

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



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de la Technologie
Département d'Electrotechnique



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de
Master (LMD)

Spécialité : Automatique et systemes

Filière : automatique

Intitulé :

**Optimisation d'un contrôleur LQR par un algorithme a
évolution différentielle amélioré (Application pour le
contrôle d'une suspension active)**

Présenté par :

- **BOUZIANE Ouail Ahmed**
- **MEBARKI Allal**

Devant le jury composé de :

Président : LABANE CHRIF
Encadreur : MERAH Abdelkader
Examineur : MEKKAOUI Mohamed

Soutenu le 28/05/2025

Promotion 2024-2025

Dédicace

Je dédie ce travail :

A ma tendre mère qui m'a entouré d'amour, que dieu la garde.

A mon très cher père qui m'a aidé à devenir ce que je suis aujourd'hui, que dieu le protège.

A mon frère, mes sœurs et mes neveux.

A tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et universitaire.

A toute ma famille.

BOUZIANE Ouail Ahmed

Dédicace

*Je dédie ce travail : A mes très chers parents que dieu les
garde et les protège pour leurs soutien moral et financier,
pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

A mon frère et ma sœur

A tous mes amis et mon binôme

A tous ce que j'aime et qui m'aiment.

MEBARKI Allal

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos remerciements les plus vifs à notre encadreur Dr. Abdelkader Merah, qui a su nous guider et nous aider dans ce travail avec beaucoup de tact et de gentillesse et qui nous a permis de découvrir un domaine très intéressant celui des systèmes d'aide à la conduite. Qu'il trouve ici notre estime et notre profond respect.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé, à titre professionnel ou personnel à la réalisation de ce travail.

Nos remerciements iront également vers tous ceux qui ont accepté avec bienveillance de participer au jury de ce mémoire

Sommaire

INTRODUCTION	11
I. (VEHICULE ELECTRIQUE ET LEUR SYSTEME DE SUSPENSION) 15	
I.1. INTRODUCTION	17
I.2. ARCHITECTURES DES VEHICULES ELECTRIQUES	17
I.3. MOTEUR ELECTRIQUE INTEGRE A LA ROUE	18
I.3.1. Roue électrique basée sur DVA avec un moteur électrique	19
I.4. LA SUSPENSION DU VEHICULE	19
I.5. MODELISATION DU VEHICULES ET SON ENVIRONNEMENT.....	20
I.5.1. MODELISATION DU VEHICULE	20
I.5.1.1. MODELE DE QUART DU VEHICULE.....	21
I.5.2. Modèle dynamique de quart du véhicule électrique avec la roue électrique à base de DVA.....	21
I.6. PERFORMANCES DE SYSTEME DU SUSPENSION ETUDIE	24
I.6.1. Confort.....	24
I.6.2. Débattement de la suspension	25
I.6.3. Tenue de route	25
I.6.4. Force dynamique de l'IWM.	25
I.6.5. Modélisation de profile de la route	26
I.6.5.1. Ralentisseur de type dos d'âne.....	26
I.7. CONCLUSION	27
II. (L'ALGORITHME EVOLUTIONNAIRE DIFFERENTIEL (DE))	28
II.1. INTRODUCTION	29
II.2. L'ALGORITHME EVOLUTIONNAIRE DIFFERENTIEL (DE)	29
II.3. APPLICATION DE DE POUR L'OPTIMISATION DES SYSTEMES ET DES CONTROLEURS	30
II.4. ÉTAPES DU DE ET FONDEMENTS EVOLUTIONNAIRES.....	30
II.4.1. Initialisation.....	30

II.4.2. Mutation	31
II.4.3. Croisement (Crossover)	31
II.4.4. Sélection.....	32
II.4.5. Boucle évolutive.....	32
II.5. APPLICATION SIMPLE AVEC DE (CONVERGENCE EN 5 ITERATIONS)	32
II.6. : STRATEGIES D'AMELIORATION ET ADAPTATION PARAMETRIQUE DE DE CLASSIQUE.....	36
II.6.1. 1. Adaptation dynamique des paramètres F et Cr	36
II.6.2. 2. Mutation guidée par le meilleur individu	37
II.6.3. 3. Réduction progressive de la taille de la population.....	38
II.7. FONCTION DE RASTRIGIN	38
III. (SYNTHESE DES LOIS DE COMMANDE)	43
III.1. INTRODUCTION.....	45
III.1.1. MECANISME DE COORDINATION ET DE CONTROLE DE SYSTEME DE LA SUSPENSION	45
III.1.1.1. <i>Contrôle de la force d'actionneurs de système DVA et de la suspension du véhicule</i>	<i>45</i>
III.2. CONCLUSION	47
IV. (SIMULATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS) ...	48
IV.1. INTRODUCTION.....	49
IV.2. SIMULATION ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS.....	49
IV.2.1.1. <i>Situation d'essai</i>	<i>50</i>
IV.3. CONCLUSION	56
V.CONCLUSION	58
VI. BIBLIOGRAPHIE.....	61
VI.1. BIBLIOGRAPHIE GENERALE.....	63
VII. ANNEXES.....	69

Liste des symboles

x_s	: Déplacement vertical de châssis
$\dot{x}_s$	: Vitesse de déplacement vertical de châssis
x_w	: Déplacement vertical de la roue
$\dot{x}_w$	: Vitesse de déplacement vertical de la roue
$q(t)$	: Profil vertical de la route
f_s	: Signal de commande appliqué sur la suspension du véhicule électrique
v_x	: Vitesse du véhicule
m_s	: $1/4$ de la masse suspendue
m_w	: Masse de la roue
m_e	: Masses de moteur électrique
k_t	: Coefficient de rigidité de pneu
k_s	: Coefficient de rigidité de la suspension
c_s	: Coefficient d'Amortissement de la suspension
k_d	: Coefficient de rigidité de ressort de DVA
c_d	: Coefficient d'Amortissement de DVA
m_{es}	: Masse de stator
m_{er}	: Masse de rotor

Liste des tableaux

Tableau II-1: Paramètres de l'algorithme DE utilisés.....	33
Tableau II-2: Évolution de la population et des valeurs de la fonction objectif au cours des itérations	35
Tableau IV-1 Modèles quart de véhicule avec les différentes configurations de la roue électrique.....	50
Tableau VII-1 : Spécifications du véhicule « modèle de quart du véhicule».....	71

Table des illustrations

Figure I-1. Synoptique du système de traction étudié.....	18
Figure I-2. Roue électrique basée sur DVA avec moteur électrique.....	19
Figure II-3. Modèle quart de véhicule avec roue électrique à base de DVA.	22

Figure I-4. Profil du ralentisseur de type dos d'âne	27
Figure II-1. Évolution du meilleur coût par itération	36
Figure II-2 : Représentation tridimensionnelle de la fonction de Rastrigin en deux dimensions.....	39
Figure II-3 : Évolution du meilleur coût $f\mathbf{x}$ en fonction des itérations pour le DE classique et le DE amélioré	40
Figure II-4 : Zoom sur l'évolution du meilleur coût $f\mathbf{x}$: comparaison détaillée de la phase de convergence	40
Figure II-5 : Variation dynamique du facteur de mutation F au cours des itérations	41
Figure II-6 : Évolution dynamique du taux de croisement Cr au cours.....	41
Figure II-7: Réduction progressive de la taille de la population NP au cours des itérations.....	42
Figure IV-1 : Schéma de principe de système de contrôle proposé pour la simulation ..	49
Figure IV-2 : Profile de la route.....	50
Figure IV-3 : L'accélération verticale du châssis	51
Figure IV-4. RMS de l'accélération verticale du châssis.....	51
Figure IV-5. Déflexion de la suspension	52
Figure IV-6 : RMS de la déflexion de la suspension.....	52
Figure IV-7 : Charge dynamique des pneus	53
Figure IV-8. RMS de la charge dynamique des pneus.....	53
Figure IV-9 La force dynamique d'IWM.....	54
Figure IV-10. RMS de la force dynamique d'IWM.....	54
Figure IV-11. La force de l'actionneur de la suspension.....	55
Figure IV-12. La force de l'actionneur de DVA	55

INTRODUCTION

Aujourd'hui, les véhicules équipés de moteurs à combustion interne (ICE) dominent encore largement le secteur des transports. Ils présentent plusieurs avantages, tels qu'une capacité à fournir une puissance élevée et à fonctionner de manière stable sur de longues périodes, même dans des conditions extrêmes. Cependant, ces véhicules posent des problèmes environnementaux majeurs, en générant d'importantes émissions polluantes et en consommant massivement des ressources fossiles. Pour des raisons économiques et environnementales, de nombreuses grandes agglomérations ont instauré des réglementations de plus en plus strictes restreignant l'accès des véhicules thermiques aux centres urbains. En réponse à ces défis, le secteur du transport se réoriente progressivement vers des solutions basées sur les véhicules électriques (VE) ou hybrides, en remplaçant les moteurs thermiques traditionnels par des moteurs électriques ou des systèmes hybrides intégrant d'autres sources d'énergie comme les piles à combustible, les volants d'inertie ou encore les moteurs à air comprimé.

Le véhicule électrique constitue un système dynamique complexe, dont le comportement est influencé à la fois par sa propre structure et par les conditions d'interaction avec l'environnement, notamment les caractéristiques de la route et les performances des pneumatiques. Les infrastructures routières présentent une forte hétérogénéité : la taille, la forme et la fréquence des irrégularités de la chaussée varient considérablement selon le type de réseau (autoroutes, routes nationales, chemins ruraux, etc.) et l'état d'usure du revêtement. Ces aspérités engendrent des perturbations verticales aléatoires sur les roues, générant ainsi des accélérations susceptibles d'être directement transmises au châssis lorsque celui-ci est rigide par rapport aux roues. Cette transmission amplifie les sollicitations mécaniques sur la structure et réduit le confort des passagers, ce qui justifie la nécessité de recourir à des systèmes de suspension performants.

Diverses configurations de suspensions ont été analysées et il a été démontré que les suspensions actives offrent des performances supérieures en matière de suppression des vibrations verticales [Hu-14]. Ces dernières années, les véhicules électriques ont connu une évolution significative grâce à leur meilleure efficacité énergétique et leur moindre impact environnemental par rapport aux véhicules thermiques [Sun-16], [Wu-16], [Xio-18], [Tian-17]. Toutefois, les solutions basées sur un moteur central, bien qu'inspirées des architectures traditionnelles, restent complexes en raison du nombre important de composants mécaniques. Cela pousse les constructeurs à explorer de nouvelles configurations pour leurs produits électriques [Sac-16], [Xio-17].

Dans ce contexte, l'intégration de moteurs dans les roues (IWM – In-Wheel Motors) est apparue comme une solution prometteuse. Cette technologie améliore l'agencement spatial du véhicule [Geo-16], facilite le contrôle de la dynamique [Wan-16], favorise la conservation énergétique [Hun-16] et introduit une redondance dans la propulsion [Zha-16]. Cependant, elle soulève également des défis techniques majeurs. L'intégration du système de propulsion directement dans les roues augmente considérablement la masse non suspendue, pouvant ajouter jusqu'à 30 kg ou plus par roue [Sch-06]. Cette augmentation impacte négativement les performances dynamiques verticales du véhicule, en réduisant notamment le confort de conduite [Wan-11], [Kat-16], en accélérant l'usure des composants [Tok-14], et en limitant l'efficacité des stratégies classiques de contrôle de suspension [Tan-16].

Face à ces défis, cette étude s'articule autour des contributions suivantes :

Chapitre I : Véhicule Électrique et leur Système de Suspension

Ce chapitre présente les architectures des véhicules électriques, les principes fondamentaux des systèmes de suspension, ainsi que les différentes configurations de moteurs-roues électriques.

Chapitre II : L'Algorithme Évolutionnaire Différentiel (DE)

Il expose les fondements théoriques de l'algorithme d'évolution différentielle, en mettant l'accent sur ses mécanismes d'optimisation ainsi que sur ses évolutions récentes pour améliorer l'efficacité et la convergence.

Chapitre III : Synthèse des Lois de Commande (LQR)

Ce chapitre décrit la conception des lois de commande par la méthode LQR (Linear Quadratic Regulator), en vue de coordonner efficacement la suspension active et le système d'absorption dynamique des vibrations (DVA).

Chapitre IV : Simulation et Interprétation des Résultats

Il présente les résultats des simulations, incluant l'analyse comparative des différentes configurations de la roue électrique et l'évaluation de la performance globale du système optimisé.

Ce mémoire vise ainsi à proposer une approche innovante combinant suspension active, moteurs-roues électriques, et techniques d'optimisation avancées, afin d'améliorer simultanément le confort de conduite, la tenue de route et la durabilité des véhicules électriques modernes.

**I.
(VEHICULE ELECTRIQUE ET
LEUR SYSTEME DE
SUSPENSION)**

I.1. INTRODUCTION

Ce premier chapitre présente la revue de littérature qui a été réalisée sur les architectures des véhicules électriques, la suspension et les configurations des moteurs-roues électriques intégrés à ces véhicules. Une étude profonde sur les suspensions montrera une vue d'ensemble sur le rôle, les architectures, les catégories de suspensions les plus répandues et les différentes technologies de suspensions passives, actives et Semi-actives sont déjà présentée par les étudiantes de master 2 automatiques et systèmes [Med-20] et [Che-21]. Nous cherchons dans ce travail d'étudier les performances des dynamiques du système de la suspension du véhicule électrique qui regroupe la suspension de véhicule électrique et la nouvelle configuration de la roue électrique qui joue le rôle d'un absorbeur dynamique des vibrations (DVA).

I.2. ARCHITECTURES DES VEHICULES ELECTRIQUES

Les architectures des véhicules électriques ont évolué en plusieurs étapes à partir du modèle traditionnel thermique. Dans un premier temps, certaines architectures reprennent directement la structure des véhicules classiques. Cette approche permet une transition plus facile, mais elle entraîne une réduction du couple et de la puissance maximaux, ainsi qu'un creux de couple, résultant en une mauvaise exploitation des caractéristiques propres aux moteurs électriques. La suppression de la boîte de vitesses et de l'embrayage constitue une seconde évolution. Bien que cette solution reste encore proche du modèle thermique, elle présente certains inconvénients, tels qu'un encombrement important de la fonction motrice, des pertes de rendement, des problèmes de bruit et de fiabilité, et l'absence de contrôle indépendant des roues. Une avancée plus marquante consiste à placer les moteurs à proximité des roues. Cette configuration permet un contrôle indépendant des roues (deux ou quatre), tout en utilisant des réducteurs simples si nécessaire. Cependant, elle impose une rupture architecturale du véhicule, pose des problèmes de rendement des réducteurs et entraîne un encombrement local.

Enfin, l'architecture la plus aboutie consiste à intégrer les moteurs directement dans les roues. Cette solution assure un contrôle totalement indépendant, une grande compacité, et un rendement optimal de la transmission. Néanmoins, elle

génère des difficultés d'intégration et impose des contraintes mécaniques sévères sur les moteurs, notamment en l'absence de réducteur.

Le système de traction étudié dans ce travail est celui représenté dans la Figure I.1. Nous considérons que ce véhicule est propulsé par quatre roues motrices. Chaque roue intègre dans sa jante un moteur alimenté par une batterie à travers un onduleur triphasé. L'utilisation des moteurs-roues permet la suppression de toutes les parties mécaniques liées à la transmission (différentiel, boîte de vitesse, embrayage, ...etc.) de commander indépendamment les roues et en même temps, de libérer de l'espace dans le véhicule, notamment utilisable par la batterie [Mer-22].

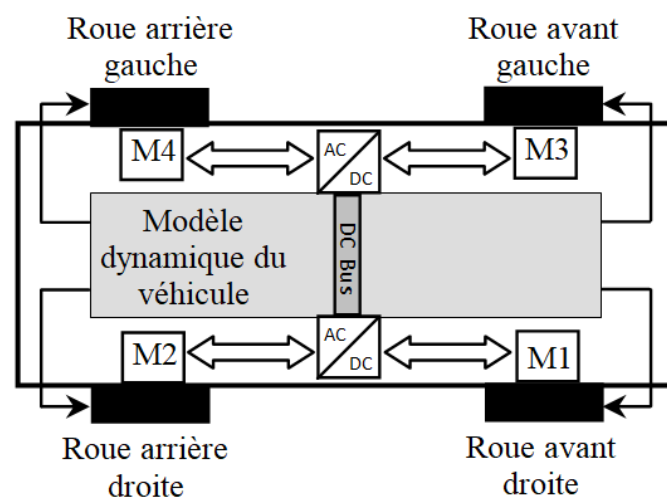


Figure I-1. Synoptique du système de traction étudié

I.3. MOTEUR ELECTRIQUE INTEGRE A LA ROUE

Intégrer un moteur électrique directement dans les roues d'un véhicule électrique fait partie des idées a priori géniales tant cela peut apporter de bénéfices. La roue électrique est entraînée par un moteur électrique. Dans une roue électrique conventionnelle, le stator et le rotor du sont reliés rigidement à l'arbre de la roue et au moyeu, respectivement. Lorsque l'excitation de la route agit sur la roue, le moteur est directement choqué en raison des connexions rigides, ce qui entraîne une vibration détériorée de la roue électrique. Dans ce travail, l'IWM est considéré comme un absorbeur de vibrations dynamiques (DVA), qui est isolé de l'arbre de roue et du moyeu à l'aide d'un ressort et d'un amortisseur avec un actionneur contrôlable, les connexions rigides ci-dessus étant remplacées par des connexions flexibles.

I.3.1. Roue électrique basée sur DVA avec un moteur électrique

Comme le montre la figure I.2a, pour réaliser la connexion flexible du stator du moteur, un ressort est introduit pour relier l'extension du stator à la masse suspendue, et un amortisseur de la roue est installé dans l'extension du stator et gainé à l'extérieur de l'arbre de roue. L'amortisseur de roue est doté d'un actionneur contrôlable, qui peut être contrôlé pour supprimer activement les vibrations de la roue. Notamment, l'arbre de roue pénètre à travers le stator-creux comme représenté sur la figure I.2b.

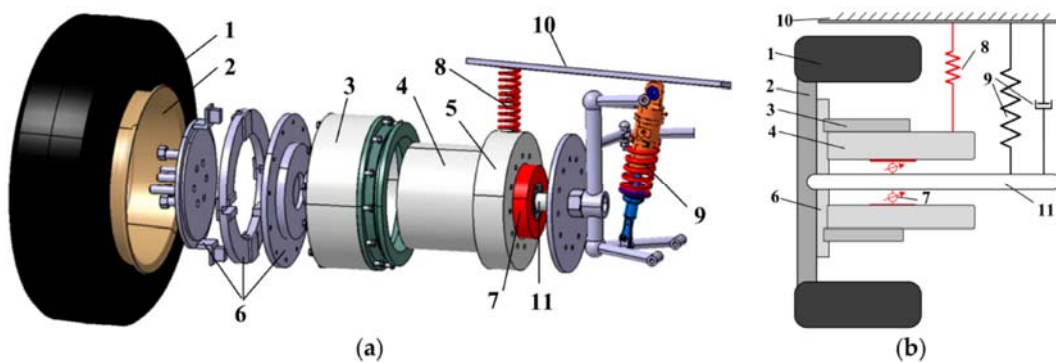


Figure I-2. Roue électrique basée sur DVA avec moteur électrique.

(a) Vue éclatée ; (b) Diagramme schématique.

Avec 1-roue ; 2- Moyeu du pneumatique ; 3-Rotor de moteur ; 4-stator de moteur ; 5-extension de stator ; 6-Paire translationnelle ; 7-Amortisseur de DVA avec un actionneur contrôlable ; 8- Ressort de DVA ; 9-Suspension; 10- Masse suspendue ; 11- Arbre de roue.

I.4. LA SUSPENSION DU VEHICULE

Sur un véhicule, la suspension est le système reliant les masses non suspendues (typiquement la roue, les systèmes de freinage, d'entraînement de roue, ... etc.) aux masses suspendues (à savoir le châssis, les passagers et tous les composants du véhicule fixés au châssis). La suspension est un élément essentiel des véhicules de transport terrestre, elle a pour but d'assurer une liaison des roues au sol en toutes circonstances. En absorbant les chocs dus à l'état de la route, elle permet d'augmenter la longévité du moteur et du châssis, en plus d'assurer

un confort au conducteur et aux passagers. De plus, elle doit assurer au véhicule une bonne dynamique à la conduite, ceci signifie que son comportement doit être sain en ce qui concerne la liaison au sol et que celui-ci doit réagir conformément aux attentes de son conducteur, notamment dans les phases de virage, freinage et accélération. Ses différentes manœuvres sont à l'origine de plusieurs mouvements verticaux et angulaires du véhicule. [Anh-11].

De nombreux composants sont implantés dans la suspension, ces éléments possèdent des rôles différents mais surtout complémentaires. Les principaux sont listés ci-dessous [Mos-12], [Faw-17].

Le ressort monté précontraint et en parallèle avec l'amortisseur, sert à absorber les chocs grâce à sa déformation élastique. Il restitue l'énergie accumulée lors de sa compression permettant à la suspension de regagner continuellement sa position d'équilibre initiale.

L'amortisseur est l'une des pièces maîtresses du système de suspension du véhicule. Il y en a quatre par voiture et fonctionne, généralement, en duo avec le ressort de suspension. Si le ressort sert à maintenir les roues de la voiture en contact avec le sol, l'amortisseur, lui, sert, comme son nom l'indique, à amortir les mouvements du véhicule. Ensemble, ils assurent le confort à bord de la voiture et la bonne tenue de route de cette dernière. Les quatre amortisseurs permettent également à la voiture de rester en équilibre lors des accélérations, des freinages, des virages ou lorsque le véhicule subit des petits chocs (route abîmée, nids de poule, bosses). En résumé, l'amortisseur sert à freiner l'action du ressort. Il stabilise les mouvements de la suspension et jugule les mouvements vifs du ressort. Il peut, selon la situation, se comprimer ou se détendre.

I.5. MODELISATION DU VEHICULES ET SON ENVIRONNEMENT

I.5.1. MODELISATION DU VEHICULE

Un véhicule électrique est un ensemble de corps reliés entre eux par plusieurs liaisons visant d'une part à assurer le mouvement du châssis mais aussi le confort des passagers qu'il transporte. Il est composé d'un châssis, et d'un système de liaison au sol comprenant : les pneumatiques, les moteurs-roues, les trains et les suspensions.

Le système de la suspension comprend le ressort, l'amortisseur (passif/ contrôlé), les pneumatiques et les moteurs-roues. La modélisation de la suspension d'un véhicule repose sur l'utilisation des lois mécaniques. Il faut noter que ce modèle doit être aussi précis pour refléter le plus fidèlement le comportement de la suspension d'une part et doit être simple pour faciliter l'étape de l'élaboration de la loi de commande d'autre part.

Le modèle présenté dans ce chapitre est le modèle de « quart du véhicule électrique » prend en compte uniquement les mouvements verticaux de la caisse et de la masse non suspendue (roue électrique) [Jea-19].

1.5.1.1. MODELE DE QUART DU VEHICULE

Le modèle de quart du véhicule est souvent utilisé lorsque la modélisation de la suspension est envisagée. Ce modèle peut être représenté essentiellement par la masse suspendue qui représente le châssis, la masse non suspendue qui prend en compte les masses d'éléments tels que le moteur à roue, le ressort comme élément élastique et l'amortisseur comme élément dissipatif. Le comportement vertical d'un véhicule peut être étudié de manière simplifiée avec ce modèle. La précision du modèle est étonnamment proche de modèle demi-véhicule ou véhicule complet. Le seul inconvénient de ce modèle est que le tangage et les mouvements de roulis du corps ne peuvent pas être étudiés [Sam-06]. Des hypothèses simplificatrices peuvent être utilisées pour simplifier le modèle à savoir le pneu est modélisé par un ressort linéaire (facteur d'amortissement des pneus est supposé être nul). Le ressort de suspension et les forces d'amortissement sont considérés comme linéaires. De petits déplacements sont supposés autour du point de charge nominale. En d'autres termes, les perturbations de la route sont suffisamment petites pour ne pas causer de non-linéarité au système de suspension. En plus de cela, le seul apport au système est la perturbation de la route et le pneu est toujours en contact avec la route.

1.5.2. Modèle dynamique de quart du véhicule électrique avec la roue électrique à base de DVA

Dans la roue électrique conventionnelle (IWM), le moteur est relié rigidement à la roue et est considéré comme faisant partie de la masse non suspendue, ce qui a pour effet d'augmenter significativement cette masse. Cette augmentation dégrade

les performances dynamiques du véhicule en amplifiant les charges transmises au châssis et en réduisant l'efficacité de la suspension.

Pour remédier à cet inconvénient, dans la roue électrique à base de DVA utilisée, la connexion rigide entre le stator du moteur et l'arbre de la roue est remplacée par une connexion flexible, conférant au moteur un degré de liberté de translation dans la direction verticale. Par conséquent, les roues électriques basées sur le DVA peuvent être généralement modélisées comme illustré à la figure II.4 [Mer-22].

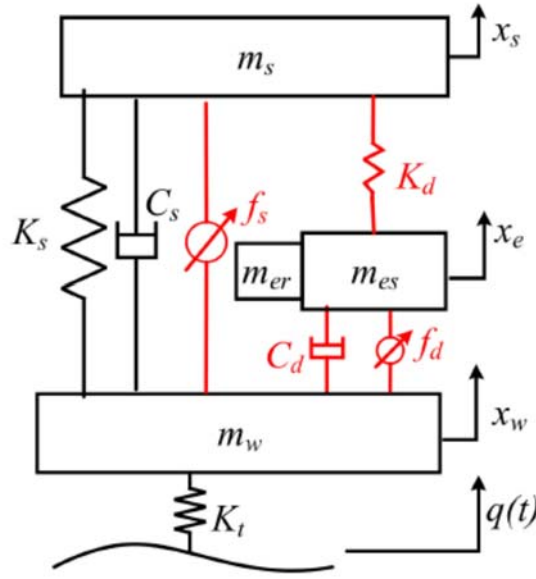


Figure I-3. Modèle quart de véhicule avec roue électrique à base de DVA.

L'équation dynamique du mouvement du système peut être représentée par des équations mathématiques. Les équations du mouvement régissant le modèle mathématique ci-dessus sont expliquées ci-dessous [Mer-22] :

Équation de masse suspendue :

$$m_s \ddot{x}_s + k_s (x_s - x_w) + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_w) + k_d (x_s - x_e) - f_s = 0 \quad I-1$$

Équation de masse non suspendue :

$$m_w \ddot{x}_w + k_s (x_w - x_s) + c_s (\dot{x}_w - \dot{x}_s) + c_d (\dot{x}_w - \dot{x}_e) + k_t (x_w - q(t)) + f_s + f_d = 0 \quad I-2$$

Équation de la masse du moteur électrique :

$$m_e \ddot{x}_e + c_d (\dot{x}_e - \dot{x}_w) + k_d (x_e - x_s) - f_d = 0 \quad I-3$$

Où

- x_s : Le déplacement vertical de châssis
- x_w : Le déplacement vertical de la roue
- x_e : Le déplacement vertical du moteur
- $q(t)$: Le profil de la route
- m_s : $1/4$ de la masse de châssis
- m_w : La masse de la roue
- m_e : La masse du moteur
- k_t : Coefficient de rigidité verticale du ressort du pneu
- k_s : Coefficient de rigidité verticale du ressort de la suspension
- c_s : Coefficient de rigidité verticale de l'amortisseur
- c_s : Coefficient de rigidité verticale du ressort de DVA
- c_d : Coefficient de rigidité verticale de l'amortisseur de DVA
- f_d : La force produite par l'actionneur DVA.
- f_s : La force produite par l'actionneur de suspension.

Nous définissons les variables d'état du modèle de quart du véhicule électrique comme suit :

$$x = [\dot{x}_w \quad \dot{x}_e \quad \dot{x}_s \quad x_s - x_w \quad x_s - x_e \quad q - x_w]^T \quad I-4$$

Les équations (II.3) à (II.5) peuvent être exprimées par une équation d'espace d'état comme :

$$\dot{x} = A x + B u + G w \quad I-5$$

Avec

$$A = \begin{bmatrix} -(c_s + c_d)/m_w & c_d/m_w & c_s/m_w & k_s/m_w & 0 & k_t/m_w \\ c_d/m_e & -c_d/m_e & 0 & 0 & k_d/m_e & 0 \\ c_s/m_s & 0 & -c_s/m_s & -k_s/m_s & -k_d/m_s & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -1/m_w & 0 & 1/m_s & 0 & 0 & 0 \\ -1/m_w & 1/m_e & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$G = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$$

$$u = [f_s \ f_d]^T$$

$$w = q(t)$$

I.6. PERFORMANCES DE SYSTEME DU SUSPENSION ETUDIE

La suspension est le système qui assure la liaison verticale entre la roue et la caisse. Elle doit porter le véhicule électrique, assurer le contact entre les pneumatiques et le sol, et isoler le châssis des perturbations générées à l'interface roue-sol. De ce fait elle doit agir comme un filtre afin d'éliminer les fréquences de vibrations indésirables pour assurer la bonne tenue de route et le confort des passagers. Pour atteindre un tel objectif, un compromis est nécessaire entre confort et tenue de route, suivant le type de suspension utilisée (passive ou active), différentes performances sont atteintes, la sécurité et le confort des passagers [Med-20].

I.6.1. Confort

Le confort correspond à l'équilibre vertical du véhicule électrique et caractérise sa capacité à transmettre et à filtrer les vibrations principalement issues des irrégularités de la route aux passagers. Comme évoqué auparavant, un passager peut ressentir plusieurs types de malaise, selon l'accélération et les vibrations verticales transmises au passager. La recherche du confort passe par la diminution des mouvements de la caisse [Hus-10]. Le confort peut être évalué par l'accélération de la masse suspendue (AMS).

$$a_s = \ddot{x}_s \quad I-6$$

I.6.2. Débattement de la suspension

Technologiquement, les éléments constituant la suspension d'un véhicule disposent d'un débattement limité. Afin d'éviter les chocs qui surviennent lorsque la suspension arrive en fin de course, les lois de commande élaborées doivent prendre en compte le débattement maximal des suspensions. Le but est donc de contraindre le débattement à rester dans un certain intervalle [Mer-22]. Alors, lors de la conception d'une suspension, il est important de minimiser la déflexion de la suspension (DS) qui peut être évaluée par :

$$d_s = x_s - x_w \quad I-7$$

I.6.3. Tenue de route

La tenue de route traduit l'équilibre latéral du véhicule en virage ou lors d'un changement de direction, mais aussi sa capacité à fournir une force longitudinale (en cas d'accélération ou de freinage) et/ou latérale (en cas de virage) entre le pneu et la route pour résister aux perturbations extérieures ou répondre à des commandes du conducteur. Dans la majorité des travaux de recherche, le pneu est modélisé par un ressort linéaire et son amortissement est négligé. La déflexion du pneu (DP) est donc utilisée comme mesure représentative de la tenue de route du véhicule [Mer-22]. Par conséquent, la charge dynamique des pneus (CDP) doit également être minimisée.

$$F_w = k_t (x_w - q) \quad I-8$$

I.6.4. Force dynamique de l'IWM.

La force dynamique d'IWM peut être quantifiée en utilisant l'accélération verticale de moteur électrique (IWM) multiplié par sa mass, cette dynamique doit être supprimée pour être aussi petite que possible. Elle est définie comme :

$$F_e = m_e \ddot{x}_e \quad I-9$$

Afin d'améliorer les performances de vibration du système de suspension du véhicule et du système d'absorption dynamique des vibrations (DVA) dans la roue, les quatre indices d'évaluation ci-dessus, a_s , d_s , F_w et F_e , doivent être

optimisés. Les quatre indices d'évaluation sont définis comme les variables de sortie pour satisfaire l'optimisation des performances. C'est-à-dire:

$$y = [a_s \quad d_s \quad F_w \quad F_e] \quad I-10$$

Ainsi, le système de contrôle, y compris le modèle de quart de véhicule et les variables de sortie, peut être exprimé par les équations d'espace d'état suivantes :

$$y = Cx + Du \quad I-11$$

Avec

$$C = \begin{bmatrix} c_s/m_s & 0 & -c_s/m_s & -k_s/m_s & -k_d/m_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_t \\ c_d & -c_d & 0 & 0 & k_d & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 1/m_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

I.6.5. Modélisation de profile de la route

L'étude dynamique et vibratoire d'un véhicule excité par la rugosité de la route, est généralement définie comme un domaine vibratoire complexe. La rugosité de la route est une caractéristique importante, car elle affecte non seulement la qualité de roulement, mais aussi elle peut causer des dommages matériels sur les différents organes mécaniques et électromécaniques, en particulier dans la partie de la suspension et le moteur à roue. [Pun-17].

I.6.5.1. Ralentisseur de type dos d'âne

Dans ce cas, on suppose que le véhicule avance avec une vitesse constante V_x dans la direction X horizontale. On s'intéresse au comportement du véhicule électrique lorsque celui-ci passe un ralentisseur de type dos d'âne. Le profil de route utilisé est une bosse qui apparaît entre 2 secondes et 2.1 secondes.

Cette bosse est générée par une fonction cosinus afin d'assurer une montée et une descente progressives sans discontinuités. La hauteur maximale atteinte par la bosse est de 10 centimètres. Mathématiquement, le déplacement vertical de la route est défini par l'équation suivante [Pun-17]-[He-08]. :

$$q(t) = 0.05 \times (1 - \cos(2\pi(t - 2)/(0.1))) \quad \text{pour } 2 \leq t \leq 2.1$$

I-12

Le profil temporel obtenu est illustré dans la Figure I.4.

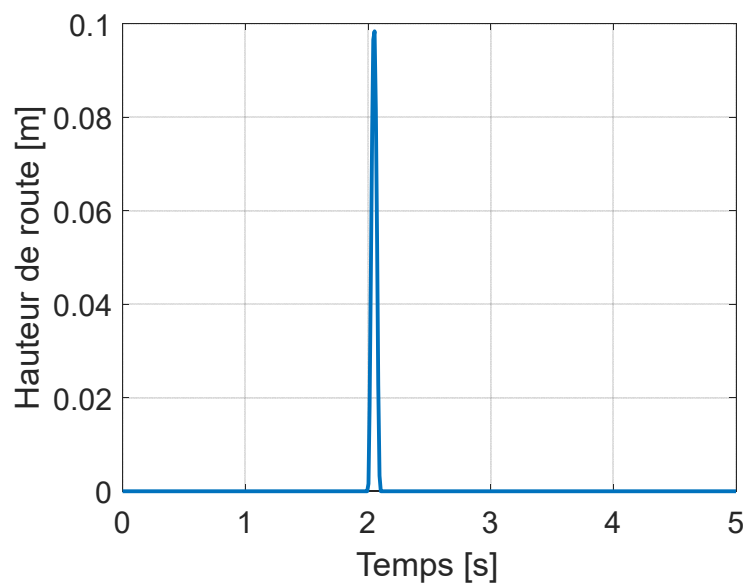


Figure I-4. Profil du ralentisseur de type dos d'âne

I.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons modélisés le système de suspension du véhicule électrique qui regroupe la suspension du véhicule et la nouvelle configuration de moteur à roue en vue de sa commande. Pour cela, le modèle de quart du véhicule a été présenté ainsi que les différents types de suspensions utilisés. Par la suite, nous allons introduire des techniques de commande qui génèrent l'action de commande de l'actionneur afin d'améliorer les performances des dynamiques verticales du véhicule électrique.

II. (L'ALGORITHME EVOLUTIONNAIRE DIFFERENTIEL (DE))

II.1. INTRODUCTION

Les algorithmes évolutionnaires (EA) sont des méthodes d'optimisation qui s'inspirent du fonctionnement de l'évolution naturelle observée dans le monde vivant. Ils imitent des mécanismes tels que la sélection naturelle, la reproduction, les mutations génétiques et la survie des individus les plus adaptés à leur environnement. Le principe de base est de faire évoluer progressivement une population de solutions pour améliorer leurs performances. Ces algorithmes sont particulièrement utiles pour résoudre des problèmes complexes, notamment ceux qui sont non linéaires, difficiles à modéliser mathématiquement, ou pour lesquels il n'existe pas de dérivées exploitables. Parmi les familles les plus connues d'algorithmes évolutionnaires, on trouve :

- les algorithmes génétiques (GA), qui reproduisent les mécanismes de croisement et de mutation génétique ;
- les stratégies d'évolution (ES), qui se concentrent davantage sur l'adaptation des paramètres de mutation ;
- la programmation évolutionnaire (EP), qui est axée sur l'évolution d'états finis
- l'algorithme évolutionnaire différentiel (DE), qui utilise des opérations de différence vectorielle pour générer de nouvelles solutions.

II.2. L'ALGORITHME EVOLUTIONNAIRE DIFFERENTIEL (DE)

L'algorithme évolutionnaire différentiel (DE) est une méthode d'optimisation aléatoire qui cherche à trouver la meilleure solution possible en utilisant des opérations simples sur des vecteurs, comme des additions et des soustractions. Son fonctionnement repose sur des principes très accessibles, ce qui le rend facile à programmer et à comprendre. Le DE est particulièrement reconnu pour son efficacité lorsqu'il s'agit de résoudre des problèmes difficiles, notamment ceux qui sont non linéaires, complexes, ou qui possèdent plusieurs optima. Contrairement à d'autres méthodes qui risquent de rester bloquées sur des solutions intermédiaires (appelées minima locaux), le DE parvient généralement à explorer intelligemment tout l'espace de recherche, augmentant ainsi les chances de trouver la meilleure solution globale.

II.3. APPLICATION DE DE POUR L'OPTIMISATION DES SYSTEMES ET DES CONTROLEURS

L'optimisation des systèmes et des contrôleurs joue un rôle essentiel dans le domaine du contrôle des systèmes dynamiques. Les performances d'un contrôleur dépendent en grande partie des paramètres choisis, comme les gains ou les coefficients de pondération. Trouver les bons réglages peut être une tâche difficile, surtout lorsque le système est complexe. L'algorithme évolutionnaire différentiel (DE) offre une solution efficace pour automatiser ce processus. Il permet de rechercher automatiquement les meilleures valeurs de paramètres en minimisant une fonction de coût, qui peut représenter des critères importants comme la consommation d'énergie, le dépassement, le temps de réponse ou la stabilité du système. Grâce à sa capacité d'exploration intelligente, DE réduit le besoin d'intervention humaine et évite les sélections subjectives de paramètres, garantissant ainsi une optimisation plus fiable et plus performante.

II.4. ÉTAPES DU DE ET FONDEMENTS EVOLUTIONNAIRES

L'algorithme évolutionnaire différentiel (DE) s'appuie sur des principes qui reproduisent les mécanismes de l'évolution naturelle, tels que la diversité, la mutation, la recombinaison et la sélection naturelle. Chaque phase de l'algorithme correspond à un processus biologique fondamental et permet à la population de solutions d'évoluer vers de meilleures performances au fil des générations.

II.4.1. Initialisation

La première étape de l'algorithme DE consiste à générer aléatoirement une population d'individus. Chaque individu est représenté par un vecteur de dimension D , contenant les différentes variables du problème à optimiser. Formellement, chaque individu est donné par :

$$x_i^0 = [x_{i1}^0, x_{i2}^0, \dots, x_{iD}^0], \quad i = 1, \dots, NP \quad II-1$$

où NP est la taille de la population, généralement choisie entre 10 et 100 selon la complexité du problème.

Cette phase représente l'analogie avec la diversité génétique initiale dans la nature : en ayant une variété d'individus dès le départ, l'algorithme augmente ses chances d'explorer toutes les zones possibles de l'espace de solutions et d'éviter de se limiter à une seule région.

II.4.2. Mutation

La mutation est une étape essentielle où l'on introduit des changements contrôlés pour explorer de nouvelles solutions. Pour chaque individu, un vecteur mutant v_i est généré à partir de trois individus distincts de la population actuelle :

$$v_i = x_{r1} + F \times (x_{r2} - x_{r3}) \quad \text{II-2}$$

où $r1$, $r2$ et $r3$ sont des indices différents choisis au hasard, et F est un facteur d'échelle, typiquement compris entre 0.4 et 1.

La mutation simule l'apparition de nouvelles variations génétiques observée dans les organismes vivants. L'utilisation de la différence $(x_{r2} - x_{r3})$ permet d'exploiter la diversité existante entre les individus pour orienter les nouvelles solutions dans des directions prometteuses.

II.4.3. Croisement (Crossover)

Après la mutation, l'algorithme réalise une recombinaison entre l'individu original x_i et le vecteur mutant v_i pour créer un nouveau vecteur d'essai u_i . Le croisement est réalisé selon la règle suivante :

$$u_{ij} = \begin{cases} v_{ij}, & \text{si } rand_j(0,1) \leq Cr \text{ ou } j = j_{rand} \\ x_{ij}, & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{II-3}$$

où $rand_j(0,1)$ est un nombre aléatoire entre 0 et 1, Cr est le taux de croisement (typiquement autour de 0.9), et j_{rand} est un index aléatoire imposant qu'au moins une composante soit héritée du mutant.

Cette étape reproduit la recombinaison génétique naturelle, où les descendants héritent d'une partie des caractéristiques de leurs parents, permettant ainsi une meilleure exploration de l'espace des solutions tout en conservant des traits bénéfiques.

II.4.4. Sélection

Une fois que le vecteur d'essai u_i est obtenu, l'algorithme procède à une comparaison directe entre l'essai u_i et l'individu d'origine x_i . Celui des deux qui présente la meilleure performance (c'est-à-dire une valeur plus faible de la fonction objective $f(\cdot)$) est sélectionné pour faire partie de la prochaine génération. La règle de sélection est exprimée par :

$$x_i^{g+1} = \begin{cases} u_i, & \text{si } f(u_i) \leq f(x_i) \\ x_i, & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{II-4}$$

Ce principe s'inspire directement de la sélection naturelle dans la biologie : parmi les différentes variations génétiques, seuls les organismes les mieux adaptés survivent et transmettent leurs caractéristiques aux générations suivantes. Ainsi, l'évolution tend à améliorer progressivement la qualité globale de la population.

II.4.5. Boucle évolutive

Après la sélection, l'ensemble des nouveaux individus forme une nouvelle génération. L'algorithme répète ensuite les étapes de mutation, croisement et sélection sur cette nouvelle population. Ce processus est itératif : il continue pendant un nombre prédéfini d'itérations ou jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt soit atteinte (par exemple, atteindre une solution suffisamment bonne ou un nombre maximal de générations). Cette répétition continue correspond à l'évolution progressive observée dans la nature, où, au fil du temps, les espèces s'adaptent de mieux en mieux à leur environnement grâce à l'accumulation de variations avantageuses.

II.5. APPLICATION SIMPLE AVEC DE (CONVERGENCE EN 5 ITERATIONS)

Pour mieux comprendre le fonctionnement de l'algorithme évolutionnaire différentiel (DE), considérons un exemple simple d'optimisation. Nous allons chercher à minimiser la fonction suivante :

$$f(x) = (x + 2)^2 \quad \text{II-5}$$

Le but est de trouver la valeur de x qui minimise cette fonction. La solution exacte est bien sûr $x = -2$ (puisque $f(-2) = 0$). Nous allons maintenant résoudre ce problème en appliquant DE, étape par étape.

Tableau II-1: Paramètres de l'algorithme DE utilisés

Paramètre	Valeur	Description
Taille de la population (NP)	4	Nombre d'individus dans la population initiale
Facteur d'amplification (F)	0,8	Contrôle l'ampleur de la mutation
Taux de croisement (Cr)	1	Probabilité d'hériter de composantes du mutant
Nombre d'itérations	5	Nombre maximal d'itérations autorisées
Fonction objectif	$f(x) = (x + 2)^2$	Fonction à minimiser

Population initiale (choisie aléatoirement):

$$x_1^0 = -3.5, \quad x_2^0 = -2.5, \quad x_3^0 = -4, \quad x_4^0 = -3$$

1^{re} itération

a- Mutation

Utiliser : $v_i = x_{r1} + F(x_{r2} - x_{r3})$

- Pour x_1 :

$$v_1 = x_2 + 0.8(x_3 - x_4)$$

$$v_1 = (-2.5) + 0.8((-4) - (-3))$$

$$v_1 = (-2.5) + 0.8(-1) = (-2.5) - 0.8 = -3.3$$

- Pour x_2 :

$$v_2 = x_3 + 0.8(x_4 - x_1)$$

$$v_2 = (-4) + 0.8((-3) - (-3.5))$$

$$v_2 = (-4) + 0.8(0.5) = (-4) + 0.4 = -3.6$$

- Pour x_3 :

$$v_3 = x_4 + 0.8(x_1 - x_2)$$

$$v_3 = (-3) + 0.8((-3.5) - (-2.5))$$

$$v_3 = (-3) + 0.8(-1) = (-3) - 0.8 = -3.8$$

- Pour x_4 :

$$v_4 = x_1 + 0.8(x_2 - x_3)$$

$$v_4 = (-3.5) + 0.8((-2.5) - (-4))$$

$$v_4 = (-3.5) + 0.8(1.5) = (-3.5) + 1.2 = -2.3$$

b- Croisement

$Cr = 1.0$ donc $u_i = v_i$ pour tous.

Résultats du croisement :

$$u_1 = -3.3, \quad u_2 = -3.6, \quad u_3 = -3.8, \quad u_4 = -2.3$$

c- Sélection

Comparer $f(u_i)$ et $f(x_i)$ pour chaque individu.

Fonction coût :

$$f(x) = (x + 2)^2$$

- Pour x_1 :
 - o $f(x_1) = (-3.5 + 2)^2 = (-1.5)^2 = 2.25$
 - o $f(u_1) = (-3.3 + 2)^2 = (-1.3)^2 = 1.69$
 - o Comme $f(u_1) < f(x_1)$, on remplace x_1 par $u_1 = -3.3$.
- Pour x_2 :
 - o $f(x_2) = (-2.5 + 2)^2 = (-0.5)^2 = 0.25$
 - o $f(u_2) = (-3.6 + 2)^2 = (-1.6)^2 = 2.56$
 - o Comme $f(u_2) > f(x_2)$, on garde $x_2 = -2.5$.
- Pour x_3 :
 - o $f(x_3) = (-4 + 2)^2 = (-2)^2 = 4$
 - o $f(u_3) = (-3.8 + 2)^2 = (-1.8)^2 = 3.24$
 - o Comme $f(u_3) < f(x_3)$, on remplace x_3 par $u_3 = -3.8$.

- Pour x_4 :
 - o $f(x_4) = (-3 + 2)^2 = (-1)^2 = 1$
 - o $f(u_4) = (-2.3 + 2)^2 = (-0.3)^2 = 0.09$
 - o Comme $f(u_4) < f(x_4)$, on remplace x_4 par $u_4 = -2.3$.

Alors, la nouvelle population est:

$$x_1^1 = -3.3, \quad x_2^1 = -2.5, \quad x_3^1 = -3.8, \quad x_4^1 = -2.3$$

Après avoir détaillé analytiquement la première itération de l'algorithme, il est pertinent de regrouper l'ensemble des résultats obtenus au cours des itérations suivantes dans un tableau récapitulatif. Ce tableau présente l'évolution des individus de la population ainsi que les valeurs correspondantes de la fonction objectif à chaque itération. On peut y observer, par exemple, que la valeur -1.99 apparaît à la cinquième itération, marquant une amélioration notable dans la recherche de la solution optimale. Par ailleurs, pour mieux visualiser la dynamique d'optimisation, l'évolution du meilleur coût en fonction du nombre d'itérations est représentée sous forme de courbe. Le Tableau II.2 synthétise les résultats numériques, tandis que la Figure II.1 illustre graphiquement la convergence progressive vers la solution optimale.

Tableau II-2: Évolution de la population et des valeurs de la fonction objectif au cours des itérations

Itération	x_1	x_2	x_3	x_4	Meilleur $f(x)$
0	-3.5	-2.5	-4.0	-3.0	0.2500
1	-3.3	-2.5	-3.8	-2.3	0.0900
2	-3.3	-2.5	-2.94	-2.26	0.0676
3	-3.04	-2.11	-2.90	-2.26	0.0117
4	-2.62	-2.11	-2.90	-2.26	0.0117
5	-2.62	-2.11	-2.67	-1.99	0.0002

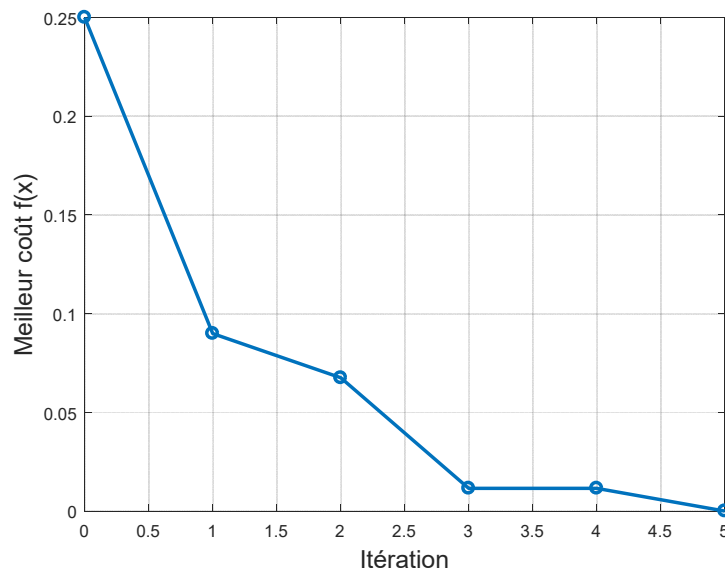


Figure II-1. Évolution du meilleur coût par itération

II.6. : STRATEGIES D'AMELIORATION ET ADAPTATION PARAMETRIQUE DE DE CLASSIQUE

II.6.1. 1. Adaptation dynamique des paramètres F et Cr

Dans l'algorithme d'évolution différentielle classique, le facteur d'amplification F et le taux de croisement Cr sont fixés au début et restent constants pendant toute l'exécution. Cependant, un choix fixe peut limiter les performances : un grand F favorise une exploration large mais ralentit la convergence précise, tandis qu'un petit F risque de piéger l'algorithme dans un minimum local. De même, un taux de croisement inadéquat peut empêcher l'algorithme de combiner efficacement les solutions.

Afin d'améliorer l'efficacité de la recherche, une adaptation dynamique de ces paramètres est introduite. Le facteur d'amplification F est fait pour décroître progressivement au fil des itérations selon la relation suivante :

$$F_{\text{iter}} = F_{\text{initial}} \times \left(1 - \frac{\text{iter}}{\text{max_iter}}\right) \quad \text{II-6}$$

où "iter" est le numéro de l'itération courante et "max_iter" est le nombre total d'itérations. Cela permet de privilégier une exploration plus large au début, suivie d'une exploitation fine à la fin.

Simultanément, le taux de croisement Cr est **augmenté progressivement** pour favoriser un croisement plus intensif lorsque l'algorithme approche de la solution optimale, selon la formule :

$$Cr_{iter} = Cr_{initial} + (1 - Cr_{initial}) \times \frac{iter}{max_iter} \quad II-7$$

Cette évolution progressive permet à l'algorithme de s'adapter dynamiquement aux différentes phases de la recherche.

II.6.2. 2. Mutation guidée par le meilleur individu

La stratégie de mutation classique du DE repose sur des individus choisis aléatoirement pour générer un nouveau candidat. Bien que simple, cette approche ne tire pas profit des meilleures solutions déjà découvertes, ce qui peut ralentir la convergence.

Afin d'accélérer l'amélioration de la population, nous introduisons une mutation guidée par le meilleur individu. Plutôt que de choisir un point de base au hasard, la mutation est centrée autour de l'individu ayant actuellement le meilleur coût x_{best} . La nouvelle formule de mutation devient :

$$v_i = x_{best} + F(x_{r2} - x_{r3}) \quad II-8$$

où $r2$ et $r3$ sont deux indices différents choisis aléatoirement parmi la population. Cette stratégie permet à l'algorithme de se concentrer sur la zone de recherche prometteuse tout en conservant une certaine diversité grâce à la différence vectorielle $(x_{r2} - x_{r3})$.

L'introduction du meilleur individu comme référence principale permet ainsi d'accélérer la convergence et d'atteindre plus rapidement des solutions de qualité supérieure.

II.6.3. 3. Réduction progressive de la taille de la population

Dans le DE classique, la taille de la population NP est maintenue constante pendant toutes les itérations. Cette approche assure une exploration complète de l'espace de recherche mais peut devenir inefficace lors des dernières phases de l'optimisation, où une population trop large ralentit inutilement la convergence.

Pour améliorer l'efficacité computationnelle et focaliser les efforts sur les solutions les plus prometteuses, une réduction progressive de la taille de la population est proposée. La taille de la population à chaque itération est recalculée par la relation suivante :

$$NP_{\text{iter}} = NP_{\text{initial}} - \left\lfloor NP_{\text{initial}} \times \frac{\text{iter}}{\text{max_iter}} \right\rfloor \quad \text{II-9}$$

où $\lfloor \cdot \rfloor$ désigne la fonction partie entière. Cette stratégie permet d'utiliser une population plus grande pour explorer efficacement l'espace au début, puis de réduire progressivement le nombre d'individus pour accélérer l'exploitation locale vers la fin.

En réduisant la population, l'algorithme devient plus rapide tout en conservant la capacité à exploiter les meilleures régions de l'espace de recherche.

II.7. FONCTION DE RASTRIGIN

Dans ce travail, la fonction de Rastrigin est utilisée comme un banc d'essai pour évaluer la performance de différentes variantes de l'algorithme d'évolution différentielle (DE). Cette fonction est couramment utilisée dans le domaine de l'optimisation car elle possède de nombreuses structures locales complexes tout en ayant un minimum global connu. Cela permet de tester à la fois la capacité d'exploration et d'exploitation des algorithmes.

La fonction de Rastrigin de dimension n est définie par l'expression mathématique suivante:

$$f(x) = 10n + \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i)) \quad \text{II-10}$$

où :

- n est le nombre de dimensions,
- $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ est un vecteur de variables réelles,
- Le domaine de définition est généralement $x_i \in [-5.12, 5.12]$.

Le minimum global de cette fonction est atteint en :

$$x_i = 0 \quad \text{pour tous } i = 1, \dots, n$$

avec une valeur minimale de : $f(0,0, \dots, 0) = 0$

La particularité de cette fonction réside dans la présence de nombreux minima locaux répartis de manière régulière dans l'espace de recherche, ce qui la rend idéale pour tester la robustesse et l'efficacité des algorithmes d'optimisation.

Dans ce travail, la fonction de Rastrigin a été utilisée en dimension 2, ce qui permet également une visualisation graphique en 3D du paysage de la fonction pour mieux comprendre la difficulté du problème d'optimisation.

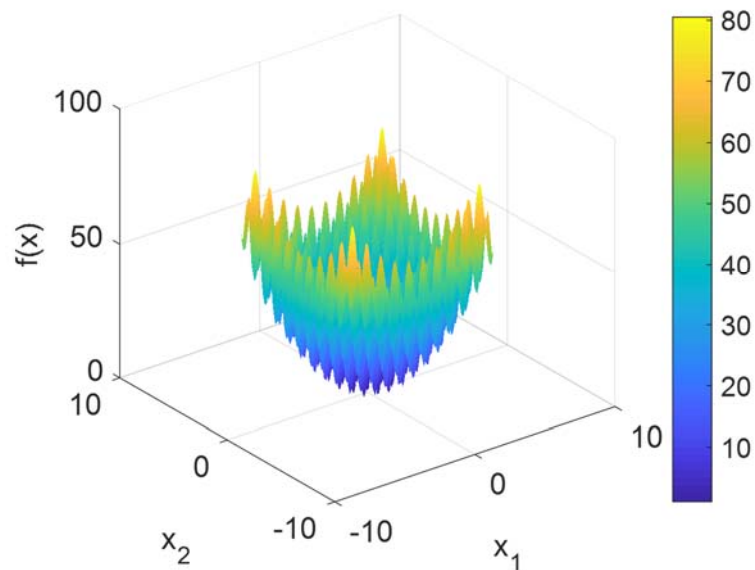


Figure II-2 : Représentation tridimensionnelle de la fonction de Rastrigin en deux dimensions

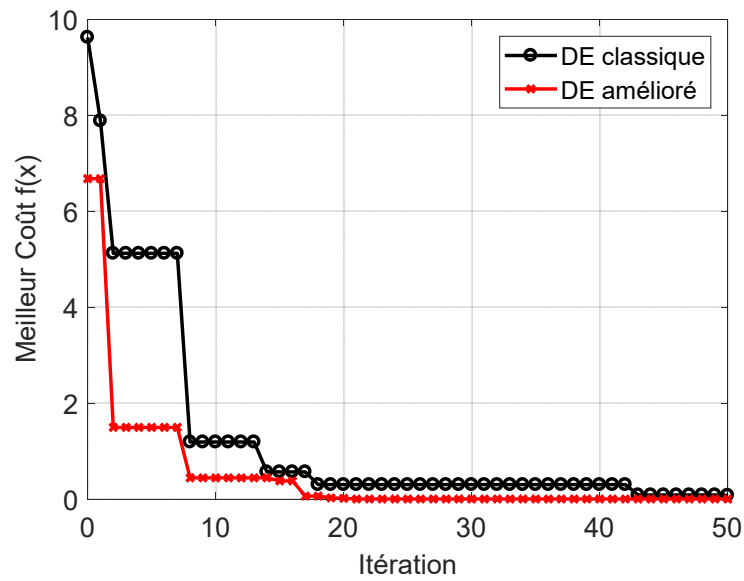


Figure II-3 : Évolution du meilleur coût $f(x)$ en fonction des itérations pour le DE classique et le DE amélioré

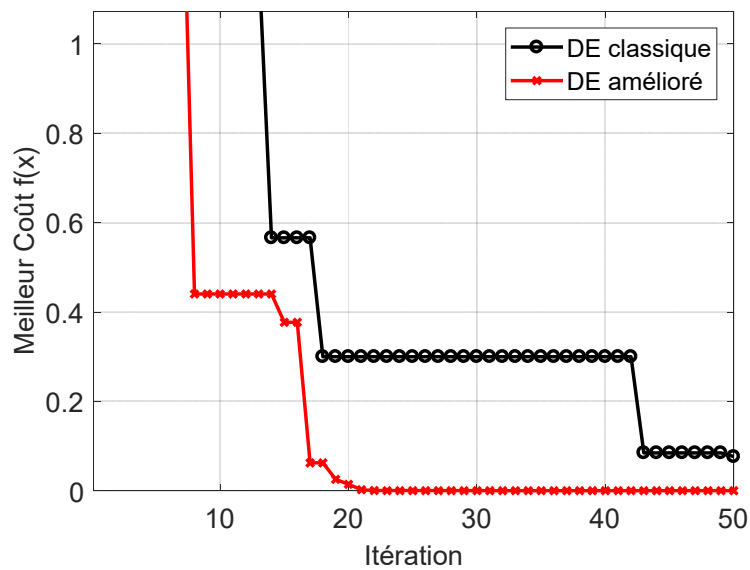


Figure II-4 : Zoom sur l'évolution du meilleur coût $f(x)$: comparaison détaillée de la phase de convergence

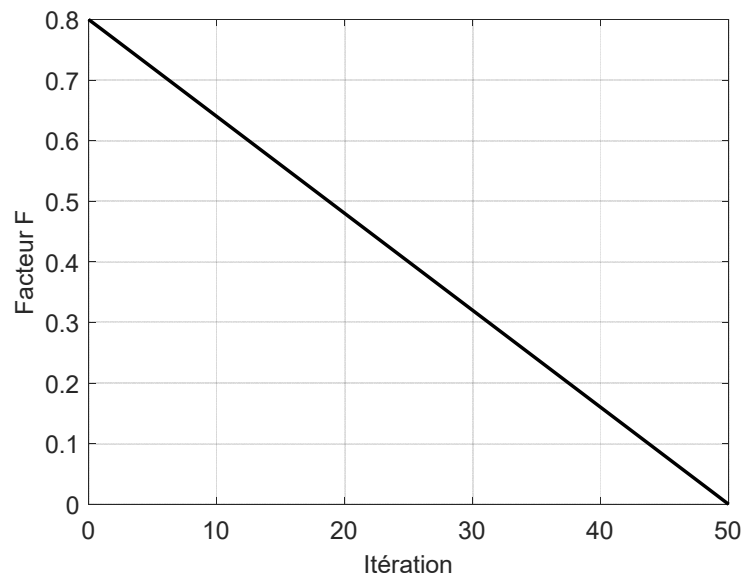


Figure II-5 : Variation dynamique du facteur de mutation F au cours des itérations

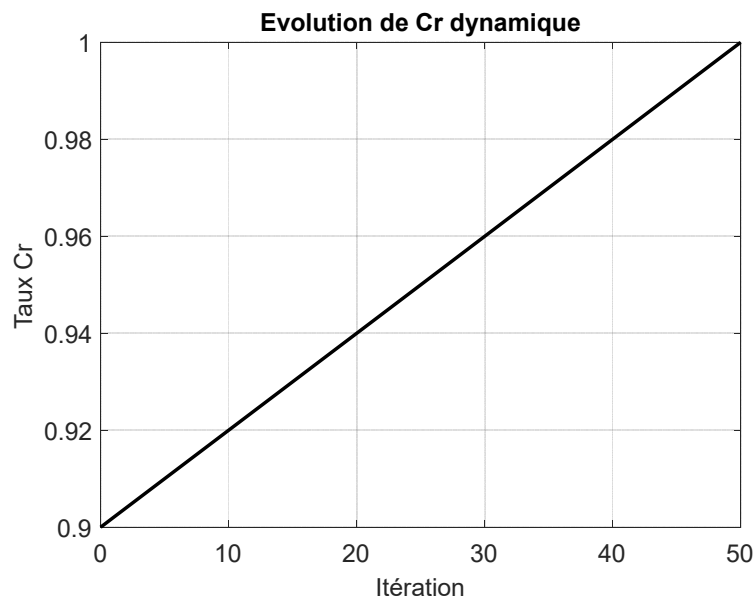


Figure II-6 : Évolution dynamique du taux de croisement Cr au cours

La série de figures suivante illustre de manière détaillée l'évolution de la performance de l'algorithme d'évolution différentielle (DE) dans ses versions classique et améliorée. La Figure II.3 montre l'évolution du meilleur coût $f(x)$ en fonction du nombre d'itérations. Il est observé que le DE amélioré converge plus rapidement que le DE classique, atteignant des valeurs de coût plus faibles en moins d'itérations.

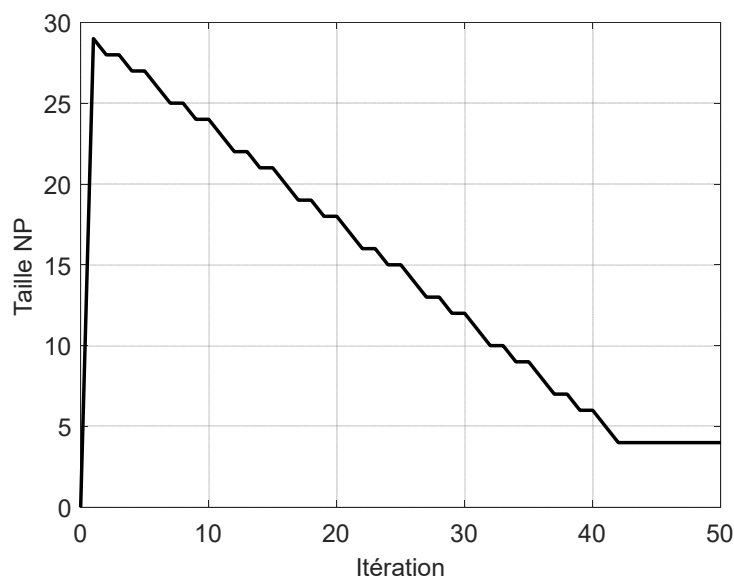


Figure II-7: Réduction progressive de la taille de la population NP au cours des itérations

Pour mieux visualiser la phase de convergence finale, la Figure II.4 présente un zoom sur les dernières valeurs du coût. Cette figure met en évidence que la version améliorée atteint un coût quasi-nul beaucoup plus tôt que la version classique, traduisant ainsi une meilleure efficacité en termes de nombre d'itérations nécessaires et de qualité de solution finale.

Les figures suivantes détaillent les mécanismes d'adaptation dynamique mis en place : la Figure II.5 représente l'évolution du facteur de mutation F , qui décroît progressivement afin de passer d'une phase d'exploration globale à une phase d'exploitation locale précise ; la Figure II.6 montre l'augmentation contrôlée du taux de croisement Cr , favorisant une recombinaison accrue des solutions au fur et à mesure de l'optimisation ; enfin, la Figure II.7 illustre la réduction progressive de la taille de la population NP , assurant une exploration large au début de l'algorithme et une concentration plus fine des recherches sur les meilleures solutions en fin de processus.

Ainsi, les figures de coût et leur zoom démontrent clairement que le DE amélioré permet de réduire considérablement le nombre d'itérations nécessaires pour atteindre une valeur minimale, tout en assurant une meilleure qualité de convergence par rapport au DE classique.

III.
(SYNTHESE DES LOIS DE
COMMANDE)

III.1. INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de définir l'architecture des asservissements permettant d'assurer la tenue de la route, le confort de conduite des passagers et augmenter la durée de vie des organes électrique dans des conditions normales en isolant le châssis du véhicule électrique des diverses perturbations de la route. Ceci en utilisant une technique de commande linéaire quadratique (LQR).

III.1.1. MECANISME DE COORDINATION ET DE CONTROLE DE SYSTEME DE LA SUSPENSION

Afin d'obtenir une performance de suppression des vibrations significative, un mécanisme de coordination et de contrôle du système complet de la suspension qui regroupe le système d'absorption dynamique des vibrations (DVA) et de la suspension du véhicule électrique est abordé dans ce chapitre. Dans ce travail la force de l'actionneur DVA f_d est contrôlée pour supprimer davantage les vibrations et la force de l'actionneur de suspension f_s est entre-temps contrôlée pour réduire activement les vibrations de la masse suspendue.

III.1.1.1. Contrôle de la force d'actionneurs de système DVA et de la suspension du véhicule

Le Système DVA se comporte comme un absorbeur de vibrations passives, et il est difficile de l'exploiter pour obtenir une performance optimale en raison de l'excitation compliquée de la route et des perturbations environnementales. Dans le système DVA proposé, une force d'actionneur peut être commandée de manière adaptative pour supprimer davantage les vibrations du moteur.

Le système DVA proposé ci-dessus est mis en parallèle avec la suspension du véhicule électrique, modifiant les caractéristiques de vibration du véhicule électrique. Cela affaiblit les performances de la suspension d'origine et détériore les vibrations de la masse suspendue. Ainsi, un contrôle approprié de la suspension est nécessaire. Dans ce travail, la commande linéaire quadratique (LQR), est adoptée pour contrôler la force de l'actionneur de la suspension afin d'améliorer le confort de conduite du véhicule électrique.

Abordant le contrôle de la force de l'actionneur de suspension et la force d'actionneur du système DVA, la commande linéaire quadratique (LQR) standard peut être énoncé comme suit :

$$\min J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u + 2x^T N u) dt \quad \text{III-1}$$

Où J est l'indice de performance quadratique. Q est une matrice de pondération définie positive des variables d'état x, et R est une matrice de pondération définie positive de la variable de contrôle u. N est la matrice associée des Q et R. Il existe deux variables de contrôle optimal $u = [f_s \quad f_d]^T$, basée sur la commande de retour d'état, pour minimiser l'indice J. On a :

$$u = -K x \quad \text{III-2}$$

Où K est la matrice de gain de retour d'état qui peut être déterminée à partir de la résolution de l'équation de Riccati, basée sur la méthode LQR, comme suit :

$$AP + PA^T + Q - PBR^{-1}B^T P + G w G^T = 0 \quad \text{III-3}$$

En utilisant la fonction LQR du logiciel Matlab, nous pouvons résoudre l'équation de Riccati (III.8) comme :

$$K = LQR(A, B, Q, R, N) \quad \text{III-4}$$

Rappelant que notre objectif est d'améliorer le confort de conduite et assurer la tenue de la route, cet objectif est évalué par les variables de sortie y dans l'équation de sortie de modèle dynamique de quart du véhicule électrique. De plus, les matrices de pondération Q, R et N peuvent être déduites comme suit :

$$\begin{cases} Q = C^T Q_p C \\ R = D^T Q_p D \\ N = C^T Q_p D \\ Q_p = \text{diag}(q_1, q_2, q_3, q_4) \end{cases} \quad \text{III-5}$$

Où q_1, q_2, q_3, q_4 sont les facteurs de pondération de a_s , d_s , F_w et F_e , respectivement.

La procédure d'optimisation (DE) avec la version classique et améliorée est appliquée pour calculer les facteurs de pondération, q_1, q_2, q_3, q_4 , qui

influencent énormément l'efficacité du contrôle. Les performances de la suspension peuvent être inférieures à celles des suspensions passives dans certaines bandes de fréquences, si ces facteurs de pondération ne sont pas choisis correctement. L'algorithme DE présenté précédemment est utilisé pour déterminer les facteurs de pondération optimaux.

La fonction objective utilisée est comme suit :

$$\min J(q_1, q_2, q_3, q_4) = \rho_{a_s} \frac{RMS(a_{sSus})}{RMS(a_{sDVA})} + \rho_{d_s} \frac{RMS(d_{sSus})}{RMS(d_{sDVA})} + \rho_{F_w} \frac{RMS(F_{wSus})}{RMS(F_{wDVA})} + \rho_{F_e} \frac{RMS(F_{eSus})}{RMS(F_{eDVA})} \quad III-6$$

Où a_{sSus} , d_{sSus} , F_{wSus} et F_{eSus} sont les expressions des quatre indices d'évaluation dans la roue électrique en utilisant le contrôle de suspension basé sur LQR et a_{sDVA} , d_{sDVA} , F_{wDVA} et F_{eDVA} sont les expressions des quatre indices d'évaluation dans la roue électrique sans contrôle.

Ainsi les quatre facteurs de pénalité sont fixés à :

$$\rho_{a_s} = 0.3 \quad \rho_{d_s} = 0.15 \quad \rho_{F_w} = 0.15 \quad \rho_{F_e} = 0.4 \quad III-7$$

III.2. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons mis en place un mécanisme de coordination et de contrôle du système complet de la suspension qui regroupe le système d'absorption dynamique des vibrations (DVA) et de la suspension du véhicule électrique. Les différents paramètres des contrôleurs proposés ont été adaptés de manière optimale en utilisant l'algorithme d'évolution différentiel (DE) avec sa version classique et améliorée pour obtenir une performance de suppression des vibrations significative.

**IV.
(SIMULATION ET
INTERPRETATION DES
RESULTATS)**

IV.1. INTRODUCTION

La détermination des modèles mathématiques qui combine les dynamiques verticales du châssis du véhicule électrique et le moteur à roue, nous a permis de trouver les équations avec lesquelles nous pouvons commencer la deuxième tâche de notre projet qui est la simulation, menant à l'évaluation des commandes proposées.

IV.2. SIMULATION ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS

La figure IV-1 présente le schéma de principe du système proposé pour la simulation.

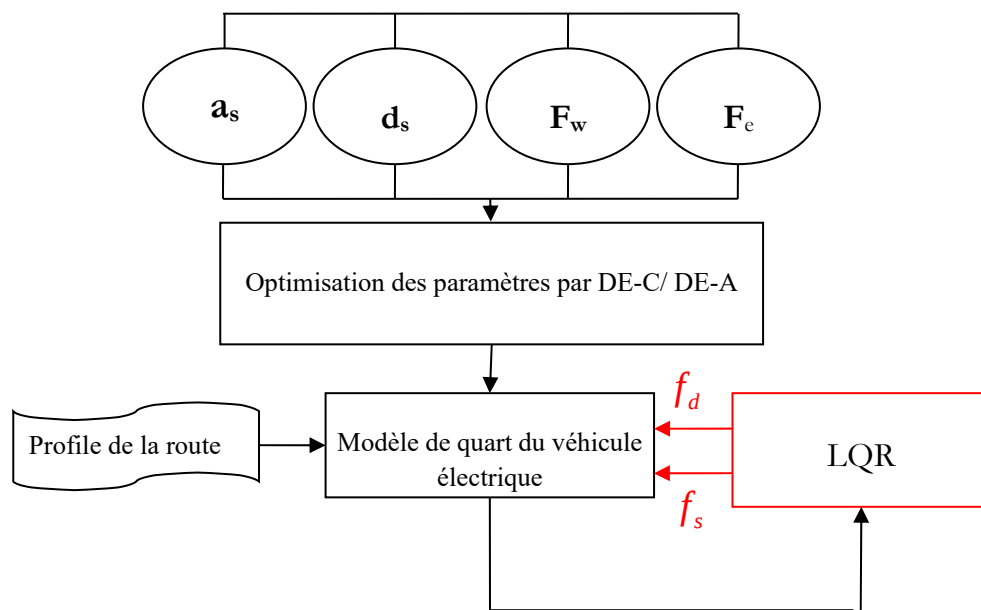


Figure IV-1 : Schéma de principe de système de contrôle proposé pour la simulation

Les valeurs des paramètres utilisés dans notre simulation sont présentées dans le tableau 1 de l'annexe.

Des séries de simulations sur le logiciel Matlab/Simulink sont présentées pour montrer l'efficacité de la technique de commande proposée.

La technique de la commande proposée a été évaluée sous quatre tests prenant en considération la configuration de la roue électrique, de la méthode de contrôle DVA et de la méthode de contrôle de la suspension du véhicule électrique, comme il est indiqué dans le tableau IV-1

Tableau IV-1 Modèles quart de véhicule avec les différentes configurations de la roue électrique.

N	Test	Configuration de la roue électrique	Actionneur (DVA)	Actionneur (suspension)
1	S-C	DVA	Sans contrôle	Sans contrôle
2	LQR-DE-C	DVA	LQR optimisé par DE classique	LQR optimisé par DE classique
3	LQR-DE-A	DVA	LQR optimisé par DE amélioré	LQR optimisé par DE amélioré

IV.2.1.1. Situation d'essai

Dans cette situation d'essai le véhicule électrique roule avec une vitesse constante de 36 km/h et passe par un ralentisseur de type dos d'âne de largeur (1 m) et de hauteur (10 cm).(voir figure IV-2).

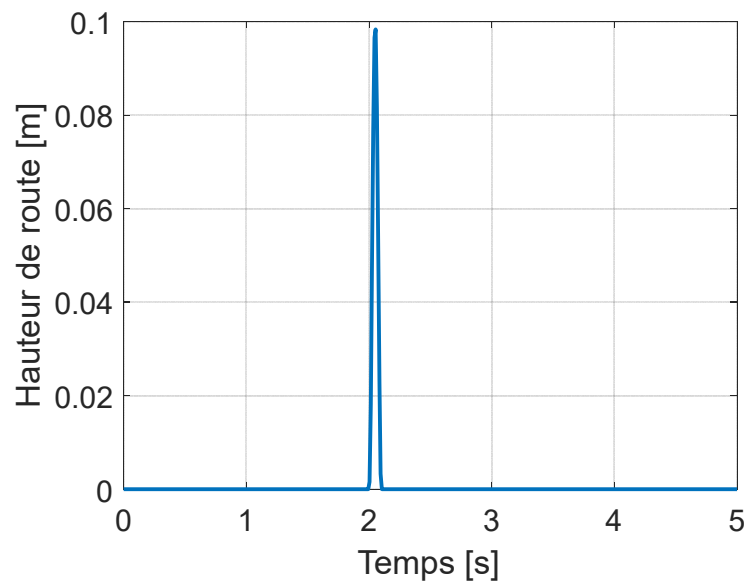


Figure IV-2 : Profile de la route

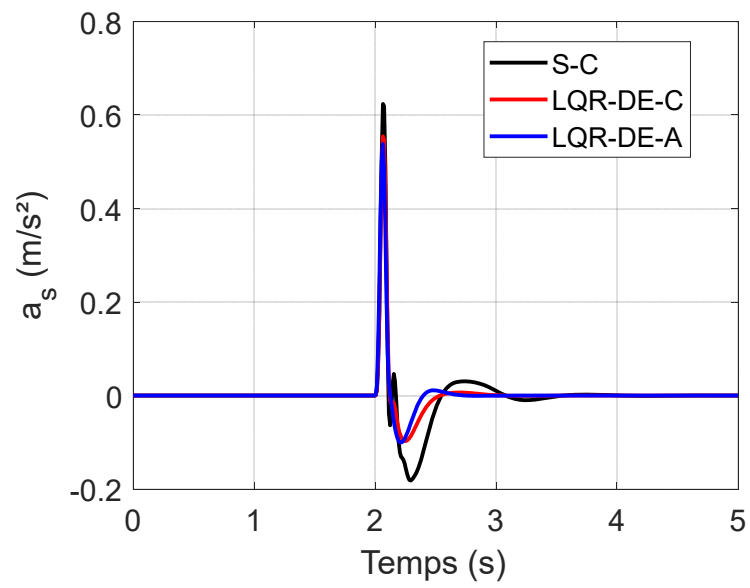


Figure IV-3 : L'accélération verticale du châssis

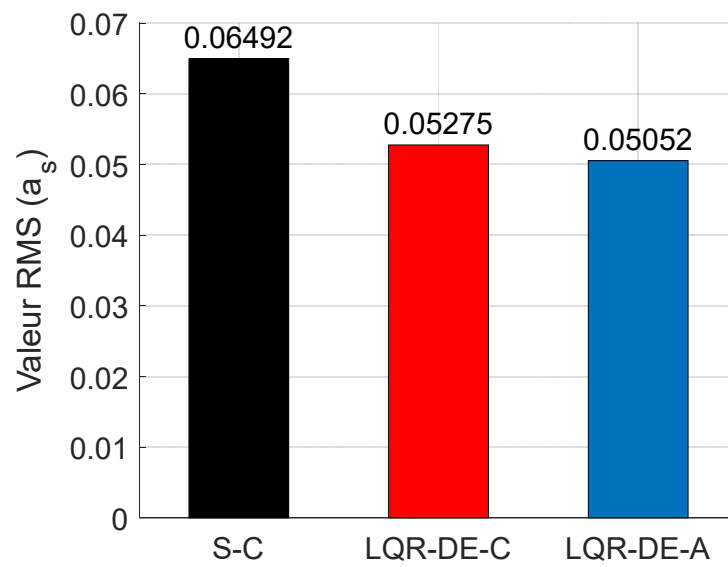


Figure IV-4. RMS de l'accélération verticale du châssis

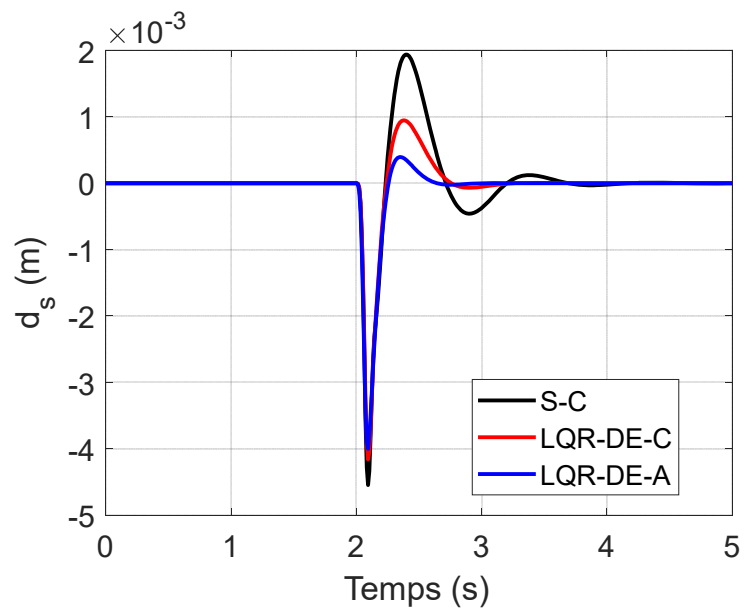


Figure IV-5. Déflexion de la suspension

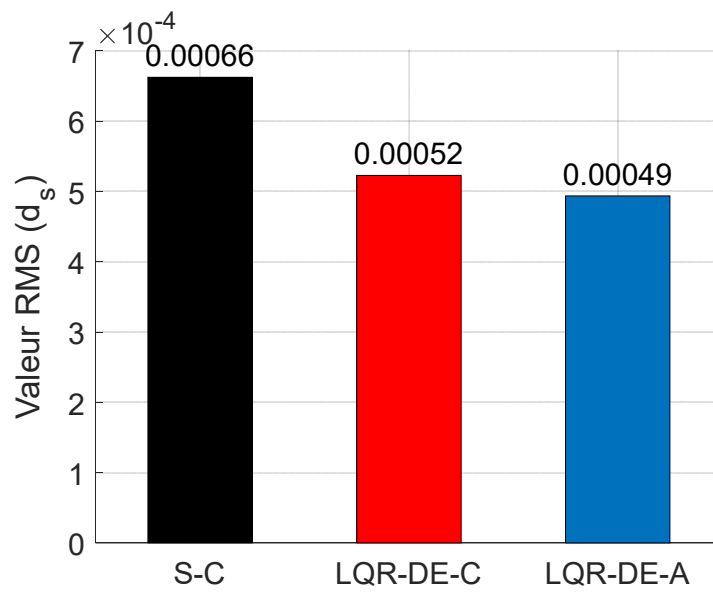


Figure IV-6 : RMS de la déflexion de la suspension

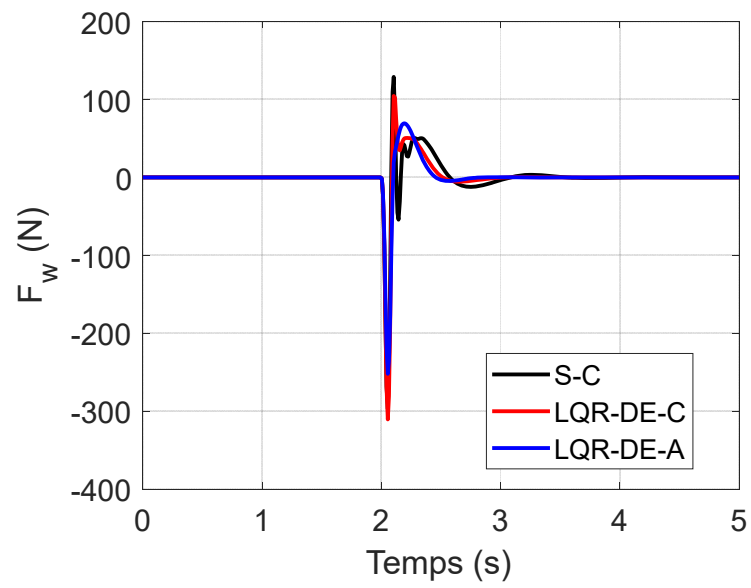


Figure IV-7 : Charge dynamique des pneus

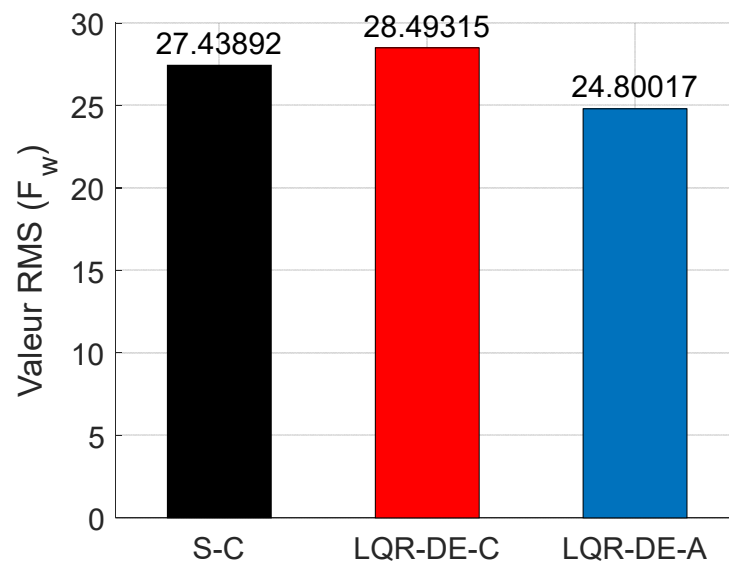


Figure IV-8. RMS de la charge dynamique des pneus

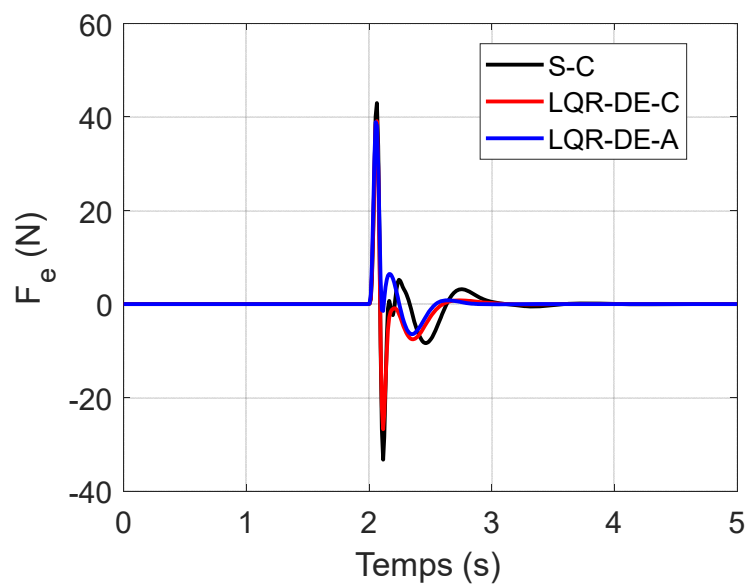


Figure IV-9 La force dynamique d'IWM

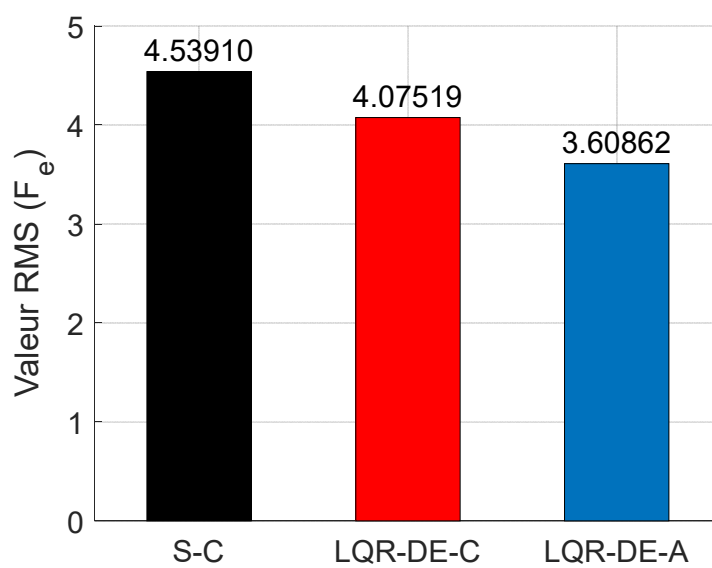


Figure IV-10. RMS de la force dynamique d'IWM

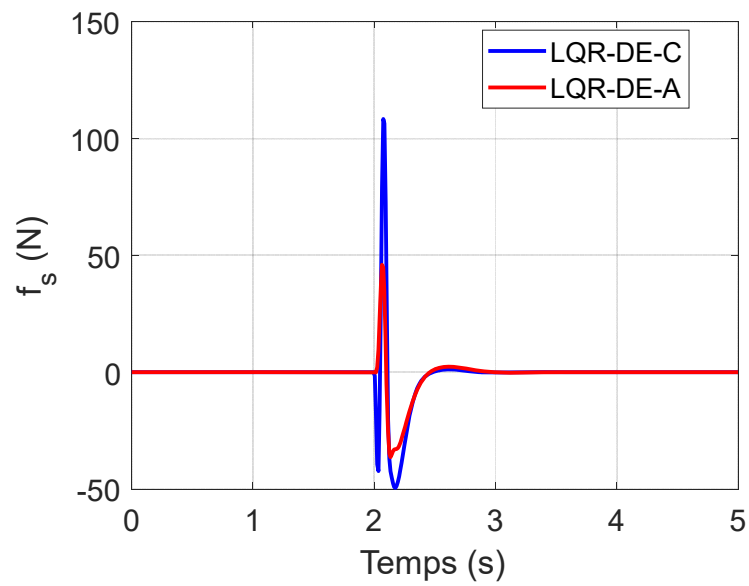


Figure IV-11. La force de l'actionneur de la suspension

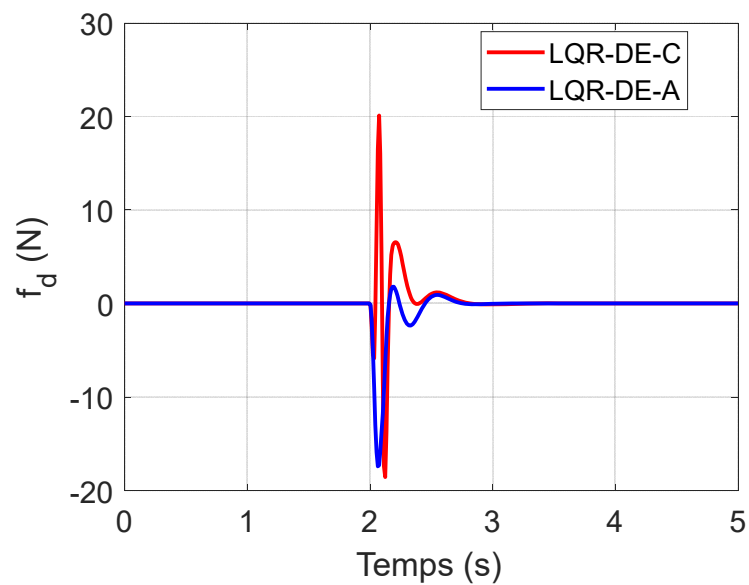


Figure IV-12. La force de l'actionneur de DVA

Les figures IV-3 à IV-12 permettent d'évaluer les performances dynamiques du système de suspension sous trois configurations : sans contrôle (S-C), avec un contrôle LQR optimisé par l'algorithme d'évolution différentielle classique (LQR-DE-C) et avec le LQR optimisé par l'algorithme d'évolution différentielle amélioré (LQR-DE-A).

La Figure IV-3 montre l'accélération verticale du châssis. Le système sans contrôle (S-C) présente les pics d'accélération les plus élevés. L'introduction d'un contrôle LQR optimisé permet de réduire ces pics, en particulier avec LQR-DE-A, qui affiche une réponse mieux amortie et plus rapide. Cela se confirme sur la Figure IV-4, où la valeur RMS de l'accélération est réduite de 22,15% avec LQR-DE-A par rapport à S-C.

Concernant la déflexion de la suspension (Figure IV-5), le système sans contrôle affiche des déplacements plus importants. L'utilisation du DE classique (LQR-DE-C) réduit cette déflexion, tandis que le DE amélioré (LQR-DE-A) parvient à la diminuer encore davantage, ce que montre la Figure IV-6 avec une réduction de plus de 25% de la valeur RMS par rapport à S-C.

La Figure IV-7, représentant la charge dynamique des pneus, révèle un point important. Bien que l'optimisation classique via LQR-DE-C améliore certains critères, elle présente ici un inconvénient majeur : elle augmente légèrement la charge dynamique par rapport au système sans contrôle (S-C), ce qui peut nuire à la stabilité du véhicule et à la longévité des pneus. En revanche, l'utilisation du DE amélioré (LQR-DE-A) constitue un avantage significatif, car elle permet de réduire la charge dynamique par rapport à S-C (réduction d'environ 9,6%), améliorant ainsi la sécurité et la tenue de route. Cette comparaison souligne l'efficacité des modifications apportées à l'algorithme DE pour mieux équilibrer les compromis dynamiques du système.

En ce qui concerne la force dynamique sur l'IWM (Figure IV-9), LQR-DE-A permet de réduire nettement cette force, avec une diminution de près de 20,5% de la valeur RMS par rapport à S-C, comme illustré dans la Figure IV-10.

Enfin, les figures IV-11 et IV-12 montrent que la stratégie optimisée via DE amélioré permet également de réduire et de mieux maîtriser les forces appliquées par les actionneurs de suspension et du DVA, ce qui contribue à une commande plus douce et moins énergivore.

IV.3. CONCLUSION

Ce chapitre met en évidence qu'une bonne coordination de contrôle des deux actionneurs système DVA et la suspension du véhicule électrique permettent de diminuer parfaitement les vibrations verticales de châssis et préserver le confort vertical de conduite et des passagers, d'absorber les vibrations provenant des

irrégularités de la route, garder un contact continu entre les pneus et la route, assurer une bonne tenue de la route et de diminuer parfaitement les vibrations verticales de moteur en augmentant leur durée de vie.

V. CONCLUSION

Ce travail a porté sur la commande des dynamiques verticales d'un modèle de quart de véhicule électrique intégrant un système d'absorption dynamique des vibrations (DVA) couplé à une roue électrique, ainsi qu'une suspension active, avec pour objectif l'amélioration du confort de conduite et de la tenue de route dans des conditions critiques.

S'appuyant sur de nombreux travaux théoriques dans le domaine du contrôle actif appliqué à l'isolation vibratoire des structures mécaniques, notre approche a consisté à définir une problématique précise et à développer une solution innovante sur le plan industriel : une suspension active à actionneur asservi, spécifiquement adaptée aux véhicules électriques terrestres.

Afin d'étudier l'impact des conditions d'excitation sur la dynamique du véhicule, un seul type d'entrée a été considérée : un profil de route sous forme d'un ralentisseur de type dos d'âne. Ce test a permis d'évaluer et de caractériser les performances du modèle sous diverses sollicitations dynamiques.

Pour optimiser les performances de la suspension, une commande linéaire quadratique (LQR) a été développée pour coordonner le comportement du DVA intégré et de la suspension du véhicule électrique. Les paramètres du contrôleur LQR ont été optimisés en utilisant un algorithme d'évolution différentielle amélioré, basé sur des critères de performance vibratoire, offrant une alternative plus performante que l'algorithme d'évolution différentielle traditionnelle.

Les résultats des simulations ont validé l'efficacité de la stratégie de commande proposée, démontrant une amélioration notable de l'isolation vibratoire du châssis et une meilleure gestion des dynamiques verticales du système. La comparaison des différentes configurations de la roue électrique a permis de mettre en évidence les spécificités et les avantages de l'approche adoptée.

Les performances obtenues sont satisfaisantes et comparables aux travaux de référence cités dans la bibliographie. Ce travail constitue ainsi une contribution prometteuse au développement de solutions de suspension innovantes pour véhicules électriques. Nous espérons que cette étude servira de base pour de futures recherches et travaux de développement au sein de notre université.

VI. BIBLIOGRAPHIE

VI.1. BIBLIOGRAPHIE GENERALE

- [Abd-10] Abdelmalek Gacem " Utilisation des méthodes d'optimisations métaheuristiques pour la résolution du problème de répartition optimale de la puissance dans les réseaux électriques", thèse magister Centre Universitaire d'El-oued.
- [Ale-05] Alessandro Z, Sur la commande robuste de suspensions automobiles en vue du contrôle global de châssis, Thèse doctorat, *Institut National Polytechnique de Grenoble*, 2005.
- [AME] Site du projet AMESIM, Critères de confort et de tenue de route, 'Université Numérique Ingénierie et Technologie (UNIT), 2010, <http://unit-amesim.insa-rouen.fr/co/index.html>
- [Anh-11] Anh L, Approche LPV pour la commande robuste de la dynamique des véhicules : amélioration conjointe du confort et de la sécurité, Thèse doctorat, *Université de Grenoble*, 2011.
- [Aur-14] Aurore L, Etude de l'influence des suspensions de véhicule de tourisme sur le confort vibratoire, le comportement routier et les limites de fonctionnement : l'approche CRONE en matière de formalisation, d'analyse et de synthèse, *Université de Bordeaux*, 2014.
- [Aym-21] Ayman H. Et all LQR and PID Controllers Performance on a Half Car Active Suspension System. 48-53. 10.1109/MIUCC52538.2021.9447609. (2021).
- [Bel-15] Belkacem L, Contrôle semi actif d'une suspension d'un véhicule terrestre, mémoire Magister, *Université Mohamed Khider – Biskra*, 2015.
- [Cam-97] Camino, J. & Zampieri, D. & Takahashi, Ricardo & Peres, Pedro. (1997). H2 and LQR Active Suspension Control Schemes with Uncertain Parameters: A Comparison.
- [Che-21] Cherfi Aicha et Namous Amel « Commande Optimale de Suspensions Automobiles en vue du Contrôle des Dynamiques Verticales de Châssis », Mémoire de Master, Université Dr. Tahar Moulay Saida 2021.
- [Dam-01] Damien S, Sur la modélisation et la commande de suspension de véhicules automobiles, Thèse doctorat, *Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG*, 2001.
- [Faw-17] Fawzi B, Mohamed B, Commande du système de suspension d'un véhicule, Mémoire Master, *Université Kasdi Merbah – Ouargla*, 2017.

- [Han-17] Han I, Rho K. Characteristic analysis of vehicle rollover accidents: Rollover scenarios and prediction/warning. *Int J Automot Tech*, 2017, 18: 451–461
- [Hu-14] Hu Y, Chen M Z Q, Shu Z. Passive vehicle suspensions employing inerters with multiple performance requirements. *J Sound Vib*, 2014, 333: 2212–2225
- [Hus-10] Hussein S, Systèmes de suspension semi-active à base de fluide magnéto rhéologique pour l'automobile, Thèse doctorat, *l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers*, 2010.
- [Jea-19] Jean B, Vers une version alternative à la suspension CRONE Hydractive, Thèse doctorat, *Université de bordeaux*, 2019.
- [Liu-06] Liu, Zhen & Luo, Cheng & Hu, Dwen. (2006). Active Suspension Control Design Using a Combination of LQR and Backstepping. 123 - 125. 10.1109/CHICC.2006.280612.
- [Liu-19] C. Liu, L. Chen, X. Yang, X. Zhang and Y. Yang, "General Theory of Skyhook Control and its Application to Semi-Active Suspension Control Strategy Design," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 101552-101560, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2930567.
- [Med-20] MEDDOUDI N, HAMIDI M, « Commande Intelligente d'une Suspension Semi-Active de demi-véhicule », Mémoire de Master, Université Dr. Tahar Moulay Saida 2020.
- [Mer-16] Merah A, Contribution à l'amélioration de la sécurité et la stabilité d'un véhicule électrique à l'aide des systèmes de contrôle latéral et longitudinal. Thèse de doctorat, *université de Saida* 2016.
- [Mer-21] Meral Özarslan Yatak, Fatih Şahin, "Ride Comfort-Road Holding Trade-off Improvement of Full Vehicle Active Suspension System by Interval Type-2 Fuzzy Control," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Volume 24, Issue 1, 2021, Pages 259-270,
- [Mer-22] Merah, A., Hartani, K., Yazid, N., and Mohammed Chikouche, T., "New Integrated Full Vehicle Suspension System for Improvements in Vehicle Ride Comfort and Road Holding," *SAE Int. J. Veh. Dyn., Stab., and NVH* 6(3):2022, <https://doi.org/10.4271/10-06-03-0018>.
- [Moh-97] Mohamed B, Etude et analyse de la suspension active et semi active des véhicules routiers, Thèse doctorat, *Faculté des Études Supérieures de l'université Laval QUÉBEC*, 1997.
- [Mos-12] Mostepha S, Effet des sollicitations de la route sur les pièces de suspension en aluminium, Mémoire maîtrise en ingénierie, *université du québec*, 2012

- [NHTSA-20] National Center for Statistics and Analysis. NHTSA 2020 annual assessment, Motor Vehicle Traffic Crash. Fatality Counts and Injury Estimates for 2020. Report NHTSA DOT HS 809923. Washington. US Department Of Transportation, National High-way Traffic Safety Administration. 2020
- [Par-14] Parida N C, Raha S, Ramani A. Rollover-preventive force synthesis at active suspensions in a vehicle performing a severe maneuver with wheels lifted off. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2014, 15: 2583–2594
- [Pun-17] Puneet Gandhi, S Adarsh, K.I. Ramachandran, Performance Analysis of Half Car Suspension Model with 4 DOF using PID, LQR, FUZZY and ANFIS Controllers, *Procedia Computer Science*, 115, 2017, PP. 2-13.
- [Sam-06] Samuel G, Étude d'un système de contrôle pour suspension automobile, Mémoire de la maîtrise en ingénierie, *Université du quebec*, 2006.
- [Seo-11] Seong M. Choi, S. Choi, Kum-Gil S, Control Strategies for Vehicle Suspension System Featuring Magnetorheological (MR) Damper, Chapitre dans le livre, *Vibration Analysis and Control, New Trends and Developments*, Francisco Beltran-Carbajal, 2011
- [Tsu-17] Tsung Heng, Chiew & Jamaludin, Z. & Bani Hashim, Ahmad Yusairi & Abdullah, Lokman & Rafan, N.A & Maharof, Madihah. (2017). Second order sliding mode control for direct drive positioning system. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 11. 3206-3216. 10.15282/jmes.11.4.2017.23.0289.
- [Van-13] Van der Westhuizen S F, Els P S. Slow active suspension control for rollover prevention. *J Terra Mech*, 2013, 50: 29–36
- [Sun-16] Sun, F.; Xiong, R.; He, H. A systematic state-of-charge estimation framework for multi-cell battery pack in electric vehicles using bias correction technique. *Appl. Energy* 2016, 162, 1399–1409.
- [Wu-16] Wu, X.; Hu, X.; Moura, S.; Yin, X.; Pickert, V. Stochastic control of smart home energy management with plug-in electric vehicle battery energy storage and photovoltaic array. *J. Power Sources* 2016, 333, 203–212.
- [Xio-18] Xiong, R.; Cao, J.; Yu, Q. Reinforcement learning-based real-time power management for hybrid energy storage system in the plug-in hybrid electric vehicle. *Appl. Energy* 2018, 211, 538–548.
- [Tian-17] Xiong, R.; Tian, J.; Mu, H.; Wang, C. A systematic model-based degradation behavior recognition and health monitoring method for lithium-ion batteries. *Appl. Energy* 2017, 207, 372–383.

- [Sac-16] Sachs, C.; Burandt, S.; Mandelj, S.; Mutter, R. Assessing the market of light electric vehicles as a potential application for electric in-wheel drives. In Proceedings of the 6th International Electric Drives Production Conference, Nuremberg, Germany, 30 November–1 December 2016.
- [Xio-17] Xiong, R.; Zhang, Y.; He, H.; Zhou, X.; Pecht, M. A double-scale, particle-filtering, energy state prediction algorithm for lithium-ion batteries. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017.
- [Geo-16] George, A.; Besselink, I. Rear suspension design for an in-wheel-drive electric car. *J. Automob. Eng.* 2016, 230, 147–159.
- [Wan-16] Wang, R.; Hu, C.; Yan, F.; Chadli, M. Composite Nonlinear Feedback Control for Path Following of Four-Wheel Independently Actuated Autonomous Ground Vehicles. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2016, 17, 2063–2074.
- [Hun-16] Hung, Y.; Wu, C. A combined optimal sizing and energy management approach for hybrid in-wheel motors of EVs. *Appl. Energy* 2015, 139, 260–271.
- [Zha-16] Zhang, G.; Zhang, H.; Huang, X.; Wang, J.; Yu, H.; Graaf, R. Active Fault-Tolerant Control for Electric Vehicles With Independently Driven Rear In-Wheel Motors Against Certain Actuator Faults. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2016, 24, 1557–1572.
- [Sch-06] Schalkwyk, D.; Kamper, M. Effect of Hub Motor Mass on Stability and Comfort of Electric Vehicles. In Proceedings of the 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Windsor, UK, 1–6 September 2006.
- [Mura-12] Murata, S. Innovation by in-wheel-motor drive unit. *Veh. Syst. Dyn.* 2012, 50, 807–830.
- [Wan-11] Wang, R.; Chen, Y.; Feng, D.; Huang, X.; Wang, J. Development and performance characterization of an electric ground vehicle with independently actuated in-wheel motors. *J. Power Sources* 2011, 196, 3962–3971.
- [Kat-16] Katsuyama, E.; Omae, A. Improvement of Ride Comfort by Unsprung Negative Skyhook Damper Control Using In-Wheel Motors. *SAE Int. J. Altern. Powertrains* 2016, 5, 214–221.

- [Tok-14] Tokita, T.; Goto, H.; Ichinokura, O. An effect of Electromagnetic Force on Acoustic Noise of Axial-gap In-wheel SR Motor. In Proceedings of the 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin, Germany, 2–5 September 2014.
- [Tan-16] Tan, D.; Lu, C.; Zhang, X. Dual-loop PID control with PSO algorithm for the active suspension of the electric vehicle driven by in-wheel motor. *J. Vibroeng.* 2016, 18, 3915–3929.
- [Sun-16] Sun, F.; Xiong, R.; He, H. A systematic state-of-charge estimation framework for multi-cell battery pack in electric vehicles using bias correction technique. *Appl. Energy* 2016, 162, 1399–1409.

VII. ANNEXES

Paramètres de modèle de quart du véhicule électrique

Tableau VII-1 : Spécifications du véhicule « modèle de quart du véhicule »

Paramètre	Valeur	Unité
m_s	292	kg
m_w	40	kg
m_e	45	Kg
k_t	241600	N/m
k_s	17000	N/m
c_s	1317	N/(m/s)
c_d	480	N/(m/s)
k_d	8025	N/m

Programme d'optimisation par DE classique et amélioré (q_1, q_2, q_3, q_4)

Nombre des variables à optimisé	Taille de l'essaim (Nombre des particules)	Nombre d'itérations
4 (q_1, q_2, q_3, q_4)	50	50

Erreur Quadratique Moyenne (Root Mean Square (RMS))

Pour calculer l'erreur quadratique moyenne RMS (*root mean square*), les erreurs individuelles sont tout d'abord élevées au carré, puis additionnées les unes aux autres. On divise ensuite le résultat obtenu par le nombre total d'erreurs individuelles, puis on en prend la racine carrée. Cette erreur nous donne une mesure synthétique de l'erreur globale dans une seule valeur.

$$RMS(x) = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}}$$

Résumé

Ce travail propose une stratégie intégrée de contrôle et d'optimisation visant à améliorer les performances dynamiques des véhicules électriques équipés de moteurs-roues. Le moteur-roue est modélisé comme un absorbeur dynamique de vibrations (DVA), isolé de la masse non suspendue par l'intermédiaire d'un ressort et d'un amortisseur. Pour garantir une efficacité maximale, une commande linéaire quadratique (LQR) est déployée pour piloter simultanément la force générée par l'actionneur du DVA et celle de la suspension active du véhicule. Les matrices de pondération Q et R du LQR, déterminantes pour la qualité du contrôle, sont optimisées à l'aide de l'algorithme d'évolution différentielle (DE) dans deux configurations : la version classique et une version améliorée. Cette dernière introduit une adaptation dynamique des paramètres de mutation et de croisement pour améliorer la convergence vers un optimum global.

Les résultats obtenus par simulation montrent que le dispositif proposé assure une atténuation efficace des vibrations des roues, tout en améliorant significativement la stabilité dynamique et le confort de conduite. Par ailleurs, l'optimisation basée sur le DE amélioré présente des performances supérieures à celles obtenues par le DE classique, notamment par une meilleure réduction des accélérations verticales du châssis, une meilleure stabilité de la charge dynamique des pneus, et une sollicitation moindre des composants mécaniques..

Mots clefs : Suspension de véhicule électrique, Modèle de quart du véhicule, DVA , Contrôle des dynamiques verticales du véhicule électrique, LQR, DE.

المخلص

يقترح هذا العمل استراتيجية متكاملة للتحكم والتهئية بهدف تحسين الأداء الديناميكي للمركبات الكهربائية المزودة بمحركات مدمجة في العجلات. يتم نمذجة المحرك-العجلة كممتص ديناميكي للاهتزازات (DVA) ، معزول عن الكتلة غير المعلقة باستخدام نابض ومخمّد. لضمان فعالية قصوى، تم اعتماد تحكم خطي تربيعي (LQR) لتنسيق التحكم في القوة المولدة من قبل مشغل الـ DVA ومن قبل نظام التعليق النشط للمركبة. وقد تم تحسين مصفوفتي الوزن Q و R الخاصتين بتحكم LQR باستخدام خوارزمية التطور التفاضلي (DE) في نسختين: النسخة الكلاسيكية والنسخة المحسنة، التي تعتمد على تعديل ديناميكي لمعاملات الطفرة والتزاوج لتحسين سرعة التقارب نحو الحل الأمثل.

أظهرت نتائج المحاكاة أن النظام المقترح يحقق تخميذاً فعالاً للاهتزازات، مع تحسين ملحوظ في استقرار المركبة وراحة الركوب. كما أثبتت استراتيجية التحسين باستخدام DE المحسن تفوقها على النسخة الكلاسيكية، من خلال تحقيق خفض أفضل للتسارعات العمودية للهيكل، وتحسين استقرار الحمل الديناميكي للإطارات، وتقليل الإجهادات الميكانيكية على المكونات.

الكلمات المفتاحية: نظام تعليق السيارة ، نموذج ربع للسيارة ، التحكم في الديناميكيات العمودية للسيارة. تقييم الاهتزازات في العجلات ذات محركات كهربائية ، التحكم الخطي التربيعي (LQR)، ممتص اهتزاز ديناميكي (DVA).