

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Automatique

N° :/2023

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: Sciences et Technologies

FILIERE: Automatique

SPECIALITE: Automatique et Systèmes (AS)

Thème

**Conception et réalisation d'une commande floue pour la
navigation autonome de véhicule électrique**

Présenté Par : Dalel Sabba

Encadré Par : Pr. Dounia Saifia

Date de soutenance : 02/07/2023

Jury de Soutenance

Président : Hana Boudjdire

Grade Docteur

Univ MSB Jijel

Encadreur : Dounia Saifia

Grade Professeur

Univ MSB Jijel

Examineur 1 : Aicha Zibra

Grade Docteur

Univ MSB Jijel

Invité : Zoubir Santouh

Grade Professeur

Univ MSB Jijel

Promotion : 2022 /2023

Remerciements

Avant tous, Je remercie *ALLAH*

WJALE tout puissant de m 'avoir donné la volonté, le

courage et la patience lors de toutes ces années d'étude

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir

le jour sans l'aide et l'encadrement de *Mme Dounia Saïfa*

professeur à l'université *Mohammed*

Saddik Ben Yahia Tijel, on le remercie pour la qualité de son

Encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa

disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

J'adresse également mes remerciements à tous les membres de jury qui

nous ont fait le grand honneur en acceptant de juger ce travail, espérons

qu'il soit digne de leurs intérêts.

Tous nos infinis remerciements vont à tous les enseignants qui ont

contribué à notre formation durant notre cursus universitaire.

*je suis très reconnaissant envers Kennouche Amine de m'avoir
aidé.*

*Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements
les plus sincères à ma famille pour leur soutien moral tout au long de ce
travail,*

*J'adresse également mes remerciements particulièrement à tous mes
amis pour leur soutien.*

*Enfin, j'exprime toute mon amitié à mes camarades avec lesquels je
garderai Un bon souvenir.*

*Ma profonde gratitude à toute personne, m'ayant souhaitée un jour
par une petite phrase « bonne chance et bon courage »*

DEDICACE

*À ma très chère mère Mme. Manghour Massika qui a été la
lumière de ma vie*

*À Mon père Mr. Sabba Kamel qui m'a aidé à devenir ce que je
suis aujourd'hui*

À ma directrice de mémoire, Mme Dounia Saïfa

Pour tout l'intérêt qu'elle a porté à bien m'encadrer

*À mes frères, Ammar et Ishak et mes sœurs, Hania, Youssra et
Farah,*

*À mes amis Chaima, Imane, Roumaïssa, Hiba
Zineb, Khawla, Asma, Marwa, Meriem et Serin*

Pour conclure, je le dédie

tous ceux qui

M'ont aimé et m'ont respecté

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : généralité sur la navigation autonome des véhicules

I.1 Introduction.....	3
I.2 Navigation autonome d'un véhicule	3
I.2.1 Histoire sur la navigation autonome	4
I.2.2 Domain d'application de véhicule autonome.....	5
I.2.3 Niveau d'autonomie.....	5
I.2.4 Avantage de navigation autonome.....	6
I.3 Etat de l'art sur les véhicules électriques	7
I.3.1 Définition	7
I.3.2 Architecture d'un véhicule électrique	7
I.3.3 Véhicules électrique à quatre moteurs (FWIDEV).....	14
I.3.4 Avantages et les inconvénients de VE.....	14
I.4 Conclusion	14

Chapitre II : modalisation de la dynamique latérale et longitudinale d'une FWIDEV

II.1 Introduction	16
II.2 Différents mouvements du véhicule	16
II.3 Différents éléments du véhicule	17
II.3.1 Le châssis.....	17
II.3.2 Pneumatique	19
II.3.3 Éléments pour le contrôle longitudinal.....	20
II.3. 4 Éléments pour le contrôle latéral	21

II.3.5 Suspension	21
II.4 Forces appliquées sur le véhicule	22
II.5 Modélisation de la dynamique du FWIDEV	23
II.5.1 Description du système.....	24
II.5.2 Hypothèses de modélisation	24
II.6 Modèle non linéaire de control du véhicule	28
II.7 Conclusion	29

Chapitre III :conception d'une commande floue pour la navigation autonome d'une fWIDEV

III .1. Introduction	30
III.2. système intelligent de navigation autonome du véhicule électrique.....	30
III.3 État de l'art sur la logique floue	31
III.3.1 Définition...	31
III.3.2 Structure d'un contrôleur flou	31
III.4 Représentation d'état des systèmes non linéaires par les modèles de Takagi-Sugeno	33
III.4.1 Méthode d'obtention des modèles flous Takagi-Sugeno	35
III.5. Commande robuste des modèle (T-S).....	35
III.5.1 Stabilité au sens de Lyapunov...	35
III.5.2 Inégalités matricielles linéaires (LMI).....	36
III.5.3 Stabilisation des modèles flous TS par un contrôleur PDC	37
III.6 L'approche H_{∞}	37
III.7. Système de contrôle latéral et longitudinal d'un véhicule électrique.....	38
III.7.1 Modèle (T-S) de control du véhicule	38
III.7.2 Synthèse H_{∞} d'une commande PDC d'un véhicule électrique.....	41
III.8 Contrôleur flou d'évitement des obstacles	43
III.9 Validation de Navigation du véhicule autonome	45
III.9.1 Validation du modèle du modèle (T-S)	46
III.9.2 Validation de La loi de commande.....	47

III.10 Conclusion.....	50
------------------------	----

Chapitre IV : réalisation d'une navigation autonome d'un prototype du FWIDEV

IV.1. Introduction	51
IV.2 Principales parties du robot	52
IV.2.1 Partie électronique.....	52
IV.2.3 Partie mécanique	56
IV.2.3 Partie informatique.....	59
IV.3 Simulation d'un véhicule électrique sur logicielle Proteus 8.	60
IV.3.1 Simulation de sens et vitesse de rotation du moteur par L298L et la carte Arduino.....	60
IV.3.2 Simulation du capteur Ultrason.....	61
IV.3.3 Simulation du servo-moteur.....	62
IV.3.4 validation du montage complète par porteus.....	63
IV.4. Réalisation du système de navigation autonome d'un véhicule électrique.	64
IV.4 .1 Réalisation réelle du capteur ultrason	64
IV.4.2 Test réel du servo-moteur	65
IV.4.3 Réalisation d'un prototype du véhicule	65
IV.5 Réalisation d'un système de contrôle pour la navigation par logique flou.....	67
IV.5.1 Contrôle de la vitesse des moteurs gauche et droit avec logique floue.....	68
IV.5.2 Algorithme de contrôle des actions de déplacement.....	68
IV.6 Conclusion	70
Conclusion générale.....	71

Liste des figures

Chapitre I : généralité sur la navigation autonome des véhicules		
Figure I. 1	Véhicule autonome	04
Figure I.2	Top 10 fabricants du véhicule électriques	07
Figure I.3	Architecture d'un véhicule électrique	08
Figure I.4	Batterie d'un véhicule électrique	08
Figure I.5	Convertisseur d'un véhicule électrique	10
Figure I.6	Processus de charge et décharge d'une batterie lithium	11
Figure I.7	Modes de charge d'un VE	12
Figure I .8	Moteur à courant continu	13
Chapitre II : modalisation de la dynamique latérale et longitudinale d'une FWIDEV		
Figure II.1	Différents mouvements du véhicule	17
Figure II.2	Quelques types du châssis	18
Figure II.3	Caractéristique d'un pneu	20
Figure II.4	Organes pour le contrôle longitudinal	20
Figure II.5	Organes pour le contrôle latéral	21
Figure II.6	Suspension	21
Figure II.7	Forces selon le repère (X, Y)	24
Figure II.8	Positionnement du véhicule sur la voie	28
CHAPITRE III : conception d'une commande floue pour la navigation autonome d'une FWIDEV		
Figure III. 1	Système de navigation	30
FigureIII.2	Exécution du contrôleur flou d'évitement d'obstacle	31

Figure III.3	Structure générale d'un contrôleur flou.	31
Figure III.4	Etape de fuzzification	32
Figure III.5	Moteur d'inférence	32
Figure III.6	Etape de défuzzification	33
Figure III.7	Représentation du concept de l'approche PDC	37
Figure III.8	Fonctions d'appartenance des entrées	44
Figure III.9	Comparaison entre le modèle non linéaire et modèle (T-S)	46
Figure III.10	Vitesse longitudinale de véhicule.	46
Figure III.11	Résultats de commande H_{∞}	47
Figure III.12	Schéma block de poursuite.	48
Figure III.13	Différentes vitesses désirées du véhicule et la courbature de trajectoire	48
Figure III.14	Trajectoire de véhicule	49
Figure III.15	Signaux des commandes	49
Figure III.16	Poursuite en présence des obstacles	50
Chapitre IV réalisation d'une navigation autonome d'un prototype du FWIDEV		
Figure IV. 1	Carte Arduino Uno	53
FigureIV.2	Double pont en H (L298N)	54
Figure IV.3	Capteur ultrason	55
Figure IV.4	Principe de fonctionnement d'un capteur ultrason.	56
Figure IV.5	Servo-moteur	58
Figure IV.6	Principe de fonctionnement d'un servomoteur	58
Figure IV.7	Interface visuelle du logiciel	59
Figure IV.8	Simulation de commande le sens et la vitesse de rotation des MCC par L298N	60

Figure IV.9	Simulation du capteur ultrason test 1	62
Figure IV.10	Simulation du capteur ultrason test 2	62
Figure IV.11	Simulation de servomoteur	63
Figure IV.12	L'installation des éléments électroniques du prototype pour éviter les obstacles	64
Figure IV.13	Réalisation simple d'un capteur ultrason	64
Figure IV.14	Réalisation simple d'un servo-moteur	65
Figure IV.15	Matériel utilisé	66
Figure IV.16	Moteurs et roues assurés sur le châssis	66
Figure IV.17	Forme finale	67
Figure IV.18	Téléchargement du programme dans la carte Arduino	67
Figure IV.19	Partie de programme par logique floue	68
Figure IV.20	Organigramme du mouvement du véhicule	69
Figure IV.21	Fonction Loop () du programme Matériel utilisé	69
Figure IV.22	Test évitement d'obstacle	70

Liste des tableaux

Chapitre III		
Tableau III-1	Fonctions d'appartenance des entrées	44
Tableau III-2	Paramètre des sorties (vitesse des moteurs à droite et à gauche).	45
Tableau III-3	Règles floues	45
Tableau III-4	Paramètre du véhicule	45
Chapitre IV		
Tableau IV-1	Caractéristique du capteur ultrason	55
Tableau IV-2	Caractéristique des roues.	57
Tableau IV-3	Caractéristique des moteurs	57
Tableau IV-4	Caractéristiques du servo-moteur	58

NOMENCLATURE

$x(t)$: Variables d'états.

$u(t)$: Variable d'entrée (la commande).

$y(t)$: Variable de sortie.

$z(t)$: Variable de prémisse.

h_i : Fonction d'activation.

F_x : Les forces longitudinales.

F_y : Les forces latérales.

M_z : Le moment de lacet.

U_x : La vitesse longitudinale du véhicule.

U_y : La vitesse latérale du véhicule.

r : Vitesse de lacet.

μ : Coefficient de friction.

λ_i : Dérapage des pneus.

α_i : Angle de patinage des pneus.

α : Rigidité au glissement latérale des pneus.

C_λ : Rigidité au glissement longitudinale du pneu.

J : Moment d'inertie de lacet du véhicule.

m : Masse totale de véhicule.

M_d : Vitesse du vent.

A_{dr} : Traînée aérodynamique.

r_w : Rayon de roue effectif.

$\dot{\psi}_L$: L'erreur de l'angle lacet.

y_L : L'erreur qui représente la distance entre le centre de gravité de véhicule et le route.

ρ : C'est la courbature de trajectoire.

g : Attraction de la Terre.

ρ : Masse volumique de l'air.

S : Surface de dessous du véhicule.

V : Vitesse du véhicule.

C_z : Coefficient de portance.

C_x : Coefficient de traînée.

w_i : l'angulaire vitesse de chaque roue.

ABRIVIATION

BEV : Battery Electric Vehicle.

VE : véhicules électriques.

DC : courant continu.

AC : courant alternatif.

MCC : Moteur à courant continu.

FWIDEV: Four-Wheel Independently Driven Electric Vehicle.

CG : Centre de gravité.

NL : Non linéaire.

T-S : Takagi-Sugeno.

PDC : Parallel Distributed Compensation (loi de commande basée sur le retour d'état).

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, la recherche dans le domaine des transports routiers a connu une augmentation significative de l'intérêt et de l'investissement de la part des laboratoires, des chercheurs, des industriels et des équipementiers automobiles. Cette évolution est motivée par la nécessité d'améliorer la sécurité, de l'augmentation de l'efficacité de l'infrastructure routière, l'amélioration de la sécurité et du confort des passagers et de développer la conduite autonome [1].

Malgré les efforts des politiques en matière de prévention, d'information, ainsi que ceux des constructeurs automobiles en matière de sécurité passive et active, le véhicule automobile demeure l'une des principales causes de mortalité. Cela est dû à l'intervention humaine dans des processus complexes de conduite qui ne sont pas toujours adaptés aux limites physiologiques de l'homme, tels que l'acuité visuelle, l'évaluation des distances et la perte d'attention. Cependant, grâce aux progrès de l'automatique, de l'informatique, des télécommunications et de la miniaturisation des instruments, les chercheurs développent des systèmes d'aide à la conduite qui automatisent certaines tâches et introduisent de nouveaux dispositifs de sécurité pour améliorer la stabilité du véhicule en cas d'accélération latérales ou longitudinales, permettant ainsi une réponse plus rapide aux sollicitations du conducteur [2]. En parallèle à la prise en considération de la sécurité et du confort des passagers, l'impact environnemental des véhicules est de plus en plus pris en compte, et l'utilisation de véhicules électriques constitue une solution prometteuse pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et la pollution atmosphérique. En effet, ils sont des véhicules qui fonctionnent principalement ou exclusivement avec l'électricité stockée dans une batterie rechargeable. Ils sont de plus en plus populaires en raison de leur efficacité énergétique, de leur impact environnemental réduit et de leur potentiel pour une mobilité durable.

Le système de contrôle de navigation des véhicules électriques a pour but d'optimiser l'efficacité et la performance tout en facilitant leur utilisation. Ce système joue un rôle crucial dans la gestion de la consommation d'énergie, la planification des trajets et l'amélioration de l'expérience globale des conducteurs de véhicules électriques. IL intègre des capteurs, des logiciels de traitement des données et des algorithmes avancés pour percevoir l'environnement, prendre des décisions et contrôler le véhicule de manière sûre et efficace. La conception de tel processus est une tâche très complexe. Les véhicules électriques en particulier, les véhicules équipés de quatre moteurs nommés FWIDEV

(**F**our-**W**heel **I**ndependently **D**riven **E**lectric **V**ehicles) offrent une flexibilité accrue pour la réalisation de ce système. Le contrôle précis des moteurs individuels, la répartition dynamique de la puissance, le contrôle avancé de la direction. Ces avantages permettent de développer des véhicules autonomes plus agiles, plus stables et plus sûrs, adaptés à une variété d'applications et de configurations de véhicules.

Le développement d'un système intelligent de pilotage autonome pour les véhicules accorde une attention particulière à la logique floue en raison de sa capacité à traiter et à gérer des informations incertaines ou vagues et à prendre en compte des variables linguistiques et de raisonnements humains. L'objectif principal de notre travail est de réaliser une stratégie de commande floue permet au véhicule de détecter et d'éviter de manière autonome les obstacles, garantissant ainsi une navigation stable selon une trajectoire désirée. Notre système est composé de deux éléments essentiels, un contrôleur flou de type Sugeno chargé de prendre des mesures pour éviter les collisions, ainsi qu'une commande PDC (**C**ompensation **P**arallèle **D**istribuée) robuste responsable de garantir que le véhicule suit la trajectoire désirée.

Les travaux développés dans ce mémoire sont structurés en quatre chapitres :

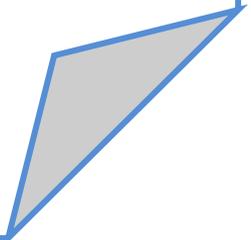
Dans le premier chapitre, on a présenté quelques généralités sur les véhicules électriques et la navigation autonome du véhicule.

Dans le deuxième chapitre, nous fournissons des définitions relatives aux mouvements et aux organes du véhicule qui interviennent dans la dynamique du véhicule. Un modèle non linéaire de la dynamique latérale et longitudinale du véhicule électrique est donné.

Le chapitre trois est consacré à la conception d'une stratégie de commande floue pour assurer à la fois la sécurité en évitant les obstacles et la précision en maintenant le véhicule sur la trajectoire souhaitée. Les lois de commande sont conçues en se basant sur la logique floue, l'approche LMIs, la fonction de Lyapunov et le critère H_∞ .

Le dernier chapitre est dédié à la réalisation d'un prototype d'un véhicule électrique de type FWIDEV pour l'évitement d'obstacle. Au premier lieu, on a fait appel aux différentes parties de prototype ; informatique, mécanique et électronique. Ainsi on a utilisé le logiciel portus pour tester la simulation des composants avant sa mise en œuvre réelle. Finalement, une validation réelle de notre véhicule est réalisée.

CHAPITRE I
GENERALITE SUR LA NAVIGATION
AUTONOME DES VÉHICULES



Chapitre I généralité sur la navigation autonome des véhicules

I.1 Introduction

Les moyens de transport, comme chacun le sait jouent un rôle très important et sont devenus une partie intégrante de nos vies. Parmi ces moyens, se trouve la voiture. Il est impossible que n'ayez pas remarqué le terrible développement dans le domaine des véhicules ou autrement dit la technique automobile. Vous pouvez imaginer que la première voiture au monde est apparue en 1769 appelée « fardier à vapeur » est une charrette à trois roues avec une chaudière à l'avant devenue une voiture intelligente (autonome) ! qui utilisent différentes sources d'énergie, telles que les voitures hybrides et électriques, le tout dans le but de répondre aux besoins humains et d'assurer la sécurité, le confort et pour protéger l'environnement aussi.

Le système de pilotage autonome des véhicules utilise des capteurs, des logiciels et des algorithmes d'intelligence artificielle pour permettre aux véhicules de se déplacer de manière autonome. Il comprend la perception de l'environnement, la planification de trajectoire et la prise de décisions de conduite pour offrir une conduite autonome sûre et confortable. Les avantages du système de contrôle de navigation pour les véhicules électriques sont nombreux, on cite :

- Planification des trajets.
- Gestion de la consommation d'énergie.
- Intégration de la recharge.
- Expérience de conduite améliorée.

Dans ce chapitre, nous fournissons des généralités sur la navigation autonome, ainsi qu'un tour d'horizon sur les voitures électriques. Nous nous pencherons sur leurs composants les plus importants et leurs avantages par rapport aux voitures ordinaires qui utilisent le carburant comme source d'énergie.

I.2 Navigation autonome d'un véhicule

La navigation est communément définie comme le processus de guidage des véhicules d'un lieu à un autre. Une voiture dite autonome est équipée d'un système de pilotage automatique qui lui permet de circuler sans intervention humaine dans des conditions de circulation réelle. Elle est également connue sous les appellations de véhicule autonome,

véhicule automatisé, véhicule à délégation de conduite ou véhicule entièrement automatisé.

Ce type de véhicule automobile est capable de rouler sans l'intervention d'un conducteur, que ce soit sur des routes ouvertes ou d'autres types de voies publiques. L'idée derrière ce concept est de permettre au véhicule de se déplacer en toute autonomie, en utilisant des capteurs, des caméras, des radars, des cartes numériques et des systèmes de navigation avancés pour percevoir l'environnement, prendre des décisions de conduite et effectuer les actions nécessaires pour se déplacer en toute sécurité [3].



Figure I.1 : véhicul autonome [4].

I.2.1 Histoire sur la navigation autonome

Les premiers travaux fondateurs dans le domaine des véhicules autonomes remontent aux années 80, avec les prototypes "Navlab" développés par l'université américaine Carnegie-Mellon. L'Europe a également montré un intérêt précoce pour cette technologie, notamment à travers le programme européen Prometheus qui s'est déroulé de 1987 à 1996. Ces travaux ont engendré de nombreuses innovations en matière d'aide à la conduite.

C'est dans les années 2000 que plusieurs challenges américains organisés par la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) en 2004, 2005 et 2007 ont démontré que la technologie permettait de créer des "véhicules autonomes" capables de fonctionner sans conducteur à bord. Depuis le début des années 2010, nous avons assisté à des démonstrations de plus en plus avancées qui ont marqué le domaine. Par exemple, lors de IAC (l'Intercontinental Autonomous Challenge) de l'université de Parme en 2010, plusieurs véhicules ont réussi à rejoindre l'exposition universelle de Shanghai.

À cette époque, Google a également lancé son projet de voiture autonome, connu sous le nom de "Self-Driving Car", qui est désormais, en 2020, à sa cinquième génération sous

la marque Waymo. En 2014, le constructeur allemand Daimler a réalisé un parcours de 100 km avec très peu d'interventions du conducteur de sécurité, lors d'un événement commémorant le parcours historique de Bertha Benz [5].

Bien que de nombreux autres exemples puissent être cités, on constate une évolution progressive des véhicules particuliers vers des véhicules autonomes. Cela signifie qu'ils sont capables de prendre le contrôle des actionneurs habituellement manipulés par le conducteur, dont le rôle se transforme en superviseur dans certaines tâches de conduite [6].

I.2.2 Domaine d'application de véhicule autonome

Voici quelques domaines d'utilisation des voitures à conduite autonome :

- Transport de passagers.
- Livraison de marchandises.
- Transport en cas d'urgence.
- Transports publics.
- Utilisation personnelle.
- Services d'urgence.

I.2.3 Niveau d'autonomie

Le tout premier référentiel conçu pour qualifier le niveau de prise en charge de la conduite par les logiciels de pilotage automatique des véhicules a été établi par l'agence fédérale américaine du transport, la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration). Ce référentiel est entré en vigueur en octobre 2016 et comprend cinq niveaux, du niveau 0 au niveau 4 :

Niveau 0 : Aucune assistance à la conduite ; Le conducteur a le contrôle total et exclusif à tout moment des fonctions primaires du véhicule, telles que les freins, la direction, l'accélération et la force motrice.

Niveau 1 : Assistance à la conduite ; Le conducteur conserve le contrôle total du véhicule, mais dispose de fonctions d'aide ou d'assistance à la conduite, telles que l'ABS (système de freinage antiblocage), l'ESP (programme électronique de stabilité), l'assistance au freinage, le régulateur et/ou le limiteur de vitesse.

Niveau 2 : Automatisation partielle ; Au moins deux fonctions primaires du véhicule sont automatisées. Le véhicule peut être équipé de dispositifs d'aide à la conduite plus avancés, qui interviennent, par exemple, à la fois sur le freinage et l'accélération.

Niveau 3 : Contrôle partiel du conducteur ; À ce stade, les véhicules permettent au conducteur de céder le contrôle complet du véhicule et de toutes ses fonctions primaires dans certaines conditions de circulation et météorologiques. Le véhicule est capable de détecter

un changement de ces conditions qui ne lui permet plus d'assurer un autopilotage et il informe alors le conducteur pour qu'il puisse reprendre le contrôle du véhicule dans un laps de temps confortable.

Niveau 4 : Autonomie complète ; Le véhicule est conçu pour assurer pleinement toutes les fonctions principales de conduite et est apte à circuler en toute autonomie sur la totalité d'un trajet. Le conducteur n'a pas besoin d'intervenir pour reprendre le contrôle du véhicule.

Il est important de noter que cette classification est sujette à des évolutions et des mises à jour, car la technologie des véhicules autonomes continue à se développer [7].

I.2.4 Avantage de navigation autonome

Il y a plusieurs avantages offerts par la conduite autonome, notamment :

- ☞ Amélioration de la sécurité : La conduite autonome repose sur des technologies avancées telles que les systèmes de détection et l'intelligence artificielle, ce qui réduit les risques d'accidents de la route dus aux erreurs humaines. Les systèmes autonomes peuvent détecter les dangers et réagir rapidement pour éviter les accidents et atténuer les conséquences.
- ☞ Augmentation de l'efficacité énergétique : Un système autonome peut adopter des techniques de conduite plus efficaces en termes de consommation de carburant et de réduction des émissions nocives. Il peut également s'adapter au trafic et aux différentes conditions routières pour améliorer l'efficacité de la conduite.
- ☞ Économie de temps et confort : Plutôt que de conduire manuellement, les individus peuvent profiter du temps passé sur la route pour effectuer d'autres activités telles que travailler, se détendre ou se divertir. Ils peuvent également se relaxer dans les sièges et profiter du confort lors de longs trajets.
- ☞ Réduction de la congestion routière : Lorsque de nombreuses personnes adoptent la conduite autonome, il est possible d'améliorer le flux du trafic et de réduire les embouteillages. Le système autonome fonctionne en harmonie avec les autres véhicules, réduisant les encombrements et les retards de circulation.
- ☞ Accessibilité aux personnes en situation de handicap : La conduite autonome peut être une technologie précieuse pour les personnes handicapées qui rencontrent des difficultés avec la conduite traditionnelle. Elle leur offre la possibilité de se déplacer librement sans dépendre des autres.

Ce ne sont là que quelques-uns des avantages potentiels de la conduite autonome, et à mesure que la technologie progresse, de plus en plus d'avantages pourraient émerger à l'avenir.

I.3 Etat de l'art sur les véhicules électriques

I.3.1 Définition

Les véhicules électriques sont aussi appelés **BEV** « **B**attery **E**lectric **V**ehicle ». Ces véhicules utilisant un ou plusieurs moteurs fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique au lieu d'un moteur thermique (diesel ou essence). Généralement, les moteurs de véhicule électrique alimentés par une batterie d'accumulateurs.

Récemment, une grande concurrence est apparue entre les entreprises spécialisées dans le domaine de la fabrication de véhicules électriques, et les plus importantes de ces entreprises sont présentées dans la figure suivante :

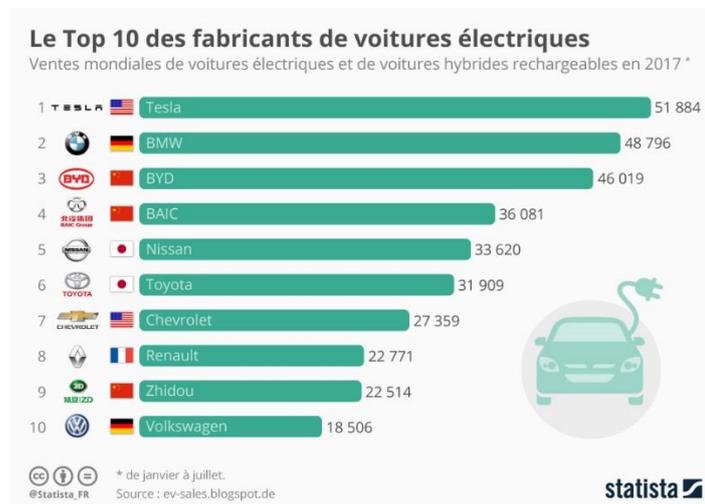


Figure I.2 : Top 10 fabricants du véhicule électriques [8]

I.3.2 Architecture d'un véhicule électrique

De nos jours, les véhicules électriques sont devenus populaires, car ils offrent des performances et de nombreux avantages.

Contrairement à un véhicule traditionnel, la voiture électrique facile de comprendre, elle fonctionne grâce à un moteur électrique alimenté par l'énergie électrique stockée dans une batterie au lithium rechargeable. La vitesse peut être contrôlée en faisant varier la fréquence de l'alimentation électrique du moteur.

Les composants principaux les plus importants sont le chargeur de batterie, la batterie, le convertisseur, le moteur et la transmission en détail ci-dessous :

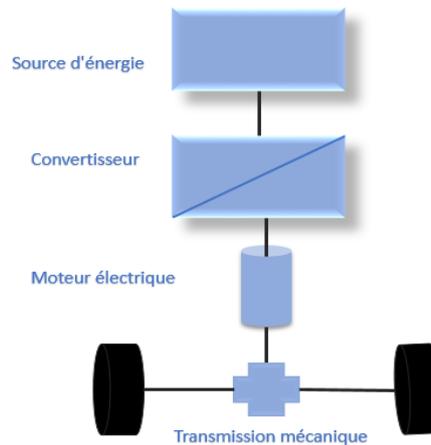


Figure I.3 : Architecture d'un véhicule électrique

I.3.2.1 Batterie de véhicule électrique

La batterie est une source et un réservoir d'énergie en même temps représente le cœur de tout véhicule électrique. Leur rôle est de convertir l'énergie chimique en énergie électrique. se compose au moins de deux cellules électrochimiques assemblées; chaque cellule est composé de deux électrodes un négative et positive connectées par un électrolyte. L'électricité se produit par l'effet chimique entre les électrodes et l'électrolyte.

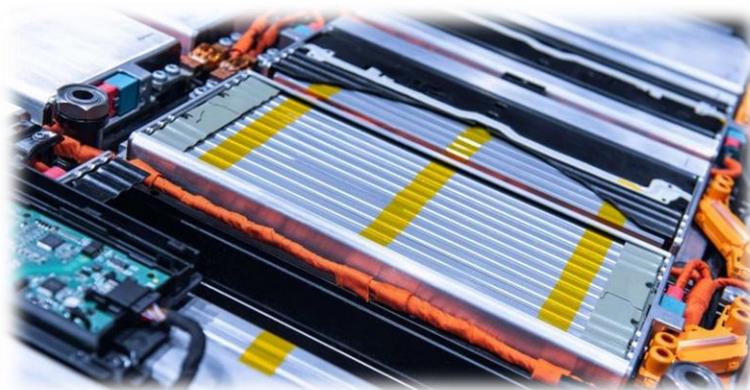


Figure I.4 : Batterie d'un véhicule électrique [9]

La batterie d'un véhicule électrique est une batterie rechargeable, généralement un accumulateur lithium-ion, dont la capacité est exprimée en kilowattheures (kWh). Plus la batterie est grande, c'est-à-dire avec un nombre élevé de cellules, plus elle est capable d'offrir une autonomie généreuse à la voiture électrique. La consommation d'énergie d'un véhicule électrique est mesurée en kWh par 100 kilomètres parcourus. Cela permet d'estimer la quantité d'énergie consommée pour parcourir une certaine distance. La batterie est l'élément

le plus lourd de la voiture électrique, pesant plusieurs centaines de kilos, et c'est également l'élément le plus cher. Il est important de faire la distinction entre la capacité utile de la batterie (la charge maximale qu'elle peut réellement accepter pour préserver sa durée de vie) et sa capacité nominale, qui est toujours supérieure. La vitesse de recharge d'une batterie dépend de la capacité du convertisseur intégré à la voiture électrique [9].

Quelques types de batteries

La batterie le plus couramment utilisé par les constructeurs automobiles sont les batteries au lithium qui sont divisés en trois types importants sont :

➤ LI-PO (lithium-polymère)

Il est considéré comme le meilleur car , il a une durée de vie plus longue et peut résister à la chaleur, mais ses inconvénients sont sa grande taille et son prix élevé.

➤ LI-ION (lithium-ion)

Il se distingue par sa durée de vie moyenne et sa taille moyenne, ainsi que par son bon prix, mais son rapport à la chaleur est mauvais.

➤ Ternary li (Ternary lithium)

L'un de ses avantages les plus importants est sa haute résistance à la chaleur, sa petite taille et son prix bon marché.

Principe de fonctionnement

Une batterie se compose d'un ou plusieurs accumulateurs et chacun a deux électrodes. Dans de nombreux modes de réalisation, la cathode est en oxyde de cobalt (CoO₂), avec un peu de lithium, et l'anode est en graphite. L'électrolyte contient une grande quantité d'ions lithium.

➤ Processus de décharge

Dans le grenier de décharge, les électrons se déplacent en raison de la différence de tension, ainsi les électrons circulent de l'électrode positive à l'électrode négative à travers le circuit externe. Les ions lithium chargés positivement quittent l'anode pour retourner à la cathode où ils sont attirés par les charges négatives des électrons.

➤ Processus de charge

Le processus de charge s'effectue en envoyant des électrons du pôle négatif au pôle positif par un chargeur externe connecté à la batterie. En conséquence, les ions lithium se déplacent de la cathode à l'anode pour équilibrer la charge électrique. La batterie est complètement chargée une fois que tous les ions sont passés. Le fabricant de la batterie

charge d'abord la batterie et provoque l'accumulation d'ion lithium dans l'anode, provoquant une différence de potentiel entre la cathode et l'anode.

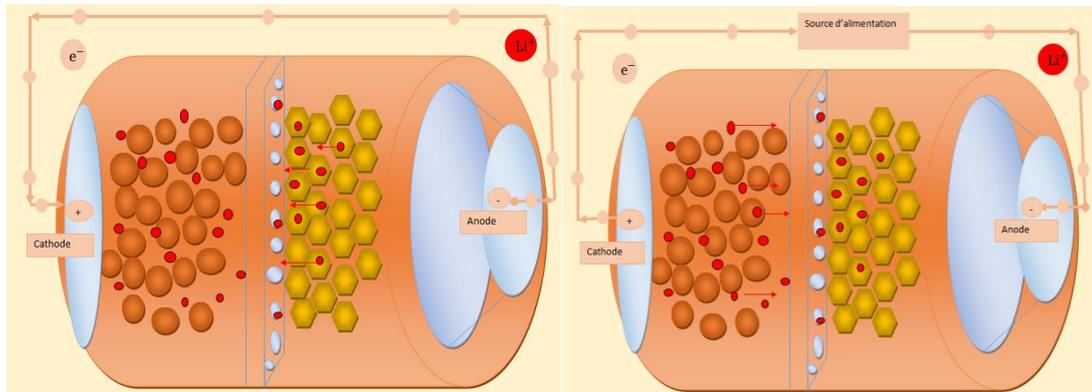


Figure I.5: Processus de charge et décharge d'une batterie lithium

I.3.2.2 Moteur électrique

Les véhicules électriques (VEs) utilisent principalement des moteurs électriques à courant continu (DC) ou à courant alternatif (AC), en fonction de leur taille et de leur application. Les moteurs à courant alternatif sont généralement utilisés dans les véhicules plus grands, tandis que les moteurs à courant continu se trouvent dans des robots mobiles à roues. Quel que soit le type de moteur utilisé, son rôle principal est de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, permettant ainsi la propulsion du véhicule.

➤ Moteur à courant alternatif

Il est composé de deux parties essentielles :

Le stator : appelé aussi inducteur son rôle est de créer un champ magnétique tournant dans le rotor. Il est composé de trois enroulements alimentés par un réseau triphasé.

Le rotor : appelé aussi induit est la partie mobile du moteur, il peut être un rotor à cage d'écureuil ou rotor bobiné.

Comme nous avons dit précédemment, pour la traction d'un véhicule électrique on utilise le moteur à courant alternatif, car étant plus légers, moins coûteux, offrent un rendement beaucoup plus élevé, une fiabilité plus grande, etc. Il existe deux types de moteurs électriques à courant alternatif : les moteurs asynchrones et les moteurs synchrones [10].

Principe de fonctionnement

▪ Moteur asynchrone ou à induction

Le moteur asynchrone, également connu sous le nom de moteur à induction, génère un champ magnétique tournant à l'aide du stator alimenté en électricité. Ce champ magnétique entraîne la rotation du rotor, mais ce dernier ne parvient jamais à rattraper complètement le

champ magnétique. C'est cette différence de vitesse, appelée glissement, qui crée le couple nécessaire pour faire tourner le rotor. En raison de ses avantages en termes de fiabilité, de rendement énergétique et de plage de vitesse, le moteur asynchrone est souvent utilisé dans les véhicules électriques conçus pour les déplacements longs et à grande vitesse [10]

▪ Moteur synchrone

Dans le moteur synchrone, le rotor remplit lui-même la fonction d'électro-aimant et participe ainsi de manière active à la création du champ magnétique. Sa vitesse de rotation est donc directement proportionnelle à la fréquence du courant qui alimente le moteur. Le moteur synchrone est donc idéal pour la conduite urbaine, qui implique généralement des arrêts réguliers et des redémarrages à faible vitesse [11].

I.3.2.3 Convertisseur statique

La plupart des moteurs de voitures électriques utilisent du courant alternatif, contrairement à la batterie qui stocke du courant continu, ce courant doit donc être converti en courant alternatif et ce processus s'effectue à l'aide d'un convertisseur, ou plus précisément de ce qu'on appelle un onduleur. Il est également considéré comme une interface entre la transmission, l'accélérateur, le bouton de démarrage et le sélecteur de mode de conduite. Il joue également un rôle important, car il est capable de récupérer de l'énergie lors d'un freinage ou lorsque le véhicule fait une déviation [12].



Figure I.6 : Convertisseur d'un véhicule électrique [12].

I.3.2.4 Transmission

Les moteurs électriques n'ont pas besoin d'une transmission traditionnelle en raison de leur plage de régimes plus large et de leur couple élevé dès le départ. Ils offrent une réponse instantanée et une accélération rapide, éliminant ainsi le besoin de changer de vitesse

fréquemment. Leur conception mécanique plus simple réduit les coûts de fabrication et les risques de pannes. De plus, les voitures électriques peuvent utiliser un système de freinage régénératif pour récupérer de l'énergie, sans nécessiter de transmission supplémentaire. Bien qu'un sélecteur de mode de conduite puisse être présent, il ne remplace pas la nécessité d'une transmission à plusieurs vitesses [12].

I.3.2.5 Chargeur

Principe de fonctionnement

Pour recharger un véhicule électrique, il existe trois modes de charge :

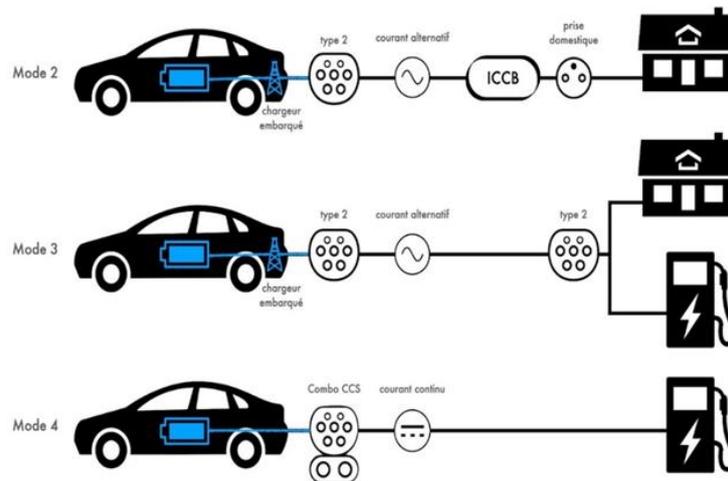


Figure I.7 : Modes de charge d'un VE [13].

- ⚡ Mode 2 : recharge sur une prise domestique classique dédiée ou non. Dans ce mode, le véhicule est branché sur une prise électrique standard, mais le câble utilisé doit être équipé d'une diapositive de protection pour contrôler le bon déroulement de la charge. Le chargeur embarqué dans le véhicule assure la conversion du courant alternatif en courant continu pour alimenter la batterie. La puissance de charge dans ce mode ne peut pas dépasser 3,7 kW.
- ⚡ Mode 3 : recharge en courant alternatif sur une borne fixe. Ce mode implique la connexion du véhicule à une borne de recharge fixe, que ce soit à domicile ou sur le domaine public, à l'aide d'une prise de type 2 du côté de la borne. Le courant fourni au véhicule est de type alternatif, et c'est le chargeur embarqué du véhicule qui se charge de convertir ce courant en courant continu pour la batterie. Lorsque le véhicule est alimenté en courant alternatif monophasé, la puissance de charge peut atteindre 7,4 kW, et elle peut aller jusqu'à 22 kW en courant alternatif triphasé.
- ⚡ Mode 4 : charge rapide en courant continu. Dans ce mode, la conversion du courant

alternatif en courant continu est effectuée au niveau de la borne de recharge. Le véhicule est donc alimenté directement en courant continu, et le chargeur embarqué du véhicule n'est plus utilisé. Ce mode permet d'atteindre des puissances de recharge plus élevées et est particulièrement adapté aux longs trajets où une recharge rapide est nécessaire.

Il est important de noter que les caractéristiques des modes de charge peuvent varier en fonction du véhicule électrique et des infrastructures de recharge disponibles. Les puissances de charge mentionnées ici sont données à titre indicatif et peuvent varier d'un véhicule à l'autre [13].

➤ Moteur à courant continu

La batterie de VE est une batterie à courant continu. Donc, on trouve des moteurs à courant continu dans les véhicules électriques. Généralement, ils servent à actionner les essuie-glaces et les vitres, etc. Pour la traction de véhicule électrique est-elle assurée par un moteur à courant alternatif.

Principe de fonctionnement

Le moteur à courant continu est composé de trois parties essentielles :

Le stator : appelé aussi inducteur son rôle est de créer un champ magnétique est la partie fixe du moteur il peut être des aimants permanents dans moteurs de faibles puissances et aussi peut être des électroaimants.

Le rotor : appelé aussi induit est la partie mobile du moteur, il est composé par des bobines formées par plusieurs spires.

Collecteur /balais : utilisé pour faire passer l'énergie électrique au rotor. Il permet aussi de basculer le courant pour qu'il circule de façon optimale.

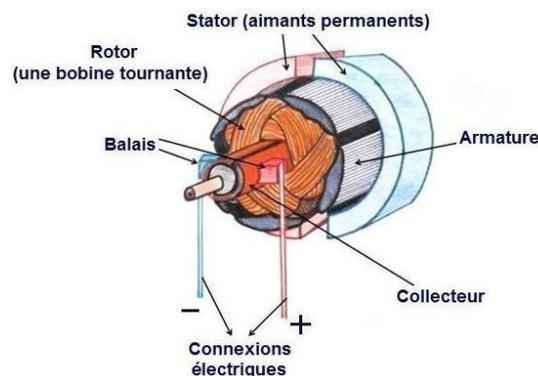


Figure I.8: Moteur à courant continu [14].

Le fonctionnement des moteurs DC s'appuie sur deux principes de l'électromagnétisme :

- ✦ Quand un conducteur traversé par un courant est assujetti à un champ magnétique

une force proportionnelle qui tend à déplacer ce conducteur.

- ✦ Lorsqu'une bobine de fil de cuivre est soumise à l'effet d'un champ magnétique qui varie au cours du temps, une tension, appelée tension induite, apparaît à ses bornes. Ce voltage est proportionnel au changement du champ magnétique.

Le stator (aimants ou électroaimants) produit un champ magnétique. Le courant (courant induit) passant à travers les bobines de rotor crée un champ magnétique. La force qui apparaît dans ces conditions fait tourner chacune des spires sur son axe [15].

I.3.3 Véhicules électrique à quatre moteurs (FWIDEV)

Le FWIDEV (**F**our-**W**heel **I**ndependently **D**riven **E**lectric **V**ehicle) est une avancée technologique dans le domaine des véhicules électriques. Contrairement aux véhicules traditionnels à propulsion par un seul moteur, les FWIDEV sont dotés de quatre moteurs électriques distincts, un pour chaque roue. Cette configuration permet un contrôle précis et indépendant de chaque roue, offrant des performances et une maniabilité améliorée.

Les moteurs utilisés dans les véhicules FWIDEV peuvent être de différents types, mais les moteurs à courant continu (DC) sont couramment utilisés dans les applications de véhicules électriques.

I.3.4 Avantages et les inconvénients de VE

Si cette voiture suscite votre intérêt ou si vous souhaitez remplacer votre voiture habituelle par cette voiture, vous devez être conscient de ses avantages et de ses inconvénients.

Avantages

On voit ici quelques points :

- Réduction des émissions d'une ou aucune particule mauvaise pour l'environnement.
- Réduction de la pollution sonore.

Inconvénients

On voit ici quelques points

- Marcher quelques kilomètres.
- Il faut beaucoup de temps pour recharger.
- Pollution de l'environnement causée par les batteries.

I.4 Conclusion

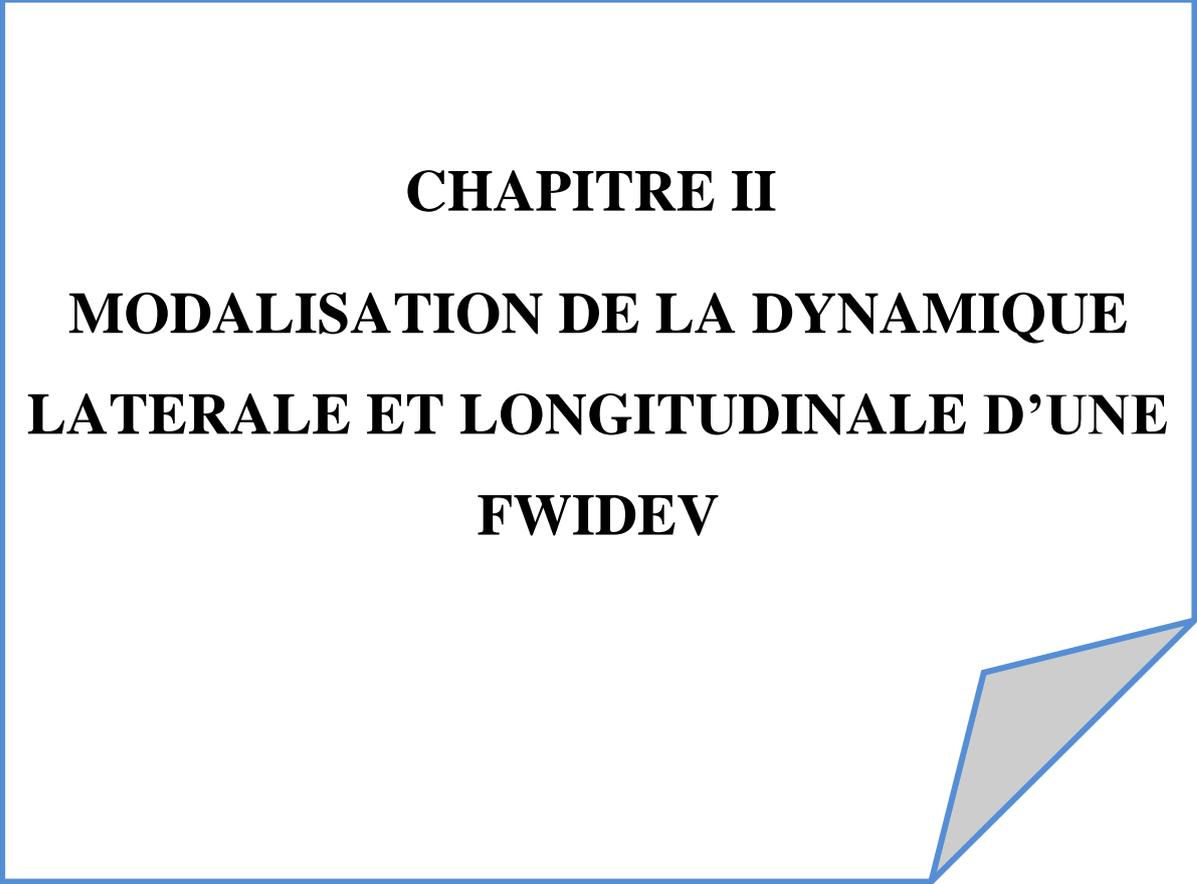
Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur la navigation autonome des véhicules. Tout d'abord, nous avons défini ce qu'est un véhicule autonome, puis nous avons abordé les différents niveaux d'autonomie et les principaux avantages associés.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons choisi de nous concentrer sur les véhicules électriques pour. Nous avons discuté des composantes principales de ces véhicules, à savoir le chargeur de batterie, la batterie elle-même, le convertisseur, le moteur et la transmission. Ensuite, nous avons examiné certains des avantages de ce type de véhicule, Cependant, nous avons également abordé certains inconvénients.

On conclut, qu'il est clair que l'avenir de la mobilité semble être axé sur les véhicules électriques. Les avancées technologiques continuent d'améliorer les performances des batteries et de résoudre les problèmes liés à l'infrastructure de recharge, ce qui rend les véhicules électriques de plus en plus attrayants sur le marché automobile. En particulier, les FWIDEV offrent des avantages significatifs dans le contexte du pilotage automatique de conduite. Leur configuration avec des moteurs électriques indépendants pour chaque roue avant permet un contrôle précis et réactif, une répartition équilibrée du poids, une stabilité directionnelle améliorée et la capacité de fournir un couple vectoriel. Ces caractéristiques contribuent à une conduite autonome plus sûre, plus stable et plus performante, offrant ainsi une expérience de conduite améliorée pour les utilisateurs.

CHAPITRE II

**MODALISATION DE LA DYNAMIQUE
LATERALE ET LONGITUDINALE D'UNE
FWIDEV**



Chapitre II modalisation de la dynamique latérale et longitudinale d'une FWIDEV

II.1 Introduction

Les véhicules électriques sont alimentés par des batteries rechargeables et utilisent des moteurs électriques pour propulser le véhicule. Ils ont gagné en popularité ces dernières années, soutenus par les efforts visant à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à promouvoir la mobilité durable. Les véhicules à quatre moteurs, également connus sous le nom de véhicules électriques à quatre roues motrices indépendantes (**FWIDEV**) sont équipés d'un moteur indépendant pour chaque roue, ce qui leur confère une meilleure adhérence et une meilleure stabilité dans des conditions de conduite difficiles. La répartition du couple moteur entre les différentes roues peut être gérée électroniquement, ce qui permet d'optimiser la performance de conduite dans différentes situations. Les véhicules électriques peuvent fournir une plateforme propice au pilotage automatique en raison de la présence de systèmes électroniques sophistiqués nécessaires à la gestion de l'énergie électrique et du moteur. De plus, les véhicules à quatre moteurs peuvent améliorer la stabilité et la maniabilité du véhicule pendant la conduite autonome, en optimisant la répartition de la puissance entre les différentes roues pour une adhérence maximale. Cependant, la réalisation de véhicules électriques avec pilotage automatique reste un défi en raison de la complexité de la modélisation de leurs dynamiques.

Ce chapitre sera consacré à décrire les éléments nécessaires à la modélisation et le contrôle d'un véhicule dont le but de concevoir un contrôle de navigation autonome du véhicule électrique.

II.2 Différents mouvements du véhicule

Un véhicule est un système mécanique non linéaire très complexe ; c'est un ensemble d'organes reliés entre eux par plusieurs liaisons dans le but d'assurer les meilleures conditions pour le transport des personnes et des biens et pour assurer le confort des passagers assis à l'intérieur et la sécurité des personnes lorsqu'ils sont assis à l'intérieur et l'extérieur aussi. Il est composé d'un châssis et d'un système de liaison au sol (les pneumatiques, les roues, les trains et les suspensions).

Le véhicule représenté sur la figure (II .1) possède six degrés de liberté, trois degrés pour le mouvement en translation et trois degrés pour le mouvement en rotation du centre de gravité de la masse suspendue. Les différents mouvements du véhicule sont définis sur le repère orthonormé direct , avec G l'origine de repère représente le CG du véhicule[1] :

🚗 Le déplacement longitudinal se fait selon l'axe.

🚗 Le déplacement latéral se fait selon l'axe.

🚗 Le mouvement vertical de la caisse du véhicule se fait selon l'axe.

Les rotations de la masse suspendue par rapport aux trois axes sont :

🚗 **Le roulis (φ)** : lorsque le véhicule se déplace dans un virage, il fait une rotation autour de l'axe G_x .

🚗 **Le tangage (θ)** : lors des phases d'accélération et de freinage le véhicule fait des mouvements angulaires autour de l'axe G_y .

🚗 **Le lacet (ψ)** : le véhicule fait des rotations autour de l'axe G_z (rotation de cap).

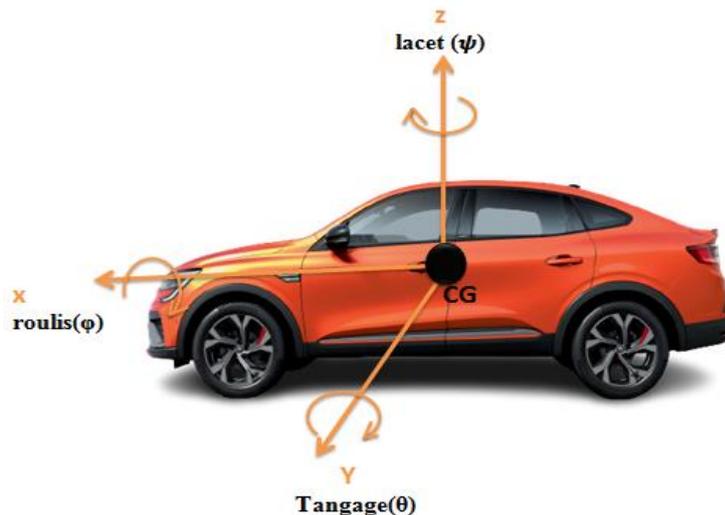


Figure II.1 : Différents mouvements du véhicule

II.3 Différents éléments du véhicule

Comme nous l'avons dit précédemment, le véhicule est un ensemble d'organes chaque élément effectue une tâche spécifique qu'il est donc, important de comprendre pour la modalisation. Dans cette partie, nous décrirons le châssis, le pneumatique, le comportement longitudinal, le comportement latéral et finalement la suspension.

II.3.1 Le châssis

Où la masse suspendue est la structure métallique externe qui supporte toutes les parties mécaniques. Il existe plusieurs types en fonction du véhicule. Elle contient l'habitacle, le groupe moteur et le système de commande du pilote.

La caisse fait trois translations par le sol sont l'avance selon l'axe, le ballant selon l'axe et le pompage selon l'axe vertical et trois rotations sont le roulis φ , tangage θ et le lacet ψ

Différents types de châssis de voiture

Le squelette d'une voiture varie selon son type on représente quelque type ci-dessous [16]

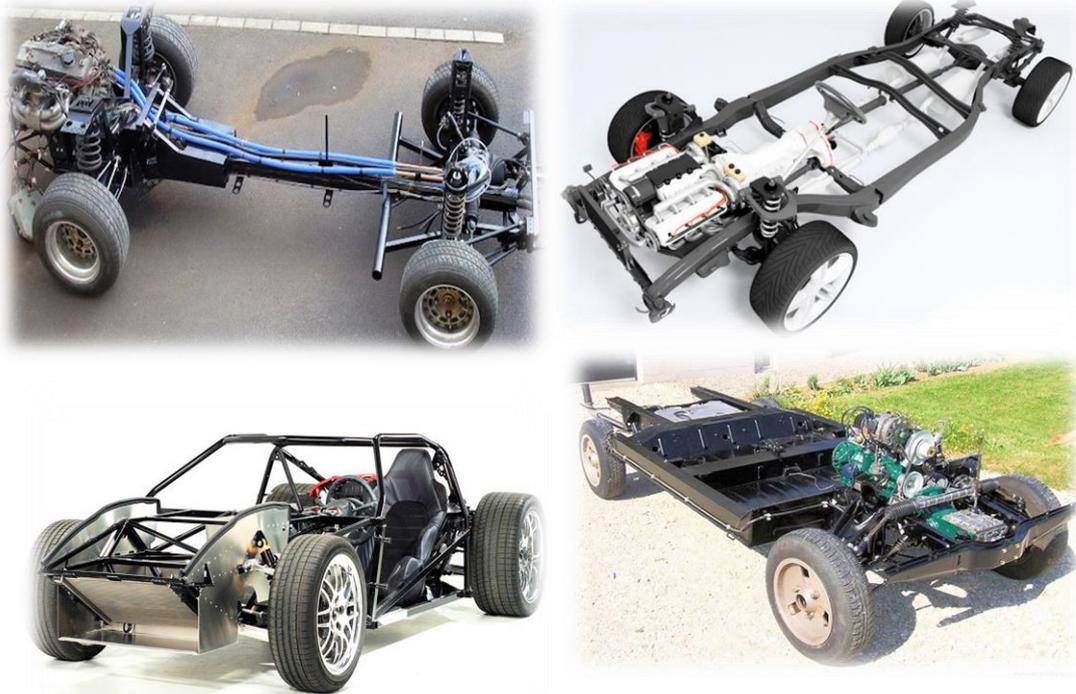


Figure II.2 : Quelques types du châssis [16].

☞ Le châssis à poutre

Ce type se compose d'une poutre centrale qui prolonge la longueur du véhicule et aussi, des éléments latéraux pour soutenir la structure de la voiture, ce type était utilisé dans les voitures de sportives.

☞ Châssis tubulaire

Se caractérise par un poids léger et une grande rigidité. Car c'est la forme circulaire des tubes qui permet une grande résistance grâce à la répartition homogène. Des efforts, contrairement aux tubes carrés à moindre résistance.

☞ Châssis en échelle / en H

Ce type est utilisé dans les camions et certains 4x4. Il ressemble un peu à un cadre à poutre, mais au lieu de reposer sur un essieu principal, il est constitué de plusieurs sections métalliques qui lui donnent une sorte de forme en H, d'où son nom.

🚗 Châssis plateforme

Il ressemble à une structure en échelle, mais il a un plancher. Ici, vous prouver conduire la voiture sans sa cabine, contrairement à d'autres types de châssis.

II.3.2 Pneumatique

C'est l'élément qui réalise le contact direct entre le véhicule et le sol. Les efforts externes qui sont appliqués lorsque le véhicule est en mouvement, Ces efforts se décomposent sous la forme de forces longitudinales et de forces latérales sont produits à l'interface pneumatique chaussée [17].

Les pneus sont généralement, composés de caoutchouc (naturel et synthétique), d'additifs chimiques (soufre, noir de carbone, huiles, etc.), de textiles et de fils métalliques.

Les zones du pneu [18]

Elle est divisée en trois régions principales : la zone flanc, la zone de sommet, en contact avec le sol, et la zone de bourrelet (ou de fond).

🚗 La zone flanc

Fabriqué en caoutchouc souple, qui se caractérise par sa capacité à résister à la déformation à chaque tour de roue et aux chocs.

🚗 La zone de sommet

Il est constitué d'une couche de gomme épaisse en contact avec la route (comme il se doit pour la transmission du couple, la direction dans les virages, etc.). Des rainures ont été utilisées sur la bande de roulement et malaxées afin d'évacuer l'eau et la neige et de réduire l'aquaplaning. Sous la bande de roulement se trouvent des rondelles de ceinture formées de fils métalliques parallèles. Ces câbles, constitués de deux nappes entrecroisées, assurent la rigidité de la structure, notamment lors des virages.

🚗 La zone de bourrelet

La fonction de cette zone est représentée par deux anneaux métalliques (« bourrelets ») qui reposent sur la jante au niveau du « bourrelet », assurant l'adhérence sur la jante. Il est également responsable de la transmission du couple entre la roue et le pneu.

Caractéristiques des pneus

Le pneu possède plusieurs caractéristiques selon plusieurs critères sous forme de chiffres et de lettres [19].

🚗 Largeur du pneu (exprimée en millimètres) : se charge de déterminer la taille de la bande de roulement.

- 🚗 Hauteur du flanc (exprimée en pourcentage) : C'est le rapport entre la largeur du pneu et l'épaisseur du flanc.
- 🚗 Structure des pneus : Actuellement, il existe 3 structures de pneus. La structure radiale est caractérisée par le R. Plus rarement, le second type est la structure diagonale « D » et le dernier type est la «Ceinture croisée B ».
- 🚗 Diamètre (pouces 1 pouce = 2.54cm) : représente le diamètre intérieur de la jante.
- 🚗 L'indice de charge : Ce nombre représente le nombre de kilogrammes par exemple l'indice de poids de 99, le pneu supporter jusqu'à 615 kg
- 🚗 Indice de vitesse : Dans notre exemple, la vitesse maximale que le pneu peut supporter est indiquée par une lettre "W" est-à-dire 270 Km/h.
- 🚗 "M + S" signifie que le pneu est adapté à la conduite sur boue comme sur neige.
- 🚗 "M + S" signifie que le pneu est adapté à la conduite sur boue comme sur neige.
- 🚗 "M + S" signifie que le pneu est adapté à la conduite sur boue comme sur neige.



Figure III.3 : Caractéristique d'un pneu.

II.3.3 Éléments pour le contrôle longitudinal

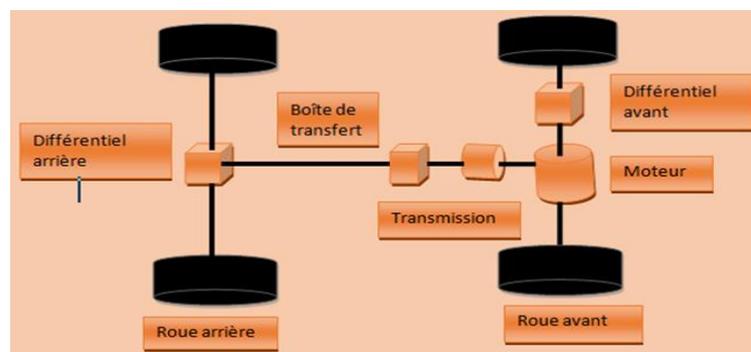


Figure II.4 : Organes pour le contrôle longitudinal

Lorsque le véhicule fait des phases d'accélération, freinage, des arrêts et des redémarrages. On parle ici, de la dynamique longitudinale qui contient du groupe

motorisation, du système de freinage, de la transmission, des roues et du contact pneu chaussée.

III.3. 4 Eléments pour le contrôle latéral

Lorsque le guidage du véhicule, on parle ici de la dynamique latérale qui utilise les quatre sous-ensembles suivants : la colonne de direction, les roues directrices, le volant, et le contact pneu / chaussée.

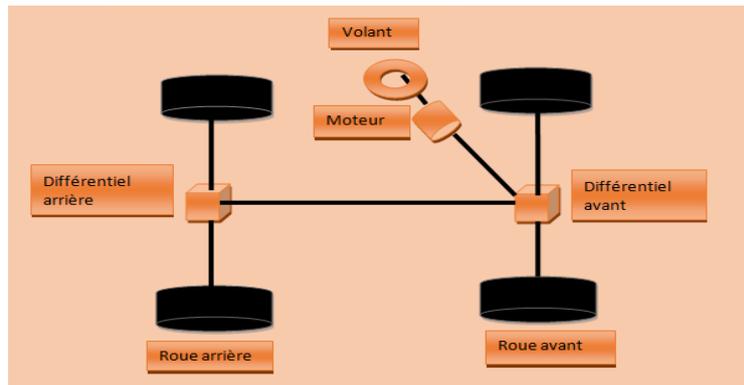


Figure II.5: Organes pour le contrôle latéral

II.3.5 Suspension

C'est un ensemble d'organes et structurels assurant la liaison verticale entre la roue et le châssis permettant d'isoler le châssis du véhicule et la route, et par conséquent, d'améliorer le confort du conducteur. Elle est composée des éléments suivants : ressort, amortisseur, barre antirollis. Il existe trois types de suspension : les suspensions passives, les suspensions actives et les suspensions semi-actives.

La classification est selon la méthode et le principe de contrôle ainsi que tous les éléments mécaniques qui relient les roues avec le corps principal du véhicule.



Figure II.6 : Suspension [20].

🚗 Suspensions passives

Il est le plus couramment utilisé par les constructeurs automobiles le ressort et l'amortisseur se présentent sous la forme d'un support parallèle, qui est basé sur le principe

de fonctionnement dissipation d'énergie par amortisseurs. Le ressort fournit une force qui dépend de la différence de position entre le châssis et roue. D'autre part, l'amortisseur exerce une force en fonction de la différence entre vitesse des roues et vitesse du châssis. L'une des principales faiblesses est les coefficients de ressort et d'amortissement sont fixes, donc ses performances sont limitées [21].

Suspension semi-active

Le système de suspension semi-actif est similaire au système passif, la différence est le coefficient d'amortissement peut être modifié. La force générée par l'amortisseur est contrôlée et ajustée à tout moment par Ordinateur du véhicule [21].

Suspension active

L'ensemble des connaissances techniques en mécanique et en électronique peut être considéré comme un appareil de haute technologie plus complexe. Ce type d'appareil est caractérisé par le besoin d'une source externe d'énergie, qui est représentée par l'inertie générée par la déformation du ressort en fonction de l'état de la route. Cette énergie (l'inertie) est utilisée pour activer le système de contrôle qui régule la force produite par le système de suspension. L'actionneur commandé produit directement une force d'inertie opposée à la force extérieure, ce qui permet de réduire les vibrations et les changements de position du véhicule. Cette nouvelle technologie de suspension offre de meilleures performances en termes de tenue de route et de confort.

Cependant, pour que cette technologie puisse fonctionner, trois conditions doivent être remplies :

- Une source d'énergie capable de générer la force nécessaire.
- La mise en place de composants capables de supporter une telle force et de fonctionner de manière continue.
- La présence d'une grande variété de capteurs et de données configurés pour les opérations d'un micro-ordinateur, permettant de déterminer le mode de contrôle [22].

II.4 Forces appliquées sur le véhicule

Le poids, La portance, La poussée, et la trainée sont les forces appliqués sur le véhicule lorsqu'est en mouvement.

Les forces s'exerçant sur un véhicule sont [23] :

Poids

Le poids correspond à la force appliquée par la terre sur véhicule, elle est donnée par la relation suivante :

$$P = m * g \quad (\text{II-1})$$

Avec :

m : La masse de véhicule en K_g .

g : Attraction de la Terre en K_g / N .

☞ Portance

C'est une force perpendiculaire appliquée au centre de gravité du véhicule. Cette force représente le flux d'air. Quand l'air passe sous la voiture, il la pousse vers le haut.

$$F_z = 0.5 * \rho * V^2 * C_z \quad (\text{II-2})$$

avec :

ρ : Masse volumique de l'air en K_g / m^3

S : Surface de dessous du véhicule

V : Vitesse du véhicule en m / s

C_z : Coefficient de portance.

☞ Poussé

C'est la force qui permet au véhicule d'avancer produite par le moteur. Le point d'application de cette force, c'est le centre de gravité de véhicule.

☞ Trainée

C'est la force qui représente la résistance de l'air ; le sens de cette force est dans le sens inverse du mouvement de véhicule et le point d'application est le centre de gravité de véhicule est donnée par la relation suivante :

$$F_x = 0.5 * \rho * V^2 * C_x \quad (\text{II.3})$$

avec :

ρ : Masse volumique de l'air en g/m^3

S : Surface de dessous du véhicule

V : Vitesse du véhicule en

C_x : Coefficient de trainée.

II.5 Modélisation de la dynamique du FWIDEV

Les véhicules FWIDEV sont conçus avec un moteur électrique indépendant pour chaque roue, ce qui leur confère une capacité de contrôle et de manœuvre accrue. La modélisation de ces véhicules vise à décrire les interactions complexes entre les différents composants,

tels que les vitesses des moteurs électriques, les roues, les suspensions et les systèmes de contrôle.

II.5.1 Description du système

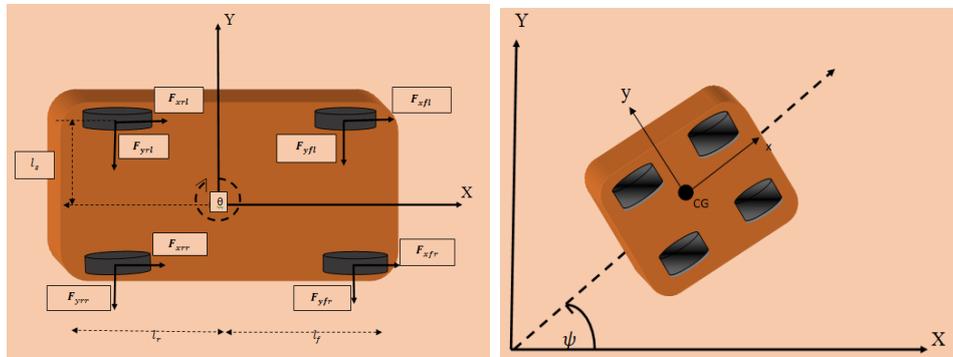


Figure II.7 : Forces selon le repère (X, Y)

Le véhicule présenter les caractéristiques suivantes : il est composé d'un châssis et de quatre moteurs. En d'autres termes, les mouvements de direction du véhicule ne sont pas contrôlés par un essieu directeur traditionnel. Au lieu de cela, le véhicule utilise trois axes globaux pour son contrôle : l'axe longitudinal (X), l'axe latéral (Y) et l'axe de lacet (Z). Lorsqu'on analyse l'entrée du conducteur dans ces axes, on constate que le mouvement longitudinal (U_x) est influencé par l'accélérateur et la pédale de frein. Le conducteur peut contrôler la vitesse du véhicule en appuyant sur l'accélérateur pour accélérer ou sur la pédale de frein pour ralentir ou s'arrêter. Quant au mouvement latéral (U_y) et au mouvement de lacet (r) du véhicule, ils dépendent de la stratégie de contrôle adoptée, qui est basée sur la vitesse des roues et la vitesse de rotation du volant [24].

II.5.2 Hypothèses de modélisation

Avons la modélisation et avons de découvrir les équations des mouvements appliqués sur le véhicule, on présente quelques hypothèses pour simplifier la complexité [1] :

- On suppose que les mouvements des suspensions sont négligeables et l'accélération du véhicule (en traction et en freinage) est faible.
- Pour un petit angle de rotation (CG) : $\cos(\psi) \approx 1$ et $\sin(\psi) \approx 0$
- La traversée du véhicule au long des axes X, Y et une rotation autour de l'axe Z .
- L'origine de repère lié au véhicule représente le centre de gravité du véhicule (CG)

Car le véhicule à des mouvements de rotation et aussi des mouvements de translation, donc l'application de 1^{ère} et 2^{ième} lois de Newton, nous a permet de déterminer le modèle physique d'un véhicule :

Loi : la somme des forces extérieures est égale l'accélération multipliée par la masse.

$$\sum \vec{F}_{ext} = m * \vec{a} \quad (II-4)$$

Loi : la somme des moments extérieurs égale à son inertie multipliée par l'accélération angulaire.

$$\sum \vec{M}_{ext} = J * \vec{\omega} \quad (II-5)$$

☞ A partir de ces deux lois, les forces longitudinales et les forces latérales et le moment de rotation totale peuvent être données par :

$$\begin{cases} \sum F_x = m * \ddot{x} \\ \sum F_y = m * \ddot{y} \\ \sum M_z = J * \ddot{\psi} \end{cases} \quad (II-6)$$

☞ Pour évaluer le vecteur de vitesse associé au centre de gravité du véhicule qui fait une rotation de l'angle ψ autour de l'axe Z on utilise la transformation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin \psi & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ r \end{bmatrix} \quad (II-7)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = \cos(\psi) * U_x - \sin(\psi) * U_y \\ \dot{y} = \sin(\psi) * U_x + \cos(\psi) * U_y \\ \dot{\psi} = r \end{cases} \quad (II-8)$$

avec :

U_x : Vitesse longitudinale.

U_y : Vitesse latérale.

r : Vitesse de lacet.

☞ En dérivant l'équation (II-8) par rapport au temps, on trouve le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\dot{x}}{dt} = \ddot{x} = \dot{U}_x \cos(\psi) - U_x \dot{\psi} \sin(\psi) - \dot{U}_y \sin(\psi) - U_y \dot{\psi} \cos(\psi) \\ \frac{d\dot{y}}{dt} = \ddot{y} = \dot{U}_x \sin(\psi) + U_x \dot{\psi} \cos(\psi) + \dot{U}_y \cos(\psi) + U_y \dot{\psi} \sin(\psi) \\ \ddot{\psi} = \dot{r} \end{array} \right. \quad (\text{II-9})$$

En tenant en compte le système d'équation (II-9), les équations de (II-6) peuvent être écrites comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sum F_x}{m} = (\dot{U}_x - U_y r) \cos(\psi) - (U_x r + \dot{U}_y) \sin(\psi) \\ \frac{\sum F_y}{m} = (U_x r + \dot{U}_y) \cos(\psi) + (\dot{U}_x + U_y r) \sin(\psi) \\ \frac{\sum M_z}{J} = \dot{r} \end{array} \right. \quad (\text{II-10})$$

Donc, on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = m((\dot{U}_x - U_y r) \cos(\psi) - (U_x r + \dot{U}_y) \sin(\psi)) \\ \sum F_y = (U_x r + \dot{U}_y) \cos(\psi) + (\dot{U}_x + U_y r) \sin(\psi) \\ \sum M_z = J\dot{r} \end{array} \right. \quad (\text{II-11})$$

☞ Par l'application d'hypothèse 1, on trouve :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = m(\dot{U}_x - U_y r) \\ \sum F_y = m(U_x r + \dot{U}_y) \\ \sum M_z = J\dot{r} \end{array} \right. \quad (\text{II-12})$$

avec :

$m(\dot{U}_x - U_y r)$ et $m(U_x r + \dot{U}_y)$: les accélérations du véhicule dans le plan (X, Y)

\dot{r} : L'accélération angulaire.

☞ A partir des relations et des simplifications précédentes, on a :

☞ Le mouvement longitudinal

$$\dot{U}_x = U_y r + \left(\frac{1}{m} \right) (F_{xfl} + F_{xfr} + F_{xrl} + F_{xrr} - A_{dr}) \quad (\text{II-13})$$

☞ Le mouvement latéral :

$$\dot{U}_y = -U_x r + \left(\frac{1}{m} \right) (F_{yfl} + F_{yfr} + F_{yrl} + F_{yrr}) \quad (\text{II-14})$$

☞ Le mouvement du lacet :

$$J\dot{r} = l_f (F_{yfl} + F_{yfr}) - l_r (F_{yrl} + F_{yrr}) + l_s (F_{xfl} - F_{xfr} + F_{xrl} - F_{xrr}) + M_d \quad (\text{II-15})$$

☞ D'autre part, on a les forces longitudinales et latérales qui représente l'interaction entre les pneus et la route dépendent des angles de glissement et elles sont données comme suite [25] :

$$\begin{cases} \lambda_i = \frac{r_w w_i - U_x}{U_x} & ; F_{x_i} = \mu C_\lambda \lambda_i & ; F_{y_i} = \mu C_\alpha \alpha_i \\ \alpha_{f(l,r)} = -\frac{U_y + r l_f}{U_x} & ; \alpha_{r(l,r)} = -\frac{U_y - r l_r}{U_x} \end{cases} \quad (\text{II-16})$$

D'où :

μ : Coefficient de friction.

λ_i : Dérapage des pneus.

α_i : Angle de patinage des pneus.

α : Rigidité au glissement latérale des pneus.

C_λ : Rigidité au glissement longitudinale du pneu.

J : Moment d'inertie de lacet du véhicule.

m : Masse totale de véhicule.

M_d : Vitesse du vent.

A_{dr} : Traînée aérodynamique.

r_w : rayon de roue effectif.

w_i : l'angulaire vitesse de chaque roue.

$$i = \begin{cases} fr & \text{avant droit} & ; & fl & \text{avant gauche} \\ rr & \text{arrière droit} & ; & rl & \text{arrière gauche} \end{cases}$$

En tenant compte de (II-16) on trouve :

$$\begin{cases} \dot{U}_x = U_y r + \frac{\mu C_\lambda r_w}{0.5 U_x} (u_1) - \frac{A_{dr}}{m} \\ \dot{U}_y = -U_y r - \frac{4 \mu C_\alpha}{m U_x} U_y + r \mu \frac{2 C_\alpha (l_r - l_f)}{m U_x} \\ \dot{r} = \mu \frac{2 C_\alpha (l_f - l_r)}{J U_x} U_y - r \mu \frac{2 C_\alpha (l_f^2 + l_r^2)}{J} + \frac{M_d}{J} + \frac{l_s \mu C_\lambda r_w}{0.5 J U_x} (u_2) \\ \dot{\theta} = r \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

☞ Le contrôle de la voiture électrique à quatre roues motrices est assuré en utilisant la différence de vitesse entre les roues de gauche et de droite, alors :

$$\begin{cases} u_1 = w_l + w_r \\ u_2 = w_l - w_r \end{cases} \quad (\text{II-18})$$

Soit \bar{U}_x représenté la différence entre la vitesse désirée et la vitesse mesurée :

$$\bar{U}_x = U_x - U_{xdes} \quad (\text{II-19})$$

☞ On obtient à la fin le modèle dynamique du FWIDEV :

$$\begin{cases} \dot{\bar{u}}_x = U_y \dot{\psi} + \frac{\mu C_{\lambda} r_w}{0.5(U_{xdes} + \bar{u}_x)} (u_1) - \frac{A_{dr}}{m} \\ \dot{U}_y = -\bar{U}_x \dot{\psi} - \frac{4\mu C_{\alpha}}{m(U_{xdes} + \bar{u}_x)} U_y + \dot{\psi} \mu \frac{2C_{\alpha} (l_r - l_f)}{m(U_{xdes} + \bar{u}_x)} - U_{xdes} \dot{\psi} \\ \dot{\psi} = \mu \frac{2C_{\alpha} (l_f - l_r)}{J(U_{xdes} + \bar{u}_x)} U_y - \dot{\psi} \mu \frac{2C_{\alpha} (l_f^2 + l_r^2)}{J(U_{xdes} + \bar{u}_x)} + \frac{M_d}{J} + \frac{l_s \mu C_{\lambda} r_w}{0.5J(U_{xdes} + \bar{u}_x)} (u_2) \\ \dot{\theta} = r \end{cases} \quad (\text{II-20})$$

II.6 Modèle non linéaire de control du véhicule

Dans cette section, on élabore un modèle non linéaire complet pour le control la dynamique latérale et longitudinale du véhicule. Ce modèle des véhicules FWIDEV prend en compte la dynamique définie par (II.17) ainsi le modèle non linéaire de contrôle de trajectoire du véhicule. Ce dernier est défini, en tenant en compte l'erreur entre la trajectoire désirée et la position de véhicule qui définit par les équations suivantes [26] :

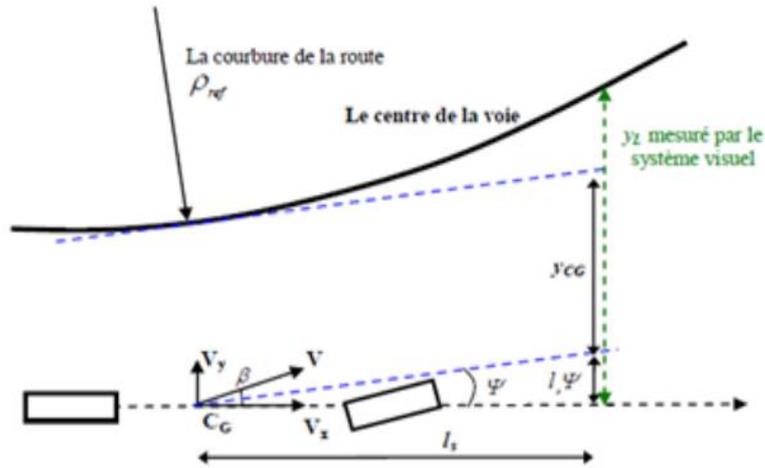


Figure III.8 : Positionnement du véhicule sur la voie [27].

$$\begin{cases} \dot{\psi}_L = r - U_x \rho \\ \dot{y}_L = \beta U_x + l_s r + \psi_L U_x \end{cases} \quad (\text{II-21})$$

Avec :

ψ_L : représente l'erreur de l'angle lacet qui définit par : $\psi - \psi_{des}$.

y_L : L'erreur qui représente la distance entre le centre de gravité de véhicule et le route.

ρ : C'est la courbature de trajectoire.

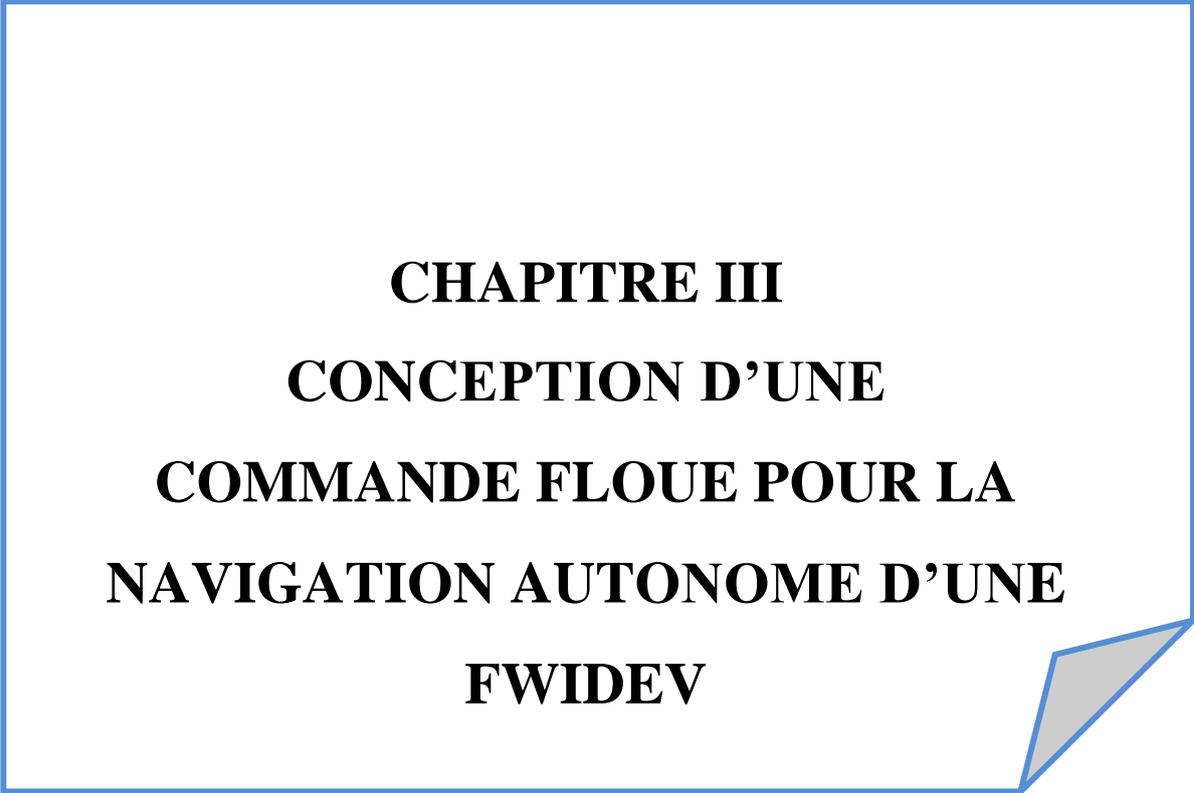
☞ Finalement, à partir des modèles (II-20) et (II-21), on peut donner un modèle global pour le contrôle du véhicule FWIDEV

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{u}_x = U_y \psi + \frac{\mu C_\lambda r_w}{0.5(U_{xdes} + \bar{u}_x)} (u_1) - \frac{A_{dr}}{m} \\ \dot{U}_y = -\bar{U}_x r - \frac{4\mu C_\alpha}{m(U_{xdes} + \bar{u}_x)} U_y + r \mu \frac{2C_\alpha (l_r - l_f)}{m(U_{xdes} + \bar{u}_x)} - U_{xdes} r \\ \dot{\psi} = \mu \frac{2C_\alpha (l_f - l_r)}{J(U_{xdes} + \bar{u}_x)} U_y - r \mu \frac{2C_\alpha (l_f^2 + l_r^2)}{J(U_{xdes} + \bar{u}_x)} + \frac{M_d}{J} + \frac{l_s \mu C_\lambda r_w}{0.5J(U_{xdes} + \bar{u}_x)} (u_2) \\ \dot{\theta} = r \\ \dot{\psi}_L = r - (U_{xdes} - \bar{u}_x) \\ \dot{y}_L = \beta U_x + l_s r + \psi_L (U_{xdes} + \bar{u}_x) \end{array} \right. \quad (II-22)$$

II.7 Conclusion

La modélisation des véhicules FWIDEV permet de représenter mathématiquement et physiquement leur comportement dynamique. Dans ce chapitre, un modèle de contrôle de la dynamique non linéaire du FWIDEV est élaboré en se basant sur les lois fondamentales de dynamique et le modèle non linéaire roue-trajectoire du véhicule. Ces modèles sont utilisés par la suite pour développer des algorithmes de contrôle avancés, simuler des scénarios de conduite, optimiser les performances et évaluer la sécurité.

CHAPITRE III
CONCEPTION D'UNE
COMMANDE FLOUE POUR LA
NAVIGATION AUTONOME D'UNE
FWIDEV



Chapitre III conception d'une commande floue pour la navigation autonome d'une FWIDEV

III.1 INTRODUCTION

Une voiture intelligente est un véhicule capable de se déplacer de manière autonome, autrement dit, elle est capable de prendre des décisions et réaliser une mission sans l'intervention humaine. La conception d'un système intelligent pour la navigation autonome du véhicule est une tâche très difficile. La logique floue est un meilleur moyen d'intégrer le raisonnement humain afin de développer un système d'intelligence artificielle pour la conduite autonome du véhicule.

L'objectif de ce chapitre est d'élaborer une stratégie de commande basée sur la logique floue permettant à un véhicule électrique de poursuivre une trajectoire désirée en évitant les obstacles en temps réel. Au premier lieu, nous donnerons d'abord le feu vert à logique floue, la définition, ses étapes principales et ses types. En se basant sur le modèle non linéaire fourni au chapitre précédent, une stratégie de commande floue est proposée pour la navigation autonome d'un véhicule électrique. Nous joindrons également les résultats les plus importants de simulation obtenus.

III.2 système intelligent de navigation autonome du véhicule électrique

Le système intelligent de navigation autonome du véhicule proposé se compose par un contrôleur flou d'évitement d'obstacles et une commande robuste basée sur les modèles flous de type Takagi-Sugeno assure le contrôle latéral et longitudinal. La figure 1 illustre la structure de base de ce système. Cette structure permet d'une part la détection d'obstacle et l'évitement de collision et d'autre part un contrôle de suivi stable du véhicule autonome.

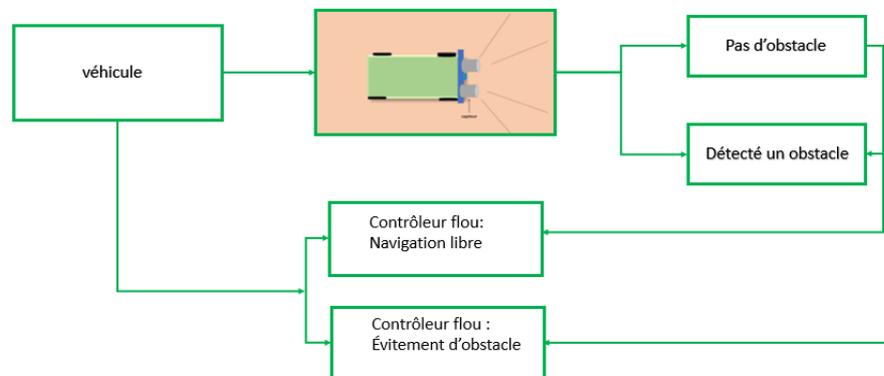


Figure III.1 : Système de navigation

Lorsque le capteur donne des informations (les distance entre le véhicule et le robot distance gauche, droite et avant) si un obstacle est détecté, le contrôleur flou d'évitement d'obstacle est exécuté si le contraire le contrôleur flou de navigation libre est exécuté jusqu'à la détection d'un obstacle. On résume le fonctionnement du système proposé par l'organigramme suivante :

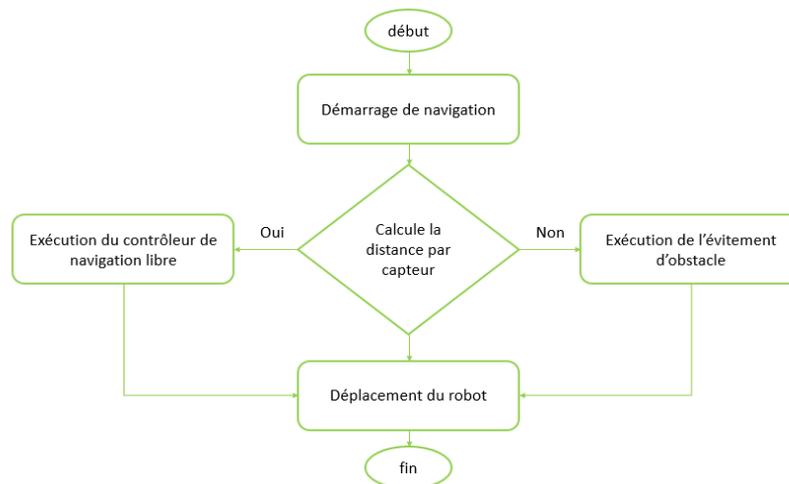


Figure III.2 : Exécution du contrôleur flou d'évitement d'obstacle

III.3 État de l'art sur la logique floue

III.3.1 Définition

Les premiers fondements théoriques de la logique floue ont été créés en 1965 à l'Université de Californie, Berkeley, USA par le professeur Lotfi A. Zadeh [29].

La logique floue ou « logique linguistique » ; car ses valeurs de vérité sont des mots d'usage général. Le but de la logique floue est d'étudier la représentation imprécise des connaissances [30]. C'est à dire l'utilisation de raisonnement humaine ce forme des règles « si...alors... », Contrairement à logique classique qui utilisé le raisonnement « vrai » au « faux » pour décrit l'état au le fonctionnement du système.

III.3.2 Structure d'un contrôleur flou

Le système flou fondé sur une logique floue consiste en quatre blocs principaux [31].

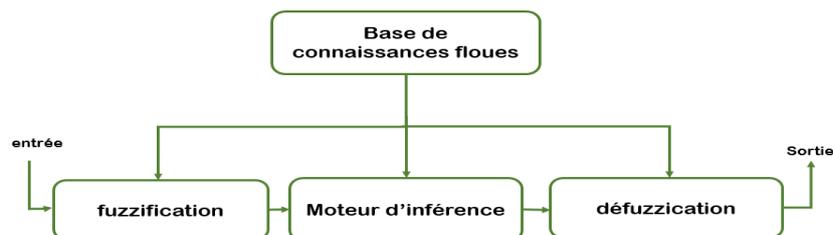


Figure III.3 : Structure générale d'un contrôleur flou.

- + Fuzzificateur.
- + Base de connaissances floues.
- + Inférence floue.
- + Défuzzificateur.

Ci-dessous, nous détaillerons chaque étape :

+ **Etape1 : Fuzzification**

La fuzzification c'est la première étape effectuée par le contrôleur flou est basé sur la conversion de données numériques en termes logiques ou linguistiques sous forme des ensembles flous [31].



Figure III.4: Etape de fuzzification

+ **Etape2 : Base de connaissances floues**

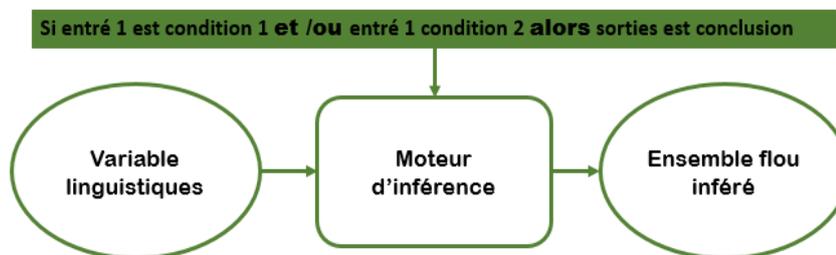


Figure III.5 : Moteur d'inférence

La base des règles floues est un ensemble de règles floues qui décrivent le comportement du système. C'est le cœur de l'ensemble du système dans le sens où tous les autres composants du sont utilisés pour interpréter et combiner ces règles afin de créer le résultat final [32]. La règle floue prendre la forme « Si Prémisse Alors Conclusion ».

En général La base de règles du système flou doit répondre aux conditions de complétude et de cohérence pour assurer son bon fonctionnement [33].

+ **Etape3 : Moteur d'inférence**

Cette étape permet de prendre une décision en utilisant un raisonnement approximatif à partir de base de connaissance et à l'aide les opérateurs ET qui lié les variables à l'intérieur

des règles et OU qui combine les différentes règles. Il existe plusieurs méthodes pour effectuer ces opérateurs dans les inférences applicables à la fonction d'appartenance, à savoir [34] :

- La méthode d'inférence max-min « Mamdani ».
- La méthode d'inférence max-prod « Larsen ».
- La somme-produit « Sugeno ».

Dans ce mémoire, notre travail est basé sur la méthode d'inférence se « Sugeno » pour plus d'informations sur les autres méthodes voir (annexe).

✚ Méthode d'inférence de Sugeno

La forme de la règle de ce modèle est une variant par rapporte les autres modèles Le points de divergence apparaissent dans la conclusion de la règle qui sont cette forme d'une fonction [33].

Si x est A_i et y est B_1 alors $Z_i = f_i(x, y)$.



Figure III.6 : Etape de défuzzification

✚ Etape4 : Défuzzification

En générale, ce qui suit s'applique l'ensemble flou résultant de l'inférence est convertie en une valeur physique. Il existe plusieurs stratégies de défuzzification, les plus courantes sont [35] :

- La méthode du centre de gravité.
- La méthode de la valeur maximum.
- La méthode de hauteurs pondérée.

Pour plus des informations (voir annexe)

III.4 Représentation d'état des systèmes non linéaires par les modèles de Takagi-Sugeno

Les modèles Takagi-Sugeno (T-S) permettent la représentation de tout système non linéaire, quelle que soit sa complexité, avec une structure simple basée sur modèles linéaires

interpolés et limités par des fonctions nulles positives ou non linéaires. Ces modèles permettent au de représenter avec précision les systèmes non linéaires. Ils ont une structure simple et présentent propriétés intéressantes, ce qui les rend faciles à utiliser d'un point de vue mathématique [36].

La forme de règle de Takagi-Sugeno s'écrit comme suite [37] :

$$\mathbf{R}^i : \text{ Si } z_1(t) \text{ est } F_1^i(z_1(t)) \text{ et } z_2(t) \text{ est } F_2^i(z_2(t)) \dots \text{ et } z_p(t) \text{ est } F_p^i(z_p(t))$$

alors :

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x(t) + B_i u(t) + B_{2i} w(t) \\ y_i(t) = C_i x(t) + D_i u(t) + D_{2i} w(t) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Dans l'équation donnée :

Où R^i représente la règle floue, $i = 1, \dots, r$ $F_j^i(z_j(t))$ pour $j = 1, \dots, r$ sont les sous-ensemble flous, r le nombre de règles floues, $z_j(t)$ sont les variables de prémisses qui dépendent l'entrée et/ou de l'état du système, $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $y(t) \in \mathbb{R}^q$ et $u(t) \in \mathbb{R}^m$ représentent respectivement le vecteur d'état, le vecteur de sortie et le vecteur de commande. $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$ et $D \in \mathbb{R}^{q \times m}$ sont des matrices décrivant la dynamique du système.

La valeur de la fonction d'appartenance $z_j(t)$ à l'ensemble flou F_j^i est $F_j^i(z_j(t))$ et $h_i(z(t))$ représente la fonction d'activation de la règle du modèle flou est donné comme suite :

$$h_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{w_i(z(t))} \text{ avec } \begin{cases} \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1 \\ h_i(z(t)) \geq 0 \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

La représentation d'état d'un modèle non linéaire par l'interconnexion de modèles locaux invariants dans le temps, à l'aide de fonctions d'activation non linéaires. La défuzzification du modèle flou permet d'atteindre cette équation :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) + B_{2i} w(t) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) (C_i x(t) + D_i u(t)) + D_{2i} w(t) \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

III.4.1 Méthode d'obtention des modèles flous Takagi-Sugeno

Il existe trois approches sont largement utilisées pour obtenir le modèle T-S ; approche basée sur les techniques d'identification, approche basée sur la linéarisation et l'approche se fonde sur la connaissance analytique du modèle non linéaire qu'est utilisé dans ce mémoire.

▪ **Approche par connaissance analytique du modèle non linéaire**

L'approche par secteur non linéaires donne une représentation exacte du modèle non linéaire en se basant sur lemme suivant :

Lemme 3.1 [28]

Soit f représente une fonction bornée $[a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ pour tout $x \in [a, b]$ avec $(a, b) \in \mathbb{R}^{+2}$ il existe deux fonctions

$$\begin{cases} F^i(\cdot) : [a, b] \rightarrow [0, 1], i \in I_2 \\ x(t) \rightarrow F^i(x(t)) \end{cases} \quad \text{(III-4)}$$

$$\begin{cases} F^1(x(t)) = \frac{f(x(t) - \beta)}{\alpha - \beta} \\ F^2(x(t)) = \frac{\alpha - f(x(t))}{\alpha - \beta} \end{cases} \quad \text{Avec } \alpha \text{ et } \beta \text{ sont deux scalaires donnés comme suite :}$$

$$\alpha = \max_{x \in [-a, b]} f(x(t)), \quad \beta = \min_{x \in [-a, b]} f(x(t)) \quad \text{(III-5)}$$

III.5 Commande robuste des modèle (T-S)

Une commande robuste est une commande vérifiée que le système bouclé reste stable en présence de perturbation. Dans notre travail, la performance est abordée par l'approche H^∞ .

La synthèse des lois de commande robustes est basées essentiellement sur les fonctions de Lyapunov et les approches LMI.

III.5.1 Stabilité au sens de Lyapunov

Le principe de stabilité selon Lyapunov repose sur le comportement du système dynamique du point de vue de son énergie totale. Cette énergie est représentée généralement par une fonction de l'état x du système. Le signe de cette fonction et sa dérivée temporelle

dans un certain voisinage du point d'équilibre donne une information sur la stabilité du système. Le principal résultat de la théorie de stabilité de Lyapunov montre que pour un système autonome à temps continu $\dot{x} = f(x)$ l'origine est un point d'équilibre globalement asymptotiquement stable, s'il existe une fonction positive vérifiant les conditions suivantes

$$\begin{cases} i) V(x(t)) > 0, \forall x \neq 0 \\ ii) \dot{V}(x(t)) < 0, \forall x(t) \in R^n \text{ et } x \neq 0 \\ iii) V(0) = 0 \text{ et } \|x\| \rightarrow \infty, V(\infty) \rightarrow \infty \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

L'utilisation de la théorie de Lyapunov conduit à des conditions suffisantes de stabilité dont le pessimisme dépend de la forme particulière imposée à une fonction $V(x(\cdot))$. Dans notre étude, nous avons utilisé une fonction de Lyapunov quadratique de la forme suivante [38] :

$$\begin{cases} v(x(t)) = x^T(t)P(t)x(t) \\ P = P^T \end{cases} \quad (\text{III-8})$$

II.5.2 Inégalités matricielles linéaires (LMI)

Une inégalité matricielle linéaire (LMI) stricte (resp. Non strict) en x ait la forme suivante [38] :

$$F(x) = F_0 + \sum_{i=1}^n x_i F_i > 0 \text{ resp. } \geq 0 \quad (\text{III.9})$$

avec F_0 et $F_i, i=1,2,\dots,n$ de $R^{p \times p}$ est une famille de matrices symétriques données, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$ est un vecteur. La contrainte $F(x) > 0$ est convexe et appelée contrainte LMI.

Parmi les techniques existantes de transformation d'un problème d'optimisation d'inégalités matricielles non linéaires à un problème d'optimisation LMI est le complément de Schur :

Lemme 3.2 [39]

Soient trois matrices $Q(x) = Q(x)^T, R(x) = R(x)^T$ et $S(x)$ affines par rapport à la variable x les LMIs suivantes sont équivalentes: $R(x) > 0, Q(x) - S(x)R(x)^{-1}S^T(x) > 0$ (III-10)

$$\begin{pmatrix} Q(x) & S(x) \\ S(x)^T & R(x) \end{pmatrix} > 0 \quad (\text{III-11})$$

III.5.3 Stabilisation des modèles flous TS par un contrôleur PDC

Le principe de base de l'approche PDC est de concevoir un compensateur sous la forme d'un contrôleur linéaire pour chaque modèle local du système, qui utilise la rétroaction d'état pour le stabiliser [40]. Dans ce contexte, la stabilité locale est assurée. Le contrôleur PDC a la même structure de synthèse que le modèle flou (T-S) avec les mêmes ensembles flous, il conserve donc les mêmes parties conclusion et aussi la même fonction d'appartenance. La loi de commande globale est obtenue en reliant les lois de commande locales linéaires [31].

La règle de contrôleur flou écrit sous la forme suivante [41] :

Si R^i : **Si** $z_1(t)$ est $F_1^i(z_1(t))$ **et** $z_2(t)$ est $F_2^i(z_2(t))$ **et** $z_p(t)$ est $F_p^i(z_p(t))$

Alors $u(t) = K_i x(t)$ (III-12)

On obtient à la fin le contrôleur flou complète défini comme suit :

$$u(t) = \frac{\sum_{i=0}^r w_i(z(t)) K_i x(t)}{\sum_{i=0}^r h_i(z) K_i x(t)} = \sum_{i=0}^r h_i(z) K_i x(t) \quad \text{(III- 13)}$$

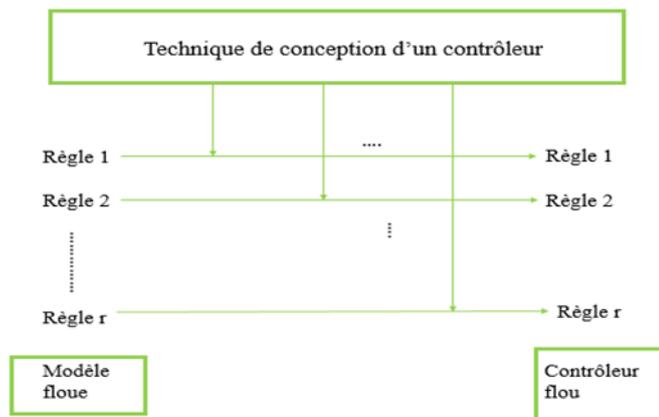


Figure III.7 : Représentation du concept de l'approche PDC

III.6 l'approche H_∞

La synthèse H_∞ de c'est une approche mathématique consiste à minimiser l'impact de la perturbation $w(t)$ sur le comportement du système. Supposons que le signal a une énergie finie et que sa taille est mesurée dans la norme du vecteur de commande $u(t)$ et nous avons une mesure $Z(t)$. Il s'agit donc de synthétiser une loi de commande $u(t)$ qui minimise

l'impact $w(t)$ sur $Z(t)$. On mesure cet impact par le rapport $\mathfrak{S}_2 = \frac{\|Z(t)\|_2}{\|w(t)\|_2}$ [42].

Norme H_∞

Il existe deux définitions de H_∞ :

Définition 1 [38] : Le standard H_∞ est appelé Transfert T_{zw} entre $z(\cdot)$ et $w(\cdot)$.

$$\|T_{zw}\|_\infty = \sup_{w(\cdot) \neq 0} \frac{\|Z(\cdot)\|_2}{\|w(\cdot)\|_2} \quad (\text{III-14})$$

Définition 2 [38] : taux de performance H_∞ du transfert T_{zw} le scalaire positif γ qui minimise l'inégalité :

$$\|Z(\cdot)\|_2^2 < \gamma^2 \|w(\cdot)\|_2^2 \text{ avec } \|x(t)\|_2^2 = \int_0^T x(\tau)^T x(\tau) d\tau \quad (\text{III-15})$$

$\|x(t)\|_2^2$ est représenté la norme carrée d'une variable $x(t)$.

Le problème de stabilisation avec une atténuation maximum des perturbations est équivalent au problème d'optimisation suivant [43] :

$$\begin{cases} \min \gamma \\ \dot{V}(t) + Z(t)^T Z(t) - \gamma^2 w(t)^T w(t) < 0 \end{cases} \quad (\text{III-16})$$

III.7 Système de contrôle latéral et longitudinal d'un véhicule électrique

L'objectif du contrôle de la dynamique latéral et longitudinal d'un véhicule électrique est la conception des lois de commande assurent un suivi stable de trajectoire avec une vitesse désirée. Donc, dans cette partie, nous proposons une synthèse d'un contrôleur flou pour la navigation autonome sans obstacle des véhicules électriques. Le développement de ces lois de commande fait appelle à fonction de Lyapunov et les modèles T-S, critère H_∞ et l'approche LMI.

III.7.1. Modèle (T-S) de control du véhicule

Pour trouver le modèle T-S par la méthode de secteur non linéaire, nous Commençons d'abord par le choix des variables de décision

Nos variables de décision sont :

- r Qui varié dans l'intervalle $[-0.4, 0.4]$.
- U_x Qui varié dans l'intervalle $[1, 120]$.
- $\frac{1}{U_x}$ Qui varié dans l'intervalle $[0.0083, 1]$.

Donc le nombre de sous-modèle est =8 modèles locaux dans la représentation T-S. Avec ce nombre des modèles locaux, le nombre de contraintes LMI augmente. Donc, la possibilité de trouve une faisabilité des contraintes LMI réduit. Pour réduire le conservatisme des conditions LMIs, nous utilisons l'approximation bien connue de Taylor pour exploiter la relation forte entre U_x et $\frac{1}{U_x}$ [42].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{U_x} = \frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1} \Delta_x \\ U_x \approx U_0 \left(1 - \frac{U_0}{U_1} \Delta_x \right) \end{array} \right. \text{ avec } \left\{ \begin{array}{l} U_0 = \frac{2U_{\min} U_{\max}}{U_{\min} + U_{\max}}, U_1 = \frac{2U_{\min} U_{\max}}{U_{\min} - U_{\max}} \\ U_x \approx U_0 \left(1 - \frac{U_0}{U_1} \Delta_x \right), \Delta_{\min} \leq \Delta_x \leq \Delta_{\max}, \Delta_{\min} = -1, \Delta_{\max} = 1 \end{array} \right.$$

Donc, les nombre des sous modèles sont diminué c'est-à-dire 4 sous modèles locaux seulement ; et les nouvelles variables de décision sont : $z_1(t) = r \in [-0.4, 0.4]$ et $z_2(t) = \Delta_x \in [-1, 1]$

$$\text{On note : } \begin{cases} F_1(x) = r; f_1 \leq r \leq f_2 \\ F_2(x) = \Delta_x; e_1 \leq \Delta_x \leq e_2 \end{cases} \quad (\text{III-17})$$

$$\text{Alors } \begin{cases} F_1(x) = F_1^1(x) \cdot \max(f_1(x)) + F_1^2(x) \cdot \min(f_1(x)) \\ F_2(x) = F_2^1(x) \cdot \max(f_2(x)) + F_2^2(x) \cdot \min(f_2(x)) \end{cases} \quad (\text{III-18})$$

$$\text{Avec } \begin{cases} F_1^1(x) = \frac{f_1(x) - \min(f_1(x))}{\max(f_1(x)) - \min(f_1(x))} = \frac{r - f_1}{f_2 - f_1} \\ F_1^2(x) = \frac{\max(f_1(x)) - f_1(x)}{\max(f_1(x)) - \min(f_1(x))} = \frac{f_2 - r}{f_2 - f_1} \\ F_2^1(x) = \frac{f_2(x) - \min(f_2(x))}{\max(f_2(x)) - \min(f_2(x))} = \frac{\Delta_x - e_1}{e_2 - e_1} \\ F_2^2(x) = \frac{\max(f_2(x)) - f_2(x)}{\max(f_2(x)) - \min(f_2(x))} = \frac{e_1 - \Delta_x}{e_2 - e_1} \end{cases} \quad (\text{III-19})$$

Alors, on trouve :

$$\begin{cases} h_1 = F_1^1(x).F_2^1(x) , h_2 = F_1^2(x).F_2^1(x) \\ h_3 = F_1^1(x).F_2^2(x) , h_4 = F_1^2(x).F_2^2(x) \end{cases} \quad (\text{III-20})$$

Et finalement, la représentation T-S de notre système est donné par :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^4 h_i [A_i x(t) + B_i u(t) + B_{wi} w(t)] \quad (\text{III-21})$$

En tenant en compte les définitions suivants :

$$\alpha = \mu \left(\frac{4 * C_\alpha}{m} \right) \quad ; \quad B = \mu * \left(\frac{2 * C_\alpha (l_r - l_f)}{m} \right) \quad ; \quad c = \mu \left(\frac{2 * C_\alpha (l_f^2 + l_r^2)}{J} \right) \quad ;$$

$$E = \mu * \left(\frac{2 C_\alpha (l_f + l_r)}{J} \right) \text{ et } N = \left(\frac{\mu * r_w * C_\lambda}{J} \right)$$

Les matrices A_i, B_i et B_{wi} sont données p

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & a * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1} \right) & B * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1} \right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1} \right) & -d * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1} \right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_s & U_0 \left(1 - \frac{U_0}{U_1} \right) & U_0 \left(1 - \frac{U_0}{U_1} \right) & 0 \end{bmatrix} ; B_1 = \begin{bmatrix} E * \left(\frac{\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1}}{(0.5 * m)} \right) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & N * \left(\frac{\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1}}{(0.5 * J)} \right) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.4 & -a * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1} \right) & B * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1} \right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1} \right) & -d * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1} \right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_s & U_0 \left(1 + \frac{U_0}{U_1} \right) & U_0 \left(1 + \frac{U_0}{U_1} \right) & 0 \end{bmatrix} ; B_2 = \begin{bmatrix} E * \left(\frac{\frac{1}{U_0} - \frac{1}{U_1}}{(0.5 * m)} \right) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & N * \left(\frac{\frac{1}{U_0} - \frac{1}{U_1}}{(0.5 * J)} \right) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & -0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & -a * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1}\right) & B * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1}\right) & -d * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_s & U_0 \left(1 + \frac{U_0}{U_1}\right) & U_0 \left(1 + \frac{U_0}{U_1}\right) & 0 \end{bmatrix}; B_3 = \begin{bmatrix} E * \frac{\left(\frac{1}{U_0} - \frac{1}{U_1}\right)}{(0.5 * m)} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & N * \frac{\left(\frac{1}{U_0} - \frac{1}{U_1}\right)}{(0.5 * J)} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.4 & -a * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1}\right) & B * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1}\right) & -d * \left(\frac{1}{U_0} + \frac{1}{U_1}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_s & U_0 \left(1 + \frac{U_0}{U_1}\right) & U_0 \left(1 + \frac{U_0}{U_1}\right) & 0 \end{bmatrix}; B_4 = \begin{bmatrix} E * \frac{\left(\frac{1}{U_0} - \frac{1}{U_1}\right)}{(0.5 * m)} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & N * \frac{\left(\frac{1}{U_0} - \frac{1}{U_1}\right)}{(0.5 * J)} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{w1} = B_{w2} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -U_0 \left(1 - \frac{U_0}{U_1}\right) \end{bmatrix}; B_{w3} = B_{w4} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -U_0 \left(1 + \frac{U_0}{U_1}\right) \end{bmatrix}$$

III.7.2 Synthèse d'une commande PDC d'un véhicule électrique

Dans cette section, une synthèse d'une commande PDC robuste pour la navigation libre d'un véhicule électrique est élaborée, les conditions de stabilisation sont fournies en terme LMIS via la fonction de Lyapunov et le critère

En tenant compte la grandeur à régler :

$$Z(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_{zi} x(t) \tag{III-24}$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t) + B_{wi} w(t)) \\ Z(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_{zi} x(t) \end{cases} \quad (\text{III-25})$$

Le système en boucle fermée composé par le système (III-25) et la commande PDC

(III-13) est défini comme suit [42] :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A_s + B_{2s} K_s) x(t) + B_s w(t) \\ Z(t) = C_s x(t) \end{cases} \quad (\text{III-26})$$

Avec :

$$A_s = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) A_i, B_s = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) B_i, \\ B_{2s} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) B_{wi}, C_s = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_{zi}, K_s = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) K_j$$

Les conditions de stabilisation de système du système (III-26) via la commande PDC et Le critère H_∞ en termes LMIs peuvent être données par le théorème suivant :

Théorème 3.1

On dit que le modèle (III-24) est stable en boucle fermée sous la commande PDC (III-13) est asymptotiquement stable et atteint le niveau de rejet de perturbation γ lorsqu'une matrice symétrique $Q \in R^{n \times n}$ est présente et les matrices $F_j \in R^{n \times m}$ sont les solutions du problème d'optimisation LMIs suivant [43] :

$$\begin{cases} \min_{Q, F_j} \gamma \\ S_{ij} < 0, i, j \end{cases} \text{ Pour } i, j \in \{1, 2, \dots, r\}. \\ S_{ij} = \begin{bmatrix} (A_i Q + B_{wi} F_j) + (*) & * & * \\ B_i^T & -\gamma^2 I & * \\ C_{zi} Q & 0 & -I \end{bmatrix}$$

- Preuve

A partir de l'équation (III-25), on a :

$$\begin{aligned} Z^T Z &= (C_s x)^T (C_s x) \\ &= \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_s \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_s \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} \\ \Sigma &= \dot{V} + Z^T Z - \gamma^2 w^T w = \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} (A_s + B_{2s} K_s)^T P + (*) & * \\ B_s^T P & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} + Z^T(t) Z(t) \\ \Sigma &= X \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix}^T \left\{ \begin{bmatrix} (A_s + B_{2s} K_s)^T P + (*) & * \\ B_s^T P & -\gamma^2 I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_s \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Par l'utilisation le théorème du Schur (Lemme 3.2), on trouve :

$$\Sigma = \begin{bmatrix} (A_s + B_{2s} K_s)^T P + (*) & * & * \\ B_s^T P & -\gamma^2 I & * \\ C_s & 0 & -I \end{bmatrix} \quad \text{(III-27)}$$

Donc si $\Sigma < 0$ alors $\dot{V} < 0$; on fait la multiplication à gauche et à droite par

$$R = \text{diag}(Q, I, I) \text{ on utilise un simple changement : } \begin{cases} P = Q^{-1} \\ F_j = K_j Q \end{cases}, \text{ on trouve } S_{ij} < 0 .$$

III.8 Contrôleur flou d'évitement des obstacles

Le but de cette partie est de concevoir un contrôleur flou de type Sugeno assure au véhicule une navigation sans collision avec les obstacles. Ce contrôleur caractérise par trois entrées et deux sorties. Les entrées sont distance avant, la distance droite et la distance gauche les sorties sont la vitesse des moteurs à droite et la vitesse du moteur à gauche.

- La première entrée est la distance avant caractérisé par les ensembles flous suivante : Far, Near et medium défini sur le range [0,200] et prendre les fonctions d'appartenance de forme triangulaire et trapézoïdale.
- La deuxième entrée est la distance droite caractérisé par les ensembles flous suivante : far, Near défini sur le range [0,200] et prendre les fonctions d'appartenance de forme triangulaire et trapézoïdale.

➤ La troisième entrée est la distance avant caractérisé par les ensembles flous suivante : far, Near défini sur le range [0,200] et prendre les fonctions d'appartenance de forme triangulaire et trapézoïdale.

Le tableau suivant résume les fonctions d'appartenance des entrées :

Entré 1 : distance avant			Entré 2 : distance à droite Entré 3 : distance à gauche		
Les variables	Rang	Fonction d'appartenance	Les variables	Rang	Fonction d'appartenance
Near	0.0.40.50	Trapézoïdale	Near	0.0.20.30	Trapézoïdale
Medium	40.50.60	Triangulaire			
Far	50.60.200.2000	Trapézoïdale	Far	20.30.200.200	Trapézoïdale

Tableau III-1 : Fonctions d'appartenance des entrées

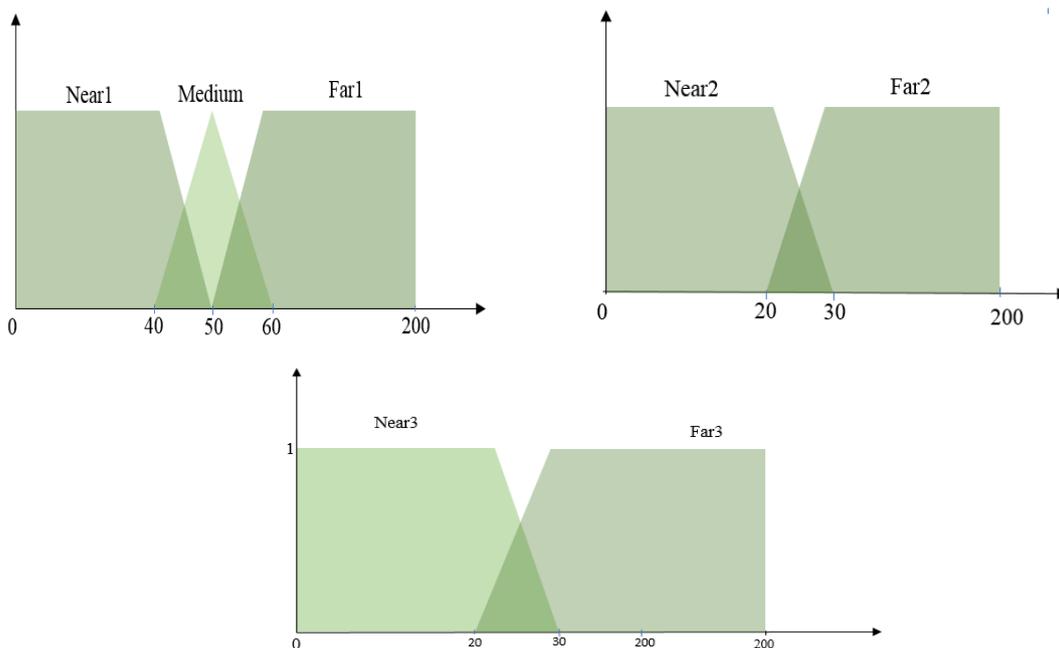


Figure III.8 : Fonctions d'appartenance des entrées

- La première sortie est la vitesse du moteur à droite caractérisé par les ensembles flous suivante : Fast, Near défini sur le range [0,250] et prendre les fonctions d'appartenance de forme singleton.
- La deuxième sortie est la vitesse du moteur à droite caractérisé par les ensembles flous suivante : Fast, Near.

Variables	Range
Slow	6
Fast	10

Tableau III-2 : Paramètre des sorties (vitesse des moteurs à droite et à gauche).

▪ **Règles floues**

Par raisonnements logiques, on obtient les règles floues de notre contrôleur. Toutes les règles sont présentées dans le tableau suivant :

Entrées linguistiques			Sorties linguistiques	
Distance avant	Distance droite	Distance gauche	Vitesse droite	Vitesse gauche
Near1	Near2	Near3	10	10
Near1	Far2	Near3	10	10
Near1	Near2	Far3	10	10
Near1	Far2	Far3	10	10
Far1	Near2	Near3	10	10
Far1	Near2	Far3	10	10
Far1	Far2	Near3	10	10
Far1	Far2	Far3	10	10
Medium	Near2	Near3	10	10
Medium	Far2	Far3	10	6
Medium	Far2	Near3	6	10
Medium	Near2	Far3	10	6

Tableau III-3 : Règles floues

III.9 Validation de Navigation du véhicule autonome

Pour fait la simulation on a choisi les paramètres suivants :

Paramètre	m [Kg]	l_s [m]	l_r [m]	l_f [m]	r_w [m]	G [ms ⁻²]	J [Kg.m ²]	μ	C_λ [N/rad]	C_α [N/rad]	A_f m ²	C_D
Valeur	1450	0.7180	1.3	1.013	0.33	9.81	1300	0.5	75000	50000	0.562	0.35

Tableau III-4 : Paramètre du véhicule

III.9.1 Validation du modèle du modèle (T-S)

Dans cette sous-section, on a fait une validation de la représentation Takagi_Sugeno du notre modèle non linéaire autonomes. La figure (III.9) représente les réponses du système non linéaire et du modèle T-S par rapport aux variations de la vitesse longitudinale du véhicule (Figure III.10).

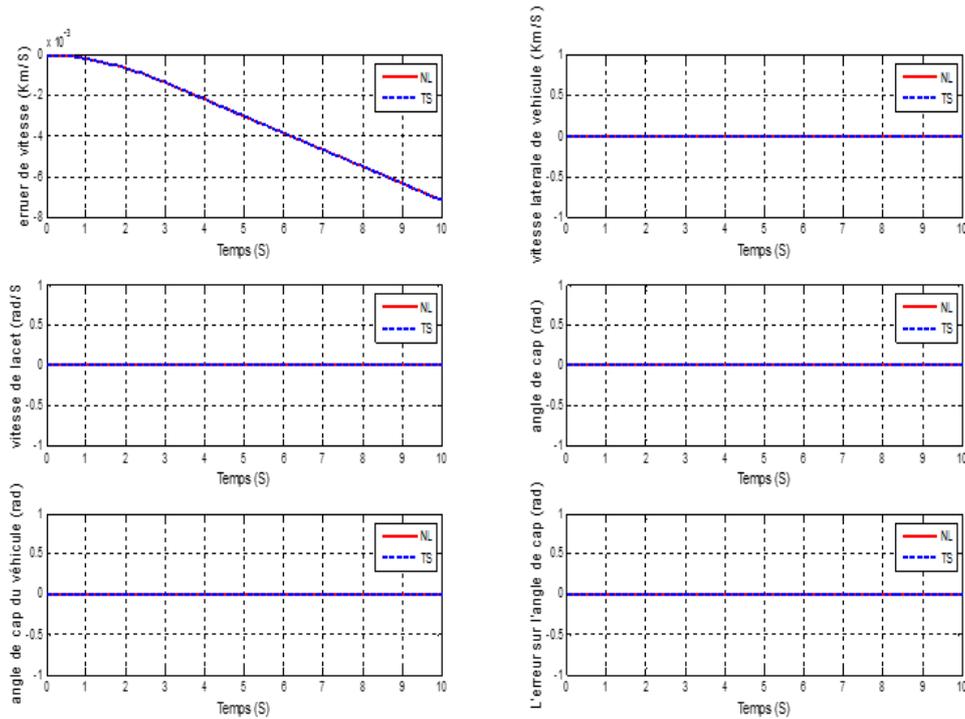


Figure III.9: Comparaison entre le modèle non linéaire et modèle (T-S)

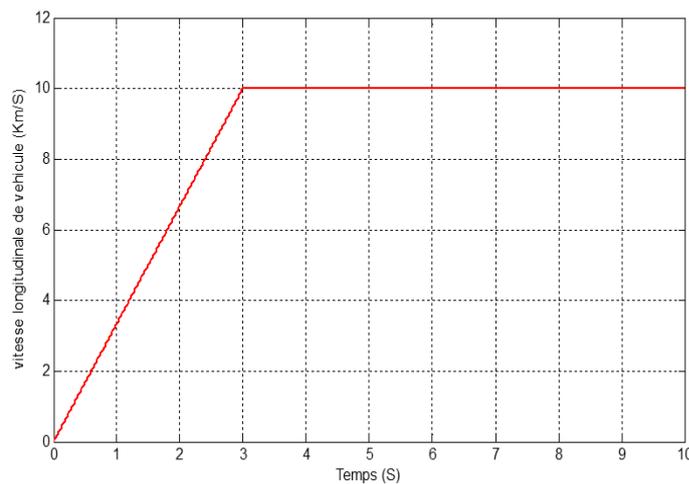


Figure III.10: Vitesse longitudinale de véhicule.

Les résultats présentés dans la figure (III.9), nous permettent de conclure que la représentation (T-S) peut décrire de manière précise le comportement non linéaire de notre Système.

III.9.2 Validation de La loi de commande.

La résolution des conditions de stabilisations LMI dans le théorème 1 à l'aide de LMI-Toolbox-LMI en MATLAB, nous donne les gains de contrôle suivants.

$$K_1 = \begin{bmatrix} -0.30127 & -0.7032 & -1.2913 & -1.7285 & -1.6450 & -1.3275 \\ 0.9126 & -4.8148 & -325.3396 & -438.9347 & -379.9860 & -334.9253 \end{bmatrix}$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} -3.0125 & -0.7035 & -1.2902 & -1.7266 & -1.6442 & -1.3265 \\ 0.9129 & -4.8120 & -325.3391 & -438.9326 & -379.9861 & -334.9245 \end{bmatrix}$$

$$K_3 = \begin{bmatrix} -3.0125 & -0.7037 & -1.2911 & -1.7287 & -1.6443 & -1.3274 \\ 0.9127 & -4.8134 & -325.3407 & -438.9347 & -379.9852 & -334.9261 \end{bmatrix}$$

$$K_4 = \begin{bmatrix} -3.0121 & -0.7026 & -1.2904 & -1.7277 & -1.6434 & -1.3265 \\ 0.9128 & -4.8130 & -325.3405 & -438.9373 & -379.9852 & -334.9261 \end{bmatrix}$$

Avec le taux s'atténuation : $\gamma = 0.01$

Pour présenter les avantages du contrôleur, nous proposons les scénarios suivants :

- **Scénario 01 : Robustesse et atténuation des perturbations**

Dans ce scénario, nous supposons que $x_0 = [5, 0.1, 0 - 0.1, 0.2, 0.2, 0.15]^T$ et que le véhicule est loin de l'axe du chemin désirée et le boîtier du véhicule est affecté par une force de vent raisonnable $M_d = 50$ (N).

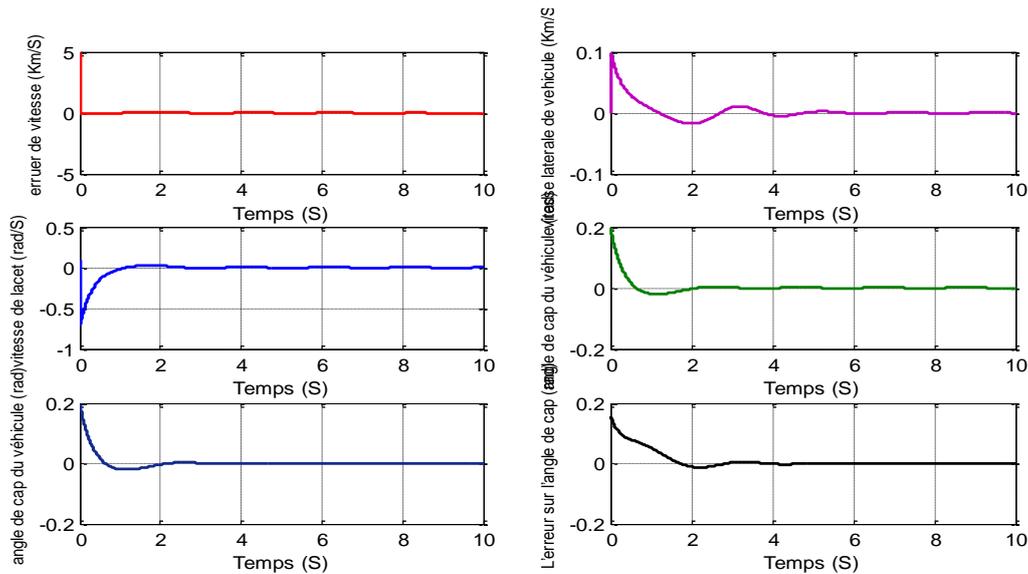
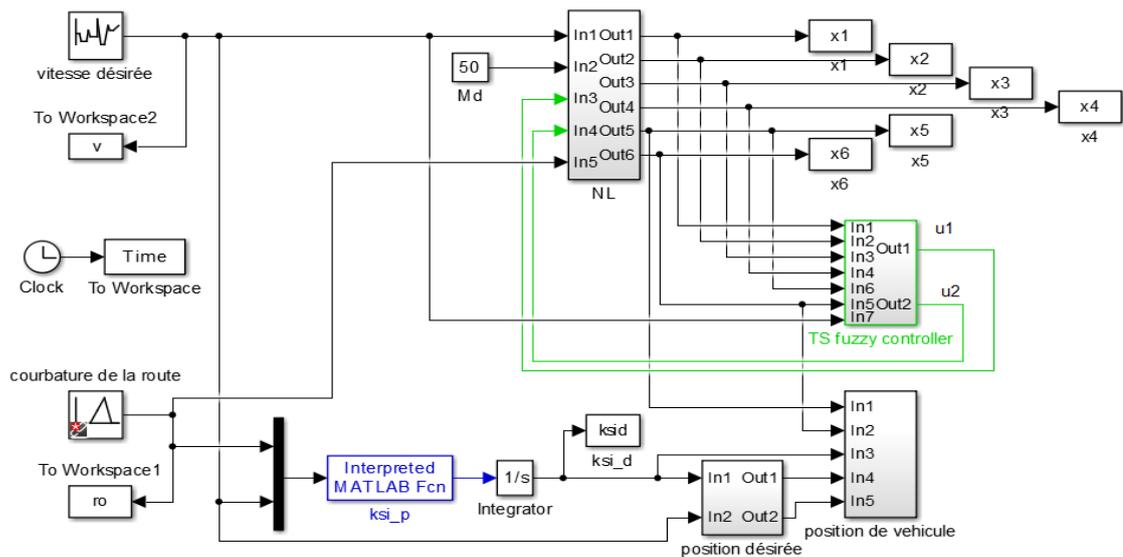


Figure III.11 : Résultats de commande H_∞

La figure (III.11) montre que le contrôleur proposé donne de très bons résultats de stabilisation, puisque tous les états du véhicule convergent vers l'origine en présence d'une perturbation externe.

- **Scénario 02 Contrôle longitudinal et latéral de véhicule.**

Les résultats de Simulink Matlab (voir figure III.12) de maintien de voie et de vitesse du véhicule sous différents valeurs de vitesse désirée et niveaux de courbature de la route (voir figure III.13).



III.12: Schéma block de poursuite

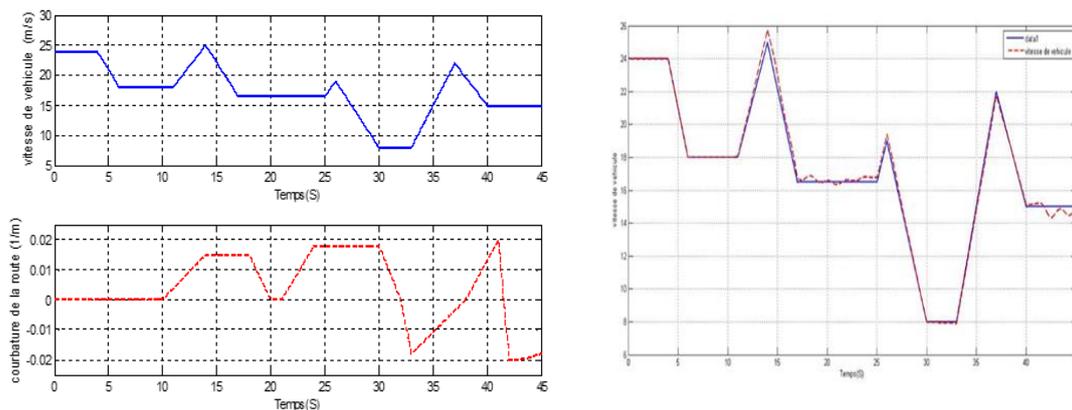


Figure III.13: Différent vitesses désirées du véhicule et la courbature de trajectoire.

Il ressort clairement des résultats illustrés à la figure (III.14), que le contrôleur PDC proposé peut garantir un contrôle de suivi stable du véhicule sous tout en maintenant des valeurs de vitesse désirées avec courbures de route variable et de fortes forces de vente.

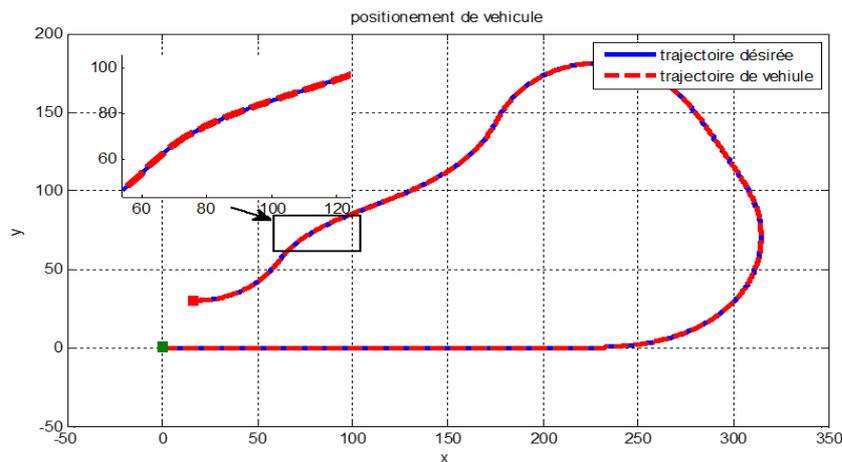


Figure 14 : Trajectoire de véhicule.

Scénario 03 : Navigation autonome de véhicule ; évitement d'obstacle et suivi de trajectoire

Les résultats de simulation est donné par les deux figure (III.15) et (III.16) montrent les la navigation autonome du véhicule en présence des obstacles.

Les résultats obtenus en simulation montrent (voir figure III.16), la faisabilité de stratégie de commande proposée tels que :

1. En absence des obstacles le véhicule suivre parfaitement la trajectoire désirée grâce au contrôleur PDC proposé.
2. En présence d'un obstacle, le véhicule évite l'obstacle grâce au contrôleur flou et après Peut revenir sur la voie désirée en activant une autre fois le contrôleur PDC

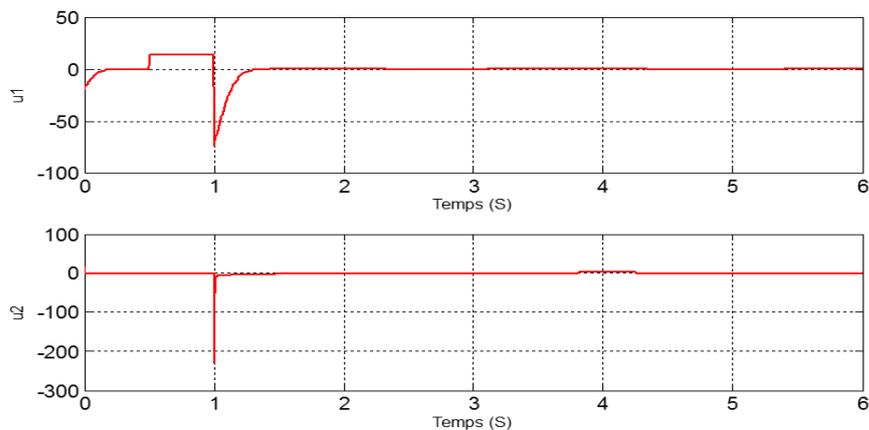


Figure III.15 : Signaux des commandes.

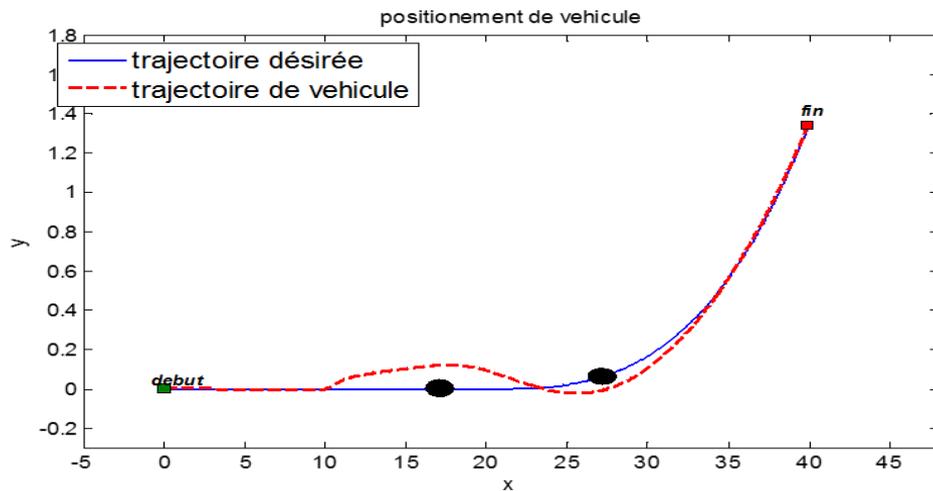
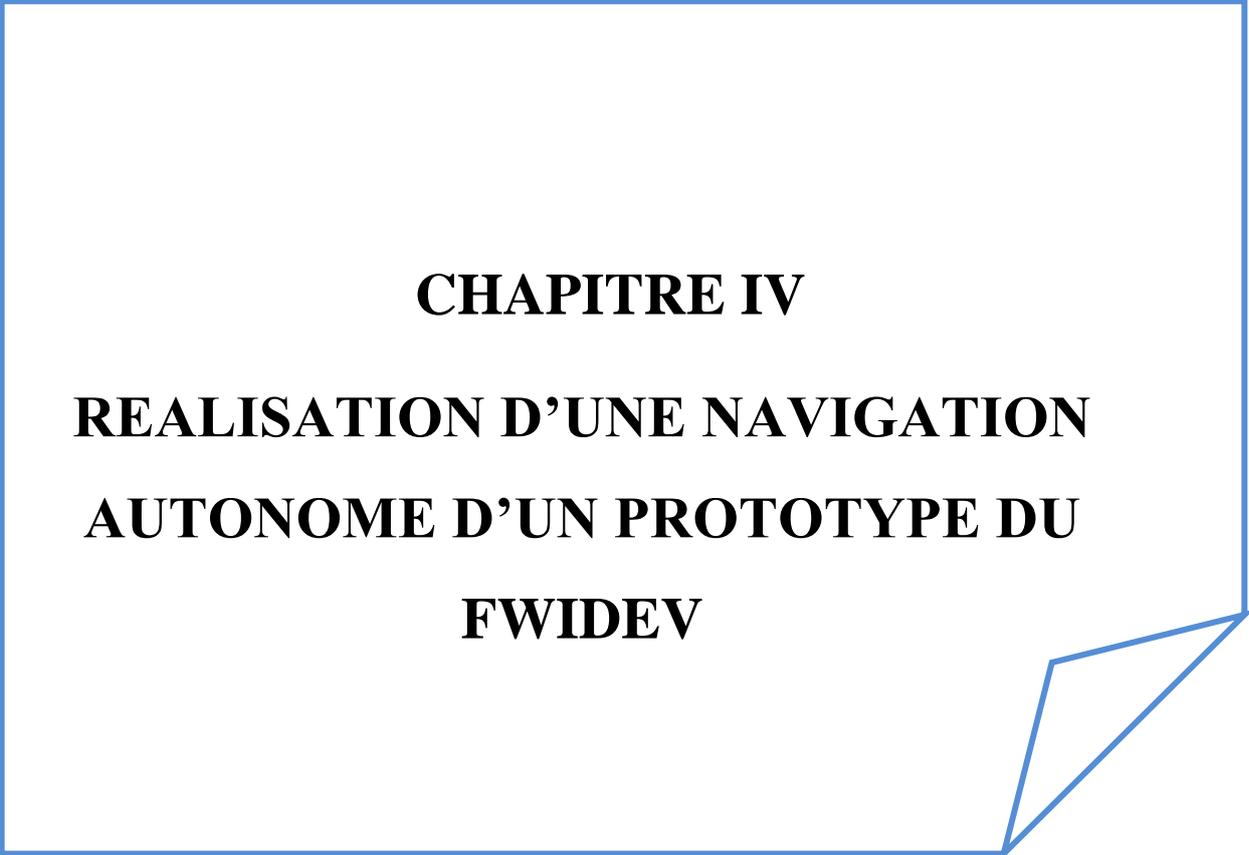


Figure III.16: Poursuite en présence des obstacles.

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un contrôle latéral et longitudinal du véhicule électrique en présence d'obstacles. D'abord, on a établi un modèle de contrôle non linéaire couplé de latérale/longitudinal, puis on a utilisé l'approche de secteur non linéaire pour le décrire sous forme du modèle (T-S). En se basant sur ce dernier, une loi de commande robuste est conçue pour la maintenir le véhicule dans sa voie avec une vitesse désirée. L'évitement d'obstacles est assuré par un contrôleur flou. Finalement, les résultats de simulation montrent l'efficacité de stratégie de commande à garantir une navigation autonome du véhicule.



CHAPITRE IV

REALISATION D'UNE NAVIGATION

AUTONOME D'UN PROTOTYPE DU

FWIDEV

Chapitre IV réalisation d'une navigation autonome d'un prototype du FWIDEV

IV.1 Introduction

La réalisation d'un véhicule autonome implique le développement et l'intégration de différentes technologies permettant au véhicule de se déplacer d'une manière autonome. Généralement, les étapes à suivre dans ce processus sont :

1. Perception de l'environnement : Le véhicule est équipé de capteurs tels que des caméras, des radars et des capteurs ultrasoniques pour percevoir son environnement.

2. Traitement des données : Les données collectées par les capteurs sont traitées en temps réel par des algorithmes avancés. Ces algorithmes peuvent détecter et reconnaître les objets et les obstacles, d'estimer leur position et leur vitesse, et de créer une représentation détaillée de l'environnement du véhicule.

3. Système de contrôle du véhicule : Basé sur les informations perçues, le système de navigation autonome utilise des algorithmes d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique pour analyser les données et prendre des décisions en temps réel. Une fois la décision prise, le système de navigation autonome envoie des commandes aux actionneurs du véhicule, tels le pilote de moteurs, pour exécuter la trajectoire planifiée. Ces commandes sont ajustées en continu en fonction des changements dans l'environnement et des nouvelles informations perçues.

4. Validation et sécurité : La navigation autonome d'un prototype de véhicule nécessite des tests rigoureux et une validation approfondie pour assurer la sécurité. Des scénarios de conduite réalistes sont simulés, et des essais sur route sont effectués dans des conditions contrôlées. Les prototypes sont également équipés de systèmes de secours et de redondance pour prévenir les défaillances.

Ce chapitre est dédié à la réalisation d'un système de la navigation autonome d'un prototype de véhicule d'évitement d'obstacles. Premièrement, d'un prototype de véhicule est réalisé. Ce véhicule est équipé un capteur ultrasonique permette de détecter les obstacles et d'estimer leurs positions. Puis, en utilisant les données collectées, un système de contrôle intelligent basé sur la logique floue décide la bonne voie en évitant les obstacles et donne des commandes aux le pilote de moteurs afin d'éviter les obstacles. Finalement, des tests réels de la mise en marche d'un prototype sont donnés.

IV.2 Principales parties du robot

Un prototype de véhicule électrique comprend trois parties essentielles qui travaillent ensemble pour assurer le fonctionnement du véhicule. En résumé ces parties comme suit :

- ❖ Partie électronique.
- ❖ Partie mécanique.
- ❖ Partie informatique.

IV.2.1 Partie électronique

C'est la partie intelligente du robot parce qu'elle contient des circuits programmables qui faire la commande et le contrôle du composant mécanique. Nous avons donc, besoin d'un circuit programmable qui est le cerveau du notre robot, pour commuter les moteurs d'une manière ou d'une autre afin de donner au robot la capacité de se déplacer ainsi que la capacité de contrôler certains appareils électroniques qui permettent à notre robot de se déplacer librement et d'éviter les obstacles. Notre choix s'est porté sur la carte Arduino.

Carte Arduino

Arduino est un projet Italie créé dans les années 2005 à l'Italie par un équipe d'enseignants et d'étudiants dans l'école désigne d'interaction d'ivrea [44] ; Elle englobe en elle-même deux entités essentielles ; le logiciel et le matériel.

La carte Arduino représente une interface programmable parce qu'elle équipée d'un microcontrôleur qui permet, à partir d'événements détectés par des capteurs, de programmer et commander des actionneurs.

Quelques types de carte Arduino

Il existe plusieurs types dont le plus célèbre :

- **Carte Arduino Méga**

C'est un modèle avec 54 entrées /sorties, dont 15 sont utilisables en PWM et les 16 autres sont des broches d'entrées analogiques.

- **Carte Arduino Nano**

Ce modèle compose de 14 broches d'E/S, dont six sont utilisées pour PWM, les autres sont des broches d'entrée analogiques.

- **Carte Arduino Uno**

C'est le modèle de base avec 14 entrées / sorties, 6 entrées analogiques et les autres sont des broches d'idées pour PWM.

La carte Arduino Uno, à microcontrôleur basée sur l'ATmega 328 est la carte utilisée dans notre projet.

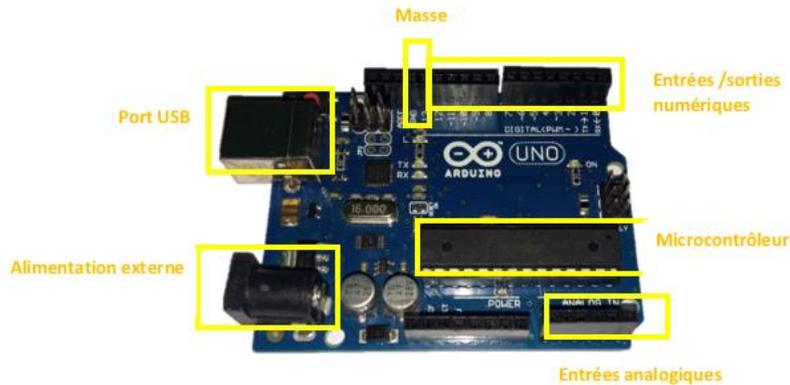


Figure IV.1 : Carte Arduino Uno

Zoom sur la carte Arduino Uno

▪ **Alimentation**

On peut alimenter la carte Arduino par une connexion USB ou par une source externe (6 à 20 volt) mais la plage recommandée est de 7 à 12 volts, car moins de 7V le fonctionnement de la carte doivent aléatoire au-dessus de 12V peut devenir anormalement chaud [45].

▪ **Broches de la carte Arduino (ou PIN)**

Broches d'alimentation

5 volts : C'est l'alimentation réglée par la carte.

3.3 volts : C'est l'alimentation fournie par le régulateur avec 50 mA la consommation maximale de courant.

Vin : le point de connexion entre la carte et la source externe (une batterie de 9v par exemple).

GND : la masse (la terre).

Broches spécialisées

LED Ces broches peuvent être reliées à la broche digitale 13. La LED s'allume lorsqu'elle reçoit une valeur HIGH, correspondant à une tension de 5V, et s'éteint lorsqu'elle reçoit une valeur LOW, correspondant à une tension de 0V.

PWM : les broches qui fonctionnent en mode PWM sont 3, 5, 6, 9, 10 et 11 à travers la fonction « analogWrite » .

Serial (RX et TX) : Le port TX (1) est utilisé pour envoyer les données, tandis que le port RX (X) est utilisé pour les recevoir.

Interruptions externes 2 et 3 : Ces broches peuvent être configurées comme une source d'interruption, que ce soit sur un niveau logique bas ou haut, ou même sur un front montant ou descendant.

Avantages de carte la carte Arduino

La carte Arduino offre plusieurs avantages qui en font un choix populaire pour les projets de développement électronique. Parmi ces des avantages, on cite :

- Facilité de programmation et le logiciel est facile à utiliser et aussi acceptable sous les plateformes les plus courantes pas sur le Windows seulement comme la plupart des logiciels.
- C'est une combinaison entre le soft et le hardware.
- Son prix est abordable compte tenu des fonctionnalités qu'elle offre.

🚦 Double Pont –H (L298N)

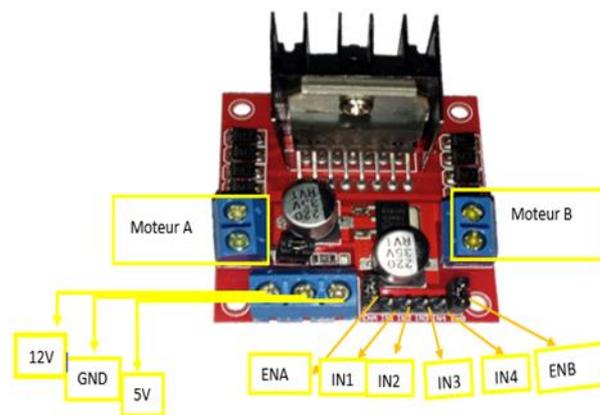


Figure IV.2: double pont en H (L298N)

Le double pont –H ou en autre mot motor_driver est un circuit électronique permet le contrôle de vitesse et le sens de rotation de moteur. Cette commande fait grâce à l'association entre deux technologies est PWM et H-bridge pour plus d'information voir (ANNAX B). La figure ci-dessous illustré les principes borne de L298N :

VCC C'est l'alimentation du moteur. Elle variée sur l'intervalle [5V,35V].

5V est utilisée pour l'alimentation interne de L298N.

GND C'est la masse commune.

ENA pour contrôler la vitesse du moteur A.

ENB pour contrôler la vitesse du moteur B.

IN1, IN2 pour contrôler le sens de rotation du moteur A.

IN3, IN4 pour contrôler le sens de rotation du moteur B.

OUT1, OUT2 points de connexion avec le moteur A.

OUT2, OUT3 point de connexion avec le moteur B.

🚦 Capteur ultrason

Le module HC-SR04 utilise des ultrasons pour déterminer la distance entre le véhicule et

l'obstacle. Il émet des ondes ultrasoniques à une fréquence de 40 kHz. Il mesure la distance en calculant le temps écoulé entre l'émission d'une impulsion ultrasonique et la réception de l'écho réfléchi par un objet. Il est généralement capable de mesurer des distances variant entre 2 cm à 400 cm, avec une précision de l'ordre du centimètre. Ce capteur composé de deux parties, un émetteur et un récepteur et 4 pins fonctionnent comme suit [44] :

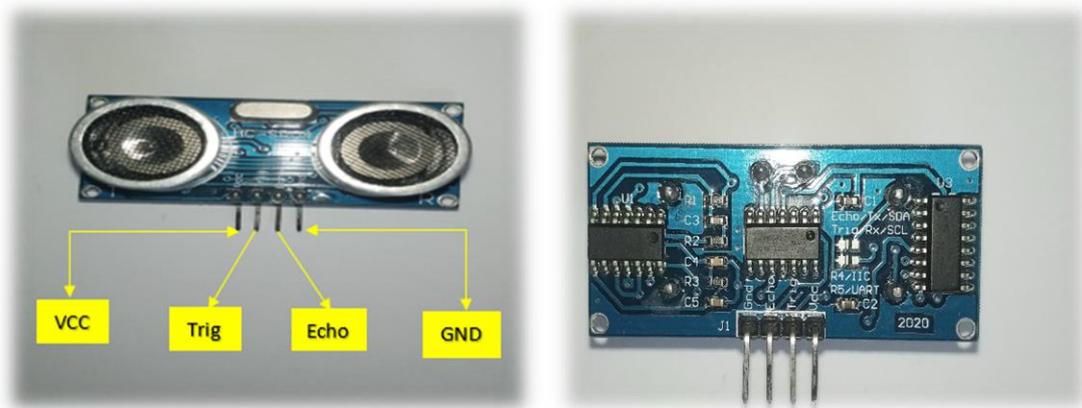


Figure IV.3 : Capteur ultrason

VCC : L'alimentation par le 5v de la carte Arduino.

GND : La masse connecter avec le GND de la carte Arduino.

Trig : Entrée de déclenchement de la mesure.

Echo : Sortie de mesure donnée en écho (Echo output).

Dimension	45 mm x 20 mm x 15 mm
Portée	De 2 cm à 4 m
Résolution de la mesure	0.3 cm
Angle de mesure efficace : 15 °	15 °
Largeur d'impulsion sur l'entrée de déclenchement	10 µs.
Dimensions	45 mm x 20 mm x 15 mm

Tableau IV.1 : Caractéristique du capteur ultrason .

■ Principe de fonctionnement

La carte Arduino envoie une impulsion d'au moins 10 µs à l'émetteur via la broche Trig pour déclencher les mesures. L'émetteur convertit cette impulsion en 8 impulsions ultrasoniques. À ce moment-là, l'écho s'active et commence à fournir le signal de réception. Si aucun obstacle détecté, le signal du récepteur se termine après 38 ms. En revanche, si le

signal est réfléchi, ce qui indique la présence d'un obstacle, l'écho est désactivé. La distance entre l'obstacle et le robot est calculée de la manière suivante [46] :

La formule de calcul de la distance est donnée comme suite : $D = \text{durée} / 58 \text{ cm}$

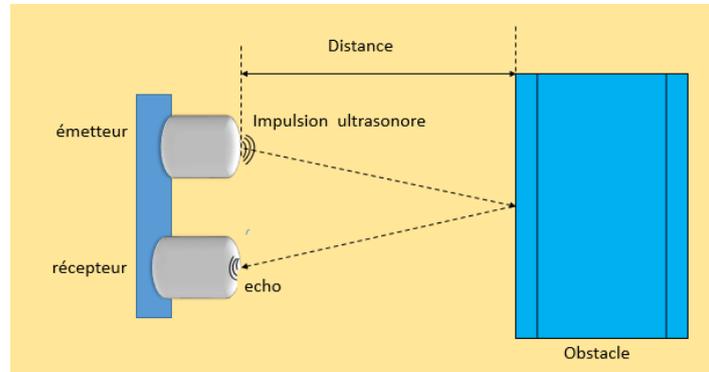


Figure IV.4: Principe de fonctionnement d'un capteur ultrason.

IV.2.3 Partie mécanique

Les mécanismes de prototype représentent la structure sur laquelle tous les composants sont placés et aussi les roues qui assurent le mouvement.

Châssis

C'est une plaque qui rassemble tous les composants du robot. Elle comporte de plusieurs trous pour une bonne fixation des éléments et la bonne disposition des fils, et elle contribue également à l'esthétique du véhicule. Il se compose de deux étages, le premier pour placer les moteurs et le deuxième pour placer la carte électronique les capteurs, etc. [47].

Notons qu'il existe de nombreux modèles, la différence entre eux est due à la nature du matériau à partir duquel ils sont fabriqués. On choisit le modèle à quatre roues dont la traction est assurée par quatre (4) moteurs chacun est attaché à l'une des roues en plastique [48].

Les roues

La mobilité à roues est la structure mécanique la plus répandue actuellement, car elle fournit le mouvement du robot avec une accélération et une vitesse rapide mais demande un sol plat en pratique, il existe trois types des roues :

- Le premier type dont l'axe de rotation passe par le centre de la roue et est appelé roues fixes.
- Le deuxième type est les roues directrices et l'essieu directeur est perpendiculaire au sol Il passe par le centre de la roue. On les appelle roues centrales

- Le troisième type Axe de direction vertical sur terre, il ne passe pas par le centre des roues dites folles.

Pour nous, nous avons choisi les roues fixes ; Notre choix est justifié par le fait que ce type de roue est plus facile à contrôler, il dissipe moins d'énergie et il donne également au véhicule une aisance de mouvement plus rapide [45].

Les caractéristiques des roues :

Vitesse de rotation	240 tours/min sous 6V
Vitesse de mouvement	489 m/min sous 6V
Diamètre de la roue	65mm
Axe de roue	5,3mm X 6,66mm
Taille de la roue	65 mm X 26mm

Tableau IV.2 : Caractéristique des roues.

Les moteurs

Dans notre prototype du véhicule, nous avons utilisé quatre moteurs électriques à courant continu pour propulser le véhicule. On a intégré aussi un servo-moteur afin d'assurer le mouvement de capteur ultrason en trois directions.

Moteur à courant continu (MCC)

Le véhicule électrique est équipé de quatre moteurs électriques à courant continu placés un par roue du véhicule. Cette configuration nous a permis une propulsion indépendante de chaque roue, offrant une meilleure maniabilité et une meilleure répartition du couple. Les caractéristiques des moteurs sont indiquées dans le tableau suivant :

Tension d'alimentation	Entre 3V et 12 V
Vitesse	15tr/mm (environ 2m/s)
Couple	Environ de 0,5kg.cm
Moteur Poids	Environ 9gr
Taille du Moteur	70mm×22mm×18mm

Tableau IV.3 : Caractéristique des moteurs

Servo-moteur

C'est un petit moteur électrique qui composé d'un réducteur intégré permet d'effectuer une rotation. Il possède trois entrées : **le rouge** pour l'alimentation, **l'orange** pour le signal de commande généré par la carte Arduino et le reste c'est **le marron** qui représente la masse [49]. Le servo-moteur est utilisé pour tourner le capteur ultrason dans les trois sens avant,

gauche et droite. Cela nous a donné la possibilité d'une détection d'obstacles dans différentes directions et une amélioration de la navigation autonome du véhicule.

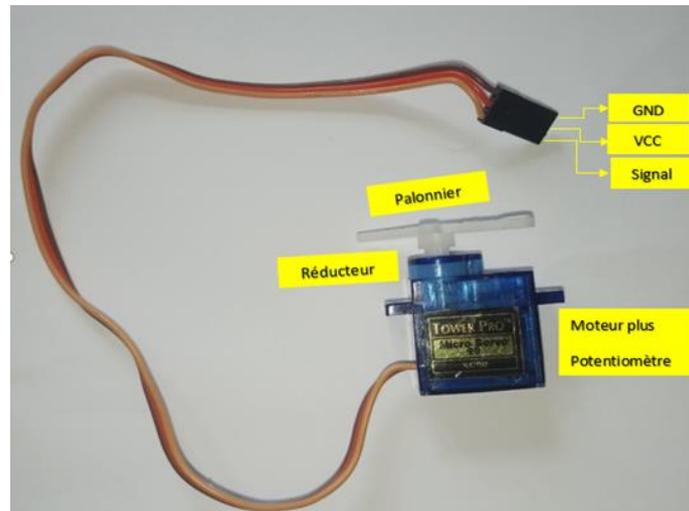


Figure IV.5 : Servo-moteur

■ **Principe de fonctionnement**

La carte Arduino transmette une impulsion chaque 20µs à servo-moteur ; la durée peut être 1s 1ms ,1.5ms au 2ms. chaque durée représente un angle comme le montre la figure 6

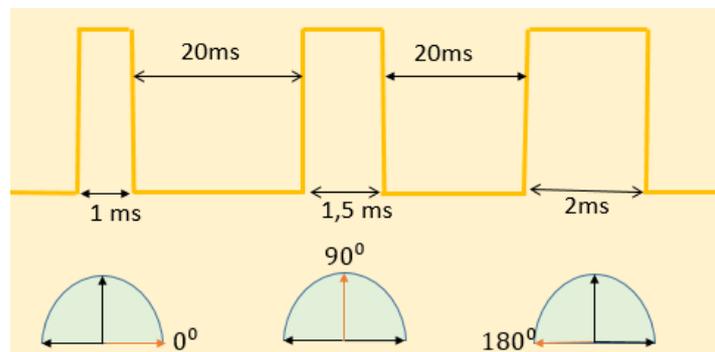


Figure IV.6: Principe de fonctionnement d'un servomoteur

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques du servo-moteur.

Tension d'alimentation	Entre 4.8Vet 6 V
Vitesse	0.2s/60°sous 4.8V
Couple	Environ de 12kg/cm sous 4.8V
Amplitude	0°180°
Dimension	20mm×11.5mm×27mm

Tableau IV.4:Caractéristiques du servo-moteur.

IV.2.3 Partie informatique

Pour programmer le comportement de la carte Arduino, il existe de deux manières différentes :

 Programmation en langage C.

 Programmation par blocs.

Dans notre travail, on a utilisé la programmation en langage C par l'utilisation de logiciel IDE.

L'IDE Arduino est un logiciel open source principalement utilisé pour écrire et compiler du code dans la carte Arduino. L'IDE Arduino est un environnement de développement intégré et une application multiplateforme utilisé la programmation en C et C++ [50].

Les parties principales du logiciel sont :

- Le menu qui contient les options de configuration.
- La zone de programmation.
- Le débogueur.

▪ **Structure d'un programme Arduino**

la structure d'un programme Arduino comprend la zone qui contient la définition des constantes, des variables et aussi des bibliothèques. La fonction `setup()` pour l'initialisation, la fonction `loop()` qu'est une boucle répétée indéfiniment utilisée pour l'exécution continue du code principal.

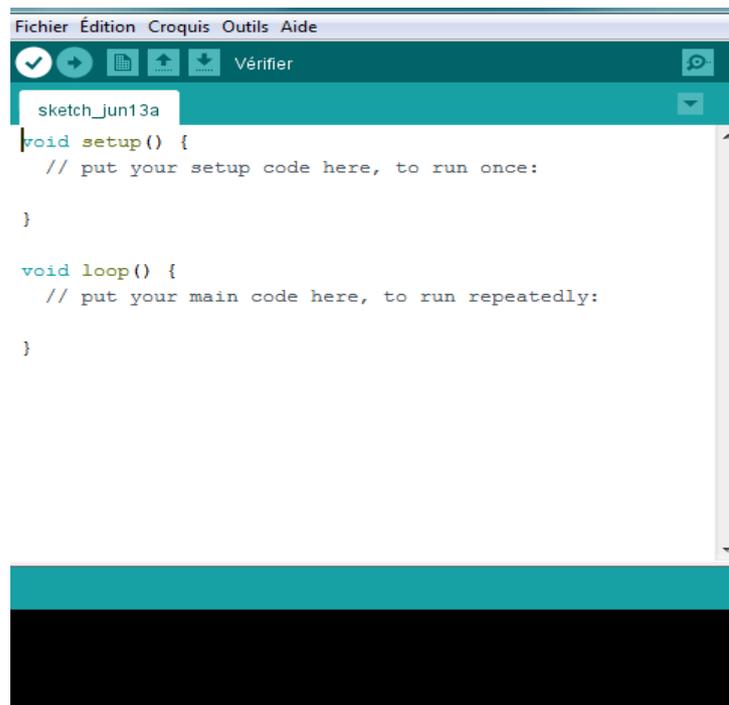


Figure IV.7 : *Interface visuelle du logiciel*

IV.3 Simulation d'un véhicule électrique sur logicielle Proteus 8

Dans ce projet, le logiciel de simulation Proteus8 est utilisé pour valider le système avant sa mise en œuvre réelle. En effet, il offre un environnement virtuel puissant pour la conception, la simulation et la validation du système de navigation autonome d'un véhicule électrique. Dans ce qui suit, on présente, quelques simulations faites par ce logiciel.

IV.3.1 Simulation de sens et vitesse de rotation du moteur par L298n et la carte Arduino

La simulation, nous avons utilisé le L298N pour contrôler le sens de rotation du moteur et aussi la vitesse de rotation.

Les composants utilisés :

- 4 moteurs
- Carte Arduino Uno
- L298N

Les caractéristiques de branchement :

- ENA connecté au pin 11 (PWM) de la carte Arduino.
- ENB connecté au pin 9 (PWM) de la carte Arduino.
- IN1 connecté au pin 10 de la carte Arduino.
- IN2 connecté au pin 8 de la carte Arduino.
- IN3 connecté au pin 7 de la carte Arduino.
- IN4 connecté au pin 6 de la carte Arduino.

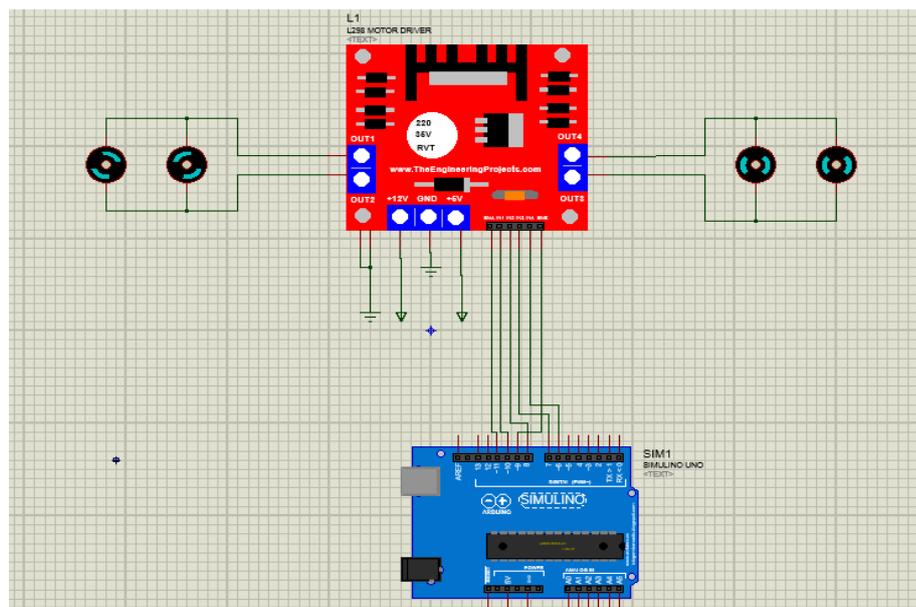


Figure IV.8: Simulation de commande le sens et la vitesse de rotation des MCC par L298N

Afin de simuler avec Proteus 8 le contrôle de 4 moteurs à l'aide d'un driver-moteur, nous suivons les principales étapes suivantes :

1. Connectez correctement de différentes composantes comme montre la figure IV-8.
2. Écrivez, compilez et téléversez le code du contrôle des moteurs puis dans l'EDI intégré de Proteus.
3. Exécutez la simulation dans Proteus afin de tester le contrôle des moteurs.

Remarque IV-1 : *Pour varier la vitesse de rotation des moteurs il faut connecter les broches ENA et ENB par les pins Arduino de type PWM.*

IV.3.2 Simulation du capteur Ultrason

Les composants utilisés dans la simulation du capteur ultrason sont :

- Capteur ultrason.
- LED bleu.
- Potentiomètre.
- Carte Arduino Uno.
- Un potentiomètre.
- Virtual terminal.

Les caractéristiques de branchement :

- Trig connecté au pin 11.
- Echo connecté au pin 10.
- LED connectée au pin 5.
- GND connecté avec le GND de la carte Arduino.
- VCC connecté avec le 5V de la carte Arduino.
- RXD connecte au pin 1 d'Arduino
- TXD connecte au pin 0 d'Arduino

Dans notre simulation, un potentiomètre est utilisé pour varier la valeur de distance.

La validation de cette simulation est faite en deux étapes, pour une distance <50 et une distance >50.

- Dans le premier test (voir figure VI.9), lorsque distance <50 cm la LED allumée c'est-à-dire l'ultrason détecte un obstacle.
- Dans le deuxième test (figure VI.10) lorsque distance >50 cm la LED éteinte c'est-à-dire l'ultrason ne détecte aucune obstacle.

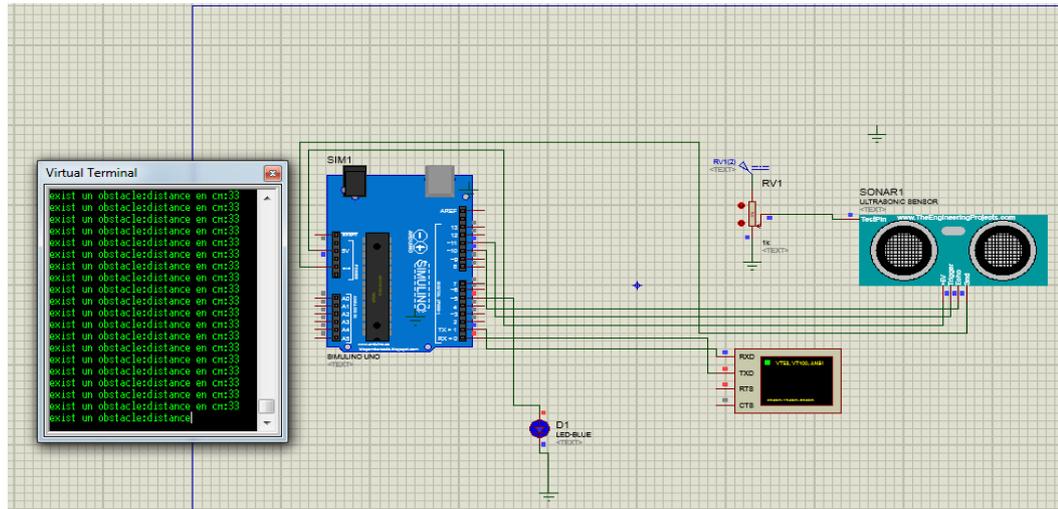


Figure IV. 9 : Simulation du capteur ultrason test 1.

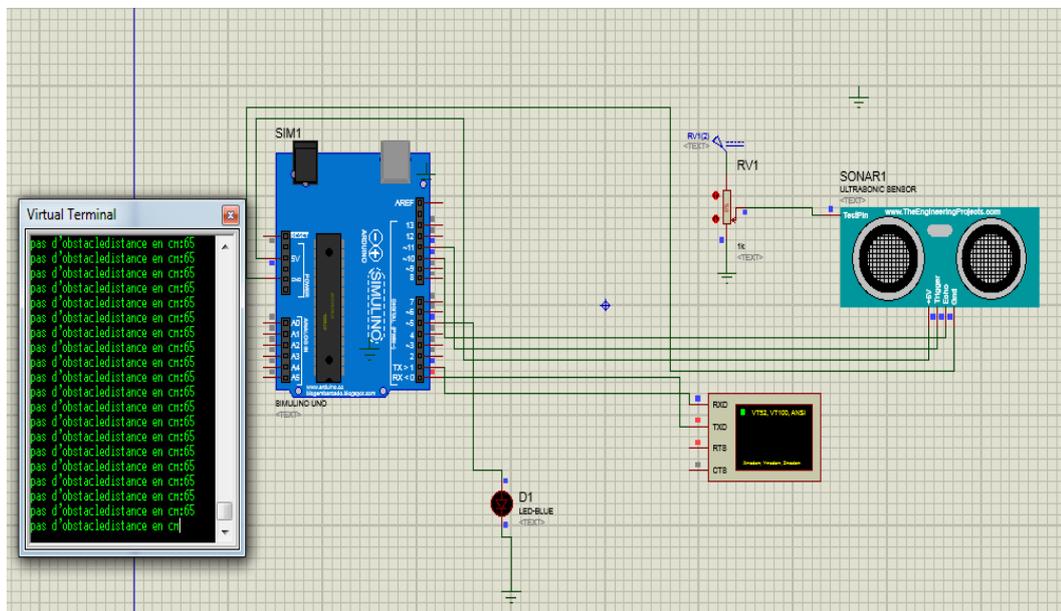


Figure IV.10 : Simulation du capteur ultrason test 2.

IV.3.3 Simulation du servo-moteur

Les composants utilisés :

- Le servomoteur
- La carte Arduino
- Virtual terminal.
- Un potentiomètre
- 3 LED coloré.

Les caractéristiques de branchement :

- Le servomoteur connecte au pin 5 d'Arduino.
- RXD connecte au pin1 d'Arduino.
- TXD connecte au pin 0d'Arduino.
- VCC connecte avec le 5V de la carte Arduino.
- GND connecte avec le GND.
- LED1connecte au pin 8d'Arduino.
- LED2connecte au pin9 d'Arduino.
- LED3connecte au pin10 d'Arduino.

En suivant les mêmes étapes de test des moteurs à courant continu, on peut tester le bon fonctionnement du servo-moteur.

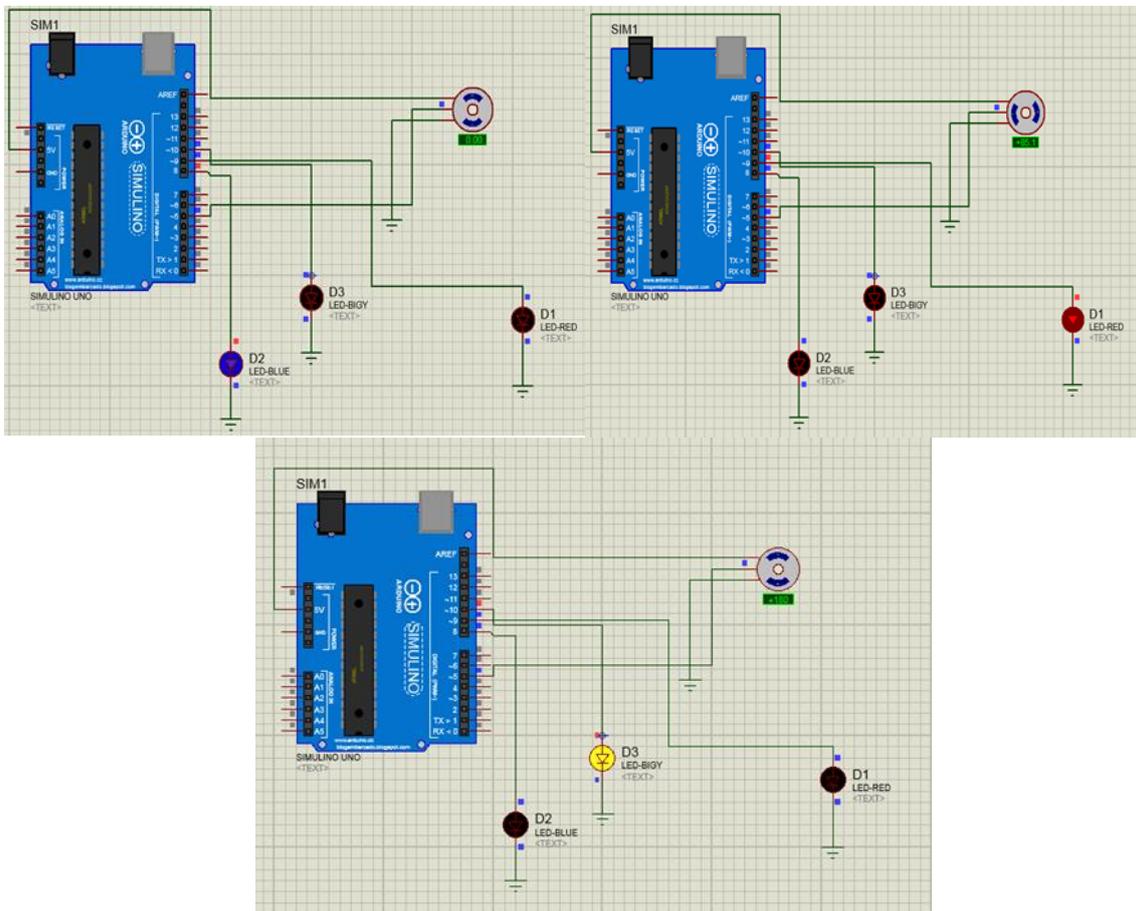


Figure IV.11 : Simulation de servomoteur

IV.3.4 Validation du montage complète par Proteus

Après avoir fourni les outils et les composants électroniques pour le développement d'un petit véhicule capable d'éviter d'obstacles, nous avons préparé la plate-forme globale et la valider à travers Proteus (figure 12).

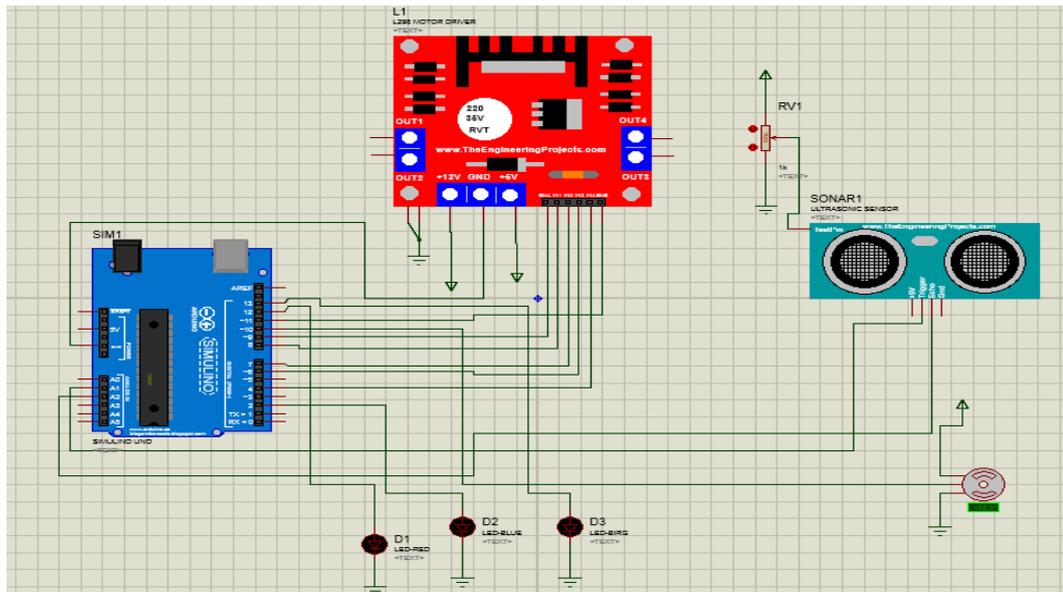
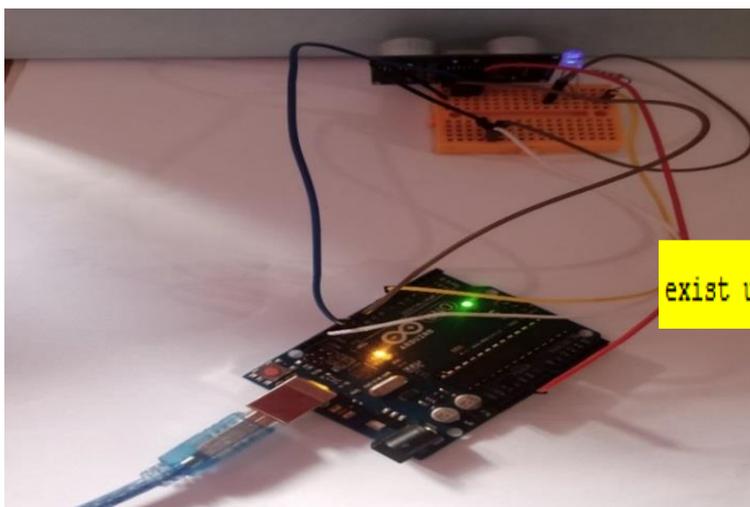


Figure IV.12 : Installation des éléments électroniques du prototype pour éviter les obstacles

IV.4 Réalisation du système de navigation autonome d'un véhicule électrique

IV.4 .1 Réalisation réelle du capteur ultrason

L'objectif de cette étape est d'effectuer des tests pour détecter la présence d'obstacles en fonction de l'allumage de la LED. Si un obstacle est détecté à une distance inférieure ou égale à 50 cm, la LED s'allume. Le moniteur série d'Arduino affiche en temps réel la distance mesurée comme montrent les figures ci-dessous.



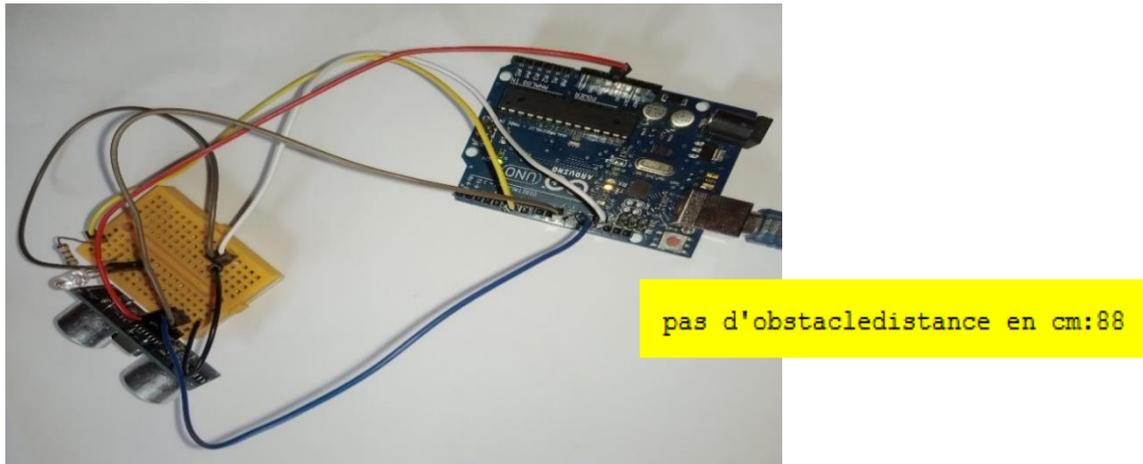


Figure VI.13 : Réalisation simple d'un capteur ultrason

IV.4.2 Test réel du servo-moteur

On a utilisé trois LED chaque LED représente une angle de servomoteur.

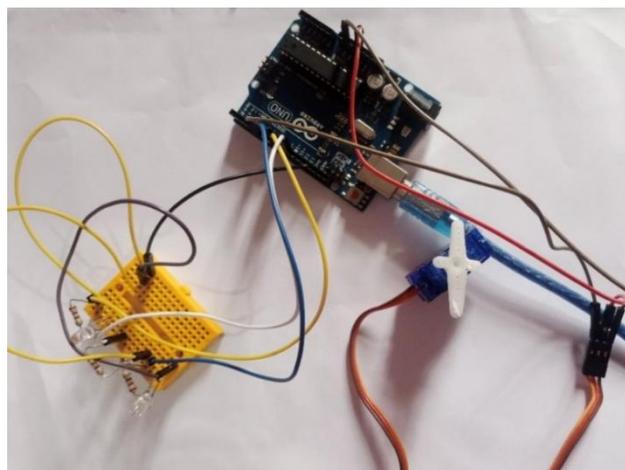


Figure IV.14 : Réalisation simple d'un servomoteur

IV.4.3 Réalisation d'un prototype du véhicule

Pour réaliser notre véhicule, on a besoin de (voire figure IV.15) :

- 4 x Pneu ;
- 2 x châssis ;
- 1 x L298 N ;
- 1 x Arduino Uno ;
- 1 x capteur ultrasons ;
- 1 x plaque d'essai ;
- 1x support de batterie.
- 2 x batteries lithium ion 3.7V.

- LED.
- Fils male-femal et male-male.
- 1 x servomoteur.
- 1 x support ultrason.

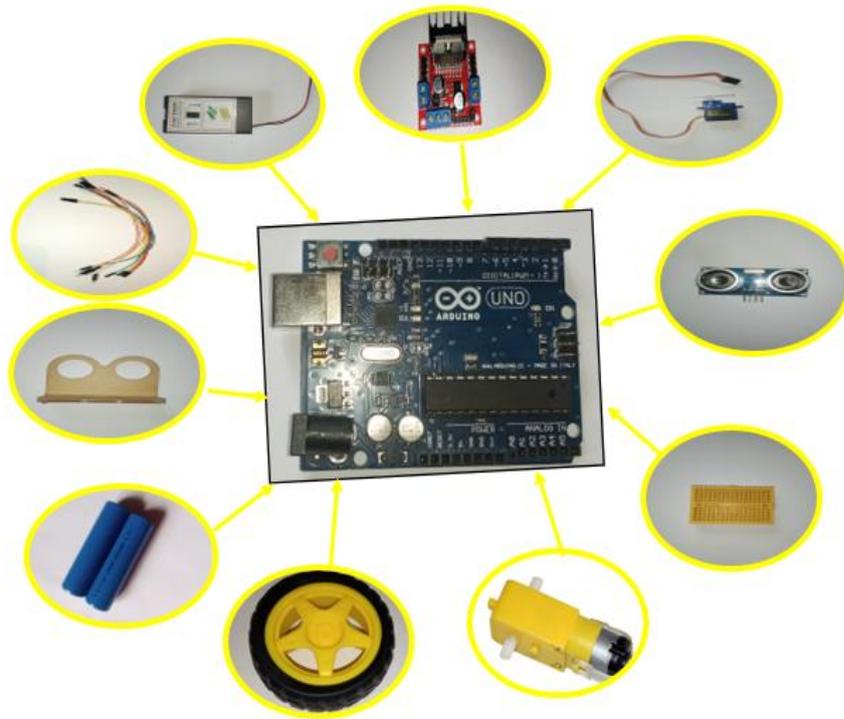


Figure IV.15 : Matériel utilisé

Après avoir tous les éléments nécessaires pour créer notre véhicule, nous avons suivi les étapes suivantes pour réaliser notre prototype :

Étape : fixé les 4 moteurs et les 4 roues sur le châssis.

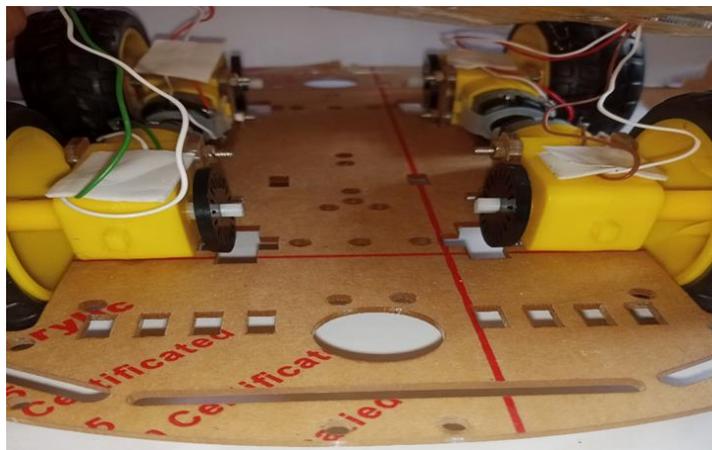


Figure IV.16 : Moteurs et roues montés sur le châssis

Étape : fixé la carte Arduino et les autres modules (L298N, ultrason, ...) sur le châssis.

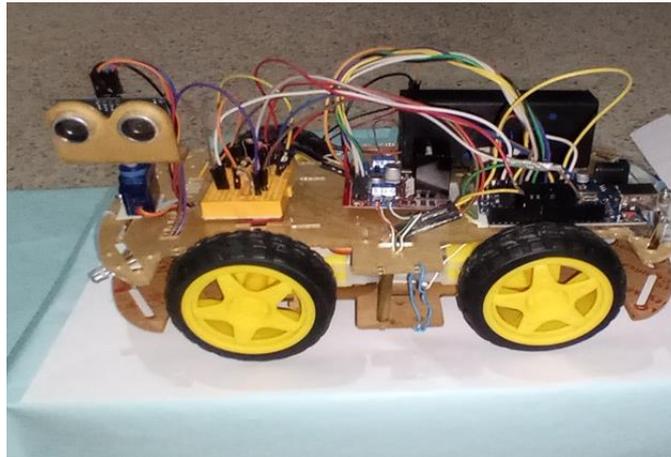


Figure IV.17: Forme finale

Étape : chargé le programme vers la carte Arduino par le câble USB après de faire la vérification.



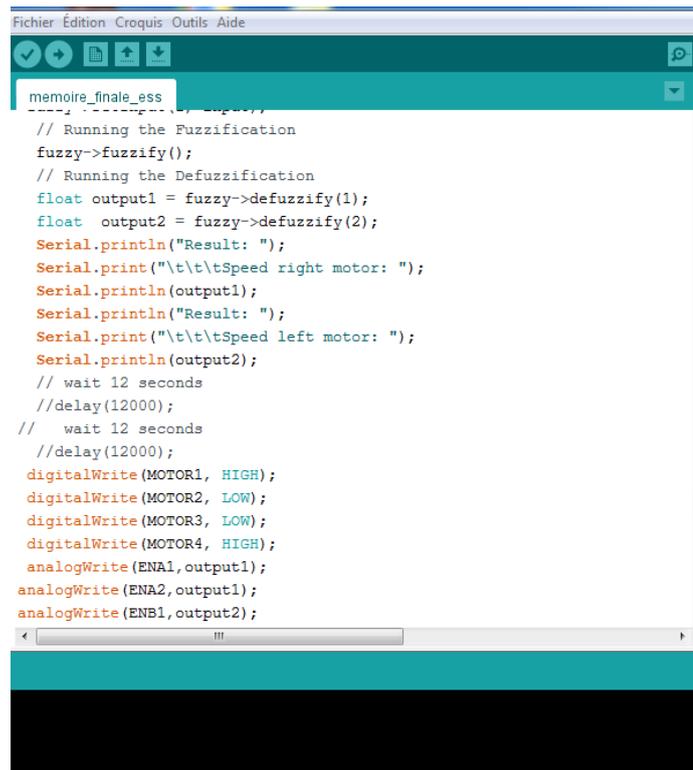
Figure IV.18: Téléchargement du programme dans la carte Arduino

IV .5 Réalisation d'un système de contrôle pour la navigation par logique flou

Dans notre projet, nous avons développé un système de contrôle intelligent pour l'évitement d'obstacles. Ce système utilise la logique floue afin de contrôler la vitesse des moteurs gauche et droit et en intégrant. Un algorithme assure les actions de déplacement (avance, à droite et à gauche). Ce système permet d'acquérir des informations sur la présence ou non d'obstacles et envoie des commandes en temps réel garantissant une navigation sûre et efficace.

IV.5 .1 Contrôle de la vitesse des moteurs gauche et droit avec logique floue

Pour assurer un mouvement fluide et ajusté en fonction de la situation, nous avons utilisé la logique floue pour contrôler la vitesse des moteurs gauche et droit. Le contrôleur flou permet de prendre en compte trois distances d'obstacles (à droite, à gauche et en face) déterminer la vitesse optimale de chaque moteur. En utilisant des règles floues préalablement définies dans le chapitre III (voir page 47).



```
Fichier Édition Croquis Outils Aide
memoire_finale_ess
// Running the Fuzzification
fuzzy->fuzzify();
// Running the Defuzzification
float output1 = fuzzy->defuzzify(1);
float output2 = fuzzy->defuzzify(2);
Serial.println("Result: ");
Serial.print("\t\t\tSpeed right motor: ");
Serial.println(output1);
Serial.println("Result: ");
Serial.print("\t\t\tSpeed left motor: ");
Serial.println(output2);
// wait 12 seconds
//delay(12000);
// wait 12 seconds
//delay(12000);
digitalWrite(MOTOR1, HIGH);
digitalWrite(MOTOR2, LOW);
digitalWrite(MOTOR3, LOW);
digitalWrite(MOTOR4, HIGH);
analogWrite(ENA1, output1);
analogWrite(ENA2, output1);
analogWrite(ENB1, output2);
```

Figure IV .19 : partie de programme par logique flou

Remarque IV-2 : par rapport au paramètre du contrôleur flou (voir chapitre III), les valeurs valeur de rapport cyclique de première variable linguistique(100, 150) sont respectivement considéré comme les sorties une et deux de contrôleur.

IV.5.2 Algorithme de contrôle des actions de déplacement

En parallèle du contrôle de la vitesse des moteurs par logique floue, nous avons mis en place un algorithme spécifique pour gérer les actions de déplacement, à savoir avancer, tourner à droite et tourner à gauche. Cet algorithme analyse les informations fournies par les capteurs de détection d'obstacles et détermine la meilleure action de déplacement pour éviter la collision. Par exemple, si un obstacle est détecté devant le véhicule, l'algorithme peut décider de tourner à gauche ou à droite pour contourner l'obstacle, en fonction de la

disponibilité de l'espace. En fonction des informations fournies par cet algorithme, le système contrôle les actions des moteurs pour exécuter les déplacements utilisant les vitesses fournies par la logique flous.

L'organigramme suivant résume ce système

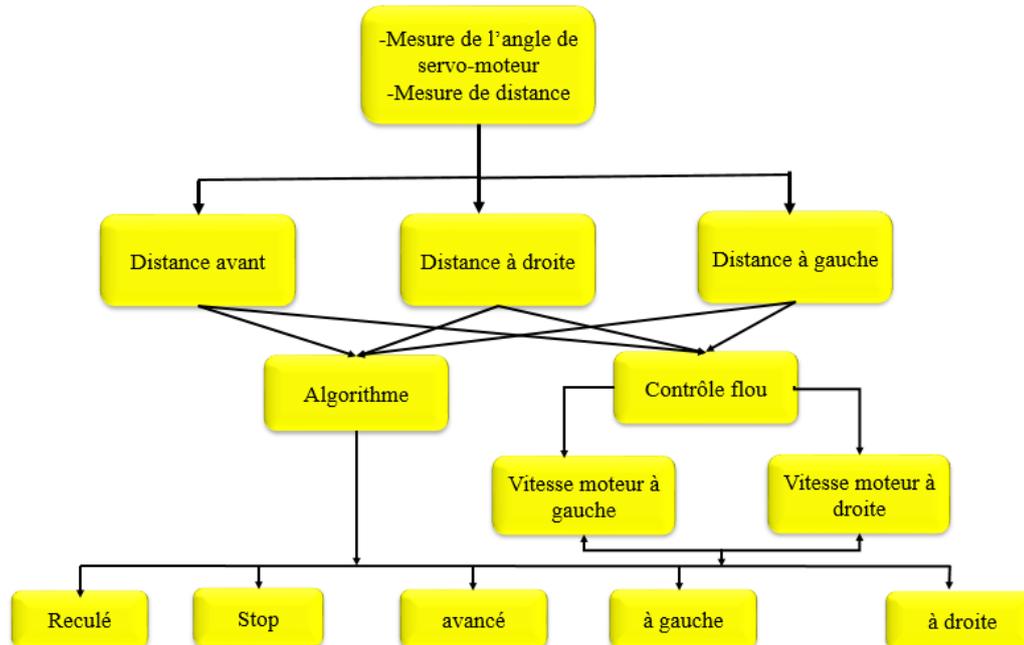


Figure IV.20 : Organigramme du mouvement du véhicule

▪ **Code Arduino de la réalisation**

Un programme est écrit en logiciel Arduino IDE (voir figure IV.21). Par la suite compilez et téléversez le code du contrôle des moteurs puis dans l'EDI intégré de carte Arduino.

```
Fichier Édition Croquis Outils Aide
memoire_finale_ess

void loop()
{
  int distanceRight = 0;
  int distanceLeft = 0;
  delay(50);
  if (dis <= 20) {

    moveStop();
    delay(300);
    moveBackward();
    delay(400);
    moveStop();
    delay(300);
    distanceRight = lookRight();
    int input1 = distanceRight;
    delay(300);
    distanceLeft = lookLeft();
    int input2 = distanceLeft;
    delay(300);
    if (dis >= distanceLeft) {

      turnRight();
    }
  }
}
```

Figure IV.21 : Fonction Loop () du programme.

Validation réelle d'une navigation autonome du véhicule autonome

Le test en temps réel de notre réalisation est montré par la figure (IV.22) Le long des tests

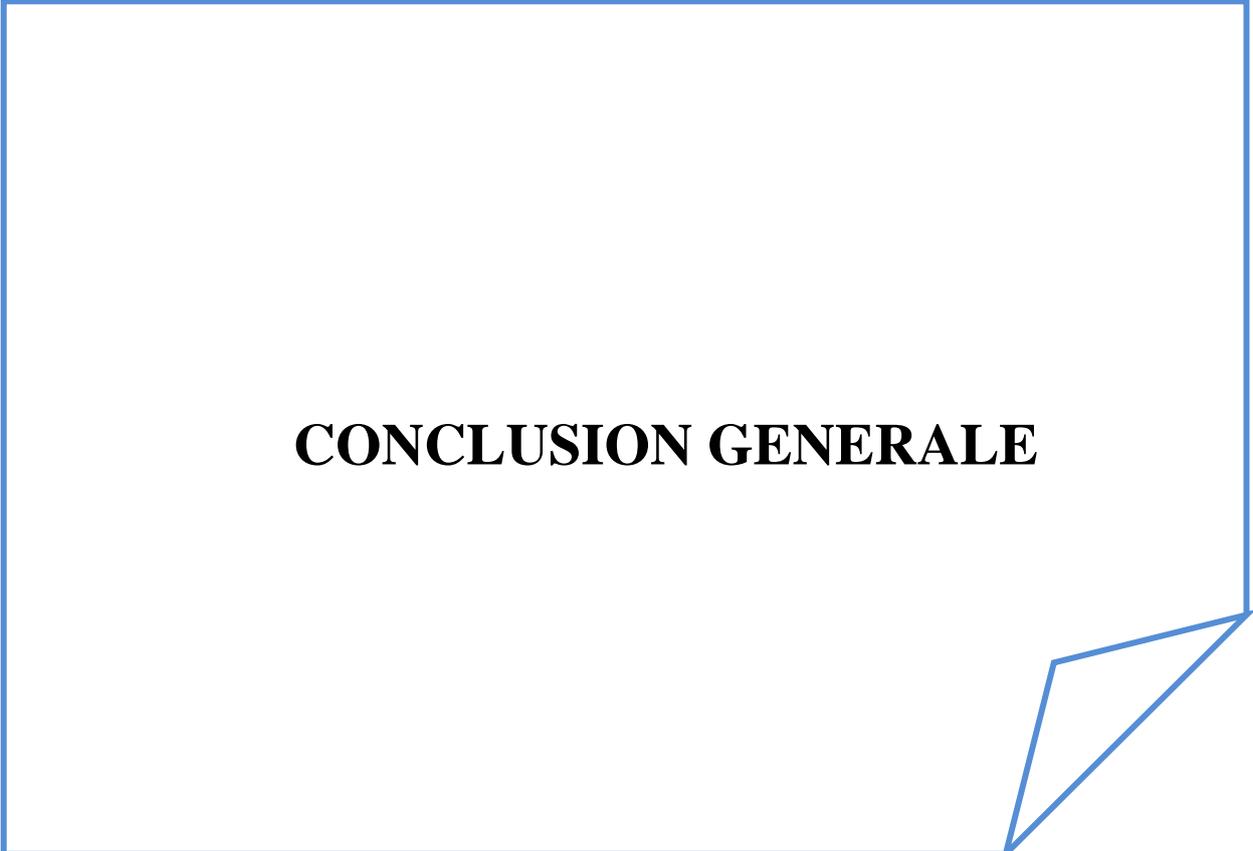
que nous avons fait, on a remarqué que dans la plupart des cas, notre véhicule est arrivé à éviter les obstacles et navigue d'une manière autonome. Cependant, dans quelques cas, il y'a de collision avec des obstacles à cause d'un problème bien connu dans la pratique, c'est le problème les points aveugles de capteur ultrason. Ces points aveugles peuvent entraîner des collisions si les obstacles ne sont pas détectés correctement.



Figure IV .22 : Test évitement d'obstacle

IV .6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté n réalisation d'un prototype de véhicule. Nous avons abordé trois aspects différentes du petit véhicule électrique : un aspect électronique (Arduino, capteurs, etc.), un aspect mécanique (moteurs, etc.) et enfin un aspect logiciel et programmation. Nous avons également exploré la programmation et le chargement du programme dans l'Arduino, ainsi nous avons fourni un système intelligent basé sur la logique floue pour le contrôle de la navigation autonome du véhicule et droite. De plus, nous avons également examiné les organigrammes de déplacement du robot afin de démontrer sa capacité à éviter les obstacles. Les résultats obtenus sont satisfaisants et montre que notre système de contrôle, dans la plupart des cas, est capable d'éviter d'obstacles et offre une protection contre les collisions. Le système proposé peut être amélioré, en prenant en compte les points aveugles des capteurs à ultrasons et incluant des approches adaptatives ou bien d'utiliser d'autres capteurs comme la caméra.



CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le système de contrôle des véhicules autonomes est un ensemble de technologies et de logiciels conçus pour permettre à un véhicule de fonctionner de manière autonome, sans intervention humaine directe. Le but de ce travail est de réaliser un système intelligent pour la navigation autonome des véhicules, en se focalisant particulièrement sur la poursuite de trajectoires et l'évitement d'obstacles.

La stratégie de commande proposée est basée sur la logique floue. En effet, deux contrôleurs flous sont travaillés ensemble afin de détecter les obstacles et prendre des mesures pour éviter les collisions en maintenant le véhicule sur la trajectoire souhaitée.

Ce travail s'articule principalement autour de deux aspects :

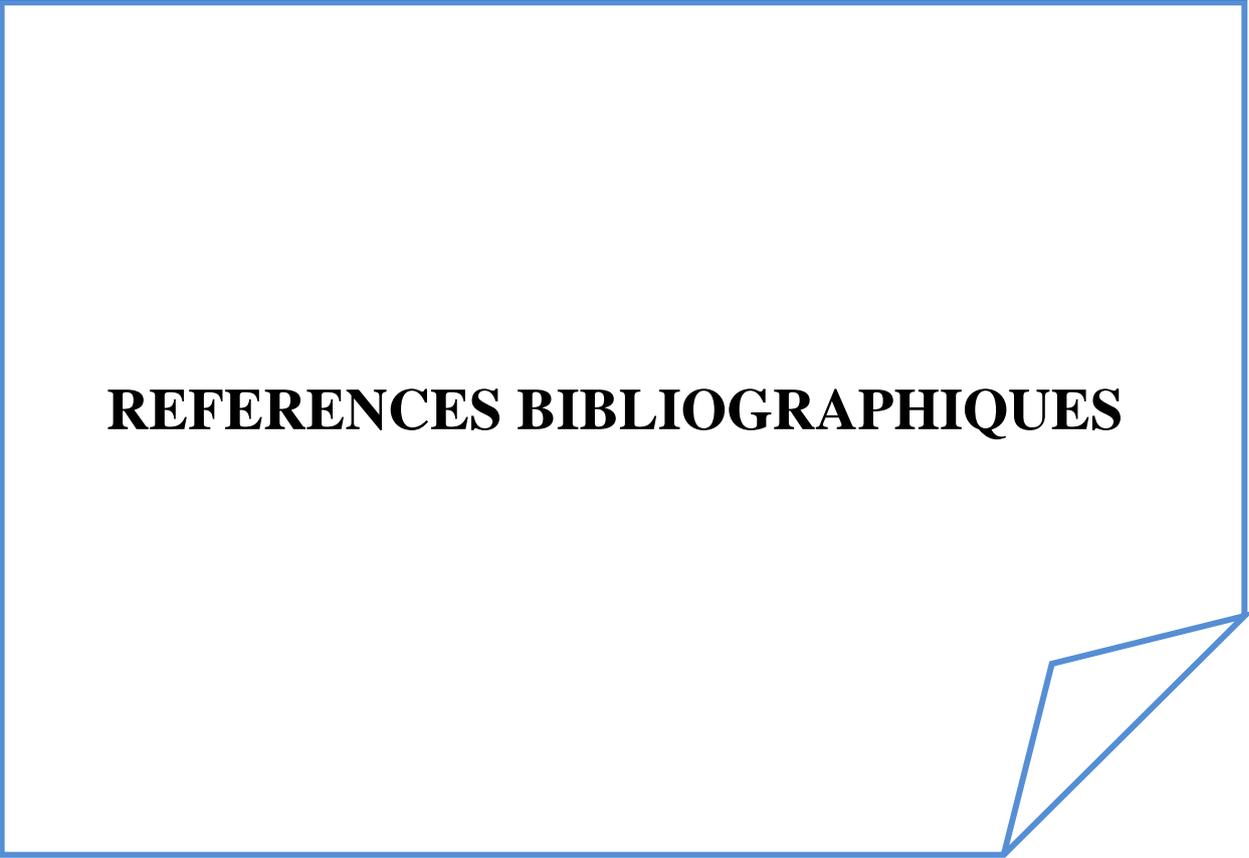
1. Aspect théorique. Synthèse d'une commande PDC robuste responsable de garantir que le véhicule suive la trajectoire désirée. Le développement de cette loi de commande repose sur la représentation floue de type T-S, la fonction de Lyapunov, l'outil LMI et l'approche H_∞ . Conception d'un contrôleur de type Sugeno chargé à éviter les obstacles.
2. Aspect pratique : la réalisation d'un prototype d'un véhicule électrique capable de détecter et éviter les obstacles en temps réel.

Les résultats obtenus dans ce mémoire, nous permet de conclure que :

- L'utilisation de la logique floue constitue une solution prometteuse pour la conception d'un processus de contrôle automatique en raison de sa capacité à traiter et à gérer des informations incertaines et intégrer l'expérience humaine.
- L'efficacité des modèles Takagi- Sugeno à concevoir une commande efficace assurent un suivi stable de trajectoire en maintenant une valeur désirée de vitesse.
- Le test en temps réel de notre réalisation montre la capacité du contrôleur flou à éviter les obstacles et navigue d'une manière autonome. Cependant, parfois les obstacles ne sont pas détectés correctement à cause du problème des points aveugles de capteur ultrason.

De nombreuses perspectives relatives au contrôle de la dynamique latérale d'un véhicule autonome basée sur l'approche floue sont envisagées. Nous pouvons citer à titre d'exemple :

- Le contrôle d'évitement d'obstacle proposé peut être amélioré, en prenant en compte les points aveugles des capteurs à ultrasons et incluant des approches adaptatives ou bien d'utiliser d'autre capteur comme la caméra.
- L'identification des paramètres réels du véhicule et la réalisation de lois de commande PDC pour la poursuite de trajectoires.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] Oudghiri. M, " Commande multi-modèles tolérante aux défauts : Application au contrôle de la dynamique d'un véhicule automobile " . Thèse de doctorat. Université de Picardie Jules Verne ,2008.
- [2] Khatir.T," Développement d'une commande hybride Appliquée à la stabilité latérale d'un véhicule électrique". Thèse de doctorat ,University of sciences and technology in Oran ,Oran,2015.
- [3] Berrezoug, L.,&Benyagoub, A.,"Conception et Réalisation d'un Prototype d'un Véhicule Autonome".thèse de doctorat ,2021.
- [4]<https://www.notretemps.com/vie-pratique/voiture/la-voiture-autonome-en-cinq-questions-17420>
- [5] J. Ziegler et al, Making Bertha Drive - "An autonomous journey on a historic route " In : IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine 6.2, p. 8-20,2014.
- [6] Bonnifait, P., & Zinoune. C, "Introduction aux techniques de navigation à L'assurance automobile d'un véhicule à conduite déléguée. Autonome pour les véhicules intelligents". Techniques de l'Ingénieur, (Réf : S7819 v1), 1-20,2021.
- [7] Thivillier, "M. L'assurance automobile d'un véhicule à conduite déléguée. Véhicule à conduite déléguée autonome pour les véhicules intelligents". Techniques de l'Ingénieur, (Réf : S7819 v1), 1-20.
- [8]<https://fr.statista.com/infographie/10937/le-top-10-des-fabricants-de-voitures-electriques/>
- [9] <https://automediaz.com/vehicule-electrique-principes-et-fonctionnement/>
- [10] Kerboua, A. Machines électrique a courant alternatif.
- [11] Mokhtari.B., DTC intelligente appliquée à la commande de la machine Appliquée à la commande de la machine asynchrone .thèse de doctorat, Université de Batna 2,2014.
- [12] <https://www.cnetfrance.fr/news/au-fait-comment-fonctionne-une-voiture-electrique->
- [13]<https://www.guillaumedarding.fr/technique-recharger-un-vehicule-electrique7754789.html>
- [14] <https://aspiration-ams.fr/content/61-moteur-aspirateur->
- [15] <https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/moteur-a-courant-continu>
- [16]<https://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1699-les-types-de-chassis-d-une-voiture.php>
-

- [17] Maakaroun, S., "Modélisation et simulation dynamique d'un véhicule urbain innovant en utilisant le formalisme de la robotique".Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Nantes,2011.
- [18] Crié. A, "Caractérisation et lois rhéologiques d'élastomères chargés à basse température pour la simulation du procédé d'extrusion" .Thèse de doctorat, Paris, ENMP,2014.
- [20] <https://www.bienpublic.com/magazine-automobile/2020/06/09/macpherson-1- homme-qui-a-revolutionne-la-suspension>
- [21] Sleiman.H, "Systèmes de suspension semi-active à base de fluide magnétorhéologique pour l'automobile". Thèse de doctorat, 2010.
- [22] Djedoui.N, "Modélisation et analyse du contrôle hybride (actif-passif) des vibrations des bâtiments sous sollicitations sismiques en champ proche". Thèse de doctorat, université Mohamed Khider Biskra,2018.
- [23] <https://aerodynamismeautomobile.webnode.fr/les-forces-s%27exer%C3%A7ant-sur-une-automobile/>
- [24] Wang, J., Wang, Q., & Jin, L, "Modeling and simulation studies on differential drive assisted steering for EV with four-wheel-independent-drive". In 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 1-7),2008.
- [25] Oke, P., & Nguang, S. K. , "Robust H_{∞} Takagi–Sugeno fuzzy output-feedback control for differential speed steering vehicles". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 234(12), 2822- 2835,2020.
- [26] Kennouche. A, "Commande non-PDC robuste pour le contrôle de la dynamique latérale d'un véhicule autonome". Mémoire de master. Université de Jijel,2020.
- [27] Saleh. L, " Contrôle latéral partagé d'un véhicule automobile" .Thèse de doctorat, 2012.
- [28] Chadli. M,"Stabilité et commande de systèmes décrit par des multimodèles". Doctorat en automatique, Institut Nationale polytechnique de lorraine,2002.
- [29] Hansruedi. B, " Réglage par logique floue" ,Vol. 204,1994.
- [30] Zadeh. L. A,"A fuzzy-algorithmic approach to the definition of complex or imprecise concepts". International Journal of Man-machine studies, 8(3), 249-291,1976.
- [31] Akka. K,"Contribution à l'optimisation de trajectoires des robots mobiles". Thèse de doctorat,2019.
- [32] Labiod. S,"Contribution à la commande adaptative floue des systèmes non linéaires"Thèse de doctorat,2005.
-

- [33] Benbouali. A, "Commande Par Logique Floue Adaptative D'une Machine Asynchrone Avec Estimation De La Constante De Temps Rotorique". Thèse de doctorat, Université Belmadani Bachir,2008.
- [34] Bouraiou. A, "Diagnostic de défauts par logique floue".Thèse de doctorat, Annaba,2010.
- [35] Redjem.W," Commande adaptative floue à base d'observateur des systèmes non linéaires incertains avec une direction de commande connue ou inconnue" .Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila,2012.
- [36] Ichalal. D,"Estimation et diagnostic de systèmes non linéaires décrits par un modèle de Takagi-Sugeno".Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL,2009.
- [37] Tahar. B,"Contribution à la synthèse de lois de commande pour les descripteurs de type Takagi-Sugeno incertains et perturbés". Thèse de doctorat, Université de Reims-Champagne Ardenne,2009.
- [38] Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., & Balakrishnan, V. "Linear matrix inequalities in system and control theory". Society for industrial and applied mathematics,1994.
- [39] Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., & Balakrishnan, V. "Linear matrix inequalities in system and control theory". Society for industrial and applied mathematics,1994.
- [40] Lin, C. M., & Mon, Y. J. "A fuzzy-PDC-based control for robotic systems. Information Sciences", 137(1-4), 135-155,2001.
- [41] Belhamra . R, "Commande floue par Inégalités Matricielles Linéaires (LMIs) à base de modèle de Takagi-Sugeno". Mémoire master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [42] Kennouche. A,"Commande non-PDC robuste pour le contrôle de la dynamique latérale d'un véhicule autonome ",Université de Jijel,2020.
- [43] Rafanotsimiva, L. F., Besançon, G., Georges, D., Sambatra, E. J. R., & Razafimanina, J. M."Modélisation multimodèle et commande par Compensation Parallèle Distribuée d'un système SMIB". Mada-ENELSA, 1, 18-26,2013.
- [44] Hamoudi , A., & BERKANI. K, "Thème Conception et réalisation d'un robot mobile autonome". Mémoire de fin d'études de master, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Tizi-Ouzou,2016.
- [45]Lamara.N, "Réalisation d'une commande d'un robot". Mémoire de fin d'étude de master, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.
-

- [46] Nafa. N, " Conception et réalisation d'un système de sécurité commandé à distance". Université de Boumerdes. Boumerdes,2016.
- [47] Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE). Enjeux et défis de l'industrie de la robotique en Île-de-France, 2010.
- [48] Frederic. G,"Petits robots mobiles". Paris,2006.
- [49] Baddou. M, "Robot superviseur". Projet fin d'étude, Université Mohamed V de RABAT,2016.
- [50] le site officiel d'Arduino. (Récupéré sur <https://arduino.cc/Arduino IDE>).
- [51] Lekbir.Z et Boudjir.H, "commande H_∞ de systèmes décrits par multimodèles avec contraintes sur l'entrée : application sur la suspension automobile", PFE-université de Jijel, Jijel, 2010.
- [52] Gasso. K," Identification des systèmes dynamiques non-linéaires: approche multimodèle ".Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine,2000.
- [53] Akhenak.A,"Conception d'observateurs non linéaires par approche multimodèle: application au diagnostic". Thèse de doctorat,2004.
- [54] KESSARI. A, DJAFER., KH., I, "Etude et réalisation d'un robot mobile à trajectoire programmée avec éviteur d'obstacles" .mémoire de master, Université Akli Mohand Oulhadje-Bouira,2018.
- [55] Dejan. <https://howtomechatronics.com/>
-

ANNEXE

A.1) Méthodes d'inférence

A.1.1) Méthode d'inférence max-min

La méthode d'inférence max-min, également connue sous le nom d'"implication de Mamdani", est une approche utilisée dans les systèmes à logique floue pour caractériser l'ensemble de sortie en utilisant une fonction d'appartenance égale au maximum des fonctions d'appartenance des sous-ensembles flous. Cette méthode tire son nom de la manière dont les opérateurs "ALORS" et "OU" de l'inférence sont réalisés. L'opérateur "ET" de chaque règle, ainsi que la conclusion "ALORS" de chaque règle, sont réalisés à l'aide de la fonction "min". En revanche, la liaison entre toutes les règles (opérateur OÙ) est réalisée à l'aide de la fonction "max"[34].

A.1.2) Méthode d'inférence max-prod

La méthode d'inférence max-prod réalise généralement, au niveau de la condition, l'opérateur OU en utilisant la fonction maximum et l'opérateur ET en utilisant la fonction minimum. Cependant, la conclusion de chaque règle, introduite par ALORS, qui relie le degré d'appartenance de la condition à la fonction d'appartenance de la variable de sortie par l'opérateur ET, est réalisée cette fois-ci en utilisant la formation du produit. L'opérateur OU, qui lie les différentes règles, est à nouveau réalisé en utilisant la formation du maximum.

Ainsi, dans la méthode d'inférence max-prod, l'opérateur OU est réalisé par la fonction maximum et l'opérateur ALORS est réalisé par la formation du produit. C'est pourquoi cette méthode d'inférence est appelée max-prod [34].

A.2) Ensemble convexe et Inégalités Linéaires Matricielles (LMIs)

A.2.1) Ensemble convexe

❖ Définition

Quand est D ensemble vérifié que [51] :

$$\forall \lambda \in [0,1], (x_1, x_2) \in D^2 \Rightarrow \lambda x_1 + (1-\lambda)x_2 \in D$$

Alors on dit que l'ensembles représente un ensemble convexe

❖ Fonction convexe

f fonction et D ensemble convexe tels que $f : D \in \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ on dit que f représente une fonction convexe si :

$$\forall \lambda \in [0,1] \in \mathbb{R}, \forall (x_1, x_2) \in D^2, f(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \leq \lambda f(x_1) + (1-\lambda)f(x_2)$$

Pour la convexité stricte l'équation doivent comme suite :

$$\forall \lambda \in [0,1] \in \mathbb{R}, \forall (x_1, x_2) \in D^2, f(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) < \lambda f(x_1) + (1-\lambda)f(x_2)$$

A.2.2) Inégalités Linéaires Matricielles (LMIs)

❖ Définition d'une LMI

La Une Inégalité Matricielle Linéaire représente une contrainte donnée sur la forme suivante [51] :

$$F(x) = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i x_i < 0$$

Avec x est une variable et A_0, A_1, \dots, A_n sont matrices symétriques Vérifiez que $F(x)$ est semi défini négative.

Les LMI non strict donné sous la forme suivante : $F(x)$ en d'autres termes $F(x)$ est semi définie négative.

L'ensemble défini par $C = \{x \in \mathbb{R}^n / A(x) < 0\}$ est convexe. Par conséquent, une contrainte LMI est une contrainte convexe.

On peut regrouper un ensemble des LMIs dans un seul LMI dans forme d'une matrice diagonale

❖ Obtention des LMI

Approche par identification

La première approche basée sur des techniques d'identification. L'architecture et les fonctions d'activation sont d'abord sélectionnées a priori. A partir de ensembles de données d'entrées-sorties collectées à partir de mesures sur un système réel, techniques d'identification sont alors mises en œuvre [52].

Approche par linéarisation

La deuxième approche est basée sur la linéarisation du modèle non linéaire autour de points de fonctionnement différents. Ainsi, des sous-modèles linéaires pour chaque région de fonctionnement sont obtenus. Les fonctions d'activation peuvent être générées en utilisant des techniques d'optimisation pour minimiser l'erreur de sortie au carré [53].

❖ Quelques problèmes pour Obtention des LMIs

Il existe plusieurs problèmes pour obtenir un LMI Mais le plus important sont [28] :

La faisabilité :

C'est trouver une solution tels que $A(x) < 0$

La minimisation d'une fonction linéaire :

le problème est de minimiser le terme en cherchant sur sous la contrainte $A(x) < 0$.

Le problème de valeur propre généralisée :

Dans ses contraintes $\begin{cases} A(x) < \lambda B(x) \\ B(x) > 0 \\ C(x) < 0 \end{cases}$;il faut minimiser le terme .

Dans notre travail nous allons faire face au troisième problème et Il sera résolu en utilisant de Matlab LMI Control Toolbox. Un formalisme important c'est le complément de Schur ou lemme de Schur. Ce dernier est utilisé pour passer de la forme d'inégalité matricielle à une inégalité LMI en transformant une inégalité non linéaire en une inégalité linéaire en une matrice spécifique.

A.3) méthode de défuzzification

Il existe plusieurs stratégies de défuzzification, les plus courantes sont [35] :

A.3.1) Défuzzification par calcul du centre de gravité :

La méthode de calcul du centre de gravité est la plus répandue. Cette méthode consiste à

calculer le centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante $X = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(X) x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i(X)}$

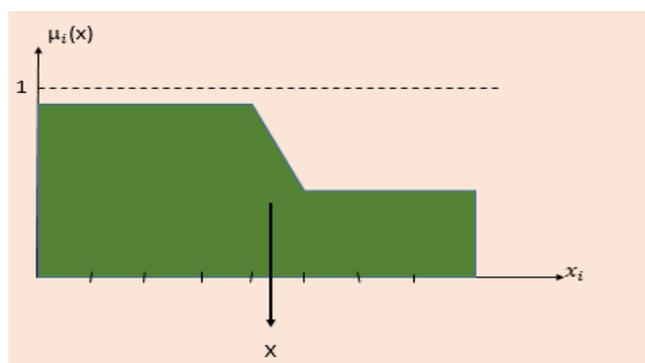


Figure 1 : Défuzzification par centre de gravité

A.3.2) Défuzzification par les hauteurs pondérées

Elle est très similaire à la méthode du centre de gravité mais elle est utilisée lorsque les

fonctions d'appartenance des sorties se forme des singletons.
$$X = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{s_i}(X) x_{s_i}}{\sum_{i=1}^n \mu_{s_i}(X)}$$

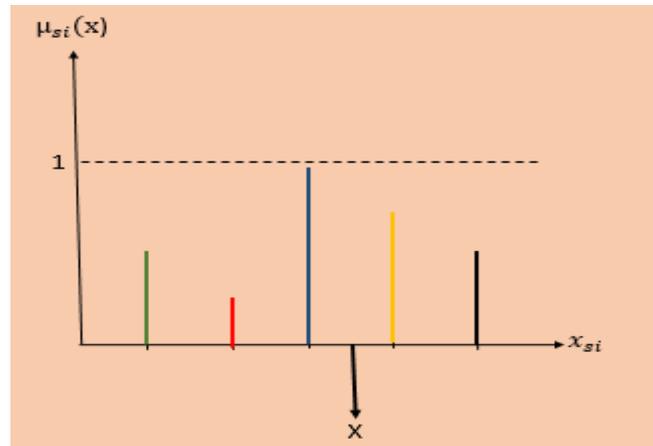


Figure 2 : Défuzzification par les hauteurs pondérées

A.3.3) Défuzzification par la valeur maximale

Cette méthode n'est utilisée que dans un cas lorsque la fonction d'appartenance de variable de sortie a un seul maximum.

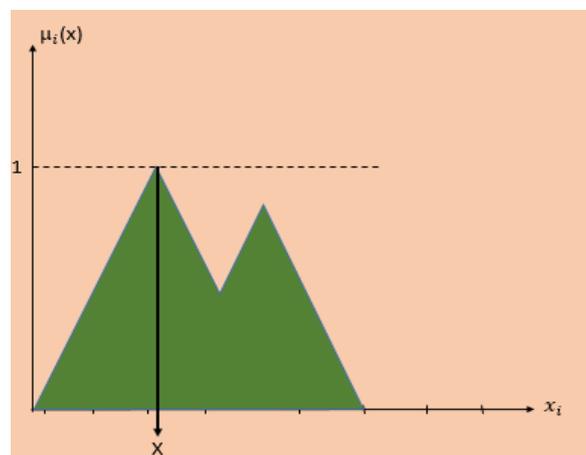


Figure 3: Défuzzification par la valeur maximale

A.4) Principe de fonctionnement du pont en H

Les interrupteurs fonctionnent deux par deux. Le A est associé au D, et le B est associé au C.

Dans le cas où tous les interrupteurs sont ouverts (ils ne laissent pas passer le courant), le moteur est arrêté.

Voyons maintenant ce qui se passe lorsque nous actionnons simultanément les interrupteurs A et D (schéma de gauche), ou les interrupteurs B et C (schéma de droite) selon la figure 4.

Sur le schéma de gauche, les interrupteurs A et D sont fermés, ce qui permet au courant d'entrer par la patte gauche du moteur et de sortir par sa droite. Par conséquent, le moteur tourne dans un sens.

Sur le schéma de droite, les interrupteurs B et C sont fermés, ce qui permet au courant d'entrer par la patte droite du moteur et de sortir par sa gauche. Cela fait tourner le moteur dans le sens inverse [54].

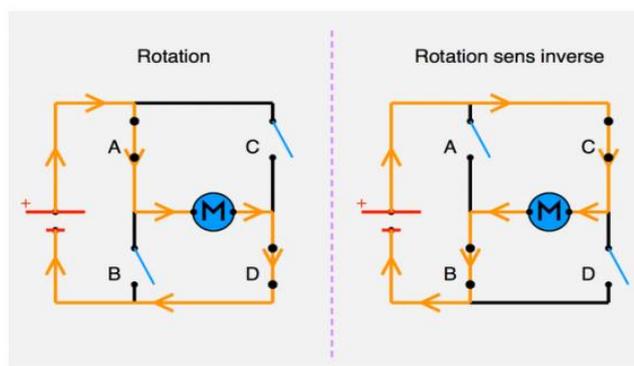


Figure 4 : fonctionnement du pont en H

A.5) PWM :

Cette technologie nous permet de contrôler la vitesse des moteurs de robots en ajustant la tension électrique du moteur grâce à la modulation de largeur d'impulsion (PWM, Pulse Width Modulation). Le PWM est une technologie qui permet de régler la valeur moyenne de tension appliquée au moteur (ou à tout autre appareil électronique) en alternant l'alimentation électrique de manière rapide et périodique T . La tension moyenne dépend du rapport cyclique (Duty cycle) ou de la durée pendant laquelle le signal est actif (T_{on}) par rapport à la durée de repos (T_{off}) du signal au cours d'une même période T [55].

$$v = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} V_{\max} ; \quad V_{\max} = \frac{T_{on}}{T} v_{\max}$$

Abstract

The work proposed in this thesis aims to solve the path-following problem for electric vehicles with **Four Independent Drive Wheels (FWIDEV)** in the presence of obstacles. Based on T-S (**Takagi-Sugeno**) fuzzy representation, a robust control of the vehicle's lateral and longitudinal dynamics is designed. First, the nonlinear model for FWIDEV is established. Secondly, to ensure a good trajectory tracking, we developed **PDC (Parallel Distributed Compensation)** controller. Then, The H_{∞} stabilization conditions of the augmented closed-loop system are given in terms of linear matrix inequalities (LMIs). To avoid the obstacles, the Sugeno fuzzy controller is used a prototype of the vehicle is investigated. Finally, a fuzzy obstacle avoidance control for a vehicle prototype is implemented using an Arduino board.

Résumé

Les travaux proposés dans le cadre de ce mémoire visent à résoudre le problème du suivi des trajets pour les véhicules électriques à **FWIDEV (Four Independent Drive Wheels)** en présence d'obstacles. En se basant sur la représentation floue de T-S (**Takagi-Sugeno**), Une commande robuste des dynamiques latérales et longitudinales du véhicule est conçue. Tout d'abord, nous avons établi les équations non linéaires pour la FWIDEV. Deuxièmement, pour assurer un bon suivi de la trajectoire, nous avons développé une commande **PDC (Parallel Distributed Compensation)**. Puis, les conditions de stabilisation H_{∞} sont données en termes **LMIs (linear matrix inequalities)**. Une commande floue pour l'évitement d'obstacle est réalisée.

ملخص

تهدف الاعمال المقترحة في اطار هذا البحث الى حل مشكلة تتبع المسارات لسيارات الكهربية لرباعية الدفع في حالة غياب ووجود عقبات. يقوم هذا الامر عن طريق تحقيق تحكم قوي في الديناميكيات الجانبية والطولية للمركبة على اساس نهج متعدد النماذج. اولاً قمنا بوضع المعادلات الغير خطية للمركبة، ثانياً ومن اجل التتبع الجيد للمسار قمنا بوضع نموذج اخر يحاكي النموذج الاول من نوع تاكاجي سوجنو الذي يمكننا من تجميع اوامر **PDC**, ثالثاً ومن اجل الحد من التأثيرات الخارجية على المركبة طبقنا اداة H_{∞} التي يتم حلها في شكل مساواة مصفوفات خطية **LMIs**.

نظراً لان ديناميكيات المركبة تتمتع بدرجة عالية من اللاخطية ومن اجل حل مشكلة تفادي العقبات استخدمنا متحكماً من نوع **T-S**. في الاخير تم بناء نموذج اولي للمركبة يتم التحكم فيه بواسطة لوحة ارد وينو. تم تزويدها بمستشعر فوق صوتي لقياس المسافة بين المركبة والحاجز.
