the electric motor applied to the onboard system

Keywords: Electric vehicle, Battery, Electric motor, Performance.

Abstract: The electric vehicle is a vehicle that operates on electrical energy stored in a battery rather than an internal combustion engine running on gasoline or diesel, making it environmentally friendly. However, the goal is to improve the performance of the electric motor to achieve the best possible performance. For this purpose, we chose a motor that reduces costs compared to other types of motors and is simple in its design, making it easy to maintain and repair.

عنوان المذكرة: تحسين أداء المحرك الكهربائي المطبق على النظام المضمن.

الكلمات المفتاحية: سيارة كهربائية، بطارية، محرك كهربائي، أداء.

الملخص: المركبة الكهربائية هي مركبة تعمل بالطاقة الكهربائية المخزنة في بطارية بدلاً من محرك احتراق داخلي يعمل بالبنزين أو الديزل، وهذا لا يشكل أي خطر على البيئة. ومع ذلك، الهدف هو تحسين أداء المحرك الكهربائي للحصول على أفضل أداء ممكن. لذا، قمنا باختيار محرك يقلل التكاليف مقارنة بأنواع أخرى من المحركات، وهو بسيط في تصميمه مما يجعله سهل الصيانة والإصلاح.