

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierat  
Département : Electronique  
Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Automatique  
Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Commande sans modèle : approche algébrique

Présenté par : *KHALFA Riheb Ayet Errahmene*

Encadrant : *BEKAIK Mounir*

MCB

UBM Annaba

Jury de Soutenance :

AIT IZEM Tarek	MCB	UBM Annaba	Président
BEKAIK Mounir	MCB	UBM Annaba	Encadrant
GUERSI Noureddine	PR	UBM Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

# REMERCIEMENT

*On tient d'abord à remercier dieu tout puissant, qui m'a éclairé le chemin et qui m'a permis de réaliser ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à Monsieur BEKAÏK Mounir, pour m'avoir accueillie au sein de son équipe et pour avoir dirigé ce projet.*

*J'ai tout particulièrement apprécié ses encouragements et ses conseils, son soutien moral et la confiance qu'il m'a toujours témoignée. Notre collaboration m'a permis de progresser.*

*En outre, il m'a permis de comprendre de ne jamais abandonner en recherche malgré les nombreux obstacles....*

*Je suis honorée par la présence de Monsieur Tarek Ait Izem et Monsieur Noureddine Guersi, les membres du jury qui ont fait l'honneur d'évaluer ce travail.*

*Je remercie également, de la manière la plus vive, mes parents Qu'ils méritent un remerciement tout spécial pour leur soutien total dans toutes les cotes de la vie.*

*Je présente mes sincères remerciements à mes amis Lamine, Zaki, Mehdi, Samar, Yousra, Fadwa et Chaima qui m'ont tant aidé durant ces derniers mois.*

*Je remercie ma famille, mes collègues, et mes amis spécialement : Housseem, Aimen, Alaa, Abdou,*

*Doudou, Belkís, Chaïma, Manar, Khouloud et Oumáïma.*

*Je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce projet.*

# *DEDICASSE*

*Ce travail est un hommage à mes grands-parents et ma tante, que dieu les reçois dans son vaste paradis.*

*Je dédie cet humble travail*

*A ceux qui me sont plus précieux que la vie :*

*Ma mère et mon père*

*A qui je souhaite une longue vie*

*A mes chères frères : Badi, Simou et Aïmen,*

*A mes sœurs : Wissem, Nour*

*A toute la famille sans être exhaustive chacun a son nom*

*A toute les Enseignants et les collaborateurs du département d'électronique option automatique et informatique industrielle*

*A ceux qui j'aime, mes amis*

*A tous mes camarades*

*Mes collègues de l'informatique industrielle chacun à son nom et surtout notre promotion 2<sup>e</sup> année Master informatique industrielle (2020)*

*La promo de COVID-19*

*« Malgré tout en a réussi »*

## الملخص:

إن الإحصائيات المسجلة لحوادث المرور في هذه السنوات الأخيرة تعد أرقاماً مخيفة، وهذا ما يدعونا إلى تطوير أجهزة التحكم الطولي للمركبة.

لتفادي هذه الحوادث المؤدية غالباً إلى الوفاة، تم تصميم أنظمة ذكية للحفاظ على مسافة الأمان بين المركبات في القافلة. في هذا العمل نحن مهتمون بتركيب نظام للتحكم في المسافة البينية للحفاظ على مسافة الأمان بين السيارة المرجعية والسيارة التابعة لها، وذلك من خلال أساليب وخوارزميات ذكية. هناك تقنيات عديدة ونذكر منها في هذا المشروع:

- وحدة تحكم PID بناءً على نموذج فيزيائي "نابض-مثبط" (بنظام السيد والعبد).

- وحدة تحكم PID ضبابي.

- وحدة تحكم PI ذكية.

### الكلمات المفتاحية:

أنظمة ذكية، مسافة امان، تحكم في المسافة البينية، قافلة من المركبات، وحدة تحكم، وحدة تحكم ضبابي، وحدة تحكم ذكي.

## Résumé :

Les statistiques des accidents routiers souvent mortels enregistrées dans les dernières années sont effrayantes, alors pour la sécurité routière, des systèmes intelligents ont été conçus afin de garder une vitesse constante et une distance de sécurité entre les véhicules dans un convoi.

L'objectif principale de ce travail est de concevoir une stratégie de commande bien adaptée pour contrôler l'inter-distance entre le véhicule maître et le véhicule esclave en utilisant des méthodes et des algorithmes intelligents. Il existe plusieurs techniques pour commander un véhicule, parmi ces techniques appliquées dans ce projet :

- Un contrôleur PID basé sur un modèle physique « ressort-amortisseur ».
- Un contrôleur PID flou.
- Un contrôleur PI intelligent.

La stratégie et la commande développées sont validées en simulation en utilisant Matlab-Simulink.

**Mots clé :** Systèmes intelligent, Distance de sécurité, Control d'inter-distance, Convoi de véhicule, Contrôleur PID, Contrôleur PID Flou, Contrôleur iPI.

## Abstract:

The statistics of often fatal road accidents recorded in recent years are frightening, so for road safety, smart systems have been designed to keep a constant speed and a safe distance between vehicles in a convoy.

The main objective of this work is to design a well-adapted control strategy to control the distance between the master vehicle and the slave vehicle using intelligent methods and

algorithms. There are several techniques for controlling a vehicle, among these techniques applied in this project:

- A PID controller based on a physical model "damping-spring".
- A fuzzy PID controller. - An intelligent PI controller.

The proposed control algorithms provided robust and stable tracking in the inter-distance control system.

**Key Words:**

Intelligent systems, safety distance, inter-distance control, convoy of vehicles, A PID controller, A fuzzy PID controller, An intelligent PI controller.

# Table des matières

<b>Table des matières</b> .....	<b>i</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>iii</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>v</b>
<b>Symboles</b> .....	<b>vi</b>
<b>Introduction Générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 Positionnement du problème</b> .....	<b>4</b>
1.1 Les systèmes intelligents d'aide à la conduite .....	5
1.2 Le système mécanique .....	6
1.3 .Modèle du système .....	6
1.3.1. Caractéristique du système .....	6
1.4 Schéma du modèle mécanique .....	7
1.4.1. Description des paramètres.....	8
1.5 Modèle dynamique .....	10
1.6 Conclusion .....	12
<b>Chapitre 2 Stratégie de commande</b> .....	<b>13</b>
2.1 La commande d'un véhicule .....	14
2.2 Les forces de résistance à l'avancement du véhicule .....	14
2.3 Modélisation de la structure de commande .....	15
2.3.1 Contrôleur de vitesse .....	15
2.3.2 Contrôleur de l'inter distance .....	15
2.3.3 Modèle de distance de sécurité .....	17
2.4 Système de contrôle de l'inter distance: Stratégie de commande.....	17
2.4.1 Contrôleur PID .....	17
2.4.2 Ajustage des paramètres d'un régulateur PID .....	19
2.4.3 Structure de commande d'inter distance pour un convoi.....	21
2.5 Conclusion .....	24
<b>Chapitre 3 Commande d'inter-distance par la logique floue</b> .....	<b>25</b>
3.1 . Les bases théoriques de la logique floue .....	26
3.2 . Structure d'un système flou .....	26
3.2.1 Interface de fuzzification .....	28
3.2.2 Base de connaissances (Base de règles).....	28

3.2.3	Inférence floue .....	29
3.2.4	Interface de défuzzification.....	30
3.3	Propriétés d'un réglage par logique floue.....	31
3.4	Pourquoi la logique floue dans la commande d'inter-distance .....	32
3.5	Contrôle d'inter-distance entre deux véhicules .....	32
3.5.1	Commande d'inter-distance par un PID flou .....	32
3.5.2	Application.....	33
a.	Définition .....	33
b.	Structuration .....	33
c.	Base de règles et fonction d'appartenance .....	34
d.	Evaluation.....	35
e.	Défuzzification .....	39
3.5.3	Résultat et discussion de la simulation .....	40
3.6	Etude comparative des deux méthodes .....	41
3.7	Conclusion .....	43
<b>Chapitre 4</b>	<b>Réalisation du contrôleur intelligent i-PI .....</b>	<b>44</b>
4.1	Etude théorique de la commande sans modèle .....	45
A.	Le modèle ultra-local .....	45
B.	Correcteurs PI intelligents.....	46
4.2	Mise en œuvre de la commande sans modèle .....	46
A.	Estimation de F .....	46
B.	Trajectoire de référence .....	47
4.2.1	Pourquoi l'ordre 1 suffit-il ? .....	47
4.2.2	Efficacité des PI classiques.....	47
4.3	Expression du filtre algébrique .....	48
4.3.1	Calcul des paramètres .....	48
4.3.2	La méthode de trapèze .....	50
4.3.3	Calcul de la fonction du filtre algébrique 1.....	50
4.4	Simulation.....	52
4.4.1	Etude synthétisée des contrôleurs i-PI .....	53
4.4.2	Résultat .....	56
4.5	Conclusion .....	61
<b>Conclusion Générale</b> .....		<b>60</b>
<b>Bibliographie</b> .....		<b>62</b>



## Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma mécanique d'une voiture. ....	6
Figure 1.2 : Modélisation du système .....	6
Figure 1.3 : Modèle dynamique de la Roue .....	7
Figure 1.4 : Degrés de liberté des mouvements du modèle .....	8
Figure 1.5 : Les forces exercées sur le véhicule .....	9
Figure 1.6 : Mouvement de véhicule dans le système d'axes .....	10
Figure 1.7 : Forces au niveau des roues du véhicule, dans le plan(x,y) .....	11
Figure 2.1 : Les forces de résistance à l'avancement de véhicule .....	14
Figure 2.2 : Modèle ressort amortisseur virtuels .....	16
Figure 2.3: Distance de sécurité entre deux véhicules .....	17
Figure 2.4 : Bloc basic d'un contrôleur PID .....	19
Figure 2.5 : Structure d'asservissement d'inter distance entre deux véhicules .....	21
Figure 2.6 : Réponse temporelle d'inter distance entre deux véhicules .....	23
Figure 2.7 : Réponse temporelle de vitesse du véhicule esclave.....	23
Figure 3.1 : Configuration de base de la commande par logique floue.....	27
Figure 3.2 : Exemple d'interférence Max-Min (Mamdani) .....	30
Figure 3.3 : Modèle de control d'inter distance avec la logique floue .....	33
Figure 3.4 : Editeur FIS du contrôleur de distance .....	34
Figure 3.5 : Editeur FIS du contrôleur de vitesse .....	34
Figure 3.6 : Définition des fonctions d'appartenances d'entrées .....	35
Figure 3.7 : Définition des fonctions d'appartenances de sorties .....	35
Figure 3.8 : Les règles de base .....	36
Figure 3.9 : Evaluation graphique de la méthode Mamdani .....	39
Figure 3.10 : Résultat final à défuzzifier .....	39
Figure 3.11 : Réponse temporelle des contrôleurs PID flou de la distance .....	40
Figure 3.12 : Réponse temporelle des contrôleurs PID flou de la vitesse.....	41
Figure 3.13 : Comparaison des contrôleurs PID flou et classique de vitesse et de distance....	42
Figure 3.14 : Réponse temporelle du contrôleur PID flou et classique de distance.....	42
Figure 3.15 : Réponse temporelle du contrôleur PID flou et classique de vitesse.....	43

Figure 4.1 : Modèle Simulink de la synthèse des contrôleurs de distance.....	53
Figure 4.2 : Modèle Simulink de la synthèse des contrôleurs de vitesse .....	53
Figure 4.3 : Modèle Simulink d'un iPI contrôleur de vitesse .....	54
Figure 4.4 : Modèle Simulink d'un iPI contrôleur de distance .....	54
Figure 4.5 : Réponse temporelle des contrôleurs i-PI de distance .....	55
Figure 4.6 : Réponse temporelle des contrôleurs i-PI de vitesse .....	55
Figure 4.7 : Comparaison des contrôleurs iPI, PID flou et classique de vitesse .....	59
Figure 4.8 : Comparaison des contrôleurs iPI, PID flou et classique de distance .....	59
Figure 4.9: Réponse temporelle des régulateurs de vitesse .....	60
Figure 4.10 : Réponse temporelle des régulateurs de distance .....	60

## Liste des Tableaux

Tableau 1 : Définition des grandeurs physiques .....	12
Tableau 2 : Définition des grandeurs du modèle ressorts amortisseurs virtuels .....	16
Tableau 3 : Paramètres PID obtenus à partir d'une réponse indicielle ZN .....	19
Tableau 4 : Paramètre PID obtenus à partir du point critique ZN .....	19
Tableau 5 : Tableau de Broïda .....	20
Tableau 6 : Table de règles d'interférences .....	34
Tableau 7 : Règles d'interférences appliqué dans l'exemple .....	38

# Symboles

$\omega_i$  : La vitesse angulaire de la roue.

$r_i$  : Le rayon effectif de la roue.

$V_{x_i}$  : La vitesse linéaire du centre de la roue.

X : Le déplacement longitudinal du centre de gravité (CG) du véhicule.

Y : Le déplacement latéral du centre de gravité (CG) du véhicule.

Z : Le déplacement vertical du centre de gravité (CG) du véhicule.

$\Psi$  : Rotation de cap (lacet).

$\Phi$  : Rotation de roulis.

$\Theta$  : Rotation de tangage.

$\rho$  : Masse volumique de l'air en kg/m<sup>3</sup>.

V : Vitesse du véhicule par rapport à l'air en m/s

S : Surface de référence en m<sup>2</sup>

$C_y$  : Coefficient de portance.

$C_x$  : Coefficient de trainée

m : La masse de l'objet en kg

g : Attraction de la Terre en N/kg

L<sub>f</sub> : La longueur entre le train avant et le centre de gravité

F<sub>yf</sub> : La force latérale de contacts pneumatique-chaussée appliquées à la roue avant

F<sub>yr</sub> : La force latérale de contacts pneumatique-chaussée appliquées à la roue arrière

F<sub>xf</sub> : La force longitudinale de contacts pneumatique-chaussée appliquées à la roue avant

F<sub>xr</sub> : La force longitudinale de contacts pneumatique-chaussée appliquées à la roue arrière

V<sub>x</sub> : Vitesse longitudinale

V<sub>y</sub> : Vitesse latérale

r : La vitesse de lacet

$\delta$  : Angle de braquage.

L : La longueur entre les deux trains avant et arrière

L<sub>r</sub> : La longueur entre le train arrière et le centre de gravité

R<sub>w</sub> : Le rayon de la roue

$F_x$  : La force longitudinale

$F_y$  : La force latérale

$\lambda$  : Le coefficient de glissement longitudinal

$M_v$  : La masse du véhicule

$d_s$  : la distance de sécurité

$L_f$  : la longueur du véhicule Suiveur.

$V_f$  : la vitesse du véhicule suiveur

$\alpha, \beta_2, \beta_1, \beta_0$  : Constantes de temps

$V_l$  : Les vitesses du véhicule suivi

$V_f$  : Les vitesses du véhicule suiveur.

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  : sont les constantes de conception.

$F_{ressort}$  : La Force du ressort

$F_{amort}$  : La Force d'amortisseur

$F_{frott}$  : La Force de frottement avec la chaussée

$K$  : Raideur de ressort

$C$  : Coefficient d'amortisseur

$D_0$  : Longueur à vide

$V_{(i-1)}$  : La vitesse du véhicule avant

$V_i$  : La vitesse du véhicule arrière.

$F_{frot}$  : La force de frottement

$D$  : La distance de sécurité

$X_{i-1}$  : La position du véhicule avant

$X_i$  : La position du véhicule arrière.

$F_{(i-1)}$  : La force avant du ressort amortisseur appliquée sur le véhicule

$F_i$  : La force arrière du ressort amortisseur appliquée sur le véhicule.

$D_{initial}$  : La distance initiale entre les véhicules

$K_p$  : Coefficient proportionnel

$K_i$  : Coefficient intégral

$K_d$  : Coefficient dérivé

$\mu_i(x)$  : Fonction d'appartenance

$x_i$  : Les abscisses

$l$  : Le nombre de valeurs quantifiées

$r$  : Valeurs pour lesquelles l'appartenance est maximale.

$u$  : Variable désigne la commande

$y$  : Variable désigne la sortie.

$a$  : Coefficient estimé à chaque pas d'échantillonnage en fonction des entrées et des sorties du système

$b$  : Coefficient du processus

$T_e$  : Temps d'échantillonnage



# **Introduction générale**

## Introduction générale

A l'heure actuelle, l'automobile constitue le moyen de transport le plus convoité, il offre plusieurs avantages : facilité de déplacements, le confort, disponibilité, temps de parcours, etc. Ce constat est justifié par le nombre de véhicules circulant quotidiennement et impliquant un trafic de plus en plus croissant. Néanmoins, ce phénomène conduit à des problèmes de congestion, des accidents et par conséquent un grand nombre de victimes. Afin de contrôler les aspects négatifs de l'utilisation de l'automobile plusieurs solutions pourraient être envisagées. A première vue, la construction de nouvelles routes pourrait résoudre le problème de congestion mais cette solution n'est plus envisageable en environnement périurbain. Une solution envisageable qui permettrait à la fois des gains en sécurité, en capacité et en confort serait : l'automatisation de la conduite à relativement basse vitesse. Ce mémoire s'inscrit dans ce cadre et y contribue au niveau d'application des nouvelles lois de commande d'un véhicule en mode de suivi. Pour cela, nous avons traité plusieurs points :

- ✓ La modélisation de la dynamique longitudinale d'un véhicule.
- ✓ La cinématique et la dynamique du positionnement relatif d'un véhicule.
- ✓ Des lois de commande non linéaires pour le suivi de véhicule sous des contraintes de confort des passagers.

Les aides sont développées sur trois niveaux :

Sécurité passive : systèmes d'aide cherchant à réduire les conséquences de l'accident sans action préventive pour l'éviter. L'airbag est un exemple d'un tel système.

Sécurité active : systèmes d'aide modifiant le comportement du véhicule en situation critique tels DYC, AFS, l'ABS et l'ESP, ASR ; ces systèmes n'ont pas d'action d'anticipation.

Sécurité préventive : systèmes d'aide anticipant les situations dangereuses et cherchant à effectuer une action préventive. En ce qui concerne les travaux sur l'assistance au contrôle latéral, les exemples se portent sur deux types de systèmes : l'assistance à l'évitement de sorties de voies LDA (Lane Departure Avoidance), et l'assistance au contrôle latéral pour le maintien dans la voie LKS (Lane Keeping Support).

## Objectif

L'objectif principal de ce travail est le développement et l'implantation d'une assistance préventive pour garder une distance de sécurité entre le véhicule référence (véhicule suiveur) et le véhicule qui le précède, en se basant sur un modèle physique virtuelle (amortisseur) et utiliser une technique de commande intelligente pour rendre le système de contrôle intelligent face à des variations brusques du comportement des deux véhicules, ce qui permet d'assurer la stabilité de véhicule et le confort des passagers.

## Plan de mémoire

**Chapitre 1** : traite la modélisation dynamique d'un véhicule et décrit les principaux éléments qui interviennent dans la dynamique du véhicule [1] [2] [3] [7] [16] .



**Chapitre 2 :** porte sur la modélisation du système de convoi par la méthode de l'imposition des impédances entre les véhicules et l'application de cette stratégie et l'exposition de son résultat [1] [3] [5] [8] [9] [15] .

**Chapitre 3 :** présente la méthodologie de la commande par logique floue et son application pour le contrôle de l'inter-distance entre deux véhicules, et une étude comparative du PID flou et classique [2] [4] [6] [19] [20].

**Chapitre 4 :** porte sur la modélisation du système de convoi par un contrôleur PI intelligent en se basant sur une commande sans modèle, et une étude comparative entre ces techniques. A la fin une conclusion ainsi que des perspectives sont données [10] [21] [23].



**CHAPITRE 01 :**  
**Positionnement du problème**

# Introduction

Un véhicule est un ensemble de corps reliés entre eux par plusieurs liaisons visant d'une part à assurer le mouvement du châssis mais aussi le confort des passagers qu'il transporte. Il est composé d'un châssis, et d'un système de liaison au sol comprenant : les pneumatiques, les roues, les trains et les suspensions. Les performances d'un véhicule au cours des différentes phases de son mouvement, en accélération, freinage, ou prise de virage résultent des réponses à des forces agissant sur ce véhicule, en chaque point de contact avec le monde extérieur.

Depuis le temps elle n'a cessé d'évoluer en fonction de nos besoins, pour rendre les déplacements de plus en plus aisés et sécurisés. Pour cela, la recherche s'est penchée sur des systèmes non seulement sécuritaires, mais aussi intelligents.

Ce chapitre sera consacré à décrire le système mécanique du véhicule, ensuite un modèle du système sera présenté. Puis nous donnerons une brève définition des paramètres qui interviennent lors du mouvement de la voiture. Enfin nous aborderons des approches pour la modélisation dynamique d'un véhicule.

## 1.1 Les systèmes intelligents d'aide à la conduite :

La voiture de demain sera intelligente et le conducteur pourra bénéficier d'une assistance accrue d'aide à la conduite. Cette assistance est fondée sur le développement des systèmes embarqués capables de fournir en temps réel des informations utiles au conducteur afin de faciliter sa tâche, d'optimiser sa prise de décision et de sécuriser ses déplacements. La plupart des véhicules actuels disposent de systèmes de freinage antiblocage, d'alerte de vitesse, de surveillance de la pression des pneus et d'autres. Ces systèmes permettent de fournir une assistance de bas niveau vu qu'ils n'utilisent que des informations inhérentes au véhicule. Pour une assistance de plus haut niveau, les informations liées à l'environnement proche du véhicule comme les bords de route, les obstacles routiers, la distance d'éloignement est indispensable afin d'assister le conducteur notamment dans des situations difficiles (détection d'obstacles, vision nocturne, régulation de vitesse, etc.). Pour ces raisons les constructeurs d'automobile sont de plus en plus demandeurs de systèmes de haut niveau et surtout intelligents. Les systèmes actuels de haut niveau sont connus sous l'acronyme ADAS (Advanced Driver Assistance System). Ils assistent le conducteur dans sa prise de décision, lui transmettent un signal d'alerte en cas de situation dangereuse et peuvent même exécuter des actions afin d'éviter l'accident.

## 1.2 Le Système mécanique :

Le véhicule routier est un système mécanique complexe présentant des caractéristiques fortement non linéaires. Il est composé d'un châssis, et d'un système de liaison au sol comprenant : les Pneumatiques, les roues, les trains et les suspensions. Tous ces systèmes ont pour but de faire fonctionner la voiture dans les meilleures Conditions.

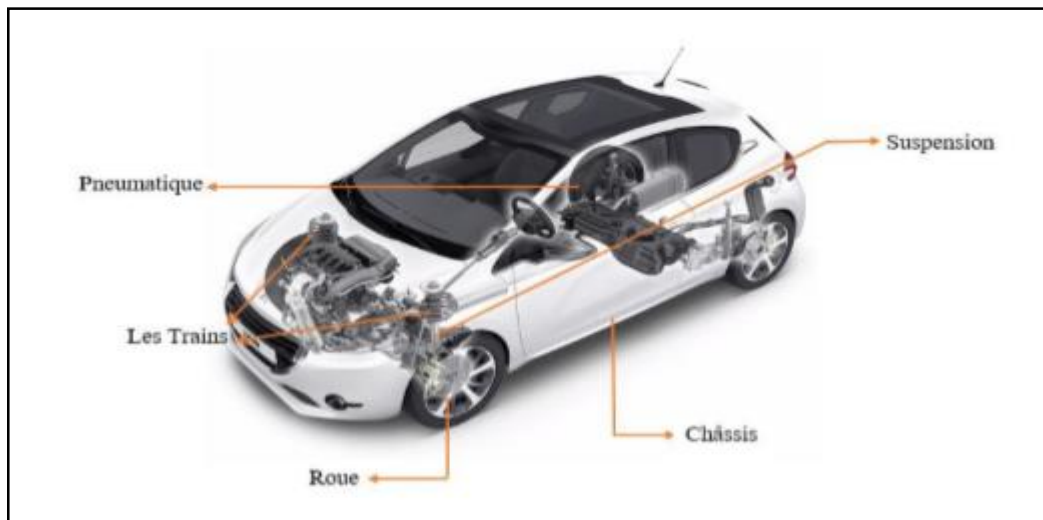


Figure 1.1 : Le schéma mécanique d'une voiture

### 1.3 Modèle du système :

Pour commander un système, il faut trouver son modèle. Pour un système mécanique, le modèle peut être dynamique ou cinématique ou un mélange des deux. La modélisation dynamique donne les relations entre les efforts appliqués et les mouvements. Tandis que, le modèle cinématique ne dépend pas sur ces efforts. Dans le cas du véhicule, il y a le mouvement longitudinal (dynamique longitudinale) et le mouvement latéral (dynamique latérale). Le modèle du système est présenté dans la figure suivante :

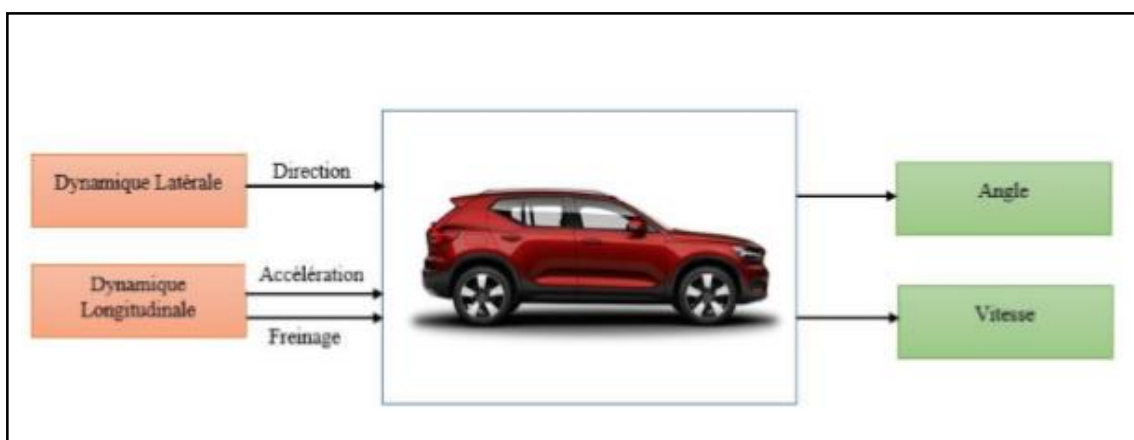


Figure 1.2 : Modélisation du système

#### 1.3.1 Caractéristique du modèle :

##### - Le pneumatique :

Le pneumatique est un organe de liaison au sol fixé sur une roue rigide assurant la rotation autour d'un élément porteur (pivot ou bras). Il constitue le seul organe permettant la liaison directe entre le véhicule et le sol, ce qui rend le comportement du véhicule fortement conditionné par les échanges dynamiques des efforts générés à la surface de contact. Lorsque le véhicule est en mouvement, tous les efforts externes qui lui sont appliqués, excepté les efforts aérodynamiques, sont générés à l'interface pneumatiques/ chaussée. Ces efforts se décomposent

sous la forme de forces longitudinales (de freinage ou d'accélération), de forces latérales (de guidage), ainsi qu'un couple d'auto-alignement. Ces efforts déterminent le comportement routier du véhicule.

- Les forces latérales sont orthogonales à la direction de mouvement du pneumatique, elles prennent naissance lorsque la vitesse de la roue au point de contact présente un angle non nul avec son axe longitudinal. Cet angle est aussi appelé angle de dérive du pneumatique.
- Les forces longitudinales sont dues à la présence d'un taux de glissement de la roue qui est lui-même dû à un écart entre la vitesse linéaire du point de contact et la vitesse d'avancement du véhicule. Chacune de ces forces induit à la fois des mouvements de translation dans le plan de la route mais aussi des moments de rotation.
- Le comportement Longitudinale :  
Dans les phases d'accélération ou de freinage, un couple moteur ou de freinage est appliqué au pneumatique, une force longitudinale naît à la surface de contact. Le comportement longitudinal est caractérisé par la relation liant cette force longitudinale à la vitesse relative du pneumatique par rapport au sol. Une fois la roue en mouvement, le principal phénomène qui intervient dans le calcul de la force longitudinale est le glissement longitudinal.

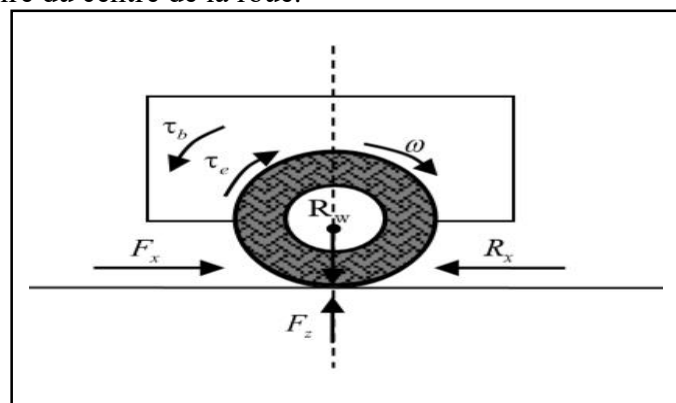
Pour la roue  $i$ , on définit le taux de glissement longitudinal comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_i = \frac{r_i \omega_i}{V_{x_i}} - 1 < 0 \quad \text{si} \quad V_{x_i} > r_i \omega_i \Rightarrow \text{Freinage} \\ \lambda_i = \frac{r_i \omega_i}{V_{x_i}} > 0 \quad \text{si} \quad V_{x_i} < r_i \omega_i \Rightarrow \text{Accélération} \end{array} \right. \quad (1.1)$$

Ou  $\omega_i$  : la vitesse angulaire de la roue.

$r_i$  : Le rayon effectif de la roue.

$V_{x_i}$  : La vitesse linéaire du centre de la roue.



**Figure 1.3 : Modèle dynamique de la roue**

- Le comportement Latérale : Le guidage du véhicule lors d'actions sur la colonne de direction est assuré par les forces et moments latéraux. Lorsque la roue est soumise à une force latérale, sa bande de roulement se déforme dans la direction opposée à la

force. Cette déformation crée l'angle de dérive qui correspond à la différence entre l'axe longitudinal de la roue et la direction de son mouvement.

## 1.4 Schéma du modèle mécanique :

Les mouvements appliqués dans le système mécaniques sont présentés dans la figure suivante :

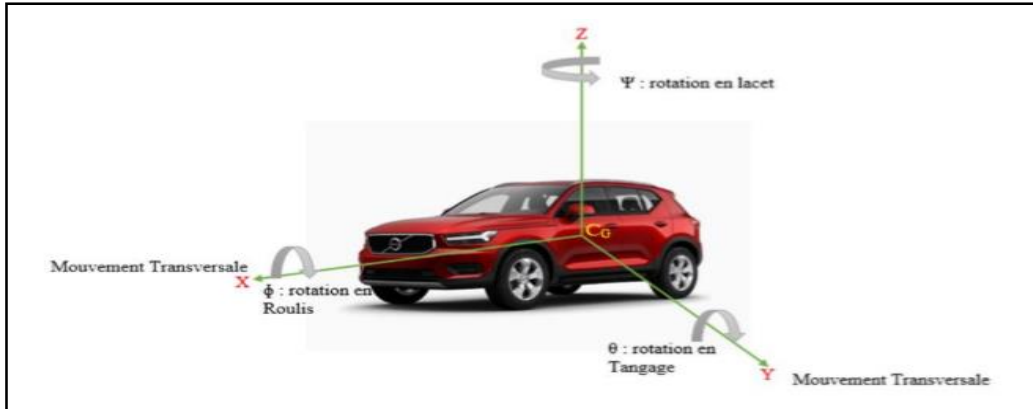


Figure 1.4 : Degré de liberté des mouvements du modèle

### 1.4.1 Description des paramètres :

#### - Angles et Repères du véhicule :

Le mouvement du véhicule se décompose en deux types : translation et rotation, comme montré dans la figure (1.4) :

- Le mouvement en translation du centre de gravité (CG) du véhicule, possède trois 03 degrés de liberté:

- Les différentes variables nécessaires à la description du mouvement sont :

X : Le déplacement longitudinal du centre de gravité (CG) du véhicule.

Y : Le déplacement latéral du centre de gravité (CG) du véhicule.

Z : Le déplacement vertical du centre de gravité (CG) du véhicule.

- Le mouvement en rotation du véhicule autour de son centre de gravité (CG), a trois degrés de liberté, décrits par les variables suivantes :

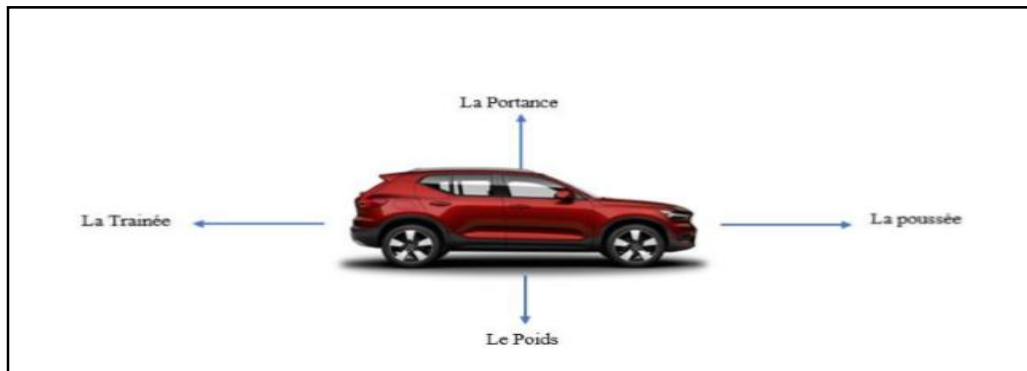
$\Psi$  : Rotation de cap (lacet).

$\Phi$  : Rotation de roulis (ressentie dans un virage).

$\Theta$  : Rotation de tangage (ressentie lors de l'accélération ou du freinage).

#### - Les forces s'exercent sur le véhicule :

Une voiture en mouvement est soumise à plusieurs forces : son poids P, la réaction du sol (La portance), la traction du moteur (La poussée), et une force de résistance (la trainée) qui résulte en outre d'un frottement des roues et de la résistance de l'air.



**Figure 1.5 : Les forces exercées sur le véhicule**

- La portance :

La portance est le fait que des flux d'air ont tendances à tirer le véhicule vers le haut. Les flux d'air passent sous le véhicule et ont une direction verticale, a un sens vers le haut et son point d'application est le centre de gravité du véhicule. La portance  $F_y$  se calcule :

$$F_y = \frac{1}{2} \times p \times V^2 \times S \times C_y \quad (1.2)$$

Où :  $p$  : Masse volumique de l'air en  $\text{kg/m}^3$

$V$  : Vitesse du véhicule par rapport à l'air en  $\text{m/s}$

$S$  : Surface de référence en  $\text{m}^2$  (dessous du véhicule)

$C_y$  : Coefficient de portance.

- La traînée :

La traînée est une force qui s'oppose à l'avancement du véhicule dans l'air. Cette force est donc en rapport direct avec l'aérodynamisme. Il est donc dans l'intérêt des constructeurs de diminuer la traînée, force à l'origine d'une augmentation de la consommation en carburant et d'une dégradation de la vitesse de pointe en ligne. Cette force a une direction horizontale, un sens vers l'arrière et le point d'application est le centre de gravité du véhicule. Cette traînée  $F_x$  s'exprime :

$$F_x = \frac{1}{2} \times p \times V^2 \times S \times C_x \quad (1.3)$$

Où :  $C_x$  : coefficient de traînée

- La poussée :

C'est la force produite par le moteur et qui permet au véhicule d'avancer. Elle a une direction horizontale et un sens vers l'avant du véhicule. Le point d'application est le centre de gravité du véhicule.

- Le poids :

Le poids est une force qui a la même direction que la portance, mais un sens opposé, le point d'application de cette force est le centre de gravité du véhicule. Le poids est la force exercée par la Terre sur le véhicule.

$$p = m \times g \quad (1.4)$$

m : la masse de l'objet en kg

g : attraction de la Terre en N/kg (environ égal à 9.81)

## 1.5 Modélisation de véhicule :

Le but de la modalisation est décrire le mouvement du véhicule dans le repère spatial tridimensionnel (déplacement bidimensionnel dans le plan de la route et rotation de la direction verticale).

Pour la modélisation du véhicule en considérant un déplacement le long des axes x, y, ainsi qu'une rotation autour l'axe verticale z, (Figure 1.6).

Les forces généralisées  $F_x$ ,  $F_y$  et le moment de rotation total  $M_z$  dans le repère inertiel  $(X, Y, \psi)$  sont donnés par les équations suivantes :

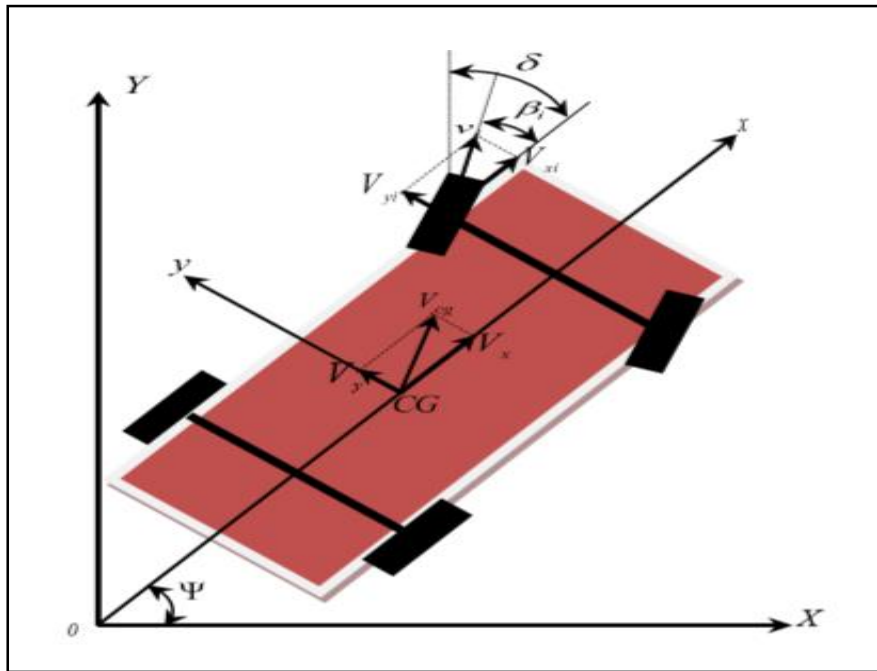
$$\begin{cases} M_v \ddot{X} = F_x \\ M_v \ddot{Y} = F_y \\ J_v \ddot{\psi} = M_z \end{cases} \quad (1.5)$$

A l'aide d'une simple rotation d'un angle  $\psi$  autour de l'axe  $o\vec{Z}$ , on peut évaluer le vecteur de vitesse associé au centre de gravité CG du véhicule

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ r \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

Où  $V_x, V_y$  sont les vitesses du véhicule dans le plan (x, y), et  $r = \dot{\psi}$  est sa vitesse de lacet.





**Figure 1.6 : Mouvement du véhicule dans le système d'axes**

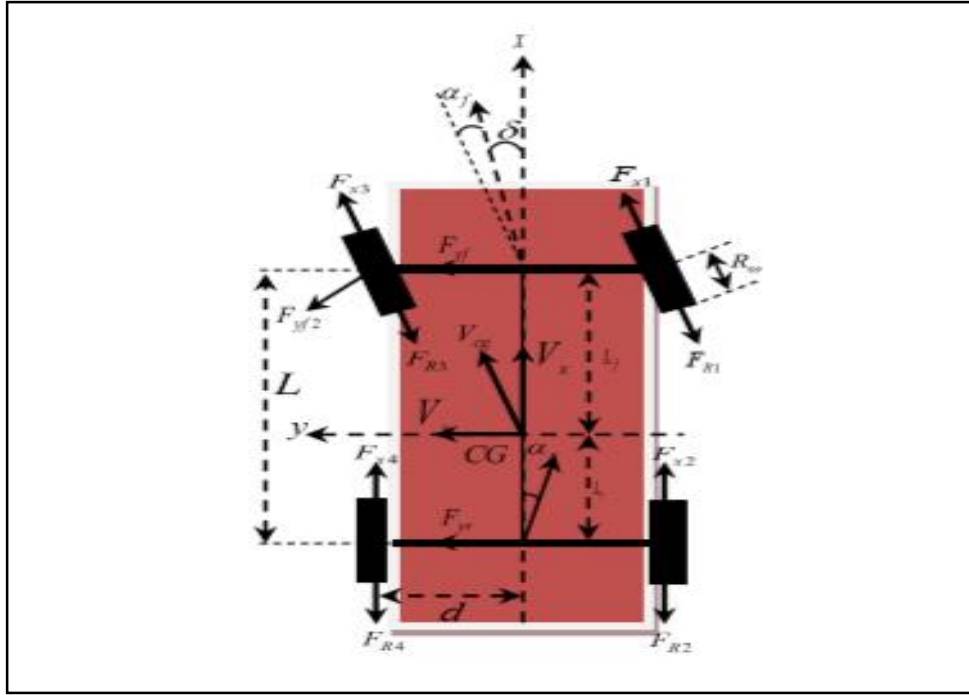
On dérivant (1.6) par rapport au temps, on obtient les accélérations :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(\dot{X}) = \dot{C}_x \cos(\psi) - V_x \dot{\psi} \sin(\psi) - \dot{V}_y \sin(\psi) - V_y \dot{\psi} \cos(\psi) \\ \frac{d}{dt}(\dot{Y}) = \dot{V}_x \sin(\psi) + V_x \dot{\psi} \cos(\psi) + \dot{V}_y \cos(\psi) - V_y \dot{\psi} \sin(\psi) \\ \frac{d}{dt}(\dot{\psi}) = r \end{cases} \quad (1.7)$$

En tenant compte de (1.4) dans les équations (1.6), on obtient :

$$\begin{cases} \frac{F_x}{M_v} = (\dot{V}_x - \dot{\psi} V_y) \cos(\psi) - (\dot{V}_y + \dot{\psi} V_x) \sin(\psi) \\ \frac{F_y}{M_v} = (\dot{V}_x - \dot{\psi} V_y) \sin(\psi) + (\dot{V}_y + \dot{\psi} V_x) \cos(\psi) \\ \frac{M_z}{J_v} = \dot{r} \end{cases} \quad (1.8)$$

Pour établir les forces qui agissent sur le véhicule, on considère le repère (x,y) avec un braquage d'un angle  $\delta$  des roues avant. Les forces qui agissent à l'interface roue-sol sont montrées sur la Figure (1.7).



**Figure 1.7 : Forces au niveau des roues du véhicule, dans le plan (x, y)**

En substituant l'équation (1.5) dans (1.7), on obtient les expressions des accélérations au centre de gravité (CG) du véhicule comme il est montré sur (1.8) :

$$\begin{cases} \frac{F_x}{M_v} = (\dot{V}_x - rV_y) \\ \frac{F_y}{M_v} = (\dot{V}_y - rV_x) \\ \frac{M_z}{J_v} = \dot{r} \end{cases} \quad (1.8)$$

En remplaçant les différentes forces longitudinales et latérales dans l'équation (1.8) on obtient les expressions définitives des équations de mouvement :

$$M_v(\dot{v}_x - v_y r) = F_{xf} \cdot \cos(\delta_f) + F_{xr} - F_{yf} \cdot \sin(\delta_f) - K_x \cdot v_x \cdot |v_x| \quad (1.9)$$

$$M_v(\dot{v}_y + v_x r) = F_{yf} \cdot \sin(\delta_f) + F_{yr} + F_{xf} \cdot \cos(\delta_f) - K_y \cdot v_y \cdot |v_y| + F_w$$

Grandeur	Définition
$L_f$	La longueur entre le train avant et le centre de gravité
$F_{yf}, F_{yr}$	Les forces latérales de contacts pneumatique-chaussée appliquées à la roue avant et arrière respectivement
$F_{xf}, F_{xr}$	Les forces longitudinales de contacts pneumatique-chaussée appliquées à la roue avant et arrière respectivement
$V_x$	Vitesse longitudinale
$V_y$	Vitesse latérale
$r = \dot{\psi}$	Est la vitesse de lacet
$\delta$	Angle de braquage.
$L$	La longueur entre les deux trains avant et arrière
$L_r$	La longueur entre le train arrière et le centre de gravité
$R_w$	Le rayon de la roue
$F_x$	La force longitudinale
$F_y$	La force latérale
$\lambda$	Le coefficient de glissement longitudinal
$M_v$	La masse du véhicule

**Tableau 1 : Définition des grandeurs physiques**

## 1.6 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre la partie mécanique de véhicule, ainsi que la détermination du son modèle dynamique, pour cela on est amené à décrire le pneumatique, à prendre en compte les aspects dynamiques et aérodynamiques et en appliquant les principes fondamentaux de la dynamique. Le modèle obtenu sera utilisé pour la synthèse des lois de commandes. Le chapitre suivant sera consacré pour la commande du véhicule et de l'inter distance de sécurité.



**CHAPITRE 02 :**

**Stratégie de commande**

## Introduction :

Le contrôle d'un convoi de véhicules par imposition d'impédances, consiste à utiliser une série de ressorts-amortisseurs entre chaque paire de véhicules adjacents. Afin d'assurer la sécurité entre les véhicules du convoi, il est nécessaire de régler la distance entre les véhicules à une valeur pré assignée. En raison de ce fait, les ressorts-amortisseurs sont utilisés pour représenter les forces d'interactions entre les véhicules du convoi.

Ce chapitre a pour but d'étudier un système de contrôle d'inter distance à base d'un ressort amortisseur. Un modèle de distance de sécurité et d'un système ressort-amortisseur sera présenté. A la fin nous nous baserons sur un système de control PID.

## 2.1 La commande d'un véhicule :

La commande d'un véhicule est un vaste sujet qui se décompose en plusieurs domaines d'activités. Dans le cas de la commande des dynamiques du véhicule, deux taches se distinguent :

✓ La commande latérale et la commande longitudinale.

✓ La commande latérale est responsable du maintien de voie du véhicule et agit sur les organes de direction tels que la colonne pour le braquage des roues, et les freins dans le cadre d'une sécurité active de type DYC (DIRECT YAW CONTROL).

✓ La commande longitudinale consiste à adapter l'allure de véhicule en agissant sur l'accélération et le freinage, il est également possible de tenir compte des paramètres de conduite tels que l'état de contact roue/sol.

## 2.2 les forces de résistance à l'avancement de véhicule

Lorsqu'une voiture se déplace à vitesse constante, elle est soumise à un certain nombre de forces qui s'opposent à son déplacement :

$$F_{tot} = F_w + F_I + F_f + F_{grav} + F_{roul} \quad (2.1)$$

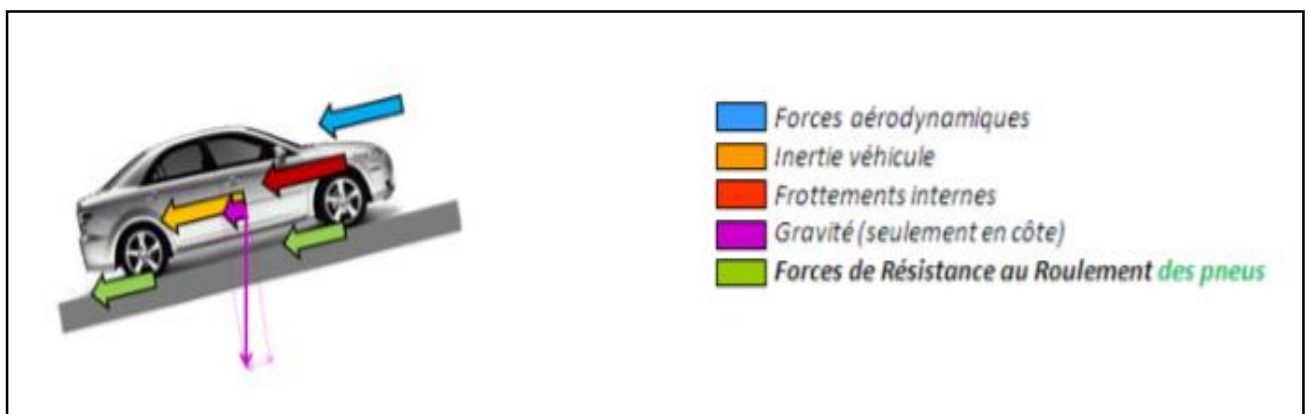


Figure. 2.1 Les forces de résistance à l'avancement de véhicule

## 2.3 Modélisation de la structure de commande :

### 2.3.1 Contrôleur de vitesse :

Dans cette partie nous voulons concevoir un contrôleur local de vitesse PID pour chaque véhicule du convoi. Le rôle de ce contrôleur est de corriger l'erreur de vitesse du véhicule lorsque ce dernier est soumis à des perturbations internes (changement de masse ...) et/ou externes (effet de l'aérodynamique...).

Le contrôleur PID permet trois actions simultanées en fonction de l'erreur :

- Une action proportionnelle: l'erreur est multipliée par un gain  $K_p$
- Une action intégrale: l'erreur est intégrée sur un intervalle de temps  $T_i$
- Une action dérivée: l'erreur est dérivée suivant un temps  $T_d$

L'ajustement des paramètres du PID influence la réponse du système de la manière suivante pour un système de 2e ordre typique:

- Gain  $K_p$  : lorsque  $K_p$ , augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement varie peu et l'erreur statique se trouve améliorée.

-  $T_i$  : lorsque  $1/T_i$  augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement important. Le temps d'établissement s'allonge mais dans ce cas on assure une erreur statique nulle.

-  $T_d$  : lorsque  $T_d$  augmente, le temps de montée change peu mais le dépassement diminue. Le temps d'établissement du régime stationnaire est meilleur. Pas d'influence sur l'erreur statique.

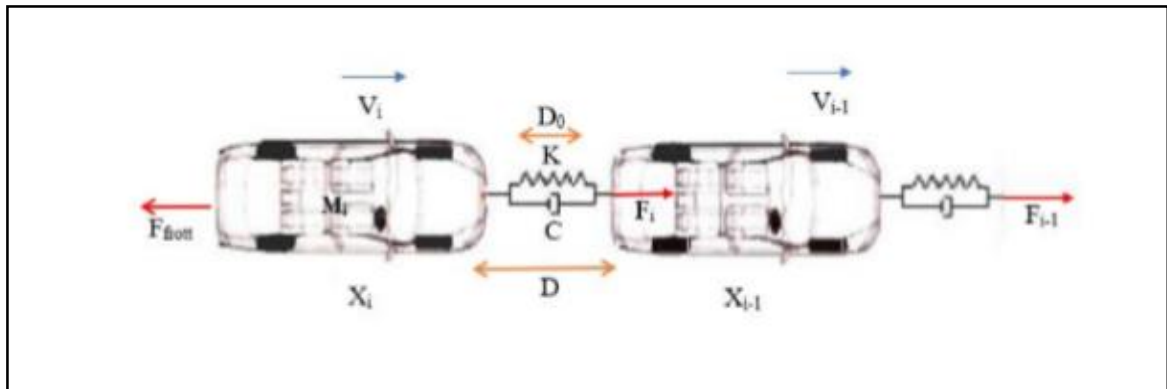
Pour ajuster ces paramètres, il existe plusieurs méthodes. Les plus utilisées sont :

- \* la méthode du lieu de Nyquist inverse (utilise le diagramme de Nyquist).
- \* la technique des pôles et des zéros.
- \* la méthode d'ajustement itérative convergente.
- \* la méthode de Ziegler/Nichols.

Plusieurs structures sont possibles pour combiner les trois effets sur l'erreur (série, parallèle ou mixte)

### 2.3.2 Contrôleur de l'inter-distance

Il existe plusieurs algorithmes et technologies pour maintenir les inter-distances entre véhicules dans les convois pour les systèmes de transport intelligents. L'objectif principal est de concevoir une stratégie de commande bien adaptée pour contrôler ces inter distances, notamment pour contrôler les distances longitudinale et latérale de chaque véhicule, en se basant sur un algorithme qui implémente une impédance virtuelle (une chaîne de ressorts-amortisseurs) pour imposer les effets d'interaction désirés entre chaque paire de véhicules adjacents. Chaque véhicule est représenté par sa position  $X_i = [x_i, y_i]$ . La masse du véhicule est notée par  $m_i$ .



**Figure 2.2: Modèle ressorts amortisseurs virtuels**

• L'inter-distance entre les véhicules est donnée par :

$$D = X_{i-1} - X_i \quad (2.2)$$

• Les expressions des forces subies par le véhicule sont :

- Force ressort  $F_{ressort} : F_{ressort} = K(D - D_0)$
- Force amortisseur  $F_{amort} : F_{amort} = -C \times D$
- Force de frottement avec la chaussée  $F_{frott} : F_{frott} = -C_1 \times \dot{X}_i$

Avec :

Grandeur	Définition
K	Raideur de ressort
C	Coefficient d'amortisseur
$D_0$	Longueur à vide
$V_{i-1}, V_i$	Représentent respectivement la vitesse du véhicule avant et arrière.
$F_{frott}$	La force de frottement
D	La distance de sécurité
$X_{i-1}, X_i$	Représentent respectivement la position du véhicule avant et arrière.
$F_{i-1}, F_i$	La force avant et arrière de ressort amortisseur appliquée sur le véhicule.

**Tableau 2 : Définition des grandeurs du modèle ressorts amortisseurs virtuels**

On considère à l'instant t, la distance relative D entre deux véhicules consécutifs qui est donnée par l'équation suivante :

$$D = \int (V_{i-1} - V_i) dt + D_{initial} \quad (2.3)$$

Avec  $D_{initial}$  : la distance initiale entre les véhicules, soit à l'instant t=0.

- Il est à noter que ce modèle de l'inter-distance est développé pour le cas de véhicules se déplaçant en ligne droite, un derrière l'autre.

$$m_i \ddot{X}_i = F_{PID} + F_{i-1} - F_i - F_{frott} \quad (2.4)$$

### 2.3.3 Modèle de distance de sécurité :

La distance de sécurité est la distance minimale qu'un conducteur doit conserver entre son véhicule et celui qui le précède. Celle-ci dépend du type de véhicule, de sa vitesse mais aussi des conditions météorologiques. La règle d'inter-distance de sécurité dictée par Pipes (1958), est comme suit :

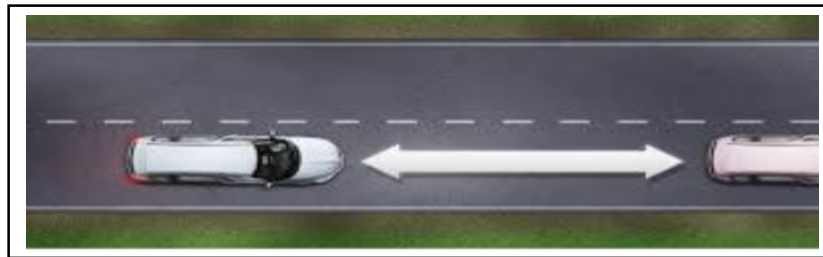
$$d_s = L_f \left( 1 + \frac{1}{16.1} V_f \right) \quad (2.5)$$

Avec :

$D_s$  : La distance de sécurité

$L_f$  : La longueur du véhicule Suiveur.

$V_f$  : La vitesse du véhicule suiveur



**Figure 2.3 : Distance de sécurité entre deux véhicules**

L'équation newtonienne qui permet de calculer la distance de sécurité s'écrit comme suit:

$$d_s(t - \tau) = \alpha V_1^2 (t - \tau) + \beta_2 V_f^2 (t) + \beta_1 V_f (t) + \beta_0 \quad (2.6)$$

$\alpha$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_0$  Sont des constantes, et  $V_1$ ,  $V_f$  les vitesses du véhicule suivi et suiveur. Mais dans la plupart des simulations de circulation routière on emploie le modèle développé par Gipps (1981), aussi le modèle de Kometani et le modèle de Chien et Ioannou (1992) qui s'écrit comme suit :

$$d_s = \alpha_1 (V_f^2 - V_1^2) + \alpha_2 V_f + \alpha_3 \quad (2.7)$$

$\alpha_1$   $\alpha_2$   $\alpha_3$  : sont les constantes de conception.



## 2.4 Système de contrôle de l'inter distance : Stratégie de commande :

### 2.4.1 Contrôleur PID :

Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie est le régulateur PID (proportionnel, intégral, dérivé), car il permet de régler à l'aide de ses trois paramètres les performances (amortissement, temps de réponse) d'une régulation d'un processus modélisé par un deuxième ordre.

Un contrôleur PID calcule en permanence une valeur d'erreur  $e(t)$  comme étant la différence entre un point de consigne souhaité et une variable de processus mesurée et applique une correction sur la base de termes proportionnel, intégral et dérivé. Le contrôleur tente de minimiser l'erreur dans le temps en ajustant une variable de contrôle  $u(t)$ , telle que la position d'une vanne de régulation, un amortisseur ou la puissance fournie à un élément chauffant, à une nouvelle valeur déterminée par une somme pondérée :

$$u(t) = k_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.8)$$

Et elle s'écrit de la forme suivante :

$$u(t) = k_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

Où :

$K_p$ : Le gain proportionnel.

$T_i$ : Le temps d'intégration.

$T_d$  : Le temps de dérivation.

#### - Etudes sur les paramètres des régulateurs P, I et D:

##### Action P (Proportionnel):

Le but de la correction proportionnelle est de diminuer de façon importante le temps de réponse. Par contre on introduit un dépassement et surtout la précision n'est pas excellente puisqu'il existe une erreur de position

##### Action I (Intégral) :

Le but de cette correction est d'annuler l'erreur de position c'est-à-dire d'obtenir en régime permanent la sortie égale à la consigne (erreur de position nulle  $s=0$ ).

Par contre le temps de réponse est long.

##### Action D (dérivateur) :

L'effet dérivée est sans influence sur le régime permanent (la dérive est nulle), mais il y a aucun effet important en régime transitoire.

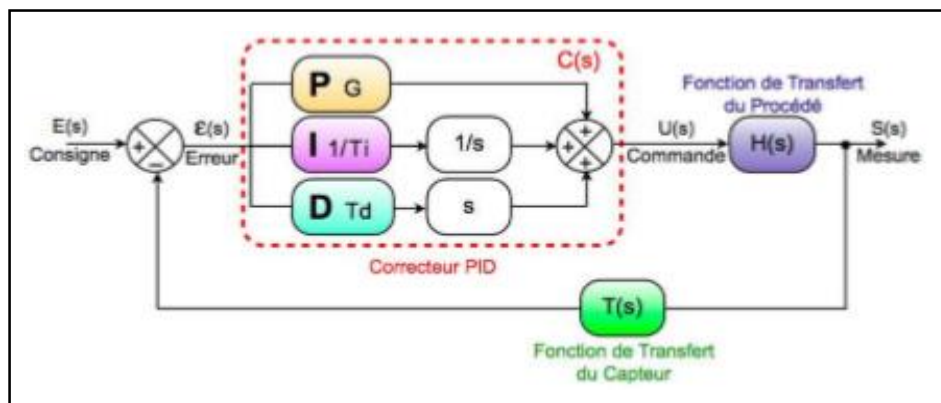


Figure 2.4 : bloc basique d'un contrôleur PID

## 2.4.2 Ajustage des Paramètres d'un Régulateur PID:

- **Méthodes de Ziegler et Nichols (ZN) :**

En 1942, Ziegler et Nichols [1] ont proposé deux approches heuristiques basées sur leur expérience et quelques simulations pour ajuster rapidement les paramètres des régulateurs P, PI et PID. La première méthode nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle en boucle ouverte, alors que la deuxième demande d'amener le système bouclé à sa limite de stabilité.

a) **Méthode de la réponse indicielle :**

Type	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$1/(pLK_0) = 1/(aK_0)$		
PI	$0.9/(pLK_0) = 0.9/(aK_0)$	3L	
PID	$1.2/(pLK_0) = 1.2/(aK_0)$	2L	0.5L

Tableau 3 : Paramètres PID obtenus à partir d'une réponse indicielle (ZNt)

b) **Méthode du point critique :**

Type	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	0.5K <sub>cr</sub>		
PI	0.4K <sub>cr</sub>	0.8T <sub>cr</sub>	
PID	0.6K <sub>cr</sub>	0.5T <sub>cr</sub>	0.125T <sub>cr</sub>

Tableau 4 : Paramètres PID obtenus à partir du point critique (ZNf)

- **Méthodes de Åström et Hägglund (AH) :**

Au début des années 1990, Åström et ses collaborateurs ont testé une nouvelle approche afin de pallier les inconvénients de la méthode de Ziegler et Nichols. Ils ont pour cela analysé et

simulé le comportement d'un grand nombre de systèmes à comportement non-oscillant en recherchant à les caractériser de manière simple.

- **Méthode de Broïda :**

La méthode de Broïda est une méthode d'identification en boucle ouverte d'une réponse indicielle expérimentale, qui consiste à assimiler la fonction de transfert d'un système d'ordre  $n$  à celle du premier ordre affectée d'un retard pur.

Un système linéaire a une fonction de transfert qui peut se calculer en établissant les équations différentielles qui relient entrée et sortie. Ces équations théoriques sont parfois difficiles à écrire car on n'a pas forcément toute la connaissance du système nécessaire : valeurs numériques, processus mis en jeu, non linéarité... Souvent, un modèle dont le comportement ressemble à celui du système à étudier est suffisant pour élaborer une loi de commande adaptée.

Nous identifions la réponse indicielle en BO du système à celle d'un modèle dont la forme est prédéfinie avec certains paramètres. La méthode consiste à calculer les meilleurs paramètres en fonction de la forme de la réponse réelle. Le modèle proposé pour approcher le comportement du système est un premier ordre avec un retard pur.

<b>Structure</b>	<b>B pu (%)</b>	<b>Ti</b>	<b>Td</b>
<b>P</b>	$125KT / \tau$		
<b>PI parallèle</b>	$125KT / \tau$	$KT / 0.8$	
<b>PI série</b>	$125KT / \tau$	$\tau$	
<b>PID série</b>	$120KT / \tau$	$\tau$	$0.42T$
<b>PID mixte</b>	$120KT / (\tau + 0.4T)$	$(\tau + 0.4T)$	$T\tau / (2.5\tau + T)$
<b>PID parallèle</b>	$120KT / (\tau + 0.4T)$	$KT / 0.75$	$0.35\tau / K$

**Tableau 5 : Tableau de Broïda**

Soient  $t_1$  et  $t_2$  les temps au bout desquels la réponse expérimentale atteint respectivement 28% et 40% de la valeur finale. On va simplement résoudre le système donné par :

$$\frac{t_1 - T}{\tau} = 0.328 \Rightarrow t_1 - T = 0.328\tau$$

$$\frac{t_2 - T}{\tau} = 0.510 \Rightarrow t_2 - T = 0.510\tau$$

La résolution de ces équations donne :

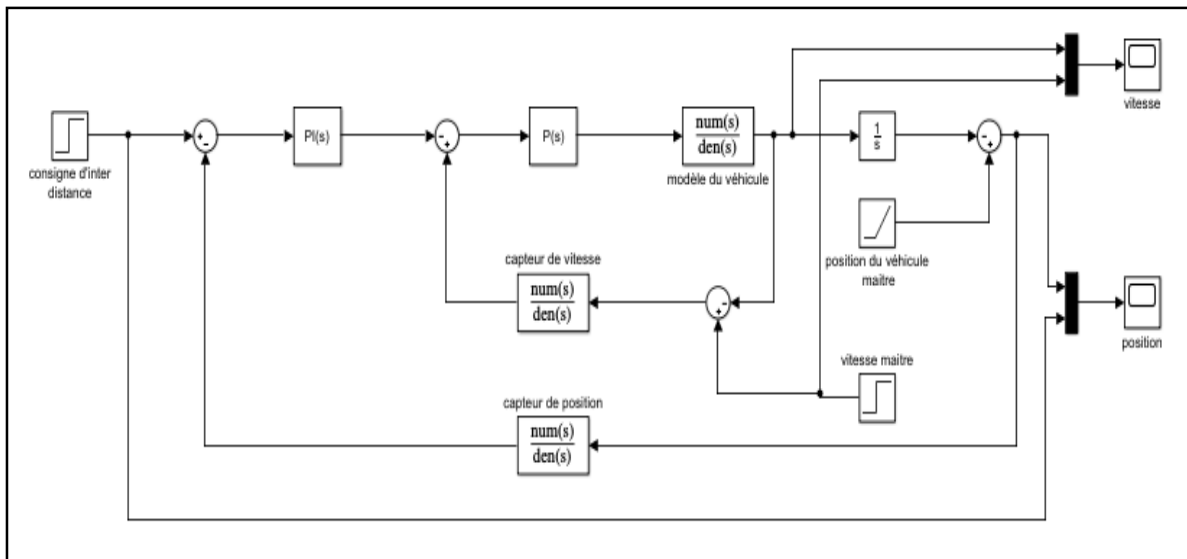
$$- \tau = 5.5(t_2 - t_1)$$

$$- T = 2.8 \times t_1 - 1.8 \times t_2$$

Et on a : 
$$K = \frac{S}{E}$$

### 2.4.3 Structure de commande de l'inter-distance pour un convoi de deux véhicules :

Pour pouvoir régler convenablement l'inter-distance entre les deux véhicules, il faut tout d'abord modéliser le système de contrôle et calculer la fonction de transfert en boucle fermée de la boucle d'asservissement. Le schéma bloc utilisé est illustré par la figure (2.5)



**Figure 2.5 : Schéma bloc de la structure d'asservissement de l'inter-distance entre deux véhicules (maître-esclave)**

La figure (2.5) représente la structure de commande pour le véhicule. Cette structure se compose de deux boucles imbriquées pour l'asservissement en vitesse et en distance du véhicule. Pour contrôler la vitesse et l'inter-distance entre deux véhicules, on utilise un contrôleur PI (proportionnel-intégral) et un contrôleur P (proportionnel).

L'interprétation physique de cette structure de commande représente un modèle de ressort amortisseur. On constate que si on néglige la partie intégrale de l'inter-distance (augmenter la constante  $T_i$ ), la conception du contrôleur de l'inter-distance se fait par une substitution des paramètres de ressort amortisseur avec les paramètres du contrôleur PI (on néglige la partie intégrale) et du contrôleur P. La fonction de transfert du modèle du petit véhicule est assimilée à un filtre passe bas.

La vitesse du véhicule maître est considérée comme une perturbation externe dans la structure de commande de l'inter-distance.

Soit la fonction de transfert du contrôleur PI de l'inter-distance :

$$C_1(s) = K_c \left( \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \right)$$

La vitesse du véhicule est contrôlée par un contrôleur P (proportionnel)

$$C_2(s) = P$$

Le modèle du véhicule électrique est représenté par la fonction de transfert suivante

$$F(s) = \frac{1}{\tau_i s + 1}$$

Selon le schéma bloc de la figure 2.5, pour un gain unitaire pour les deux capteurs, on détermine la fonction de transfert en boucle fermée

$$H(s) = \frac{\frac{K_c P}{\tau} s + \frac{K_c P}{\tau \cdot \tau_i}}{s^3 + \frac{P+1}{\tau} s^2 + \frac{K_c P}{\tau} s + \frac{K_c P}{\tau \cdot \tau_i}}$$

On détermine les coefficients P, Kc et Ti en fonction de deux paramètres physiques représentatifs (facteur d'amortissement  $\xi$  et pulsation naturelle  $\omega_n$ )

Le dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée peut s'écrire de la manière suivante:

$$D(s) = (s + \omega_n)(s^2 + 2\xi\omega_n \cdot s + \omega_n^2)$$

En posant :

$$\frac{PK_c}{\tau \cdot \tau_i} = \omega_n^3$$

$$\frac{PK_c}{\tau} = \omega_n^2 (1 + 2\xi)$$

$$\frac{P+1}{\tau} = \omega_n (1 + 2\xi)$$

On en déduit alors les coefficients des contrôleurs PI et P

$$P = \omega_n \tau (1 + 2\xi) - 1$$

$$K_c = \frac{\omega_n^2 \tau (1 + 2\xi)}{\omega_n \tau (1 + 2\xi) - 1}$$

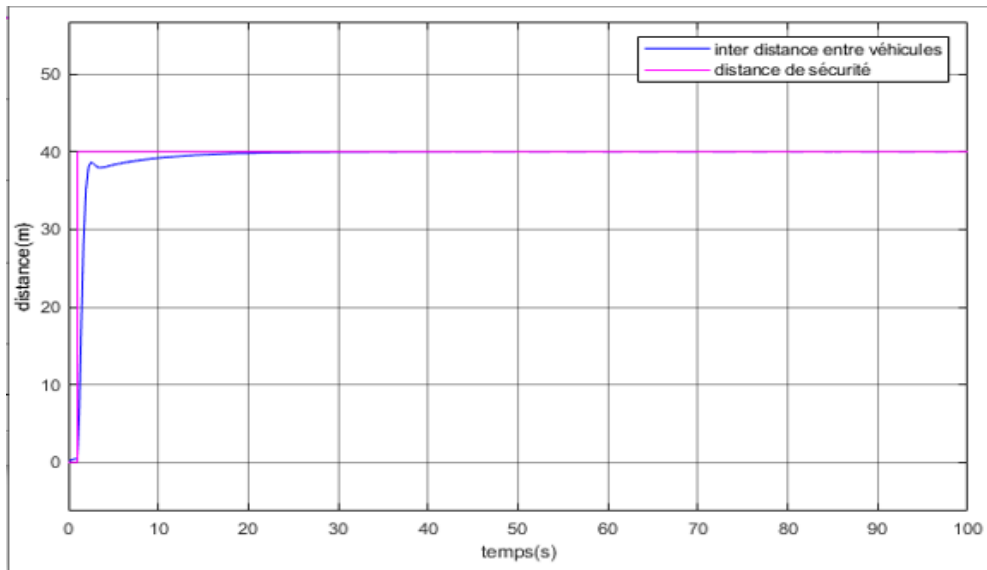
$$\tau_i = \frac{1 + 2\xi}{\omega_n}$$

On choisit les paramètres physiques:

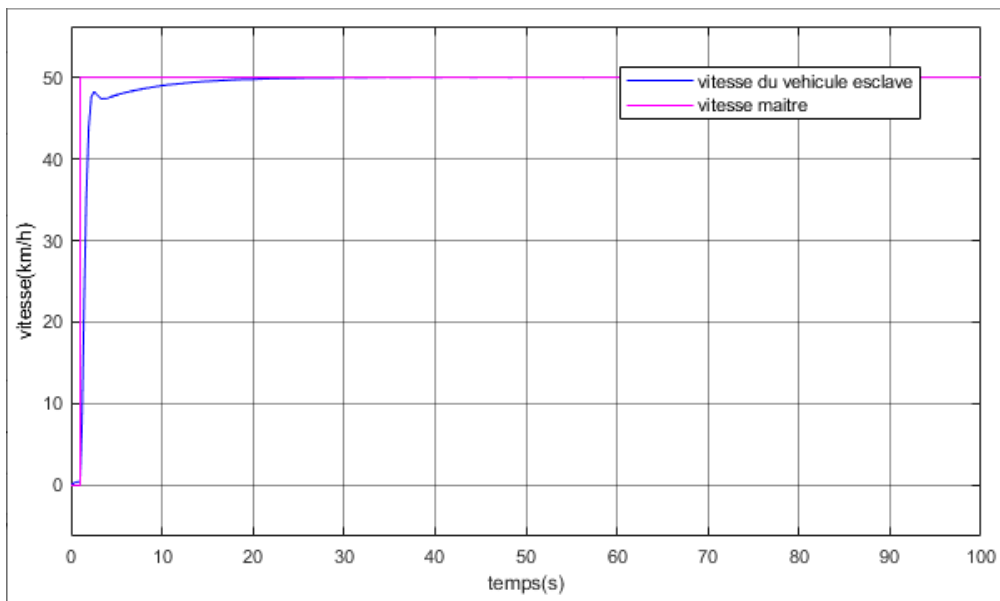
$$\xi = 0.6$$

$$T_{s,(2\%)} = \frac{4}{\xi \omega_n} = 3s$$

En utilisant les coefficients des régulateurs PI et P qu'on a déjà calculé précédemment. Après la simulation on obtient le résultat suivant :



**Figure 2.6 : Inter-distance entre deux véhicules (maître-esclave)(m)**



**Figure 2.7 : Vitesse du véhicule esclave (km/h)**

**- Discussion :**

Les figures 2.6 et 2.7 représentent respectivement la réponse de l'inter-distance entre les deux véhicules (maître-esclave) et la vitesse du véhicule esclave pour des véhicules initialement à l'arrêt

Pour la simulation, on a imposé la valeur de l'inter-distance de sécurité entre deux véhicules de 40 m et la vitesse de consigne pour le véhicule maître de 50 km/s.

Selon la figure 2.6, on constate que la distance entre le véhicule maître et esclave est ajustée à la distance de sécurité après une période de 20s.

La figure 2.7 expose l'asservissement de vitesse du véhicule esclave. On constate que le temps de stabilisation de la vitesse du véhicule esclave est réglé après une période de presque 20s.

## **2.5 Conclusion :**

En utilisation cette nouvelle vision de contrôle, nous avons démontré qu'il est possible d'implémenter un système de contrôle basé sur des impédances. En effet, ce concept permet de doter les véhicules d'une autonomie leur permettant de réaliser l'approche d'interaction virtuelle.

Les stratégies de commande présentées dans ce chapitre seront comparées par simulation dans le prochain chapitre afin d'évaluer la stabilité et la robustesse de chaque stratégie de commande dans le système de convoi.



**CHAPITRE 03 :**  
**Commande d'inter-distance par la**  
**logique floue**



## Introduction

Les méthodes conventionnelles de réglage ont prouvé leur efficacité pour des processus simples à modéliser ayant des paramètres fixes. Or, ce n'est pas toujours le cas. La plupart des systèmes industriels sont non linéaires et possèdent des paramètres variables dans le temps. Ils rendent les méthodes conventionnelles inefficaces, pour ce genre de réglage, l'imprécision accompagnant chaque modélisation et la présence des erreurs de mesure rendent le réglage plus délicat.

Les études effectuées ont montré que dans une boucle de régulation, l'homme réagit comme un contrôleur robuste pour des systèmes non linéaire ayant des paramètres variant au cours du temps. En effet, l'être humain peut prendre des actions de contrôle dans les pires des cas, même dans la distorsion du système. Cette stratégie de contrôle " Humain " possède une logique pour la prise de décision en intégrant la connaissance du comportement du processus à commander.

Afin d'assurer un contrôle automatique, au système industriel complexe, ayant une stratégie proche de la stratégie " Humaine ", une commande basée sur la « Théorie de la logique floue » est élaboré.

### 3.1 Les bases théoriques de la logique floue :

Les bases théoriques de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh l'université de Californie de Berkeley dans son article "fuzzy set ".

Un domaine d'application de la logique floue qui devient fréquent est celui du réglage et de la commande des régulations industrielles. Cette méthode permet d'obtenir une loi de commande souvent efficace, sans devoir faire appel à des développements théoriques importants. Elle présente l'intérêt de prendre en compte les expériences acquises par les utilisateurs et opérateurs du processus à commander.

BASES GENERALES :

Les éléments de base de la logique floue sont :

- \* les variables linguistiques
- \* les fonctions d'appartenance
- \* les déductions aux inférences

Le contrôleur flou apparaît utile pour tous systèmes complexes et non linéaires dans lesquels la modélisation est difficile ou impossible, ainsi que pour tous domaines où un flou persiste. Son intérêt réside dans sa capacité de traiter l'imprécis, l'incertain et le vague.

### 3.2 Structure d'un système flou

Un système flou peut être interprété selon deux points de vue : mathématique ou logique. D'un point de vue mathématique, un système flou est une fonction non linéaire reliant un vecteur de données, d'entrée à un vecteur de sortie. Du point de vue logique, un système

flou est un système à structure particulière, composé de quatre modules principaux : à savoir, la base de connaissance, la fuzzification, le moteur d'inférence et la défuzzification.

La commande floue est l'application la plus utilisée dans la logique floue. En effet, cette méthode permet d'obtenir un réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies.

Par opposition à un régulateur standard, la commande par logique floue (CLF) ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences (déductions) avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques.

Le système à base de la logique floue est composé de quatre blocs principaux (Figure 3.1).

1- Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :

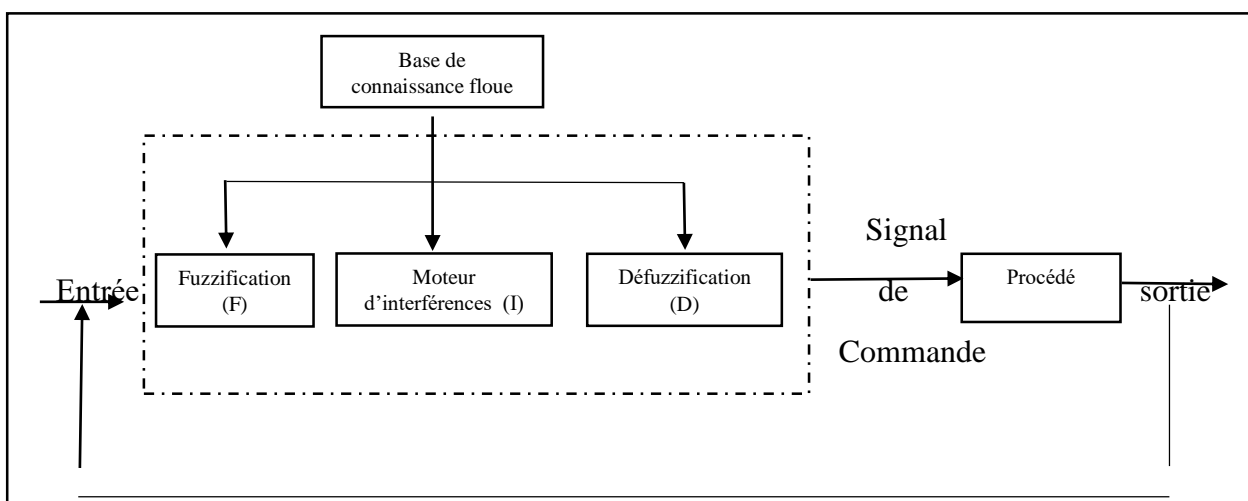
- mesure des variables d'entrées .
- établit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables d'entrées .
- effectue une fonction de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables.

2- Le bloc de base de connaissances ou base de règles, caractérise les buts et stratégies de commande émis par les experts du domaine au moyen d'un ensemble de règles linguistiques de contrôle .

3- Le bloc d'inférence est le cerveau de CLF, qui possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire (inférer) les actions de commande floue, à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence.

4- Le bloc de défuzzification fournit un signal de commande non- flou (réel) à partir du signal flou déduit.

Chacun de ces blocs fera l'objet d'un développement détaillé.



Retour non flou

**Figure 3.1 : Configuration de base de la commande par logique floue**

### 3.2.1 Interface de Fuzzification :

Dans les problèmes de commande, les données observées sont habituellement physiques (réelles). Or, le traitement de ces données est basé ici sur la théorie des ensembles flous, ceci nécessite donc une procédure de fuzzification. La fuzzification, proprement dite, consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables d'entrées. On réalise ainsi le passage des grandeurs physiques (réelles) en variables linguistiques (variables floues) qui peuvent être alors traitées par les inférences.

$U_0 = (U_{01}, U_{02}, \dots, U_{0n}) \in U$  En un ensemble flou  $F_x = F_{x1} \times F_{x2} \times \dots \times F_{xn}$  défini dans  $U$   
(3.1)

Dans la littérature de la commande floue, deux approches de fuzzification sont généralement utilisées: la fuzzification singleton et la fuzzification non-singleton.

- **Fuzzification singleton :**

Où l'opérateur de fuzzification converti l'entrée numérique  $U_0 \in U$  en un singleton flou  $F_x$  dans  $U$  tel que :

$$\mu_{F_x}(U) = 1 \quad \text{Si} \quad U = U_0 \quad (3.2)$$

$$\mu_{F_x}(U) = 0 \quad \text{Si} \quad U \neq U_0$$

Cette stratégie est largement utilisée dans les applications de contrôle flou, car elle est facile à implémenter.

- **Fuzzification non – singleton :**

Est une fuzzification pour laquelle  $\mu_{F_x}(U)$  est égal à l'unité si  $U = U_0$  et décroît quand on s'éloigne de  $U_0$ .

### 3.2.2 Base de connaissances (Base de règles) :

Une base de règles floues  $R$  est une collection de règles floues, décrivant le comportement du système. Elle est le cœur du système entier, dans le sens où tous les autres composants sont utilisés pour interpréter et combiner ces règles pour former le système final. Ces règles permettent de déterminer le signal de sortie du contrôleur en fonction des signaux d'entrées.

Cette dernière est la partie du contrôleur flou dans lequel se trouvent sous forme de règles heuristiques, les connaissances de l'opérateur. Elle est composée d'une base de données et d'une base de règles.

- La base de données regroupe :

- Les ensembles flous associés aux variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou.
- Les facteurs d'échelle (gains) en entrée (normalisation) et en sortie (dénormalisation).

- La base de règle contient des règles de la forme :

« Si  $X_1$  est  $A_1$  et  $X_2$  est  $A_2$ ...et  $X_n$  est  $A_n$  Alors Y est B »

Suivant la nature de B on parlera de :

- Règles à conclusion symbolique (contrôleur de type Mamdani) : B est une valeur linguistique.
- Règles à conclusion algébrique (contrôleur de Sugeno) : B est une valeur numérique (singleton) ou une équation mathématique bien précise (non floue).

Une base de règles d'un système flou est dite complète si, pour chaque vecteur d'entrée, il existe au moins une règle floue activée. Afin d'assurer cette propriété, les fonctions d'appartenance doivent couvrir tout l'espace des variables d'entrée. Une base de règles d'un système flou est dite inconsistante, s'il existe deux règles floues ayant la même prémisse mais des conclusions différentes. La propriété de consistance permet d'éviter les contradictions dans une base de règles.

### 3.2.3 Inférence floue :

Le moteur d'inférence floue, ou la logique de prise de décision est le noyau (cerveau) du contrôleur (système) flou. Elle est capable de simuler la prise de décision de l'être humain, en se basant sur le raisonnement flou et l'ensemble des règles floues qui forment la base de règle.

On appelle règles d'inférence, l'ensemble des différentes règles reliant les variables floues d'entrée d'un système aux variables floues de sortie de ce système. Ces règles se présentent sous la forme :

- Si condition 1 et/ou condition 2 alors action sur les sorties. En d'autres termes, cette opération quantifie la force de la liaison entre la prémisse et la conclusion de la règle. Les opérateurs les plus courants en commande sont de type conjonctif :

- L'implication de Mamdani (1974) :

$$\mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.3)$$

- L'implication de Larsen (1980) :

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \times \mu_B(x) \quad (3.4)$$

Dans notre étude on va utiliser la méthode de Mamdani.

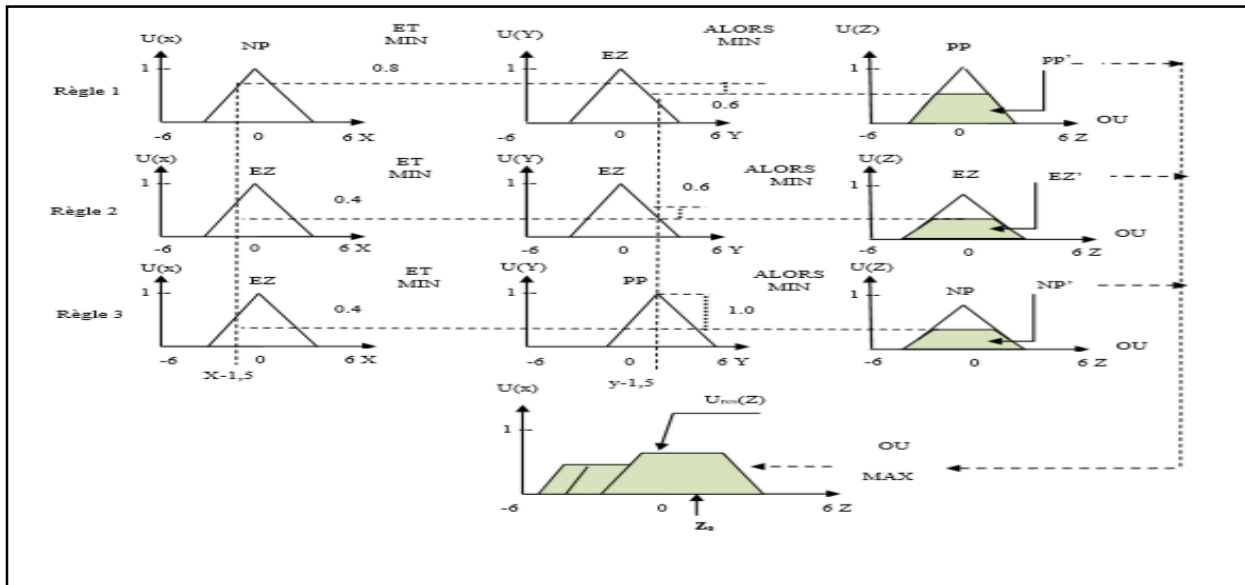
- **Méthode d'inférence Max- Min (Mamdani) :**

Cette méthode réalise :

- L'opérateur "ET" par la fonction "Min"
- La conclusion "ALORS" de chaque règle par la fonction "Min"
- La liaison entre toutes les règles (opérateur "OU") par la fonction Max.

la dénomination de cette méthode, dite Max- Min ou « implication de Mamdani », est due à la façon de réaliser les opérateurs ALORS et OU de l'inférence.

Afin de mettre en évidence le traitement numérique de cette méthode, on fera appel à deux variables d'entrées (x, y) et une variable de sortie z qui sont représentées par des fonctions d'appartenance sous forme triangle, figure (3.2).



**Figure 3.2 : Exemple d'inférence Max- Min (Mamdani).**

Trois règles sont prises en considération pour illustrer les différentes méthodes d'inférence et qui sont données par la forme générale :

Règle1 : Si x est négatif petit (NP) **Et** y est environ zéro (EZ) **Alors** z est positif petit (PP).

**OU**

Règle2 : Si x est environ zéro (EZ) **Et** y est environ zéro (EZ) **Alors** z est environ zéro (EZ).

**OU**

Règle3 : Si x est environ zéro (EZ) **Et** y est positif petit (PP) **Alors** z est négatif petit (NP).

### 3.2.4 Interface de défuzzification :

Les valeurs obtenues lors de la combinaison des règles appliquées aux intervalles flous de la variable de sortie, définies une fonction d'appartenance. Mais, l'organe de commande nécessite un signal de

commande précis (réel) à son entrée ; donc il faut prévoir une transformation de cet ensemble flou en une grandeur précise. Cette transformation est appelée : défuzzification. Plusieurs façons de faire, peuvent être envisagées mais, en pratique, on utilise surtout les deux méthodes suivantes :

- Défuzzification par calcul du centre de gravité.
- Défuzzification par calcul de moyenne de maximum.

En général, c'est la défuzzification par calcul du centre de gravité qui est la plus utilisée.

#### • Défuzzification par calcul du centre de gravité :

Il s'agit de calculer le centre de gravité de la fonction d'appartenance de la variable de sortie. Le calcul du centre de gravité permet bien d'obtenir une seule valeur pour la grandeur de sortie. Son calcul est cependant relativement complexe puisqu'il nécessite le calcul d'une intégrale, ou dans le cas simple de fonctions d'appartenance en raies, d'une somme pondérée. Le calcul de la solution précise  $U_0$ , d'une solution floue à l'aide de la méthode du centre de gravité est défini par :

$$U_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(x) \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i(x)} \quad (3.5)$$

Avec :

$\mu_i(x)$  : Fonction d'appartenance

$x_i$  : Les abscisses

### • Méthode de moyenne de maximum :

Cette méthode génère une commande précise en calculant la moyenne des valeurs pour lesquelles l'appartenance est maximale. Si la fonction est discrétisée, la valeur défuzzifiée est donnée par :

$$U_0 = \frac{\sum_{i=1}^l r_i}{l} \quad (3.6)$$

Avec :

$l$  : le nombre de valeurs quantifiées.

$r$  : valeurs pour lesquelles l'appartenance est maximale.

## 3.3 Propriétés d'un réglage par logique floue :

La commande par logique floue est en pleine expansion grâce à ses avantages qui peuvent être résumés de la manière suivante :

- La maîtrise du système à régler, même avec un comportement complexe.
- La non- nécessité d'une modélisation du processus à contrôler (cependnt, il peut être utile de disposer d'un modèle convenable).
- La non- nécessité d'une modélisation du processus à contrôler (cependnt, il peut être utile de disposer d'un modèle convenable).
- La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur du processus.

Malgré que son application a quelques inconvénients tels que :

- L'impossibilité de démontrer la stabilité en l'absence d'un modèle valable.
- L'approche artisanale et non systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile).

- Le manque des directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification et le choix des fonctions d'appartenance, détermination des inférences et de la défuzzification).

### **3.4 Pourquoi la logique floue dans la commande de l'inter-distance ?**

La commande par logique floue est habituellement appliquée pour commander les procédés où la modélisation est impossible ou non-précise.

- Le véhicule est un procédé fortement non- linéaire. Un régulateur non- linéaire peut donner de meilleures performances à ce système, par rapport au régulateur conventionnel.
- L'implantation de la commande par logique floue est relativement plus facile que les autres méthodes modernes (commande adaptative classique, commande par réseau de neurones).

### **3.5 Contrôle de l'inter-distance entre deux véhicules :**

En termes de sécurité active, le contrôle longitudinal d'un véhicule est d'importance majeure. C'est une tâche complexe qui exige la connaissance de certains paramètres instantanés. L'estimation de ces paramètres est donc déterminante dans la construction d'un contrôleur qui garantit un comportement longitudinal stable du véhicule. Parmi les systèmes de sécurité active les plus importants en phase d'accélération le système de contrôle de l'inter-distance entre le véhicule maître et le véhicule esclave pour le cas traité dans ce travail.

On s'intéressant à développer un algorithme de contrôle de l'inter-distance, pour garder une distance de sécurité entre le véhicule maître et le véhicule esclave. Cet objectif peut être validé par la combinaison de la logique floue avec un régulateur PID.

#### **3.5.1 Commande de l'inter-distance entre deux véhicules par un contrôleur flou de type PID :**

La principale difficulté des régulateurs PID réside dans le réglage des gains afin d'obtenir de bonnes performances surtout lorsque le procédé à commander est d'ordre élevé et à dynamique non linéaire. En effet, le problème dans le réglage des gains devient plus difficile en présence de variations paramétriques et de perturbations externes.

La nature complexe des procédés industriels et la nécessité de maintenir de bonnes performances exigent un réglage en ligne des gains du régulateur PI. Cette opération peut être réalisée par des régulateurs numériques autos ajustables. Dans ce cas, l'ajustement en ligne des paramètres de synthèse est, généralement, basé sur un algorithme de réglage qui fait appel, à chaque période, à la fonction de transfert du procédé, souvent difficile à déterminer avec une précision suffisante. Ceci rend ce principe de contrôle assez sensible aux variations du comportement de procédé industriel. Dans l'objectif de maintenir de bonnes performances face à d'éventuelles variations de la dynamique du procédé, il est évident que le réglage ne peut se faire aisément qu'avec la mesure de l'écart entre les performances réelles et désirées. L'exploitation d'une supervision basée sur la logique floue en vue de l'adaptation des paramètres de synthèse d'un régulateur du type PID permet d'offrir une alternative très

intéressante pour ramener, quelle que soit la situation en ligne, les performances réelles à celles souhaitées. Donc il est possible d'améliorer les performances du système de commande par la combinaison de la logique floue avec un régulateur PID ce qui s'appelle un contrôleur PID-flou.

### 3.5.2 Application :

#### a. Définition :

Afin de mieux comprendre la méthodologie de la logique floue, on va l'appliquée sur un exemple de convoi de véhicules réel (en miniature). Cette application consiste à contrôler l'inter-distance dans les véhicules utilisant une combinaison de la logique floue et un régulateur PID.

Cet exemple est représenté dans la figure suivante :

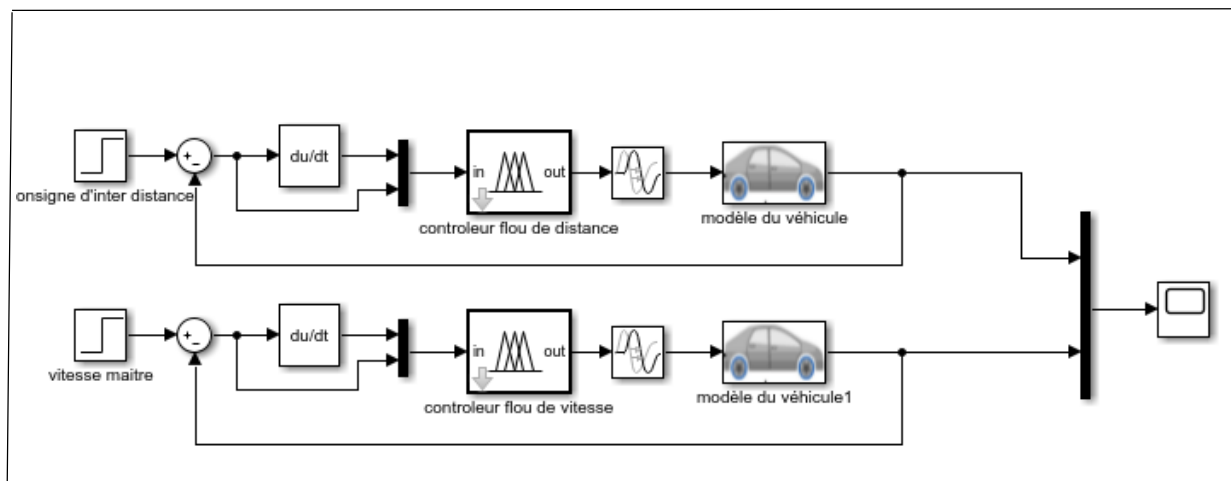


Figure 3.3 : modèle de control d'inter distance avec la logique floue

#### b. Structuration :

Comme en a cité précédemment il y a plusieurs méthodes de réglage par la logique floue. Mais, la plus utile et qui offre de meilleures performances c'est la méthode de MAMDANI et pour cela en va utiliser le modèle d'inférence flou de MAMDANI pour déterminer les deux régulateurs.

Le modèle a deux données d'entrée « l'erreur et la dérivée d'erreur » pour chaque bloc contrôleur flou et une seule variable de sortie (Vitesse ou Distance) A l'aide du bloc « Fuzzy logic toolbox » dans Simulink, on a pu configurer les contrôleurs Logique Flou comme montré dans les figures suivantes :



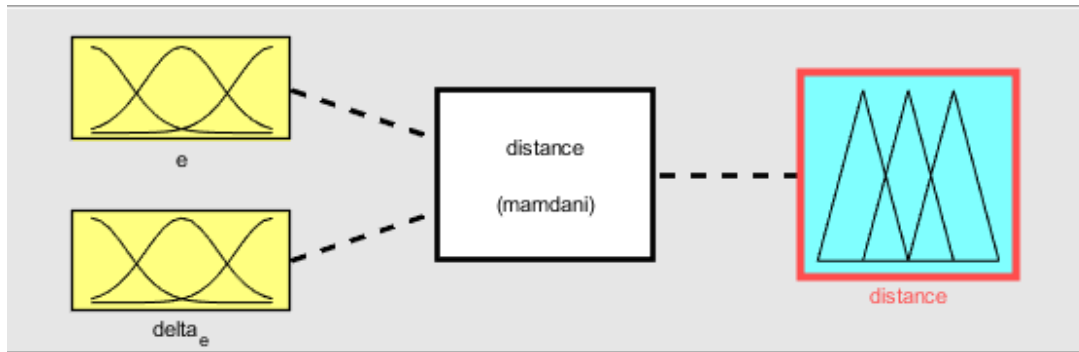


Figure 3.4 : Editeur FIS du contrôleur de distance

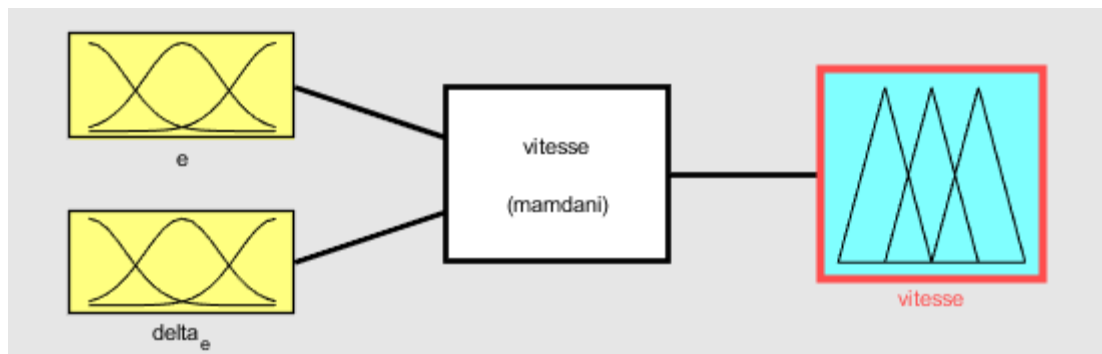


Figure 3.5 : Editeur FIS du contrôleur de vitesse

### c. Définition du comportement du contrôleur flou :

Cette étape concerne l'élaboration de la base de règle du contrôleur à logique Floue du type MAMDANI pour le réglage de vitesse et de distance. En décrivant point par point le comportement du processus et l'action de variation de commande à appliquer, on en déduit la table suivante (table du contrôleur flou de base) qui correspond en fait à la table de règles suivante :

<b>e</b>	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>P</b>
$\Delta e$			
<b>N</b>	<b>NG</b>	<b>N</b>	<b>Z</b>
<b>Z</b>	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>P</b>
<b>P</b>	<b>Z</b>	<b>P</b>	<b>PG</b>

Tableau 6 : table de règles d'interférences

- Les fonctions d'appartenance sont du type triangulaire. L'intervalle d'intérêt des variables d'entrées est subdivisé en trois classes pour l'erreur « e » et en trois classes pour sa dérivée « de/dt » alors que celui de la variable de sortie est subdivisé en cinq classes. Les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie sont illustrées par la figure (3.6) et la figure (3.7) avec :

NG : négatif grand

N : négatif

Z : Zéro

P : positif

PG : positif Grand

- L'intervalle des entrées varie de [0 à 1] pour l'erreur et la dérivée.

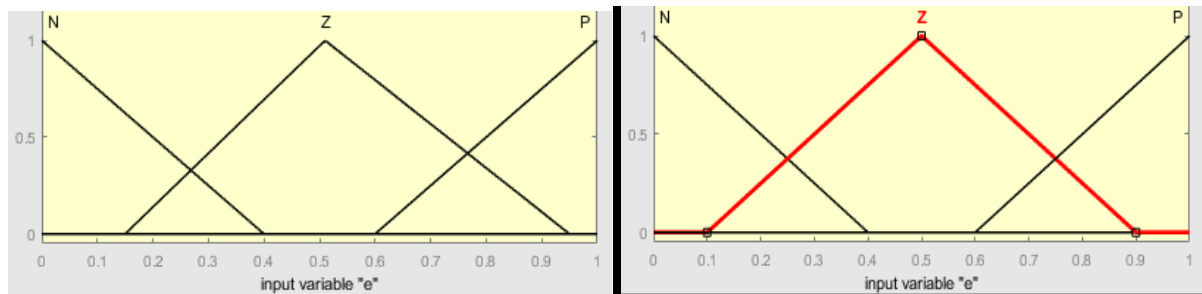


Figure 3.6 : définition des fonctions d'appartenance d'entrées

- L'intervalle pour les sorties :

Distance varie entre [0 à 100]

Vitesse varie entre [0 à 180]

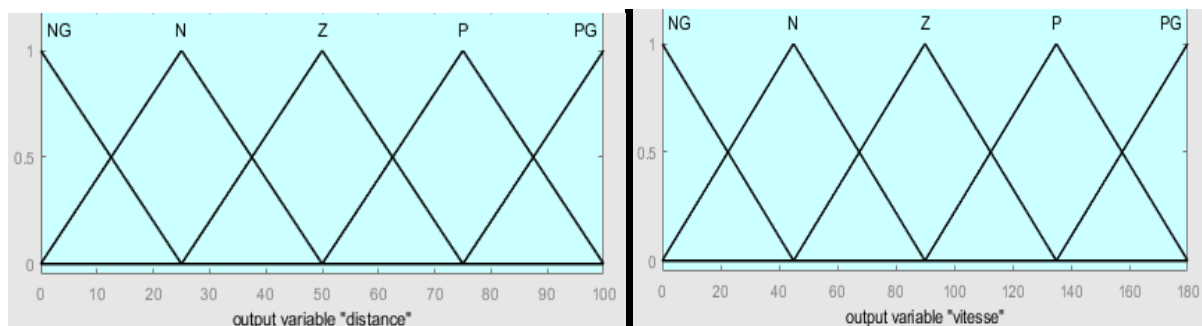
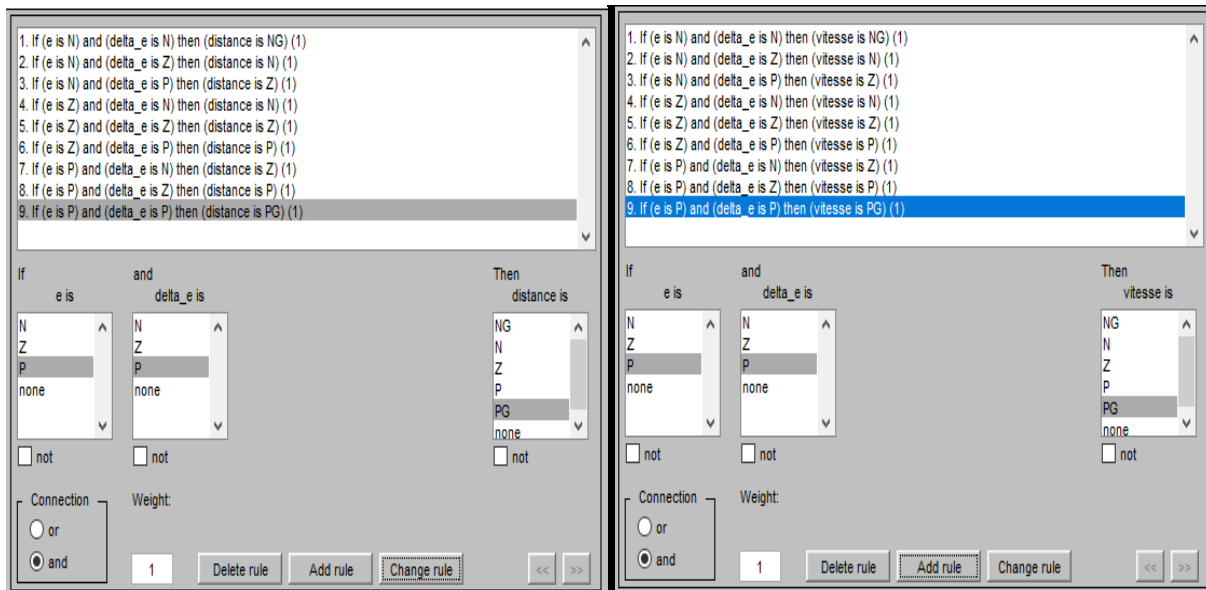


Figure 3.7 : définition des fonctions d'appartenance de sorties

On constate que les fonctions d'appartenance de l'erreur ont une forme asymétrique créant une concentration autour de zéro qui améliore la précision près du point de fonctionnement désiré.

#### d. Evaluation :

- Les règles sont saisies à l'aide d'un formulaire représenté sur la figure suivante :



**Figure 3.8 : Les règles de base**

- Les calculs des fonctions d'appartenances se font comme suit :

• Fonction d'appartenances pour l'erreur « e » :

$$\mu_N(x) = \frac{0.4 - x}{0.4} \quad 0 \leq x \leq 0.4 \quad (3.7)$$

$$\mu_Z(x) = \begin{cases} \frac{x}{0.52} & 0 \leq x \leq 0.52 \\ \frac{0.95 - x}{0.52} & 0.52 \leq x \leq 0.95 \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\mu_P(x) = \frac{x - 0.6}{0.4} \quad 0.6 \leq x \leq 1 \quad (3.9)$$

• Fonction d'appartenances pour la dérivée d'erreur « Delta\_e » :

$$\mu_N(y) = \frac{0.4 - y}{0.4} \quad 0 \leq y \leq 0.4 \quad (3.10)$$

$$\mu_Z(y) = \begin{cases} \frac{y}{0.4} & 0 \leq y \leq 0.52 \\ \frac{0.9 - y}{0.4} & 0.52 \leq y \leq 0.9 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\mu_P(y) = \frac{y - 0.6}{0.4} \quad 0.6 \leq y \leq 1 \quad (3.12)$$

• Fonction d'appartenances pour la sortie « Vitesse » :

$$\mu_{NG}(z) = \frac{45-z}{45} \quad 0 \leq z \leq 45 \quad (3.13)$$

$$\mu_N(z) = \begin{cases} \frac{z}{45} & 0 \leq z \leq 45 \\ \frac{90-z}{45} & 45 \leq z \leq 90 \end{cases} \quad (3.14)$$

$$\mu_Z(z) = \begin{cases} \frac{z-45}{45} & 45 \leq z \leq 90 \\ \frac{135-z}{45} & 90 \leq z \leq 135 \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\mu_P(z) = \begin{cases} \frac{z-90}{45} & 90 \leq z \leq 135 \\ \frac{180-z}{45} & 135 \leq z \leq 180 \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\mu_{PG}(z) = \frac{z-135}{45} \quad 135 \leq z \leq 180 \quad (3.17)$$

• Fonction d'appartenances pour la sortie « Distance » :

$$\mu_{NG}(z') = \frac{25-z'}{25} \quad 0 \leq z' \leq 25 \quad (3.18)$$

$$\mu_N(z') = \begin{cases} \frac{z'}{25} & 0 \leq z' \leq 25 \\ \frac{50-z'}{25} & 25 \leq z' \leq 50 \end{cases} \quad (3.19)$$

$$\mu_Z(z') = \begin{cases} \frac{z'-25}{25} & 25 \leq z' \leq 50 \\ \frac{75-z'}{25} & 50 \leq z' \leq 75 \end{cases} \quad (3.20)$$

$$\mu_P(z') = \begin{cases} \frac{z'-50}{25} & 50 \leq z' \leq 75 \\ \frac{100-z'}{25} & 75 \leq z' \leq 100 \end{cases} \quad (3.21)$$

$$\mu_{PG}(z') = \frac{z'-75}{25} \quad 75 \leq z' \leq 100 \quad (3.22)$$

Prenons le cas suivant pour :  $e=x=0.2$  et  $\Delta_e=y=0.7$  :

$$\mu_N(0.2) = \frac{0.4-0.2}{0.4} = \frac{1}{2} \quad (3.23)$$

$$\mu_z(0.2) = \frac{0.2}{0.52} = 0.38 \quad (3.24)$$

$$\mu_z(0.7) = \frac{0.9 - 0.7}{0.4} = \frac{1}{2} \quad (3.25)$$

$$\mu_p(0.7) = \frac{0.7 - 0.6}{0.4} = \frac{1}{4} \quad (3.26)$$

- Les équations précédentes mènent aux règles suivantes :

- Si « e » est Négative et « Delta\_e » est Zéro alors V et D sont Négatives
- Si « e » est Négative et « Delta\_e » est Positive alors V et D sont Zéro
- Si « e » est Zéro et « Delta\_e » est Zéro alors V et D sont Zéro
- Si « e » est Zéro et « Delta\_e » est Positive alors V et D sont Positives

<b>e</b>			
$\Delta e$	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>P</b>
<b>N</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Z</b>	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>0</b>
<b>P</b>	<b>Z</b>	<b>P</b>	<b>0</b>

**Tableau 8 : Règles d'interférences appliqué dans cet exemple**

- Pour cette évaluation, on a appliqué la méthode Max-Min (Implication de Mamdani) :

- La robustesse de la 1ere règle est :

$$Z_1 = \min(\mu_N(0.2), \mu_z(0.7)) = \min\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} \quad (3.27)$$

- La robustesse de la 2eme règle est :

$$Z_2 = \min(\mu_N(0.2), \mu_p(0.7)) = \min\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{4}\right) = \frac{1}{4} \quad (3.28)$$

- La robustesse de la 3eme règle est :

$$Z_3 = \min(\mu_z(0.2), \mu_z(0.7)) = \min\left(0.38, \frac{1}{2}\right) = 0.38 \quad (3.29)$$

• La robustesse de la 4eme règle est :

$$Z_4 = \min(\mu_z(0.2), \mu_p(0.7)) = \min(0.38, \frac{1}{4}) = \frac{1}{4} \quad (3.30)$$

- Voici ce que ces calculs donnent graphiquement :

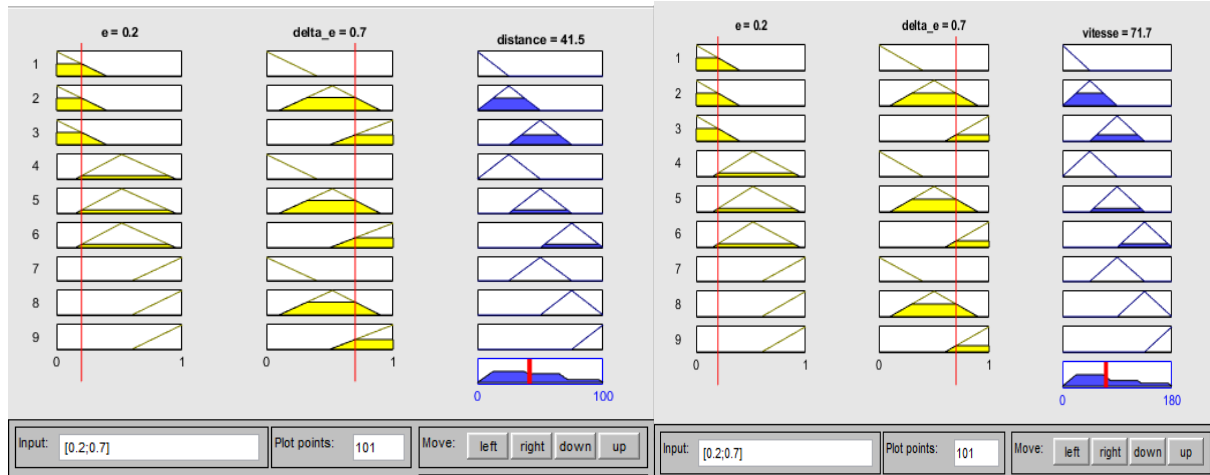


Figure 3.9 : Evaluation graphique de la méthode Mamdani

### e. Défuzzification :

Le modèle de la vitesse ainsi que la distance à défuzzifier sont les suivants :

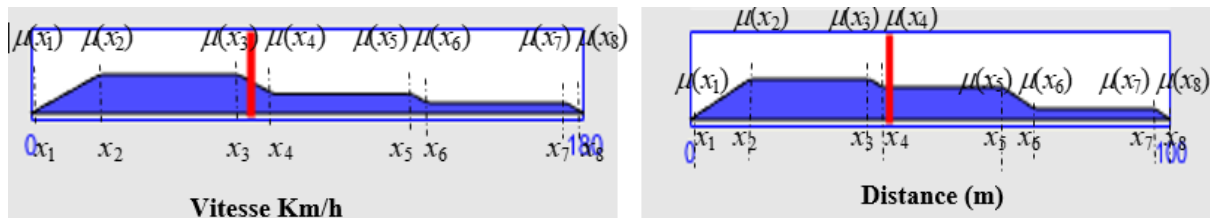


Figure 3.10 : Résultat final à défuzzifier

La méthode de défuzzification la plus utilisée et celle de la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante  $\mu_i(x)$ . L'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante  $\mu_i(x)$  est donnée par la relation suivante :

$$CG_D = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(x) \times x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i(x)} = \frac{\mu_1(x)x_1 + \mu_2(x)x_2 + \dots + \mu_n(x)x_n}{\mu_1(x) + \mu_2(x) + \dots + \mu_n(x)} = 41.5m \quad (3.31)$$

$$CG_v = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(x) \times x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i(x)} = \frac{\mu_1(x)x_1 + \mu_2(x)x_2 + \dots + \mu_n(x)x_n}{\mu_1(x) + \mu_2(x) + \dots + \mu_n(x)} = 71.7 \text{ Km / h} \quad (3.32)$$

### 3.5.3 Résultat et discussion de la simulation :

En appliquant la méthode de la logique floue aux contrôleurs de vitesse et de distance les résultats de la simulation seront les suivants :

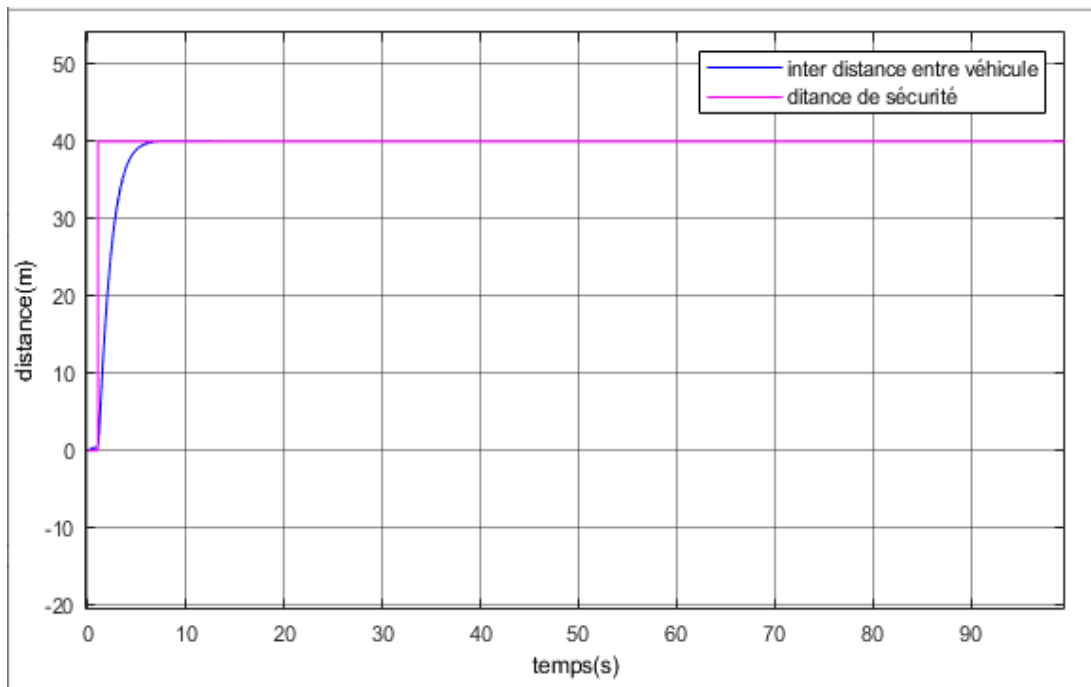
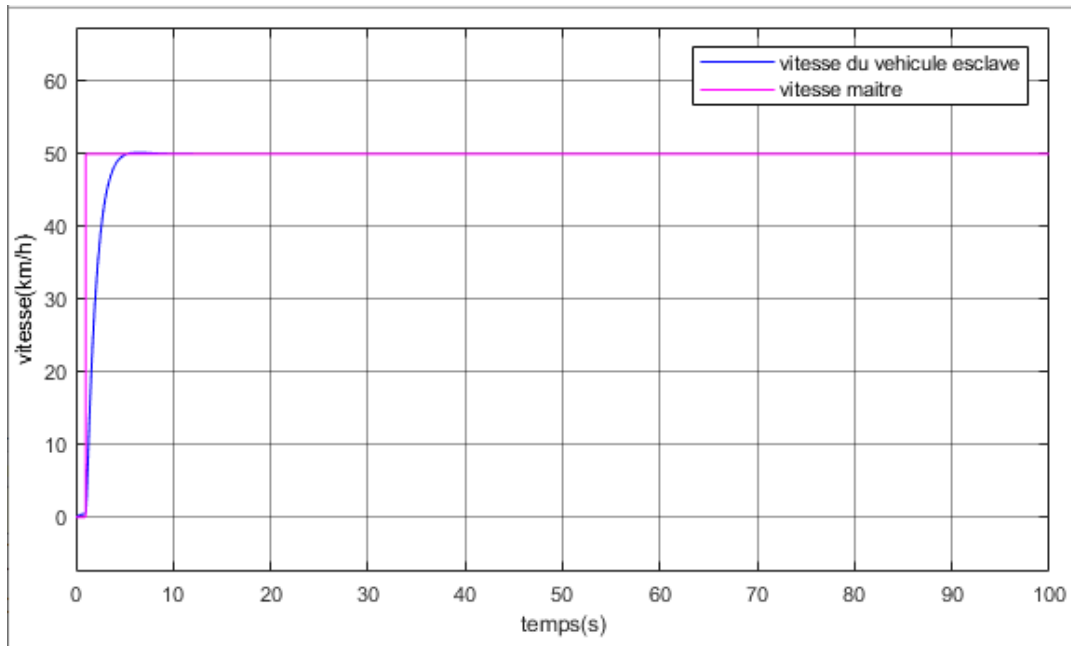


Figure 3.11 : Réponse temporelle du contrôleur PID flou de la distance



**Figure 3.12 : Réponse temporelle du contrôleur PID flou de vitesse**

**- Discussion :**

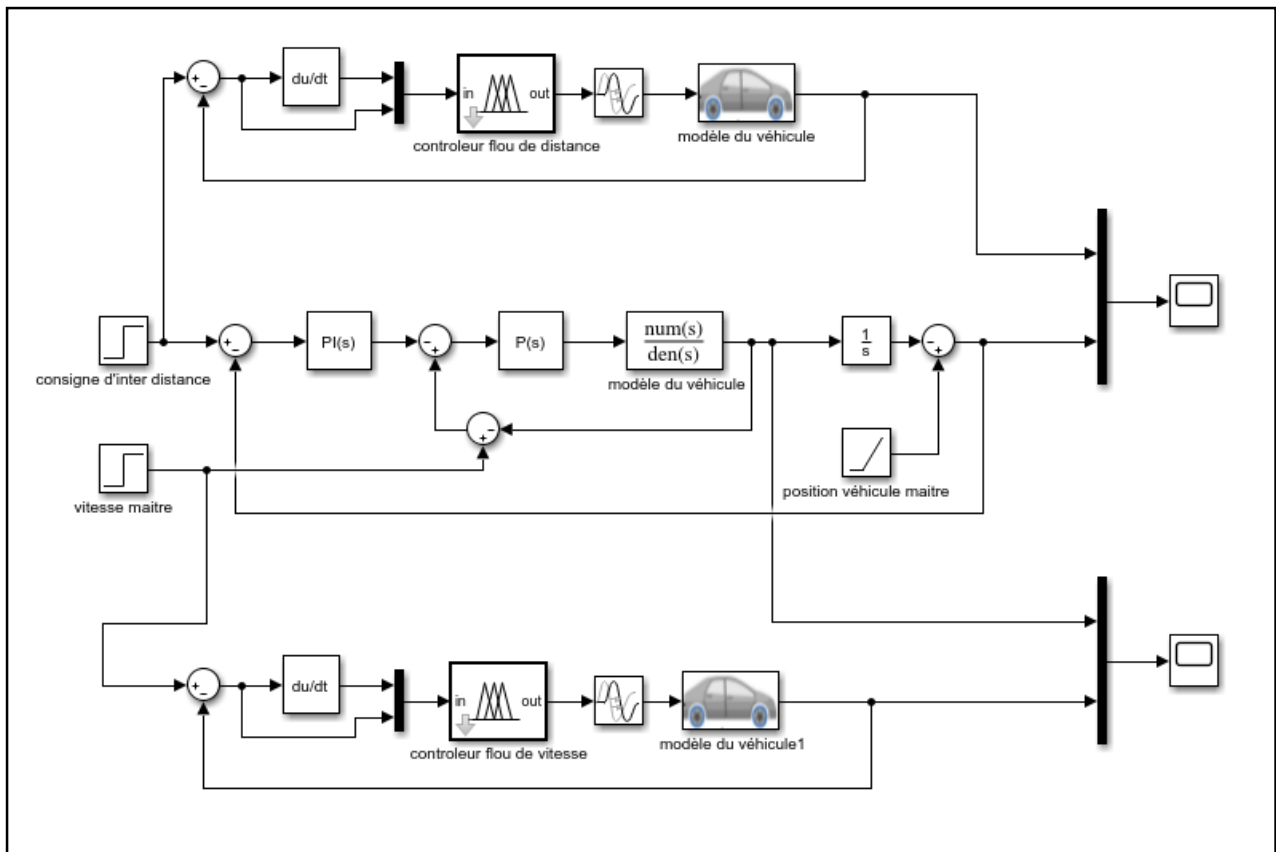
D'après les résultats obtenus de la simulation on remarque que le système à une réponse rapide où le temps de réponse de la distance de sécurité tend vers 6s et sel de la vitesse du véhicule esclave tend vers 5s. Et pour cela on constate que le contrôleur flou montre un bon suivit de consigne.

### **3.6 Etude comparative des deux méthodes :**

L'utilisation du contrôleur PID avec la logique flou a des avantages par rapport à celle du contrôleur PID classique et on cite essentiellement que la logique flou nous permette de numériser le PID flou ou de le modéliser par ordinateur, ce qui n'est pas le cas du PID classique.

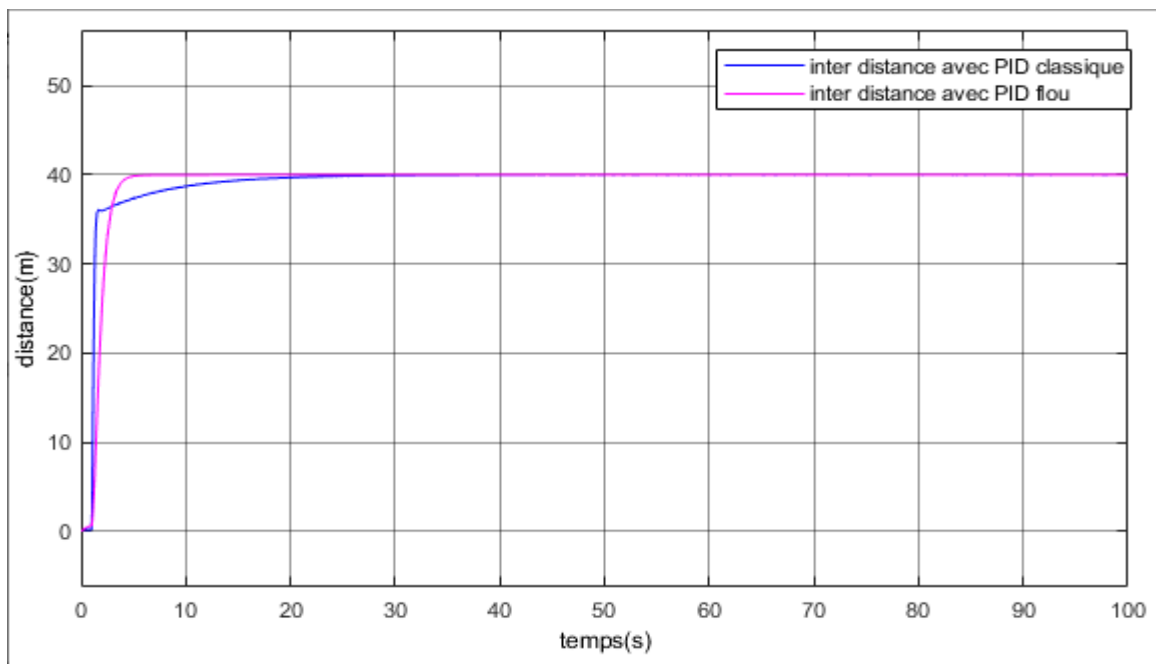
Pour montrer la méthode la plus fiable pour la régulation, on va comparer les résultats précédents aux temps identiques en jumelant les deux schémas des simulations comme la présente les figures suivantes :



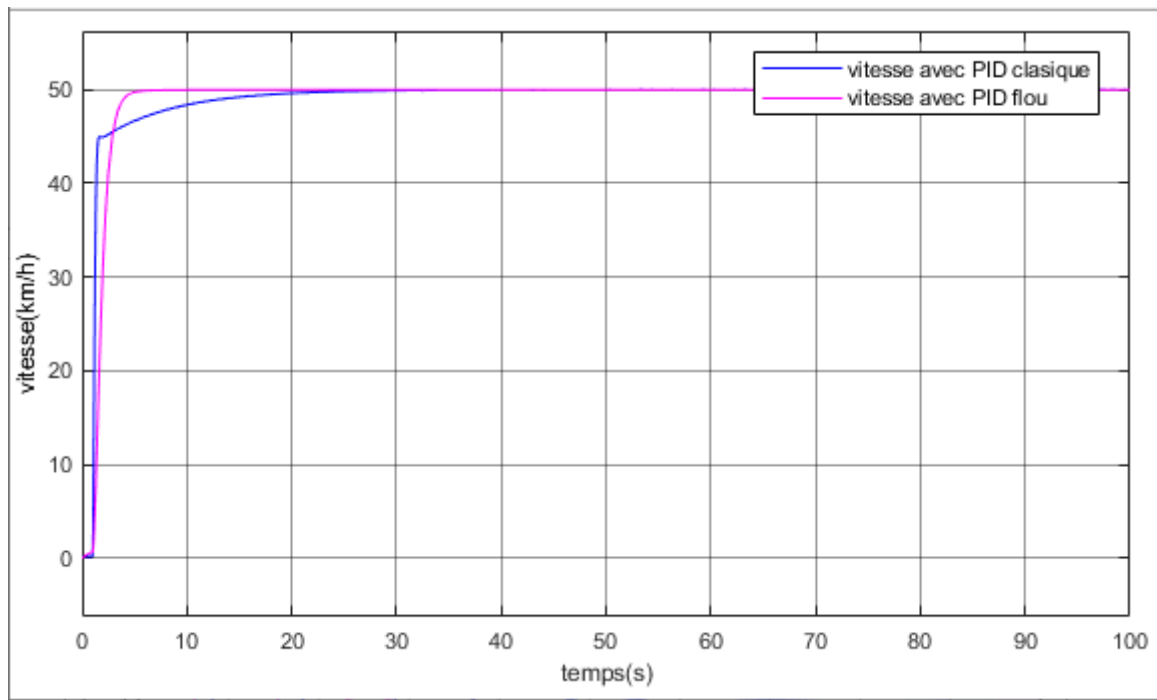


**Figure 3.13 : Comparaison des contrôleurs PID flou et classique de distance**

Les résultats de la comparaison entre les contrôleurs PID classique et PID flou sont représentés dans les figures suivantes :



**Figure 3.14 : Réponse temporelle des contrôleurs PID flou et classique de distance**



**Figure 3.15 : Réponse temporelle des contrôleurs PID flou et classique de vitesse**

**- Discussion :**

En observant les résultats précédents, nous constatons que le comportement des deux régulateurs est presque identique, mais le régulateur Flou présente un net avantage :

- Un meilleur temps de réponse.
- Une réponse rapide.

### **3.7 Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre un nouveau modèle de référence pour la commande. Pour contrôler l'inter-distance entre deux véhicules un contrôleur flou de type PID est utilisé. Ce dernier est simple et nécessite une seule sortie ce qui permet de diminuer le temps de calcul.

On a détaillé les étapes et les méthodes les plus répandus pour la réalisation d'un système de régulation basé sur la logique floue :

- Les fonctions d'appartenances sont le cœur de la logique floue, et ces eux qui mettent la différence entre la logique classique (booléen) et la logique floue.
- L'inférence est ou l'expérience humaine détermine la manière de raisonnement du système.
- L'agrégation c'est ou le système prend le rôle de l'être humain et commence à raisonner et de défuzzifier en suite pour donner des résultats.

Afin de réaliser une étude comparative, nous avons appliqué les deux méthodes de commande classique et floue sur le système de convoi de véhicules. Les résultats de simulation montrent que la commande floue de type PID permet d'assurer la stabilité et la sécurité de véhicule.

Et pour conclure on dit que la logique floue reste encore la plus applicable dans l'industrie.



**CHAPITRE 04 :**  
**Réalisation du contrôleur intelligent i-PI :**

## Introduction :

Dans cette partie de mémoire, nous avons choisi de mettre l'accent sur la commande sans modèle basée sur un filtre algébrique à la place un dérivateur simple afin de pouvoir filtrer les termes additifs incertains tels que les bruits et améliorer la robustesse de la réponse en termes de précision et de rapidité. Le but n'est pas faire une étude synthétisée sur les filtres algébriques mais le but est de comparer cette commande avec les commandes précédemment évoquées. Dans la première partie nous présentons la commande sans modèle ou PI intelligent et dans la deuxième partie nous décrivons la conception du dérivateur utilisée. Une simulation sous Simulink est faite pour mieux illustrer les objectifs de l'approche.

### 4.1 Etude théorique de la commande sans modèle :

La commande sans modèle repose sur une modélisation locale, sans cesse réactualisée, à partir de la seule connaissance du comportement entrée-sortie. Elle se distingue des identifications de type « boîte noire », où l'on recherche un modèle valide sur une plage de fonctionnement aussi large que possible. Cette vision, radicalement nouvelle de l'automatique facilite largement le réglage du correcteur correspondant, dit PI intelligent, ou i-PI. D'où une rupture nette avec les PID classiques.

Résumons à grands traits notre démarche dans le cas mono variable. À l'équation différentielle inconnue, décrivant le comportement entrée-sortie, supposé de dimension finie, linéaire ou non,

$$E(y, \dot{y}, \dots, y^{(a)}, u, \dot{u}, \dots, u^{(b)}) = 0 \quad (4.1)$$

#### A. Le modèle ultra-local

On se restreint, pour simplifier les notations, à un système mono variable, d'entrée  $u$  et de sortie  $y$ . Dans l'ignorance d'un modèle mathématique global, on introduit le modèle « phénoménologique », dit ultra-local, valable sur un court laps de temps,

$$y^{(v)} = F + \alpha u \quad (4.2)$$

Où

- L'ordre de dérivation  $v$ , en général 1, choisi par l'opérateur, est étranger à l'ordre de dérivation maximum de  $y$ , inconnu, dans le système.
- Le paramètre constant  $\alpha$ , fixé par l'opérateur afin que les valeurs numériques de  $\alpha u$  et  $y^{(v)}$  aient même ordre de grandeur, n'a pas a priori de valeur précise.
- $F$ , qui contient toutes les informations « structurelles », dépend de toutes les autres variables du système,  $y$  compris des perturbations, et de leurs dérivées.

L'estimation en temps réel de la valeur numérique de  $F$ , traitée permet de réactualiser à chaque instant.

Nous mettons ici en œuvre (4.2), avec  $v = 1$ , sous la forme

$$\alpha \dot{y} = F - u \quad (4.3)$$

Qui a l'avantage de donner un sens clair de débit entrant à  $F$ , information importante en faisant apparaître la différence  $F - u$ , où  $u$  est le débit sortant. La boucle est fermée, d'après (4.4), par

$$u = F - \alpha \dot{y}^* + \alpha PI(e) \quad (4.4)$$

Où  $PI(e) = K_p e + K_I \int e$  est un correcteur PI, piloté par  $e = y - y^*$

## B. Correcteurs PI intelligents

On obtient le comportement désiré avec, si  $\nu = 1$  en (4.2), le correcteur proportionnel-intégral intelligent, ou i-PI,

$$u = -\frac{F - \dot{y}^* + K_p e + K_I \int e}{\alpha} \quad (4.5)$$

Où

- $y^*$  est la trajectoire de référence de la sortie,
- $e = y - y^*$  est l'erreur de poursuite,
- $K_p, K_I$  sont les gains usuels.

$K_I = 0$  Conduit au correcteur proportionnel intelligent, où i-P,

$$u = -\frac{F - \dot{y}^* + K_p e}{\alpha} \quad (4.6)$$

**Remarque 1 :** Si  $\nu = 1$  en (4.2), on se ramène avec (4.5) ou (4.6) à la stabilisation d'un intégrateur pur. D'où le réglage facile des gains.

## 4.2 Mise en œuvre de la commande sans modèle :

### A. Estimation de F :

Réécrivons (4.5) sous la forme

$$F = -\alpha u + \dot{y}^* - K_p e - K_I \int e \quad (4.7)$$

On atténue les bruits entachant les mesures en intégrant les deux membres de (4.7) sur un court laps de temps  $\delta$ . Il vient :

$$F_{approx} = \frac{1}{\delta} \int_{T-\delta}^T (-\alpha u + \dot{y}^* - K_p e - K_I \int e) d\tau$$

Où

$F_{approx}$  : est une approximation, constante par morceaux, de  $F$ . Cet estimateur s'implante facilement sous la forme d'un filtre linéaire discret.

**Remarque 2 :** Il y a quelques situations où il peut être intéressant d'estimer  $\alpha$  en (4.2).

## B. Trajectoire de référence pour la sortie :

On suppose le système d'entrée  $u$  et de sortie  $y$  à déphasage minimal. On peut alors choisir une trajectoire de référence pour  $y$  satisfaisant les nécessités du système.

### 4.2.1 Pourquoi l'ordre 1 suffit-il ?

Prendre  $\nu = 1$  en (4.2) suffit jusqu'à présent dans toutes les applications. Pourquoi cette heureuse propriété qui simplifie passablement l'implantation numérique du sans modèle ? On l'explique par les frottements. Il leur correspond la présence de la dérivée première  $\dot{y}$  dans l'équation, inconnue, du système, qui évite l'apparition d'une boucle algébrique avec  $\nu = 1$ . Illustrons cette thèse avec le système linéaire du second ordre, à coefficients constants,

$$\ddot{x} + c\dot{x} + 4x = u \quad (4.8)$$

Où

$c\dot{x}$  : représente des frottements. Fournissent des simulations satisfaisantes avec un régulateur i-PI

### 4.2.2 Efficacité des PI classiques

#### A. Discrétisation

Associons au correcteur PI classique

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(\tau) d\tau \quad (4.9)$$

Sa forme « vitesse » :

$$\dot{u}(t) = K_p \dot{e}(t) + K_I e(t)$$

Une discrétisation élémentaire fournit :

$$\frac{u(t) - u(t-h)}{h} = K_p \left( \frac{e(t) - e(t-h)}{h} \right) + K_I e(t) \quad (4.10)$$

Où  $h > 0$  est « petit ».

Si  $\nu = 1$  en (4.2), remplaçons  $F$  par  $\dot{y}(t) - \alpha u(t-h)$  pour les besoins de l'implantation numérique. Alors, (4.6) devient

$$u(t) = u(t-h) - \frac{e(t) - e(t-h)}{h\alpha} + \frac{K_p}{\alpha} e(t) \quad (4.11)$$

(4.10) et (4.11) deviennent identiques si, et seulement si,

$$K_p = -\frac{1}{\alpha h}, \quad K_I = \frac{K_p}{\alpha h} \quad (4.12)$$

**Remarque 3 :** Cette équivalence entre PI et i-P n'est plus valable en temps continu, comme on le voit si  $h \rightarrow 0$ .

Les calculs précédents, qui s'étendent aisément aux PID, expliquent pourquoi, grâce à nos régulateurs intelligents, les correcteurs PI et PID classiques, échantillonnés, donnent des résultats satisfaisants pour des systèmes complexes si leur réglage est approprié. Le bénéfice, considérable, de nos i-PI est, comme déjà dit, un réglage simple.

### 4.3 Expression du filtre algébrique 1:

Soit, pour illustrer ce qui précède,  $x(t)$  un signal dont on veut estimer la dérivée première. Approchons  $x(t)$  autour de  $t = 0$  par le polynôme de Taylor tronqué jusqu'à l'ordre de la dérivation souhaitée, dans notre étude l'ordre est  $N = 1$ . De cette façon, l'identification des coefficients est immédiate :  $a_0$  et  $a_1$  sont des estimateurs en  $t = 0$  du signal et de sa dérivée. Avec les notations classiques du calcul opérationnel, il vient, pour  $t \geq 0$  :

$$p(t) = a_0 + a_1 t, \quad a_0, a_1 \in \mathbb{R}, \quad \text{pour } t \geq 0 \quad (4.13)$$

#### 4.3.1 Calcul des paramètres :

Maintenant on fait une transformation dans le domaine de Laplace de  $p(t)$  avec :

- $a_k = \frac{1}{s}$
- $t = \frac{1}{s^2}$

Alors  $p(t)$  devient  $P(s)$  avec :

$$P(s) = \frac{a_0}{s} + \frac{a_1}{s^2} \quad s = j\omega \quad (4.14)$$

On cherche à éliminer  $a_0$  car on veut estimer  $a_1$  Pour cela on multiplie (4.14) par  $s$

$$s * P(s) = a_0 + \frac{a_1}{s} \quad (4.15)$$

Puis on dérive l'expression obtenue par rapport à  $s$  pour supprimer  $a_0$

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} [sP(s)] &= s \frac{dP(s)}{ds} + P(s) \\ P(s) + s \frac{dP(s)}{ds} &= -\frac{a_1}{s^2} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Avant de revenir au domaine temporel, une multiplication par  $s^{-N}$ , avec  $N > 1, N = 2$  par exemple, de l'équation (4.16) est nécessaire pour obtenir uniquement des intégrales.

$$s^{-2}P(s) + s^{-1} \frac{dP(s)}{ds} = -s^{-4}a_1 \quad (4.17)$$

On revient au domaine temporel en rappelant que  $\frac{d}{ds}$  correspond à la multiplication par  $-t$ , Avec cette dernière équation on a que des intégrateurs, pour revenir au domaine temporel on utilise les propriétés suivantes :

- $(-1)^n \frac{d^n F}{ds} \llbracket t^n h(t) \rrbracket$  où « n » est l'ordre de la dérivée

Le théorème de Borel

- $F_1(s).F_2(s) \llbracket \int_0^t h_1(\tau)h_2(t-\tau)d\tau = \int_0^t h_2(\tau)h_1(t-\tau)d\tau \rrbracket$
- $\frac{1}{s} F(s) \llbracket \int_0^t h(t)dt \rrbracket$

On revient au domaine temporel

- $s^{-1} \frac{dP(s)}{ds} = \int_{t_0}^t -\tau x(\tau)d\tau$
- $s^{-2}P(s) = \int_{t_0}^t (t-\tau)x(\tau)d\tau$
- $-\frac{a_1}{s^4} \llbracket -\frac{1}{3!}t^3 a_1 \rrbracket$

Ainsi l'équation (4.17) au domaine temporel est la suivante :

$$\Leftrightarrow \int_{t_0}^t -\tau x(\tau)d\tau + \int_{t_0}^t (t-\tau)x(\tau)d\tau = -\frac{1}{6}t^3 a_1 \quad (4.17)$$



$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{6 \left[ \int_{t_0}^t \tau x(\tau) d\tau - \int_{t_0}^t \int_{t_0}^{\tau} x(k) dk d\tau \right]}{t^3} \\
&= \frac{6 \left[ \int_{t_0}^t \tau x(\tau) d\tau - \int_{t_0}^t (t-\tau)x(\tau) d\tau \right]}{t^3} \\
&= \frac{6 \int_{t_0}^t (\tau x(\tau) - (t-\tau)x(\tau)) d\tau}{t^3}
\end{aligned} \tag{4.18}$$

Cet exemple permet de comprendre la variété possible d'estimateurs que l'on peut obtenir par cette méthode, en modifiant par exemple l'ordre du polynôme de Taylor ou l'entier N.

## Fonction du filtre algébrique 1:

### 4.3.2 La méthode de trapèze :

Soit  $f$  une fonction continue sur  $I = [a, b]$  on se propose dans cette section d'évaluer l'intégrale  $I(f)$  par la méthode du trapèze

$$I(f) = \int_a^b f(x) dx$$

Cette méthode est basée sur l'interpolation, chaque intervalle de  $I_k = [x_k, x_{k+1}]$ , par un polynôme de degré 1. En d'autres mots, sur chaque intervalle de  $I_k$ , la fonction  $f$  continue et dérivable sur  $[a, b]$ , est substituée par la droite joignant les points  $(x_k, f(x_k))$  et  $(x_{k+1}, f(x_{k+1}))$ . Le schéma numérique de la méthode de trapèze est donné par :

$$I(f) = \frac{\Delta x}{2} [f(a) + f(b)] + \Delta x \cdot \sum_{k=1}^{n-1} f(x_k)$$

### 4.3.3 Calcul de la fonction du filtre algébrique 1 :

Les propriétés du calcul opérationnel permettent de généraliser (4.18) en écrivant tout estimateur algébrique d'une dérivée d'ordre quelconque du signal  $x(t)$  sous la forme  $\int_{t_1}^{t_n} \alpha(t)x(t)dt$ . Où  $\alpha(t)$  est un polynôme temporel caractérisant ledit estimateur. Il vient avec une discrétisation trapézoïdale régulièrement espacée :

$T$  est la période et  $Te$  la période d'échantillonnage soit la formule de trapèze suivante :

$$\int_{t_1}^{t_n} f(t)dt = Te \sum_{k=1}^n f(t_k) - \frac{Te}{2} (f(t_1) + f(t_n)) \quad (4.19)$$

Développement de la formule de trapèze

$$\int_{t_0}^t f(t)dt = \frac{Te}{2} f(t_1) + Te.f(t_1) + \dots + Te.f(t_{n-1}) + \frac{Te}{2}.f(t_n) \quad (4.20)$$

On remplace alors  $f(t)$  par le produit du signal  $\alpha(t)x(t)$

$$\int_{t_0}^t f(t)dt = \frac{Te}{2} \alpha(t_1)x(t_1) + Te.\alpha(t_2)x(t_2) + \dots + Te.\alpha(t_{n-1})x(t_{n-1}) + \frac{Te}{2}.\alpha(t_n)x(t_n) \quad (4.21)$$

$$= \frac{Te}{2} \alpha(t_1)x(1-m) + Te.\alpha(t_2)x(2-m) + \dots + Te.\alpha(t_{n-1})x(-1) + \frac{Te}{2}.\alpha(t_n)x(0) \quad (4.22)$$

La fonction de transfert correspondant à l'expression (4.22), considérée comme définissant un filtre linéaire, numérique et fini, est donc la fonction de transfert correspondante est :

$$H(z) = \frac{Te}{2} \alpha(t_1)z^{1-n} + Te.\alpha(t_2)z^{2-n} + \dots + Te.\alpha(t_{n-1})z^{-1} + \frac{Te}{2}.\alpha(t_n)$$

$$H(z) = \sum_{k=1}^n c_k z^{-(k-1)}$$

$$H(z) = z^{-(n-1)} \sum_{k=1}^n c_k z^{-(k-1)} z^{n-1}$$

**Ainsi « H(z) » est l'expression de la fonction du filtre algébrique d'ordre 1**

$$H(z) = \frac{\sum_{k=1}^n c_k z^{(n-k)}}{z^{n-1}} \quad (4.23)$$

Où  $C_k$  sont les coefficients des  $x(t_k)$  en (4.24). Si on considère, les échantillons  $x(t_k)$  comme les composantes de l'état, le nouvel arrivant  $u$  comme l'entrée et la valeur de l'intégrale à chaque instant comme la sortie, il lui correspond la représentation d'état en discret.

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} x_k + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (4.24)$$

$$y = [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_{n-1} \quad c_n] X_k + 0$$

➤ **Expression de  $\alpha(t)$  :**

$$\alpha(t) = 2(t - t_0) - (n - 1)Te$$

$$\alpha(t_1) = -(n - 1)Te$$

$$\alpha(t_2) = 2Te - (n - 1)Te$$

$$\alpha(t_n) = (n - 1)Te$$

$$\alpha(t_k) = 2(k - 1)Te - (n - 1)Te \quad (4.25)$$

➤ **Expression de  $C_k$  :**

Pour :  $k \neq 1$  et  $k \neq n$

$$C_k = Te \cdot \alpha(t_k)$$

$$C_k = -(n + 1 - 2k)Te^2 \quad (4.26)$$

Pour :  $k = 1$  où  $k = n$

$$C_k = \frac{Te}{2} \cdot \alpha(t_k)$$

$$C_k = -(n + 1 - 2k) \frac{Te^2}{2} \quad (4.27)$$

## 4.4 Simulation :

- Pour la simulation on utilise :

$$\dot{y} = F + u$$

Soit l'iPI :

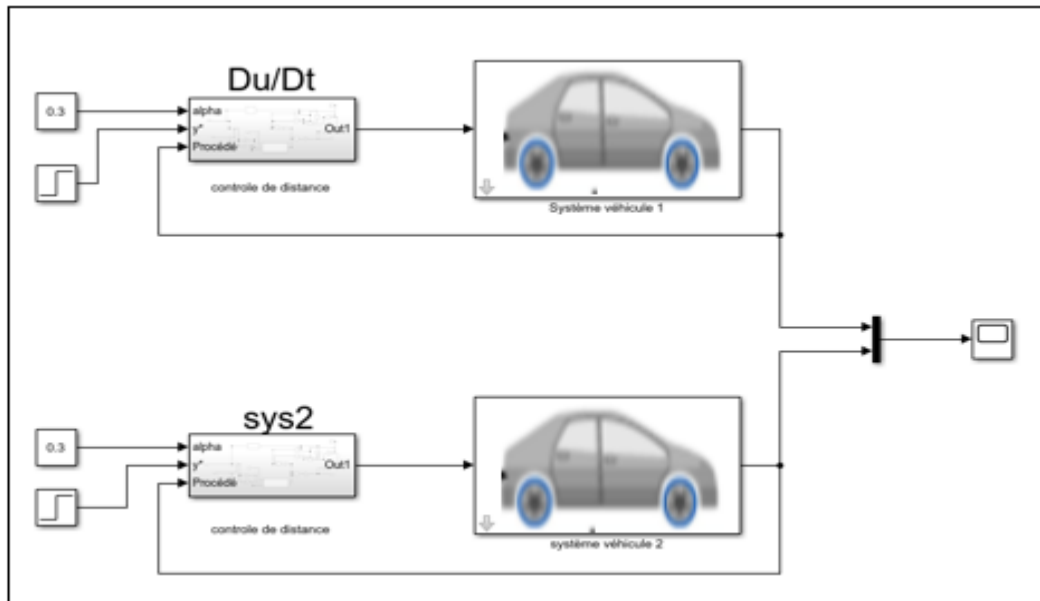
$$u = -[F]_e + y^* + PI(e)$$

Où :

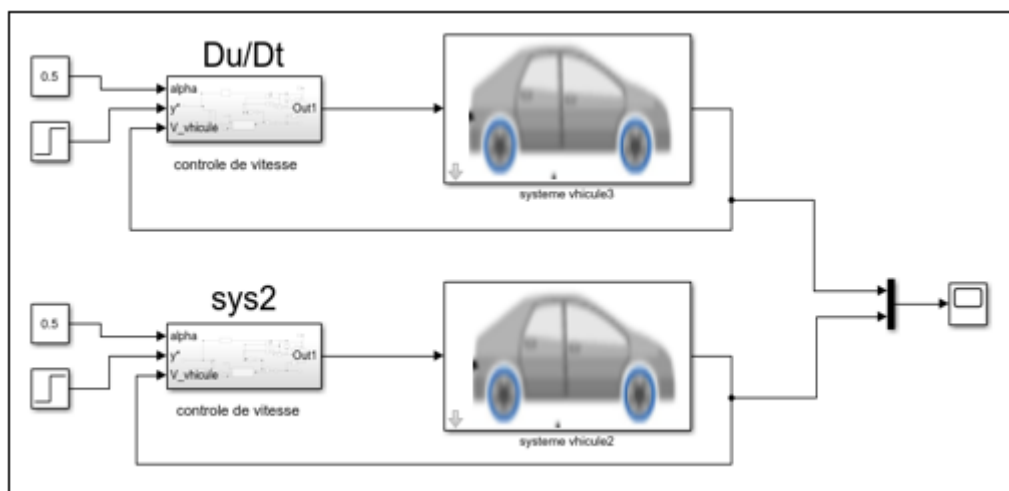
- $[F]_e = [\dot{y}]_e - u$
- $y^*$  Est la trajectoire de référence.
- $e = y - y^*$
- $(e)$  Est un  $PI$  usuel.

### 4.4.1 Etude synthétisé des contrôleurs i-PI :

Pour effectuer l'analyse de la synthèse des contrôleurs intelligents d'inter-distance on doit d'abord jumeler les deux modèles de distance et vitesse contenant chacun son propre estimateur l'un d'eux contient un dérivateur simple  $du/dt$  et l'autres contiennent l'estimateur algébrique 1 comme démontrer sur la figure ci-dessous.

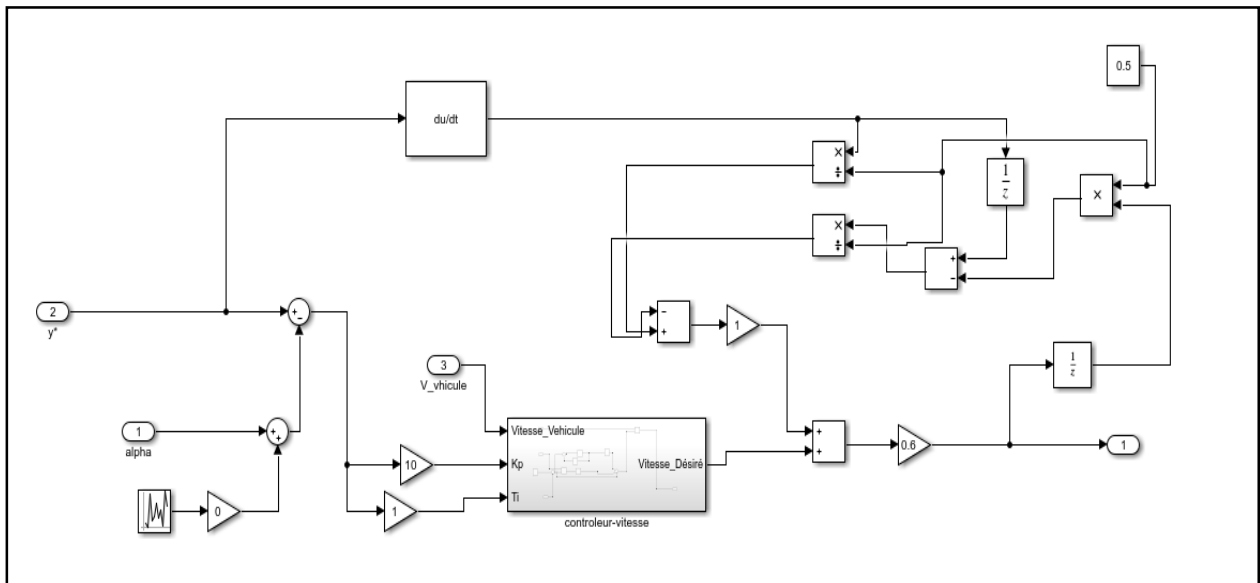


**Figure 4.1 : Modèle Simulink de la synthèse des contrôleurs de distance**



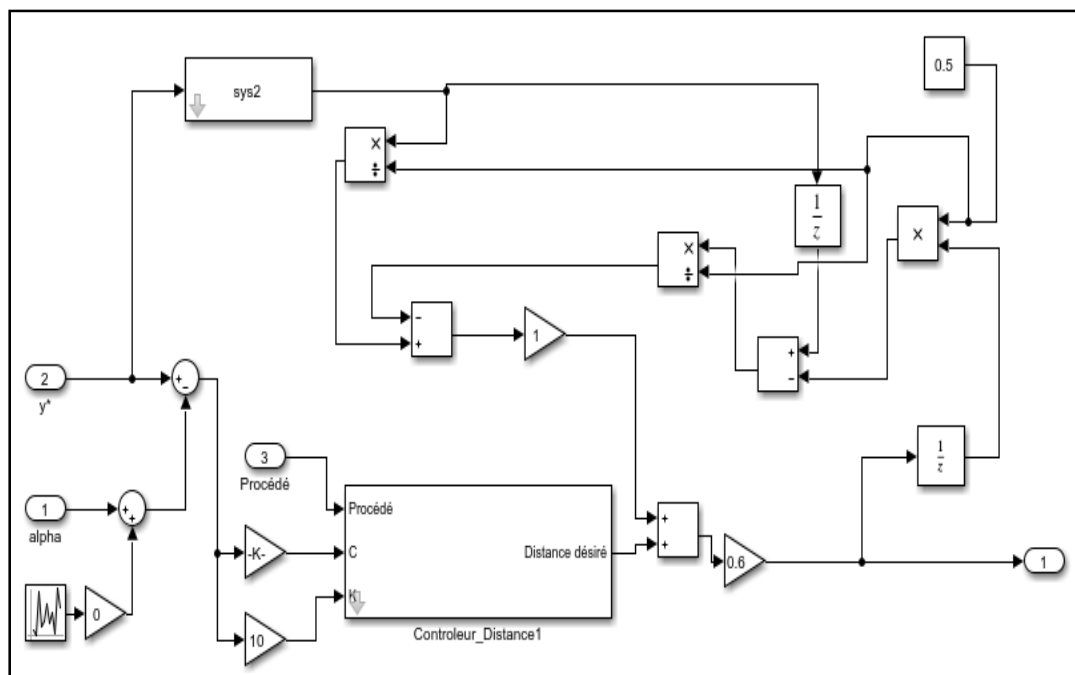
**Figure 4.2 : Modèle Simulink de la synthèse des contrôleurs de vitesse**

- Le bloc de l'iPI contrôleur de vitesse est comme suit :



**Figure 4.3 : modèle Simulink d'un iPI contrôleur de vitesse**

- Le bloc de l'iPI contrôleur de distance est comme suit :



**Figure 4.4 : modèle Simulink d'un iPI contrôleur de distance**

## 4.4.2 Résultat :

- Le résultat de la synthèse affiché sur le scope sous forme de réponse temporelle est sur les figures suivantes :

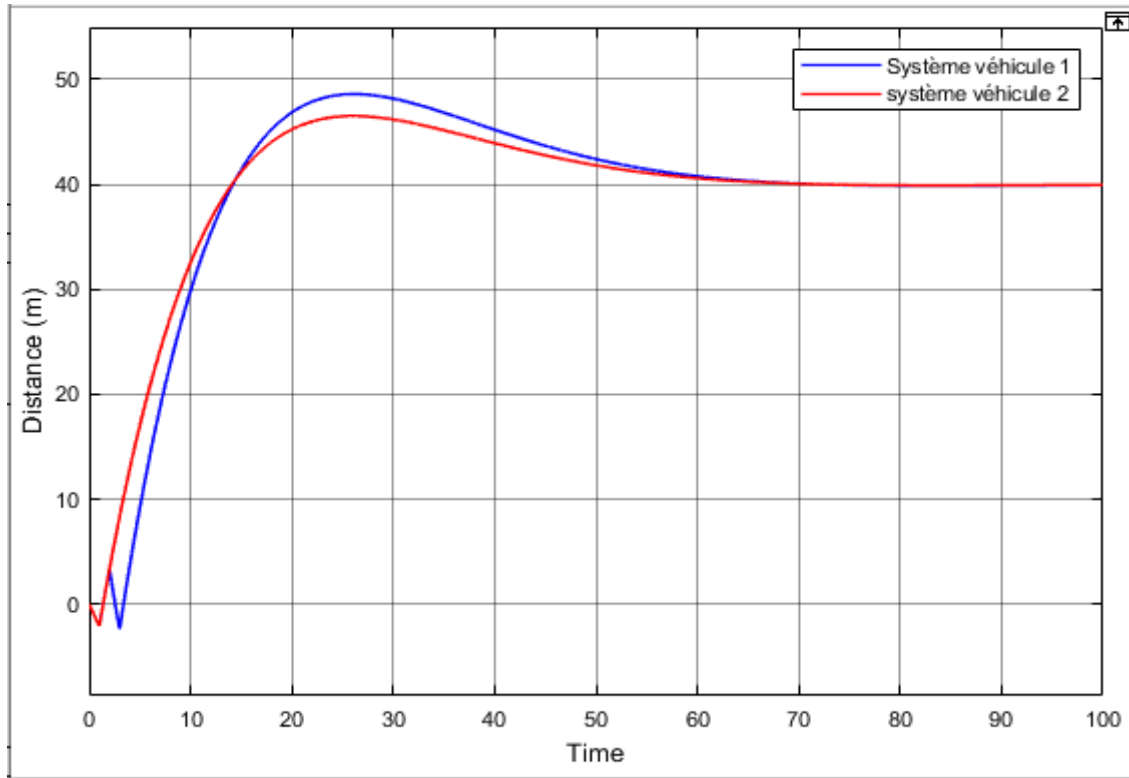
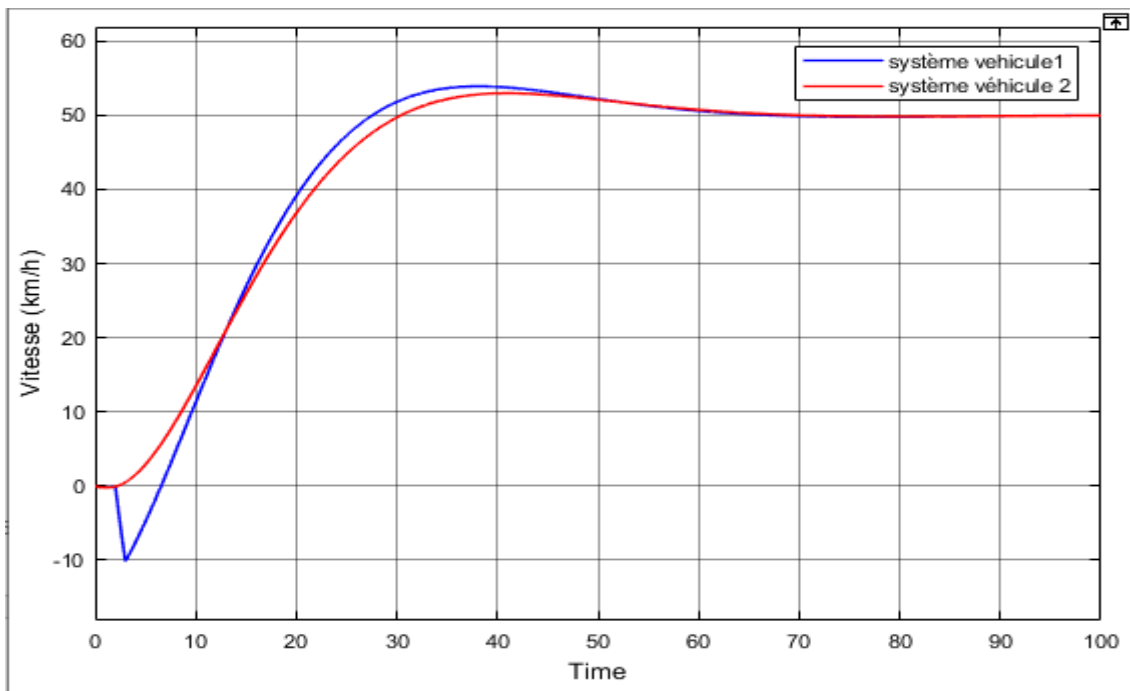


Figure 4.5 : Réponse temporelle des contrôleurs i-PI de distance



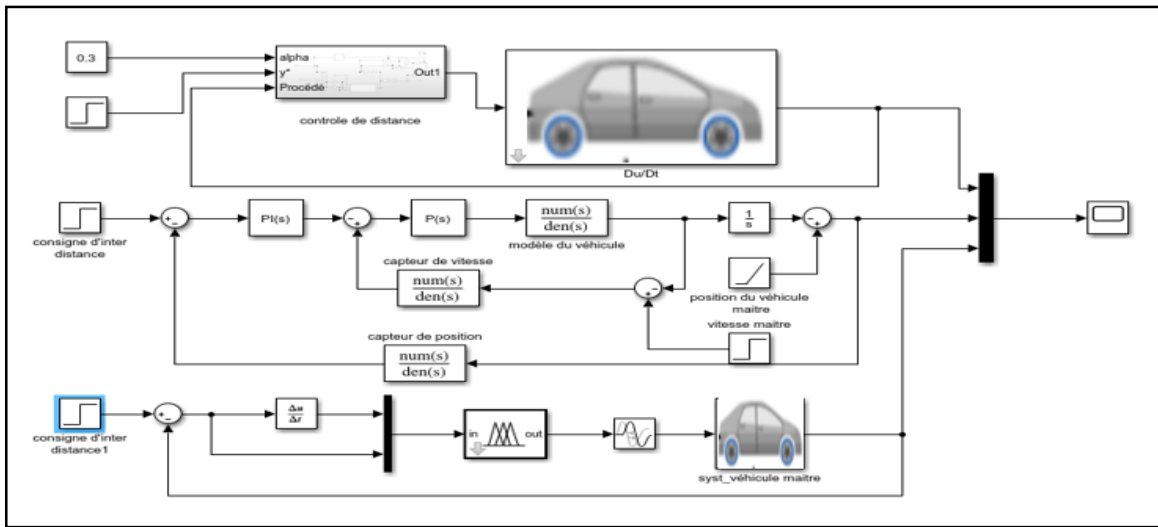
**Figure 4.6 : Réponse temporelle des contrôleurs i-PI de vitesse**

**- Discussion :**

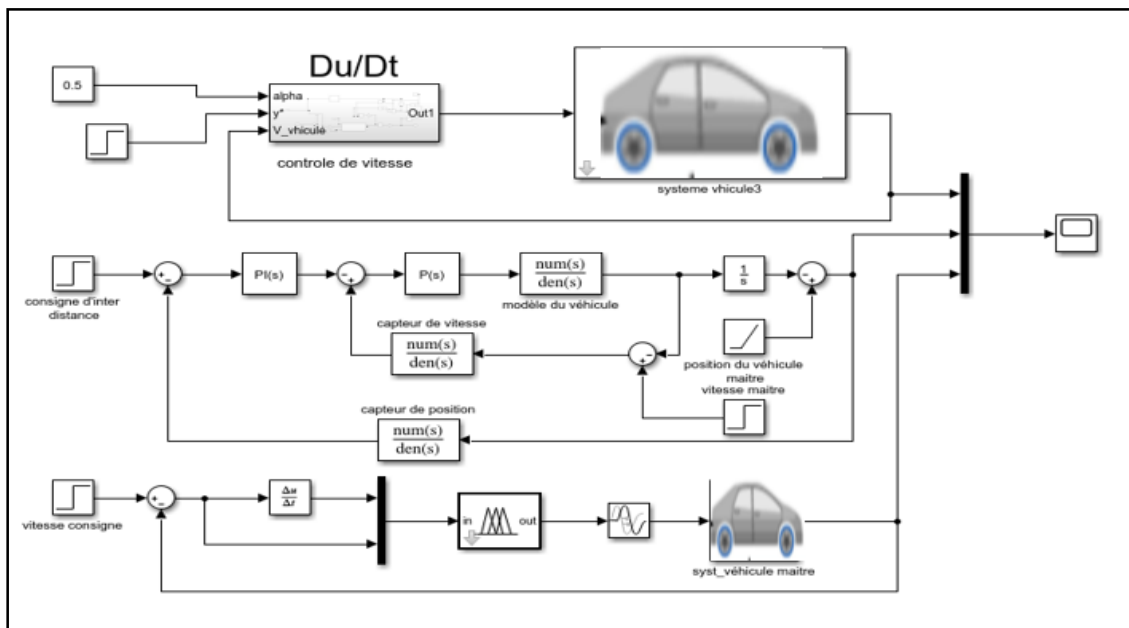
D'après les résultats obtenus de la simulation en remarque que le système de véhicule 2 qui le système qui utilise le filtre algébrique présente une meilleure réponse par rapport au système qui utilise un dérivateur simple dans notre cas c'est le système véhicule 1.

**4.3. Etude comparative des contrôleurs :**

Pour procéder à la comparaison des contrôleurs iPI, PID, PID Flou on a jumelé les trois schémas des simulations précédentes aux instants identiques, comme la montre les figures suivantes :

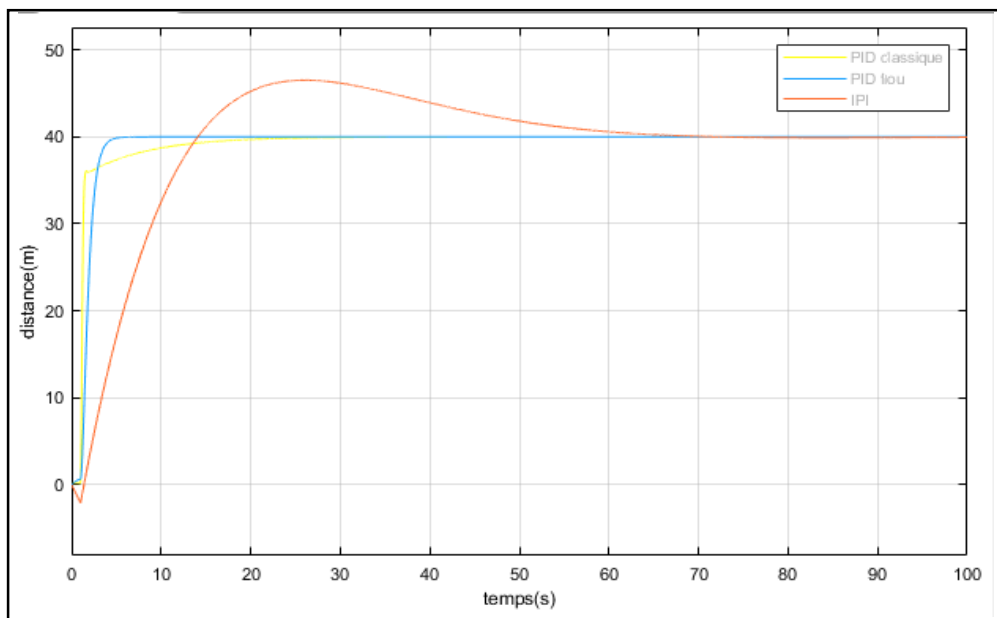


**Figure 4.7 : Comparaison des contrôleurs iPI, PID flou et classique de distance**

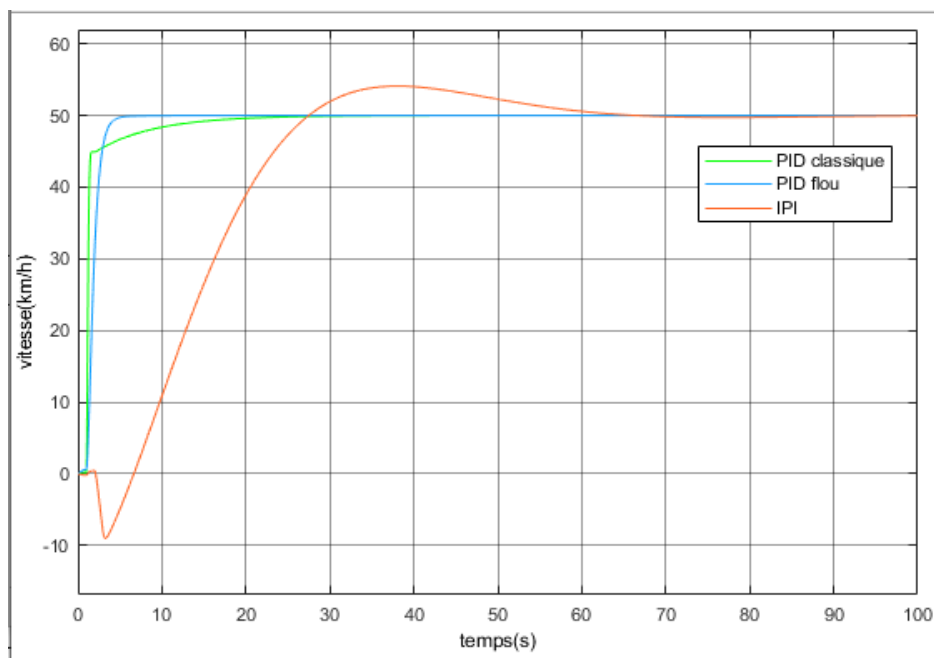


**Figure 4.8 : Comparaison des contrôleurs iPI, PID flou et classique de vitesse**

Les résultats de la comparaison entre les régulateurs sont représentés sur les figures suivantes :



**Figure 4.9 : Réponse temporelle des régulateurs de distance**



**Figure 4.9 : Réponse temporelle des régulateurs de vitesse**



## 4.5 Conclusion :

Le modèle Simulink d'un contrôleur intelligent est constitué de 3 parties principales qui sont : le contrôleur, le processus sans modèle et l'estimateur.

L'estimateur et celui qui nous donnent la vitesse désirer contrôler par les paramètres de  $K_p$  et  $T_i$ . Et le processus sans modèle et la partie intelligente de l'i-PI.

Dans ce chapitre on a fait une étude sur le contrôleur PI intelligent et l'élaboration d'une commande sans modèle. Ensuite on a appliqué les deux méthodes de contrôle à disposition (iPI utilisant un dérivateur simple  $du/dt$ , l'i-PI utilisant un filtre algébrique 1 sur un système de véhicule, afin de faire une étude de synthèse entre eux. Après la simulation, on conclut que :

- Le filtre algébrique 1 donne de meilleur temps de réponses par rapport aux contrôleurs utilisant un dérivateur simple.



# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Le but de ce projet consiste à avoir une distance de sécurité dans un convoi de véhicule, en utilisant des techniques de control d'inter-distance intelligentes.

En premier lieu, on a décrit la modélisation dynamique d'un véhicule ainsi que les principaux éléments qui interviennent dans la dynamique du véhicule.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté un modèle de control d'inter distance, qui consiste à implémenter un système de control basé sur des impédances virtuelles. Ce qui permet de doter les véhicules d'une autonomie permettant de réaliser l'approche d'interaction virtuelle.

Dans le troisième chapitre, nous avons apporté une amélioration au contrôleur d'inter-distance en utilisant une commande floue de type PID. Ce régulateur flou, est synthétisé de type Mamdani pour le réglage de vitesse et de distance. Ensuite, nous avons réalisé une comparaison entre les deux commandes (régulateur PID classique et régulateur par la logique floue) afin de vérifier les conditions de robustesse. Nous avons donc mis en évidence le comportement de la régulation de vitesse et de distance de ces deux types de régulations.

En dernier lieu, nous avons développés un contrôleur iPI pour le control de vitesse et de distance, plusieurs essais ont été établis. Nous avons également comparé le contrôleur iPI aux contrôleurs PID classique et Flou.

Enfin, nous pourrions conclure que d'après les résultats obtenus de la simulation sous MATLAB sont des résultats satisfaisants une fois la stabilité, la rapidité ainsi que la précision du véhicule. En effet le projet a réussi à concevoir un système de pilotage automatique basé sur des commandes intelligentes pour le control d'inter-distance, de telle sorte que les commandes intelligentes fonctionnent de manière très efficace pour les systèmes dynamiques non linéaires.

# Bibliographie

- [1] Braekstone M. et McDonald M., "Car-Following: a historical review", Transportation Research Part F 2, Pergamon, 2000.
- [2] Bouchikhi Hocine & Brahimi Benyahia, « Contrôle d'inter distance d'un convoi de véhicules », Projet de fin d'étude, université de Dr. Tahar Moulay de Saïda 2018.
- [3] MOUHCINE AKKI. « Commande de l'inter distances dans un convoi de véhicules autonomes par l'imposition d'impédances virtuelles d'interaction », départ. Génie électrique, Univ du QUÉBEC, Avril 2010.
- [4] H. Bühler, "Réglage par logique floue", Presse polytechnique et universitaire, Romande, Lausanne (Suisse), 1994.
- [5] John-Jairo Martinez, Carlos Canudas de Wit. "A Safe Longitudinal Control for Adaptive Cruise Control and Stop-and-Go Scenarios ". IEEE Transactions on control systems technology, Vol. 15, No. 2, Mars 2007.
- [6] M. Kadjoudj, N. Golea1 & M. E. Benbouzid, "Fuzzy Rule – Based Model Reference Adaptive Control for PMSM Drives", SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 4, No. 1, June 2007.
- [7] Abdelkader Merah « Contribution à l'amélioration de la sécurité et la stabilité d'un véhicule électrique à l'aide des systèmes de contrôle latéral et longitudinal » Thèse de doctorat, université Docteur Tahar Moulay Saïda, 2016.
- [8] Ghania Boukerche «Etude et Synthèse d'un Contrôleur PI et Application», Projet de fin d'étude, université Badji Moukhtar d'Aannaba 2017.
- [9] Prof. F. Mudry «Ajustage des Paramètres d'un Régulateur PID», Note d'application, institut d'automatisation d'industrielle (laboratoire d'automatique).
- [10] Cédric Join. Une approche algébrique pour la pratique de l'estimation, du diagnostic, de la commande et de la finance. Automatique / Robotique. Université de Lorraine, 2012.
- [11] Dif Nihed & Triki Razika, «Synthèse d'un contrôleur PID pour la commande d'une MCC», Projet de fin d'étude, Université Larbi Ben M'hidi –Oum El Bouaghi 2011.
- [12] Pierre Avanzini. « Modélisation et commande d'un convoi de véhicules urbains par vision ». Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2010.
- [13] Salim Maakroun, « Modélisation et simulation dynamique d'un véhicule urbain innovant en utilisant le formalisme de la robotique », Thèse Doctorat, départ. Automatique, Univ de Nantes, le 02/12/2011.
- [14] K. Chen, A. Bouscayrol, W. Lhomme, "Energetic Macroscopic Representation and Inversion-based control: Application to an Electric Vehicle with an electrical differential", Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 6, no.1, Juin 2008.

[15] Radhia CHIBANI, «Approches Neuronales pour la Synthèse, la Supervision et l'Optimisation des Performances de Régulateurs PID », Thèse de doctorat, Génie Electrique, Université de Sfax École Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 2010.

[16] Shin-ichiro SAKAI, Satoshi HARA & Yoichi HORI, "Experimental Study on EV's Lateral Motion Stabilization with Fast Feedback Control of 4 In-wheel Motors", Proc. 9th European Conference on Power Electronics and Applications, Graz, Austria, 2001.

[17] John Jairo Martinez Molina, « Commande de l'inter-distance entre deux véhicules », Thèse Doctorat, départ. Automatique, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, le 14/03/2005.

[18] Boualem Badji, « Caractéristique du comportement non linéaire en dynamique du véhicule », Thèse Doctorat, départ. De l'automatique, Univ Belfort-Montbéliard, le 15/12/2009.

[19] S. Labiod, "Contribution à la commande adaptative floue des systèmes non linéaires". Thèse de Doctorat, ENP.2004

[20] BERNADETTE BOUCHON-MEUNIER, « La logique floue et ses applications », Edition Addison-Wesley France SA 1995.

[21] Andrea-Novel, B, Boussard, C, Fliess, M, el Hamzaoui, O, Mounier, H,& Steux, B. (2010), « Commande sans modèle de vitesse longitudinale d'un véhicule électrique », in 6e Conf. Internat. Francoph. Automatique, Nancy.

[22] Bauer M, Tomizuka M. « Fuzzy logic traction controllers and their effect on longitudinal vehicle platoon systems ». California Path Report, UCB-ITS-PRR- 95-14, 1995.

[23] Samer Riachy, Yara Bachalany, Mamadou Mboup, Jean-Pierre Richard, « Différenciation numérique multivariable I : estimateurs algébriques et structure », Sixième Conférence Internationale Francophone d'Automatique Nancy, France, En (2010).