



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électromécanique
Électromécanique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
BENCHENNA Ahmed Khaireddine ET BOUBEKEUR Ahmed Bouzid

Le : dimanche 26 juin 2022

Optimisation des paramètres du régulateur de vitesse d'un véhicule électrique par la technique PSO

Jury :

Dr	Okba KRAA	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Dr	Ahmed GHAMRI	MCA	Université de Biskra	Président
Dr	Nassima BEKHOUCHA	MAB	Université de Biskra	Examineur



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électromécanique

Électromécanique

Réf. :

Optimisation des paramètres du régulateur de vitesse d'un véhicule électrique par la technique PSO

Le : dimanche 26 juin 2022

Présenté par :

BENCHENNA Ahmed Khaireddine

BOUBEKEUR Ahmed Bouzid

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. KRAA Okba

Signature Avis favorable du Président du Jury

GHAMRI Ahmed

Cachet et signature

Remerciements:

Dieu merci, nous avons fait ce travail et nous ne pouvons que remercier tous ceux qui ont couronné le travail en cours.

Nous tenons à remercier tous et particulièrement :

- Dr. Okba Kraa (Promoteur).

Merci pour ses conseils productifs et son bon encadrement, et pour toutes ses notes liées à ce travail.

Nous tenons également à remercier les membres du jury qui nous ont donné le privilège d'accepter de juger cet humble travail.

Dédicace :

Nous dédions ce mémoire de fin d'étude à :

Nos chers parents.

Nos frères et sœurs.

Nos collègues d'études.

Nos amies.

Résumé :

Les voitures thermiques utilisent une grande quantité de carburant et causent une grande pollution dans le climat, ce qui a conduit au développement de l'idée des voitures électriques pour se débarrasser de ces problèmes. Dans ce travail, nous allons essayer d'étudier la source d'énergie dans les véhicules électriques (batteries, réseaux électriques...), les types de moteurs utilisés dans la chaîne de traction, la partie mécanique (réducteur, boîte de vitesses, et différentiel mécanique, etc). l'objectif de notre travail est de faire déterminer les paramètres du contrôleur PID de la vitesse d'un véhicule électrique par l'utilisation de la méthode d'optimisation PSO. La fonction objective définie est de minimiser l'erreur entre la vitesse mesurée et la vitesse de référence imposée, l'optimisation est faite off line pour avoir déterminé les paramètres de PID qui correspondent aux bonnes performances dynamiques durant le régime transitoire et forte stabilité et robustesse en régime permanent. La validation du système a été faite par la simulation sous Matlab/Simulink.

Mots clé : Véhicule Electrique, Hacheur, Batteries, Modélisation, Machine à Courant Continu, Algorithme de PSO.

Abstract:

Thermal cars use a large amount of fuel and cause pollution in the climate, which led to the development of the idea of electric cars to get rid of these problems. In this work, we will try to study the source of energy in electric vehicles (batteries, electrical networks...), the types of motors used in the traction chain, the mechanical part (reducer, gearbox, and mechanical differential, etc). the objective of our work is to determine the parameters of the PID controller of the speed of an electric vehicle by using the PSO optimization method. The defined objective function is to minimize the error between the measured speed and the reference speed, the optimization is done off line to have determined the PID parameters which correspond to good dynamic performance during the transient state and high stability and robustness in steady state. The validation of the system was made by simulation under Matlab/simulink.

Keywords: Electric Vehicle, Chopper, Batteries , Modeling, DC Machine, PSO Algorithm.

Sommaire

Introduction Générale	13
Chapitre I Généralités sur les véhicules électriques.....	15
I.1 Introduction	16
I.2 Définition de véhicule électrique	16
I.3 Historique	17
I.4 Chronologie du véhicules électrique avec quelques modèles	22
I.5 Fonctionnement de véhicules électrique	23
I.6 System de stockage de l'énergie dans les véhicules électrique.....	24
I.6.1 Véhicules électrique à batteries	24
I.6.2 VEs à pile à combustible	25
I.6.3 VEs Super condensateurs	26
I.7 Classification des véhicules électrique.....	27
I.7.1 Véhicules tout électrique	27
I.7.2 Véhicules hybrides	27
I.8 Types de chargeur	30
I.8.1 Chargeurs de batteries	30
I.8.2 Chargeur externe.....	30
I.8.3 Chargeur embarqué.....	30
I.8.4 Modes de connexion des chargeurs pour VE	31
I.9 Types de moteurs utilisés dans le véhicule électrique.....	31
I.9.1 Moteurs Universels (MU).....	31
I.9.2 Moteurs électriques à courant continu(MCC)	32
I.9.3 Moteurs électriques à courant alternatif (MCA).....	32
I.10 Différentes configurations des VEs.....	33

I.10.1 VEs mono-moteur.....	33
I.10.2 VEs multi-moteurs.....	33
I.11 Moteur roue	34
I.12 Chaîne de traction de VE	35
I.13 Inconvénients et avantages des VEs.....	36
I.14 Conclusion.....	36
Chapitre II Modélisation de Véhicule Electrique.....	37
II.1 Introduction.....	38
II.2 Modélisation de la batterie.....	39
II.3 Modélisation du moteur de traction	40
II.3.1 Description du phénomène de moteur.....	40
II.3.2 Présentation de machine à courant continu	40
II.3.3 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu.....	43
II.3.4 Equation du moteur à courant continu	44
II.4 Convertisseur continu/continu (Le hacheur).....	45
II.5 La transmission mécanique.....	46
II.6 Modélisation du véhicule électrique	47
II.6.1 Model dynamique du véhicule	47
II.6.2 Mouvement longitudinal (les forces agissant sur le véhicule)	48
II.7 Modélisation de la vitesse des véhicules électriques en moteur a c c.....	50
II.7.1 La source d'approvisionnement du VE	50
II.7.2 Le hacheur	51
II.7.3 Entraînement moteur	51
II.7.4 Modélisation du couplage mécanique	52
II.8 Modèle de véhicule électrique	54

II.9 Conclusion	59
Chapitre III Optimisation des essaims de particules	59
III.1 Introduction	60
III.2 Définition du technique de PSO	60
III.3 Principe de ce technique	61
III.4 Formulation de la technique	62
III.5 Algorithme d'optimisation des essaims de particules	64
III.6 Application du PSO au problème de dispatching économique de puissance	67
III.7 Conclusion	68
Chapitre IV Résultats de simulation.....	69
IV.1 Introduction	70
IV.2 Les résultats de PSO.....	70
IV.2.1 saisir le système	70
IV.2.2 Saisir les paramètres de recherche	70
IV.2.3 la boucle du calcul la valeur globale.....	71
IV.2.4 La partie de dessiner les résultats	74
IV.2.5 Commentaire général sur l'algorithme de PSO	76
IV.3 La simulation de notre travaille.....	79
IV.4 Conclusion.....	85
Conclusion générale.....	86
Bibliographie	87

Liste des figures

Figure I.1	Système de propulsion d'un VE.....	16
Figure I.2	Première voiture au monde.	17
Figure I.3	Lajamaiscontente.....	18
Figure I.4	La première voiture hybride.....	19
Figure I.5	Laprius.....	19
Figure I.6	tesla model s 2015.....	20
Figure I.7	Tesla Model 3 Standard Range Plus.	21
Figure I.8	tesla model s 2022.....	21
Figure I.9	Éléments constituant un VE.....	23
Figure I.10	Principe de fonctionnement d'une PAC.....	25
Figure I.11	Schéma simplifié d'un super condensateur et principe de stockage de charges.	27
Figure I.12	Véhicule hybride série.....	28
Figure I.13	Véhicule hybride parallèle.	29
Figure I.14	Véhicule hybride combiné.	30
Figure I.15	Architecture mono moteur. monomoteurs	33
Figure I.16	Architecture multi-moteurs.	34
Figure I.17	Moteur-roue.....	35
Figure I.18	Chaîne de puissance et chaîne de traction de VEs.	35
Figure.II.1	Schéma synoptique des composants du véhicule électrique	38
Figure.II.2	Circuit équivalent de la batterie (pour une cellule), Modèle statique.....	39
Figure II.3	Phénomène d'entraînement du moteur électrique	40
Figure II.4	constitution de la machine à courant continu.....	41
Figure II.5	Inducteur complet d'une machine à courant continu.....	41
Figure II.6	Induit d'une machine à courant continu.	42
Figure II.7	Collecteur d'une machine à courant continu.	43
Figure II.8	Principe de fonctionnement du moteur à courant continu.	43
Figure II.9	Schéma détaillé d'un Hacheur élévateur bidirectionnel.....	46
Figure II.10	Les forces agissant sur un véhicule.....	47
Figure II.11	La force de roulement sur la roue.	49
Figure II.12	schéma de la batterie.....	50

Figure II.13 Schéma bloc de VE en boucle ouverte.	54
Figure II.14 courant de l'induit	55
Figure II.16 couple moteur avans réduction	55
Figure II.15 le couple de rotation après réduction	56
Figure II.17 la force de traction	56
Figure II.18 la vitesse du véhicule	57
Figure II.19 la vitesse avant réduction	57
Figure II.20 la vitesse après réduction	58
Figure II.21 Force electromotrice	58
Figure III.1 Déplacement d'une particule.	61
Figure III.2 Organigramme général d'un PSO.	63
Figure III.3 Déplacement d'une particule.	65
Figure III.4 Algorithme d'optimisation par essaim particulaire.....	66
Figure IV.1 le système sans contrôleur.....	70
Figure IV.2 l'amplitude de step en fonction du temps	75
Figure IV.3 temps intégral erreur absolue à chaque itération.....	76
Figure IV.4 l'amplitude de step après l'optimisation en fonction du temps.....	77
Figure IV.5 le meilleur cout en fonction de nombre d'itération (4).....	78
Figure IV.6 le meilleur cout en fonction de nombre d'itération (7).....	78
Figure IV.7 le meilleur cout en fonction de nombre d'itération (10).....	79
Figure IV.8 Schéma de simulation sur Matlab/Simulink.....	80
Figure IV.9 la vitesse d véhicule (R) et la vitesse de référence (B).....	81
Figure IV.10 la vitesse d véhicule (R) et la vitesse de référence (B).....	81
Figure IV.11 le courant d'induit.....	82
Figure IV.12 le couple du moteur.....	82
Figure IV.13 le couple du moteur après réduction	83
Figure IV.14 la force de traction.....	83
Figure IV.15 la vitese de moteur avans réduction	84
Figure IV.16 la vitesse de moteur après réduction	84
Figure IV.17 Force electrometrice.....	85

Liste des tableaux

Tableau I.1:Chronologie de quelques modèles des VEs.....	22
Tableau I.2:Propriétés des batteries utilisées dans les VEs.	24

Symboles

$U(t)$: Tension appliquée au moteur

$E(t)$: Force contre électromotrice

$i(t)$: Intensité traversant le moteur

$\omega(t)$: Vitesse de rotation du rotor

C_u : Couple moteur généré

C_r : Couple résistant

f : Coefficient de frottement visqueux

J : Moment d'inertie de l'axe du rotor

K : Constante de vitesse

K_c : Constante de couple

V : la vitesse du véhicule.

F_{tot} : l'effort de traction totale du véhicule

F_{res} : la résistance totale

M : la masse totale du véhicule

F_r : force de résistance de roulement des roues.

F_a : force aérodynamique.

F_g : force d'inclinaison.

F_{acc} : force d'accélération.

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

α_{chop} : le gain d'amplification du hacheur.

$(\alpha_{\text{chop}} = \frac{1}{1-\alpha})$ le rapport cyclique.

I_{chop} : le courant de le hacheur.

U_{chop} : la tension de le hacheur.

V_{bat} : la tension de la batterie.

R_{arm} : la résistance de l'enroulement d'induit.

L_{arm} : l'inductance de l'enroulement d'induit.

T_{mot} : couple moteur généré.

K : le paramètre constant de la machine lié au couple.

f.e.m. ϕ : le flux magnétique.

T_{gear} : le couple de rotation après réduction.

W_{gear} : la vitesse de rotation après réduction.

K_{gear} : le coefficient de réduction de la boîte de vitesses.

W_{mot} : la vitesse de rotation du moteur.

W_{diff} : la vitesse de rotation différentielle.

T_{diffleft} : le couple de roues gauche après différentiel.

$T_{\text{diffright}}$: le couple de roues droite après différentiel.

X : la position de particule dans l'espace de recherche.

V : la vitesse de particule.

P_b : la position de la meilleure solution par laquelle elle est passée.

P_g : la position de la meilleure solution connue de tout l'essaim.

$f(P_b)$: la valeur de fitness de sa meilleure solution.

$f(Pg)$: la valeur de fitness de la meilleure solution connue de tout l'essaim.

V^k_i : la vitesse de la particule i à l'itération k .

W : facteur de pondération ou d'inertie.

W_{max} : poids initial.

W_{min} : poids final.

iter max : nombre maximal d'itération.

$C1$: facteur d'accélération lié à p best.

$C2$: facteur d'accélération lié à g best.

Rand : nombre aléatoire entre 0 et 1.

X^k_i : position actuelle de la particule i à l'itération k .

$P\ best_i$: meilleure position rencontrée par la particule i jusqu'à l'itération k .

$G\ best$: meilleure position rencontrée par l'essaim jusqu'à l'itération k .

Introduction Générale

Après la reconstruction d'après-guerre, l'économie mondiale a subi de profondes mutations. Durant cette période, surnommée les « Trente Glorieuses » par les économistes, les pays occidentaux ont connu une croissance inhabituelle et régulière qui a entraîné des évolutions et des changements dans les modes de vie. Ces changements ont contribué au début de la société de consommation. L'industrialisation à grande échelle, les ressources fossiles abondantes et le déploiement de l'énergie électrique ont contribué au confort humain. Les écarts technologiques connus au fil des ans sont considérables dans tous les domaines (transports, énergie, communications, etc.). Le problème qui nous amène aujourd'hui est que nous devons faire face à un problème complètement différent. L'impact de la surindustrialisation et de la surconsommation sur les ressources naturelles de la planète est clair. Ainsi, la nécessité d'économiser l'énergie et de prévenir le réchauffement climatique causé par l'effet de serre commence à conduire à une nouvelle façon de penser l'économie. La prise de conscience universelle est à la tête d'un nouveau modèle de marché basé sur le développement de produits plus respectueux de l'environnement et des générations futures [18].

Dans le contexte énergétique actuel (pénurie d'énergies fossiles et pollution), l'humanité espère continuer à améliorer la qualité de vie en introduisant les milliers de nouvelles technologies, dont l'automobile, qui occupent le quotidien d'aujourd'hui. En effet, la pollution par le bruit et les gaz à effet de serre, ainsi que la hausse de la consommation de carburant, suggèrent davantage que cet objet de consommation est au cœur du débat énergétique. Les constructeurs automobiles et les instituts de recherche préconisent plusieurs solutions pour remplacer progressivement les véhicules traditionnels, notamment dans les centres-villes. Par conséquent, l'avenir de la véhicule est un sujet de recherche brûlant dans les années à venir. Au cours des dernières années, la recherche d'une meilleure qualité de vie, les contraintes environnementales et économiques et les économies d'énergie sont devenues des facteurs importants qui ont suscité l'intérêt pour le développement de l'énergie électrique. La réussite dans ce domaine viendra d'un subtil mélange entre prospective scientifique de haut niveau et maîtrise de la technologie. Dans

cette combinaison, l'électricité jouera un rôle fondamental et continuera d'atteindre de nouveaux objectifs d'économie d'énergie et de protection de l'environnement dans les automobiles [19].

La voiture électrique n'est pas nouvelle aujourd'hui, elle date du 19e siècle, mais elle a échoué lamentablement à ses débuts car ses concurrents étaient des voitures thermiques, en raison de la capacité insuffisante des vieux moteurs électriques, des batteries faibles et des limites de vitesse des véhicules électriques...

Mais au fur et à mesure que la technologie se développe et s'ouvre aux véhicules électriques et se débarrasse de la pollution, les constructeurs commencent à développer des composants pour ces derniers, tels que les batteries, la technologie de contrôle du couple moteur et de la vitesse.

L'objectif de notre travail est faire déterminer les paramètres du contrôleur PID de la vitesse d'un véhicule électrique par l'utilisation de la méthode d'optimisation PSO. La fonction objective définie est de minimiser l'erreur entre la vitesse mesurée et la vitesse de référence imposée, l'optimisation est faite off line pour avoir déterminé les paramètres de PID qui correspondent des bons performances dynamiques durant le régime transitoire et forte stabilité et robustesse en régime permanent. La validation du système a été faite par la simulation sous Matlab/simulink.

Dans le premier chapitre, nous aborderons l'histoire des véhicules électriques, leurs types et composants, compris les batteries de différentes capacités, les convertisseurs, les types de moteurs utilisés, les avantages et les inconvénients.

Et dans le deuxième chapitre, Nous parlerons la modélisation de la vitesse de la voiture électrique. Ensuite, nous l'étudierons à l'aide du programme Matlab / Simulink.

Et dans le troisième chapitre, Nous parlerons du principe de fonctionnement de PSO et la méthode de calcul par cet algorithme.

Dans le quatrième chapitre, Nous montrerons les résultats de la simulation et en discuterons.

Chapitre I

Généralités sur les véhicules électriques

I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter un bref historique et des généralités sur les VEs. Ainsi une présentation des éléments constituant, des différentes chaînes de traction électrique et des technologies d'hybridation des VEs

I.2 Définition de véhicule électrique

Les véhicules électriques sont caractérisés par le fait qu'ils sont entraînés par un ou plusieurs moteurs électriques, qui transmettent la puissance d'entraînement aux roues selon le schéma de transmission sélectionné. Compte tenu des avancées technologiques dans des domaines tels que l'électronique de puissance, de nombreuses idées et de nouvelles conceptions sont explorées pour développer ce mode de propulsion, toutes liées à une problématique commune : produire, transporter, stocker et utiliser l'électricité.

Le système de propulsion électrique est le corps principal d'un véhicule électrique. Il est alimenté par un moteur, comprenant un ou plusieurs moteurs entraînant un système de transmission composé de deux roues motrices [3].

Sa structure est très simple. Il est constitué d'un actionneur électrique. Un dispositif de transmission et la roue comme illustré à la Figure I.1.

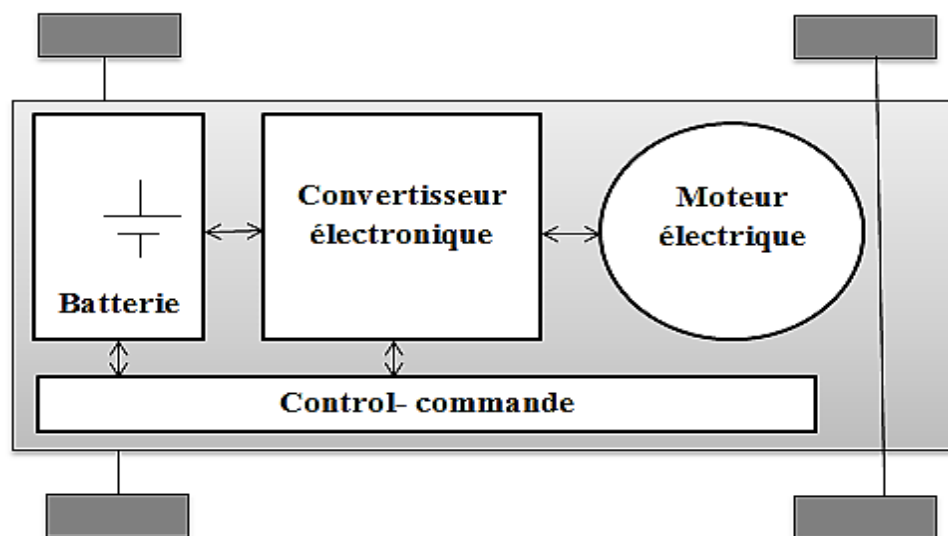


Figure I.1 Système de propulsion d'un VE

I.3 Historique

Aujourd'hui, les voitures sont l'un des problèmes de pollution de l'environnement. Les entreprises de l'industrie d'automobile ont présenté la voiture électrique est propre comme « la solution » au problème de la pollution des gaz d'échappement, et la voiture propre n'est pas l'idée d'hier [1].

- En 19^{ème} siècle, Au début de l'industrie automobile, il existait plusieurs modes de compétition pour la propulsion (le moteur électrique, le moteur à vapeur et le moteur thermique). D'ailleurs, les performances des premiers prototypes de véhicule électrique n'avaient rien à envier à celles des véhicules à propulsion thermique de l'époque. Ci-dessous on compte les VEs qui ont marqué l'histoire .

- Entre (1832-1839) L'homme d'affaires écossais Robert Anderson fut la première personne à avoir inventé véhicule électrique. Il s'agissait plutôt d'une carriole électrique[1].

- Vers 1835, l'américain Thomas Davenport construit une petite locomotive électrique, Après des années, l'écossais Robert Davidson fabriqua un modèle similaire qui pouvait rouler jusqu'à 6 km/h.

- En 1859, le français Gaston Planté inventa la batterie rechargeable au plomb acide, qui sera modifiée par Camille Faure en 1881.

- En 1884, Thomas Parker assis dans la première voiture électrique au monde illustrée sur la figure I.2[2].



Figure I.2 Première voiture au monde.

- En 1899 en Royaume-Uni, le belge Camille Jeanatzy inventa la célèbre voiture de course « la jamais contente », elle était en forme de torpille, qui établit un record à l'époque avec une vitesse de 100km/h, (Figure I.3) [5].

- Dès 1900, la voiture électrique a connu ses beaux jours. En circulation, plus que le tiers des voitures sont électriques et le reste étant des voitures à essence et à vapeur. Néanmoins, après des années de domination, des inconvénients commençaient à apparaître même pour celle-ci puisque il s'avérait qu'elle est dépendante de plusieurs paramètres variables et parfois incontrôlables tel la fait que sans pétrole ; élément généralement importer par les grandes industries et qui se fait rare en temps de guerre comme ce fut le cas lors de la deuxième guerre mondiale (1939 et 1945) [2,5].



Figure I.3 La jamaiscontente.

-Entre (1972 et 1990), lors de la crise pétrolière et de la pollution résultant de l'utilisation intensive des voitures thermiques, on ne pouvait pas utiliser de voiture thermique.

Tout cela fait que la solution de l'électrique n'a jamais été oubliée et les recherches n'ont jamais cessées d'aller dans ce sens mais juste qu'on en parlait vraiment de cette solution qu'en temps de crise, cette logique a changé depuis que les effets de la pollution menacent la planète. De ce fait, une autre approche plus sérieuse et plus volontaire est engagée dans la

recherche et l'amélioration de la technologie du véhicule électrique et véhicule hybride et ce depuis déjà les années 70, ce qui a permis de concevoir des prototypes et des modèles variés, toutefois, ils restent toujours incapable de fournir des performances au moins proche de celle d'un véhicule thermique .

- En les années 90, la société automobile Général Motors lance un projet de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique hybride "Buick Skylark", construite par Victor Walk en(1972), qui deviendra l'EV 1 et qui va être produite entre 1996 et 1998 .(Figure I.4).



Figure I.4 La première voiture hybride.

- En 1997, Toyota lance la Prius (Figure I.5), la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires ont été vendus

au Japon la première année et en 2006 Toyota a passé le cap des 500.000 unités vendues à travers le monde avec son célèbre véhicule hybride[5].



Figure I.5 Laprius.

- Au bout de quelques années, de nombreux constructeurs ont mis sur le marché des prototypes qui pour certains on était une référence et un sucée commercial tel: Honda EV Plus, G.M. EV1, Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10 EV et Toyota RAV4 EV [2].

- La demande de voitures électriques est en constante augmentation. Depuis 2015, plus de 25 000 voitures électriques ont été mises en circulation en Suisse. Avec le lancement sur le marché de la Tesla Model 3 en 2019, le nombre d'immatriculations a plus que doublé, passant de 5 000 à plus de 12 000 voitures par an après des années de croissance molle. La Tesla Model 3 est la première fois qu'une voiture électrique se retrouve dans le top 5 des meilleures ventes et donc dans la masse[38].



Figure I.6 tesla model s 2015.

- En 2020, de nombreux constructeurs automobiles de renommée ont lancé de nouveaux modèles de voitures électriques ou introduit de nouvelles versions avec des systèmes d'assistance à la conduite optimisés et à plus longue portée pour les voitures électriques existantes, à des prix attractifs[37].



Figure I.7 Tesla Model 3 Standard Range Plus.

-Pour la Tesla Model S 2022, on oublie les appellations classiques P suivi d'un chiffre et d'une lettre. La gamme de la berline du constructeur américain se décline désormais en version à Autonomie prolongée, Plaid et Plaid+. Pour la version à Autonomie Prolongée, on parle d'un prix de départ de 114 990\$ alors que pour les autres versions, il est question de 159 990\$ et 189 990\$[39].



Figure I.8 tesla model s 2022.

I.4 Chronologie du véhicules électrique avec quelques modèles

En 1981, certaines entreprises bien connues ont commencé à concevoir et à développer des technologies de VE telles que Toyota, Peugeot, etc. le tableau ci-dessous montre la chronologie quelques modèles des VE [1].

Tableau I.1:Chronologie de quelques modèles des VEs.

Années	Constructeur/inventeur	Autonomie	Vitesse
1981	CharlesJeanTaud	100m	
1894	Henry.G .Morris&Pedro.G. Salomon	40km	32km/h
1899	Camille Jenatzy		100km/h
1911	Detroitelectric	130km	
1940	PaulArzens	100km	70km/h
1941	Jean Albert Gregoire	250km	42km/h
1941	Peugeot	250km	42km/h
1947	NissanToyotaelectric	65km	35km/h
1959	Renault	60km	60km/h
1967	Ford	40à60km	64km/h
1984	Peugeot	140km	100km/h
1985	Renault	120km	80km/h
1997	Toyota		
2003	Renault	140km	
2010	BMW		
2015	Tesla model s	400km/h	225km/h
2020	Nissan ioniq	200km/h	274km/h

2022	Tesla model s	640km/h	322km/h
------	---------------	---------	---------

I.5 Fonctionnement de véhicules électrique

Les véhicules électriques sont équipés d'une batterie stockant l'énergie et se rechargeant sur le secteur, d'un ou plusieurs moteurs électriques avec systèmes de contrôle et d'un chargeur de batterie. La batterie est connectée au moteur électrique via un convertisseur. Le régulateur du convertisseur contrôle le courant du moteur, et son fonctionnement est très simple : lorsque le conducteur du véhicule appuie sur la pédale d'accélérateur, la batterie libère du courant, et le convertisseur convertit le courant continu (DC/AC) pour alimenter le moteur (cas moteur AC), ou (DC/DC) pour alimenter le moteur (dans le cas d'un moteur DC) [5].

Le convertisseur de couple fait partie intégrante du moteur. La force des véhicules électriques est la chaîne cinématique électromécanique. En effet, le véhicule a besoin d'un couple élevé pour accélérer à basse vitesse et d'un couple moindre en vitesse de croisière. Ces caractéristiques sont les caractéristiques du moteur électrique.

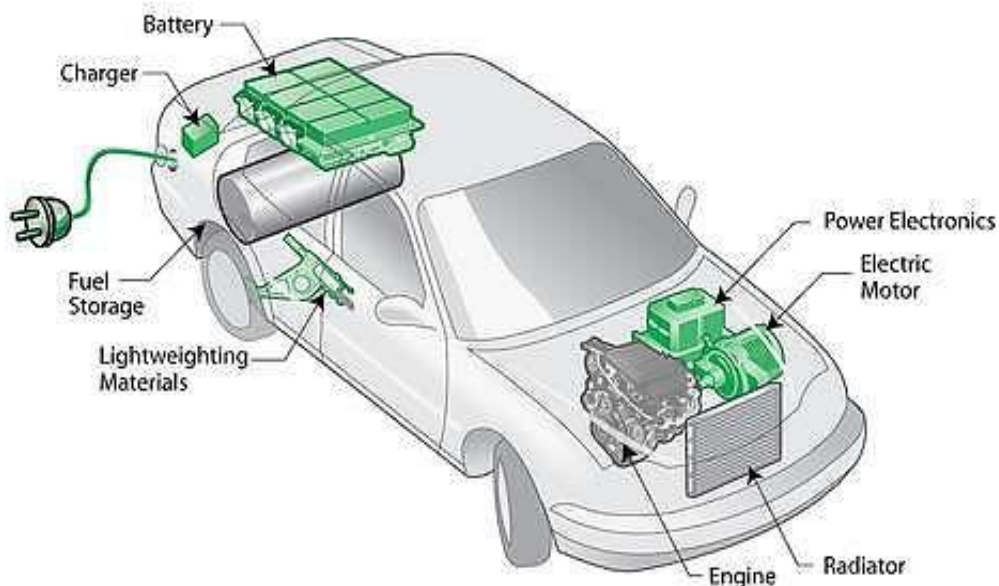


Figure I.9 Éléments constituant un VE.

I.6 System de stockage de l'énergie dans les véhicules électrique

Le développement du véhicule électrique est étroitement lié au développement de sa chaîne d'approvisionnement : les batteries à énergie spécifique relativement faible sont aussi lourdes et très chères. Les véhicules électriques sont essentiellement divisés en trois types en fonction de la source d'énergie qui alimente le véhicule : les véhicules électriques à batterie, les véhicules électriques à pile à combustible et les véhicules électriques à super condensateur [7].

I.6.1 Véhicules électrique à batteries

Les VEs fonctionnent avec des batteries, constituent aujourd'hui l'essentiel du parc mondial des véhicules électriques. Une batterie est un système embarqué pouvant stocker de l'énergie électrique pour la restituer par la suite. C'est à ce jour le système le mieux adopté pour l'alimentation des véhicules électriques. Son invention remonte au 19^{ème} siècle, il est de ce fait, le système de stockage le mieux maîtrisé techniquement qui transforme l'énergie électrique en énergie chimique potentielle pendant la charge puis convertisse l'énergie chimique en énergie électrique lors de déchargement. La figure. I.9 présente le principe de fonctionnement d'un accumulateur, ce fonctionnement est basé sur l'exploitation de deux couples oxydo-réducteurs, Ox1/Red1 et Ox2/Red2, qui se déroulent respectivement à deux électrodes différentes [7].

Il existe de nombreux types de batteries différents, par exemple, acide au plomb, Hydrure de nickel-métal, lithium-ion, etc. Cependant, aujourd'hui, lithium-ion est le choix préféré pour les applications VE en raison de son énergie spécifique et de sa puissance relativement élevées. Le tableau suivant résume les propriétés des batteries utilisées dans le secteur des VE.

Tableau I.2: Propriétés des batteries utilisées dans les VEs.

Technologie	Energie massique (Wh/Kg)	Puissance massique (W/Kg)	Nombre cycles 80% décharge	Coût à En de euro/KWh
Pb-Acide	40-50	140-250	800-1500	100-190
Ni-Mh	60-80	500-1400	500-2000	400-2000
Li-Ion	70-130	600-3000	800-1500	700-2000

I.6.2 VEs à pile à combustible

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

Il y a divers types de piles à combustible qui fonctionnent avec différents carburants mais la pile à membrane échangeuse de protons, considérée comme la plus prometteuse pour les véhicules automobiles, utilise de l'hydrogène H_2 et l'oxygène de l'air ambiant comme carburants [2].

L'application de cette technologie dans le domaine automobile est assez récente et relève encore de l'expérimentation. La pile à combustible existe depuis près deux cents ans. Elle fut inventée en Angleterre au début du 19^{ème} siècle par deux anglais, Sir Henry Davy et Sir William Grove.

Son principe de fonctionnement repose sur la production d'énergie par réaction entre de l'hydrogène et de l'oxygène. Une PAC consiste en un électrolyte pris en sandwich entre deux électrodes. L'électrolyte a une propriété spéciale qui permet aux ions positifs (protons) de passer à travers tout en bloquant les électrons. Le gaz hydrogène passe sur une électrode, appelée anode, et à l'aide d'un catalyseur, se sépare en électrons et en protons d'hydrogène [8], comme indiqué à la figure :

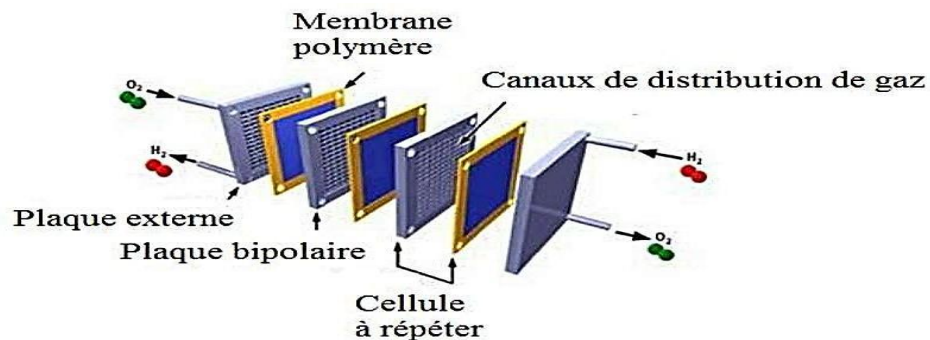
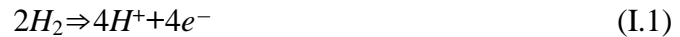


Figure I.10 Principe de fonctionnement d'une PAC.

Cette réaction produit, en fait, de l'électricité, l'eau et de la chaleur selon l'équation suivante :



Dans le cas d'une PEMFC à électrolyte acide, on a une oxydation de l'hydrogène à l'anode selon :

L'équation (I.1) s'agit d'une réaction catalysée. La molécule d'hydrogène réagit en libérant deux électrons, qui circulent dans le circuit électrique qui relie l'anode à la cathode, ce dernier assiste à la réduction cathodique (également catalysée) de l'oxygène selon :



La réaction globale de la PAC est donc s'écrit comme suite :



La société a réussi cet exploit en sept générations de son moteur à pile à combustible Fcvelo City, déployé au sein des autobus de 15 pays sur 5 continents au cours des 10 dernières années. Durant cette période, Ballard a travaillé avec 13 fabricants d'autobus pour développer une variété de configurations de bus à pile à combustible, et ceci en étudiant un large éventail de conditions climatiques et de financement [2].

I.6.3 VEs Super condensateurs

Ils sont des systèmes de stockage d'énergie électrique à haute notabilité et haute densité d'énergie. Ils sont appelés batteries électrochimiques et non répétables, et les super condensateurs ont la même structure que les batteries ou les piles à combustible à deux électrodes et un électrolyte. La différence se situe dans le mode de fonctionnement [9].

Contrairement aux batteries, il n'y a pas de réactions électrochimiques dans ce système, mais un stockage de charge aux interfaces électrodes /électrolyte ou un inter-calage dans la structure de l'électrode. L'électrolyte est une matière organique (liquide ou solide) munie de base au charbon ou d'oxyde métallique (ultra capacité), ce moyen de stockage peut délivrer ou absorber une puissance massique élevée de l'ordre de 10kW/kg [1].

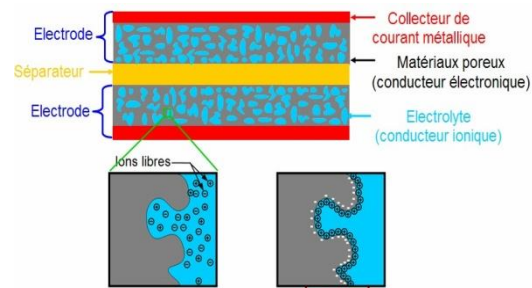


Figure I.11 Schéma simplifié d'un super condensateur et principe de stockage de charges.

I.7 Classification des véhicules électrique

I.7.1 Véhicules tout électrique

Ce sont des véhicules qui n'ont comme sources d'énergies qu'un accumulateur rechargeable par la voie d'une source extérieure. Actuellement les VTE proposés sont exclusivement urbains, leur autonomie est de 70 à 120 Km avec des batteries en Plomb- Acide et cadmium-nickel et de 150 à 200 km avec des batteries Nickel-Métal-Hydrure et Lithium. Afin d'accroître leurs autonomies, ces véhicules sont dotés de systèmes de conversions réversibles pour récupérer l'énergie de freinage [5].

I.7.2 Véhicules hybrides

Les véhicules hybrides utilisent au moins deux types de production et de stockage d'énergie habituellement un moteur thermique classique (essence ou diesel), en plus d'au moins un moteur électrique et le stockage d'électricité par batteries. Ces systèmes peuvent fonctionner simultanément ou indépendamment les uns des autres. Les VHs, sont quant à eux munis d'un moteur classique et d'un moteur électrique qui fonctionnent en combinaison selon la vitesse et l'accélération du véhicule. Le moteur électrique permet d'améliorer les performances du moteur thermique ainsi que l'autonomie du véhicule .

On distingue deux principaux types de système d'entraînement hybrides : parallèle et série, ces systèmes diffèrent dans leurs façons d'intégrer le fonctionnement des deux unités de production d'énergie [9].

I.7.2.1 Véhicules hybrides série

Dans ce cas, le principe repose sur le fait que l'énergie électrique utilisée par le moteur électrique peut être produite par un alternateur entraîné par un moteur thermique fonctionnant à vitesse de rotation constante. Les deux moteurs sont donc en série, d'où l'appellation. On peut alors choisir .

la vitesse de rotation du moteur thermique de manière à obtenir un rendement maximum et par conséquent augmenter la quantité de carburant brûlée dans un cycle moteur, ce qui implique une diminution des rejets gazeux. Par ailleurs, la signature acoustique du moteur thermique peut être améliorée pour la vitesse de rotation fixe choisie. Le schéma de principe d'un tel véhicule est donné sur la figure[10] :

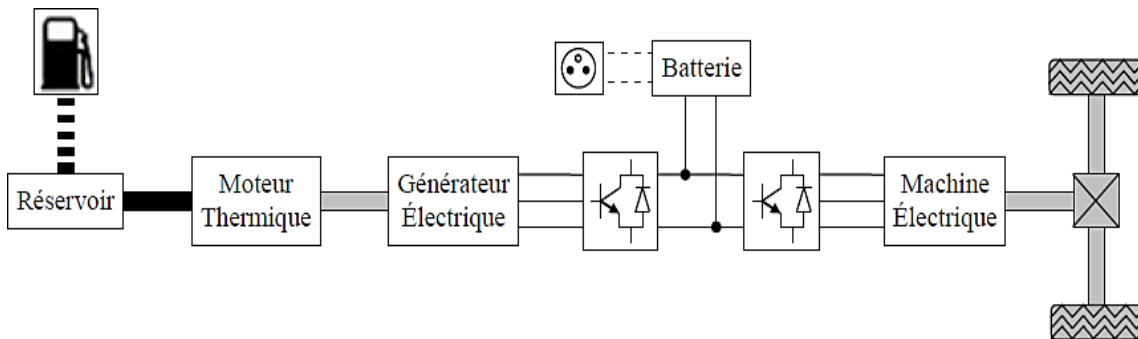


Figure I.12 Véhicule hybride série.

La plus grande partie de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du moteur électrique est fournie par la génératrice. La batterie est là uniquement en tampon pour fournir des pointes d'énergie ou pour fonctionner en mode tout électrique [10].

Un des inconvénients majeur de ce type d'architecture est le faible rendement global de l'ensemble car la puissance mécanique délivrée par le moteur thermique est tout d'abord convertie en puissance électrique par l'alternateur, éventuellement stockée dans les batteries puis reconvertie en puissance mécanique par le moteur électrique, cependant, du point de vue de la commande, l'architecture offre deux degrés de liberté: le régime et le couple du moteur thermique peuvent être choisis quasiment indépendamment des conditions de conduite [2].

I.7.2.2 Véhicule hybride parallèle

La première idée est de faire deux véhicules en un, en bénéficiant des avantages de chacun. Le VHP possède ainsi deux moteurs fonctionnant en parallèle, un électrique et un thermique. Les deux moteurs sont utilisés séparément et on résout alors le problème écologique du moteur thermique en ville, en fonctionnant en mode électrique et celui de l'autonomie du véhicule électrique pour les grands déplacements hors des agglomérations en fonctionnant en mode thermique.

Le schéma de principe d'un tel véhicule est donné sur la figure ci-dessous.

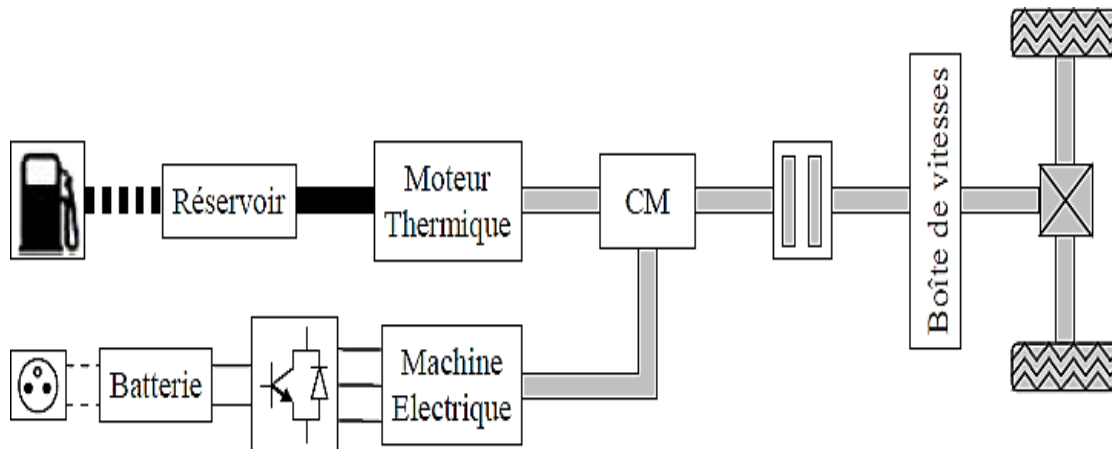


Figure I.13 Véhicule hybride parallèle.

Le moteur électrique joue habituellement aussi le rôle d'un générateur entraîné par le moteur thermique pour recharger les batteries lorsque la puissance électrique n'est pas requise pour propulser le véhicule [11].

I.7.2.2 Véhicule hybride combiné (série-parallèle)

La catégorie des architectures combinées correspond aux hybrides série/parallèle, appelée aussi hybride parallèle à dérivation de puissance, cette architecture intègre un moteur électrique, une génératrice, et un moteur thermique, grâce à une gestion efficace des puissances demandées d'un côté, et fournies de l'autre, il est possible de contrôler en régime le moteur thermique, et de partager son couple entre les demandes du véhicule, et la recharge de la batterie, schématise le fonctionnement d'un hybride combiné [11].

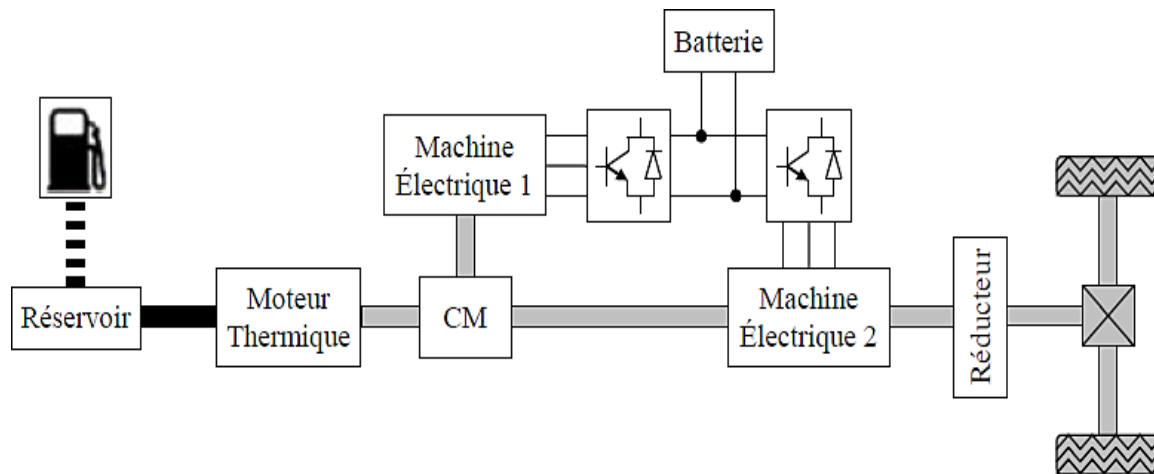


Figure I.14 Véhicule hybride combiné.

I.8 Types de chargeur

I.8.1 Chargeurs de batteries

Le chargeur de batterie est aussi important que tous les autres composants des véhicules électriques, ce dernier joue le rôle de la "station-service", Pour cela plusieurs systèmes de recharge ont alors été conçus, il s'agit d'une part des chargeurs de type externe (off-board) appelés chargeurs "inductifs" ,et d'autre part des chargeurs de type embarqué (on-board) autrement dit chargeurs "conductifs"[17].

I.8.2 Chargeur externe

Installé à l'extérieur du véhicule, l'énergie électrique est fournie directement au véhicule a partir d'un mode de connexion choisi par l'utilisateur (prise domestique, prise domestique et câble équipés d'un dispositif de protection, prise spécifique sur un circuit dédié, Connexion courant continu) les chargeurs externes réutilisent les éléments de la chaîne de propulsion du véhicule pour recharger les batteries [17].

I.8.3 Chargeur embarqué

Intégré au sein du véhicule, l'énergie électrique délivrée par le réseau est transmise au véhicule. Ils sont dotés d'un dispositif totalement indépendant de la chaîne de traction électrique, Cette configuration ne nécessite pas de convertisseur supplémentaire au sol [17].

I.8.4 Modes de connexion des chargeurs pour VE

Une norme internationale (norme IEC 61851-1 Electric Véhicule Conductivité Charging System), en cours de finalisation définit deux modes de connexion pour recharger le véhicule, comme suit :[7]

I.8.4.1 Prise domestique

Le VE était connecté à la source d'alimentation à l'aide d'une prise standard (courant standard jusqu'à 16A). Adapté aux petites charges de puissance telles que les quads et les véhicules électriques à deux roues, ou une prise domestique et un câble avec dispositif de protection renforcé avec un boîtier de commande intégré dans le câble pour une meilleure sécurité, ce câble est réservée à des applications de puissance inférieure ou égale à 3 kW. Du fait de la spécificité du câble, cette solution est particulièrement coûteuse [7].

I.8.4.2 Prise spécifique sur un circuit dédié

Le véhicule est relié au réseau électrique via un socle (Wall box), une prise électrique et un circuit dédié, équipé d'un quatrième fil entre la borne et le véhicule afin de garantir la continuité avec la terre et permettre au véhicule de dialoguer en permanence avec l'infrastructure, une fonction de contrôle et de protection est installée en permanence dans l'installation, en effet, avant d'enclencher la recharge, le système de contrôle vérifie que le véhicule est bien connecté, que la masse est reliée au circuit de protection de l'installation et que les puissances entre le câble, le véhicule et le circuit de charge sont cohérentes. Ce mode est dédié à la recharge rapide [7].

I.9 Types de moteurs utilisés dans le véhicule électrique

Les moteurs électriques peuvent être regroupés en trois grandes catégories qui sont:

I.9.1 Moteurs Universels (MU)

Les moteurs universels ont un principe de fonctionnement identique à celui d'une machine à courant continu à excitation série (la MCC est un convertisseur électromécanique bidirectionnel, qui convertit l'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique), ils peuvent être utilisés comme moteur à courant continu lorsqu'ils sont alimentés par une source de tension continue, ou alors être utilisés comme moteur à courant alternatif, lorsqu'ils sont alimentés en courant alternatif, à cause de leurs mauvais

rendements de l'ordre d'environ 60% en comparaison avec ceux des technologies de Brushless qui sont supérieures à 85%, et de l'usure du collecteur et balais qui nécessitent une maintenance, nous n'allons pas considérer ce moteur comme faisant parti de l'objet de notre étude et travail.

La figure 2-1 ci-dessous nous donne les deux catégories restantes [16].

I.9.2 Moteurs électriques à courant continu (MCC)

Le moteur électrique à courant continu peut être, à son tour, un moteur à induction permanente ou un moteur à induction continue, outre ces classifications plus générales, il existe également d'autres types de moteurs plus modernes tels que les moteurs pas à pas et les moteurs linéaires [16].

I.9.3 Moteurs électriques à courant alternatif (MCA)

Le moteur à courant alternatif peut être classé en tant que moteur universel, moteur synchrone ou moteur asynchrone, La division classique est entre les moteurs à courant continu (CC) et les moteurs à courant alternatif (CA), cependant, ce n'est pas une classification extrêmement précise, car il existe des moteurs qui ressemblent de manière constructive à ceux du courant continu qui peuvent également être alimentés en courant alternatif, appelés moteurs universels, différentes distinctions peuvent être faites sur la base d'autres références: par exemple, la distinction entre les moteurs synchrones, dans lesquels la fréquence du réseau est égale à un multiple de la fréquence de rotation, et les moteurs asynchrones, dans lesquels les deux fréquences sont différentes, Par conséquent, les catégories dans lesquelles le moteur électrique est classé sont généralement un moteur asynchrone, un moteur synchrone ou un moteur à courant continu [16].

- **Moteur synchrone:** Le moteur synchrone est un type de moteur électrique à courant alternatif dans lequel le stator, généralement triphasé, génère un champ magnétique tournant. Dans le rotor il y a un champ magnétique (généralisé par un aimant permanent ou un bobinage alimenté en continu) qui est attiré par le champ magnétique tournant du stator, ce qui génère le couple [16].
- **Moteur asynchrone:** Le moteur asynchrone est un type de moteur électrique à courant alternatif dans lequel la fréquence de rotation n'est pas la même ou un sous-multiple de la fréquence du réseau, c'est-à-dire qu'il n'est pas "synchrone" avec elle; C'est pourquoi il se

distingue des moteurs synchrones. Le moteur asynchrone est également appelé moteur à induction en raison de son principe de fonctionnement [16].

I.10 Différentes configurations des VEs

Les différentes configurations des VEs peuvent être regroupées en deux :

I.10.1 VEs mono-moteur

L'architecture mono moteur qui emploie un moteur à courant continu, une batterie plus un variateur (un hacheur réversible) en série et un réducteur différentiel (réduction de la vitesse, augmentation du couple) [12].

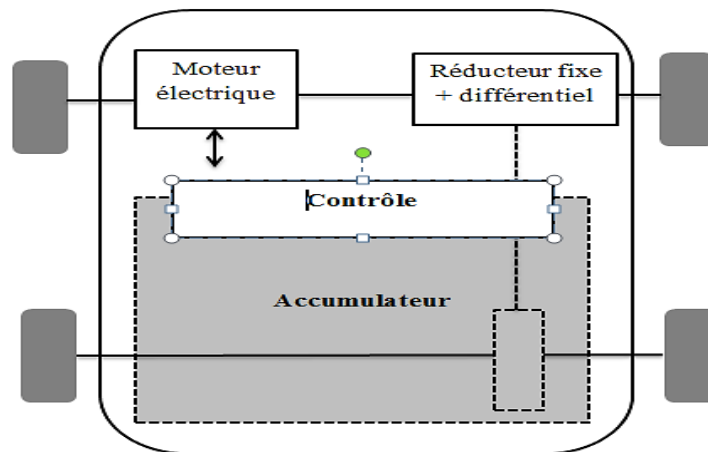


Figure I.15 Architecture mono moteur.

I.10.2 VEs multi-moteurs

Sur les VEs multi moteur on trouve deux grandes architectures, l'une utilise une double chaîne de traction à l'aide de deux moteurs à courant continu qui permet d'avoir plus de fiabilité côté moteur, l'autre utilise un moteur asynchrone et deux moteurs roue pour permettre d'augmenter le différentiel mécanique du véhicule [12].

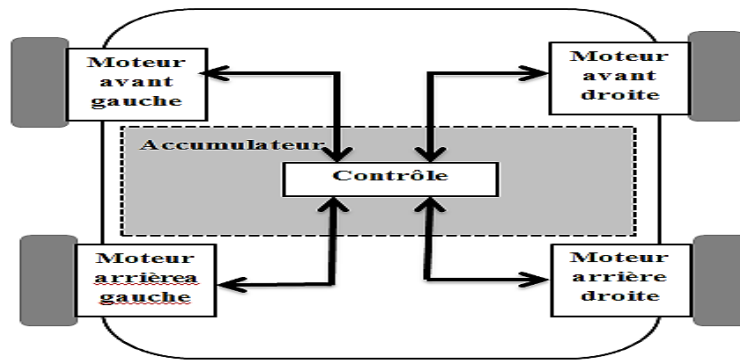


Figure I.16 Architecture multi-moteurs.

I.11 Moteur roue

Le moteur roue électrique est très proche d'un moteur normal, a seule différence repose sur son agencement. Au lieu d'avoir un seul moteur placé sous le capot, deux (voir quatre) moteurs de plus petites tailles sont insérés directement dans les roues du véhicule, on notera que les batteries restent placées à l'intérieur de la voiture [13].

Ce système permet d'une part de contrôler avec haute précision et indépendamment le couple appliqué à chaque roue et d'autre part de maximiser la capacité du freinage régénérateur. L'utilisation de ce type de moteur sur des roues directrices permet la suppression de toutes les parties mécaniques liées de la transmission, de commander indépendamment les roues et en même temps, de libérer de l'espace dans le véhicule, cette grande liberté permet un contrôle indépendant du couple ce qui peut améliorer la sécurité de transport.

Les inconvénients de ce type de moteur sont l'augmentation de la masse non-suspendue et la difficulté d'intégrer un réducteur, ainsi, l'introduction d'un moteur à fort couple dans la roue peut avoir tendance à déstabiliser le véhicule [14].



Figure I.17 Moteur-roue.

I.12 Chaîne de traction de VE

Une chaîne de motorisation d'un véhicule tout électrique se compose classiquement d'un moteur électrique, d'un système électronique (alimentation et commande), d'un système de liaison mécanique (réducteur, différentiel et roues).

La chaîne de traction choisie est du type monomoteur, car le coût et la masse d'un seul moteur sont toujours plus faibles que ceux de plusieurs moteurs (figure I.18). L'utilisation d'un réducteur est dans le but de réduire le couple dimensionnant du moteur et par la suite sa masse et son coût, en plus, la commande d'un seul moteur évite le problème de dérapage lors de la commande de plusieurs moteurs à la même vitesse [7].

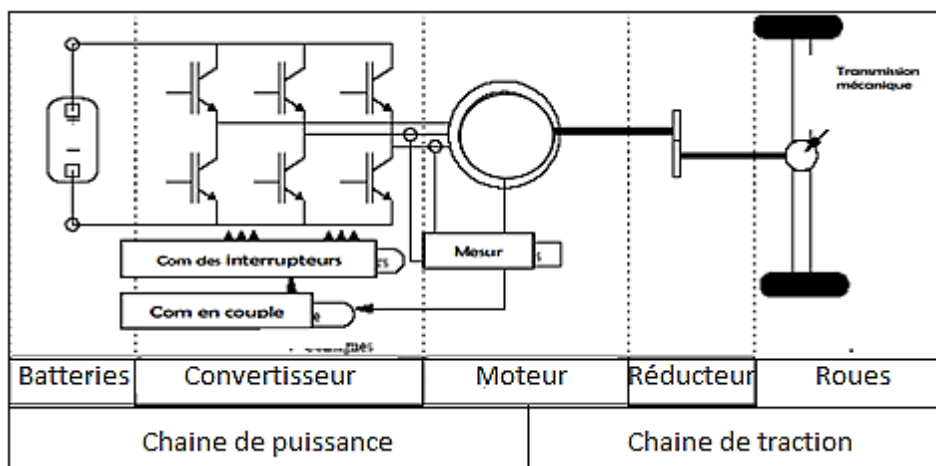


Figure I.18 Chaîne de puissance et chaîne de traction de VEs.

I.13 Inconvénients et avantages des VEs

Depuis les premières réalisations des voitures électriques, le facteur principal de son développement et encore aujourd'hui est lié aux faibles performances, taille et lourdeur des batteries (elles sont actuellement dans un développement remarquable), et leur comparaison avec les hautes performances voitures thermiques.

Parmi les principaux obstacles, citons la présence de VEs dans le trafic urbain : l'absence d'infrastructures de recharge et coûts d'achat élevés.

Ainsi, deux inconvénients notables du véhicule électrique apparaissent liés à son système de stockage d'énergie, une masse très élevée d'accumulateurs (batteries), une longue période de recharge (conditionnée à l'acceptation des batteries et au coût des infrastructures) en revanche, ses deux principaux avantages sont l'absence de pollution atmosphérique locale et un faible bruit acoustique, à noter également que cette chaîne de commutation est réversible et peut permettre une récupération d'énergie lors de la descente ou lors du freinage[15].

I.14 Conclusion

Ce chapitre est consacré à présenter les informations générales sur les véhicules pure électriques, véhicules hybrides et tous ses composants afin de connaître le fonctionnement de chaque élément impliqué dans leur constitution.

Les véhicules électriques, étant écologiques et propres, vont certainement être le nouveau moyen de transport qui va prendre une place de plus en plus importante au marché dans un avenir proche, Cependant, Il y a encore des choses à développer, la capacité de la batterie, sa masse et son temps de charge jouera un rôle très important.

Chapitre II

Modélisation de Véhicule Electrique

II.1 Introduction

La modélisation est le processus de développement d'un modèle, qui est une représentation de l'architecture et du fonctionnement d'un système (véhicule). L'un des objectifs du modèle est de prédire la probabilité de l'effet des changements sur le système, d'autre part le modèle doit être très proche du système réel et intégrer la plupart de ses caractéristiques saillantes et ne doit pas être trop complexe pour être processus mathématiquement ou numériquement complexe [20].

Dans ce chapitre, nous avons introduit le modèle dynamique du véhicule pure électrique à MCC. Pour le développement des stratégies de contrôle, il est nécessaire de se familiariser avec le système complexe du véhicule aux propriétés électromécaniques et les différentes forces agissant sur celui-ci. Nous analysons ensuite le mouvement longitudinal et latéral du véhicule et montrons enfin différents modes de traction.

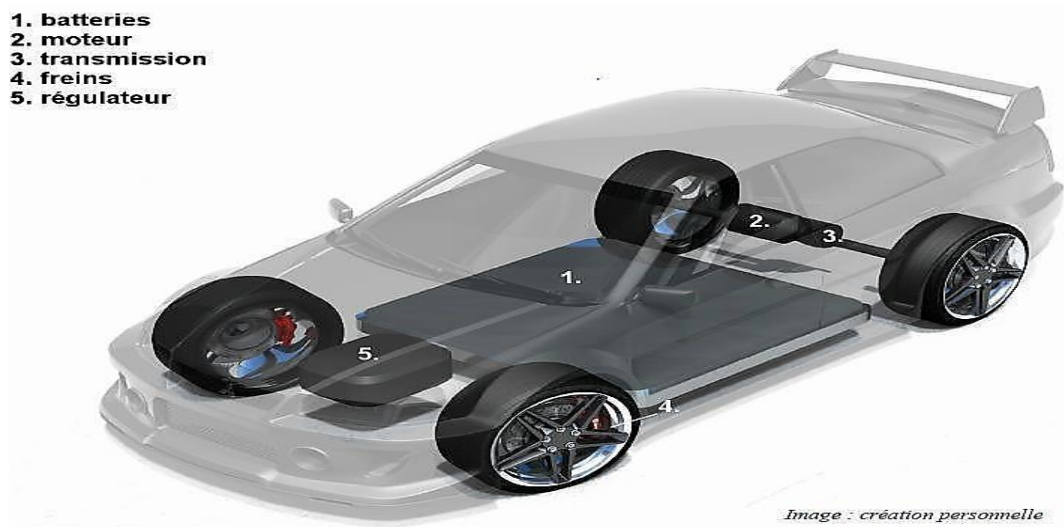


Figure.II.1 Schéma synoptique des composants du véhicule électrique .

II.2 Modélisation de la batterie

Dans notre étude, la batterie a été modélisée comme un générateur de tension parfait en série avec la résistance interne de la batterie, comme le montre la Figure II.2 :

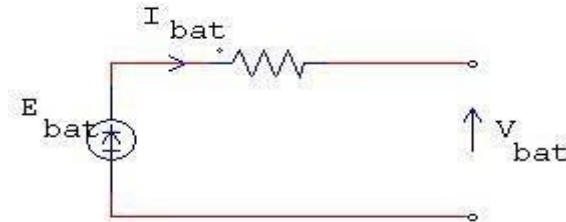


Figure.II.2 Circuit équivalent de la batterie (pour une cellule), Modèle statique.

Pour calculer la tension de la batterie on utilise l'équation suivante :

$$V_{bat} = E_{bat} - R_{bat} * I_{bat} \quad (II.1)$$

Tel que : E_{bat} est la tension à vide, R_{bat} est la résistance interne, et I_{bat} est le courant fourni par la batterie.

Comme nous l'avons vu dans l'équation (II.1), la résistance interne de la batterie dépend du signe du courant, il existe donc deux types de résistance, la résistance de charge et la résistance de décharge [17].

- **Etat de charge de la batterie (SOC)**

Couramment utilisé en électrotechnique, le SOC (State of Charge) est un paramètre estimé lorsque le courant traverse une batterie. Le SOC est donné par le rapport entre la capacité disponible actuelle et la capacité totale disponible avant utilisation (à ne pas confondre avec la capacité initiale d'une batterie neuve).

$$SOC = \frac{C_{actuell}}{C_{totale}} = SOC(t_0) - \frac{1}{c} \int_{t_0}^{t_1} i(t) dt \quad (II.2)$$

Parmi eux, $SOC(t_0)$ est l'état de charge initial, et $i(t)$ représente le courant traversant la batterie. Comme la capacité, cet indicateur dépend des conditions de mesure, notamment de la température. L'état de charge de la batterie est généralement exprimé en pourcentage [30].

II.3 Modélisation du moteur de traction

II.3.1 Description du phénomène de moteur

Le domaine technique auquel se rapporte la présente invention est le contrôle d'un système d'alimentation électrique dans un véhicule électrique. Pour de tels véhicules, la commande du moteur électrique peut tenir compte de la volonté du conducteur via les pédales d'accélérateur et de frein avec des réglages de couple positifs ou négatifs. Cette consigne de couple moteur est ensuite transmise à l'électronique de puissance (onduleur) pour assurer l'évolution des consignes électriques correspondantes (tension et courant). Les moteurs électriques convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique. Enfin, l'intermédiaire d'un quelconque réducteur transfère le couple du moteur électrique aux roues, comme le montre la figure suivante.

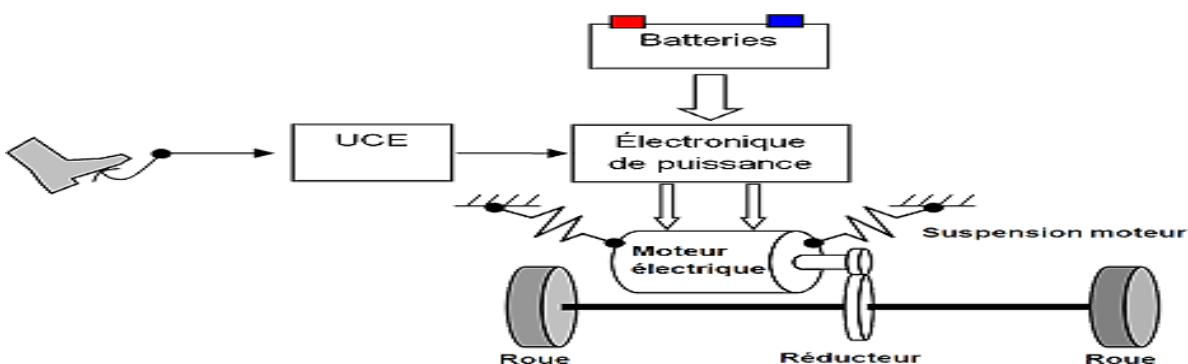


Figure II.3 Phénomène d'entraînement du moteur électrique

Ce dispositif électromécanique qui transmet aux roues un couple défini par le conducteur est appelé une chaîne de traction, et celle-ci, comme tout système physique, est définie par un ensemble de grandeurs caractéristiques liées à l'inertie et à l'électronique de puissance pouvant être utilisée. Ces grandeurs décrivent le comportement dynamique de la chaîne de traînée. Elles affectent le comportement du véhicule lors de la modification de la consigne de couple (donnée par le conducteur), cependant certaines configurations de ces grandeurs peuvent produire des oscillations même pour des consignes de couple stables [21].

II.3.2 Présentation de machine à courant continu

Les moteurs à courant continu ont trois éléments de base (figure II.4) :

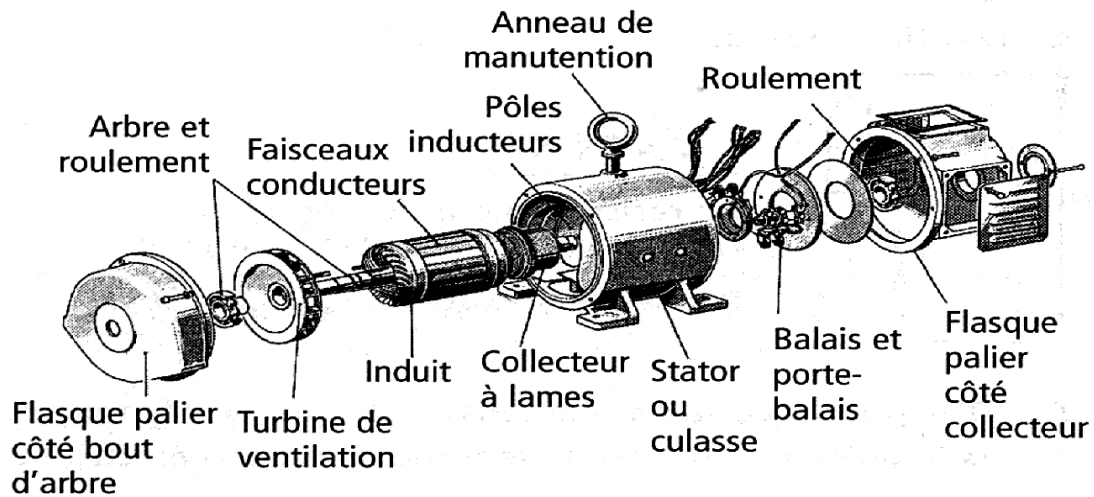


Figure II.4 constitution de la machine à courant continu.

- **L'inducteur**

C'est la partie fixe du moteur et son rôle est de générer le champ magnétique d'excitation. Il se compose d'aimants permanents ou d'électroaimants et ses enroulements ont un courant d'excitation continu. La bobine est montée dans une culasse, généralement en fonte, et les pièces polaires sont en acier doux. La bobine de champ est alimentée en courant continu, le courant de champ (Figure II.5) [23].

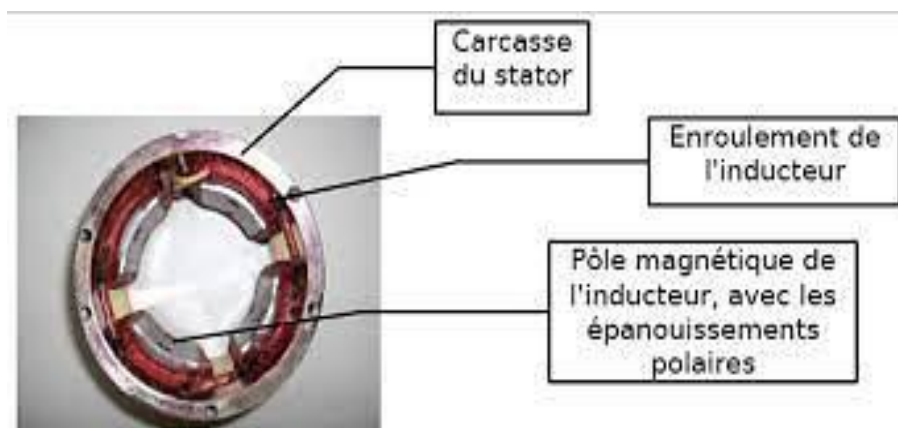


Figure II.5 Inducteur complet d'une machine à courant continu.

- **L'induit**

C'est la partie mobile de la machine qui transporte les conducteurs affectés par le flux magnétique de l'inducteur, Il est composé de feuilles de Ferro silicium isolées les unes des autres pour limiter les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault, il y a des encoches sur la périphérie du fer d'induit, des enroulements d'induit transportés par courant continu sont installés dans ces fentes, l'enroulement d'induit est composé de pièces, une pièce est un ensemble de spires isolées les unes des autres, l'extrémité de l'enroulement d'induit est connectée au collecteur. (Figure II.6)[29 ,23] :

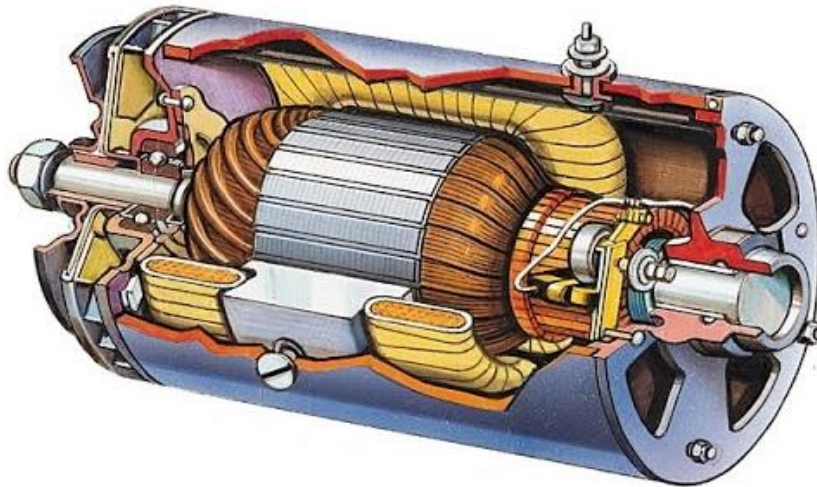


Figure II.6 Induit d'une machine à courant continu.

- **Le collecteur**

Le collecteur est le composant clé d'un moteur à courant continu. Il est constitué d'un groupe de lames de cuivre séparées latéralement et logées dans un cylindre à l'extrémité du rotor. Ces lames sont reliées aux conducteurs de l'induit. Le travail du collecteur est de s'assurer que le courant dans le conducteur de l'industrie est allumé et éteint. (figure II.7)[29].

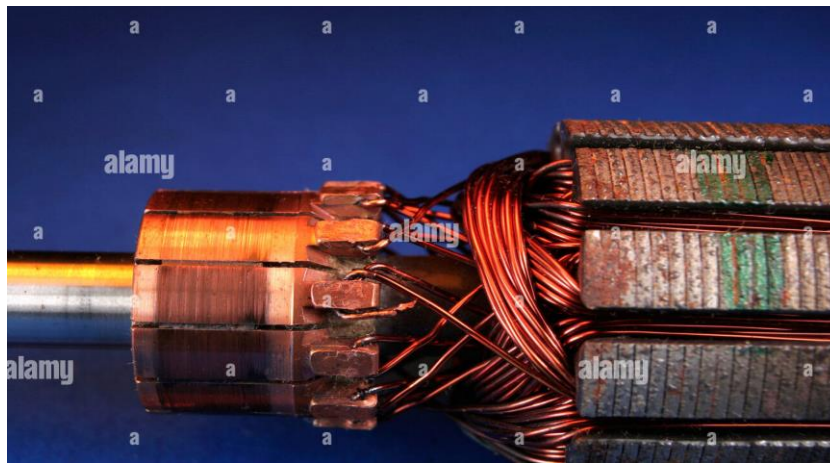


Figure II.7 Collecteur d'une machine à courant continu.

II.3.3 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu

Lorsque l'inductance d'un moteur est alimentée par un courant continu, le principe est le même que lorsqu'un courant permanent est utilisé. Un champ magnétique (flux d'excitation) est généré dans la direction nord-sud, et une bobine capable de tourner autour d'un seul axe est placée dans le champ magnétique. Selon la loi de Laplace (Equation II.1 et Figure II.8), tout conducteur traversé par un courant électrique et placé dans un champ magnétique serait soumis à une force. Les conducteurs d'industrie des deux côtés de l'arbre de balai (ligne neutre) sont soumis à des forces opposées égales à F , mais lorsque le couple est généré, les forces sont égales[24,25].

$$\vec{dF} = I(d\vec{l} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II.3})$$

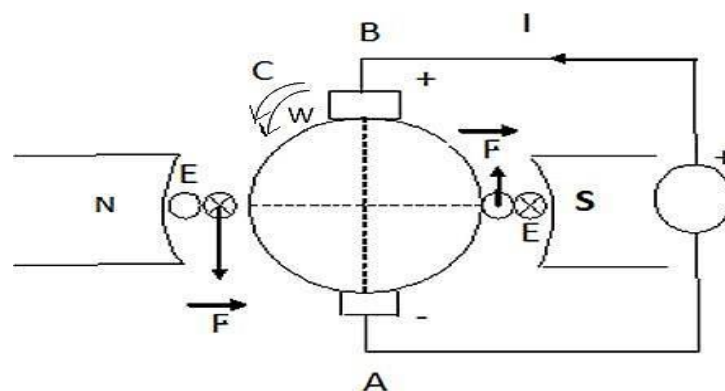


Figure II.8 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu.

II.3.4 Equation du moteur à courant continu

Selon les lois de Newton et Kirchhoff, les moteurs à courant continu sont régis par des équations physiques générées par leurs caractéristiques électriques, mécaniques et magnétiques [26,29]:

$$\begin{aligned} \text{(Loi d'Ohm)} \quad U(t) &= Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) \\ e(t) &= K\omega(t) \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

D'après le principe fondamental de la dynamique on a :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = Cu - Cr \quad (\text{II.5})$$

$$Cu = Kc i(t) - Cp \quad (\text{II.6})$$

$$Cr = f\omega(t) \quad (\text{II.7})$$

$U(t)$: Tension appliquée au moteur

$e(t)$: Force contre électromotrice

$i(t)$: Intensité traversant le moteur

$\omega(t)$: Vitesse de rotation du rotor

Cu : Couple moteur généré

Cr : Couple résistant

f : Coefficient de frottement visqueux

J : Moment d'inertie de l'axe du rotor

K : Constante de vitesse

Kc : Constante de couple

- Equation de l'inducteur

$$L_f \frac{dI_f}{dt} = -R_f I_f + V_f \quad (\text{II.8})$$

- **Equation de l'induit**

$$L_a \frac{dI_a}{dt} = -R_a I_a - E_a + T_a \quad (\text{II.9})$$

Où

$$E_a = k\phi\omega \quad (\text{II.10})$$

Avec ω vitesse de rotation en radians/seconde. Le flux est une fonction linéaire du courant d'excitation[29]:

$$k\phi = MI_f \quad (\text{II.11})$$

- **Equation de couple**

On l'obtient à partir de la puissance électromagnétique :

$$P = C_\varepsilon \cdot \omega = I_a E_a = I_a k\phi\omega \quad (\text{II.12})$$

Ce qui donne

$$C_\varepsilon = kI_a\phi = MI_f I_a \quad (\text{II.13})$$

- **Equation mécanique**

$$\frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t) - f \cdot \omega_m(t) \quad (\text{II.14})$$

Où C_r est le couple résistant imposé par la charge, J le moment d'inertie total (machine + charge entraînée) et f le frottement proportionnel à la vitesse de rotation [29].

- **Position du rotor**

$$\dot{\theta} = \omega \quad (\text{II.15})$$

II.4 Convertisseur continu/continu (Le hacheur)

Le hacheur est un convertisseur statique continu/continu (DC/DC) qui nous permet d'obtenir à partir d'une source de tension continue fixe, une source de tension continue de valeur moyenne réglable de plus forte ou faible valeur (élevateur ou abaisseur de tension). Il est

essentiellement constitué d'interrupteurs de puissance (transistors, diodes...) et de composants passifs (inductances, condensateurs.).

Par la commutation ouvert-fermé, périodique d'un interrupteur unidirectionnel, Ce dernier agit en hachante le courant du Circuit de Charge.

Le rôle du convertisseur DC/DC dans le véhicule électrique est :

- L'alimentation du véhicule en réseau basse tension (éclairage, Calculateurs, climatisation, etc.).
- Charger la batterie basse tension à partir de la batterie haute tension.

Le schéma de principe de base du convertisseur DC/DC est représenté dans la figure II.9 :

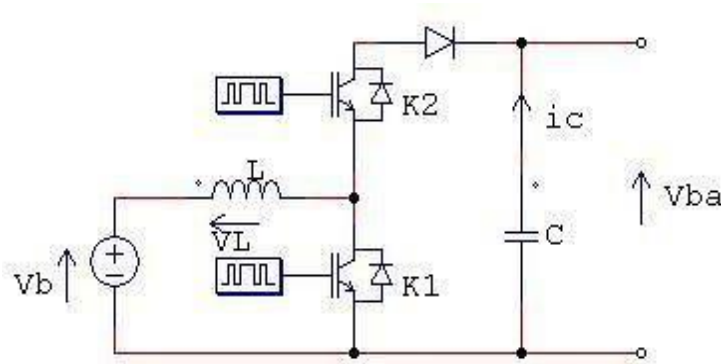


Figure II.9 Schéma détaillé d'un Hacheur élévateur bidirectionnel.

Le convertisseur DC/DC (hacheur) est un convertisseur bidirectionnel. Ce système s'appuie sur le mode de fonctionnement du véhicule pour que le courant circule dans les deux sens, et sa tension est la tension de la batterie.

Le hacheur peut être utilisé dans les voitures électriques pour maintenir le courant du moteur à la valeur souhaitée sans perte notable de tension du moteur, il peut également régler la vitesse et le couple du moteur dans les cas de traction et de freinage électrique[17].

II.5 La transmission mécanique

Une transmission mécanique permet de transférer la puissance du moteur aux roues et régule le couple et la vitesse de sortie du moteur. C'est presque le même type de transmission que l'on trouve sur les véhicules à moteur à combustion plus traditionnels. Le moteur électrique

tourne plus vite que les roues et produit très peu de couple. Le réducteur de vitesse ralentit pour faire correspondre la vitesse du moteur avec la vitesse demandée par les roues, fournissant plus de couple, et enfin grâce à une chaîne de transmission mécanique qui peut être composée d'une boîte de vitesses, mais c'est rare, l'astuce consiste à passer un contrôleur de convertisseur fixe (tel qu'un hacheur) contrôler directement le moteur pour régler la vitesse [31].

II.6 Modélisation du véhicule électrique

II.6.1 Model dynamique du véhicule

Afin d'étudier le contrôle du véhicule, il est nécessaire d'avoir un modèle pour expliquer la dynamique du véhicule, la résistance de traction et de déplacement générée à partir de ses actionneurs, le modèle dynamique choisi est un modèle simplifié, donc, le véhicule est modélisé comme une masse mobile m , qui est affectée par la force motrice F générée par le groupe motopulseur et différents effets liés à l'environnement F_{res} , tels que [27]:

$$F_{res} = F_r + F_a + F_g \quad (II.10)$$

La figure suivante montre les différentes forces agissant sur le véhicule :

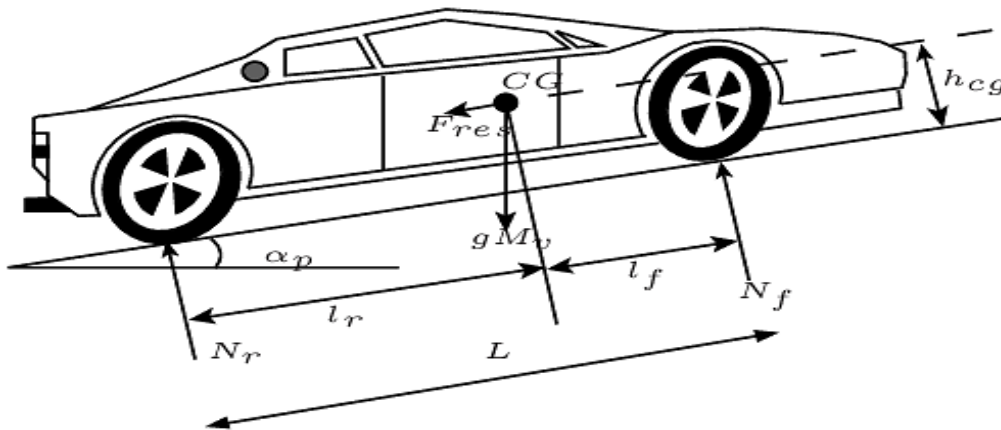


Figure II.10 Les forces agissant sur un véhicule

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

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_{tot} - \sum F_{res}}{\delta M} \quad (II.16)$$

où :

V : la vitesse du véhicule.

F_{tot} : l'effort de traction totale du véhicule

F_{res} : la résistance totale

M : la masse totale du véhicule

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

$$F_{tot} = F_r + F_a + F_g + F_{acc} \quad (II.17)$$

Où :

F_r : force de résistance de roulement des roues.

F_a : force aérodynamique.

F_g : force d'inclinaison.

F_{acc} : force d'accélération.

II.6.2 Mouvement longitudinal (les forces agissant sur le véhicule)

II.6.2.1 Force de roulement

La résistance au roulement d'un pneu sur des surfaces dures est principalement due à l'hystérésis du matériau du pneu. En effet, la pression dans l'aire de contact pneu-sol est répartie symétriquement par rapport à l'axe médian, elle est liée au coefficient de roulement de la roue. En fait, le coefficient de roulement C_{rr} est d'environ 0,01, il dépend de la largeur du pneu et de la surface de la route [3].

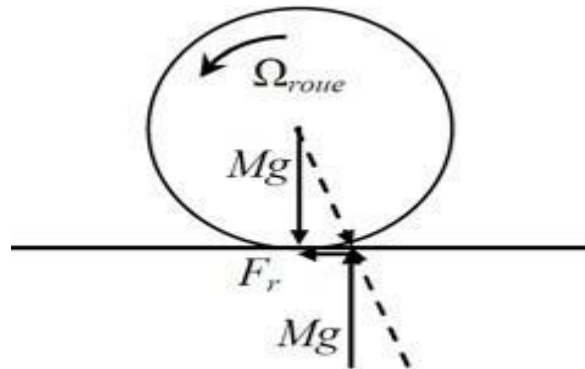


Figure II.11 La force de roulement sur la roue.

S'il y a une différence entre les pneus avant et arrière, l'effort de résistance au roulement vaut:

$$F_{res} = (C_{rr}m_{av} + C_{rr}m_{ar})g \simeq MgC_{rr} \quad (\text{II.18})$$

Ou :

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

M: La masse totale du véhicule.

II.6.2.2 Force aérodynamique

Un véhicule se déplaçant dans l'air à une vitesse donnée rencontre des forces qui s'opposent à son mouvement. Cette force est appelée traînée aérodynamique. Elle provient principalement de deux parties : la résistance de forme et le frottement de forme.

Créer une traînée : le mouvement vers l'avant du véhicule pousse l'air devant lui. Cependant, l'air ne peut pas immédiatement quitter la surface de la route, sa pression s'accumule, ce qui entraîne une pression atmosphérique élevée, et l'air derrière le véhicule ne peut pas remplir immédiatement l'espace laissé par son mouvement vers l'avant, ce qui crée une zone de faible air. pression. Ainsi, la force aérodynamique est proportionnelle à la densité de l'air, au carré de la vitesse relative par rapport à l'air (compte tenu du vent), à l'avant du véhicule et à

son coefficient de pénétration dans l'air. Air Cx. Elle est représentée par la relation suivante [21,2] :

$$F_a = \frac{1}{2} \rho S_f C_x (V - V_{\text{vent}})^2 \quad (\text{II.19})$$

Où C_x est le coefficient de résistance de l'air qui caractérise la forme de la carrosserie du véhicule, et V_{wind} est la composante de vitesse du vent dans la direction du mouvement du véhicule. Le signe positif est lorsque la vitesse du vent est dans la même direction que la voiture, et le signe négatif lorsque la vitesse du vent est opposée

II.7 Modélisation de la vitesse des véhicules électriques en moteur a c c

II.7.1 La source d'approvisionnement du VE

Dans ce chapitre, nous utiliserons une simple batterie, la batterie peut être modélisée comme un circuit équivalent tel qu'une source de tension en série avec une résistance interne l'équation suivante permet de trouver une approximation acceptable du SOC [32]

$$SOC(t) = SOC(0) - \frac{100}{Q} \cdot \int I_{\text{bat}}(t) dt \quad (\text{II.20})$$

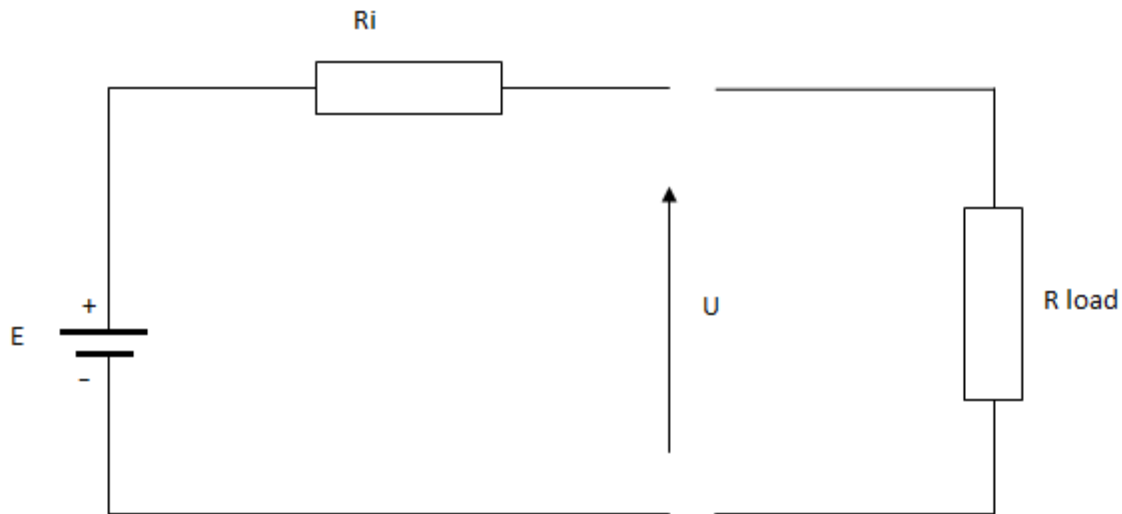


Figure II.12 schéma de la batterie.

II.7.2 Le hacheur

Le hacheur est un convertisseur électrique (pas d'accumulation d'énergie et supposé sans perte). Il est exprimé sous forme d'élément de conversion (pictogramme carrée), et son expression est [32]:

$$\begin{cases} U_{\text{chop}} = \alpha_{\text{chop}} V_{\text{bat}} \\ I_{\text{chop}} = \frac{1}{\alpha_{\text{chop}}} I_{\text{bat}} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Où :

α_{chop} : est le gain d'amplification du hacheur.

($\alpha_{\text{chop}} = \frac{1}{1-\alpha}$) et est le rapport cyclique.

I_{chop} :est le courant de le hacheur.

U_{chop} :est la tension de le hacheur.

V_{bat} : est la tension de la batterie.

II.7.3 Entraînement moteur

La motorisation utilisée comprend un moteur à courant continu alimenté par un hacheur. M C C est modélisé à l'aide de relations classiques. Le courant d'induit (I_{arm}) est la variable d'état de l'enroulement d'induit, qui peut être obtenue à partir de la tension d'alimentation et de la force électromotrice e_{em} [32]:

$$L_{\text{arm}} \frac{dI_{\text{arm}}}{dt} = U_{\text{chop}} - e_{em} - R_{\text{arm}} I_{\text{arm}} \quad (\text{II.22})$$

Où R_{arm} et L_{arm} sont la résistance et l'inductance de l'enroulement d'induit, du fait de l'inductance, le dispositif est donc un élément cumulatif, la conversion électromécanique relie le courant au couple moteur généré (T_{mot}), comme indiqué en (II.36), e_{em} est également dérivé du nombre nominal de tours du moteur W_{nom} [34,35].

$$\begin{cases} T_{mot} = k\phi I_{arm} \\ e_{em} = k\phi W_{nom} \\ k\phi = \frac{U_{arm}^{nominal} - R_{arm} I_{arm}^{nominal}}{W_{nom}} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Où k est le paramètre constant de la machine lié au couple et à la f.e.m. ϕ est le flux magnétique. L'équation suivante permet de trouver la valeur numérique pour la conversion mécanique (arbre + boîte de vitesse)[34] :

$$\begin{cases} T_{gear} = k_{gear} T_{mot} \\ W_{mot} = k_{gear} W_{gear} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

où :

T_{gear} et W_{gear} sont le couple et la vitesse de rotation après réduction, k_{gear} est le coefficient de réduction de la boîte de vitesses et W_{mot} est la vitesse de rotation du moteur [34].

II.7.4 Modélisation du couplage mécanique

II.7.4.1 Différentiel mécanique

La réduction de couple est répartie équitablement sur les roues gauche et droite, ainsi que la vitesse de rotation comme indiqué dans (II.38) [35].

$$\begin{cases} T_{diff_left} = \frac{1}{2} T_{gear} \\ T_{diff_right} = \frac{1}{2} T_{gear} \\ W_{diff} = \frac{1}{2} (W_{left} + W_{right}) \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

Où :

W_{diff} : la vitesse de rotation différentielle.

T_{diff_left} : le couple de roues gauche après différentiel.

T_{diff_right} : le couple de roues droite après différentiel.

II.7.4.2 Roues gauche et droite

Les roues doivent générer un mouvement linéaire à partir d'un mouvement de rotation. Les forces de traction peuvent être calculées à partir du couple du différentiel et la rotation des roues à partir de la vitesse du véhicule [32] .

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{\text{left}} = \frac{1}{R_{\text{wheel}}} T_{\text{diffleft}} \\ W_{\text{left}} = \frac{1}{R_{\text{wheel}}} V_{\text{veh}_{\text{left}}} \\ F_{\text{right}} = \frac{1}{R_{\text{wheel}}} T_{\text{diff right}} \\ W_{\text{right}} = \frac{1}{R_{\text{wheel}}} V_{\text{veh}_{\text{right}}} \end{array} \right. \quad (\text{II.39})$$

En distinguant la vitesse linéaire des roues gauches et droite, le rayon de courbure (*Recourbe*) et la largeur du véhicule (*lveh*) (la distance entre les roues arrière) peuvent être considérés [35].

$$\left\{ \begin{array}{l} F_t = F_{\text{left}} + F_{\text{right}} \\ v_{\text{veh}_{\text{left}}} = \frac{R_{\text{courb}} + \frac{l_{\text{veh}}}{2}}{R_{\text{courb}}} v_{\text{veh}} \\ v_{\text{veh}_{\text{right}}} = \frac{R_{\text{courb}} - \frac{l_{\text{veh}}}{2}}{R_{\text{courb}}} v_{\text{veh}} \end{array} \right. \quad (\text{II.40})$$

II.7.4.3 Châssis

Nous avons vu, dans (II.16), que la vitesse du véhicule *V-veh* est obtenue avec la relation dynamique de Newton à partir de la force de traction totale du véhicule *Ft* et de la force de résistance *Ftr* comme il est montré dans l'expression suivante [34,36]:

$$M \frac{dV_{\text{veh}}}{dt} = F_t - F_{tr} \quad (\text{II.41})$$

Où M est la masse du véhicule.

II.8 Modèle de véhicule électrique

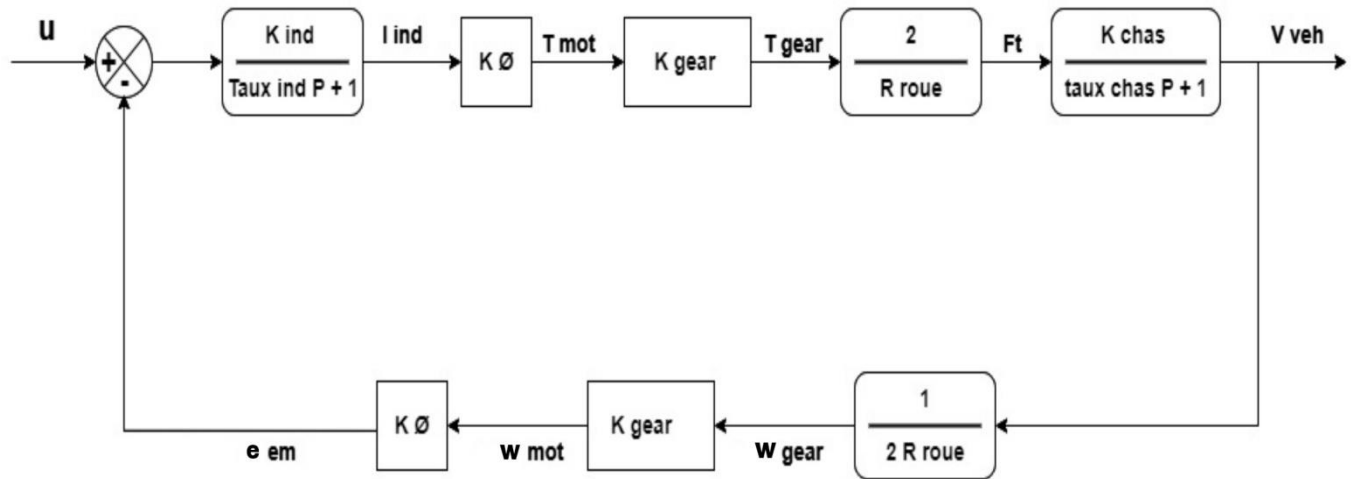


Figure II.13 Schéma bloc de VE en boucle ouverte.

La fonction de transfert simplifiée (FT) d'un véhicule électrique est un système du second ordre obtenu à partir du schéma bloc [32].

$$\frac{V_{veh}(s)}{U(s)} = \frac{G}{s^2 + a \cdot s + b} \quad (\text{II.42})$$

Ou :

$$G = \frac{k_{ind} \cdot k \cdot \phi \cdot k_{gear} \cdot k_{chass} \cdot \frac{2}{R_{wheel}}}{\tau_{ind} \cdot \tau_{chass}}$$

$$a = \frac{\tau_{ind} + \tau_{chass}}{\tau_{ind} \cdot \tau_{chass}} \quad (\text{II.43})$$

$$b = 1 + k_{ind} \cdot k_{chass} \left(k \cdot \phi \cdot K_{gear} \cdot \frac{1}{R_{wheel}} \right)^2 \tau_{ind} \cdot \tau_{chass}$$

Après la simulation, nous avons obtenu les résultats suivants :

Les courbes de courant d'induit et le couple de moteur (avant et après la réduction), la force de traction de ce test sont illustré sur les figures suivantes, respectivement.

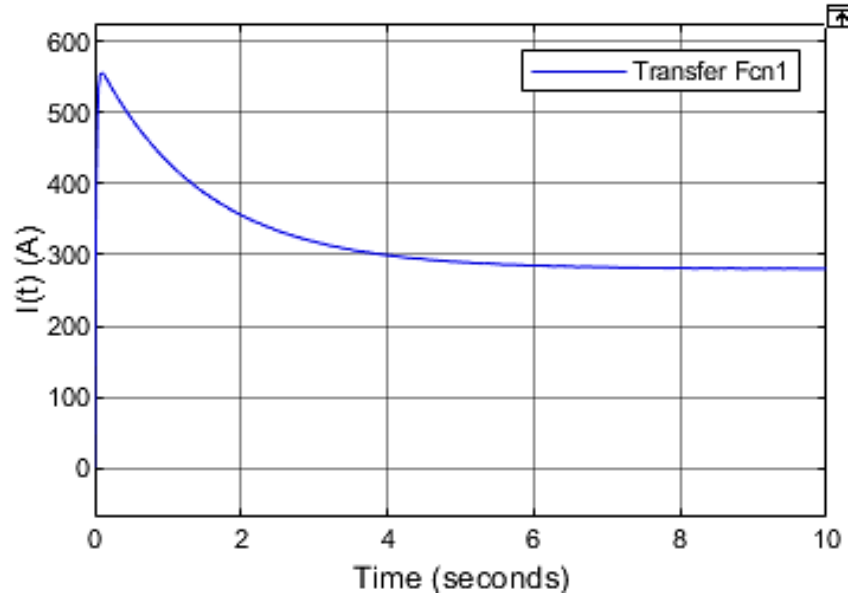


Figure II.14 courant de l'induit

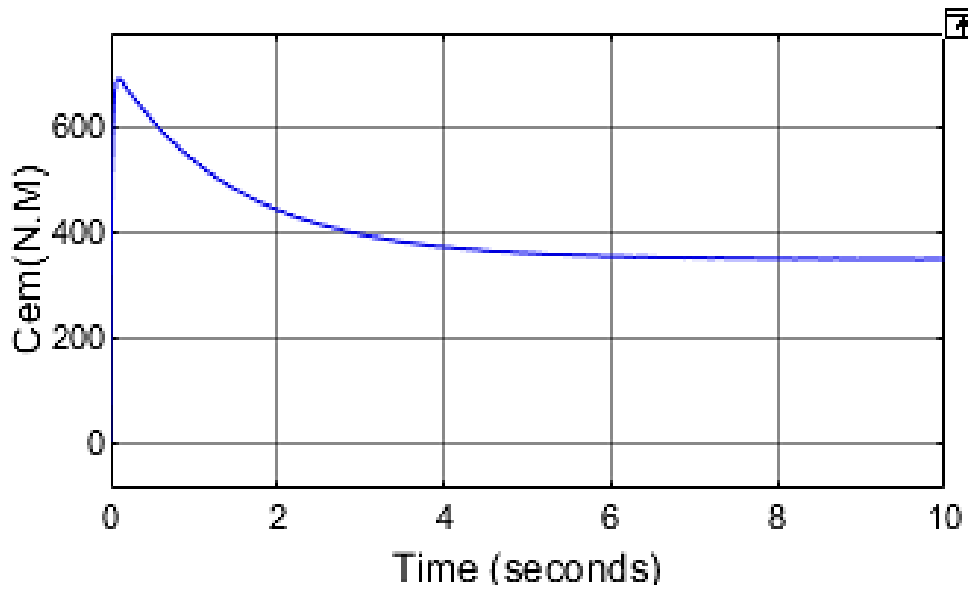


Figure II.15 couple moteur avans réduction

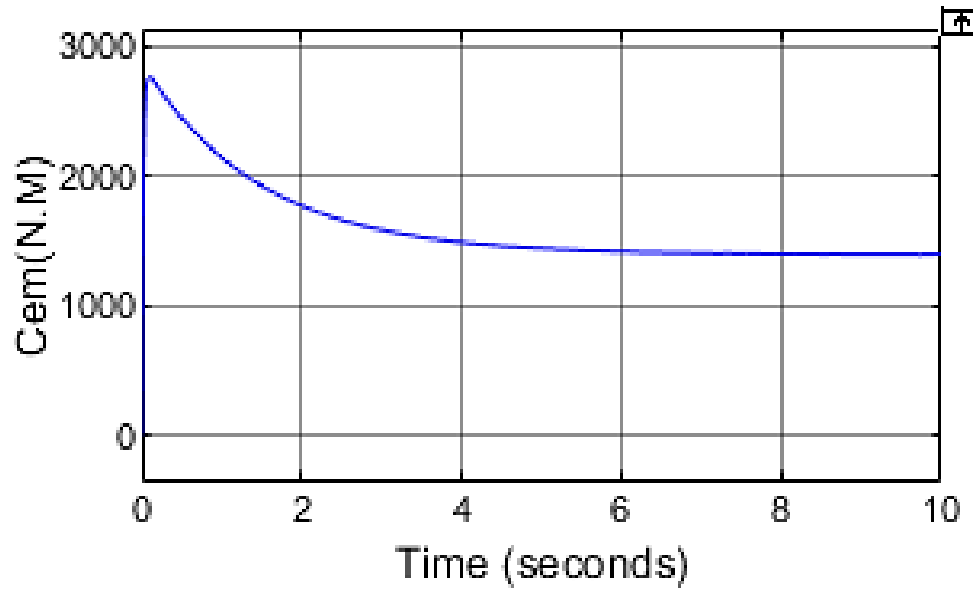


Figure II.16 le couple de rotation après réduction

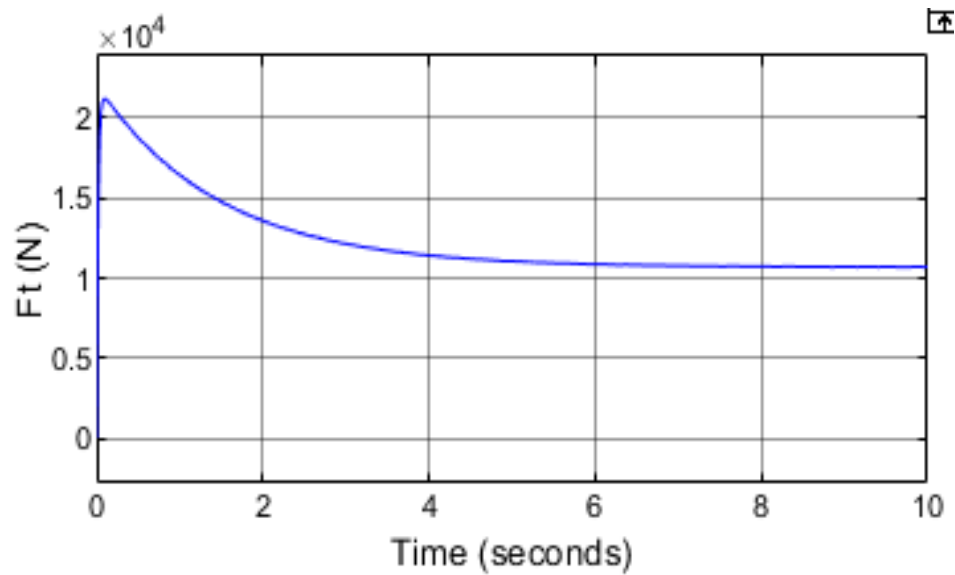


Figure II.17 la force de traction

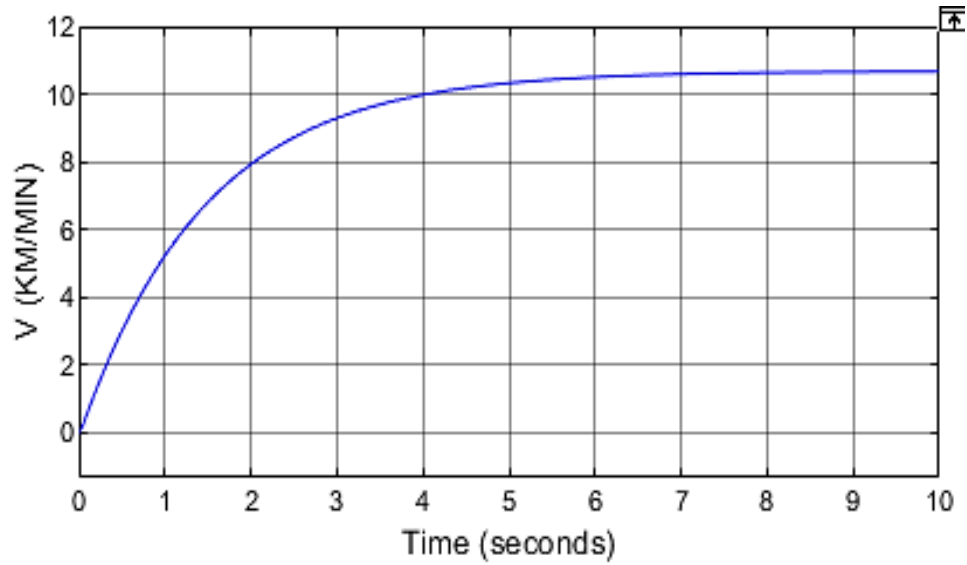


Figure II.18 la vitesse du véhicule

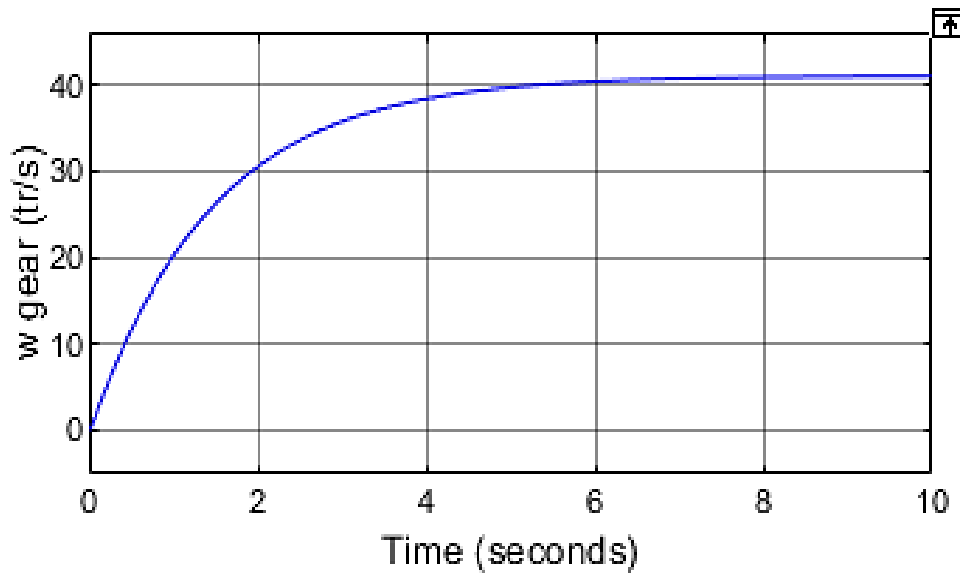


Figure II.19 la vitesse avant réduction

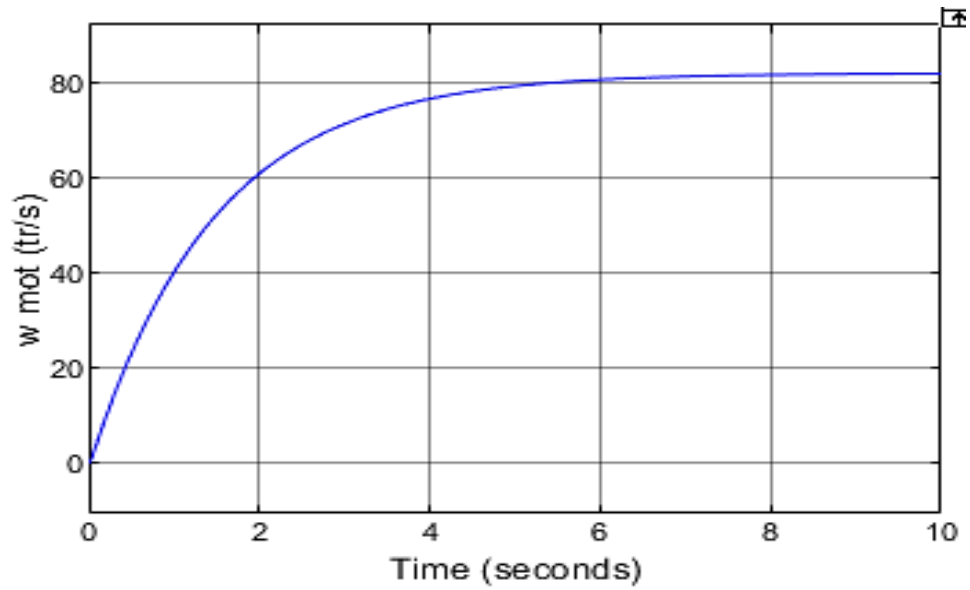


Figure II.20 la vitesse après réduction

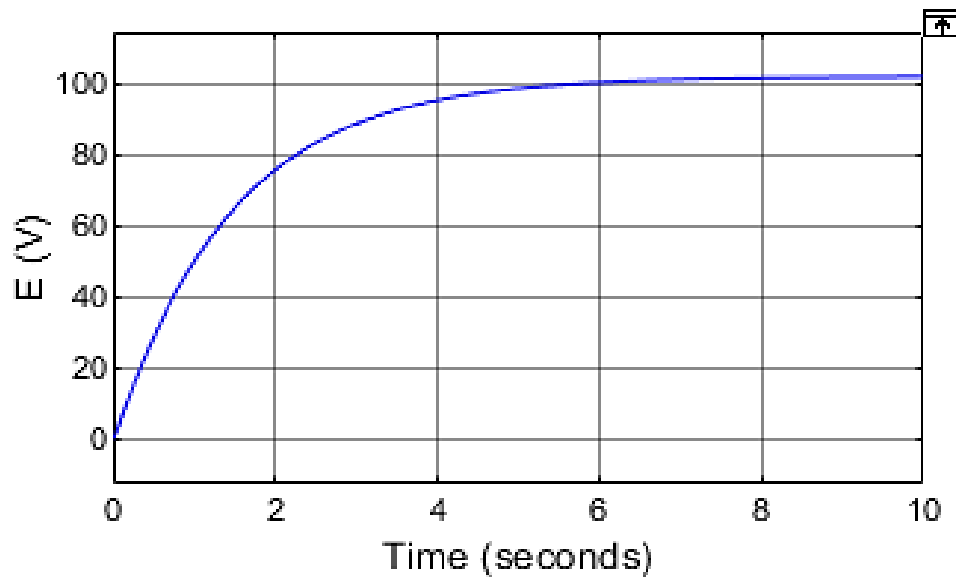


Figure II.21 Force electromotrice

Nous remarquons que toutes les courbes suivent la référence que nous avons donnée au début de la simulation.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les équations mathématiques utilisées et les composants du véhicule utilisés pour modéliser la vitesse du moteur à courant continu.

Dans le chapitre suivant, nous décrirons les techniques de contrôle de vitesse couramment utilisées dans les véhicules électriques et leurs résultats de simulation.

Chapitre III

Optimisation des essaims de particules

III.1 Introduction

L'optimisation est importante dans de nombreux domaines, et compris en science des données. Dans la fabrication, où chaque décision est essentielle au processus et au profit de l'organisation, l'optimisation est souvent utilisée, à partir du nombre de chaque produit fabriqué, de la planification de la production de l'unité, de l'obtention du paramètre de processus le meilleur ou optimal [40].

L'optimisation de l'essaim de particules a été proposée par Kennedy et Eberhart en 1995. Lorsque les sociobiologistes pensent qu'un banc de poissons ou une volée d'oiseaux qui se déplacent en groupe "peuvent profiter de l'expérience de tous les autres membres". En d'autres termes, pendant qu'un oiseau vole et cherche de la nourriture au hasard, par exemple, tous les oiseaux du troupeau peuvent partager leur découverte et aider l'ensemble du troupeau à obtenir la meilleure chasse [45].

Dans ce chapitre nous allons présenter un bref historique et des généralités sur l'optimisation par Essaim de Particules (PSO). Ainsi que une explication de cette méthode et leur paramètre que permet d'utiliser avec les lois algorithmique appliquée.

III.2 Définition du technique de PSO

L'optimisation par essaims particulaires est une méthode qui s'inspire de la biologie pour résoudre des problèmes d'optimisation Inspiré du comportement social des animaux, comme une volée d'oiseaux ou un banc de poissons. L'essaim n'explore pas complètement l'espace de recherche mais trouve potentiellement une meilleure solution.

PSO est initialisé avec un groupe de particules aléatoires (solutions) puis recherche des optima en mettant à jour les générations. Chaque individu est traité comme une solution unique, appelée particule, qui se déplacera dans l'espace des solutions à la recherche d'optimums globaux [40].

La direction et la vitesse du mouvement des particules sont déterminées par 3 composantes : la composante d'inertie, la composante cognitive et la composante sociale. Chacune de ces composantes reflète une partie de l'équation, figure 1 [46].

- 1) **La composante d'inertie** : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
- 2) **La composante cognitive** : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.
- 3) **La composante sociale** : la particule tend à se diriger vers le meilleur site atteint par ses voisins.

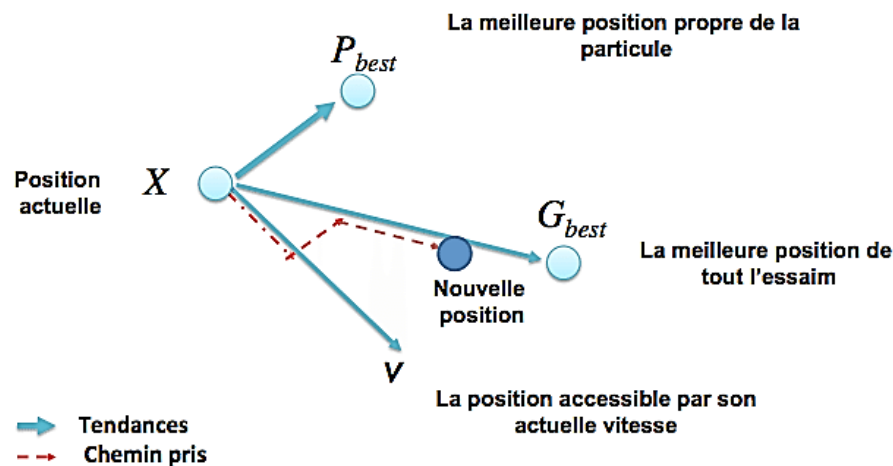


Figure III.1 Déplacement d'une particule.

III.3 Principe de ce technique

L'optimisation par essaim de particules repose sur un ensemble d'individus originellement disposés de façon aléatoire et homogène, appelés des particules. Ces particules se déplacent dans l'espace de recherche et constituent chacune une solution potentielle. Chaque particule dispose d'une mémoire concernant sa meilleure solution visitée, ainsi que la capacité de communiquer avec les particules constituant son entourage [42].

Le déplacement de ses particules en essaim est complexe, sa dynamique obéit à des règles et des facteurs bien spécifiques:

- Chaque individu dispose d'une certaine intelligence « limitée » (qui lui permet de prendre une décision).

- Chaque individu doit connaître sa position locale et disposer d'information locale de chaque individu se trouvant dans son voisinage.
- Obéir à ces trois règles simples, « rester proche des autres individus », « aller dans une même direction » ou « voler à la même vitesse »

III.4 Formulation de la technique

Une particule i de l'essaim dans un espace de dimension D est caractérisée, à l'instant t , par :

- ✓ X : sa position dans l'espace de recherche
- ✓ V : sa vitesse
- ✓ P_b : la position de la meilleure solution par laquelle elle est passée
- ✓ P_g : la position de la meilleure solution connue de tout l'essaim
- ✓ $f(P_b)$: la valeur de fitness de sa meilleure solution
- ✓ $f(P_g)$: la valeur de fitness de la meilleure solution connue de tout l'essaim.

Le déplacement de la particule i entre les itérations t et $t+1$ se fait selon les deux équations [1] et [2] [43] :

$$V(t+1) = V(t) + C_1 r_1 (P_b(t) - X(t)) + C_2 r_2 (P_g(t) - X(t)) \quad (\text{II.1})$$

$$X(t+1) = X(t) + V(t+1) \quad (\text{II.2})$$

- ✓ C_1 et C_2 : deux constantes qui représentent les coefficients d'accélération, elles peuvent être non constantes dans certains cas selon le problème d'optimisation posé.
- ✓ r_1 et r_2 : deux nombres aléatoires tirés de l'intervalle $[0,1]$.

Les étapes d'un (PSO) peuvent être représentées par l'organigramme suivant [41]:

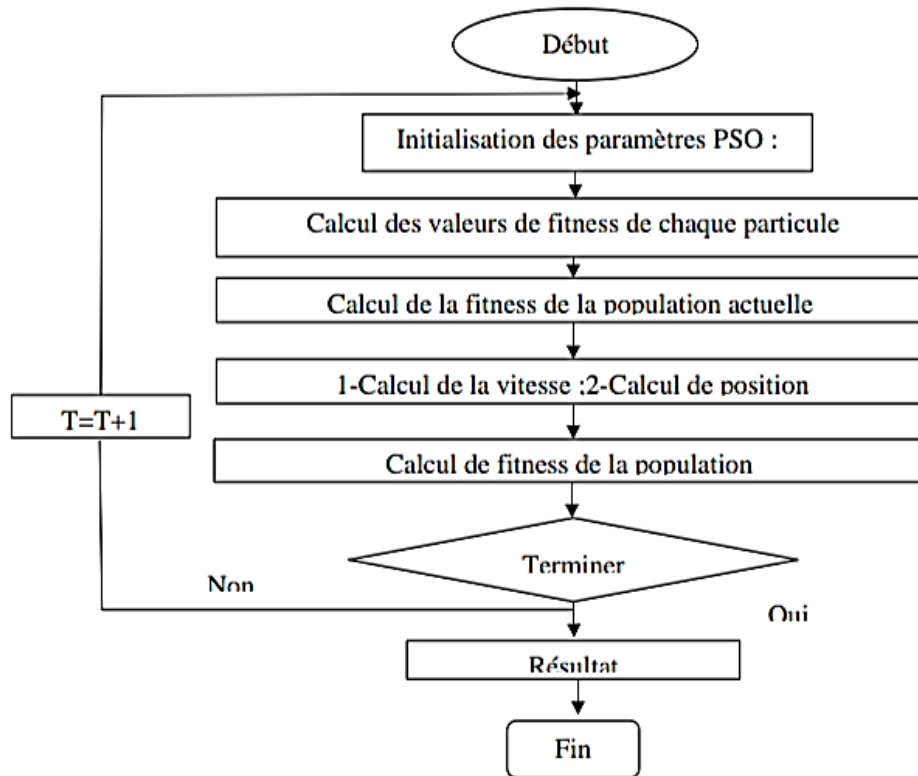


Figure III.2 Organigramme général d'un PSO.

Pour cette algorithmme PSO ; chaque particule est dotée d'une position, d'une vitesse qui lui permet le déplacement et d'un voisinage .les fonctions de vitesse et de position de chacun de ces particules sont données comme suite :

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c1 * rand1 * (Pbest_i - x_i^k) + c2 * rand2 * (gbest - x_i^k) \quad (II.3)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (II.4)$$

Avec :

V^k_i : la vitesse de la particule i à l'itération k .

W : facteur de pondération ou d'inertie. Sa fonction de calcul est donnée comme suite:

$$W = w_{max} - \frac{w_{min} - w_{max}}{iter\ max} * iter \quad (II.5)$$

Avec $(W_{\max}$: poids initial ; W_{\min} : poids final; iter max : nombre maximal d'itération; iter : nombre actuel d'itération).

C1 : facteur d'accélération lié à p best.

C2 : facteur d'accélération lié à g best.

Rand : nombre aléatoire entre 0 et 1.

X^k_i : position actuelle de la particule i à l'itération k .

P best_i : meilleure position rencontrée par la particule i jusqu'à l'itération k .

G best : meilleure position rencontrée par l'essaim jusqu'à l'itération k .

En utilisant l'équation [3], une certaine vitesse, qui s'approche graduellement de p best et de g best peut être calculée. La position courante, qui représente la recherche du point dans l'espace de solution, peut être modifiée par l'équation [4] [41].

L'OEP (PSO) est un algorithme à population. Il commence par une initialisation aléatoire de l'essaim dans l'espace de recherche. A chaque itération de l'algorithme, chaque particule est déplacée suivant [3] et [4]. Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées. Les Pbest (t) ainsi que Gbest (t) sont alors mis à jour. Le critère d'arrêt peut être différent suivant le problème posé. Si l'optimum global est connu a priori, on peut définir une "erreur acceptable" ϵ comme critère d'arrêt. Sinon, il est commun de fixer un nombre maximum d'évaluations de la fonction objectif ou un nombre maximum d'itérations [44].

III.5 Algorithme d'optimisation des essaims de particules

Dans un espace de recherche de dimension D , la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position $\vec{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ et par son vecteur vitesse $\vec{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note $\vec{P}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$. La meilleure position atteinte par toutes les particules de l'essaim est notée $\vec{g} = (g_1, g_2, \dots, g_D)$. Au temps t , le vecteur vitesse est calculé à partir de (II.6) [42].

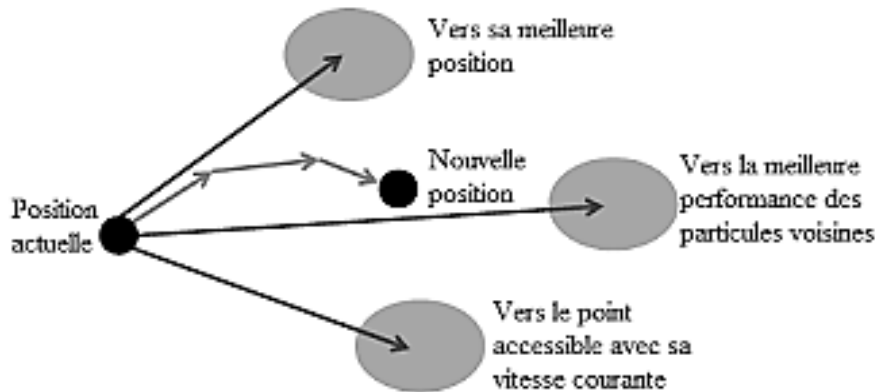


Figure III.3 Déplacement d'une particule.

$$v_{ij}(t) = w \cdot v_{ij}(t-1) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{ij}(t-1) - x_{ij}(t-1)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_i(t-1) - x_{ij}(t-1)), j \in \{1, \dots, D\} \quad (\text{II.6})$$

Où w est en général une constante appelée, coefficient d'inertie, c_1 et c_2 sont deux constantes, appelées coefficients d'accélération, r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0,1]$ à chaque itération et pour chaque dimension.

$w \cdot v_{ij}(t-1)$ Correspond à la composante physique du déplacement. Le paramètre w contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur. Il est à noter que, dans certaines applications, le paramètre w peut être variable [Siarry et al., 2006].

$c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{ij}(t-1) - x_{ij}(t-1))$ Correspond à la composante cognitive du déplacement. c_1 contrôle le comportement cognitif de la particule.

$c_2 \cdot r_2 \cdot (g_i(t-1) - x_{ij}(t-1))$ Correspond à la composante sociale du déplacement. c_2 contrôle l'aptitude sociale de la particule.

La combinaison des paramètres w , c_1 et c_2 permet de régler la balance entre les phases diversification et intensification du processus de recherche [Shi et al., 1998 ; Kennedy et al., 2001]. Il est à noter que le terme "vitesse" est ici abusif car les vecteurs \vec{V}_i ne sont pas homogènes à une vitesse. Il serait plus approprié de parler de "direction de déplacement".

Cependant, pour respecter l'analogie avec le monde animalier, les auteurs ont préféré utiliser le terme "vitesse". La position au temps t de la particule i est alors définie par (II.7)

$$x_{ij}(t) = X_{ij}(t - 1) + v_{ij}(t), j \in \{1, \dots, D\} \quad (\text{II.7})$$

L'OEP est un algorithme à population. Il commence par une initialisation aléatoire de l'essaim dans l'espace de recherche. A chaque itération de l'algorithme, chaque particule est déplacée suivant [5] et [6]. Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées. Les \vec{p}_i ainsi que \vec{g} sont alors mis à jour. Cette procédure est résumée par l'Algorithme 7. N est le nombre de particules de l'essaim.

Le critère d'arrêt peut être différent suivant le problème posé. Si l'optimum global est connu a priori, on peut définir une "erreur acceptable" ε comme critère d'arrêt. Sinon, il est commun de fixer un nombre maximum d'évaluations de la fonction objectif ou un nombre maximum d'itérations[42].

Algorithme 7 Algorithme d'optimisation par essaim particulaire

Initialisation aléatoire des positions et des vitesses de chaque particule

Pour chaque particule i , $\vec{p}_i = \vec{X}_i$

Tant que le critère d'arrêt n'est pas atteint **faire**

Pour $i = 1$ à N **faire**

Déplacement de la particule à l'aide de (1.5) et (1.6)

Évaluation des positions

Si $f(\vec{X}_i) < f(\vec{p}_i)$

$\vec{p}_i = \vec{X}_i$

Fin Si

Si $f(\vec{p}_i) < f(\vec{g})$

$\vec{g} = \vec{p}_i$

Fin Pour

Fin Tant que

Figure III.4 Algorithme d'optimisation par essaim particulaire

Comme critère d'arrêt. Cependant, au regard du problème posé et des exigences de l'utilisateur, d'autres critères d'arrêt peuvent être utilisés [42].

- **Les étapes de l'algorithme**

Les principales étapes de l'algorithme de notre approche sont les suivantes [46] :

Étape 1 : Attribuer les particules pour l'ensemble de l'espace de recherche en générant leurs positions, vitesses et topologie de communication.

Étape 2 : Créer les voisinages via la valeur initiale du rayon.

Étape 3 : Diviser le traitement de l'algorithme PSO sur un ensemble de traitements : pour chaque traitement on attribue un thread.

Étape 4 : Attribuer les lots de particules aux threads

Étape 5 : Lancer les traitements de tous les threads en parallèle pour une itération.

Étape 6 : Mettre à jour les voisinages selon les nouvelles positions des particules et la nouvelle valeur du rayon s'il y a lieu.

Étape 7 : Si le critère d'arrêt est satisfait, arrêter, sinon passer à l'étape 5.

Étape 8 : Le résultat est la meilleure solution obtenue parmi les threads.

III.6 Application du PSO au problème de dispatching économique de puissance

Etape 1 : Introduction de toutes les données Introduire toutes les données concernant le réseau électrique tel que les limites des puissances des générateurs et les données de la méthode utilisée comme : le nombre d'itération (génération), le nombre de particules et les paramètres de la méthode (coefficient d'inertie (w), l'intensité d'attraction ($C1$ et $C2$)).

Etape 2 : Initiation aléatoire de l'essaim initial, cet essaim est un ensemble des particules et chaque particule contient les valeurs des puissances délivrées par chaque générateur (PG_i) en

utilisant les valeurs réelles dans l'espace des valeurs permises. Puisque chaque puissance P_{Gi} à une limite supérieure $P_{Gi \max}$ et une limite inférieure $P_{Gi \min}$.

Étape 3 : Évaluation de la fonction objective Chaque particule est placée sur la position initiale suivant la valeur de la fonction fitness, en se basant sur le concept de ce processus pour chaque particule de l'essaim. Dans cette étape. L'influence directe de la valeur de la fonction objective de l'OPF dépend de la position de chaque particule.

Étape 4 : Calcul de la meilleure position de chaque particule jusqu'ici ($P_i \text{ best}$) et la Meilleure Position dans toutes les générations ($P_g \text{ best}$) Dans cette étape, on calcule les deux meilleures positions, la première c'est la meilleure position de chaque particule jusqu'ici ($P_i \text{ best}$) et la deuxième c'est la meilleure position de toutes Les générations ($P_g \text{ best}$). Ce calcul se fait suivant les valeurs de la fonction fitness.

Étape 5 : La modification de la vitesse et de la position Selon l'équation (III.1), chaque particule choisit la prochaine direction en prenant en considération la vitesse initiale (la vitesse) de chaque particule (V_0), l'inertie (w) et les valeurs de l'intensité d'attraction C_1 et C_2 . Et enfin chaque particule se déplace vers sa nouvelle position suivant équation (III.2). Chaque position (X_{k+1}) est l'image de la puissance délivrée par le générateur correspondant.

Étape 6 : Vérifier le critère d'arrêt [41].

Si le nombre actuel d'itérations atteint le nombre maximal d'itérations prédéterminé, alors sortir. Autrement, réitére le processus à l'étape 4.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la méthode d'optimisation par l'algorithme PSO et son Principe.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons la simulation et son résultat et la différence entre les paramètres normale de la vitesse d'un véhicule électrique et les paramètres optimisé par PSO.

Chapitre IV

Résultats de simulation

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, Dans la simulation nous utilisons le programme de l'algorithme d'optimisation PSO hors-ligne lié avec le fichier de simulation de VE pour optimiser les paramètres de PID (KP,KI,KD), Après trouver les paramètres optimaux de PID, on exécute la simulation du VE avec le mode européen.

IV.2 Les résultats de PSO

Nous allons parler de l'algorithme et expliquer ses résultats, le code a été tiré de [47].

IV.2.1 saisir le système

L'algorithme commence par entrer la fonction transfert on boucle ouvert de VE

```
clc;clear all;close all;
ns=[1,956];
ds=[1 54,18 36,6];
G=tf(ns,ds);
Gf=feedback(G,1);
step(Gf)
hold on
```

- Résultats : système sans contrôleur

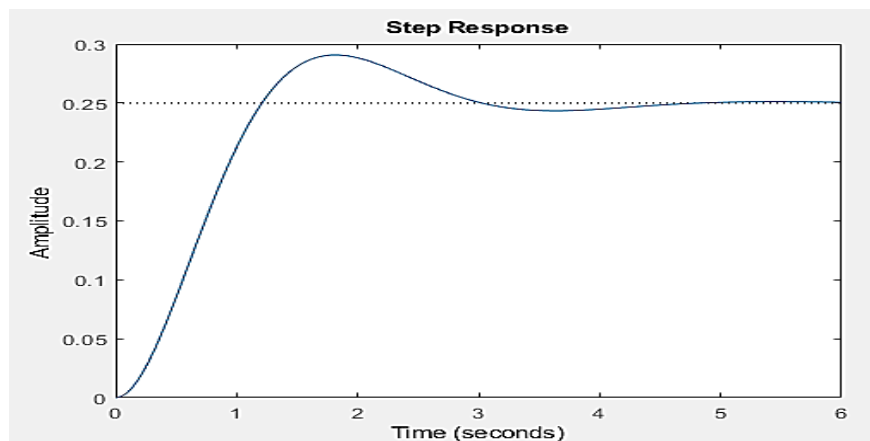


Figure IV.1 le système sans contrôleur

IV.2.2 Saisir les paramètres de recherche

C'est ici que les informations de recherche sont saisies

Input

```

%PSO Constant Parametres
c=2;w=0.7;particles=20;iteration=50;var=3;

%Search Space
a=0; %lower bound
b=30; %upper bound

%Optimization Steps
c_cf=0;

```

IV.2.3 la boucle du calcul la valeur globale

Partie du compte valeur globale

Initialisation

```

%Initialization
for m=1:particles

    for n=1:var
        v(m,n)=0; %velocity Particles
        x(m,n)=a+rand*(b-a); %position Particles
        xp(m,n)=x(m,n);
    end

    %Model Parameters
    kp=x(m,1);
    ki=x(m,2);
    kd=x(m,3);

    %Simulation Model
    Gc=pid(kp,ki,kd);
    Gcf=feedback(Gc*G,1);
    y=step(Gcf);

    %ITAE (Objective Function)
    ff1=0;
    sim1=size(y);
    for m1=1:sim1
        ff1=ff1+(abs(y(m1)-1))*m1;
    end
    ITAE(m)=ff1;
end

%Find the Best Value
[Best_Performance,Location]=min(ITAE);
fg=Best_Performance
xg(1)=x(Location,1);
xg(2)=x(Location,2);
xg(3)=x(Location,3);

```

Résultats

```

fg =
    110.3596

xg =
    23.3750

xg =
    23.3750    28.0203

xg =
    23.3750    28.0203    3.8972
fx >> |

```

valeur globale = fg ; xg = [kp ki kd]

Le programme répète et compare les résultats obtenus avec les résultats qu'il a calculés afin d'obtenir les meilleurs résultats.

Iteration

```

for i=1:iteration %No of repetition
    for m=1:particles %No of Particles
        for n=1:var %No of var
            v(m,n)=(w*v(m,n))+(c*rand*(xp(m,n)-x(m,n)))+(c*rand*(xg(n)-
x(m,n))); %Update Velocity
            x(m,n)=x(m,n)+v(m,n);
%Update Postion
        end

        %Check Bound
        for n=1:var
            if x(m,n)<a
                x(m,n)=a;
            end

            if x(m,n)>b
                x(m,n)=b;
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end

    %Model Parameters
    kp=x(m,1);
    ki=x(m,2);
    kd=x(m,3);

    %Simulation Model
    Gc=pid(kp,ki,kd);
    Gcf=feedback(Gc*G,1);
    y=step(Gcf);

    %ITAE (Objective Function)
    ff1=0;
    sim1=size(y);
    for m1=1:sim1
        ff1=ff1+(abs(y(m1)-1))*m1;
    end
    ITAEp(m)=ff1;

    %Compare Local
    if ITAEp(m)<ITAE(m)
        ITAE(m)=ITAEp(m);
        xp(m,1)=x(m,1);
        xp(m,2)=x(m,2);
        xp(m,3)=x(m,3);
    end
    end
    [B_fg,Location]=min(ITAE);

    %Compare Global
    if B_fg<fg
        fg=B_fg;           %New Global Value
        xg(1)=xp(Location,1); %Position of var 1
        xg(2)=xp(Location,2); %Position of var 2
        xg(3)=xp(Location,3); %Position of var 3
    end
    c_cf=c_cf+1;
    best_cf_ac(c_cf)=fg;
end

Min_ITAE=fg
kp=xg(1)
ki=xg(2)
kd=xg(3)

```

Résultats:

```
fg =  
    134.0088  
  
Min_ITAE =  
    74.2995  
  
kp =  
    23.6782  
  
ki =  
    22.5346  
  
kd =  
    2.9728
```

Commentaire : Nous avons commencé avec une valeur globale (fg) et après l'opération de l'iteration nous avons obtenu une valeur inférieure (Min_ITAE).

IV.2.4 La partie de dessiner les résultats

```
Gc=pid(kp,ki,kd);  
Gcf=feedback(Gc*G,1);  
step(Gcf);  
  
t_cf=1:c_cf;  
figure  
plot(t_cf,best_cf_ac,'r--','linewidth',2),xlabel('iteration'),ylabel('Cost  
Function(ITAE)')  
legend('ITAE for PSO-PID')  
title('ITAE with each iteration')
```

Résultat:

Le system Après avoir été traité par pid et pso

```
fg =  
    424.4292  
  
Min_ITAE =  
    74.5467  
  
kp =  
    24.2514  
  
ki =  
    23.8261  
  
kd =  
    3.2402  
  
.
```

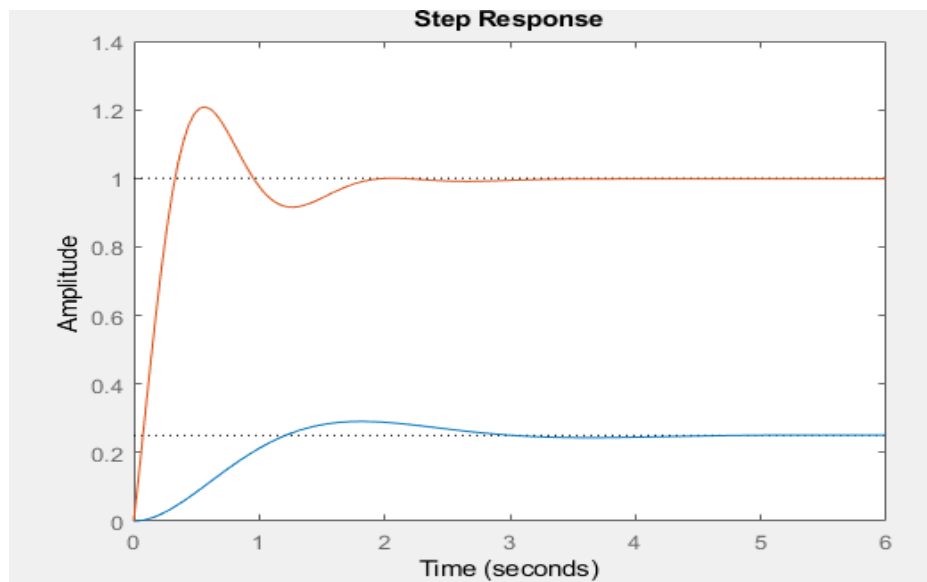


Figure IV.2 l'amplitude de step en fonction du temps

La convergence de temps intégral erreur absolue :

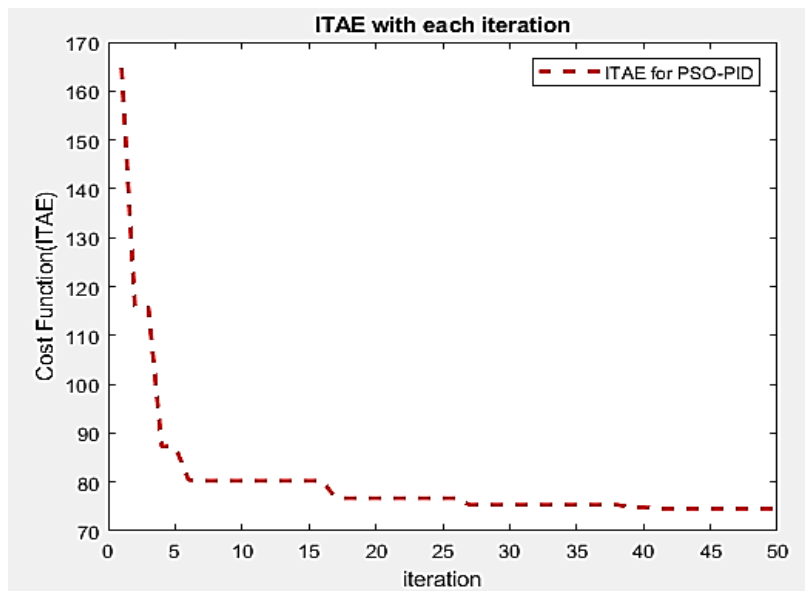


Figure IV.3 temps intégral erreur absolue à chaque itération

Remarque : ITAE diminue à chaque itération

IV.2.5 Commentaire général sur l'algorithme de PSO

PSO est un algorithme d'optimisation non linéaire, En utilisant la meilleure combinaison de paramètres, il est possible d'atteindre un résultat plus proche de la solution optimal , car il est impossible d'atteindre une solution idéale .nous donnerons des exemples pour le confirmer.

Exemple 01 : Après le changement de espace de recherche [0 300] nous obtenons un résultat plus proche.

```
fg =  
    442.3970  
  
Min_ITAE =  
    109.0391  
  
kp =  
    102.3492  
  
ki =  
    70.3619  
  
kd =  
    39.8768  
fx >> |
```

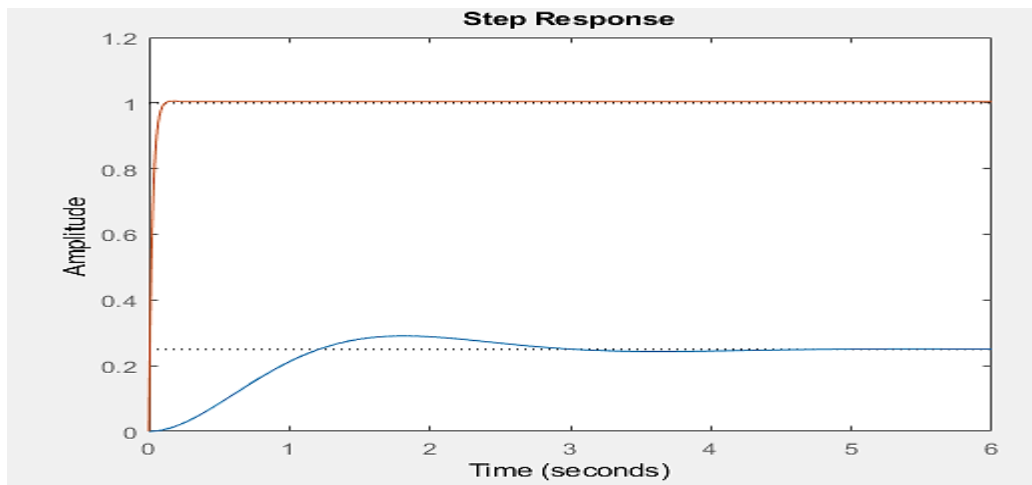


Figure IV.4 l'amplitude de step après l'optimisation en fonction du temps

Exemple 02 : nous allons changer dans le nombre maximum d'itérations

- Le nombre maximum d'itérations = 4

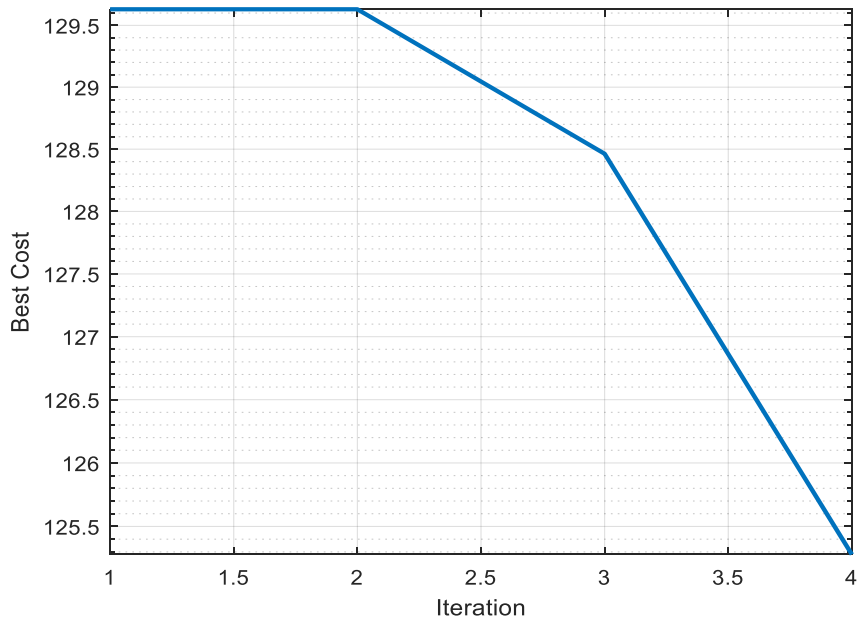


Figure IV.5 le meilleur cout en fonction de nombre d'itération (4)

- le nombre maximum iterations = 7

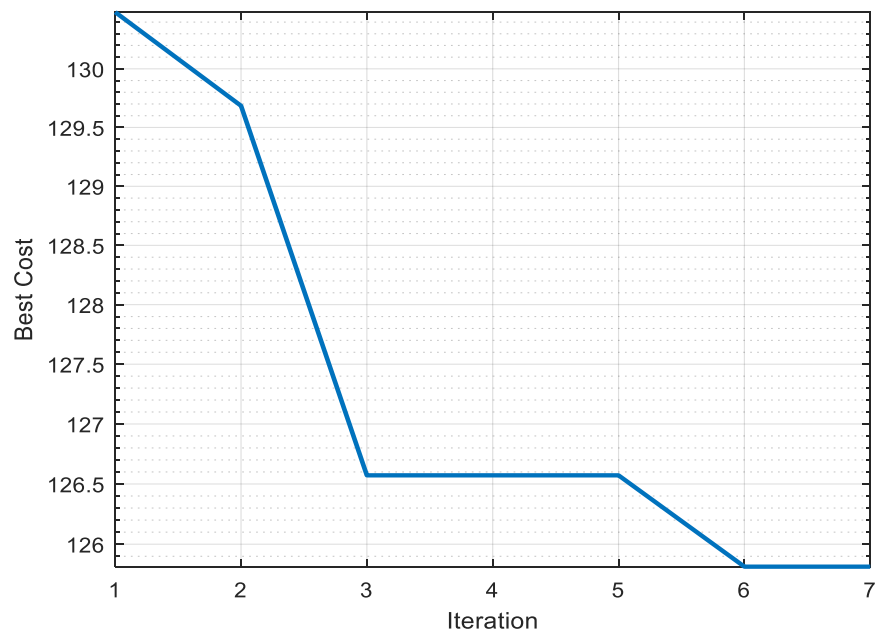


Figure IV.6 le meilleur cout en fonction de nombre d'itération (7)

- le nombre maximum d'itérations = 10

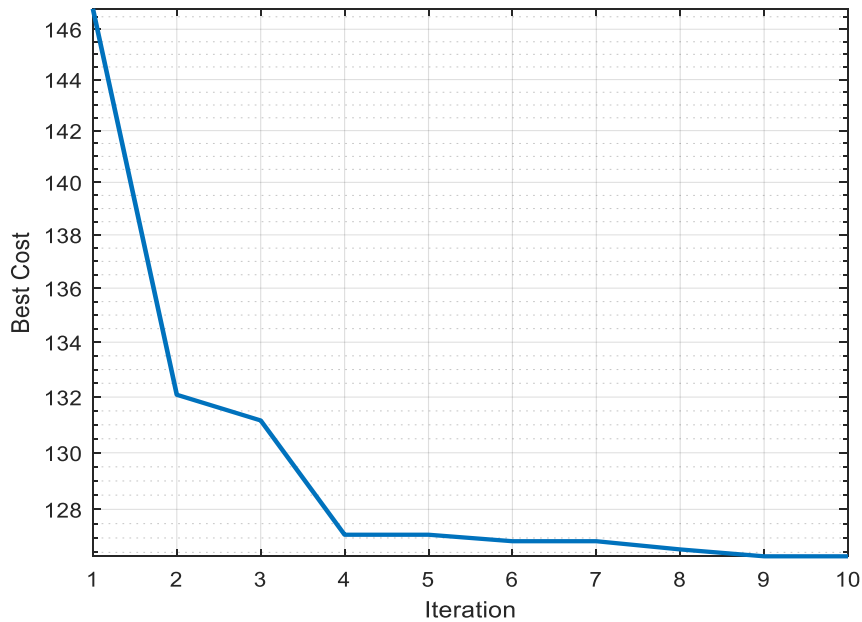


Figure IV.7 le meilleur cout en fonction de nombre d'itération (10)

_ plus il y'a de itérations, meilleur est le résultat.

IV.3 La simulation de notre travail

Dans cette simulation nous utilisons l'algorithme d'optimisation PSO pour optimiser les paramètre de PID (KP, KI, KD) , La simulation du VE se fait sous Matlab/simulink 2019. Cette simulation représente la structure de contrôle de la Vitesse de VE avec l'optimisation de PID par PSO.

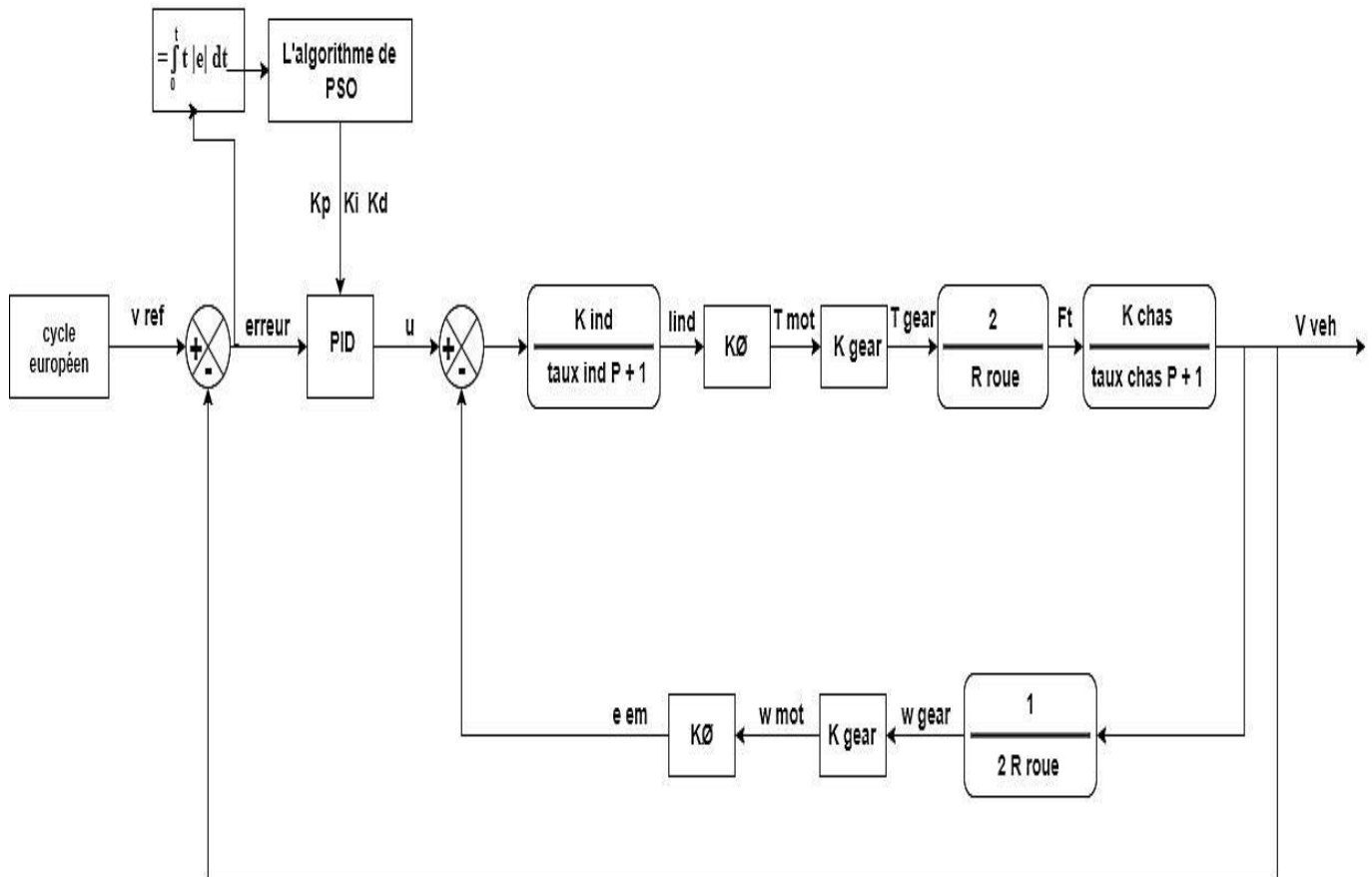


Figure IV.8 Schéma de simulation sur Matlab/Simulink.

Après la simulation, nous avons obtenu les résultats suivants :

Pour tester la poursuite du système en utilisant le profil de vitesse (profil de cycle européen) montrée sur la figure suivante :

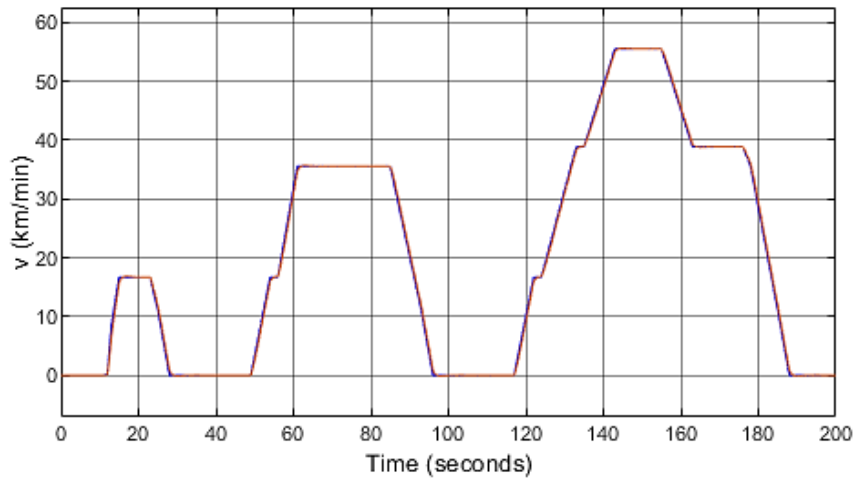


Figure IV.9 la vitesse d véhicule (R) et la vitesse de référence (B)

On remarque que la courbe de la vitesse de référence et la courbe du véhicule électrique sont identiques, cela signifie que nous avons obtenu une bonne réponse à la vitesse de VE.

Nous avons agrandi l'image précédente afin de clarifier la convergence entre les deux courbes

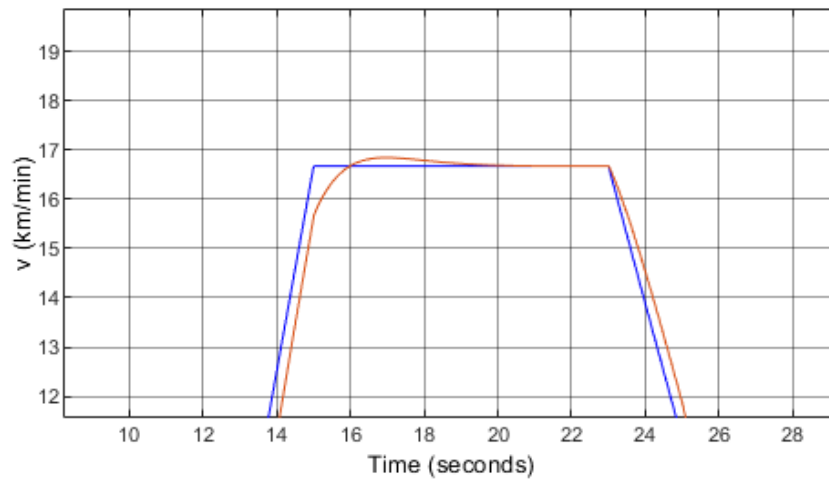


Figure IV.10 la vitesse d véhicule (R) et la vitesse de référence (B)

Les courbes de courant d'induit et le couple de moteur (avant et après la réduction), la force de traction de ce test sont illustré sur les figures suivantes, respectivement.

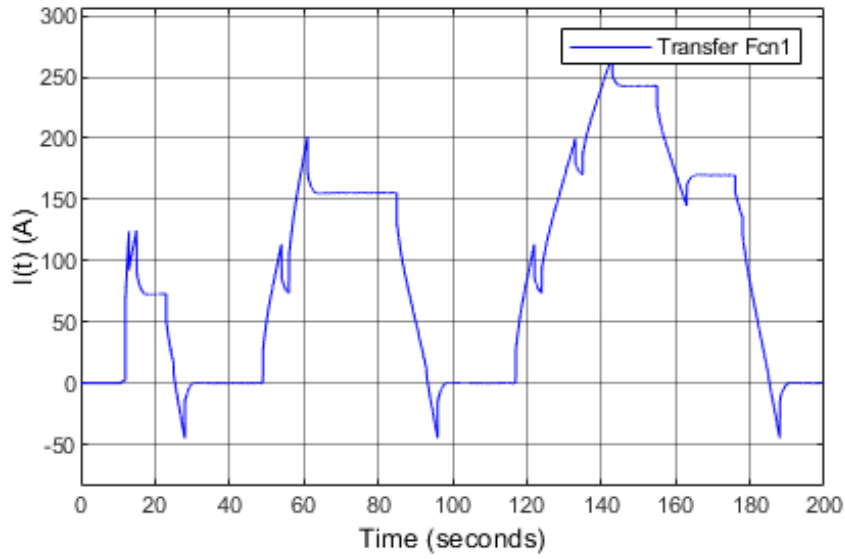


Figure IV.11 le courant d'induit

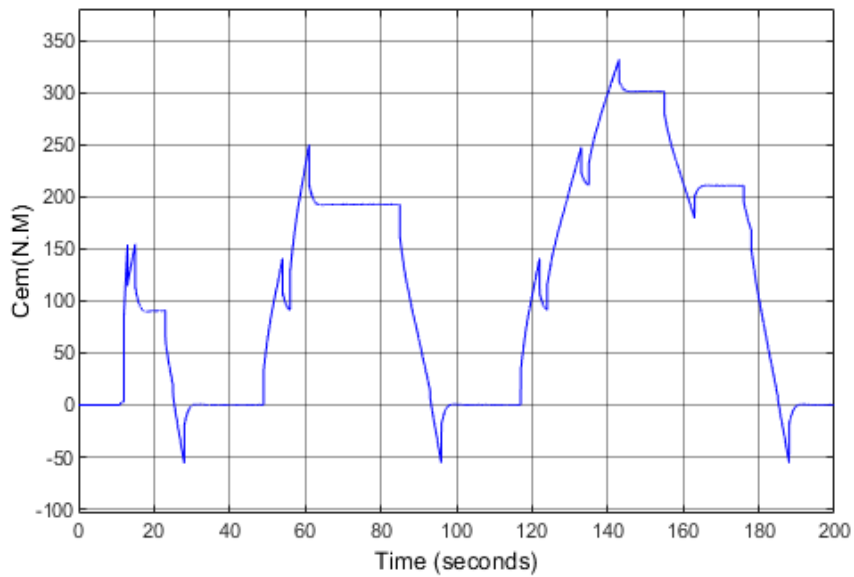


Figure IV.12 le couple du moteur

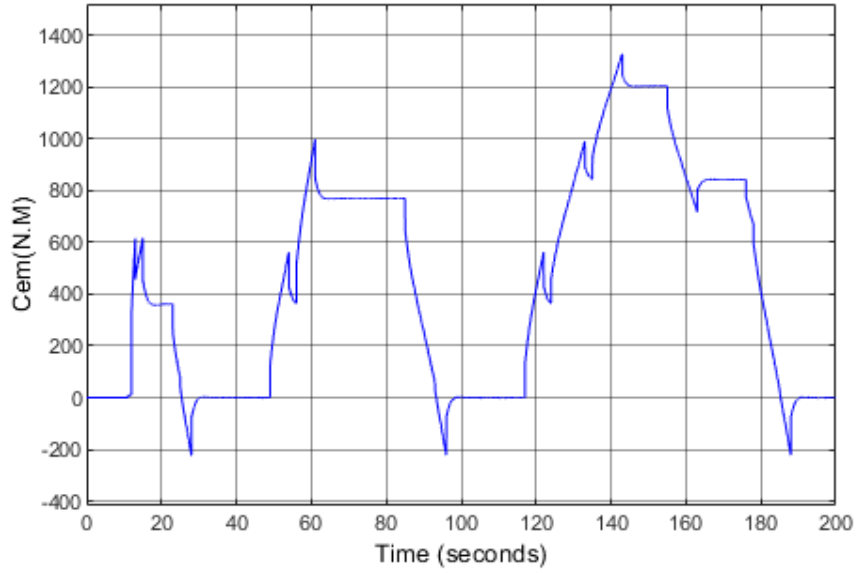


Figure IV.13 le couple du moteur après réduction

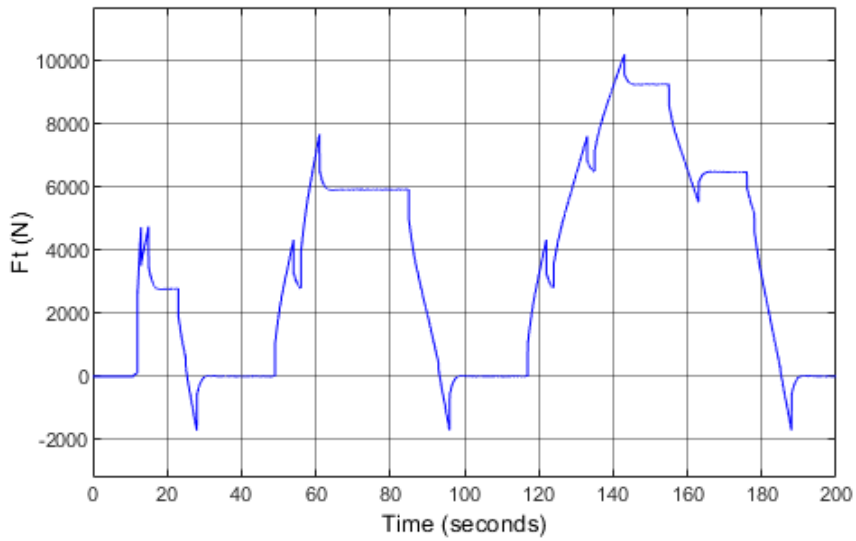


Figure IV.14 la force de traction

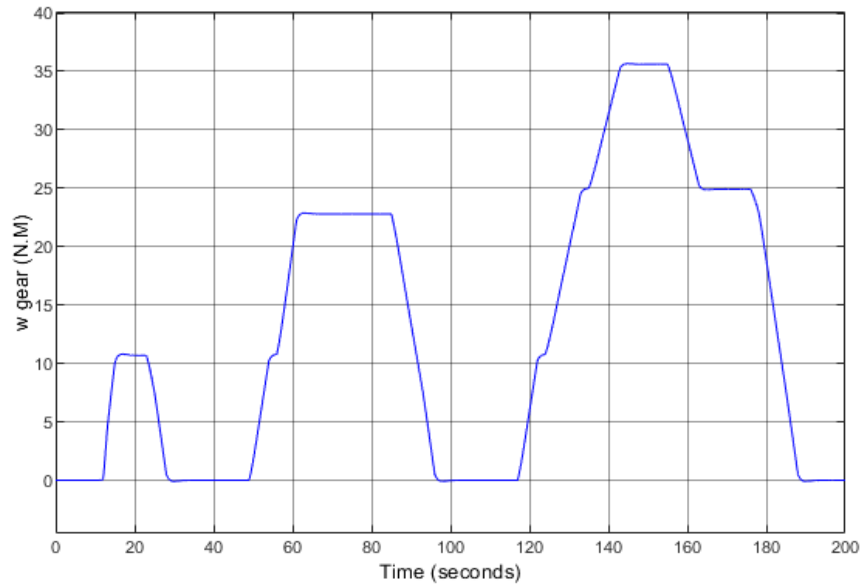


Figure IV.15 la vitesse de moteur avans réduction

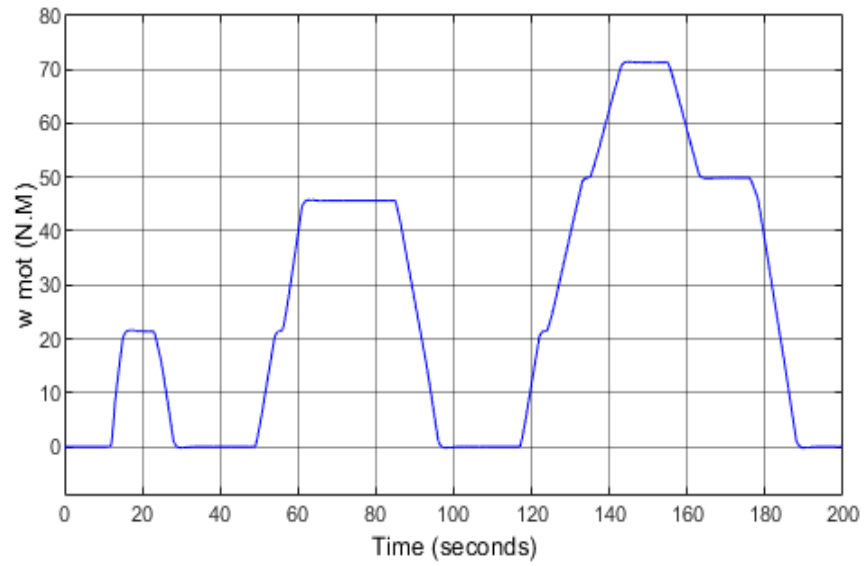


Figure IV.16 la vitesse de moteur après réduction

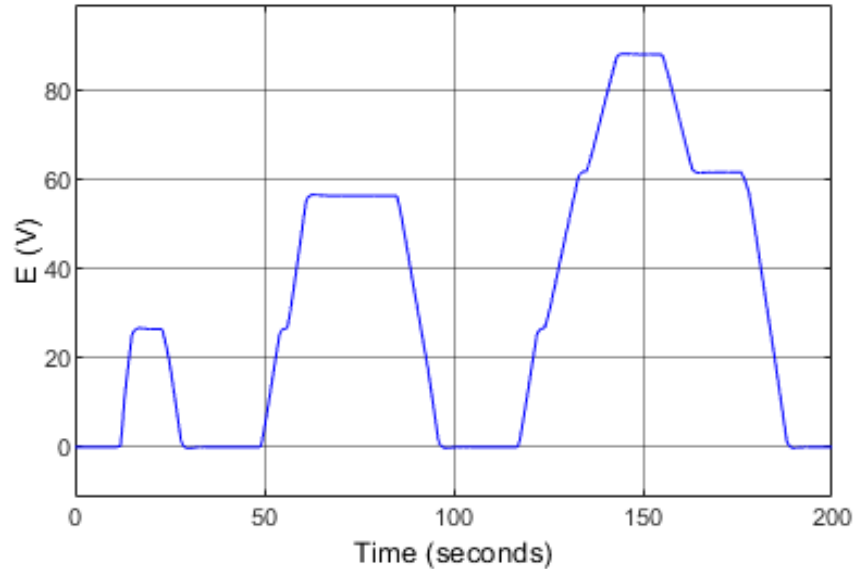


Figure IV.17 Force electrometrice

- Par conséquent, nous concluons que le régulateur PID optimisé par l'algorithme d'optimisation PSO nous donne:
 - ✓ Des bons performances dynamiques dans le régime transitoire,
 - ✓ Une forte stabilité et une robustesse dans le régime permanent.

IV.4 Conclusion

Les résultats de simulation sous matlab/Simulink montré que l'algorithme d'optimisation PSO était capable de donner d'excellentes valeurs au contrôleur PID et pouvait bien réduire les erreurs et à partir de là, nous obtenons une bonne réponse pour le moteur. Ainsi, nous avons pu améliorer la vitesse du véhicule électrique.

Conclusion générale

Ce travail porte sur l'étude des véhicules électriques, de leurs types et des différentes structures de leur traction et de leurs groupes motopropulseurs. Les sources d'énergie actuellement utilisées et tous les avantages et inconvénients des véhicules hybrides sont bien discutés dans cet ouvrage. L'objectif principal est consacré pour faire déterminer les paramètres du contrôleur PID de la vitesse d'un véhicule électrique par l'utilisation de la méthode d'optimisation PSO. La fonction objective définie est de minimiser l'erreur entre la vitesse mesurée et la vitesse de référence imposée, l'optimisation est faite off line pour avoir déterminé les paramètres de PID qui correspondent des bons performances dynamiques durant le régime transitoire et forte stabilité et robustesse en régime permanent. La validation du système a été faite par la simulation sous Matlab/simulink.

La modélisation des véhicules électriques Et en utilisant l'algorithme d'optimisation PSO, nous pouvons améliorer le contrôle de la vitesse de la véhicule électrique.

Dans le premier chapitre, Nous avons écrit sur l'aspect historique des véhicules électriques et comment les gens les ont développées en raison du besoin, nous avons également mentionné le principe de leur travail, leur composition, leurs inconvénients et leurs avantages. Puis nous avons consacré le deuxième chapitre à développer le modèle de véhicule électrique à moteur à courant continu et à faciliter les équations de forces qui lui sont appliquées pour faciliter son introduction dans Matlab/Simulink.

Nous avons consacré le troisième chapitre à parler de l'algorithme PSO, de son principe de fonctionnement et de la méthode pour le calculer.

Dans le quatrième chapitre on a présenté les résultats de simulation du système étudié et Nous avons vu l'efficacité de l'algorithme pour améliorer le contrôle de la vitesse d'un véhicule électrique.

Bibliographie

- [1] : D.MERFED, K.HAMROUN,' Etude et Stratégies de Commande d'un Véhicule Hybride Série, MEMOIRE DE FIN D'ETUDES master 2, UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI OUZOU, 2013.
- [2] : I. MARIF, H. ABDAT, La commande en vitesse d'un véhicule électrique, Mémoire de master, université de Tlemcen, 2019.
- [3] : H. Benariba, Contribution à la commande d'un véhicule électrique, Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Décembre 2018.
- [4] : D. Benoudjit, Contribution à l'optimisation et a la commande d'un système de propulsion pour véhicule électrique, Mémoire de magister, Université de Batna, Janvier 2010.
- [5] : I. Bougunna, Commande Robuste d'une Chaine de Traction d'un Véhicule Electrique Multi sources, Thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES, 2020.
- [6] : S. Meziani, A.Bourenane, Contrôle par logique floue d'une chaine de traction d'un véhicule électrique basé sur une machine asynchrone à double alimentation, Mémoire de master, Université Abderahmane Mira Bejaia, 2013.
- [7] : A. Boucheur, M. Djouder, MODELISATION ET COMMANDE D'UN VEHICULE ELECTRIQUE A BASE D'UNE MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS, Mémoire de Fin d'Etude de MASTER, UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU,2015.
- [8] : G. Malloy, M. Lachapelle, Essence, hybride ou électrique :ce qu'il faut savoir, Association Canadienne des Automobilistes
- [9] : L. Angot, La mobilité électrique dans les systèmes de transport et de mobilité urbains : constats et perspectives. Comment développer une nouvelle offre de mobilité durable par le biais de l'électromobilité dans la métropole toulousaine? Géographie. 2014.
- [10] : C.Espanet .Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inversée-Application au moteur-roue, Thèse de doctorat, Université de Franche Comté, Janvier 1999.

- [11] : I. OUKKACHA, Approche systémique de la gestion d'énergie électrique par stockage électrochimiques dédiée aux applications de transport, Thèse de doctorat, Université Le Havre Normandie, 2019.
- [12] : S. Meziani, A. Bourenane, Contrôle par logique floue d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique basé sur une machine asynchrone à double alimentation, Mémoire de master, Université Abderahmane Mira Bejaia, 2013.
- [13] : M. Florence, L. Benoit, Mobilité urbaine et technologies de l'information et de la communication (TIC) : enjeux et perspectives pour le climat, Studies, 5 :56 , 2012.
- [14] : A. Nouh, Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers, Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard et par l'université de Franche-Comté, Mars 2008.
- [15] : M. Ikkiss, R. El Ferrare, Voitures solaires électriques, Mémoire de Master, Faculté multy disciplinaire d'Ouarzazate, Mai 2013.
- [16] : Oriol Planas - Ingénieur Technique Industriel, spécialité mécanique Date de publication : 23 novembre 2018.
- [17] : A. Bordji, H. Flitti, Etude et simulation des éléments de chargeurs intégrés pour véhicule électrique, Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2019.
- [18] : Samantha LACROIX, " Modélisation et commande d'une chaîne de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries", THÈSE DE DOCTORAT, UNIVERSITE PARIS-SUD, 2013.
- [19] : AOUZELLAG Haroune, " Stratégies de Commande d'un Véhicule Hybride", MEMOIRE DE MASTER, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2013.
- [20] Y. Henni ; H. Boudjmil, Commande en vitesse d'un véhicule électrique par mode glissant, Mémoire de fin d'étude de Master, Université Mouloud MAMMERI de TIZI OUZOU, 2018.
- [21] S. Boughanem , R. chauchi Commande en vitesse d'un véhicule électrique, Mémoire de Fin d'Etude. De MASTER, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2018.

- [22] <https://www.techniques-ingenieur.fr/> , 11 :30, 30/05/2021.
- [23] M. Selmani , ‘Identification par Algorithmes Génétiques des Pertes dans un Moteur à Courant Continu à Excitation Séparée’, mémoire de master , université Mouloud Mammri de tizi ouazou,2013.
- [24] Séguier, F. Notelet, "Electro technique Industrielle", Technique et Documentation, 2^{ème} Edition, 1994.
- [25] M. Hadjeras, M. Belbey, "Etude des caractéristiques d’un moteur à c.c à différents types d’excitation", Mémoire de fin d’étude de licence Professionnelle en Electrotechnique Industrielle, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [26] F.Remadi ,A ,Sioune , ‘Modélisation et commande de la machine à courant continu’, mémoire de master, université larbi ben M’hidi oum lbouaghi,2012 .
- [27] Henni Gharbi <<Modélisation et commande d’un véhicule électrique hybride>> Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali chlef. 2015
- [28] H. Karima, Contribution à l’Etude et à l’Optimisation d’une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides, Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Juin 2016.
- [29] M. Ben saoula;’’Ception du Contrôleur PID pour le Moteur à Courant Continu (MCC) à Excitation indépendante Simulation sous Matlab /Simulink’’ ; UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA ; 2019.
- [30] : R. 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.
- [31] : Kerbouai Hamza ;’’Développement et validation d’une stratégie de commande optimale pour minimiser la consommation de la batterie dans un véhicule électrique’’ ; Mémoire de fin d’étude de Master ; Université de NANTES ; 2011.

- [32] O. kraa, "Control and Energy Management of an Electrical Vehicle" ; thèse de doctorat UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER DE BISKRA, 2015.
- [33] : Mohd, T. A. T., Hassan, M. K., Aziz, W. M. K. A. (2015). Mathematical modeling and simulation of an electric vehicle. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 8(1), 1312-1321.
- [34]: Kraa O, Becherif M, Aboubou A, Ayad M.Y, Tegani I and Haddi . Modeling and Fuzzy logic Control of Electrical Vehicle with an Adaptive Operation Mode. POWERENG IEEE 2013; 120-127
- [35] : A. Nouh, M. Becherif, A. Djerdir and M. El-Bagdouri. "Traction control of an electric vehicle with two separate wheel drive". International Conference on Ecologic Vehicle and Renewable Energies, EVER07, Monaco 2007.
- [36] : Rani, L. T., Sivakumar, D., Rathikarani, D., Suryakala, S. (2014, March). Design and implementation of RST controllers for a nonlinear system. In 2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE) (pp. 1-6). IEEE.
- [37] : <https://www.tcs.ch/fr/tests-conseils/conseils/mobilite-electrique/voitures-electriques-2020.php>
- [38] : <https://www.guideautoweb.com/constructeurs/tesla/model-s/2015/>
- [39] : https://www.autoaubaine.com/dossier-tesla-model-s-2022_9002458.html
- [40]:Adyatama,A.(2019).Particle Swarm Optimization.RPubs .
- [41]:BOUHINI,S.(2018).Etude du problème de la réparation économique de puissance avec l'algorithme d'Optimisation à Essaims de particules (PSO). Uuniversité DJILALI BOUNAAMA KHEMIS MILIANA.

[42]:COOREN, Y. (2008).Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en génie médical et en électronique THÈSE DE DOCTORAT : L'UNIVERSITÉ PARIS 12 VAL DE MARNE.

[43]:Kennedy,J, & Eberhart,R.(1995).Particle Swarm Optimization Purdue School of Engineering and Technology,IEEE Press,vol.8,no.3,pp.1943-1948

[44]:MANCER,N.(2012).Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS).Biskra : Université Mohamed Khider.

[45]: Tam, A. (2021). A Gentle Introduction to Particle Swarm Optimization. *Machine Learning Mastery* .

[46]:Zemzami, M., Elhami, N., Makhloufi, A., Itmi, M., & Hmina, N. (2017). Application d'un modèle parallèle de la méthode PSO au problème de transport d'électricité . *ISTE Science Publishing, London, UK – openscience.fr* .

[47]: <https://www.google.com/imgres?imgurl=https://www.researchgate.net/profile/Mohammed-El-Telbany/publication/239831415/figure/fig3/AS:667637306630148@1536188546367/The-structure-of-GA-or-PSO-of-PID-tuning-system.ppm&imgrefurl=https://www.researchgate.net/figure/The-structure-of-GA-or-PSO-of-PID-tuning->

[48]: system_fig3_239831415&tbnid=HWjyhUZsc0zbzM&vet=1&docid=P9ujrAwN4YFw-M&w=533&h=256&source=sh/x/im

[49]: <https://www.youtube.com/watch?v=qlZxsP-JQsQ&t=976s>.