

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Contribution à la commande Backstepping d'un véhicule électrique à deux roues motrices.

Préparé par :

BENASLA Chawki Zakaria

HACHEMI Cheikh

Devant le Jury :

| Nom et prénoms | Grade | Qualité |
|-------------------------------|--|---------------------|
| HABRI Khaled | Maître assistant « A » (Université de Tiaret) | Président |
| NEGADI KARIM | Professeure (Université de Tiaret) | Examineur 1 |
| KOULALI Mustapha | Maître de conférences « B » (Université de Tiaret) | Examineur 2 |
| ARARIA Rabah | Maître de conférences « B » (Université de Tiaret) | Encadreur |
| CHEDJARA Ahmed Zakaria | Maître assistant « B » (Université de Tiaret) | Co-Encadrant |

Remerciements

On tient avant tout à remercier chaleureusement Monsieur ARARIA Rabah , Maître de conférences classe "B" à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret et Monsieur CHEDJARA. A.Z, Maître de conférences classe " B" de nous avoir encadré et assuré le suivi de notre travail. En nous faisant confiance depuis le début de nos travaux, ils ont su diriger ce travail tout en nous laissant une complète autonomie. On les remercie non seulement pour leur qualité d'encadrement mais également pour l'inestimable qualité humaine dont ils ont toujours fait preuve. On est reconnaissant de l'honneur que nous ont fait Monsieur NEGADI Karim Professeur à l'université de Tiaret et Monsieur KOULALI. M Maître de conférences classe "A" à l'université de Tiaret pour avoir accepté de prendre part au jury. On les remercie vivement d'avoir accepté la tâche d'évaluer notre mémoire en qualité d'examineurs, en consacrant de leur précieux temps à l'examen, à l'évaluation de notre travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail. On les remercie aussi pour la patience et la pertinence dont ils ont fait preuve à la lecture de ce document afin de l'expertiser et estimer sa valeur scientifique. On remercie tout autant Monsieur HABRI Khaled., Maître assistant classe "A" à l'université Ibn Khaldoun de tiaret, pour avoir accepté de prendre part au jury, de le présider et de proclamer le résultat de la délibérations du jury notre soutenance.

Enfin, on tient aussi à remercier l'équipe pédagogique, constituée de l'ensemble des enseignants permanents et vacataires qui ont assurés notre formation durant notre cycle de master, ainsi que l'équipe de formation, constituée du responsable de filière et du responsable de la spécialité qui ont assurés la promotion de la spécialité maintenance industrielle, sans oublier le staff administratif du département de génie mécanique qui a veillé à l'organisation, la planification, le contrôle et le suivi des activités pédagogiques .

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Nos chers parents,

Nos frères et sœurs,

Toute ma famille HACHEMI.

Tous nos amis et camarades de promo AUTOII

(2023 – 2024)

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Nos chers parents,

Nos frères et sœurs,

Toute ma famille BENASLA .

Tous nos amis et camarades de promo AUTOII

(2023 – 2024)

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Remerciements | i |
| Table des figures | v |
| Liste des tableaux | vi |
| Nomenclature | vii |
| Notation et symboles | viii |
| Introduction Générale | 1 |
| 1 Introduction générale | 1 |
| I INTRODUCTION AUX VÉHICULES ÉLECTRIQUES (VE) | 5 |
| 1 Introduction | 6 |
| 2 Historique des véhicules électriques : | 6 |
| 3 Définition de Véhicule électrique : | 7 |
| 4 Les types des véhicules électriques : | 8 |
| 4.1 Le véhicule hybride : | 8 |
| 4.2 Hybride série : | 8 |
| 4.3 Hybride parallèle : | 9 |
| 4.4 Architecture combinée : | 9 |
| 4.5 Véhicules entièrement électriques (VE) | 10 |
| 4.5.1 Les Véhicules Électriques à Batterie : | 10 |
| 4.5.2 Les véhicules électriques à pile à combustible (PAC) | 13 |
| 4.5.3 Véhicule électrique à panneau solaire (Photovoltaïque) (VEPV) : | 14 |
| 4.5.4 Les véhicules électriques à supercondensateur | 16 |
| 4.6 Les convertisseurs statiques | 17 |
| 4.7 Les moteurs dans les véhicules électriques : | 18 |
| 4.8 Positionnement des Moteurs Électriques dans les VE | 21 |
| 5 CONCLUSION | 22 |
| II MODÉLISATION D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE | 23 |
| 1 Introduction | 24 |
| 2 Modélisation de véhicule électrique | 24 |
| 2.1 Modèle mécanique d'un véhicule | 25 |
| 2.2 Modélisation du Moteur à Courant Continu à Aimant Permanent (PMDC) : | 27 |
| 2.3 Modélisation de la batterie | 29 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4 a). Convertisseurs DC/DC (Hacheur) | 29 |
| 3 Différentiel du véhicule | 33 |
| 4 Régulation de la vitesse d'un moteur à CC par une commande PI | 34 |
| 4.1 Partie de simulation : | 35 |
| 5 Conclusion | 38 |
| III COMMANDE DU VEHICULE ELECTRIQUE PAR METHODE DE BACKSTEPPING | 39 |
| 1 Introduction | 40 |
| 2 Systèmes non linéaires | 40 |
| 3 Contrôle de systèmes non linéaires par la méthode du backstepping | 42 |
| 3.1 Principe de la commande par la méthode Backstepping : | 43 |
| 3.2 Application du commande backstepping a MCC | 43 |
| 3.3 Résultat et simulation du comportement du système | 45 |
| 4 Contrôle latéral d'un véhicule électrique | 46 |
| 4.1 Modèle latéral d'un véhicule | 47 |
| 4.2 Commande de la position latérale | 52 |
| 4.3 Comportement du véhicule en virage | 52 |
| 4.4 La commande latérale d'un VE à l'aide de la technique du Backstepping | 54 |
| 4.4.1 Élaboration de la loi de commande | 54 |
| 4.5 Résultat Simulation et étude du système | 56 |
| 5 Conclusion | 57 |
| Conclusion Générale | 60 |
| 6 Conclusion général | 60 |
| Bibliographie | 63 |

Table des figures

| | | |
|-----------------|--|----|
| Figure. I.1 : | Premier véhicule électrique | 7 |
| Figure. I.2 : | Véhicule électrique en charge. | 8 |
| Figure. I.3 : | Configuration série dans les véhicules hybrides. | 9 |
| Figure. I.4 : | : Exploration de l'Architecture Hybride Parallèle à Double Arbre dans les Véhicules. | 9 |
| Figure. I.5 : | Exploration de l'Architecture Hybride Parallèle à Double Arbre dans les Véhicules. | 11 |
| Figure. I.6 : | Montage d'un véhicule à pile combustible. | 14 |
| Figure. I.7 : | Montage d'un Véhicule électrique à panneau solaire. | 15 |
| Figure. I.8 : | Structure de système Photo voltaïque dans les véhicules électriques.. | 15 |
| Figure. I.9 : | MCC dans VE. | 19 |
| Figure. I.10 : | Moteurs synchrones à aimants permanents. | 20 |
| Figure. I.11 : | Positionnement Des Moteur dans VE. | 21 |
| Figure. II.1 : | Les composants du système de traction d'un véhicule électrique . . . | 24 |
| Figure. II.2 : | Forces élémentaires agissant sur un véhicule | 26 |
| Figure. II.3 : | Les forces agissant sur le véhicule électrique. | 27 |
| Figure. II.4 : | schéma fonctionnel du MCC | 28 |
| Figure. II.5 : | Modèle Statique du Circuit Équivalent d'une Cellule de Batterie. . . | 29 |
| Figure. II.6 : | Buck-Boost model in two-transfer directions. | 30 |
| Figure. II.7 : | Schéma électrique d'un hacheur à 4 quadrants | 31 |
| Figure. II.8 : | le type de commutation de déclenchement dans tous les quadrants (a) Premier quadrant (b) Deuxième quadrant (c) Troisième quadrant (d) Quatrième quadrant | 32 |
| Figure. II.9 : | Modèle proposé d'un différentiel [1] | 34 |
| Figure. II.10 : | Réglage de la vitesse d'un MCC avec régulation en cascade | 35 |
| Figure. II.11 : | La structure du système simulé | 36 |
| Figure. II.12 : | Résultat de simulation du premier cas | 36 |
| Figure. II.13 : | Résultat de simulation du deuxième cas | 37 |
| Figure. III.1 : | Trajectoire d'un système dans le plan de phase. | 41 |
| Figure. III.2 : | Résultats de simulation utilisant la commande backstepping | 45 |
| Figure. III.3 : | schéma fonctionnel d'assistance automatisé. | 47 |

| | |
|---|----|
| Figure. III.4 : Mouvement du véhicule dans le système d'axe (X,Y) | 48 |
| Figure. III.5 : Forces au niveau des roues du véhicule. | 49 |
| Figure. III.6 : Épure de Jeanteaud. | 53 |
| Figure. III.7 : La boucle de commande. | 55 |
| Figure. III.8 : Position du Véhicule et l'erreur de control | 57 |

Liste des tableaux

Tableau. II.1 : Table de commutation d'un hacheur à 4 quadrants. 32

Nomenclature

| | |
|-------|---|
| VE | Véhicule électrique |
| VEB | Véhicule électrique à batterie |
| HEV | Véhicule électrique hybride |
| VEPV | Véhicule électrique à Photovoltaïque |
| CC | Courant Continu |
| CA | Courant Alternatif |
| DC | Direct current |
| AC | Alternatif current |
| PAC | pile à combustible |
| PEMFC | polymer electrolyte membrane fuel cells |
| MCC | Moteur à courant continu |
| PV | Photovoltaïque |
| PI | Proportionnel et Intégral |
| PEMFC | Proton-exchange membrane fuel cells |
| MLI | Modulation de Largeur d'Impulsion |
| PWM | Pulsed Width Modulation |

| Symbole | description | Unité |
|-----------|---|-------------|
| F_t | Force de traction | N |
| F_{add} | Force d'aérodynamique | N |
| F_{ro} | Force de résistance | N |
| F_{cr} | Force de traction | N |
| F_a | Force d'accélération du véhicule | N |
| C_{em} | Couple électromagnétique | $N.m$ |
| C_r | Couple résistante | $N.m$ |
| C_m | les pertes mécanique | j |
| V_{vhe} | la vitesse du véhicule | m/s |
| m | La masse du véhicule | kg |
| R_m | La constante universelle des gaz parfaits | $J/(mol.k)$ |
| ω | est la vitesse de rotation de l'induit | rpm |
| J | Moment d'inertie | $kg.m^2$ |
| f | Coefficient de frottement visqueux | $N.m.s/rd$ |
| g | l'accélération de pesanteur | m/s^2 |

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1 Introduction générale

Le transport joue un rôle crucial dans le problème de la pollution climatique, notamment avec une augmentation constante des émissions dans le secteur. Pour un avenir durable, une transition vers des sources d'énergie renouvelables est indispensable, surtout dans l'Union européenne où le transport consomme deux tiers du pétrole et produit 28 défis, les véhicules électriques (VE) émergent comme une solution prometteuse pour réduire la dépendance au pétrole et les émissions de carbone. Entre 2012 et 2015, leur adoption a connu une croissance significative, passant de 12 000 à environ 430 000 unités vendues. Motoriser un véhicule électrique peut se faire de plusieurs manières selon les choix du constructeur et le niveau de simplicité mécanique souhaité. Cela inclut l'utilisation d'un seul moteur avec embrayage et boîte de vitesses, plusieurs moteurs entraînant directement les roues ou via un réducteur fixe, et l'intégration des moteurs dans les roues (moteur-roue). Cette dernière option offre une meilleure performance et une conduite plus fluide en supprimant les parties mécaniques de transmission et en permettant le contrôle indépendant de chaque roue motrice. Ce travail explore une solution intermédiaire, motivée par des considérations de réduction de l'encombrement et de robustesse du contrôle de la vitesse. Cette approche implique l'utilisation de deux moteurs à courant continu couplés aux roues arrière, agissant de manière indépendante l'un de l'autre. Cette configuration permet l'élimination de la boîte de vitesses, des différentiels mécaniques et de la colonne de direction. De plus, un dispositif de contrôle spécifique des moteurs électriques sera mis en œuvre pour la conduite du véhicule et pour créer un différentiel de vitesse entre les roues lors des changements de direction. Dans ce cadre, nous examinerons des techniques de commande pour réguler les moteurs à courant continu. Nous commencerons par un contrôleur classique de type PI, puis explorerons une approche de commande non linéaire appelée Backstepping. Nous évaluerons ensuite l'efficacité de ces techniques et comparerons leur robustesse pour choisir la meilleure option à adopter dans notre système. De plus, nous étudierons la commande latérale du véhicule et proposerons une stratégie basée sur la technique de Backstepping pour rendre le véhicule autonome, en améliorant ses performances en termes de sécurité. Pour cela, notre étude a été condensée en trois chapitres distincts. Le premier chapitre traite de manière exhaustive des véhicules électriques (VE). Le deuxième chapitre expose en détail le modèle mathématique du système étudié. Enfin, le troisième chapitre se concentre sur l'étude et la simulation d'une commande

avancée (Backstepping). En conclusion, une synthèse des résultats obtenus est présentée pour clôturer notre travail.

Chapitre

I

INTRODUCTION AUX VÉHICULES ÉLECTRIQUES (VE)

1 Introduction

Les véhicules électriques (VE) représentent une évolution significative dans le domaine de la mobilité durable, offrant une alternative prometteuse aux véhicules conventionnels. Confrontés à une demande croissante pour des performances accrues tout en répondant aux normes environnementales strictes, les constructeurs automobiles se tournent de plus en plus vers cette technologie émergente. Ce chapitre vise à fournir un aperçu général et des définitions clés utilisées dans le domaine des véhicules électriques, en commençant par un état de l'art succinct. Les VE se déclinent principalement en trois catégories : les véhicules à batterie, les véhicules hybrides et ceux à pile à combustible. Chacune de ces technologies présente ses propres avantages et défis, influençant le choix des motorisations telles que les moteurs à courant continu, à courant alternatif et synchrones à aimants permanents. Ce choix crucial dépend des besoins spécifiques en puissance, autonomie et budget du véhicule. Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les VE sont confrontés à des limitations telles qu'une autonomie parfois restreinte, des temps de recharge prolongés et un coût initial relativement élevé. Ces défis soulignent la nécessité d'innovations continues et d'améliorations technologiques pour rendre les VE plus compétitifs sur le marché automobile mondial. Ce chapitre s'attache ainsi à explorer les progrès récents et les développements clés dans le domaine des VE, tout en examinant de près les défis persistants et les opportunités d'amélioration future. À travers cette étude, nous visons à approfondir la compréhension des implications technologiques et environnementales des véhicules électriques dans le paysage automobile contemporain [2].

2 Historique des véhicules électriques :

L'histoire des véhicules électriques est marquée par une évolution fascinante et souvent méconnue, remontant aux premières décennies de l'ère automobile. À leurs débuts dans les années 1830, les voitures électriques figuraient parmi les premiers modèles sur les routes, avant même la popularité des véhicules à essence à la fin du 19^{ème} siècle (dans la figure (I.1)). Les premiers prototypes de véhicules électriques à batteries ont été réalisés dès 1880 par des pionniers tels que Charles Jeantaud, Camille Faure, Gustave Trouvé et Nicolas Raffard . Cependant, c'est en 1899 que la technologie électrique a captivé le monde avec la « Jamais Contente », pilotée par C. Jenatzy, devenant ainsi la première voiture à dépasser les 100km/h,

une prouesse impressionnante pour l'époque [2, 3]. Avant la Première Guerre mondiale, les taxis électriques étaient courants à Paris et à Londres, représentant même un tiers du parc automobile aux États-Unis. Louées pour leur écologie, leurs performances supérieures et leur silence de fonctionnement par rapport aux véhicules à essence, les voitures électriques semblaient avoir un avenir prometteur. Cependant, l'avènement des moteurs à essence au début du 20^{ème} siècle a graduellement éclipsé leur popularité [4]. Les véhicules électriques de l'époque souffraient de limitations telles qu'une faible autonomie, une vitesse limitée, et des coûts de production élevés comparés aux modèles Ford à essence qui gagnaient en popularité. Au cours des dernières décennies, le développement des véhicules électriques a connu un renouveau significatif, stimulé par la montée des prix du pétrole et la prise de conscience croissante des problèmes environnementaux liés aux émissions des moteurs à combustion [3]. Des avancées majeures ont été réalisées, notamment dans le domaine du stockage d'énergie avec l'introduction commerciale des batteries au lithium-ion. Aujourd'hui, les véhicules électriques apparaissent comme une solution prometteuse pour réduire la congestion et la pollution dans les centres urbains, offrant une alternative propre et silencieuse à leurs homologues à essence. Ce chapitre explore l'évolution historique des véhicules électriques, mettant en lumière les défis passés et les innovations récentes qui façonnent l'avenir de la mobilité durable.



Fig. I.1 Premier véhicule électrique .

3 Définition de Véhicule électrique :

Véhicule électrique est un véhicule qui dispose d'une chaîne de traction électrique, c'est-à-dire d'un système consistant en un ou plusieurs dispositifs de stockage de l'énergie électrique

(une batterie, un volant d'inertie électromécanique ou un super condensateur, par exemple), un ou plusieurs dispositifs de conditionnement de l'énergie électrique et une ou plusieurs machines électriques conçues pour transformer l'énergie électrique stockée en énergie mécanique qui est transmise aux roues pour faire avancer le véhicule (voir figure (I.2)) [4, 5].



Fig. I.2 Véhicule électrique en charge.

4 Les types des véhicules électriques :

Les véhicules utilisant l'électricité pour se déplacer sont souvent regroupés sous le terme "véhicules électriques". Cependant, cette désignation englobe plusieurs types de véhicules aux caractéristiques distinctes. Par exemple :

- Véhicules hybrides (HEV)
- Véhicules entièrement électriques (VE)

4.1 Le véhicule hybride :

Les véhicules hybrides sont regroupés en trois principales catégories selon leur architecture de chaîne de traction : série, parallèle et combinée. Chacune de ces configurations offre des caractéristiques distinctes qui influencent leur fonctionnement et leurs performances.

4.2 Hybride série :

L'architecture série se distingue par l'utilisation exclusive du moteur électrique pour la propulsion. Dans ce système, le moteur thermique ne propulse pas directement les roues, mais il peut alimenter le moteur électrique ou recharger les batteries via une génératrice (figure (I.3)) [6]. Ce mode de fonctionnement permet au moteur thermique de maintenir une

efficacité optimale tout en réduisant les émissions en milieu urbain. De plus, grâce à la gestion efficace de l'énergie, cette configuration peut offrir une amélioration notable de l'efficacité énergétique, réduisant la consommation de carburant de 15 à 30% selon les études récentes [? 6].

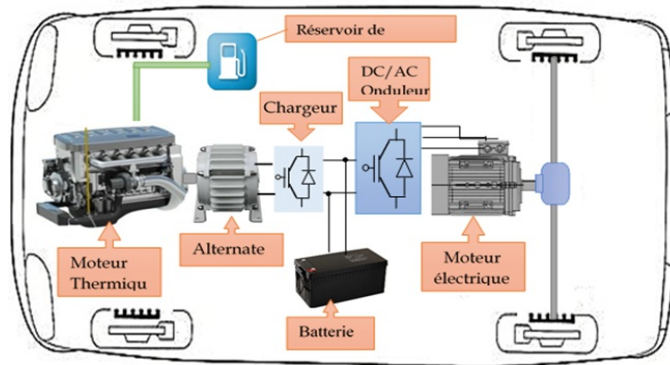


Fig. I.3 Configuration série dans les véhicules hybrides.

4.3 Hybride parallèle :

Dans ce type d'hybridation, le moteur thermique est principalement utilisé pour déplacer le véhicule. Dans cette architecture, les sources d'énergie primaire (le réservoir de carburant) et secondaire (la batterie) sont directement connectées aux deux moteurs du véhicule [3].

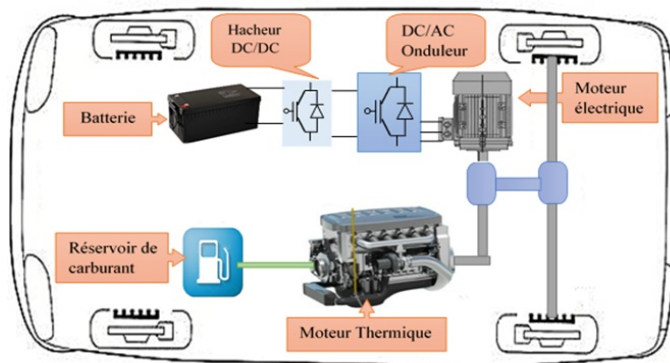


Fig. I.4 : Exploration de l'Architecture Hybride Parallèle à Double Arbre dans les Véhicules.

4.4 Architecture combinée :

L'architecture combinée, appelée aussi architectures hybrides combinent à la fois les moteurs thermiques et électriques pour intégrer les avantages de l'hybride série et parallèle

sur un même véhicule. En multipliant les voies d'énergie disponibles, ces architectures visent à maximiser les gains d'efficacité énergétique, mais elles complexifient également les interactions entre les composants et augmentent le nombre de pièces nécessaires. La Toyota Prius est un exemple emblématique de cette approche, fusionnant les architectures série et parallèle au sein d'un même modèle pour une intégration complexe mais cohérente [3]. Ces véhicules offrent une autonomie autonome sans nécessiter d'infrastructure spécifique pour la recharge des batteries, réduisant ainsi de manière significative les émissions de polluants et la consommation de carburant. Parmi les avantages de cette conception, on compte un rendement énergétique élevé, une gestion efficace de l'énergie et une grande flexibilité opérationnelle avec tous les modes disponibles (thermique, électrique, série, parallèle ou série-parallèle), sans rupture de couple aux roues. Cependant, ces configurations présentent également des inconvénients notables tels que l'utilisation de trois machines ou de deux machines avec deux embrayages, un couplage complexe et une gestion délicate. De plus, elles requièrent au moins deux machines électriques en plus du moteur thermique, ce qui augmente à la fois les coûts et le poids du véhicul

4.5 Véhicules entièrement électriques (VE)

Le développement des véhicules électriques est étroitement lié à l'évolution de leurs sources d'alimentation en énergie [7]. Selon la source d'énergie utilisée pour alimenter ces véhicules, on distingue essentiellement plusieurs types de véhicules électriques : les voitures électriques à batteries rechargeables par prise de courant, les voitures électriques à alimentation par pile à combustible, les véhicules à supercondensateurs et les véhicules à panneaux photovoltaïques (PV). Il peut également s'agir de véhicules hybrides combinant plusieurs de ces sources d'énergie. Ces véhicules diffèrent en termes de composition et d'architecture.

4.5.1 Les Véhicules Électriques à Batterie :

Les Véhicules Électriques à Batterie (VEB) utilisent exclusivement l'énergie stockée dans une batterie rechargeable de grande capacité, alimentée par le réseau électrique [8]. Ils offrent généralement une autonomie variant entre 100et400km, en fonction de la taille de la batterie. Le temps nécessaire pour recharger un VEB dépend également de la capacité de la batterie et de l'utilisation éventuelle d'une borne de recharge rapide. Ce temps de recharge est influencé par des facteurs tels que la température ambiante et le niveau d'autonomie restant au moment

de la recharge [9].

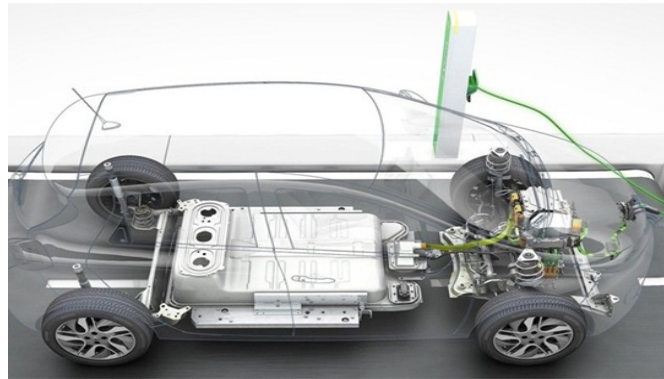


Fig. I.5 *Exploration de l'Architecture Hybride Parallèle à Double Arbre dans les Véhicules.*

a). Les types de batteries pour véhicules électriques

Dans le domaine des véhicules électriques, le terme « batterie » désigne généralement un ensemble de cellules connectées en série pour fournir l'énergie nécessaire au véhicule. Ces batteries utilisent des principes d'accumulation électrochimique, où des réactions aux électrodes convertissent l'énergie électrique en réactions chimiques réversibles. Une caractéristique clé des accumulateurs électrochimiques est leur capacité à maintenir une tension relativement constante indépendamment de leur niveau de charge. Chaque cellule individuelle produit typiquement quelques volts. Pour obtenir des tensions plus élevées telles que 12 V, 24 V, 48 V et au-delà, plusieurs cellules identiques sont connectées en série à l'intérieur de la batterie [9, 10].

Les types de batteries pour véhicules électriques varient en termes de technologie, de puissance, et de capacité, chacune ayant ses avantages et limites propres en fonction des besoins spécifiques en autonomie et en performances du véhicule.

Les premiers accumulateurs ont été développés en étudiant les réactions électrochimiques du couple plomb/acide. Les batteries plomb/acide se distinguent par leur simplicité, leur coût relativement bas, et leur capacité à délivrer des courants élevés, ce qui les rend adaptées aux applications de démarrage de véhicules. Cependant, elles sont moins performantes pour propulser des véhicules électriques en raison de leur poids élevé, de leur recharge lente, et de leur sensibilité aux décharges profondes qui réduisent leur durée de vie.

D'autres couples électrochimiques ont été développés pour élargir la gamme des accu-

mulateurs, particulièrement pour les applications de traction dans les transports. Parmi les principaux couples utilisés, on trouve [11] :

- le nickel/cadmium (Ni-Cd),
- le nickel/métal hydrure (Ni-MH),
- le nickel/zinc (Ni-Zn),
- le sodium/chlorure de nickel (Zebra),
- le lithium/ion (Li-Ion),
- le lithium/polymère (Li-Po),
- le lithium/phosphate (LiFePO4),
- le lithium/métal,
- polymère (LMP).

Chaque type de batterie présente ses caractéristiques propres en termes de densité énergétique, de sécurité, de coût et de durabilité, influençant directement les performances et l'efficacité des véhicules électriques.

a.1). Paramètres principaux de la batterie : Les principaux paramètres d'une batterie incluent [12] :

- **Capacité :** Mesure de la quantité d'énergie que la batterie peut stocker, généralement exprimée en ampères-heures (Ah) ou en kilowattheures (kWh).
- **Tension :** La force électromotrice fournie par la batterie, exprimée en volts (V). Les batteries peuvent avoir différentes configurations de tension en fonction du nombre de cellules connectées en série.
- **Densité d'énergie :** Quantité d'énergie stockée par unité de volume (Wh/L) ou par unité de masse (Wh/kg). Cela détermine la compacité et le poids de la batterie.
- **Cycle de vie :** Nombre de cycles de charge et de décharge complets que la batterie peut supporter avant que ses performances ne commencent à décliner significativement.
- **Taux de décharge :** Vitesse à laquelle la batterie peut délivrer son énergie, généralement exprimée en C (multiples de la capacité nominale).
- **Temps de recharge :** Temps nécessaire pour recharger complètement la batterie, influencé par la capacité de charge (exprimée en kW), et souvent divisé en temps de charge standard et de charge rapide.

- **Température de fonctionnement** : La plage de température dans laquelle une batterie peut fonctionner efficacement sans risque de dommages. Les batteries peuvent être sensibles aux températures extrêmes et leur performance peut être affectée par des températures trop élevées ou trop basses.
- **Sécurité** : Mesures de sécurité intégrées pour prévenir la surchauffe, les courts-circuits et d'autres situations dangereuses.

4.5.2 Les véhicules électriques à pile à combustible (PAC)

Les voitures électriques à alimentation par pile à combustible (PAC) utilisent une technologie avancée de pile à combustible pour produire de l'électricité à bord du véhicule. Cette technologie repose sur une réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène (généralement de l'air) pour générer de l'électricité, produisant de l'eau comme seul sous-produit. Les PAC, souvent équipées de membranes d'échange de protons (PEMFC) ou de technologies à oxyde solide (SOFC), offrent une autonomie comparable à celle des véhicules à batterie, souvent supérieure à 500 km avec un seul plein d'hydrogène, selon le modèle et la capacité du réservoir (voir figure I.6) [13]. Le temps de ravitaillement en hydrogène est rapide, prenant seulement quelques minutes, ce qui équivaut au temps de remplissage d'un réservoir d'essence et offre une alternative pratique au rechargement des batteries. Bien que les PAC émettent de l'eau et non de CO₂ lorsqu'elles utilisent de l'hydrogène produit à partir de sources renouvelables, leur adoption est limitée par la disponibilité encore restreinte de l'hydrogène vert et par l'infrastructure de ravitaillement en cours d'expansion [3, 10]. Ces véhicules représentent une solution prometteuse pour réduire les émissions globales tout en offrant une autonomie étendue et des temps de recharge rapides, sous réserve de surmonter les défis liés à l'infrastructure et à la production durable d'hydrogène.

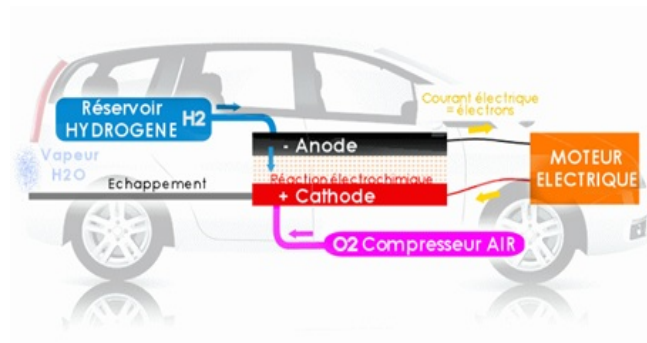


Fig. I.6 Montage d'un véhicule à pile combustible.

4.5.3 Véhicule électrique à panneau solaire (Photovoltaïque) (VEPV) :

Le véhicule électrique à panneau solaire photovoltaïque est une technologie innovante qui permet de conduire des véhicules électriques sans émissions de CO₂. Ces véhicules intègrent des panneaux solaires sur leur surface, permettant de convertir l'énergie solaire en électricité pour alimenter le moteur électrique ou recharger la batterie. Grâce à cette source d'énergie renouvelable, les véhicules peuvent réduire leur dépendance aux sources d'énergie traditionnelles et diminuer leur empreinte carbone [14]. Cette technologie offre une solution écologique en utilisant l'énergie solaire pour une conduite plus propre et durable .

La figure (I.7) illustre le principe de fonctionnement d'un véhicule électrique à panneau solaire. Les panneaux solaires, habituellement installés sur le toit du véhicule, captent la lumière solaire et la transforment en électricité grâce à des cellules photovoltaïques. Cette électricité est ensuite utilisée pour recharger la batterie du véhicule, ce qui augmente son autonomie électrique et réduit la nécessité de se connecter à une prise de courant externe pour la recharge.



Fig. I.7 Montage d'un Véhicule électrique à panneau solaire.

Les panneaux solaires, généralement montés sur le toit du véhicule, captent la lumière solaire et la convertissent en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Les avancées dans la motorisation électrique et les technologies photovoltaïques progressent graduellement. Toutefois, les panneaux solaires intégrés pour recharger une voiture électrique demeurent une solution innovante d'appoint. Avec une surface totale de 5 m² de panneaux solaires répartis sur le véhicule, il est possible de recharger suffisamment pour parcourir plus de 10 km par jour. Cette capacité est adéquate pour les petits déplacements lors des journées ensoleillées, mais ne suffit pas encore pour couvrir tous nos déplacements tout au long de l'année [15].

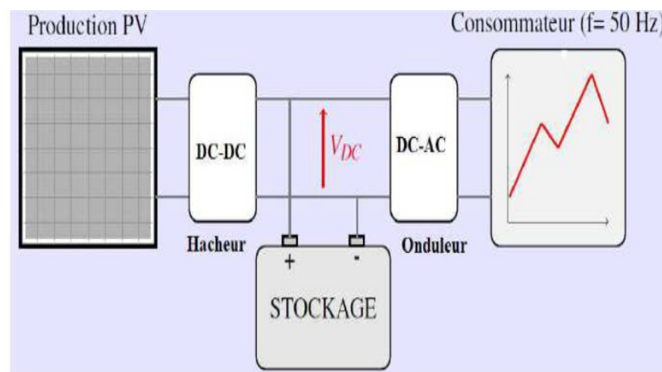


Fig. I.8 Structure de système Photo voltaïque dans les véhicules électriques..

Les avantages et les défit de PV (panneau Photovoltaïque) Les avantages :

Avantages :

Énergie Renouvelable : Les PV utilisent l'énergie solaire, une ressource renouvelable abondante et gratuite.

Zéro Émissions : Ils ne produisent aucune émission de gaz à effet de serre ni de polluants

lors de leur fonctionnement [16].

Réduction des Coûts à Long Terme : Une fois installés, les PV nécessitent peu d'entretien et peuvent réduire les coûts d'électricité à long terme [16].

Flexibilité d'Installation : Ils peuvent être installés sur divers types de surfaces, comme les toits, les façades et même les surfaces au sol, adaptés à différents environnements.

Indépendance Énergétique : Ils permettent aux utilisateurs de produire leur propre électricité, réduisant ainsi leur dépendance aux fournisseurs d'énergie.

Défis :

Coûts Initiaux Élevés : L'installation de systèmes PV peut être coûteuse, bien que les coûts aient diminué ces dernières années.

Dépendance à la Lumière Solaire : La production d'électricité des PV dépend directement de l'exposition au soleil, ce qui peut varier selon les conditions météorologiques et la localisation géographique.

Stockage de l'Énergie : Pour une utilisation constante, l'énergie solaire doit souvent être stockée dans des batteries ou injectée dans le réseau électrique, ce qui implique des coûts et des technologies supplémentaires.

Impact Environnemental de la Production : Bien que les PV soient propres pendant leur utilisation, leur fabrication peut nécessiter des ressources et générer des impacts environnementaux lors de la production des matériaux et des composants.

Durée de Vie et Recyclage : La durabilité et le recyclage des panneaux PV sont des aspects importants à considérer pour réduire leur impact environnemental total sur leur cycle de vie.

4.5.4 Les véhicules électriques à supercondensateur

Les véhicules électriques (VE) à supercondensateur constituent une nouvelle approche prometteuse dans le domaine de la propulsion électrique. Les supercondensateurs, également connus sous le nom de condensateurs à double couche électrique (EDLC), se distinguent par leur capacité à stocker et à libérer rapidement de grandes quantités d'énergie électrique. Cette caractéristique les rend particulièrement efficaces pour le captage de l'énergie lors des freinages régénératifs et leur utilisation lors d'accélération rapides [17].

Comparés aux batteries traditionnelles, les supercondensateurs offrent plusieurs avantages significatifs. Ils sont capables de supporter un nombre élevé de cycles de charge et de décharge

sans subir de dégradation notable, ce qui prolonge leur durée de vie utile. De plus, leur efficacité n'est pas affectée par les températures extrêmement basses, ce qui les rend adaptés aux conditions climatiques difficiles. La simplicité de leur conception et leur fiabilité élevée sont également des atouts, nécessitant moins d'entretien par rapport aux systèmes de batterie complexes [17].

Toutefois, malgré ces avantages, les supercondensateurs présentent des limitations en termes de densité énergétique. Leur capacité de stockage d'énergie est inférieure à celle des batteries, ce qui les rend moins adaptés pour le stockage à long terme. Pour cette raison, ils sont souvent utilisés en complément des batteries dans les véhicules hybrides ou à double stockage d'énergie. Cette combinaison permet d'optimiser l'utilisation des deux technologies, en exploitant les avantages de chaque système pour répondre aux besoins spécifiques de puissance et d'autonomie des véhicules électriques modernes [18].

4.6 Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des composants essentiels de l'électronique de puissance, facilitant la conversion efficace et contrôlée de l'énergie électrique entre différentes formes. Ils incluent des dispositifs tels que les hacheurs (DC-DC), les onduleurs (DC-AC) et les redresseurs (AC/DC), qui reposent sur des composants comme des transistors, des diodes, des condensateurs et des inductances. Ces éléments jouent un rôle crucial dans la régulation précise de la tension, du courant et de la fréquence électrique, adaptant ainsi l'énergie aux exigences spécifiques des systèmes électriques [19].

Dans le domaine des véhicules électriques, les convertisseurs statiques sont utilisés pour alimenter les moteurs électriques à partir des batteries, recharger ces dernières à partir de sources externes comme les bornes de recharge, et fournir une alimentation stable aux systèmes auxiliaires du véhicule. Cette technologie continue de progresser pour améliorer l'efficacité énergétique, réduire les pertes d'énergie et répondre aux besoins croissants de la mobilité électrique durable. Son évolution vise à optimiser l'intégration des sources d'énergie renouvelables et à renforcer la fiabilité des systèmes électriques des véhicules électriques modernes [20].

4.7 Les moteurs dans les véhicules électriques :

Le moteur électrique d'entraînement est un dispositif essentiel utilisé pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique afin de propulser divers équipements industriels et systèmes.

Les types les plus courants de moteurs électriques d'entraînement incluent les moteurs à courant continu, les moteurs synchrones et asynchrones. Les moteurs à courant continu sont privilégiés pour leur capacité à fournir un contrôle précis de la vitesse et du couple, ce qui les rend adaptés aux applications nécessitant une performance dynamique. En revanche, les moteurs à induction (asynchrones) sont souvent utilisés pour des charges à vitesse variable en raison de leur robustesse et de leur efficacité énergétique. Les moteurs synchrones trouvent leur application dans des environnements nécessitant une vitesse constante et une haute précision.

Dans le contexte des véhicules électriques (VE), ces moteurs jouent un rôle crucial pour la propulsion des roues, offrant une conduite silencieuse et une accélération instantanée. L'évolution technologique continue à améliorer leur efficacité énergétique, leur fiabilité et leur performance globale, contribuant ainsi à la transition vers une mobilité électrique durable.

a). Les moteurs à courant continu (DC) Les moteurs à courant continu (DC) sont essentiels dans le domaine des véhicules électriques (VE), où ils sont largement utilisés pour assurer la propulsion efficace et répondre aux besoins spécifiques de performance. Ces moteurs fonctionnent en convertissant l'énergie électrique en mouvement mécanique grâce à l'interaction entre un champ magnétique rotatif et des bobines de fil de cuivre alimentées par courant continu [3].

Dans les VE, les moteurs à courant continu sont particulièrement appréciés pour plusieurs raisons. Tout d'abord, ils offrent un couple élevé dès les basses vitesses, ce qui est crucial pour assurer une accélération rapide et une conduite fluide. Cette caractéristique est essentielle pour améliorer l'expérience de conduite tout en optimisant l'efficacité énergétique du véhicule. De plus, ces moteurs permettent un contrôle précis de la vitesse et une réponse rapide aux variations de charge, ce qui est avantageux dans les conditions de circulation urbaine et périurbaine.

Les applications des moteurs à courant continu dans les VE vont au-delà de la simple propulsion. Ils sont également utilisés pour alimenter divers systèmes auxiliaires tels que les

pompes hydrauliques, les compresseurs d'air conditionné et les systèmes de direction assistée électrique. Grâce à leur conception robuste et à leur capacité à fonctionner efficacement sur une large gamme de tensions, ces moteurs contribuent à optimiser la performance globale du véhicule tout en réduisant son empreinte carbone.

Dans les véhicules électriques (VE), plusieurs types de moteurs à courant continu (DC) peuvent être utilisés en fonction des besoins spécifiques de performance et d'efficacité. Voici les principaux types de moteurs à courant continu que l'on retrouve dans les VE :

A). Moteurs à Courant Continu Sans Balais (Brushless DC Motors) :

Aussi connus sous le nom de moteurs BLDC, ces moteurs éliminent les balais traditionnels pour réduire l'usure mécanique et augmenter l'efficacité. Ils offrent un rapport puissance/poids élevé, une faible maintenance et une longue durée de vie, ce qui en fait un choix populaire pour les véhicules électriques modernes.



Fig. 1.9 MCC dans VE.

B).Moteurs à Courant Continu à Balais (Brushed DC Motors) :

Ces moteurs utilisent des balais pour commuter le courant dans le rotor, provoquant ainsi la rotation. Bien que moins efficaces que les moteurs sans balais, ils sont encore utilisés dans certaines applications de VE en raison de leur coût plus bas et de leur simplicité de conception.

C).Moteurs à Courant Continu à Excitation Série (Series DC Motors) :

Ces moteurs sont caractérisés par leur structure où le stator et le rotor sont connectés en série. Ils offrent un couple élevé à basse vitesse, ce qui les rend adaptés pour les applications nécessitant une forte puissance de démarrage, comme les véhicules de transport lourd.

D).Moteurs à Courant Continu à Excitation Parallèle (Shunt DC Motors) :

Dans ces moteurs, le stator et le rotor sont connectés en parallèle. Ils offrent une vitesse

plus constante et sont souvent utilisés dans les applications où la vitesse de rotation doit être maintenue de manière plus précise.

Chacun de ces types de moteurs à courant continu présente des caractéristiques spécifiques qui les rendent adaptés à différentes applications dans les véhicules électriques, en fonction des exigences de performance, d'efficacité énergétique et de contrôle de vitesse.

b). Les moteurs à courant alternatif (AC) Les véhicules électriques (VE) utilisent divers types de moteurs à courant alternatif (AC) pour leur propulsion, chaque type offrant des caractéristiques spécifiques adaptées aux besoins variés en matière de performance et d'efficacité énergétique.

Les moteurs asynchrones (à induction) sont largement répandus en raison de leur fiabilité et de leur coût modéré. Ils sont utilisés par des marques telles que Tesla, qui les intègre dans des modèles comme le Tesla Model S et le Tesla Model 3, offrant une efficacité énergétique élevée et une adaptabilité aux vitesses variables [21].

Les moteurs synchrones, utilisés par des fabricants comme BMW dans la BMW i3 et la BMW i8, offrent une vitesse constante et une précision accrue, idéales pour les véhicules de luxe [3].

Les moteurs à aimants permanents, tels que ceux présents dans la Nissan Leaf, optimisent l'efficacité et réduisent la taille du moteur grâce à leur conception compacte et à leur haute densité de puissance [3, 21].

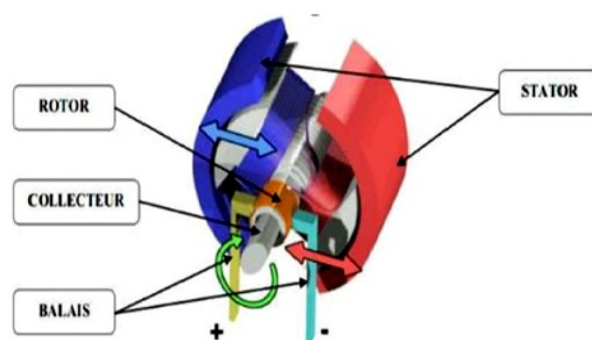


Fig. I.10 Moteurs synchrones à aimants permanents.

Enfin, **les moteurs à relutance variable**, comme ceux utilisés par Renault dans la Renault Zoe, permettent une meilleure efficacité à différentes vitesses de rotation, répondant aux exigences variées des conducteurs de VE modernes. Chaque type de moteur AC est

choisi en fonction des performances spécifiques requises, contribuant ainsi à la diversité technologique et à l'évolution continue des véhicules électriques.

4.8 Positionnement des Moteurs Électriques dans les VE

Les moteurs électriques dans les véhicules électriques (VE) sont positionnés de manière variée en fonction de l'architecture spécifique du véhicule, ce qui influe directement sur leurs performances et leur efficacité. Une configuration courante est celle avec **les moteurs montés sur l'essieu avant, où le moteur est placé près de l'essieu avant du véhicule**. Cette disposition aide à améliorer la répartition du poids, contribuant ainsi à une meilleure tenue de route et à une stabilité accrue, typiquement utilisée dans les véhicules à propulsion avant comme la Nissan Leaf [22].

D'autre part, **les moteurs montés sur l'essieu arrière sont positionnés près de l'essieu arrière du véhicule**, favorisant une meilleure traction, particulièrement dans des conditions de conduite difficiles telles que sur la neige ou la glace. Cette configuration est fréquemment adoptée dans les véhicules à propulsion arrière ou dans certains modèles à transmission intégrale, comme on le retrouve dans la Tesla Model S .



Fig. I.11 *Positionnement Des Moteur dans VE.*

Une autre approche innovante est celle des moteurs dans les moyeux de roue (Wheel Hub Motors), où **les moteurs électriques sont intégrés directement dans les moyeux des roues**. Cette conception simplifie le groupe motopropulseur en éliminant la nécessité de transmission, réduisant ainsi les pertes d'énergie et permettant un contrôle indépendant de chaque roue. Cette technologie est souvent explorée dans des prototypes expérimentaux et des véhicules conceptuels pour améliorer la maniabilité et l'efficacité énergétique [23].

Enfin, les configurations multi-moteurs, telles que celles utilisées par Tesla avec leurs modèles Dual Motor et Tri Motor, exploitent plusieurs **moteurs pour optimiser les performances globales du véhicule**. Cela permet une traction maximale, une accélération rapide et une meilleure adaptation aux différentes conditions de conduite. Chaque disposition est soigneusement choisie pour répondre aux exigences spécifiques en matière de performance, d'efficacité énergétique et de dynamique de conduite, contribuant ainsi à l'évolution continue des véhicules électriques vers une mobilité plus durable et efficace.

5 CONCLUSION

En conclusion, les véhicules électriques offrent une alternative prometteuse aux véhicules conventionnels, répondant aux exigences croissantes des utilisateurs en matière de performances et d'efficacité énergétique, ainsi qu'aux normes environnementales strictes visant à réduire les émissions polluantes. Classés en trois catégories principales les véhicules électriques à batterie, les véhicules hybrides et les véhicules à pile à combustible ces véhicules utilisent différents types de moteurs électriques, tels que les moteurs à courant continu, les moteurs à courant alternatif et les moteurs synchrones à aimants permanents, en fonction des besoins spécifiques du véhicule. Cependant, malgré leurs avantages, les véhicules électriques présentent encore des limitations telles qu'une autonomie limitée, des temps de recharge prolongés et des coûts initiaux plus élevés. Il reste donc des défis à relever pour rendre les véhicules électriques encore plus compétitifs sur le marché automobile, notamment en améliorant la technologie des batteries, en développant des infrastructures de recharge plus efficaces et en réduisant les coûts de production.

Chapitre



MODÉLISATION D'UN VÉHI- CULE ÉLECTRIQUE

1 Introduction

La modélisation des véhicules électriques joue un rôle crucial dans la compréhension, la conception et l'amélioration des performances de ces véhicules. Les véhicules électriques (VE) sont devenus une option prometteuse en raison de l'augmentation de la demande pour des solutions de transport plus durables et de la pression croissante pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le but de ce chapitre est de représenter les véhicules électriques à la fois de manière électrique et dynamique, ainsi que de représenter une partie de leurs composantes telles que la batterie, la machine à courant continu et les convertisseurs statiques. De plus, nous avons inclus la commande traditionnelle par PI d'un véhicule électrique.

2 Modélisation de véhicule électrique

La figure (II.1) illustre La chaine de traction d'un véhicule électrique basé sur un système d'entraînement électrique. L'objectif ultime de l'approche proposée est de contrôler la vitesse à l'aide de la technique classique PI et de la commande avancée Backstepping, en utilisant un convertisseur DC-DC à quatre quadrants. Les composants du système de traction électrique comprennent une source de tension continue alimentée par une batterie, un convertisseur DC-DC bidirectionnel de type Buck-Boost, un convertisseur DC-DC à quatre quadrants, et deux moteurs à courant continu (DC) situés à l'arrière du véhicule électrique, attachés aux deux roues.

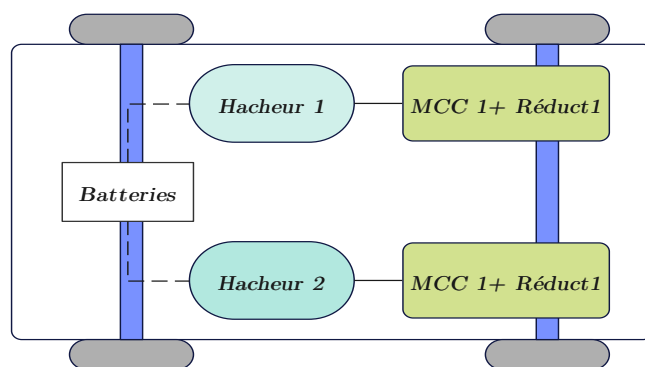


Fig. II.1 Les composants du système de traction d'un véhicule électrique .

Après avoir cité les différentes parties constituant un véhicule électrique, une modélisation détaillée de chaque élément sera présentée :

2.1 Modèle mécanique d'un véhicule

Le modèle mécanique présenté dans cette section déduit le couple et la force motrice nécessaire au fonctionnement du véhicule (Figure II.2). Le système de propulsion doit fournir un effort de traction au niveau de la roue égale à la somme des forces pour surmonter la traînée aérodynamique, la résistance au roulement et l'inclinaison de la route. Il doit également fournir l'effort nécessaire à l'accélération du véhicule. La force nécessaire à la traction du véhicule au niveau des roues est définie à partir des équations (II.1) à (II.5) [3] :

$$F_t = F_{ro} + F_{add} + F_{cr} + F_a \quad (\text{II.1})$$

$$F_{add} = \frac{1}{2} \rho C_d A_f (v + v_0)^2 \quad (\text{II.2})$$

$$F_{ro} = \mu mg \cos \alpha \quad (\text{II.3})$$

$$F_{cr} = \pm mg \sin \alpha \quad (\text{II.4})$$

$$F_a = k_m m \frac{d(v + v_0)}{dt} \quad (\text{II.5})$$

F_{add} : est la force aérodynamique ou la résistance visqueuse de l'air agissant sur le véhicule.

avec :

A_f : est la surface frontale,

ρ : est la masse volumique dont la valeur est de $1,225 \text{ kg/m}^3$,

C_d : est le coefficient de frottement de l'air.

F_{ro} la force de résistance au roulement produite par l'aplatissement du pneu au niveau de la surface de contact avec la chaussée.

où :

μ : est dépend de manière non-linéaire de la vitesse du véhicule, du type de la pression des pneus. et des caractéristiques du revêtement. IL augmente avec la vitesse du véhicule et également lors des manœuvres en virage,

m : est la masse de VE,

g : est l'accélération de la pesanteur dont la valeur est de $9,807 \text{ m/s}^2$,

F_{cr} : est la force due à l'inclinaison,

F_{cr} : est la résistance à la montée (son signe opérationnel est positif) et la force de rétrogradation (son signe opérationnel négatif),

avec :

α : est l'angle d'inclinaison du véhicule avec l'horizontal

F_α : est la force pour l'accélération du véhicule,

où :

v : est la vitesse du véhicule,

v_0 : est la vitesse du vent de face (négative en cas de vent arrière)

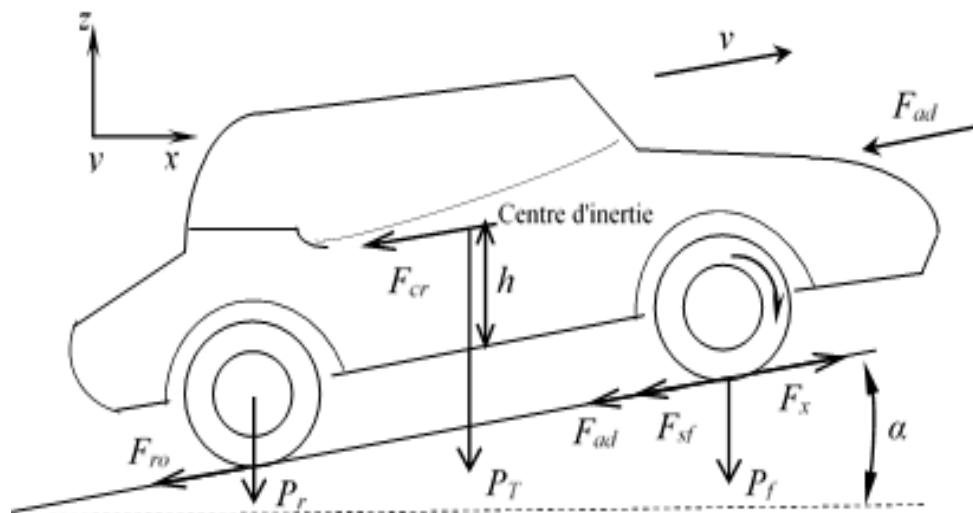


Fig. II.2 Forces élémentaires agissant sur un véhicule

La puissance requise pour conduire un véhicule doit compenser la charge de la route :

$$P_v = vF_t \quad (\text{II.6})$$

L'équation mécanique (dans le référentiel moteur) utilisée pour décrire chaque entraînement de roue est exprimée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - C_m \quad (\text{II.7})$$

Cette équation fait déjà intervenir l'accélération de la machine (et donc du véhicule),

avec :

J moment d'inertie, Ω Vitesse de rotation, C_{em} couple électromécanique, C_r est le couple résistant et C_m les pertes mécaniques dans la machine.

L'expression suivante représente le couple résistant appliqué à la machine dans le cas d'un réducteur sans perte :

$$(C_r)_{machine} = \frac{(C_r)_{roue}}{G} \quad (\text{II.8})$$

Le couple de charge dans le référentiel moteur est donné par :

$$C_{ch} = \frac{R_r}{G} F_t \quad (\text{II.9})$$

Où : C_r rayon de la roue et G rapport de réduction. La vitesse angulaire $\omega(\text{rad/s})$ est liée à la vitesse du véhicule $V_{veh}(\text{m/s})$ par la relation :

$$\Omega = \frac{V_{veh}}{R_r} \quad (\text{II.10})$$

Si le coefficient d'adhérence de la chaussée est élevé, il est généralement faible et peut être négligé.

2.2 Modélisation du Moteur à Courant Continu à Aimant Permanent (PMDC) :

Les moteurs à courant continu à aimant permanent (PMDC) sont largement utilisés dans les véhicules électriques en raison de leur efficacité, de leur robustesse et de leur capacité à offrir un contrôle précis de la vitesse et du couple. Le modèle du PMDC intègre les dynamiques électriques et mécaniques pour simuler fidèlement la conversion de l'énergie électrique en mouvement.

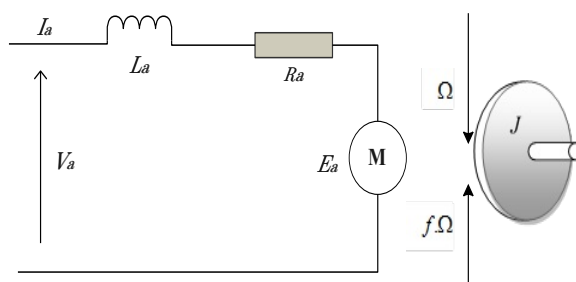


Fig. II.3 Les forces agissant sur le véhicule électrique. .

- Selon la (figure(II.3)), un moteur électrique à courant continu est régi par les équations physiques découlant de ses caractéristiques électriques, mécaniques et magnétiques.
- D'après la loi de Newton, combiné à des lois de Kirchhoff, On peut écrire les équations différentielles de premiers ordres [24] suivantes :

$$V_a(t) = R_a I_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_a \quad (\text{II.11})$$

- ou :
- V_a : Tension d'armature
 - R_a : Résistance d'armature
 - I_a : Courant d'armature
 - L_a : Inductance d'armature
 - E_a : Force électromotrice (fem) induite

$$E_a = k_e \Omega(t) \quad (\text{II.12})$$

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

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_{ch} - f\Omega \quad (\text{II.13})$$

- J : Moment d'inertie du rotor
- C_{em} : Couple électromagnétique
- C_{ch} : Couple de charge
- f : Coefficient de frottement visqueux
- Ω : Vitesse angulaire du moteur

$$C_{em} = k\phi_e I_a \quad (\text{II.14})$$

avec $\frac{d\theta}{dt} = \Omega$

En appliquant la transformée de Laplace aux équations différentielles précédentes, nous avons tracé le schéma fonctionnel du moteur à courant continu (MCC) [25], comme dans la figure(II.4) .

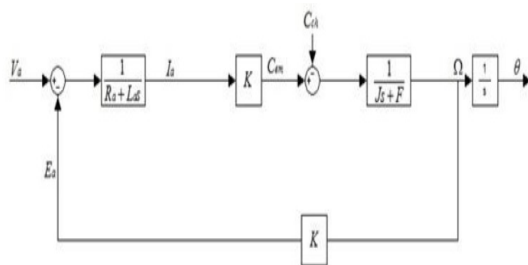


Fig. II.4 schéma fonctionnel du MCC . .

2.3 Modélisation de la batterie

Dans notre étude, la batterie est modélisée comme un générateur de tension parfait en série avec la résistance interne de la batterie [3, 25], comme illustré à la figure (II.5).

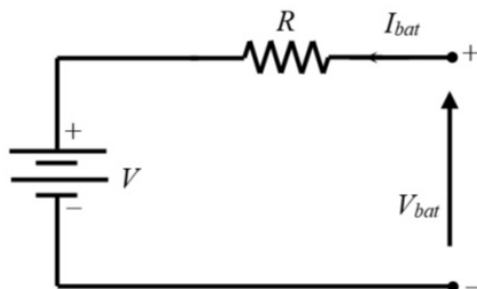


Fig. II.5 Modèle Statique du Circuit Équivalent d'une Cellule de Batterie. .

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

$$V_{bat} = E_{bat} - R_{bat} * I_{bat} \quad (II.15)$$

Tel que :

E_{bat} : Est la tension à vide.

R_{bat} : est la résistance interne.

I_{bat} : est le courant fourni par la batterie.

Comme nous pouvons observer dans l'équation (II.15) la résistance interne de la batterie dépend du signe du courant. On distingue donc deux cas de résistances, une résistance en charge et une résistance en décharge.

2.4 a). Convertisseurs DC/DC (Hacheur)

Selon la position du commutateur et du hacheur, différents types de convertisseurs DC-DC peuvent être réalisés : l'abaisseur de tension "Buck", l'élévateur de tension "Boost", le hacheur "Boost-Buck" et le hacheur à quatre quadrants. Dans ce travail, nous nous concentrerons sur les deux derniers.

b).Hacheur Buck-Boost

La figure ci-dessus illustre un convertisseur DC-DC buck-boost capable de fournir une tension de sortie régulée supérieure ou inférieure au niveau de tension de la source [25]. Le schéma présenté dans la figure (II.6)

montre la topologie du convertisseur, comprenant une source de tension d'entrée V_{bat} , deux interrupteurs commandés, une inductance de filtrage (L), un condensateur (C) agissant comme filtre, et une tension de sortie V_{DC} .

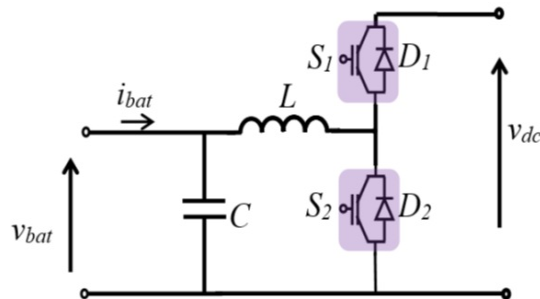


Fig. II.6 Buck-Boost model in two-transfer directions. .

Le convertisseur boost-buck est conçu sur la base de la formule suivante

$$V_{dc} = V_{bat} \frac{D}{(1-D)} \quad (\text{II.16})$$

avec :

V_{dc} : est la tension de charge.

L'ondulation de tension des convertisseurs boost-buck est calculée à partir de la formule suivante :

$$\frac{V_{dc}}{V_{bat}} = \frac{D}{RCf} \quad (\text{II.17})$$

d).Hacheur à quatre quadrants

Un hacheur à quatre quadrants ou appelé aussi hacheur en pont H est destiné à alimenter des moteurs à courant continu. Il comporte tous les éléments de puissance et d'interfaçage logique avec les automates de commande et requiert une tension d'alimentation normalisée.

Ce hacheur est à la fois réversible en courant et en tension. Il peut alimenter un moteur DC afin de le faire fonctionner dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse c'est-à-dire, le faire tourner dans les deux sens de rotation et autoriser la récupération d'énergie pendant les phases de freinage, chaque interrupteur électronique est associé à une diode dite de récupération [3]. Elles permettent la circulation du courant lorsque l'interrupteur est commandé et que le courant est dans le sens opposé au sens autorisé par l'interrupteur électronique. Pour les interrupteurs électroniques, il faut utiliser des semi-conducteurs à ouverture et fermeture commandées (transistors, thyristors, ...) (voire la figure (II.7)), source

de tension réversible par exemple une batterie [3, 26]. Ce hacheur à deux rôles principaux : Fournir le courant nécessaire au fonctionnement du moteur. Donner la possibilité d'inverser le sens du courant (donc le sens de la vitesse de rotation du moteur).

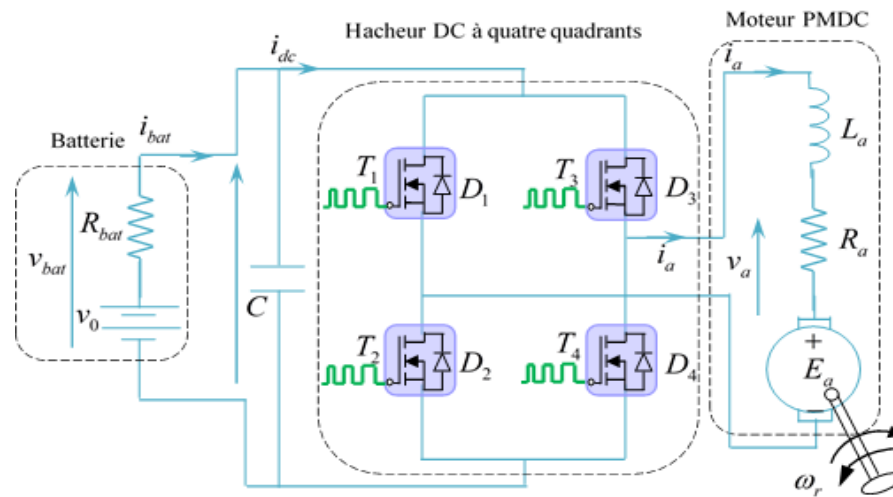


Fig. II.7 Schéma électrique d'un hacheur à 4 quadrants

Principe du fonctionnement

La figure II.8 expose le principe de fonctionnement des interrupteurs d'un hacheur DC à quatre quadrants [26]. Le tableau ci-dessous résume les différents modes de fonctionnement du convertisseur en question :

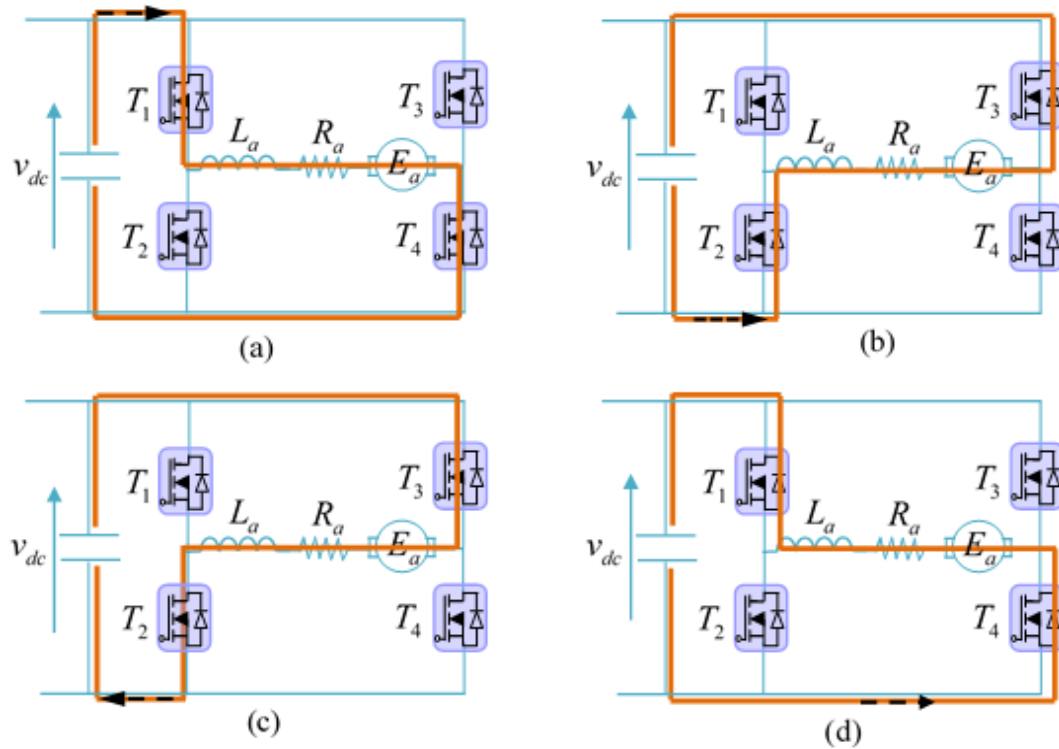


Fig. II.8 le type de commutation de déclenchement dans tous les quadrants (a) Premier quadrant (b) Deuxième quadrant (c) Troisième quadrant (d) Quatrième quadrant

TABLEAU II.1 Modes de fonctionnement convertisseur DC à quatre quadrants

| Zone (N) | | | | V_a (V) | I_a (A) | état du moteur | Quadrant |
|----------|-------|-------|-------|-----------------------|-----------|--|------------|
| T_1 | T_2 | T_3 | T_4 | | | | |
| O | O | O | O | $V_a = 0$ | $I_a = 0$ | arrêt | aucun |
| F | | | F | $V_a \approx V_{dc}$ | $I_a > 0$ | tourne sens \dagger | <i>I</i> |
| O | O | O | O | $V_a > 0$ | $I_a > 0$ | phase de freinage : D_2 et D_3 conduit | <i>II</i> |
| | F | F | | $V_a \approx -V_{dc}$ | $I_a < 0$ | tourne sens $-$ | <i>III</i> |
| O | O | O | O | $V_a < 0$ | $I_a < 0$ | phase de freinage : D_1 et D_4 conduit | <i>IV</i> |

Tableau II.1 – Table de commutation d'un hacheur à 4 quadrants.

les lettres : V_a : est la tension de charger.

O désigne Ouverte,

F désigne fermée.

3 Différentiel du véhicule

Le différentiel d'un véhicule est un ensemble mécanique essentiel situé dans le système de transmission. Il permet aux roues motrices de tourner à des vitesses différentes, particulièrement utile lors des virages. Lorsqu'un véhicule prend un virage, les roues extérieures parcourent une plus grande distance que les roues intérieures. Le différentiel compense cette différence en répartissant la puissance du moteur de manière appropriée entre les roues, améliorant ainsi la traction et la maniabilité. Il est généralement constitué d'un boîtier contenant des engrenages qui assurent cette fonction de répartition de la vitesse et du couple.

Le différentiel électronique représente un progrès significatif dans la technologie des véhicules électriques, remplaçant le différentiel mécanique dans les systèmes multi-entraînement [1]. Ce système utilise les signaux de commande du volant, les signaux de position et les signaux de vitesse des moteurs pour contrôler la puissance de chaque roue, garantissant que chaque roue reçoit le couple nécessaire. La structure de contrôle proposée est généralement basée sur une commande PID pour chaque roue.

Les avantages du différentiel électronique sont nombreux. Il remplace les systèmes de transmission mécanique, souvent lourds et inefficaces, par un dispositif léger, compact et efficace. En outre, il est possible de déterminer la vitesse de référence en fonction des exigences du conducteur. Lorsque le véhicule aborde un virage, le conducteur applique un angle de braquage aux roues. Le différentiel électronique intervient instantanément sur les deux moteurs, réduisant la vitesse de la roue motrice intérieure au virage tout en augmentant celle de la roue motrice extérieure, comme illustré dans la figure (II.9).

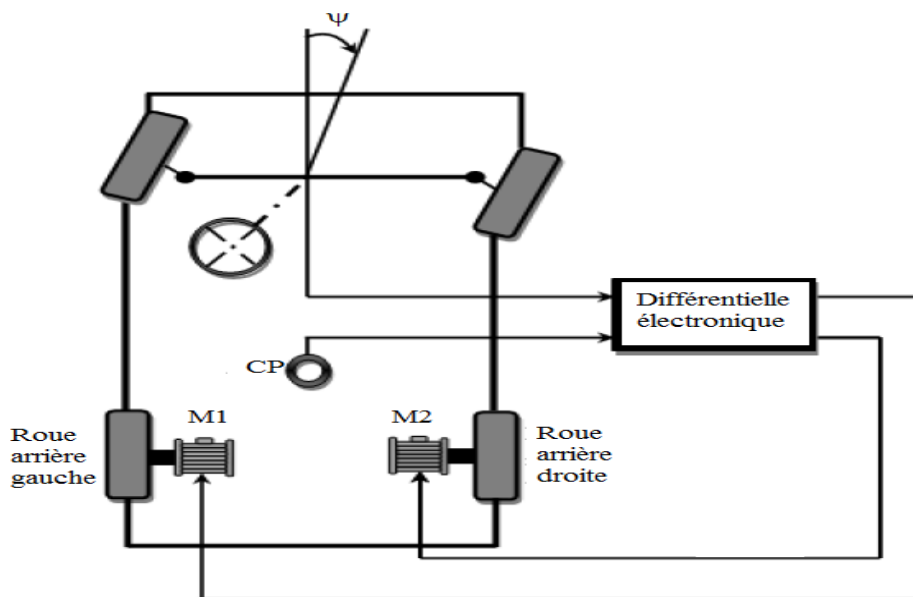


Fig. II.9 Modèle proposé d'un différentiel [1] .

Ce dispositif améliore non seulement la traction et la stabilité du véhicule mais aussi son efficacité énergétique, contribuant ainsi à des performances globales accrues et une meilleure maniabilité. La vitesse linéaire de chaque roue motrice est donnée par V_g et V_d comme suit :

$$V_g = \omega_R \left(R + \frac{d\omega}{2} \right) \quad (\text{II.18})$$

$$V_d = \omega_R \left(R - \frac{d\omega}{2} \right) \quad (\text{II.19})$$

Avec :

R : le rayon de virage

4 Régulation de la vitesse d'un moteur à CC par une commande PI

Un variateur de vitesse est un dispositif permettant de réaliser l'alimentation et la commande d'un moteur. Son schéma de principe est illustré à la figure (figure(II.10)). L'objectif est de faire tourner une charge mécanique à une vitesse donnée (sortie) conformément à la loi d'évolution d'une grandeur d'entrée (consigne).

L'écart entre la consigne et la vitesse du moteur est pré-amplifié et éventuellement écrêté avant de commander l'amplificateur de puissance du moteur à courant continu avec excitation constante. La mesure de la vitesse est convertie en tension par une dynamo tachymétrique.

La mesure du courant absorbé par le moteur est également transformée en tension par un transformateur d'intensité.

La boucle secondaire de courant permet de limiter le courant dans le moteur pendant les phases transitoires et a un effet stabilisateur. On peut donc dire que le courant est l'image du couple absorbé et, par conséquent, la variation de courant reflète la variation de vitesse.

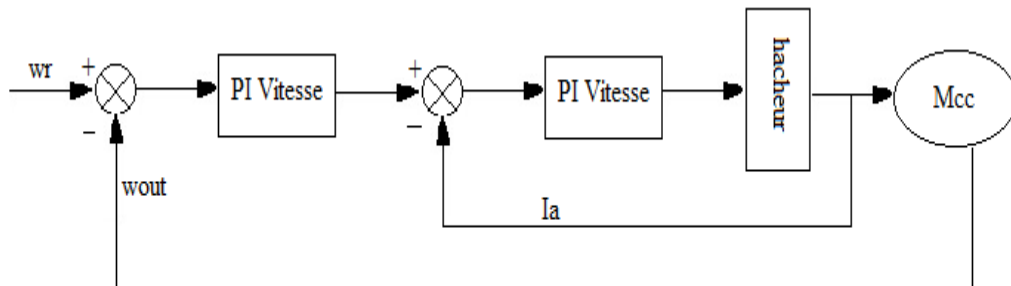


Fig. II.10 Réglage de la vitesse d'un MCC avec régulation en cascade .

4.1 Partie de simulation :

Nous allons simuler le système pour varier la vitesse d'un moteur à courant continu sur une période de 20 s, en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK.

Ce logiciel est un outil efficace pour étudier le fonctionnement des machines à courant continu dans des conditions de fonctionnement souhaitées. Il permet d'observer de manière réaliste des phénomènes électriques et physiques, tels que le couple, la vitesse et le courant.

La commande utilisée est une commande classique par régulateur PI, sans application de couple de charge. Pour vérifier l'efficacité du système, nous avons réalisé un test de simulation sur le modèle validé. Ce test consiste à régler la vitesse de la machine à courant continu à 117.00 rad/sec en utilisant une structure en cascade.

du véhicule correspond à celle des roues motrices. Les moteurs présentent une consommation de courant et une production de couple électromagnétique équivalentes.

Cas 2 : Application de couple et mouvement avec virage à droite sur une pente de 30% à divers instants.

Dans cet état, le véhicule maintient une vitesse constante sur une route droite et plate. À l'instant $t=8s$, il entame un virage à droite à la même vitesse, puis à $t=11s$, il commence à gravir une rampe de 30%. Entre $t=14s$ et $t=17s$, les deux moteurs sont mis sous charge, ce qui entraîne une augmentation du couple résistant avec l'accroissement de la vitesse du véhicule. La figure (II.13) illustre les courbes représentant le comportement du véhicule dans ce scénario, incluant les vitesses de rotation des moteurs, les vitesses linéaires des roues et du véhicule, les courants induits dans les moteurs, les couples électromagnétiques, ainsi que les différents couples résistants.

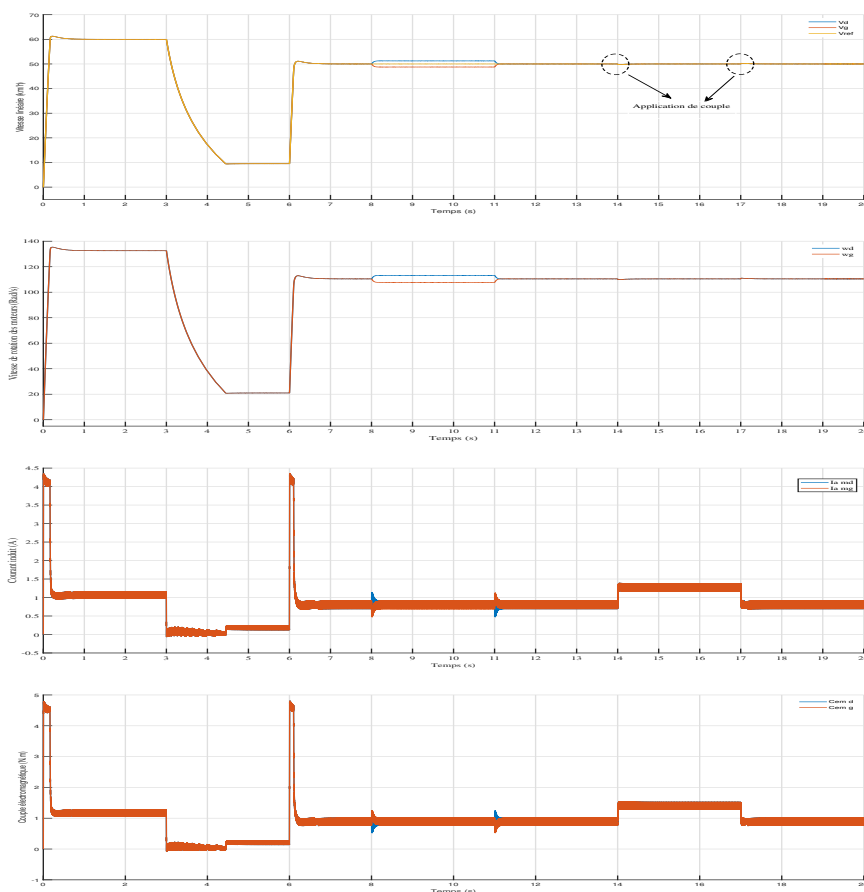


Fig. II.13 Résultat de simulation du deuxième cas

V_g , V_d , et V_{ref} sont les abréviations pour les termes suivants : la vitesse linéaire de la roue gauche (V_g), la vitesse linéaire de la roue droite (V_d), et la vitesse linéaire du véhicule (V_h).

Wg et Wd désignent respectivement la vitesse de rotation de la roue motrice gauche et de la roue motrice droite.

interprétation de résultat

On observe clairement l'importance du régulateur PI dans un système de propulsion à deux roues motrices, qui maintient la vitesse linéaire du véhicule à une valeur constante désirée par le conducteur, que ce soit en mode de traction ou en mode de freinage, même en présence de variations du couple résistant dues aux changements de revêtement routier ou à la charge du véhicule. Malgré de bonnes performances obtenues avec cette stratégie de commande, elles ne sont pas optimales.

5 Conclusion

La modélisation des véhicules électriques joue un rôle crucial dans la compréhension, la conception et l'amélioration des performances de ces véhicules. En réponse à l'augmentation de la demande pour des solutions de transport plus durables et à la pression croissante pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, les véhicules électriques (VE) sont devenus une option prometteuse. Le but de ce chapitre est de représenter les véhicules électriques à la fois de manière électrique et dynamique, tout en incluant une description détaillée de leurs composantes essentielles telles que la batterie, la machine à courant continu et les convertisseurs statiques. De plus, nous abordons la commande traditionnelle par PI appliquée à un véhicule électrique, fournissant ainsi une vision complète et intégrée des différentes facettes de la modélisation et du contrôle des VE. Cette approche holistique permet non seulement d'optimiser les performances et la fiabilité des véhicules électriques, mais aussi de faciliter l'intégration de nouvelles technologies dans ce domaine en constante évolution.

Chapitre



**COMMANDE DU VEHICULE
ELECTRIQUE PAR METHODE
DE BACKSTEPPING**

1 Introduction

Pendant longtemps, les systèmes physiques modélisés par des équations non linéaires ont été étudiés en négligeant les non-linéarités, ce qui a conduit à des problèmes de comportement. Un modèle linéaire est valable uniquement pour une zone spécifique de fonctionnement, au-delà de laquelle le système n'est plus linéaire. Les systèmes non linéaires, qui sont essentiels dans la commande des processus physiques, peuvent avoir plusieurs points d'équilibre, contrairement aux systèmes linéaires qui en ont un seul. Un système non linéaire peut atteindre des valeurs infinies en un temps fini, posant des problèmes de stabilité, notamment en commande adaptative. Pour obtenir des oscillations stables, il faut utiliser des systèmes non linéaires, connus sous le nom de cycles limités. Dans ce contexte, nous allons étudier des techniques de commande pour le contrôle des moteurs à courant continu en utilisant une approche non linéaire de type Backstepping. Nous aborderons également le contrôle latéral, puis nous proposerons une méthode basée sur le backstepping pour rendre notre véhicule autonome, améliorant ainsi ses performances en matière de sécurité.

2 Systèmes non linéaires

Un système non linéaire est un système dont la relation entre les variables d'entrée et de sortie ne peut pas être représentée par une équation linéaire. Autrement dit, les superpositions d'effets ne sont pas valides, et les principes de proportionnalité et d'additivité ne s'appliquent pas. Ces ensembles sont définis en termes de contraintes imposées aux non-linéarités du système

a) Points d'Équilibre

Un point d'équilibre d'un système non linéaire est un état où le système reste stationnaire s'il n'est pas perturbé. Matériellement, cela signifie que les dérivées temporelles des variables d'état sont nulles à cet état. Pour un système dynamique représenté par $\dot{x} = f(x)$, le point d'équilibre x^* satisfait $f(x^*) = 0$.

b). Stabilité

La stabilité d'un point d'équilibre est une mesure de la capacité du système à revenir à cet état après une perturbation. Les deux principaux types de stabilité sont :

- Stabilité de Lyapunov : Un point d'équilibre est stable au sens de Lyapunov si, pour toute perturbation initiale suffisamment petite, les trajectoires du système restent proches de l'équilibre.

- Stabilité asymptotique : Un point d'équilibre est asymptotiquement stable si, en plus d'être stable au sens de Lyapunov, les trajectoires du système convergent vers cet équilibre au fil du temps.

Pour analyser la stabilité, on utilise souvent la fonction de Lyapunov $V(x)$, une fonction scalaire qui est positive définie et dont la dérivée temporelle $\dot{V}(x)$ est négative définie.

c). Analyse du Plan de Phase

Le plan de phase est un outil graphique (voire la figure(III.1)) pour visualiser les trajectoires des systèmes dynamiques non linéaires dans l'espace des états. Chaque point dans ce plan représente un état du système, et les flèches indiquent la direction du mouvement des états au fil du temps. Les caractéristiques clés incluent :

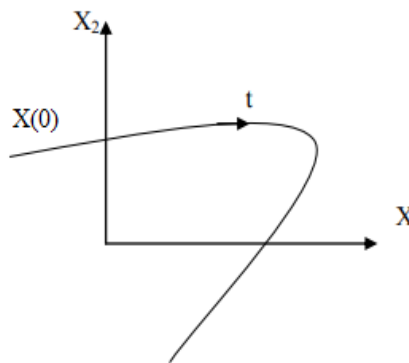


Fig. III.1 Trajectoire d'un système dans le plan de phase.

- Points fixes : Correspondent aux points d'équilibre.
- Trajectoires : Représentent l'évolution des états du système dans le temps.
- Cycles limites : Trajectoires fermées indiquant des oscillations périodiques

3 Contrôle de systèmes non linéaires par la méthode du backstepping

Le backstepping, développé dans les années 1990 comme une extension de la méthode de commande par retour d'état pour les systèmes non linéaires, est une approche moderne de conception de commande largement promue par des chercheurs tels que Miroslav Krstic. Cette méthode repose fortement sur la théorie de Lyapunov pour garantir la stabilité des systèmes. Avec l'évolution constante visant à améliorer les performances des systèmes commandés, les modélisations de plus en plus précises sont devenues essentielles pour répondre à une gamme étendue d'opérations. Cependant, l'émergence des non-linéarités rend les outils traditionnels d'analyse et de synthèse des lois de commande linéaires obsolètes et incapables de rendre compte de nombreux phénomènes. Ainsi, ces dernières années ont vu une intensification de la recherche dans le domaine de la commande des systèmes non linéaires, visant à développer des approches plus adaptées et robustes pour ces environnements dynamiques complexes.

Théorie de Lyapunov

La théorie de Lyapunov est une branche fondamentale de la théorie des systèmes dynamiques, introduite par le mathématicien russe Aleksandr Lyapunov à la fin du 19e siècle. Cette théorie est principalement utilisée pour étudier la stabilité des systèmes dynamiques, qu'ils soient linéaires ou non linéaires.

- **Fonctions de Lyapunov** : Au cœur de la théorie se trouvent les fonctions de Lyapunov, qui sont des fonctions scalaires définies sur l'espace des états du système. Une fonction de Lyapunov est choisie de manière à être positive définie, ce qui signifie qu'elle est positive pour tous les états non nuls et nulle seulement à l'état d'équilibre du système.
- **Stabilité** : La théorie de Lyapunov permet de déterminer la stabilité d'un état d'équilibre d'un système dynamique. Si une fonction de Lyapunov peut être trouvée pour laquelle sa dérivée le long des trajectoires du système est négative (ou nulle), alors l'état d'équilibre est stable.
- **Types de stabilité** : La théorie de Lyapunov permet également de caractériser différents types de stabilité, tels que la stabilité asymptotique (où le système converge vers l'état d'équilibre avec le temps), la stabilité exponentielle (où la convergence vers

l'équilibre est exponentielle), et d'autres concepts plus avancés selon les conditions spécifiques du système étudié.

- **Applicabilité** : La théorie de Lyapunov est largement utilisée en ingénierie de contrôle pour concevoir des lois de commande robustes et pour analyser la stabilité des systèmes non linéaires. Elle fournit un cadre mathématique puissant pour prouver des propriétés de stabilité et pour guider le développement de stratégies de contrôle efficaces.

3.1 Principe de la commande par la méthode Backstepping :

La méthode du backstepping commence en définissant une fonction d'énergie qui intègre l'écart entre les sorties régulées du système et les objectifs de commande. Le principe est alors de construire à chaque étape un écart entre l'état courant du système et une commande virtuel qui garantirait, s'il pouvait être appliqué tel quel, la non-positivité de la dérivée de la fonction de Lyapunov. A la fin de chaque étape, la fonction d'énergie est complétée par cet écart, afin d'en assurer la convergence vers zéro. Le processus s'achève lorsque le vecteur de commande du système apparaît : la commande virtuel défini au dernier pas est alors une commande réelle, garantissant la convergence des états du système vers zéro, et l'équilibre des sorties régulées autour des objectifs de commande. Dans cette partie nous contenterons sur l'application de la commande backstepping au MCC. Rappelons que ce modèle a été calculé à vitesse par le principe .

3.2 Application du commande backstepping a MCC

a). **Conception de la loi de commande** **Première étape** Nous considérons Ω_{ref} comme la référence souhaitée, ce qui entraîne l'erreur de régulation suivante :

$$e_1 = \Omega - \Omega_{ref} \quad (\text{III.1})$$

Ainsi sa dérivé est :

$$\dot{e}_1 = \dot{\Omega} - \dot{\Omega}_{ref} \quad (\text{III.2})$$

On considère la fonction candidate de Lyapunov suivante :

$$V_1 = \frac{1}{2}e_1^2 \quad (\text{III.3})$$

La dérivée de la fonction candidate de Lyapunov est :

$$\dot{V}_1 = \dot{e}_1 e_1 \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$$-k_1 \dot{e}_1 = -\frac{f}{J}\Omega + \frac{1}{J}C_r - \dot{\Omega}_{ref} + \frac{k}{J}I_a \quad (\text{III.5})$$

Pour assurer la convergence de la fonction candidate de Lyapunov :

$$\dot{V}_1 = k_1 e_1^2 \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$$k_1 > 0$$

Alors la loi de commande est donnée par équation (III.7) :

$$I_a^* = \frac{f}{k}\Omega + \frac{1}{k}C_r + \frac{J}{k}\dot{\Omega}_{ref} - \frac{K_1 J}{K}e_1 \quad (\text{III.7})$$

Deuxième étape

À cette étape, la nouvelle référence désirée deviendra la variable de commande pour le sous-système précédent :

$$e_2 = I_a - I_a^* \quad (\text{III.8})$$

$$\dot{e}_2 = \dot{I}_a - \dot{I}_a^* \quad (\text{III.9})$$

$$\dot{e}_2 = -\frac{k}{L_a}\Omega - \frac{R_a}{L_a}I_a + \frac{1}{L_a}U_a - \dot{I}_a^* \quad (\text{III.10})$$

Pour rendre \dot{V}_2 négative et assurer la stabilité on prend :

$$-k_2 \dot{e}_2 = -\frac{k}{L_a}\Omega - \frac{R_a}{L_a}I_a + \frac{1}{L_a}U_a - \dot{I}_a^* \quad (\text{III.11})$$

Avec : $k_2 > 0$

Ainsi, la loi de commande sera donnée par :

$$U_a = k\Omega + R_a I_a + L_a \dot{I}_a^* - k_2 L_a e_2 \quad (\text{III.12})$$

Ce qui garantit la négativité de la dérivée de la fonction de Lyapunov étendue :

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 < 0 \quad (\text{III.13})$$

3.3 Résultat et simulation du comportement du système

Pour améliorer la commande de vitesse d'un véhicule électrique en utilisant la méthode du backstepping, des simulations numériques ont été réalisées dans des conditions de fonctionnement identiques à celles utilisées pour le réglage par un contrôleur PI (voir la figure (II.11)). Cette comparaison des résultats obtenus nous a permis de sélectionner la technique la plus appropriée pour notre système.

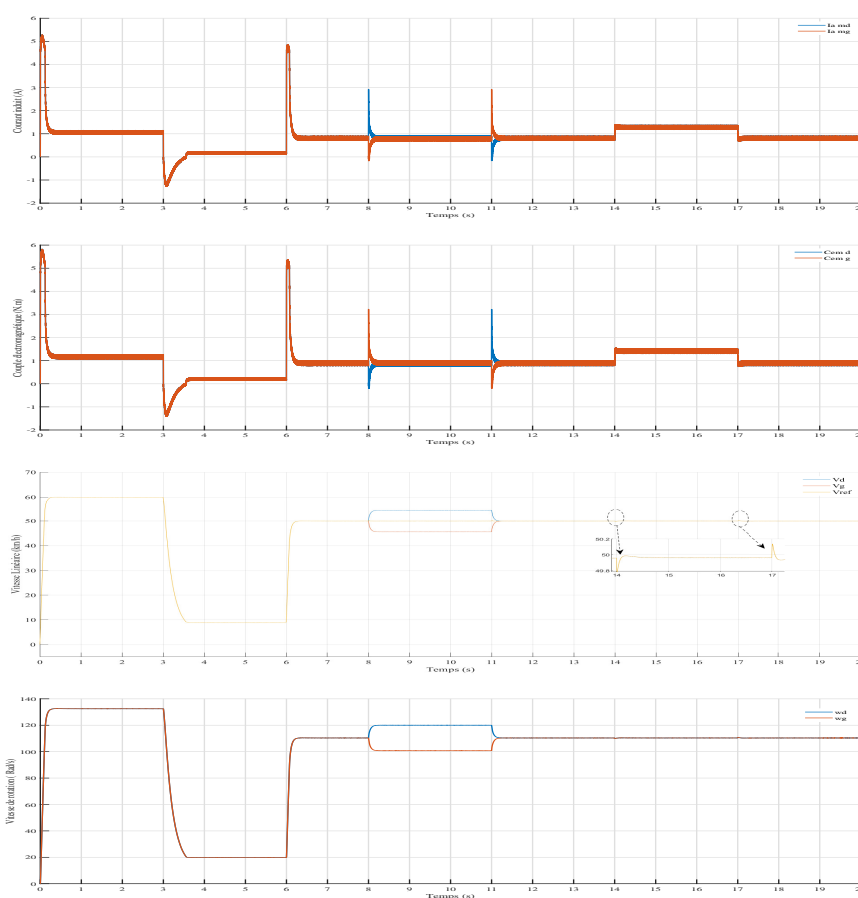


Fig. III.2 Résultats de simulation utilisant la commande backstepping

Cette fois-ci, supposons que notre véhicule entame un virage à droite à l'instant $t = 8s$, avec une durée de braquage de 3 secondes à une vitesse de $60km/h$. Ensuite, à $t = 11s$, il commence à gravir une pente de 30% à la même vitesse. La figure (III.2) illustre l'évolution des paramètres correspondants, et à $t = 14s$, nous appliquons un couple de charge pendant 4 s.

- **Interprétation et comparaison :**

Le régulateur backstepping démontre sa robustesse dans un système de propulsion à deux roues motrices en maintenant la vitesse linéaire du véhicule constante à la valeur désirée. Il parvient à compenser les fluctuations du couple résistant dues aux changements de nature de la chaussée ou à la charge du véhicule, sans présenter de dépassement. Pour évaluer les performances de la commande backstepping appliquée à notre véhicule électrique, nous avons simulé son fonctionnement avec les paramètres suivants : vitesse du véhicule $V_h = 60 \text{ km/h}$, angle de braquage $\gamma = 7^\circ$ et une pente de 30%.

Entre 0 et 4 s, le véhicule maintient une vitesse linéaire constante de 60 km/h. De 3 à 3,4 s, il y a un freinage avec récupération d'énergie, entraînant une décélération. De 3,4 à 6 s, la vitesse est maintenue à 10 km/h de manière constante. Entre 6 et 8 s, des couples de charge sont appliqués successivement à 14 et 17 s respectivement. Enfin, de 8 à 11 s, la vitesse des deux roues est comparée dans un virage (roue gauche et droite). L'analyse comparative montre que la commande Backstepping permet aux roues motrices de suivre précisément la vitesse de référence avec un temps de réponse rapide et précis. Il est également remarquable qu'il n'y ait pas de pics de réponse, ce qui témoigne de la stabilité accrue du système dans différentes conditions.

4 Contrôle latéral d'un véhicule électrique

La commande latérale maintient le véhicule dans sa voie en agissant sur la direction et les freins, dans le cadre de la sécurité active ESP. L'objectif est de définir l'architecture des systèmes de contrôle pour suivre une trajectoire définie, en ajustant les paramètres des correcteurs et en validant les performances [27]. Dans la conduite autonome, la commande latérale dirige automatiquement le véhicule en agissant sur l'angle de braquage. Les systèmes d'assistance utilisent un moteur électrique couplé à la colonne de direction pour contrôler le couple ou l'angle de braquage, et peuvent également intervenir sur le freinage différentiel pour modifier la direction du véhicule.

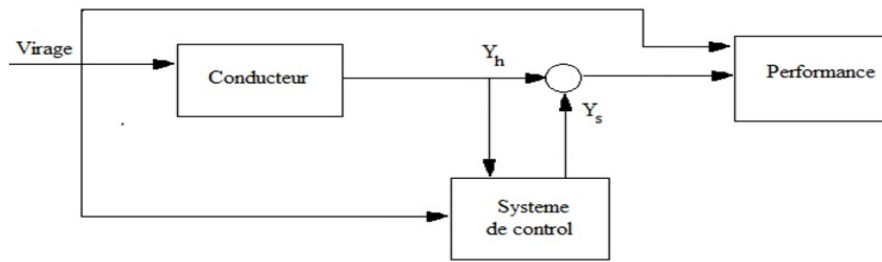


Fig. III.3 schéma fonctionnel d'assistance automatisé.

La conception d'un système de contrôle efficace pour les véhicules électriques doit résoudre les défis posés par diverses perturbations et incertitudes, comme l'effet du vent et les variations d'adhérence. Cela nécessite l'utilisation de stratégies de commande adaptées. Cette partie se concentre sur le contrôle latéral des véhicules électriques, en introduisant un modèle augmenté pour capturer le comportement latéral du véhicule, incluant l'accélération latérale, la vitesse de lacet et l'angle de dérive.

4.1 Modèle latéral d'un véhicule

Pour décrire la cinématique du véhicule, nous utilisons un modèle à trois degrés de liberté. Ce modèle utilise un système d'axes cartésien (X, Y) pour analyser le déplacement du centre de gravité (CG) du véhicule, ainsi qu'un système d'axes (x, y) pour cette étude. En outre, il prend en compte la définition de l'angle de lacet. Les forces généralisées et le moment de rotation total autour de l'axe Z sont exprimés en fonction des deux principes fondamentaux de la dynamique du véhicule [28].

$$\begin{cases} M\ddot{X} = F_X \\ M\ddot{Y} = F_Y \\ M\ddot{Z} = F_Z \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Où J_z est le moment d'inertie suivant l'axe Z :

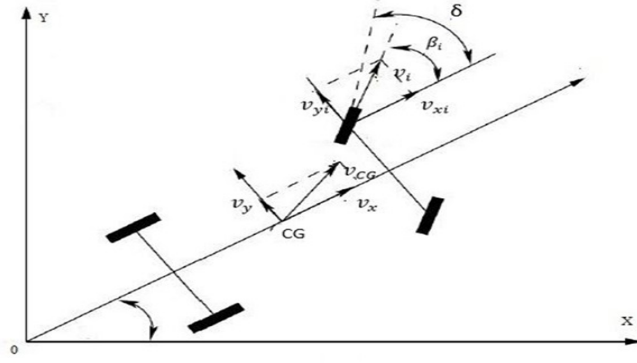


Fig. III.4 Mouvement du véhicule dans le système d'axe (X, Y) .

En effectuant une rotation simple d'un angle ψ autour de l'axe Oz , on peut évaluer le vecteur vitesse lié au centre de gravité (CG) du véhicule :

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Les variables V_x et V_y représentent les composantes de la vitesse du véhicule dans le plan (x, y) , tandis que $r = \dot{\psi}$ correspond à la vitesse de lacet. En dérivant l'équation (III.15) par rapport au temps, on obtient les accélérations suivantes[28, 29] :

$$\begin{cases} \frac{d\dot{X}}{dt} = \dot{v}_x \cos(\psi) - \dot{v}_x \dot{\psi} \sin(\psi) - \dot{v}_y \sin(\psi) - \dot{v}_y \dot{\psi} \cos(\psi) \\ \frac{d\dot{Y}}{dt} = \dot{v}_x \sin(\psi) - \dot{v}_x \dot{\psi} \cos(\psi) - \dot{v}_y \cos(\psi) - \dot{v}_y \dot{\psi} \sin(\psi) \\ \frac{d\dot{\psi}}{dt} = \dot{r} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Tenant compte de (III.14), dans les équations du système (III.16), on obtient :

$$\begin{cases} \frac{F_x}{M} = (\dot{v}_x - \dot{v}_y \dot{\psi}) \cdot \cos(\psi) - (\dot{v}_y - \dot{v}_x \dot{\psi}) \cdot \sin(\psi) \\ \frac{F_y}{M} = (\dot{v}_x - \dot{v}_y \dot{\psi}) \cdot \sin(\psi) - (\dot{v}_y - \dot{v}_x \dot{\psi}) \cdot \cos(\psi) \\ \frac{M_z}{J_z} = \dot{r} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Pour un angle de rotation ψ petit, on approxime $\cos(\psi) \approx 1, \sin(\psi) \approx 0$.

Ainsi, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{F_x}{M} = (\dot{v}_x - \dot{v}_y \dot{\psi}) \\ \frac{F_y}{M} = (\dot{v}_x - \dot{v}_x \dot{\psi}) \\ \frac{M_z}{J_z} = \dot{r} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Les forces appliquées au véhicule sont représentées dans le repère (X, Y) , où les roues avant sont braquées d'un angle δ_f . Ces forces sont visualisées sur la figure (III.5) au niveau de l'interface roue-sol.

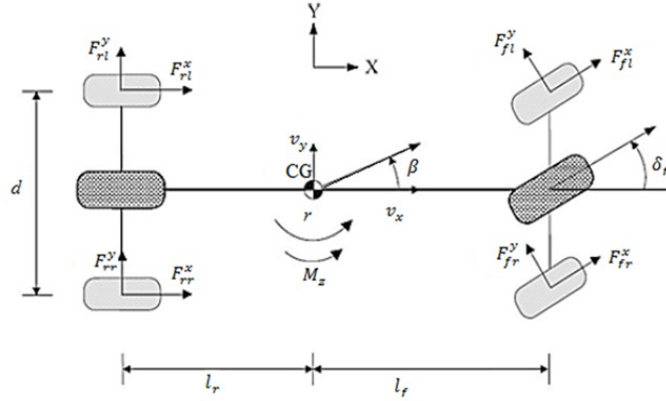


Fig. III.5 Forces au niveau des roues du véhicule.

La somme des forces F_X agissant dans la direction (X) , comprenant la force aérodynamique et la force d'inclinaison, est exprimée comme suit :

$$\sum F^x = (F_{fl}^x + F_{fr}^x) \cos(\delta_f) + F_{fl}^x + F_{fr}^x - (F_{fl}^y + F_{fr}^y) \sin(\delta_f) \quad (III.19)$$

La somme des forces F_y agissant dans la direction (Y) , comprenant la force aérodynamique et la force d'inclinaison, est exprimée comme suit :

$$\sum F^y = (F_{fl}^x + F_{fr}^x) \sin(\delta_f) + F_{fl}^y + F_{fr}^y - (F_{fl}^y + F_{fr}^y) \cos(\delta_f) \quad (III.20)$$

Avec :

δ_f : est l'angle de braquage.

F_{rl}^x, F_{fr}^x : sont respectivement les forces de traction des roues frontales gauche et droite.

F_{fl}^x, F_{rr}^x : sont respectivement les forces de traction des roues arrières gauche et droite.

F_{fl}^y, F_{fr}^y : sont respectivement les forces latérales des roues frontales gauche et droite.

F_{rl}^y, F_{rr}^y : sont respectivement les forces latérales des roues arrières gauche et droite.

Le moment des forces suivant l'axe Z est exprimé par :

$$M_z = l_f(F_{fl}^x + F_{fr}^x) \sin(\delta_f) + l_f(F_{fl}^y + F_{fr}^y) \cos(\delta_f) - l_r(F_{rl}^y + F_{rr}^y) \sin(\delta_f) + M_{diff} \quad (III.21)$$

Où

M_{diff} représente la dynamique produite par le freinage différentiel. Il est exprimé comme suit :

$$M_{diff} = \frac{d}{2}(F_{rl}^x + F_{rr}^x) + \frac{d}{2}(F_{fl}^x + F_{fr}^x) \cos(\delta_f) \quad (\text{III.22})$$

Avec :

d : est la longueur du train arrière.

Les équations (III.19), (III.20) et (III.22) peuvent être simplifiées de la manière suivant :

$$\begin{cases} M(\dot{v}_x - rv_y) = F_f^x \cos(\delta_f) + F_r^x - F_f^y \sin(\delta_f) \\ M(\dot{v}_y - rv_x) = F_f^x \sin(\delta_f) + F_r^x - F_f^y \cos(\delta_f) \\ J_z \dot{r} = l_f F_f^x \sin(\delta_f) + l_f F_f^y \cos(\delta_f) - l_r F_r^y + M_{diff} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

L'expression générale du coefficient de glissement longitudinal s'exprime de la manière suivante :

$$\lambda_i = \frac{R\omega_i - u_i}{\text{Max}(R\omega_i, u_i)} \quad (\text{III.24})$$

Avec ω_i représentant la vitesse angulaire de la roue i , et u_i les vitesses linéaires du véhicule rapportées aux centres des roues, données par :

$$\begin{aligned} u_{fr} &= (v_x + d.r) \cos(\delta_f) + (v_y + l_f r) \sin(\delta_f) \\ u_{rr} &= v_x + d.r \\ u_{fl} &= (v_x - d.r) \sin(\delta_f) + (v_y + l_f r) \cos(\delta_f) \\ u_{rl} &= v_x - d.r \end{aligned} \quad (\text{III.25})$$

Le glissement latéral par rapport au plan de rotation de la roue est évalué par l'angle de glissement ou de dérive. En utilisant le vecteur de vitesse du centre de gravité du véhicule $[v_x v_y r]$ et ses paramètres géométriques, la relation entre la vitesse et les angles de dérive s'exprime comme suit :

$$\begin{cases} \tan(\delta_f - \alpha_f) = \frac{l_r r + v_y}{v_x} \\ \tan(\alpha_r) = \frac{l_r r - v_y}{v_x} \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

Pour les petits angles de braquages :

$$\begin{cases} \alpha_f \approx \delta_f \cdot \frac{l_r r + v_y}{v_x} \\ \alpha_r \approx \frac{l_r r - v_y}{v_x} \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

L'angle de dérive du véhicule est défini comme suit :

$$\beta = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (\text{III.28})$$

Lorsque les angles de dérive sous les roues restent petits (où $\beta = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right)$), le glissement latéral pour les trains avant et arrière peut être exprimé de la manière suivante :

$$\begin{cases} \alpha_f \approx \delta_f \cdot \frac{l_f r}{v_x} - \beta \\ \alpha_r \approx \frac{l_r r}{v_x} - \beta \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

Avec :

l_f : distance perpendiculaire entre le train avant et le centre de gravité.

l_r : Distance perpendiculaire entre le train arrière et le centre de gravité.

β : angle de braquage des roues avant.

Pendant une conduite normale en virage, où les angles de dérive des pneumatiques restent faibles (inférieurs à $4\check{r}$), les forces latérales peuvent être modélisées comme une fonction linéaire des angles de glissement (dérive), définie de la manière suivante :

$$\begin{cases} F_f^y = -2C_{yf}\alpha_f \\ F_r^y = -2C_{yr}\alpha_r \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

C_{yf} et C_{yr} sont les rigidités au glissement latéral des pneus avant et arrière.

En conditions de conduite agressives ou sur une chaussée à faible adhérence, la relation entre les forces latérales et les angles de glissement devient non linéaire, entraînant un potentiel de sous-virage ou de survirage des pneumatiques. Dans un véhicule électrique, la propulsion est assurée par les roues arrière motrices, tandis que les roues avant, bien que directrices, ne contribuent pas à la traction. Avec un angle de braquage faible (entre $-7\check{r}et + 7\check{r}$), le modèle simplifié du véhicule peut être décrit comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{v}_x &= v_y r + \frac{F_r^x}{M} + \frac{2C_{yf}\alpha_f}{M} \left(\frac{l_r r + v_y}{v_x} - \delta_f \right) \\ \dot{v}_y &= -2 \left(\frac{C_{yr} + \alpha_{yf}}{M v_x} \right) v_y + \left(\frac{2C_{yr} l_r + 2C_{yf} l^2}{M v_x} - v_x \right) r + \frac{2C_{yf}\alpha_f}{M} \\ \dot{r} &= -2 \left(\frac{C_{yr} l_r + C_{yf} l_f}{J_z v_x} \right) v_y - \left(\frac{2C_{yr} l_r^2 + 2C_{yf} l_f}{J_z v_x} \right) r + \frac{2C_{yf} l_f \delta_f}{J_z} + \frac{d(F_{rl}^x - F_{rr}^x)}{2J_z} \end{aligned} \quad (\text{III.31})$$

Dans cette partie, nous nous concentrons uniquement sur les mouvements transversaux du véhicule, en supposant une vitesse constante le long de l'axe (X), ce qui permet d'éliminer la première équation du modèle. Ainsi, le modèle précédent se simplifie à un modèle à deux

degrés de liberté, décrit comme suit :

$$\begin{aligned}\dot{v}_y &= -2\left(\frac{C_{yr} + \alpha_{yf}}{Mv_x}\right)v_y + \left(\frac{2C_{yr}l_r + 2C_{yf}l_f^2}{Mv_x} - v_x\right)r + \frac{2C_{yf}\delta_f}{M} \\ \dot{r} &= -2\left(\frac{C_{yr}l_r + C_{yf}l_f}{J_z v_x}\right)v_y - \left(\frac{2C_{yr}l_r^2 + 2C_{yf}l_f}{J_z v_x}\right)r + \frac{2C_{yf}l_f\delta_f}{J_z} + \frac{d(F_{rl}^x - F_{rr}^x)}{2J_z}\end{aligned}\quad (\text{III.32})$$

4.2 Commande de la position latérale

Le contrôle de la dynamique latérale peut être effectué en ajustant directement l'angle de braquage, en prenant l'accélération latérale comme une sortie mesurée [27]. Le modèle de commande pour le suivi de trajectoire suppose que les angles de dérive sur le même essieu sont égaux. On néglige les dynamiques du roulis et du tangage, et les angles sont considérés comme faibles (angle de braquage du pneu, d'inclinaison et de lacet). L'accélération transversale (latérale) du véhicule est exprimée comme suit :

$$a_y = \dot{v}_y + rv_x \quad (\text{III.33})$$

Si l'on prend en compte le mouvement de lacet du véhicule, alors :

$$a_y \neq \dot{v}_y \quad (\text{III.34})$$

On déduit la relation entre l'accélération transversale (latérale), la vitesse du véhicule et les vitesses de lacet et de dérive au centre de gravité :

$$a_y = \dot{V}(\dot{\beta} + r) \quad (\text{III.35})$$

Nous nous intéressons également au comportement du véhicule en virage établi. La première notion à présenter est l'angle d'Ackerman. On considère les braquages idéaux des roues avant en supposant de petits angles.

4.3 Comportement du véhicule en virage

Les premiers véhicules motorisés étaient équipés de roues à forte rigidité, ce qui limitait les déformations transversales des pneumatiques. La dynamique transversale se réduisait ainsi au schéma d'Ackermann-Jeantaud, qui illustre la relation entre la position du centre instantané de rotation du véhicule et les axes des essieux avant et arrière (point F et R sur

la figure (III.6)). À basse vitesse, comme l'explique Gillespie, les forces et les angles de dérive des pneumatiques sont très faibles, surtout à l'arrière, plaçant ainsi le centre de rotation dans le prolongement de l'axe arrière. En conséquence, la perpendiculaire au plan de chaque roue avant doit passer par ce point, permettant de déduire les braquages idéaux des roues avant selon le schéma d'Ackermann-Jeantaud.

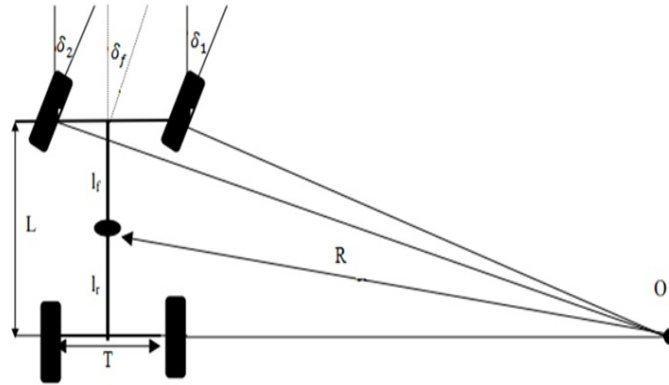


Fig. III.6 Épure de Jeantaud.

L : l'empattement du véhicule.

R : le rayon de la trajectoire.

T : est la longueur de l'essieu.

La condition d'Ackerman est la suivante :

$$\cos \delta_2 - \cos \delta_1 = \frac{T}{L} \quad (\text{III.36})$$

L'angle de braquage d'Ackermann définit l'angle de braquage idéal des roues avant de la manière suivante :

$$\delta_A = \frac{L}{R} \quad (\text{III.37})$$

Le gain en accélération transversale est défini selon :

$$\frac{a_y}{\delta_f} = \frac{V^2}{L(1 + KV^2)} \quad (\text{III.38})$$

Le gradient de sous-virage K définit le comportement dynamique du véhicule :

— Un véhicule neutre a $K = 0$, avec des pouvoirs directeurs égaux aux essieux avant et

arrière. L'angle d'Ackermann suffit pour maintenir le bon rayon de virage malgré les variations de vitesse.

- Un véhicule sous-vireur a $K > 0$, où les roues avant ont un plus grand pouvoir directeur. Pour un virage de rayon constant, l'angle de braquage doit être augmenté avec l'augmentation de la vitesse pour maintenir le bon rayon.
- Un véhicule survireur a $K < 0$, où les roues arrière ont un plus grand pouvoir directeur. En virage établi sur un rayon constant, l'angle de braquage doit être réduit avec l'augmentation de la vitesse pour maintenir le bon rayon.

4.4 La commande latérale d'un VE à l'aide de la technique du Backstepping

L'objectif de cette commande est de créer un système capable d'imiter le conducteur, ajustant l'angle de braquage (δ) et la vitesse angulaire du lacet (ψ) afin que le véhicule suive son trajet. De plus, la commande latérale vise à diriger le véhicule pour qu'il suive un chemin spécifique tout en maintenant une distance de poursuite y_r entre l'axe symétrique du véhicule et la ligne médiane de la route [31].

4.4.1 Élaboration de la loi de commande

En pratique, l'écart y est généralement mesuré par un système de capteurs ou de vision. Plus l'erreur $e = y_r - y$ est faible, plus le véhicule se rapproche de la trajectoire désirée. Ainsi, l'idée est de choisir e comme entrée de notre correcteur. La figure (III.7) illustre le système de commande en boucle classique, qui est particulièrement adapté à ce que nous devons réaliser en pratique.

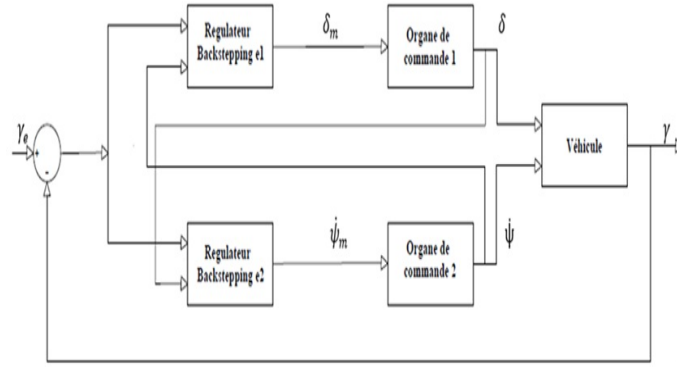


Fig. III.7 La boucle de commande.

D'après les équations extraites du modèle dynamique du véhicule on a [31] :

$$\begin{cases} \dot{v}_x = v_y \dot{\psi} + \frac{c v_y}{m v_x} \delta - \frac{L c}{2m} \frac{\dot{\psi}}{v_x} \delta \\ \dot{v}_y = -v_x \dot{\psi} + \frac{c}{m} \delta - \frac{2c}{m} \frac{v_y}{v_x} \delta \\ \ddot{\psi} = \frac{L c}{2J_z} \delta - \frac{L^2}{2J_z} \frac{\dot{\psi}}{v_x} \delta \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

$$\ddot{y} = v_x \dot{\psi} + \frac{c}{m} \delta - \frac{2c}{m} \frac{\dot{y}}{\dot{x}} \quad (\text{III.40})$$

On extrait \dot{y} d'après l'équation :

$$\dot{y} = \frac{m \dot{x}^2}{2c} \dot{\psi} + \frac{\dot{x}}{2} \delta - \frac{m \dot{x}}{2c} \ddot{y} \quad (\text{III.41})$$

De plus, nous avons également

$$\dot{y} = \dot{x} \sin(\psi) + \dot{y} \cos(\psi) \quad (\text{III.42})$$

D'après les équations (III.41) et (III.42), on obtient :

$$\dot{y} = \frac{m \dot{x}^2}{2c} \dot{\psi} + \dot{x} \sin(\psi) \frac{\dot{x}}{2} \delta - \frac{m \dot{x}}{2c} \dot{y} \cos(\psi) \quad (\text{III.43})$$

La commande virtuelle est sélectionnée de la manière suivante :

$$e_1 = y_r - y \quad (\text{III.44})$$

Sa dérivée est la suivante :

$$\dot{e}_1 = \dot{y}_r - \dot{y} \quad (\text{III.45})$$

L'équation (III.44) définit la fonction de Lyapunov V_1 , qui simplifie l'énergie de l'erreur dans le système de commande. Cette fonction joue un rôle crucial dans l'analyse de la stabilité, offrant des outils efficaces pour évaluer comment l'erreur du système évolue. Si V_1 reste positive et que sa dérivée est constamment négative, cela garantit que l'erreur du système sera stable et tendra vers zéro au fil du temps.

$$V_1 = \frac{1}{2}e_1^2 \quad (\text{III.46})$$

La dérivée de cette fonction est la suivante :

$$\dot{V}_1 = \dot{e}_1 e_1 \quad (\text{III.47})$$

Pour que la dérivée du critère soit toujours négative, la fonction V_1 doit prendre la forme $V_1 = -k_1 * e_1^2$, où k_1 est un paramètre de conception positif et non nul. Ainsi, on obtient :

$$\dot{e}_1 = -k_1 e_1 \quad (\text{III.48})$$

$$\dot{e}_1 = \dot{y}_r - \dot{y} \quad (\text{III.49})$$

$$\dot{y} = \dot{y}_r + k_1 e_1 \quad (\text{III.50})$$

On substitue l'équation (III.43) dans l'équation (III.50)

$$\dot{y} = \dot{y}_r + k_1 e_1 = -\frac{m\dot{x}^2}{2c}\dot{\psi} + \dot{x} \sin(\psi) \frac{\dot{x}}{2}\delta - \frac{m\dot{x}}{2c}\ddot{y} \cos(\psi) \quad (\text{III.51})$$

Les résultats donnent les lois de commande suivantes :

$$\begin{cases} \delta = \left(\frac{2}{\dot{x} \cos(\psi)}\right) \left[-\frac{m\dot{x}^2}{2c}\dot{\psi} + \dot{x} \sin(\psi) \left(\frac{m\dot{x}^2}{2c}\right)\dot{\psi} \cos(\psi) + \frac{m\dot{x}}{2c}\ddot{y} \cos(\psi)\right] \\ \dot{\psi} = \frac{2c}{m\dot{x}^2 \cos(\psi)} \left[-\dot{y}_r - k_1 e_1 + \dot{x} \sin(\psi) \frac{\dot{x}}{2}\delta - \frac{m\dot{x}}{2c}\ddot{y} \cos(\psi)\right] \end{cases} \quad (\text{III.52})$$

4.5 Résultat Simulation et étude du système

Nous rappelons que l'entrée du régulateur selon la technique du 'backstepping' est la distance latérale désirée y_r , fixée à 120cm. Le correcteur par backstepping agit sur les angles

de braquage (δ) et de cap (ψ). Pour ce faire, nous ajustons les valeurs des gains jusqu'à obtenir les résultats souhaités : $k_1 = 1.4$ pour δ (angle de braquage) et $k_2 = 1.8$ pour ψ (angle de cap).

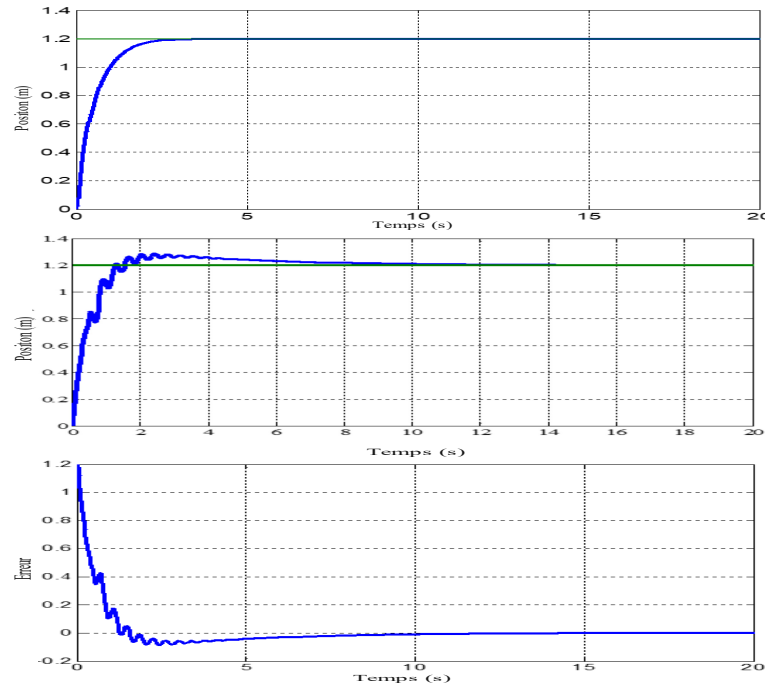


Fig. III.8 Position du Véhicule et l'erreur de control

interprétation

Les tests effectués avec les paramètres $k_1 = 1.8$ et $k_2 = 2.9$ ont montré que le système est devenu stable, précis et réactif. Le gain k_1 a été ajusté pour améliorer la rapidité du système, en veillant à ce que l'angle de braquage maximal δ_{max} reste inférieur à $0.78rad(45^\circ)$, conforme aux normes des véhicules légers. Après analyse des résultats de simulation (voir la figure (III.8)), il est confirmé que le contrôleur a répondu de manière satisfaisante : aucun dépassement, un temps de réponse court, un angle de braquage dans les limites acceptables, et une erreur en régime permanent nulle.

5 Conclusion

Cette étude a montré que l'approche de commande par backstepping améliore significativement la stabilité, la précision et la réactivité d'un véhicule électrique face aux variations de conditions routières et de charge. Comparée aux régulateurs traditionnels comme le PI, cette méthode non linéaire s'est révélée plus robuste et efficace pour maintenir une performance optimale. Les simulations ont confirmé que le contrôleur backstepping permet de mieux gérer

les perturbations externes, assurant ainsi une conduite plus sûre et plus stable. Cette approche offre donc des perspectives prometteuses pour l'avenir de la technologie de commande des véhicules électriques, en répondant aux exigences croissantes en matière de sécurité et d'efficacité énergétique.

Conclusion général

Conclusion général

6 Conclusion général

Les véhicules électriques (VE) constituent une avancée significative dans le domaine de la mobilité durable, en offrant une alternative prometteuse aux véhicules traditionnels. En réponse à une demande croissante de performances améliorées et de respect des normes environnementales rigoureuses, les constructeurs automobiles se tournent de plus en plus vers cette technologie innovante.

Dans notre projet de fin d'études, nous avons choisi de contrôler la vitesse et le comportement d'un VE dans un virage. Nous avons d'abord exploré les généralités des véhicules électriques, y compris leurs classifications, leurs sources d'énergie, les convertisseurs statiques utilisés et la motorisation des VE. Par la suite, nous avons modélisé le véhicule électrique, en abordant à la fois les aspects électriques et dynamiques. Nous avons également modélisé le moteur à courant continu (MCC) et la batterie, et expliqué le fonctionnement du convertisseur Buck-Boost et du hacheur quatre quadrants.

Nous avons initialement contrôlé le VE en utilisant une commande classique de type PI. Enfin, nous avons étudié la commande backstepping pour contrôler la vitesse du VE et son comportement dans un virage, et nous avons simulé ces deux méthodes à l'aide de Matlab. Les résultats montrent que la commande backstepping offre des avantages prometteurs pour améliorer les performances des véhicules électriques, notamment en ce qui concerne la gestion de la vitesse et le comportement dans les virages. Cette méthode fournit une réponse rapide et précise aux variations des conditions de conduite grâce à sa capacité à gérer des dynamiques non linéaires complexes et à garantir une stabilité solide.

Les perspectives pour l'avenir sont vastes. L'incorporation d'algorithmes avancés de commande backstepping dans les futurs systèmes de contrôle des VE peut conduire à une meilleure efficacité énergétique et à une adaptation dynamique aux changements de terrain

et de charge. Cela ouvrira la voie à des véhicules électriques plus performants et sécurisés. De plus, les recherches futures pourraient se concentrer sur l'optimisation des composants et des systèmes de stockage d'énergie, tels que les batteries et les supercondensateurs, pour prolonger encore l'autonomie et la durabilité des VE. En conclusion, la commande backstepping et d'autres technologies avancées de contrôle offrent un potentiel considérable pour le développement de véhicules électriques plus efficaces, fiables et sûrs.

Bibliographie

- [1] JL Febin Daya, Padmanaban Sanjeevikumar, Frede Blaabjerg, Patrick W Wheeler, and Joseph Olorunfemi Ojo. Implementation of wavelet-based robust differential control for electric vehicle application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(12) :6510–6513, 2015.
- [2] Iqbal Husain. *Electric and hybrid vehicles : design fundamentals*. CRC press, 2021.
- [3] ARARIA Rabah. *Contribution à la Modélisation et la Commande d'un Véhicule Electrique Hybride à Architecture Série/Parallèle (Étude Théorique et Expérimentale)*. PhD thesis, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2020.
- [4] Tom Denton. *Electric and hybrid vehicles*. Routledge, 2020.
- [5] Yue Wang, Atriya Biswas, Romina Rodriguez, Zahra Keshavarz-Motamed, and Ali Emadi. Hybrid electric vehicle specific engines : State-of-the-art review. *Energy Reports*, 8 :832–851, 2022.
- [6] Dai-Duong Tran, Majid Vafaeipour, Mohamed El Baghdadi, Ricardo Barrero, Joeri Van Mierlo, and Omar Hegazy. Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains : Topologies and integrated energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119 :109596, 2020.
- [7] Camille-Laurie Normandeau. *Conception d'un agrégateur pour la gestion de recharge bidirectionnelle de véhicules électriques au Québec*. PhD thesis, École de technologie supérieure, 2023.
- [8] Ahmad Faraz, A Ambikapathy, Saravanan Thangavel, K Logavani, and G Arun Prasad. Battery electric vehicles (bevs). *Electric Vehicles : Modern Technologies and Trends*, pages 137–160, 2021.
- [9] Shichun Yang, Xinhua Liu, Li Shen, and Cheng Zhang. *Advanced Battery Management System for Electric Vehicles*. Springer, 2023.
- [10] Duo Yang, Li Wang, Kunjie Yu, and Jing Liang. A reinforcement learning-based energy management strategy for fuel cell hybrid vehicle considering real-time velocity prediction. *Energy Conversion and Management*, 274 :116453, 2022.
- [11] John T Warner. *The handbook of lithium-ion battery pack design : Chemistry, components, types, and terminology*. Elsevier, 2024.
- [12] Brian Ospina Agudelo. *Modélisation et méthodes basées sur l'expérience pour l'estimation de l'état de santé des batteries lithium-ion*. PhD thesis, CY Cergy Paris Université, 2022.
- [13] Qiao Yang, Tao Zeng, Caizhi Zhang, Wenjian Zhou, Lei Xu, Jiaming Zhou, Ping Jiang, and Shangfeng Jiang. Modeling and simulation of vehicle integrated thermal management system for a fuel cell hybrid vehicle. *Energy Conversion and Management*, 278 :116745, 2023.
- [14] Mohamed BENMAHDJOUR. *Modélisation et commande d'un véhicule électrique alimenté par un système PV/Batterie*. PhD thesis, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2022.
- [15] Fulin He and Hassan Fathabadi. Novel standalone plug-in hybrid electric vehicle charging station fed by solar energy in presence of a fuel cell system used as supporting power source. *Renewable Energy*, 156 :964–974, 2020.

-
- [16] Henry Martin, René Buffat, Dominik Bucher, Jannik Hamper, and Martin Raubal. Using rooftop photovoltaic generation to cover individual electric vehicle demand—a detailed case study. *Renewable and sustainable energy reviews*, 157 :111969, 2022.
- [17] Alvaro Omar Macias Fernandez. *Hybridation passive de la pile à combustible et supercondensateur pour les véhicules électriques*. PhD thesis, Université du Québec à Trois-Rivières, 2023.
- [18] Bouchra ABBOU and DJOUDI Boutkhil. *Modélisation d'un convertisseur DC-DC dans un système de stockage batterie Li-ion et supercondensateur*. PhD thesis, Directeur : Mr. M. BOUCHAOUR/Co-Directeur : Mr MERAD Lotfi, 2022.
- [19] L Ashok Kumar and S Albert Alexander. *Power converters for electric vehicles*. CRC Press, 2020.
- [20] Mena ElMenshawy and Ahmed Massoud. Development of modular dc-dc converters for low-speed electric vehicles fast chargers. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1) :1067–1083, 2021.
- [21] Aissam Riad Meddour. *Optimisation du dimensionnement et la conception d'une chaîne de traction (Batterie-Moteur) pour un véhicule électrique* / Theses. fr. PhD thesis, université Paris-Saclay, 2024.
- [22] Zhi Cao, Amin Mahmoudi, Solmaz Kahourzade, and Wen L Soong. An overview of electric motors for electric vehicles. In *2021 31st Australasian Universities power engineering conference (AUPEC)*, pages 1–6. IEEE, 2021.
- [23] Lichun Cai, Zili Liao, Shuguang Wei, and Jiaqi Li. Novel direct yaw moment control of multi-wheel hub motor driven vehicles for improving mobility and stability. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(1) :591–600, 2022.
- [24] Rokan Ali Ahmed and Enas Dawood Hassan. Modeling, design and control of speed dc motor using chopper.
- [25] Karim Negadi, Mohamed Boudiaf, Rabah Araria, and Lazreg Hadji. Improvement of the amplification gain for a propulsion drives of an electric vehicle with sensor voltage and mechanical speed control. *Smart Structures and Systems, An International Journal*, 29(5) :661–675, 2022.
- [26] Sarah Bouradi, Karim Negadi, Rabah Araria, Bachir Boumediene, and Mostefa Koulali. Design and implementation of a four-quadrant dc-dc converter based adaptive fuzzy control for electric vehicle application. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 9(3), 2022.
- [27] Dario Penco. *Contrôle véhicule autonome. Contrôle robuste et haute performance pour permettre les manœuvres à haute dynamique des véhicules autonomes*. PhD thesis, Université Paris-Saclay, 2022.
- [28] Amine Kennouche and Dounia Encadreur Saifia. *Commande non-PDC robuste pour le contrôle de la dynamique latérale d'un véhicule autonome*. PhD thesis, Université de Jijel, 2020.
- [29] Julien Saunier. Modèle de comportement latéral des véhicules légers fondé sur des forces. *Revue Ouverte d'Intelligence Artificielle*, 3(5-6) :451–476, 2022.
- [30] Chenning Wang, Ren He, Zhecheng Jing, and Shijun Chen. Coordinated path following control of 4wid-ev based on backstepping and model predictive control. *Energies*, 15(15) :5728, 2022.
- [31] Laëtitia Li. *Modélisation et contrôle d'un véhicule tout-terrain à deux trains directeurs*. PhD thesis, Université Paris sciences et lettres, 2021.

ملخص:

اليوم، يتجه العالم نحو اعتماد متزايد على المركبات الكهربائية، بهدف استبدال المركبات ذات محركات الاحتراق الداخلي، لتحقيق قيادة آمنة ومنع الحوادث المرورية، خاصة في المنعطفات. لتجنب هذه الحوادث، ركز عملنا على تنظيم سرعة السيارة الكهربائية ذات الدفع بالعجلتين (محرك التيار المستمر) باستخدام متحكم PI وتحكم Backstepping. تم تصميم النظام للحفاظ على سرعة مرجعية متغيرة، حتى أثناء الانعطاف بزواوية 30 درجة يتيح الجمع بين متحكم PI وتحكم Backstepping التعامل بفعالية مع اللاخطيات وعدم اليقين في نموذج المركبة، مما يضمن استقراراً واستجابة أفضل. أظهرت النتائج تحسناً كبيراً في دقة التحكم في السرعة في هذه الظروف الصعبة، مما يؤكد فعالية هذا النهج في التحكم.

الكلمات المفتاحية:

متحكم PI، Backstepping، مركبة كهربائية (EV)، محرك تيار مستمر (MCC)، لاخطيات، زاوية الانعطاف.

Abstract:

Today, the world is moving towards an increasing reliance on electric vehicles, intended to replace internal combustion engine vehicles, with the goal of ensuring safer driving and preventing road accidents, especially in curves. To avoid such incidents, our work has focused on regulating the speed of a two-wheel drive electric vehicle (DC motor) using a PI controller and Backstepping control. The system is designed to maintain a variable reference speed, even during a 30-degree turn. The combination of the PI controller and Backstepping control effectively manages the vehicle model's nonlinearities and uncertainties, thereby ensuring better stability and responsiveness. The results have shown a significant improvement in speed control accuracy under these challenging conditions, validating the effectiveness of this control approach.

Keywords:

PI controller, Backstepping, electric vehicle (EV), direct current motor (DC motor), nonlinearities, turning angle.

Résumé :

Aujourd'hui, le monde s'oriente vers une dépendance croissante aux véhicules électriques, destinés à remplacer les véhicules à moteur thermique, dans un souci de sécurité routière et de prévention des accidents, notamment dans les virages. Afin d'éviter ces incidents, notre travail s'est concentré sur la régulation de la vitesse d'une voiture électrique à deux roues motrices (MCC) en utilisant un régulateur PI et une commande par Backstepping. Le système est conçu pour maintenir une vitesse de référence variable, même lors d'un virage de 30 degrés. La combinaison du régulateur PI et de la commande par Backstepping permet de gérer efficacement les non-linéarités et les incertitudes du modèle du véhicule, assurant ainsi une meilleure stabilité et réactivité. Les résultats ont montré une amélioration significative de la précision du contrôle de la vitesse dans ces conditions difficiles, validant l'efficacité de cette approche de commande.

Mots clés :

Régulateur PI, Backstepping, véhicule électrique (VE), moteur à courant continu (MCC), non-linéarités, angle de virage