

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2019

Faculté: Sciences de l'Ingénierat
Département: Electronique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

Intitulé :
Control intelligent d'inter distance d'un convoi de véhicules

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electronique

Spécialité : Instrumentation

Par :

BOUGHELOUM LOUBNA

DEVANT Le JURY

Directeur de memoire:	M.BEKAIK	Dr	UBM Annaba
Président :	H.KHERFANE	MCA	UBM Annaba
Examineurs:	F.ARBAOUI	MCA	UBM Annaba
	K.MANSOURI	MCA	UBM Annaba

Remerciements

Je remercie Dieu qui m'a donné la volonté et le courage pour la réalisation de ce travail.

De m'avoir guidé dans le chemin de la science.

Je remercie chaleureusement Monsieur « BEKAÏK Mounir » pour son encadrement de grande qualité. Sa rigueur ainsi que son esprit critique m'ont toujours permis d'avancer dans les bonnes directions. Pour son attitude exemplaire tout au long de la réalisation de ce travail. D'avoir éveillé en moi la passion de ce domaine.

Je remercie mon ami Mohamed pour son investissement corps et âme, pour ses encouragements au parcours de mes études, pour les valeurs qu'il m'a apprises.

Je remercie les membres du jury qui ont fait l'honneur d'évaluer ce travail.

Je présente mes sincères remerciements à mon ami Aniss, qui m'a tant aidé durant ces derniers mois.

Je remercie ma famille, mes collègues, et mes amis spécialement : Abdou, Ahmed, Nasro, Nour, Maïssa et Nesrine.

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

Dédicaces

C'est avec profonde gratitude que Je dédie ce modeste travail :

A Mes chers parents qui m'ont toujours encouragé et aidé dès mes premiers pas d'études jusqu'à ce jour. Pour leurs sacrifices qui n'ont cessés de me déployer, pour leurs conseils judicieux, Que dieu leurs procure bonne santé et longue vie.

A ma très chère sœur Mouna , qui a toujours été présente pour moi, pour le soutien et l'appui moral qu'elle m'a apporté, et pour les valeurs qu'elle m'a apprises.

A ma sœur Wafa, et mes frères : Nabil et Imed, pour leurs affections, compréhensions, patiences et leurs soutiens.

A mes sœurs de cœur : Sonia et Anissa, pour leurs présences malgré la distance.

A mon cousin Walid et ma cousine Ilham, pour le courage et les conseils qu'ils m'ont procuré durant cette année.

A toute l'équipe de FERRIAL spécialement l'équipe des pompiers, pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Bougheloum Loubna

الملخص:

ان حوادث الطرق هي السبب الرئيسي للوفاة ، وعادة ما تكون هذه الزيادة بسبب السرعة. من أجل السلامة على الطرق ، تم تصميم أنظمة ذكية للحفاظ على سرعة ثابتة ومسافة آمنة بين المركبات في القافلة. يركز هذا العمل على تركيب نظام التحكم بين المسافات باستخدام الأساليب والخوارزميات الذكية. هناك العديد من التقنيات للتحكم في السيارة ، من بين هذه التقنيات المطبقة في هذا المشروع:
وحدة تحكم PID بناء على نموذج فيزيائي "نابض-مثبط"
وحدة تحكم PID ضبابي
وحدة تحكم PI ذكية
قدمت خوارزميات التحكم المقترحة تتبعًا قويًا ومستقرًا في نظام التحكم بين المسافات
الكلمات المفتاحية : أنظمة ذكية ، تحكم بين المسافات ، وحدة تحكم iP ، وحدة تحكم PID ، وحدة تحكم PID ضبابي

Résumé :

Les accidents de la route sont la première cause de mortalité, cette augmentation est due généralement à un excès de vitesse. 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.

Ce travail s'intéresse à la synthèse d'un système de contrôle d'inter distance 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.

Les algorithmes de commande proposés, fournissent un suivi robuste et stable dans le système de contrôle d'inter distance.

Mots clé : Systèmes intelligent, Control d'inter distance, Contrôleur PID, Contrôleur PID Flou, Contrôleur iPI.

Abstract:

Road crashes are the leading cause of death, this increase is usually due to speeding. For road safety, intelligent systems have been designed to keep a constant speed and a safe distance between vehicles in a convoy.

This work focuses on the synthesis of an inter-distance control system using intelligent methods and algorithms. There are several techniques for ordering 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, inter-distance control, A PID controller, A fuzzy PID controller, An intelligent PI controller.

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	i
Symboles	i
Introduction Générale	1
Chapitre 1 Positionnement du problème	4
1.1.Le système mécanique	5
1.2.Modèle du système	6
1.2.1. Caractéristique du système	6
1.3.Schéma du modèle mécanique.....	8
1.3.1. Description des paramètres.....	8
1.4.Modèle dynamique	10
1.5.Conclusion	14
Chapitre 2 Stratégie de commande	15
2.1. Modèle de distance de sécurité	16
2.2.Contrôle de l'inter distance	17
2.3.Système de contrôle de l'inter distance basé par amortisseur : Stratégie de commande	19
2.3.1. Contrôleur PID	19
2.3.2. Réglage des régulateurs PID	20
2.3.3. Régulateur PID d'inter-distance	22
2.4.Conclusion	29
Chapitre 3 La Logique flou	30
3.1.La logique flou	31
3.1.1. Fuzzification	32
3.1.2. Interférence floue	33
3.1.3. La défuzzification	34
3.1.4. Base de connaissance (Base de règles).....	35
3.2.Application de la logique floue	35
3.3.Contrôleur Flou.....	35
3.3.1. Commande PID floue	35

3.3.2. Application	36
a. Définition.....	36
b. Structuration	37
c. Base de règles et fonction d'appartenance	38
d. Evaluation.....	39
e. Défuzzification	43
3.3.3. Résultat et discussion de la simulation	44
3.4. Etude comparative des deux méthodes	44
3.5. Conclusion	46
Chapitre 4 Contrôleur PI intelligent	48
4.1. Réalisation du contrôleur intelligent iPI	49
4.1.1. Etude théorique de la commande sans modèle	49
4.1.2. Algorithme de la commande sans modèle	51
4.1.3. Equivalence entre PI classique et i-P	53
4.2. Simulation	54
4.2.1. Résultat.....	56
4.2.2. Variation du coefficient alpha	57
4.3. Etude comparative des contrôleurs	58
4.4. Conclusion	61
Conclusion Générale	62
Bibliographie.....	64

Liste des figures

Figure 1 : Schéma mécanique d'une voiture.....	5
Figure 2 : Modélisation du système	6
Figure 3 : Modèle dynamique de la Roue	7
Figure 4 : Degrés de liberté des mouvements du modèle	8
Figure 5 : Les forces exercées sur le véhicule	9
Figure 6 : Projection des forces sur le plan (X,Y).....	10
Figure 7 : Distance de sécurité entre deux véhicules	16
Figure 8 : Modèle ressorts amortisseurs virtuels	17
Figure 9 : bloc basic d'un contrôleur PID	20
Figure 10 : Modèle de contrôle de l'inter-distance par un ressort amortisseur	22
Figure 11 : Réponse temporelle de vitesse et de distance (s) n°1	28
Figure 12 : Réponse temporelle de vitesse et de distance (s) n°2	28
Figure 13 : Réponse temporelle de vitesse et de distance (s) n°3	29
Figure 14 : Structure générale d'un système basé sur la logique floue	32
Figure 15 : Exemple d'interférence Max-Min	34
Figure 16 : Modèle de control d'inter distance avec la logique floue	37
Figure 17 : Editeur FIS du contrôleur de distance	37
Figure 18 : Editeur FIS du contrôleur de vitesse.....	38
Figure 19 : Définition des fonctions d'appartenances d'entrées	39
Figure 20 : Définition des fonctions d'appartenances de sorties	39
Figure 21 : Les règles de base	39
Figure 22 : Evaluation graphique de la méthode Mamdani	43
Figure 23 : Résultat final à défuzzifier	43
Figure 24 : Réponse temporelle des contrôleurs PID flou de la vitesse et de la distance	44
Figure 25 : Comparaison des contrôleurs PID flou et classique de vitesse	45
Figure 26 : Comparaison des contrôleurs PID flou et classique de distance	45
Figure 27 : Réponse temporelle des contrôleur PID flou et classique de vitesse	45
Figure 28 : Réponse temporelle des contrôleur PID flou et classique de distance	46
Figure 29 : Principe général de la commande sans modèle	52
Figure 30 : Modèle Simulink du contrôleur d'inter distance en utilisant un iPI	55
Figure 31 : Modèle Simulink d'un iPI contrôleur de vitesse	55
Figure 32 : Modèle Simulink d'un iPI contrôleur de distance	55
Figure 33 : Réponse temporelle du système de control d'inter distance	56

Figure 34 : Diagramme de Bode du iPI intelligent dans le domaine fréquentiel	56
Figure 35 : les variations d'alpha sur le contrôleur iPI de distance	57
Figure 36 : les variations d'alpha sur le contrôleur iPI de vitesse	58
Figure 37 : Comparaison des contrôleurs iPI, PID flou et classique de vitesse	59
Figure 38 : Comparaison des contrôleurs iPI, PID flou et classique de distance	59
Figure 39 : Réponse temporelle des régulateurs de vitesse	60
Figure 40 : Réponse temporelle des régulateurs de distance	60

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Définition des grandeurs physiques	14
Tableau 2.1 : Définition des grandeurs du modèle ressorts amortisseurs virtuels	18
Tableau 2.2 : Action des coefficients	20
Tableau 2.3 : Valeur des paramètre PID dans le cas de la méthode de la réponse indicielle proposée par ZN	21
Tableau 2.4 : Valeur des Paramètre PID dans le cas de la méthode du point critique proposée par ZN	21
Tableau 2.5 : Paramètres du véhicule	26
Tableau 2.6 : Paramètres des contrôleurs pour l'essai n°1	26
Tableau 2.7 : Paramètres des contrôleurs pour l'essai n°2	27
Tableau 2.8 : Paramètres des contrôleurs pour l'essai n°3	27
Tableau 3.1 : Règles d'interférences	38
Tableau 3.2 : Règles d'interférences appliqué dans l'exemple	42

Symboles

ω_i : la vitesse angulaire de la roue.

r_i : le rayon effectif de la roue.

V_x : la vitesse linéaire du centre de la roue.

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

Y : Le déplacement latérale du centre de gravite (CG) du véhicule.

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

Ψ : Rotation de cap (lacet).

Φ : Rotation de roulis.

Θ : Rotation de tangage.

p : masse volumique de l'air en kg/m³

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

S : surface de référence en m²

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_f : La longueur entre le train avant et le centre de gravité

F_{yf} : La force latérales de contacts pneumatique-chaussée appliquées à la roue avant

F_{yr} : La force latérales de contacts pneumatique-chaussée appliquées à la roue arrière

F_{xf} : La force longitudinales de contacts pneumatique-chaussée appliquées à la roue avant

F_{xr} : La force longitudinales de contacts pneumatique-chaussée appliquées à la roue arrière

V_X : Vitesse longitudinale

V_Y : Vitesse latérale

r : La vitesse de lacet

δ : 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

λ : 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

α, β₂, β₁, β₀ : Constantes de temps

V_l : Les vitesses du véhicule suivi

V_f : Les vitesses du véhicule suiveur.

α₁ α₂ α₃ : 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

D₀ : 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 :

L'automobile, un système mécanique en général intrinsèquement non linéaire par sa cinématique et ses caractéristiques dynamiques, conduit par un être humain, embarque aujourd'hui des dispositifs électroniques et informatiques. Ces dispositifs donnent aux véhicules la capacité de devenir autonome, et d'être qualifiés intelligents. Néanmoins, cette invention conduit à des problèmes de congestion, des accidents et par conséquent un grand nombre de victimes.

De nombreux travaux et recherches ont été accomplis en ce qui concerne l'optimisation de cette intelligence au niveau de la sécurité afin de diminuer l'insécurité sur les routes. Pour cela il faut d'abord prendre en considération les non linéarités de ce système.

Le contrôle intelligent d'inter distance d'un convoi de véhicules a pour objectif principal de développer et implémenter une assistance préventive pour garder une distance de sécurité entre le véhicule référence et le véhicule qui le précède, ce qui permet d'assurer la stabilité de véhicule et le confort des passagers.

Ce mémoire s'inscrit dans ce cadre et y contribue au niveau d'application des nouvelles lois de commande intelligentes pour un véhicule. La recherche bibliographique montre que les stratégies de commande utilisées pour le contrôle des inter-distances sont basées sur des lois de la physique [1] [3], les outils de dynamique du véhicule sont principalement utilisés lors de la première étape afin de faire une étude théorique du comportement du véhicule sur la route. Une technique de contrôle d'inter- distance dans les systèmes de convois, basée sur une implémentation de ressorts et amortisseurs virtuels qui représentent les effets d'interaction désirés entre les véhicules [7]. Cette stratégie consiste à utiliser une série de ressorts-amortisseurs entre chaque paire de véhicules adjacents afin d'assurer la sécurité entre les véhicules du convoi, dans ce cas il est nécessaire de régler la distance entre les véhicules à une valeur pré assignée. De ce fait, les ressorts-amortisseurs sont utilisés pour représenter les forces d'interactions entre les véhicules du convoi et un contrôleur local PID de vitesse est conçu pour chaque véhicule [8] [10].

Afin d'étudier la robustesse de l'approche envisagée, nous avons décidé de faire une étude de synthèse entre deux techniques de la même famille mais dans deux contextes différents. La deuxième technique est basée sur un algorithme plus avancé utilisant la logique floue [13] [14]. Le choix du type de la commande avancée emploie la connaissance et l'expérience d'un opérateur humain et parmi ces importantes applications [15], présente une stratégie de contrôle de l'inter-distance entre les véhicules en se basant sur un modèle physique (amortisseur) et intégrer un contrôleur flou de type PID pour rendre le système de contrôle intelligent face à des variations brusques du comportement des deux véhicules et assure la stabilité du véhicule référence et le confort des passagers.

Introduction Générale

Ensuite, un travail intéressant et à l'ordre du jour est réalisé dans une quatrième partie, l'aspect contrôle intelligent est évoqué exhaustivement afin de rendre le contrôle plus fiable en tenant en compte plus de paramètres dans le control afin de filtrer tout événement indésirable pouvant affecter le comportement du système. Pour ce faire, nous avons fait appelle à une technique récente qui consiste à implémenter un PI intelligent pour le control d'inter-distance. Dans notre étude nous avons choisis de mettre l'accent sur la structure du PI intelligent lui-même [19] dans ce sens une étude sur les paramètres du contrôleur permet de trouver une meilleure optimisation en termes de rapidité, précision ainsi que la stabilité. Le résultat de la comparaison des différentes méthodes est donné à l'aide des simulations sur Matlab qui montre un avantage important à la technique PI intelligent qui montre une meilleure stabilité en comparant les erreurs statiques de chaque méthode.

Ce mémoire a été organisée comme suit :

Chapitre 1 : traite la modélisation dynamique d'un véhicule et décrit les principaux éléments qui interviennent dans la dynamique du véhicule.

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.

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.

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.

Chaque chapitre est muni des simulations sur Matlab afin de montrer l'efficacité des approches envisagées. A la fin une conclusion ainsi que des perspectives sont données.

Chapitre 1 :

Positionnement du problème

Introduction :

La voiture est un moyen de transport dont on ne peut plus s'en passer. 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. 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.

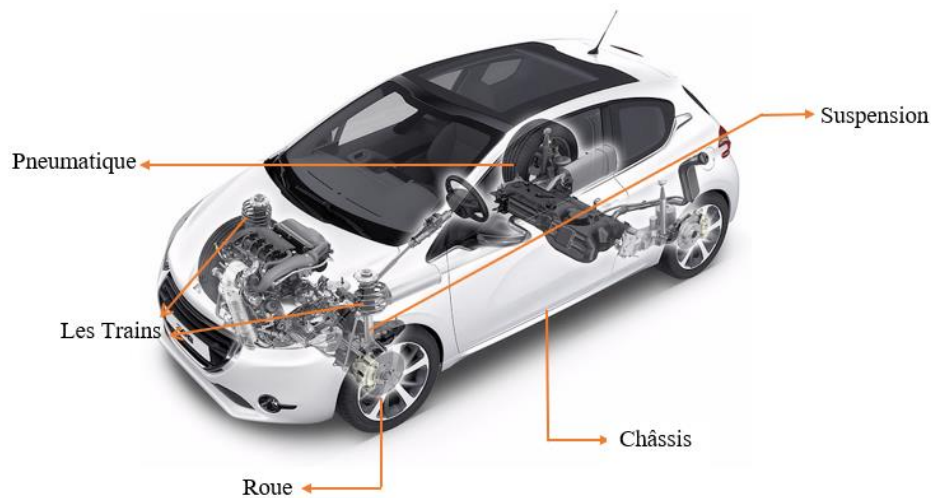


Figure 1 : Schéma mécanique d'une voiture.

1.2. 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 2 : modélisation du système

1.2.1. 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 ω_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.

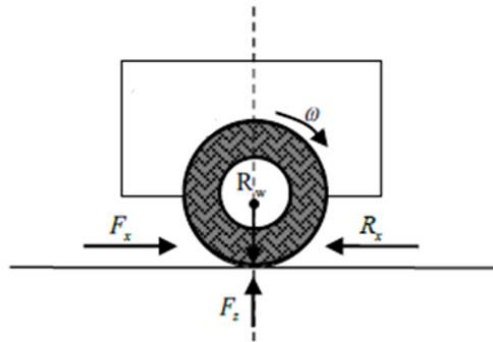


Figure 3 : Modèle dynamique de la Roue

- 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.

1.3. Schéma du modèle mécanique :

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

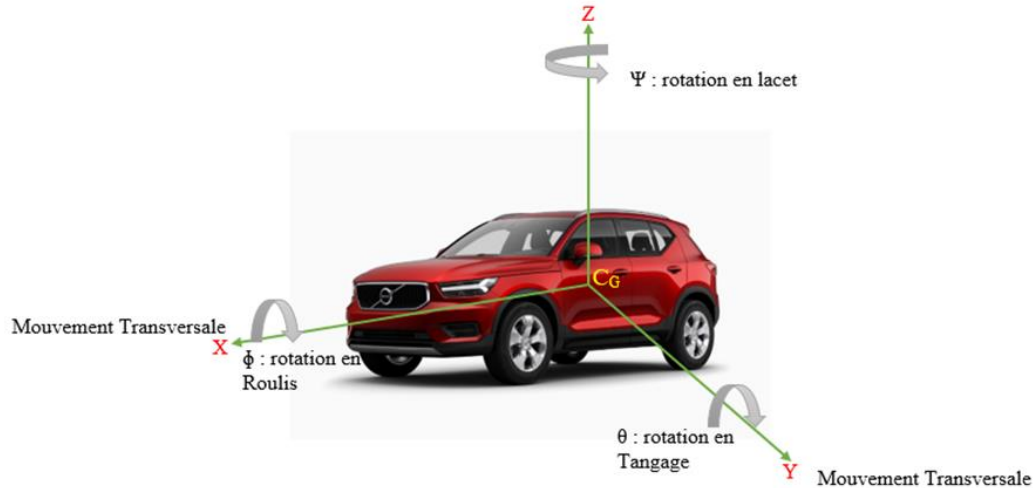


Figure 4 : Degrés de liberté des mouvements du modèle

1.3.1. 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 (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 latérale 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 :
 - Ψ : Rotation de cap (lacet).
 - Φ : Rotation de roulis (ressentie dans un virage).
 - Θ : 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 traînée) qui résulte en outre d'un frottement des roues et de la résistance de l'air.



Figure 5 : les forces exercées sur le véhicule

- La portance :

La portance est le fait que des flux d'air ont tendance à tirer le véhicule vers le haut. Les flux d'air passent sous le véhicule et ont une direction verticale, à 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 kg/m^3

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

S : surface de référence en 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.

$$P = m \times g \tag{1.4}$$

m : la masse de l'objet en kg

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

1.4. Modèle dynamique :

Les forces qui agissent à l'interface roue-sol sont montrées sur la Figure (6) :

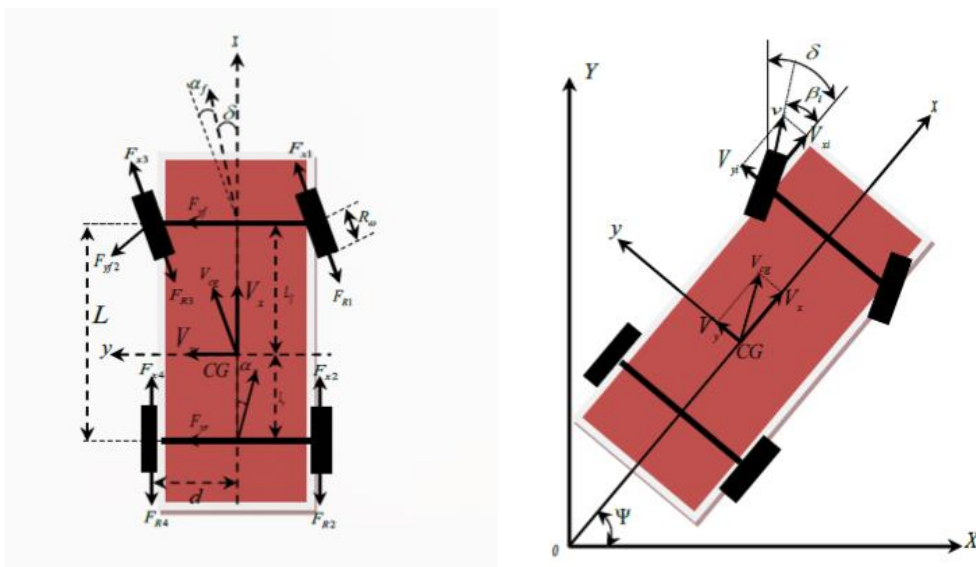


Figure 6 : Projection des forces sur le plan (X,Y)

- Afin de trouver les équations des mouvements exercées sur le véhicule, nous adoptons les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 :

La route est considérée plane (sans dévers) et uniforme (revêtement sans défaut). Son revêtement assure de bonnes conditions d'adhérence (goudron par temps sec).

Hypothèse 2 :

L'accélération du véhicule (en traction et en freinage) est suffisamment faible pour que les mouvements des suspensions soient supposés négligeables.

Hypothèse 3 :

Le déplacement du véhicule est considéré tout au long des axes x, y, ainsi qu'une rotation autour l'axe verticale z.

Hypothèse 4 :

Le mouvement de rotation se résume à un seul degré de liberté qui correspond au mouvement du lacet ψ . Les deux autres degrés de liberté : le roulis et le tangage ne sont pas pris en considération ($\theta = 0, \Phi = 0$).

Hypothèse 5 :

Le centre de gravité du véhicule est confondu avec l'origine de repère lié au véhicule (CG=O).

Hypothèse 6 :

Vu la symétrie du véhicule par rapport à son centre de gravité CG on peut noter :

$$L_f = L_r = \frac{L}{2}$$

Hypothèse 7 :

Généralement les pneumatiques des trains avant et arrière sont identiques de ce fait le coefficient de raideur est identique :

$$C_f = C_r = C$$

Pour établir la modélisation dynamique d'un véhicule, on doit appliquer les lois de newton :

Comme il est défini précédemment que le véhicule a deux types de mouvement : mouvement de translation (Z) et mouvement de rotation (x,y), on doit appliquer :

Le Principe et la loi de Newton : on a deux principes :

1er principe :

La somme des forces extérieures F_{ext} appliquées à un corps solide en mouvement dans une direction donnée, est égale au produit de la masse m du corps isolé par son accélération γ dans cette direction.

$$\sum \vec{F}_{ext} = M \vec{\gamma} \quad (1.5)$$

2eme principe :

La somme des moments de torsion sur un axe donné est égale au produit du tenseur d'inertie J et de l'accélération de rotation Ω suivant cet axe.

$$\sum \vec{M} = J \frac{d}{dt} \vec{\Omega} \quad (1.6)$$

- Les forces généralisées, F_X F_Y et le moment de rotation totale M_Z dans le repère inertiel (X, Y, Ψ) sont donnés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} M_v \ddot{X} = F_X \\ M_v \ddot{Y} = F_Y \\ J_v \ddot{\Psi} = M_Z \end{cases} \quad (1.7)$$

A l'aide d'une simple rotation d'un angle Ψ autour de l'axe OZ, on peut évaluer le vecteur de vitesse associé au centre de gravité CG du véhicule :

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ r \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

En dérivant (1.8) par rapport au temps, on obtient les accélérations :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \dot{X} = C \cos(\psi) - V_x \dot{\psi} \sin(\psi) - V_y \dot{\psi} \sin(\psi) - V_x \dot{\psi} \cos(\psi) \\ \frac{d}{dt} \dot{Y} = V_x \dot{\psi} \sin(\psi) + V_x \dot{\psi} \cos(\psi) + V_y \cos(\psi) - V_y \dot{\psi} \sin(\psi) \\ \frac{d}{dt} \dot{\Psi} = \dot{r} \end{cases} \quad (1.9)$$

En tenant compte de (1.8) dans les équations (1.9), on obtient :

$$\begin{cases} \frac{F_X}{M_V} = (\dot{V}_X - \dot{\psi} V_Y) \cos(\psi) - (\dot{V}_Y + \dot{\psi} V_X) \sin(\psi) \\ \frac{F_Y}{M_V} = (\dot{V}_X - \dot{\psi} V_Y) \sin(\psi) + (\dot{V}_Y + \dot{\psi} V_X) \cos(\psi) \\ \frac{M_Z}{J_V} = \dot{r} \end{cases} \quad (1.10)$$

En se basant sur l'hypothèse 2, on trouve :

$$\begin{cases} \frac{F_X}{M_V} = (\dot{V}_X - rV_Y) \\ \frac{F_Y}{M_V} = (\dot{V}_Y + rV_X) \\ \frac{M_Z}{J_V} = \dot{r} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} F_X = M_V (\dot{V}_X - rV_Y) \\ F_Y = M_V (\dot{V}_Y + rV_X) \\ M_Z = J_V \dot{r} \end{cases} \quad (1.11)$$

A partir des relations précédentes et des simplifications permises par nos hypothèses et en linéarisation autour d'un angle de braquage δ considéré petit sur autoroute, nous obtenons les expressions du modèle dynamique dans un repère lié au véhicule :

$$\begin{cases} \dot{V}_X = V_y \dot{\psi} + \frac{C}{M_v} \frac{V_Y}{V_X} + \frac{LC}{2M_v} \frac{\dot{\psi}}{V_X} \delta \\ \dot{V}_Y = -V_x \dot{\psi} + \frac{C}{M_v} \delta - \frac{2C}{M_v} \frac{V_Y}{V_X} \\ \ddot{\psi} = \frac{LC}{2J_v} \delta - \frac{L^2}{2J_v} \frac{\dot{\psi}}{V_X} \end{cases} \quad (1.12)$$

Avec :

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
δ	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
λ	Le coefficient de glissement longitudinal
M_v	<i>La masse du véhicule</i>

Tableau 1.1 : Définition des grandeurs physiques

1.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a pu déterminer le modèle dynamique d'un véhicule, 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 2 :

Stratégie de commande

Introduction :

Depuis quelques années, beaucoup de recherches ont été effectuées dans le domaine de la commande des systèmes non linéaire. L'implémentation d'impédance virtuelle fait partie de ces nouvelles méthodes de contrôle, celle-ci consiste à utiliser un "ressorts-amortisseurs virtuels", où le véhicule se comporte comme s'il y avait des ressorts imaginaires et des amortisseurs agissant avec le véhicule maître. La structure de conception inclut des spécifications de sécurité et de confort de façon simple.

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 seront présentés. A la fin nous nous baserons sur un système de control PID.

2.1. 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 :

$$d_s = L_f \left(1 + \frac{1}{16.1} V_f \right) \quad (2.1)$$

Avec :

d_s : la distance de sécurité

L_f : la longueur du véhicule Suiveur.

V_f : la vitesse du véhicule suiveur



Figure 7 : distance de sécurité entre deux véhicules

Kometani et Sasaki (1959) proposent une distance de sécurité obtenue par la manipulation de l'équation newtonienne du mouvement dans laquelle une collision serait inévitable si le conducteur du véhicule de devant devait agir de façon "imprévisible".

Elle s'écrit comme suit :

$$d_s(t - \tau) = \alpha V_l^2(t - \tau) + \beta_2 V_f^2(t) + \beta_1 V_f(t) + \beta_0 \quad (2.2)$$

$\alpha, \beta_2, \beta_1, \beta_0$ Sont des constantes, et V_l, V_f les vitesses du véhicule suivi et suiveur.

Un important développement de ce modèle a été fait par Gipps (1981), et il est employé réellement dans la plupart des simulations de circulation routière. De même le modèle de Kometani et le modèle de Chien et Ioannou (1992) ont proposé une règle de distance de sécurité, comme suit :

$$d_s = \alpha_1 (V_f^2 - V_l^2) + \alpha_2 V_f + \alpha_3 \quad (2.3)$$

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

2.2. Contrôle 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 $\vec{X}_i = (x_i, y_i)$. La masse du véhicule est notée par m_i .

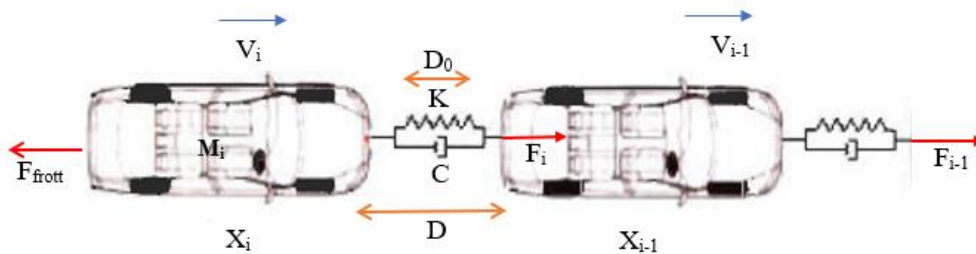


Figure 8 : Modèle ressorts amortisseurs virtuels

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

$$D = X_{i-1} - X_i \quad (2.4)$$

- 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 _{frot}	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 2.1 : 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 :

$$D = \int (V_{i-1} - V_i) dt + D_{initial} \quad (2.5)$$

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.

$$m_i \ddot{X}_i = F_{PID} + F_{i-1} - F_i - F_{frott} \quad (2.6)$$

2.3. Système de contrôle de l'inter distance basé par amortisseur : Stratégie de commande :

2.3.1. Contrôleur PID :

Les trois principaux paramètres du PID sont les suivants :

Proportionnel (P), intégral (I) et dérivé (D). La partie proportionnelle est responsable du respect du point de consigne souhaité, tandis que les parties intégrale et dérivée tiennent compte respectivement de l'accumulation des erreurs passées et du taux de changement d'erreur dans le processus.

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 :

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Avec :

k_p , k_i et k_d , non négatifs, désignent respectivement les coefficients des termes proportionnel, intégral et dérivé (parfois notés P, I et D). Dans ce modèle :

- P représente les valeurs actuelles de l'erreur. Par exemple, si l'erreur est grande et positive, la sortie de contrôle sera également grande et positive.
- I représente les valeurs passées de l'erreur. Par exemple, si la sortie de courant n'est pas suffisamment forte, l'intégrale de l'erreur s'accumulera avec le temps et le contrôleur répondra en appliquant une action plus forte.
- D explique les tendances futures possibles de l'erreur, sur la base de son taux de variation actuel.

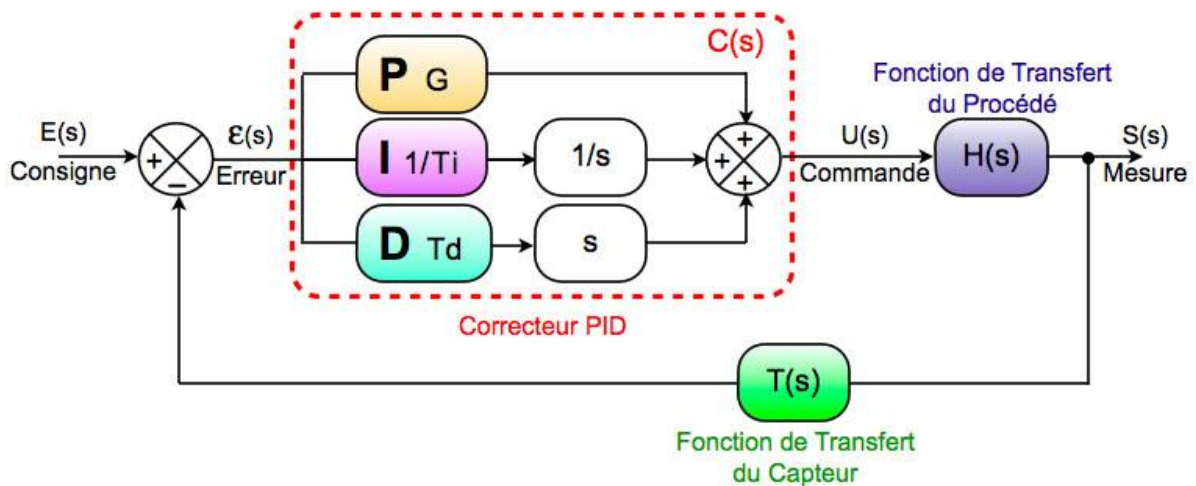


Figure 9 : bloc basic d'un contrôleur PID

Chacun des coefficients a un rôle à jouer sur la réponse à une consigne :

Coefficient :	Temps de montée :	Temps de stabilisation :	Dépassement :	Erreur statique :
K_p	Diminue	Augmente	Augmente	Diminue
K_i	Diminue	Augmente	Augmente	Annule
K_d	Pas d'influence	Diminue	Diminue	Pas d'influence

Tableau 2.2 : Action des coefficients

2.3.2. Réglage des régulateurs PID :

Le réglage d'un PID consiste à trouver les meilleurs coefficients K_p , K_i et K_d dans le but d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. L'objectif est d'être robuste, rapide et précis tout en limitant les dépassements. Il existe plusieurs méthodes de réglage des paramètres du régulateur PID, la méthode de Ziegler et Nichols, Cohen et Coon et la méthode du modèle. On va s'intéresser à la méthode de Ziegler et Nichols.

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

En 1942, Ziegler et Nichols 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.

- **Méthode de la réponse indicielle :**

Pour obtenir les paramètres du régulateur PID, il suffit d'enregistrer la réponse indicielle du processus seul puis de tracer la tangente au point d'inflexion de la courbe. On mesure ensuite

sa pente P et le retard apparent L correspondant au point d'intersection de la tangente avec l'abscisse, On peut alors calculer les coefficients du régulateur choisi à l'aide du tableau 2.3 :

Type :	k_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{PL}$	/	/
PI	$\frac{0.9}{PL}$	$3L$	/
PID	$\frac{1.2}{PL}$	$2L$	$0.5L$

Tableau 2.3 : Valeur des paramètre PID dans le cas de la méthode de la réponse indicielle proposée par ZN

L'algorithme suivant résume les différentes étapes de la méthode :

Prélever à partir de la réponse indicielle :

- Le retard apparent : $L = t_1$
- La constante de temps apparente : $T = t_2 - t_1$
- La pente de la tangente au point d'inflexion : $P = \frac{y(\infty)}{T_3 - T_1}$
- Le temps mort relatif : $\tau = \frac{L}{L+T} = \frac{t_1}{t_2}$
- **Méthode du point critique :**

Cette méthode est basée sur la connaissance du point critique du processus. On boucle le processus sur un simple régulateur proportionnel dont on augmente le gain jusqu'à amener le système à osciller de manière permanente ; on se trouve ainsi à la limite de stabilité. Après avoir relevé le gain critique k_{cr} de régulateur et la période d'oscillation T_{cr} de la réponse, on peut calculer les paramètres du régulateur choisi à l'aide du **tableau 2.4** suivant :

Type :	k_p	T_i	T_d
P	$0.5k_{cr}$	/	/
PI	$0.4k_{cr}$	$0.8T_{cr}$	/
PID	$0.6k_{cr}$	$0.5T_{cr}$	$0.25T_{cr}$

Tableau 2.4 : Valeur des Paramètre PID dans le cas de la méthode du point critique proposée par ZN

L'algorithme de cette méthode est donné ci-dessous :

Prélever à partir de la réponse fréquentielle :

- La pulsation ω_π pour laquelle la phase vaut -180
- Le gain G_π correspondant à cette pulsation
- Calculer à l'aide des résultats ci-dessus :

Le gain critique : $k_{cr} = \frac{1}{G_\pi}$

La période d'oscillation critique : $T_{cr} = \frac{2\pi}{\omega_\pi}$

2.3.3. Régulateur PID d'inter-distance :

Le système de contrôle du convoi tel qu'illustré à la figure 10 comprend un contrôleur local de vitesse PID, et un contrôleur de l'inter-distance basé sur un modèle classique d'un ressort amortisseur.

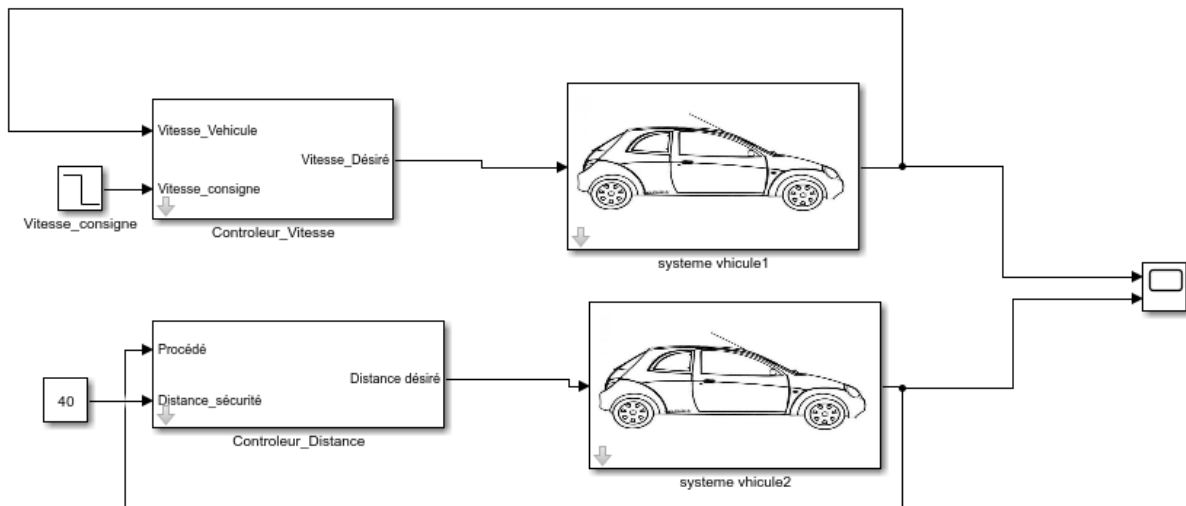


Figure 10 : Modèle de contrôle de l'inter-distance par un ressort amortisseur

Pour l'analyse du comportement du système, un modèle mathématique qui se compose de trois équations différentielles a été établi comme suit :

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1 &= F_1 - k_1(x_1 - x_2) - C_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1 x_{120} + C' \dot{x}_1 \\
 m_2 \ddot{x}_2 &= F_2 + k_1(x_1 - x_2) + C_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_2(x_2 - x_3) - C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_2 x_{230} - k_1 x_{120} + C' \dot{x}_2 \\
 m_3 \ddot{x}_3 &= F_3 + k_2(x_2 - x_3) + C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - k_2 x_{230} - C' \dot{x}_3
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

$X_1 = (x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1)$, $X_2 = (x_2, \dot{x}_2, \ddot{x}_2)$, $X_3 = (x_3, \dot{x}_3, \ddot{x}_3)$, et x_0 représentent la position, la vitesse et l'accélération pour chaque véhicule par rapport à un référentiel fixe et x_{120} , x_{230} représentent la distance au repos entre les véhicules 1 et 2, et 2 et 3, respectivement.

F_1 , F_2 , et F_3 représentent les forces fournies par les contrôleurs locaux de vitesse PID pour chaque véhicule, et s'écrivent sous la forme :

$$\begin{aligned}
 F_1 &= K_c(\dot{x}_1^* - \dot{x}_1) + \frac{k_c}{\tau_i}(x_1^* - x_1) + k_c \tau_{Df}(\ddot{x}_1^* - \ddot{x}_1) \\
 F_2 &= K_c(\dot{x}_2^* - \dot{x}_2) + \frac{k_c}{\tau_i}(x_2^* - x_2) + k_c \tau_{Df}(\ddot{x}_2^* - \ddot{x}_2) \\
 F_3 &= K_c(\dot{x}_3^* - \dot{x}_3) + \frac{k_c}{\tau_i}(x_3^* - x_3) + k_c \tau_{Df}(\ddot{x}_3^* - \ddot{x}_3)
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

$\dot{x}_1^*, \dot{x}_2^*, \dot{x}_3^*, x_1^*, x_2^*, x_3^*, \ddot{x}_1^*, \ddot{x}_2^*, \ddot{x}_3^*$ Représentent successivement la vitesse, l'intégrale de vitesse et la dérivée de la vitesse de consigne pour les 3 véhicules.

$$\begin{bmatrix} m_1 + k_c \tau_{Df} & 0 & 0 \\ 0 & m_2 + k_c \tau_{Df} & 0 \\ 0 & 0 & m_2 + k_c \tau_{Df} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 + k_c + c' & -C_1 & 0 \\ -C_1 & C_1 + C_2 + k_c + c' & -C_2 \\ 0 & -C_2 & C_2 + k_c + c' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + \frac{k_c}{\tau_i} & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 + \frac{k_c}{\tau_i} & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 + \frac{k_c}{\tau_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{10} + k_1 x_{120} \\ F_{20} - k_1 x_{120} + k_2 x_{230} \\ F_{30} - k_2 x_{230} \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

F_{10}, F_{20}, F_{30} : représentent la partie de la force du contrôleur PID qui dépend des consignes, et leur formule respective est donnée par les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 F_{10} &= k_c \dot{x}_1^* + \frac{k_c}{\tau_i} x_1^* + k_c \tau_{Df} \ddot{x}_1^* \\
 F_{20} &= k_c \dot{x}_2^* + \frac{k_c}{\tau_i} x_2^* + k_c \tau_{Df} \ddot{x}_2^* \\
 F_{30} &= k_c \dot{x}_3^* + \frac{k_c}{\tau_i} x_3^* + k_c \tau_{Df} \ddot{x}_3^*
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

On considère que les paramètres du ressort-amortisseur et du contrôleur de vitesse pour les trois véhicules sont les mêmes, ainsi que les inter-distances de repos :

$$\begin{aligned}
 k_1 &= k_2 = k \\
 c_1 &= c_2 = c \\
 x_{120} &= x_{230} = x_0
 \end{aligned}$$

Et en régime permanent on a :

$$\begin{aligned}
 \ddot{x}_1 &= \ddot{x}_2 = \ddot{x}_3 = \dot{x}_1^* = \dot{x}_2^* = \dot{x}_3^* = 0 \\
 \dot{x}_1 &= \dot{x}_2 = \dot{x}_3 = \dot{x}_f = cte
 \end{aligned}$$

\dot{x}_f : la vitesse finale en régime permanent.

Donc selon ces hypothèses, l'équation matricielle devient sous forme :

$$\begin{bmatrix} k_c + c' & 0 & 0 \\ 0 & k_c + c' & 0 \\ 0 & 1 & k_c + c' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{x}_f \\ \dot{x}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k + \frac{k_c}{\tau_i} & -k & 0 \\ -k & 2k + \frac{k_c}{\tau_i} & -k \\ 0 & -k & k + \frac{k_c}{\tau_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1f} \\ x_{2f} \\ x_{3f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{10} + kx_0 \\ F_{20} \\ F_{30} - kx_0 \end{bmatrix} I_3 \quad (2.12)$$

Pour trouver l'expression du vecteur de déplacement $\begin{bmatrix} x_{1f} \\ x_{2f} \\ x_{3f} \end{bmatrix}$ on doit chercher la matrice inverse de raideur :

$$k^{-1} = \begin{bmatrix} k + \frac{k_c}{\tau_i} & -k & 0 \\ -k & 2k + \frac{k_c}{\tau_i} & -k \\ 0 & -k & k + \frac{k_c}{\tau_i} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.13)$$

Soit la matrice inverse K^{-1} :

$$k^{-1} = \frac{1}{\frac{k_c}{\tau_i} (k + \frac{k_c}{\tau_i}) (3k + \frac{k_c}{\tau_i})} \begin{bmatrix} k + \frac{3 - \sqrt{5}}{2} \frac{k_c}{\tau_i} & k(k + \frac{k_c}{\tau_i}) & k^2 \\ k(k + \frac{k_c}{\tau_i}) & (k + \frac{k_c}{\tau_i})^2 & k(k + \frac{k_c}{\tau_i}) \\ k^2 & k(k + \frac{k_c}{\tau_i}) & (k + \frac{3 - \sqrt{5}}{2} \frac{k_c}{\tau_i})(k + \frac{3 + \sqrt{5}}{2} \frac{k_c}{\tau_i}) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Donc on déduit le vecteur de déplacement $\begin{bmatrix} x_{1f} \\ x_{2f} \\ x_{3f} \end{bmatrix}$:

$$\begin{bmatrix} x_{1f} \\ x_{2f} \\ x_{3f} \end{bmatrix} = k^{-1} \begin{bmatrix} \frac{k_c}{\tau_i} x_1^* + kx_0 - c'\dot{x}_f \\ \frac{k_c}{\tau_i} x_2^* - c'\dot{x}_f \\ \frac{k_c}{\tau_i} x_3^* - kx_0 - c'\dot{x}_f \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Si on dérive cette équation, on trouve que :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1f} \\ \dot{x}_{2f} \\ \dot{x}_{3f} \end{bmatrix} = k^{-1} \begin{bmatrix} \frac{k_c}{\tau_i} x^* \\ \frac{k_c}{\tau_i} x^* \\ \frac{k_c}{\tau_i} x^* \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Après le développement de cette dernière équation, on en déduit donc que la vitesse de chaque véhicule suit la vitesse de consigne (si le système est stable). L'objectif est de démontrer que l'erreur de position entre les véhicules de convoi égale à la position repos de ressort.

Les expressions de l'erreur des inter-distances se définissent comme suit :

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= x_1 - x_2 = x_0 \\ \Delta p_2 &= x_2 - x_3 = x_0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

Les coefficients du contrôleur de l'inter-distance sont déterminés en se basant sur l'équation suivante :

$$A_2 = c\Delta V + k(\Delta X - d_{\min}) \quad (2.18)$$

$A_2, \Delta V = V_1 - V_2, \Delta X = X_1 - X_2$: sont respectivement l'accélération et l'erreur de vitesse et de position entre les deux véhicules adjacents 1 et 2.

On applique la transformée de Laplace pour déterminer la valeur des coefficients K et C sur l'équation (2.17), on trouve, pour $d_{\min}=0$:

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{x_3}{x_2} = \frac{CS + k}{S^2 + CS + k} \quad (2.19)$$

On approche cette équation (2.18) d'une fonction d'un filtre passe-bas :

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{x_3}{x_2} = \frac{1 + \frac{4}{C}S}{(1 + \frac{2}{C}S)^2} \tag{2.20}$$

En posant les valeurs suivantes pour les coefficients du contrôleur de l'inter-distance :

$$k = \left(\frac{C}{2}\right)^2 \tag{2.21}$$

• **Résultat de la simulation du modèle de control de l'inter-distance par un ressort amortisseur :**

- On a effectué plusieurs essais lors de la simulation, ci-dessous les paramètres de la simulation :
- On a imposé la valeur de l'inter distance entre les véhicules de 40m et la vitesse de consigne de 50 km/h.

Paramètres :	Description :	Valeur :	Unité :
M	Masse du véhicule	1300	Kg
B	Coefficient visqueux de frottement avec le sol	180	Nm/s

Tableau 2.5 : Paramètres du véhicule

Essai n°1		
Contrôleur :	Paramètres :	Valeur :
Contrôleur de vitesse :	K _c	10
	τ _d	0.2
	τ _i	0.1
Contrôleur de distance :	K	8.98
	C	5.71

Tableau 2.6 : Paramètres des contrôleurs pour l'essai n°1

Essai n°2		
Contrôleur :	Paramètres :	Valeur :
Contrôleur de vitesse :	K_c	10
	τ_d	0.2
	τ_i	0.5
Contrôleur de distance :	K	10
	C	5.71

Tableau 2.7 : Paramètres des contrôleurs pour l'essai n°2

Essai n°3		
Contrôleur :	Paramètres :	Valeur :
Contrôleur de vitesse :	K_c	10
	τ_d	0.2
	τ_i	1
Contrôleur de distance :	K	7.5
	C	5.71

Tableau 2.8 : Paramètres des contrôleurs pour l'essai n°3

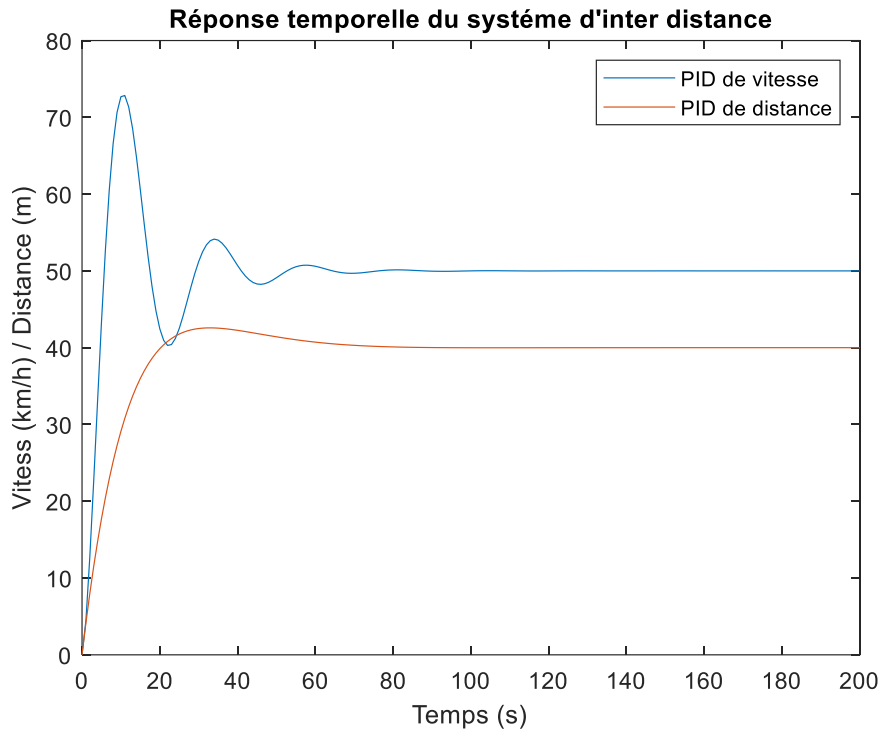


Figure 11 : Réponse temporelle de vitesse et de distance (s) n°1

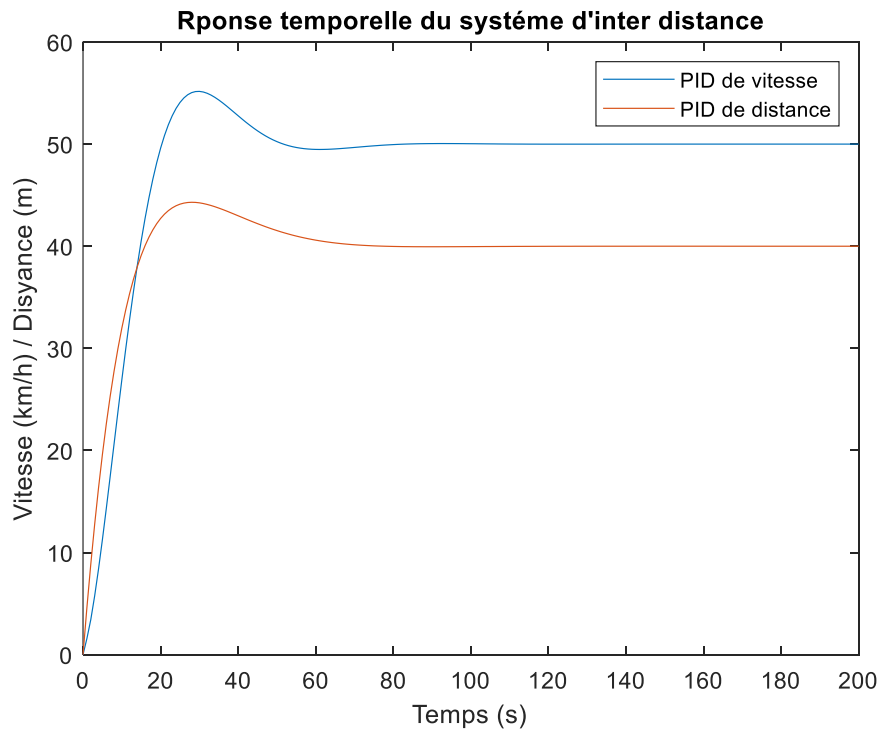


Figure 12 : Réponse temporelle de vitesse et de distance (s) n°2

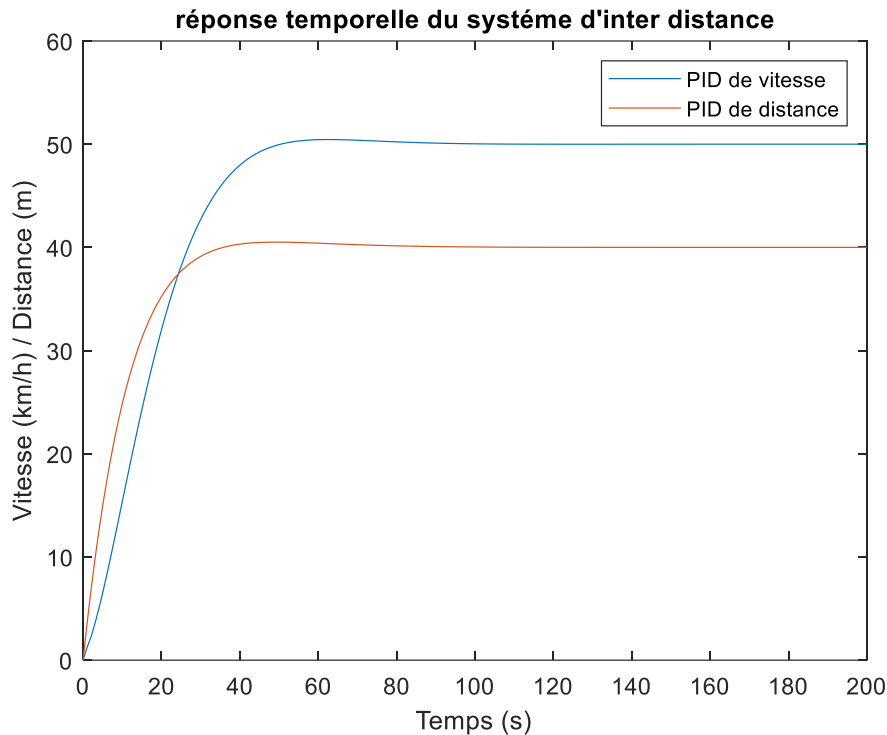


Figure 13 : Réponse temporelle de vitesse et de distance (s) n°3

• **Discussion :**

- D'après l'essai n°1, on remarque au contrôleur de vitesse un dépassement qui est égale à 22Km/h. Ce dernier est dû au frottement du pneumatique avec le sol.
- L'essai n°2 montre que pour avoir un résultat amélioré, on doit garder les paramètres des contrôleurs PID de vitesse (τ_i) qui sera compris dans l'intervalle $0.5 < \tau_i < 1$ et de la distance (K qui sera compris dans l'intervalle $7.5 < K < 8$).
- Selon le 3eme résultat, on remarque que le temps de réponse T_r de la distance, est plus rapide que celui de la vitesse. Ainsi lorsqu'on s'approche de la distance de sécurité désirée (40m), la vitesse suit relativement la vitesse désirée (50km/h) avec un décalage de 5s. On conclut que la régulation de la vitesse dépend de la régulation de la distance.

2.4. Conclusion :

Dans ce chapitre on a vu la commande « Implémentation d'une impédance virtuelle ». Par simulation, on a comparé l'évaluation de la stabilité et la robustesse dans le système de convoi. Ainsi on a démontré que cette nouvelle méthode peut être implémenter au système de contrôle et qui permet au véhicule une autonomie.

Chapitre 3 :

La Logique Floue

Introduction :

Suite au développement sans cesse croissant de l'informatique, les méthodes de traitements connaissent de nos jours un essor considérable. Les techniques de commande ont prouvés leur efficacité dans de nombreux problèmes de régulation industrielle. Les méthodes de commande avancées (Régulateur adaptatif, Commande prédictive, Commande robuste...) permettent de répondre aux exigences d'un certain nombre de systèmes fortement non linéaires. C'est dans ce même créneau que les méthodes de modélisation et de commande floues se positionnent. La Fuzzy logic suscite actuellement un intérêt général de la part des chercheurs, des ingénieurs et des industriels, et plus généralement de la part de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser des modes de raisonnement naturel, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine et de construire des systèmes artificiels effectuant les tâches habituellement prises en charge par les humains.

Dans ce chapitre on va présenter la logique floue et son principe, le système floue, la commande floue et l'implémentation de la commande floue dans un système de véhicule pour le contrôle d'inter distance.

3.1. La logique floue :

La logique floue est une technique pour le traitement de connaissances imprécises basées, sur des termes linguistiques ; elle donne les moyens de convertir une commande linguistique basée sur le raisonnement humain, en une commande automatique, permettant ainsi la commande des systèmes complexes dont les informations sont exprimées d'une façon vague et mal définie.

Le concept de la logique floue fut réellement introduit en 1965 par Lotfi Zadeh, un professeur d'électronique à l'université de Berkeley (USA), sa théorie « *fuzzy set theory* » n'eut pas un succès immédiat, elle fut développée surtout en Europe et au japon. Cette théorie est très attractive, parce qu'elle est basée sur le raisonnement intuitif et prend en compte la subjectivité et l'imprécision. Mais ce n'est pas une théorie imprécise. C'est une théorie mathématique rigoureuse, adaptée au traitement de tout ce qui est subjectif et/ou incertain.

Le système à base de la logique floue est composé de quatre blocs principaux (Figure 14).

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

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

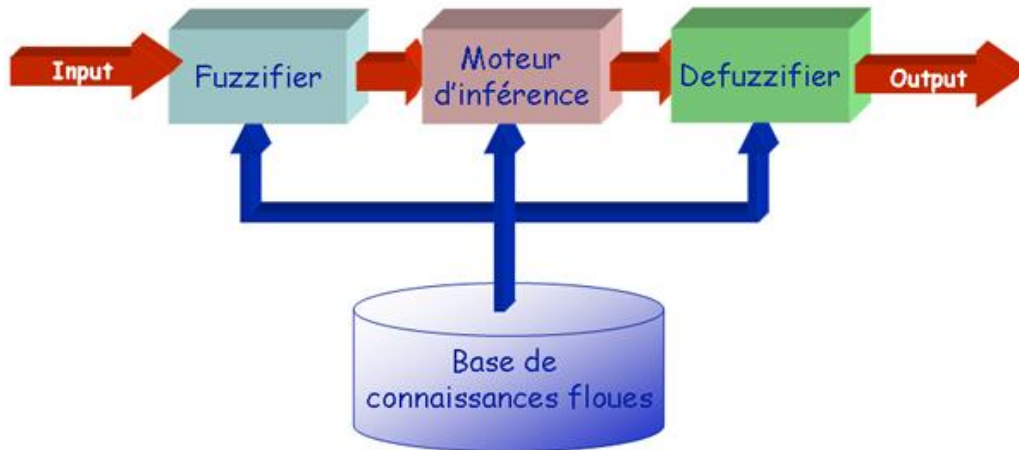


Figure 14 : Structure générale d'un système basé sur la logique floue

3.1.1. Fuzzification :

La fuzzification est un process qui effectue la conversion de l'entrée numérique observée

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

Pour le système flou, la fuzzification des variables est une étape importante du processus de mise en œuvre. Ses étapes consistent à :

- Etablir les variables linguistiques.
- Établir les quantificateurs flous (nombre de valeurs linguistiques)
- Attribuer une signification numérique à chaque quantificateur flou : fonction d'appartenance.

Le choix de la forme des fonctions d'appartenance (triangulaires, trapézoïdales, exponentielles, gaussiennes, ...) est arbitraire. Les formes triangulaires facilitent la programmation ce qui explique qu'elles soient le plus fréquemment utilisées. Quant au nombre de fonctions d'appartenance, il est généralement impair car elles se répartissent autour de zéro.

Dans les applications de la logique floue, les données observées sont souvent numériques, mais dans le système flou la manipulation des données est basée sur la théorie des ensembles flous. Il y'a au minimum deux choix pour cette conversion :

- **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 :

$$\begin{aligned} \mu_{F_x}(U) &= 1 \quad \text{si } U = U_0 \\ \mu_{F_x}(U) &= 0 \quad \text{si } U \neq U_0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

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 $\mu_{Fx}(U)$ est égal à l'unité si $U = U_0$ et décroît quand on s'éloigne de U_0 .

3.1.2. Interférence floue :

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 ce travail, on va s'intéresser à l'implication de Mamdani.

- **La méthode de 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.

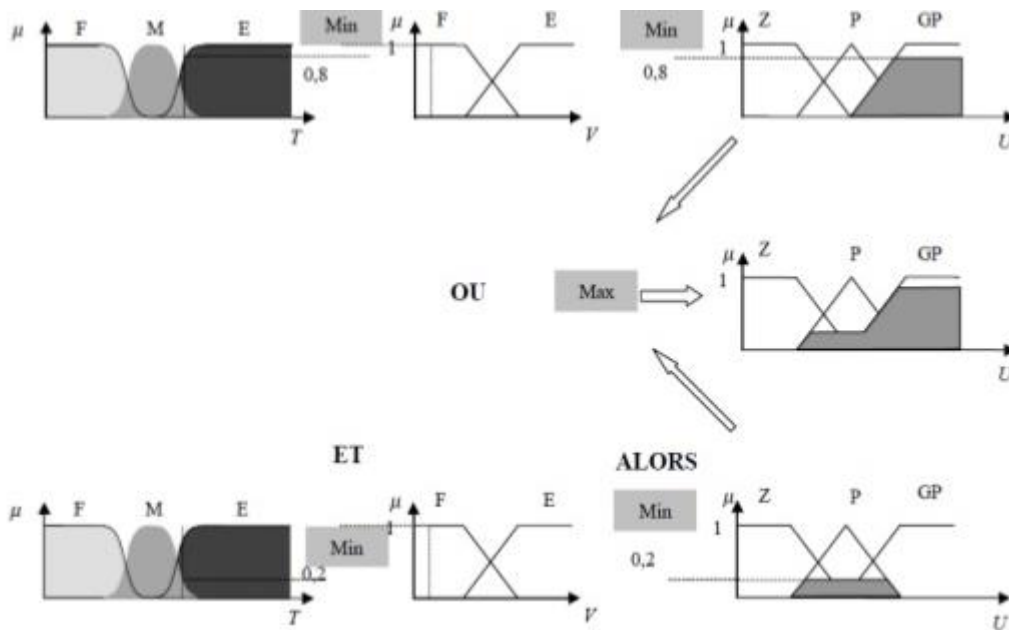


Figure 15 : exemple d'inférence Max-Min

3.1.3. La défuzzification :

Les valeurs obtenues lors de la combinaison des règles appliquées aux intervalles flous de la variable de sortie, définies une fonction d'appartenance. Il s'agit de convertir cette information en une grandeur physique. 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.

3.1.4. Base de connaissances (Base de règles) :

C'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).

3.2. Application de la logique floue :

Les principaux domaines d'application de la logique floue sont les suivants :

- Appareils électroménagers (lave-linges, aspirateurs, autocuiseurs)
- Systèmes audio-visuels (appareils de photo autofocus, caméscopes à stabilisateur d'images, photocopieurs)
- Systèmes automobiles embarqués (ABS, suspension, climatisation)
- Systèmes autonomes mobiles
- Système de contrôle/commande dans la plupart de domaines industriels de production
- Systèmes de décision, diagnostic, reconnaissance
-

La logique floue est une technique de résolution de problèmes très puissants avec une large applicabilité dans le control et la prise de décision. Elle est très utile lorsque le modèle

mathématique du problème à traiter n'existe pas ou existe mais difficile à implémenter, ou il est trop complexe pour être évalué assez rapidement pour des opérations en temps réel. Ou bien lorsque des experts humains sont disponibles pour fournir des descriptions subjectives du comportement du système avec des termes en langage naturel. La logique floue est aussi supposée de travailler dans les situations où il y a de large incertitude et des variations inconnues dans les paramètres et la structure du système.

- **Pourquoi la logique floue pour le control d'inter distance ? :**

- 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).

3.3. Contrôleurs floue :

La commande floue a le même but qu'une commande réalisée en automatique classique, c'est-à-dire la gestion automatique d'un processus, en fonction d'une consigne donnée, par action sur les variables qui décrivent le processus.

3.3.1. Commande PID floue :

La Logique Floue établit des règles de systèmes non linéaire. En raison de la complexité et des conditions multivariables des systèmes, les méthodes de contrôle conventionnelles peuvent ne pas donner de solutions satisfaisantes. D'autre part, leur robustesse et leur fiabilité font des contrôleurs flous utiles pour résoudre un large éventail de problèmes de contrôle dans les systèmes. En général, l'application de la logique floue à la conception de la commande PID peut être classée en deux grandes catégories selon leur mode de construction.

- Un contrôleur de logique floue est construit comme un ensemble de règles de contrôle heuristiques et le signal de contrôle est directement déduit de la base de connaissances.
- Les gains du contrôleur PID conventionnel sont réglés en termes de base de connaissances et d'inférence floue, puis le contrôleur PID classique génère le signal de commande.

3.3.2. : Application :

a. Définition :

Pour assimiler le fonctionnement et la théorie de la logique floue, on va étudier un exemple réel. Cette étude portera sur le control d'inter distance dans les véhicules utilisant une combinaison de la logique floue et un régulateur PID. Les informations utilisées par l'estimation de l'inter distance seront :

- Un contrôleur de distance : basé sur un système ressort-amortisseur PID flou
- Un contrôleur de vitesse : basé sur un régulateur PID flou

Cet exemple est représenté dans la figure suivante :

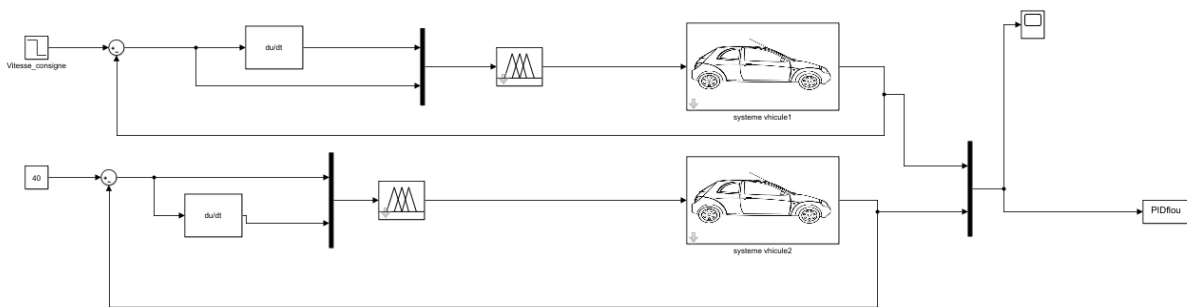


Figure 16 : modèle de control d'inter distance avec la logique floue

b. Structuration :

Pour de meilleures performances, on va utiliser le modèle d'interférence flou de « Mamdani » pour déterminer chaque contrôleur.

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 Floue comme montré dans les figures suivantes :

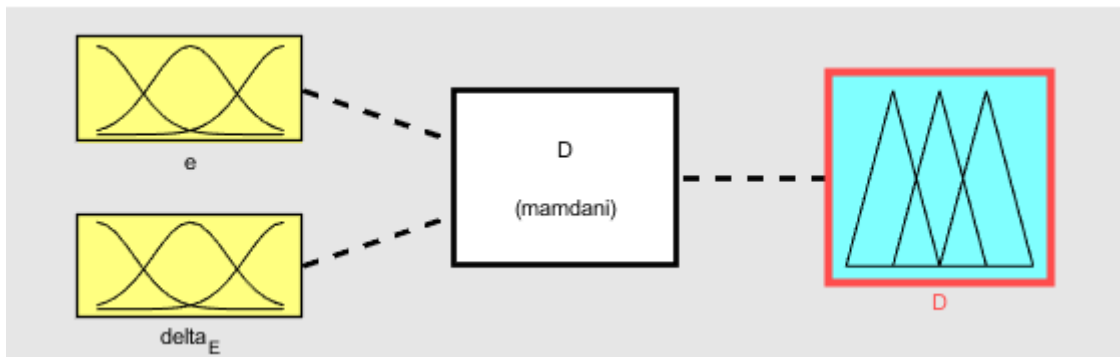


Figure 17 : Editeur FIS du contrôleur de distance

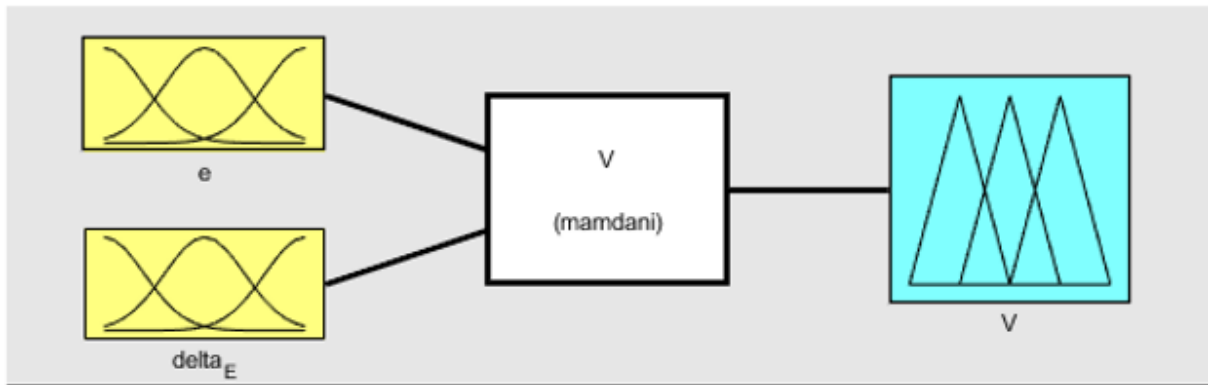


Figure 18 : Editeur FIS du contrôleur de vitesse

c. Base de règles et fonction d'appartenance :

Nous avons synthétisé le régulateur à logique Floue du type MAMDANI pour le réglage de vitesse et de distance. Le signal de sortie est déterminé en fonction des signaux d'entrée par l'intermédiaire des règles, comme il est illustré dans le **tableau (3.1)** :

e	N	Z	P
Δe			
N	NG	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	PG

Tableau 3.1 : règles d'interférences

- Les fonctions d'appartenances 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 classes sont notées comme suit :

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.

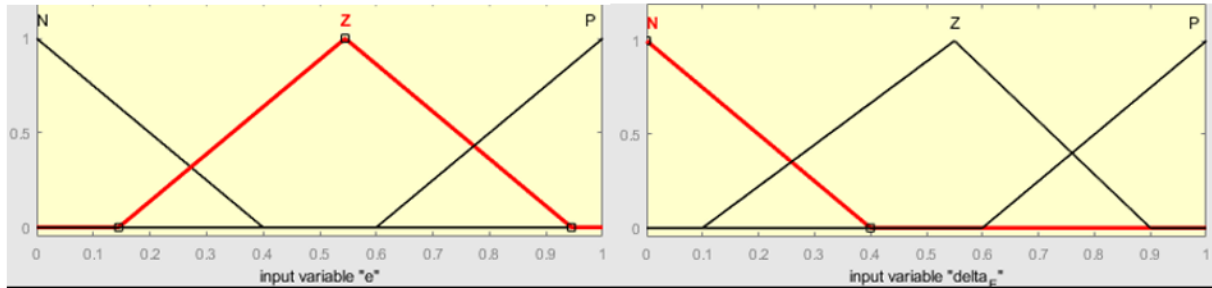


Figure 19 : définition des fonctions d'appartenance d'entrées

- L'intervalle pour les sorties :
D varie entre [0 à 100]
V varie entre [0 à 180]

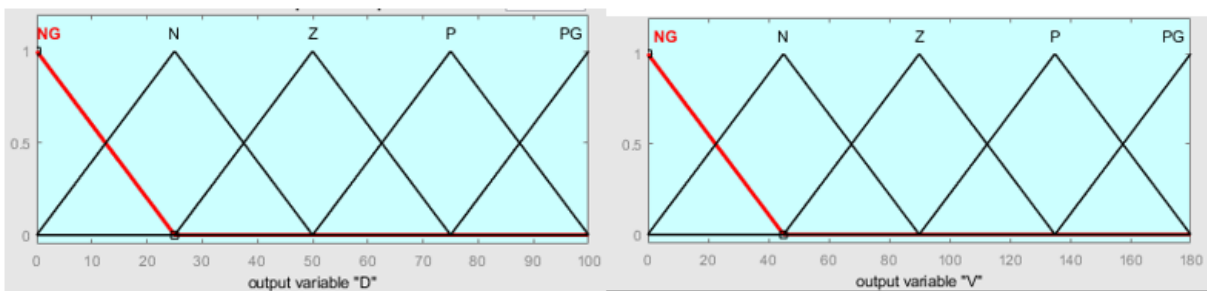


Figure 20 : définition des fonctions d'appartenance de sorties

d. Evaluation :

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

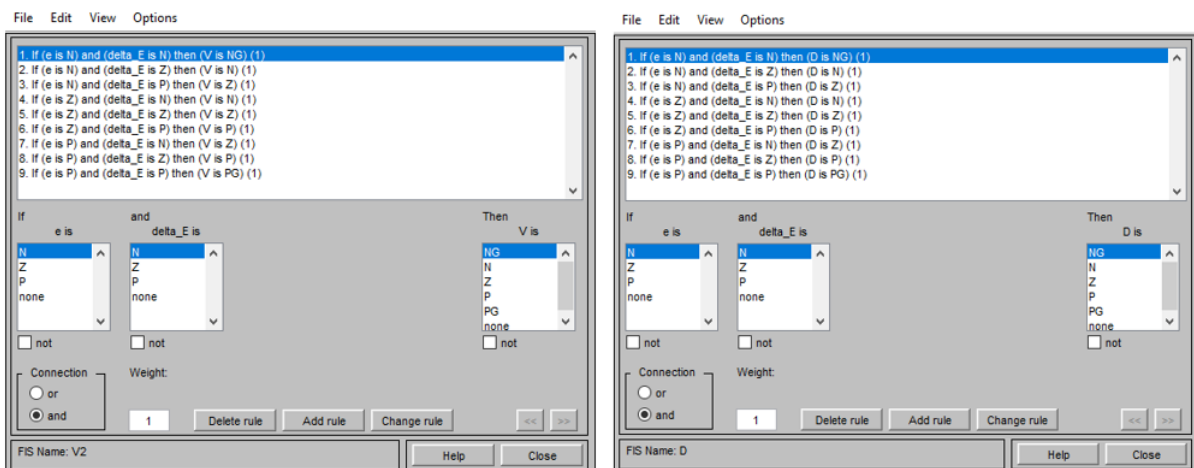


Figure 21 : Les règles de base

- Les calculs des fonctions d'appartenance se font comme suit :
- Fonction d'appartenance pour l'erreur « e » :

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

$$\mu_Z(x) = \begin{cases} \frac{x}{0.54} & 0 \leq x \leq 0.54 \\ \frac{0.94-x}{0.54} & 0.54 \leq x \leq 0.94 \end{cases} \quad (3.8)$$

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

- Fonction d'appartenances pour la dérivée d'erreur « Delta_e » :

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

$$\mu_Z(y) = \begin{cases} \frac{y}{0.4} & 0 \leq y \leq 0.55 \\ \frac{0.9-y}{0.4} & 0.55 \leq y \leq 0.9 \end{cases} \quad (3.11)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\mu_{NG}(z') = \frac{25 - z'}{25} \quad 0 \leq z' \leq 25 \quad (3.19)$$

$$\mu_N(z') = \begin{cases} \frac{z'}{25} & 0 \leq z' \leq 25 \\ \frac{50 - z'}{25} & 25 \leq z' \leq 50 \end{cases} \quad (3.20)$$

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

$$\mu_P(z') = \begin{cases} \frac{z' - 50}{25} & 50 \leq z' \leq 75 \\ \frac{100 - z'}{25} & 75 \leq z' \leq 100 \end{cases} \quad (3.22)$$

$$\mu_{PG}(z') = \frac{z' - 75}{25} \quad 75 \leq z' \leq 100 \quad (3.23)$$

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

$$\mu_N(0.2) = \frac{0.4 - 0.2}{0.2} = \frac{1}{2} \quad (3.24)$$

$$\mu_Z(0.2) = \frac{0.2}{0.54} = 0.37 \quad (3.25)$$

$$\mu_Z(0.7) = \frac{0.9 - 0.7}{0.4} = \frac{1}{2} \quad (3.26)$$

$$\mu_P(0.7) = \frac{0.7 - 0.6}{0.4} = \frac{1}{4} \quad (3.27)$$

- 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

e	N	Z	P
Δe			
N	0	0	0
Z	N	Z	0
P	Z	P	0

Tableau 3.2 : 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 :

$$Z_1 = \min(\mu_N(0.2), \mu_Z(0.7)) = \min\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} \tag{3.28}$$

- La robustesse de la 2eme règle est :

$$Z_2 = \min(\mu_N(0.2), \mu_P(0.7)) = \min\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{4}\right) = \frac{1}{4} \tag{3.29}$$

- La robustesse de la 3eme règle est :

$$Z_3 = \min(\mu_Z(0.2), \mu_Z(0.7)) = \min\left(0.37, \frac{1}{2}\right) = 0.37 \tag{3.30}$$

- La robustesse de la 4eme règle est :

$$Z_4 = \min(\mu_Z(0.2), \mu_P(0.7)) = \min\left(0.37, \frac{1}{4}\right) = \frac{1}{4} \tag{3.31}$$

- Voici ce que ces calculs donnent graphiquement :

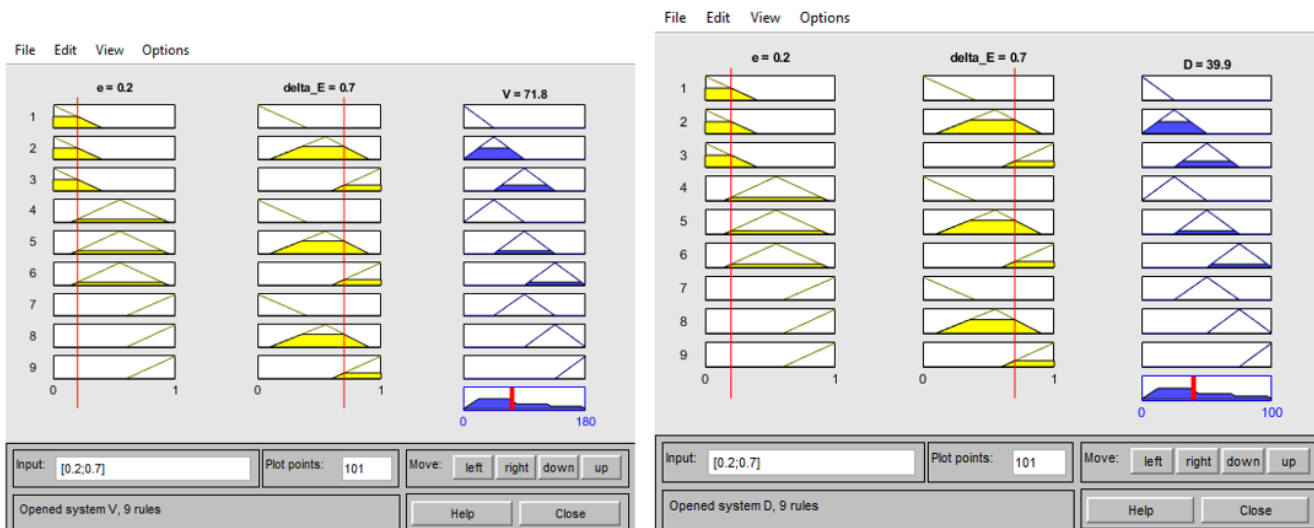


Figure 22 : Evaluation graphique de la méthode Mamdani

e. Défuzzification :

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

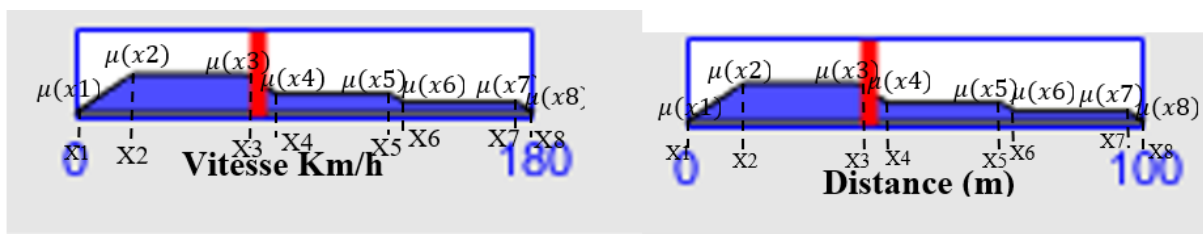


Figure 23 : Résultat final à défuzzifier

- Pour la défuzzification, on va utiliser la méthode du centre de gravité :

$$CG_D = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(x) \times x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i(x)} = \frac{\mu_1(x)x_1 + \mu_2(x)x_2 + \dots + \mu_n(x)x_n}{\mu_1(x) + \mu_2(x) + \dots + \mu_n(x)} = 39.9m \quad (3.32)$$

$$CG_V = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(x) \times x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i(x)} = \frac{\mu_1(x)x_1 + \mu_2(x)x_2 + \dots + \mu_n(x)x_n}{\mu_1(x) + \mu_2(x) + \dots + \mu_n(x)} = 71.8km / h \quad (3.33)$$

3.3.3. Résultat et discussion de la simulation :

- Le résultat de la simulation en appliquant la logique floue aux contrôleurs de vitesse et de distance est représenté dans la figure suivante :

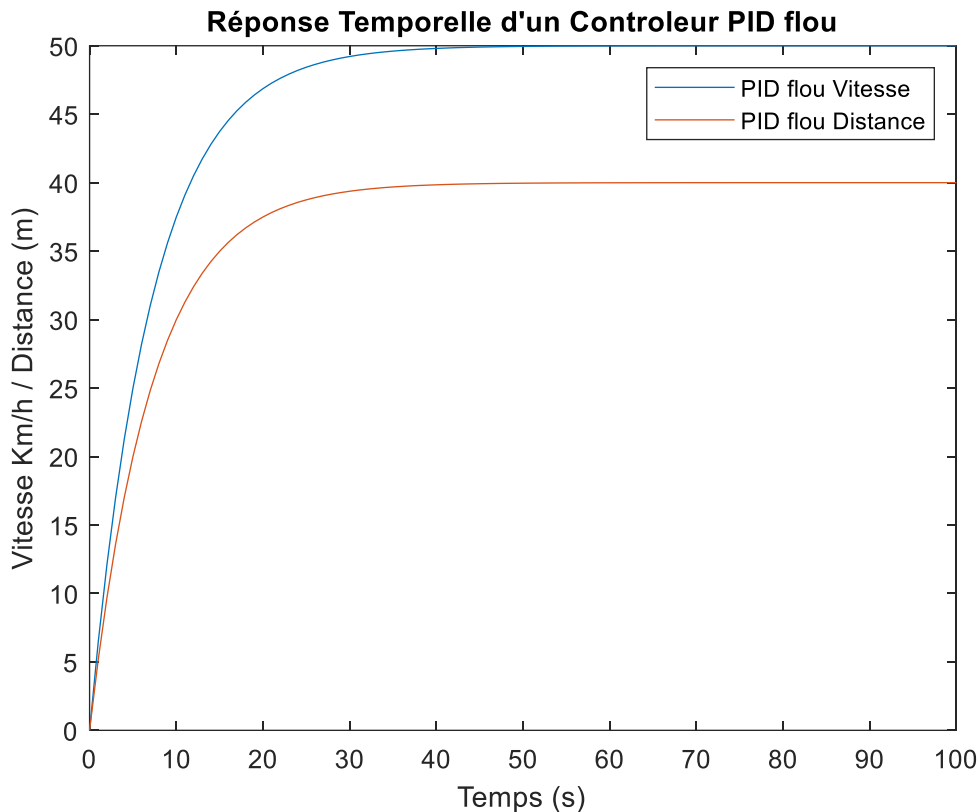


Figure 24 : Réponse temporelle des contrôleurs PID flou de la vitesse et de la distance

- D'après la figure ci-dessus on remarque que le temps de réponse de la distance et de la vitesse sont égaux $T_r \sim 15s$ et plus rapide. Le PID flou montre un meilleur suivi de consigne.

3.4. Etude comparative des deux méthodes :

L'avantage principal du PID logique floue par rapport au régulateur PID classique est le fait de pouvoir numériser le PID flou ou de le modéliser par ordinateur, c'est un régulateur évolutif qui peut être modifier à la demande, ce qui n'est pas le cas du PID classique. Pour procéder à la comparaison des résultats on a jumelé les deux schémas des simulations précédentes aux instants identiques, comme le montre les figures suivantes :

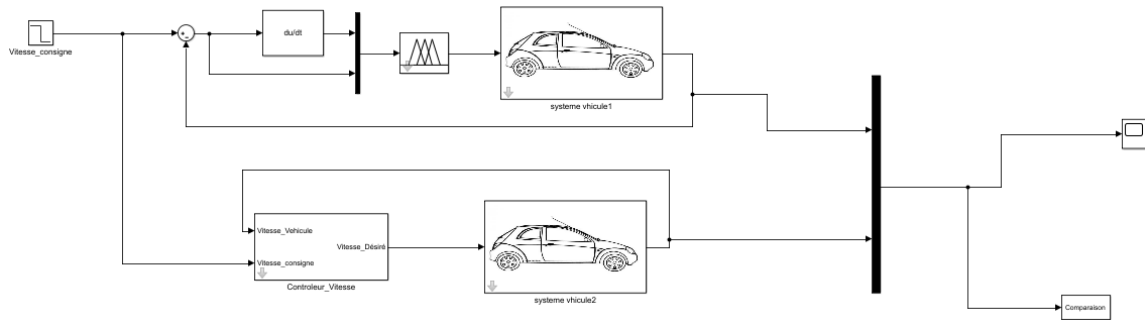


Figure 25 : Comparaison des contrôleurs PID flou et classique de vitesse

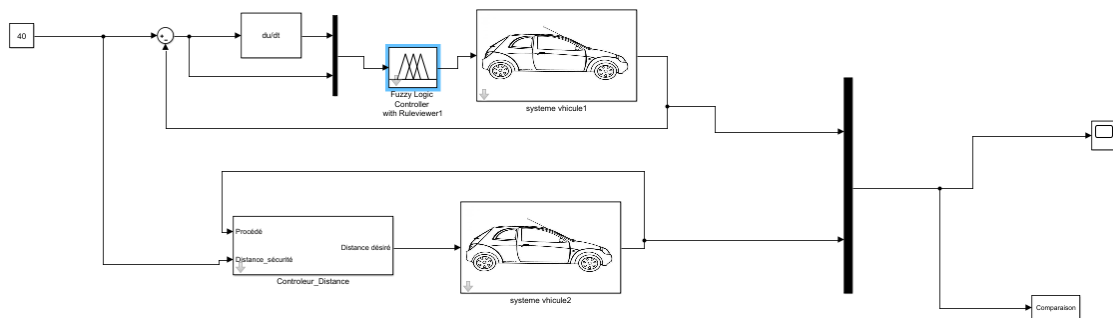


Figure 26 : Comparaison des contrôleurs PID flou et classique de distance

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

Réponse temporelle des contrôleurs PID intelligent et classique de vitesse

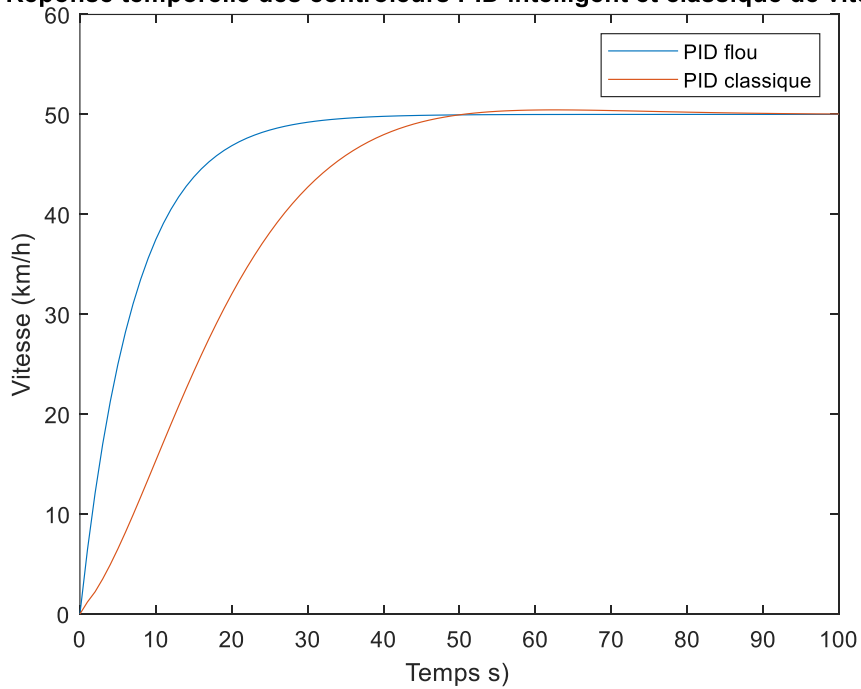


Figure 27 : Réponse temporelle des contrôleurs PID flou et classique de vitesse

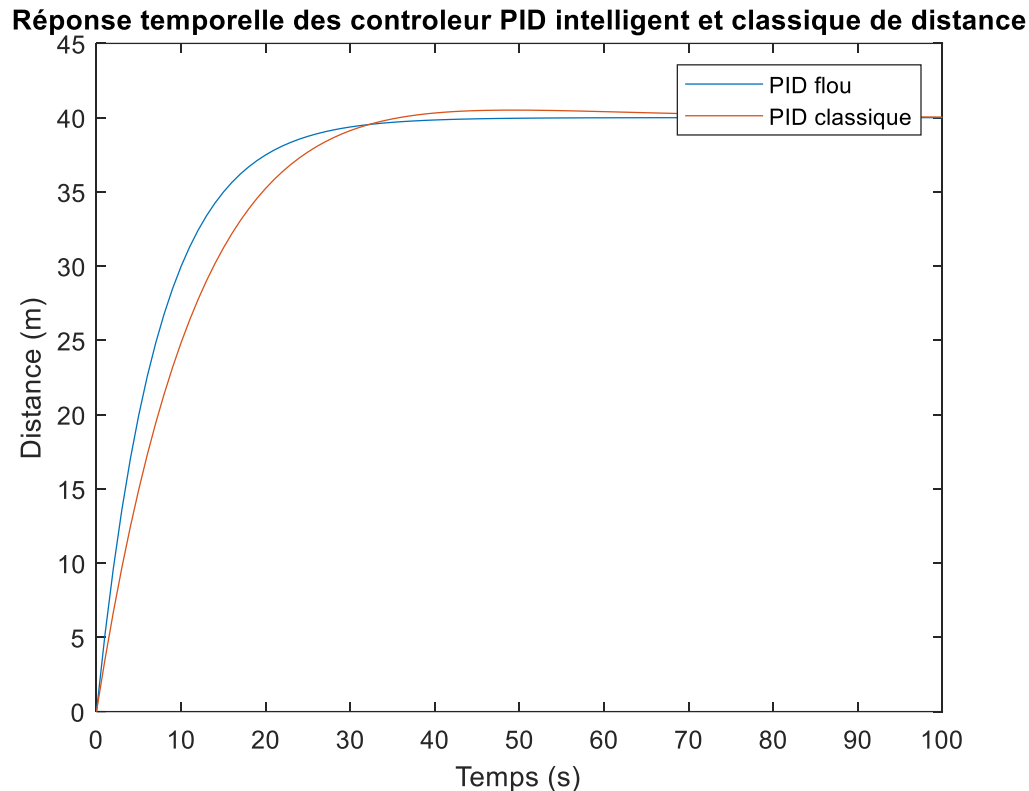


Figure 28 : Réponse temporelle des contrôleur PID flou et classique de distance

- **Discussion :**

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

- Un meilleur temps de réponse.
- Une réponse rapide.
- Un écart type de :
 - $PID(vitesse) = 0.1957$
 - $PID\ Flou(vitesse) = 0.1370$
 - $PID(distance) = 0.4456$
 - $PID\ Flou(distance) = 0.0523$

3.5. Conclusion :

La logique floue est une approche au raisonnement humain. Nous avons évoqué dans ce chapitre 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 où le système prend le rôle de l'être humain et commence à raisonner et de défuzzifier en suite pour donner des résultats.

Ensuite, nous avons appliqué les deux méthodes de commande (PID flou et classique) sur un système de véhicule, afin de réaliser une étude comparative.

Après la simulation, on a obtenu les résultats précédents, ces derniers montrent que :

- Le régulateur flou donne de meilleures réponses par rapport au régulateur PID en termes de rapidité, une plus grande puissance au démarrage et une faible erreur d'estimation. De plus les avantages du régulateur flou liés à sa mise en œuvre en comparaison avec le PID classique. En revanche, ce dernier reste encore celui qui est le plus utilisé dans l'industrie.

Chapitre 4 :

Contrôleur PI intelligent

Introduction :

La régulation est une discipline technique destinée à analyser et concevoir des systèmes de commande pratiques et autres dispositifs technologiques.

L'intérêt de la correction de type intégrale proportionnel est de permettre une erreur statique nulle. Si le système comporte un intégrateur et se stabilise à un point d'équilibre, tous les signaux sont constants. L'erreur est annulée même en présence d'une perturbation.

Dans ce Chapitre, afin d'améliorer le contrôle d'inter distance du véhicule, nous proposons une méthode intelligente basée sur le contrôleur PI avec la présence d'une partie intelligente qui permet de prévenir le comportement du modèle en se basant sur des mesures précédentes ce qui permet d'avoir une meilleure réponse en termes des bruits additifs incertains. Ces derniers peuvent affecter le comportement du système 'capteurs, actionneurs, et d'autres actions extérieures pouvant affecter la vitesse des véhicules à Controller.

4.1. Réalisation du contrôleur intelligent iPI:

4.1.1. Etude théorique de la commande sans modèle :

La « commande sans modèle », ou model-free control, [Fliess & Join (2013)] et ses correcteurs « intelligents » ont été inventés pour combler ces lacunes. On remplace le modèle global inconnu par le modèle ultra-local :

$$y^{(v)} = a + bu \quad (4.1)$$

Avec :

u, y : Variables désignent respectivement la commande et la sortie.

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

b : coefficient choisi selon le processus à contrôler.

Le modèle décrivant l'évolution du système est généralement obtenu soit par une description physique, soit par une identification paramétrique du système qu'il représente. On obtient alors la formule qui est décrite mathématiquement sous la forme des entrées/sorties suivantes :

$$E(y, \dot{y}, \dots, y^{(a)}, u, \dot{u}, \dots, u^{(b)}, d) = 0 \quad (4.2)$$

Avec :

u : est l'entrée du système

y : est la sortie du système

d : représente les perturbations généralement issues de l'extérieur.

L'hypothèse exigée pour élaborer cette loi de commande intelligente est que le système étudié soit à déphasage minimal, qu'il soit, ou non, asymptotiquement stable. L'objectif est d'assurer le bon suivi des trajectoires même si la dynamique précise du système n'est pas requise.

Pour construire cette approche, Nous devons garantir l'hypothèse suivant :

Pour toutes les équations différentielles décrivant le système étudié, il existe un entier minimal m tel que, au moins localement, ces équations vérifient la relation suivante :

$$y^{(m)} = a + bu \tag{4.3}$$

Où, m est la $m^{\text{ème}}$ dérivée choisie selon le concepteur (m est différent de α de l'équation)

A partir de cette hypothèse on peut conclure que l'on peut disposer des estimations de a et de b qui nous permettent de résoudre le problème de suivi de la trajectoire en appliquant la loi de commande explicitée dans (4.7).

La commande sans modèle repose sur une modélisation locale, sans cesse réactualisée, à partir de la seule connaissance du comportement entrées/sorties d'un procédé. Elle se distingue des identifications de type boîte noire où l'on recherche un modèle valide sur une plage de fonctionnement aussi rare que possible d'où la terminologie de la commande sans modèle plutôt que la commande à boîte noire.

L'équation différentielle décrivant le comportement entrée/sortie d'un système est représentée par :

$$E(y, \dot{y}, \dots, y^{(a)}, u, \dot{u}, \dots, u^{(b)}) = 0 \tag{4.4}$$

Avec :

E : une fonction suffisamment régulière en ses arguments.

Si pour, $0 < n < a$, $\frac{\partial E}{\partial y^n} \neq 0$, le théorème des fonctions implicites permet de réécrire localement l'équation (4.4) sous la forme :

$$y^n = \xi(t, y, \dots, y^{(n-1)}, y^{(n+1)}, \dots, y^{(a)}, u, \dots, u^{(b)}) \tag{4.5}$$

En substituant cette équation, valable sur un intervalle de temps très court, par le modèle ultra-local suivant :

$$y^{(v)} = F + \alpha u \tag{4.6}$$

L'ordre de dérivation v en général égal à un ou deux et v n'est pas nécessairement égal à l'ordre de dérivation de « a » à « y » l'équation différentielle précédente.

La constante α est un paramètre non physique, fixé par l'opérateur.

On peut réguler ou encore asservir une grandeur physique d'un procédé, à l'aide de la formule suivante :

$$u(k) = -\frac{[F]_e}{\alpha} + \frac{y^{*(v)}(t)}{\alpha} + K_p e(t) + K_i + \int e(t) + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (4.7)$$

Où :

- y^* Est la trajectoire de référence de la sortie, obtenue selon les préceptes de la commande par platitude
- $y^{*(v)}$ Est la dérivée $v^{ième}$ de la trajectoire de référence
- $e = y - y^*$ Est l'erreur de poursuite
- K_p, K_i, K_d Sont les gains de réglage

La valeur numérique de F, qui contient l'ensemble des informations structurelles du système, est obtenue d'une manière à éviter toute bouclage algébrique grâce au retard impliqué sur la commande envoyée au système :

$$[F]_e = [y^v(k)]_e - \alpha u(k-1) \quad (4.8)$$

Où :

$[y^v(k)]_e$ Désigne l'estimée à l'instant « k ».

Le choix de la trajectoire de référence pour les « y » se fait de façon analogue à celle adoptée en commande par platitude.

4.1.2. Algorithme de la commande sans modèle :

Dans ce qui suit, on restreindra notre étude aux systèmes monovariables avec les systèmes à déphasage minimal et au cas de $v = 1$

Si $v = 1$ le correcteur PI-intelligent (ou i-PI) devient :

$$u = \frac{F}{\alpha} + \frac{\dot{y}^*}{\alpha} + K_p e + K_i \int e \quad (4.9)$$

Où $y(t)$ est un signal dont nous voulons estimer y dans :

$$F = [\dot{y}(k)]_e - \alpha u(k-1) \quad (4.10)$$

Résumons l'algorithme de PI-intelligent en trois équations suivantes :

$$u = -\frac{F}{\alpha} + \frac{\dot{y}^*}{\alpha} + K_p e + K_1 \int e \tag{4.11}$$

$$F = y^*(k) - \alpha u(k-1) \tag{4.12}$$

$$y^*(k, T_e) = \frac{-3!}{(n_p - T_p)^3} \sum_{i=0}^{n_p} (n_p - 2i) T_p y((k-i)T_p) \tag{4.13}$$

Cet algorithme synthétise la commande sans modèle comme illustré dans la figure (29) :

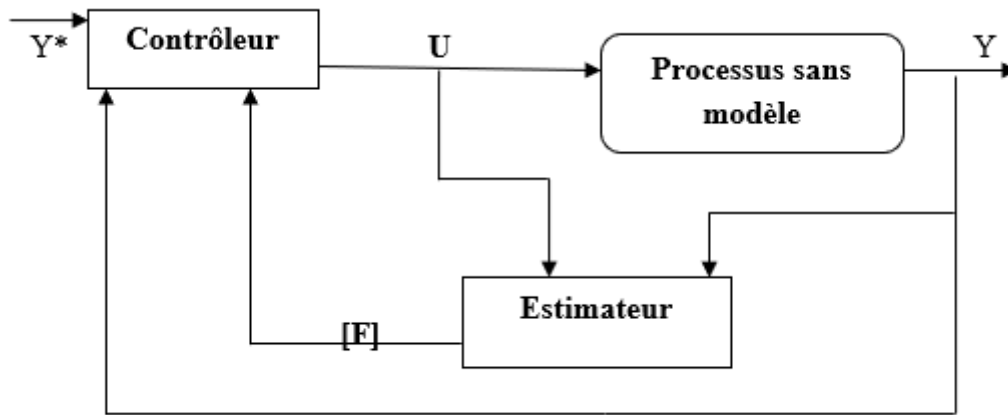


Figure 29 : Principe général de la commande sans modèle

De la même manière on procède pour trouver l'algorithme de PI-intelligent pour $v = 2$

Le développement de l'algorithme de la commande sans modèle ne nécessite pas de prendre une valeur de $v \geq 3$ Par contre on étendrait, si nécessaire les correcteurs PID classiques aux correcteurs PID-Intelligent. Ainsi, il peut être profitable, pour améliorer les performances, de remplacer le terme $K_i \int e$ par une somme d'intégrales itérées :

$$K_{I_1} \left(\int e + K_{I_2} \left(\int e + \dots + K_{I_r} \int e \right) \right) \tag{4.14}$$

Avec :

r : un nombre entier. Ce nombre permet de déterminer le nombre de la commande sans modèle utilisé.

4.1.3. Equivalence entre PI classique et i-P :

La comparaison liant le contrôleur classique et le correcteur intelligent est inspiré des travaux D'andréa Novel. On peut calculer la commande PID c'est à dire u en fonction de l'erreur e de la manière suivante :

$$u(k) = K_p e(k) + k_i \int e(\tau) d\tau \quad (4.15)$$

La discrétisation de $\int e(\tau) d\tau$ permet de l'écrire sous la forme :

$$\begin{aligned} I(k) &= \int e(\tau) d\tau \\ I(k) &= I(k - T_e) + T_e e(k) \end{aligned} \quad (4.16)$$

T_e : est le temps d'échantillonnage.

L'implémentation de l'équation (4.15) dans (4.16) permet d'obtenir la formule (4.17)

$$\begin{aligned} u(k) &= k_p e(k) + k_i I(k) \\ &= k_p e(k) + k_i (I(k - T_e) + T_e e(k)) \\ &= k_p e(k) + k_i I(k - T_e) + k_i T_e e(k) \end{aligned} \quad (4.17)$$

En utilisant l'équation récurrente (4.17) qu'on peut l'écrire sous la forme :

$$u(k - T_e) = k_p e(k - T_e) + k_i I(k - h) \quad (4.18)$$

En combinant les équations précédentes, on trouve :

$$u(k) = u(k - T_e) + k_p (e(k) - e(k - T_e)) + k_i T_e e(k) \quad (4.19)$$

Par ailleurs, la commande P-intelligent se calcule de la manière suivante :

$$u(k) = \frac{1}{\alpha} [y^*(k) - [F] + K_p e(k)] \quad (4.20)$$

$$[F] = y^*(k) - \alpha u(k - T_e) \quad (4.21)$$

Nous obtenons alors l'équivalence numérique de $[F]$:

$$\frac{1}{\alpha}(y(k) - y(k - T_e)) - \alpha u(k - T_e) + \frac{K_p}{\alpha} e(k) \quad (4.22)$$

Nous obtenons la commande numérique du P-intelligent :

$$u(k) = u(k - T_e) - \frac{e(k) - e(k - T_e)}{\alpha T_e} \quad (4.23)$$

En identifiant les équations (4.22) et (4.23) on trouve que :

$$k_p = -\frac{1}{\alpha T_e}, k_i = \frac{K_p}{\alpha T_e} \quad (4.24)$$

4.2. Simulation :

- Pour la simulation on utilise :

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

$$\text{Soit l'iPI : } u = -[F]_e + y^* + PI(e)$$

Où :

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

- Le modèle de Simulink est représenté ci-dessous :

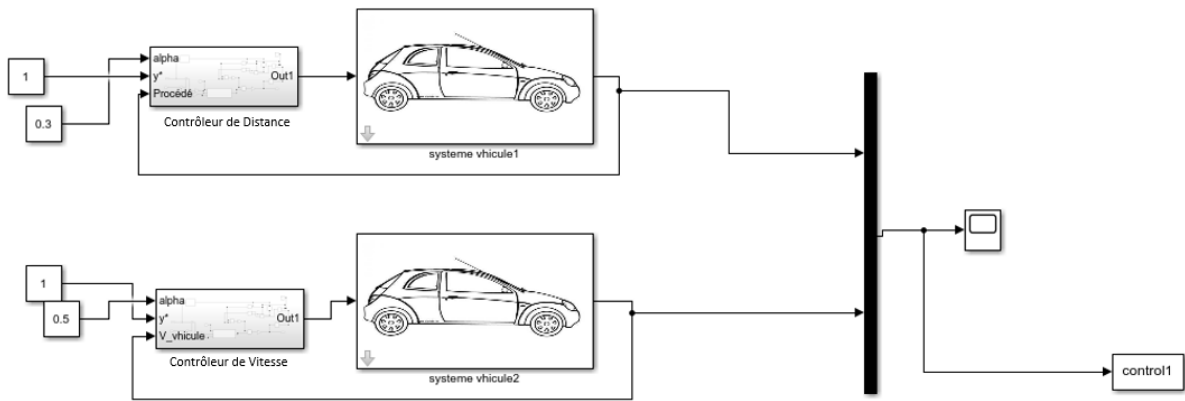


Figure 30 : modèle Simulink du contrôleur d'inter distance en utilisant un iPI

- Le bloc du iPI contrôleur de vitesse est comme suit :

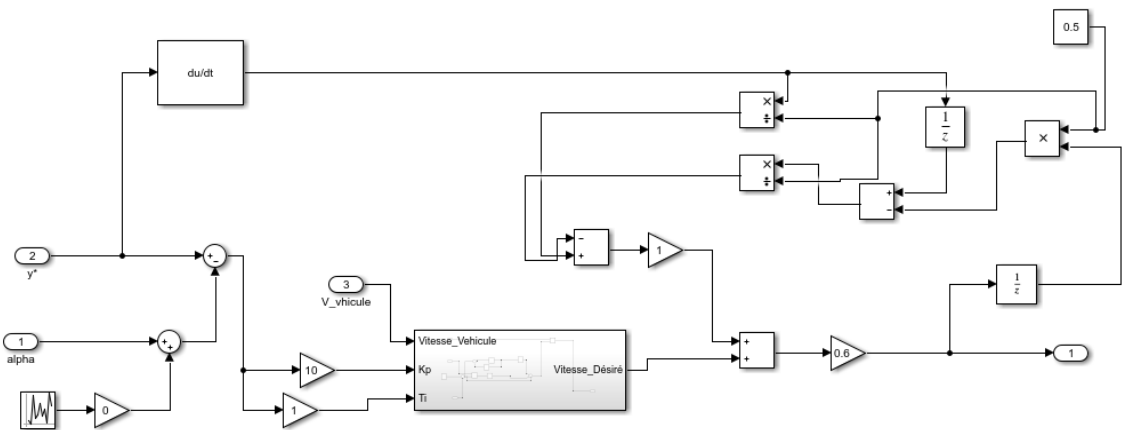


Figure 31 : modèle Simulink d'un iPI contrôleur de vitesse

- Le bloc du iPI contrôleur de distance est comme suit :

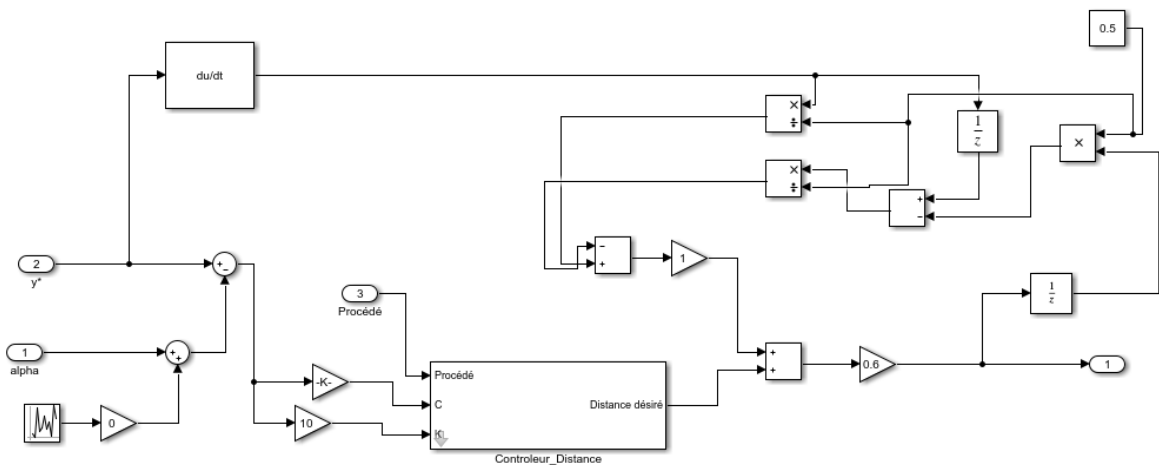


Figure 32 : modèle Simulink d'un iPI contrôleur de distance

4.2.1. Résultat :

- Le résultat de la simulation est représenté dans la figure suivante :

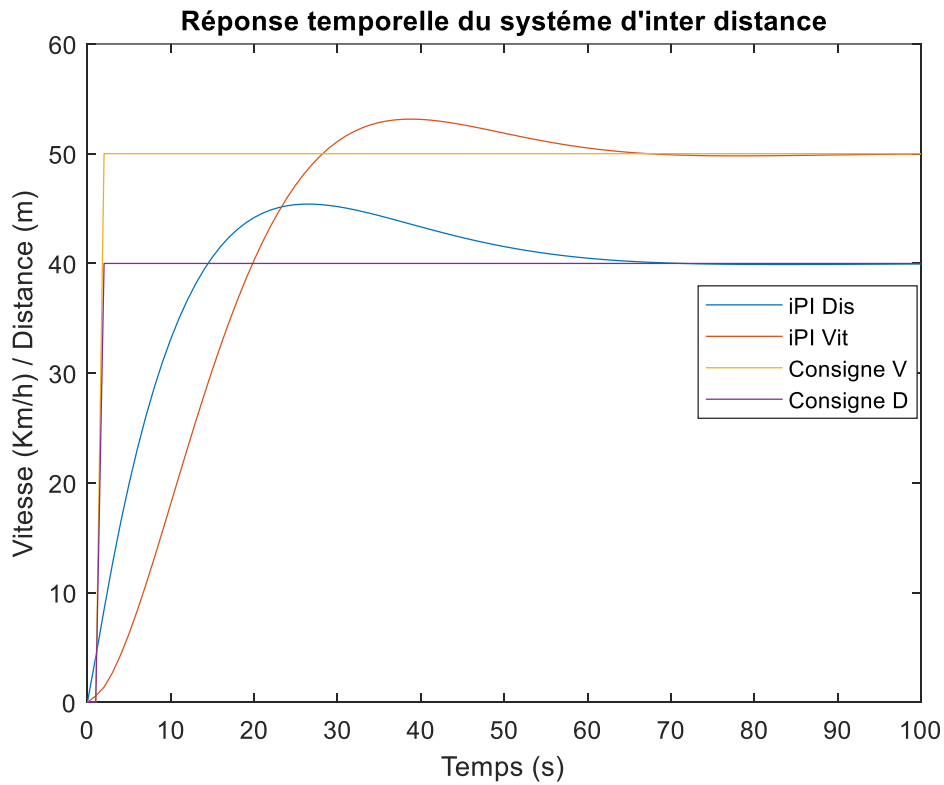


Figure 33 : Réponse temporelle du système de control d'inter distance

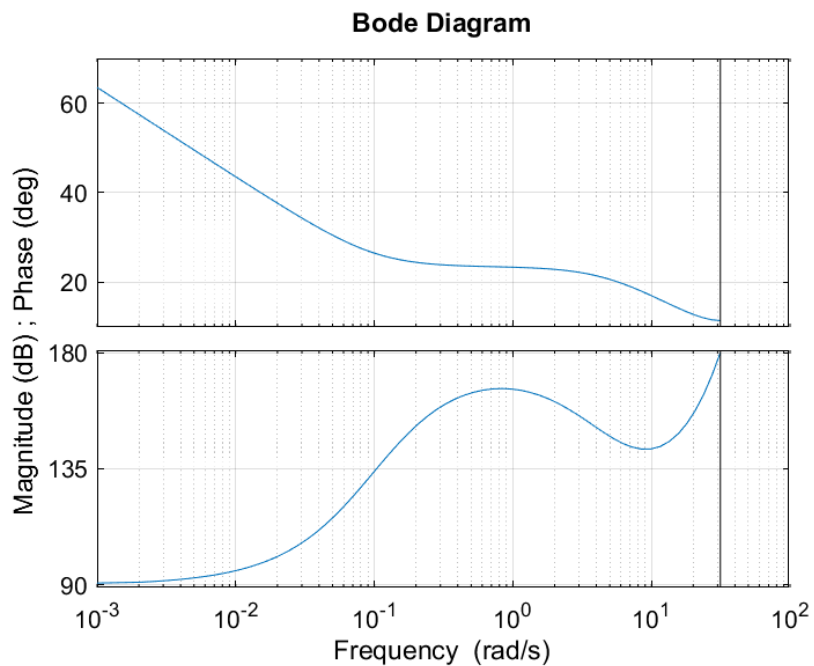


Figure 34 : Diagramme de Bode du iPI intelligent dans le domaine fréquentiel

- **Discussion :**

- On remarque que le contrôleur iPI de distance est plus rapide que le contrôleur de vitesse mais ils se suivent relativement.

4.2.2. Variation du coefficient alpha α :

- Le contrôleur iPI a été testé pour plusieurs valeurs du paramètre « α ».
- Le coefficient « α » a une grande influence sur chacun des contrôleurs iPI, il permet de diminuer la marge de phase et donc augmenter la rapidité du modèle, les illustrations suivantes montrent ce changement :

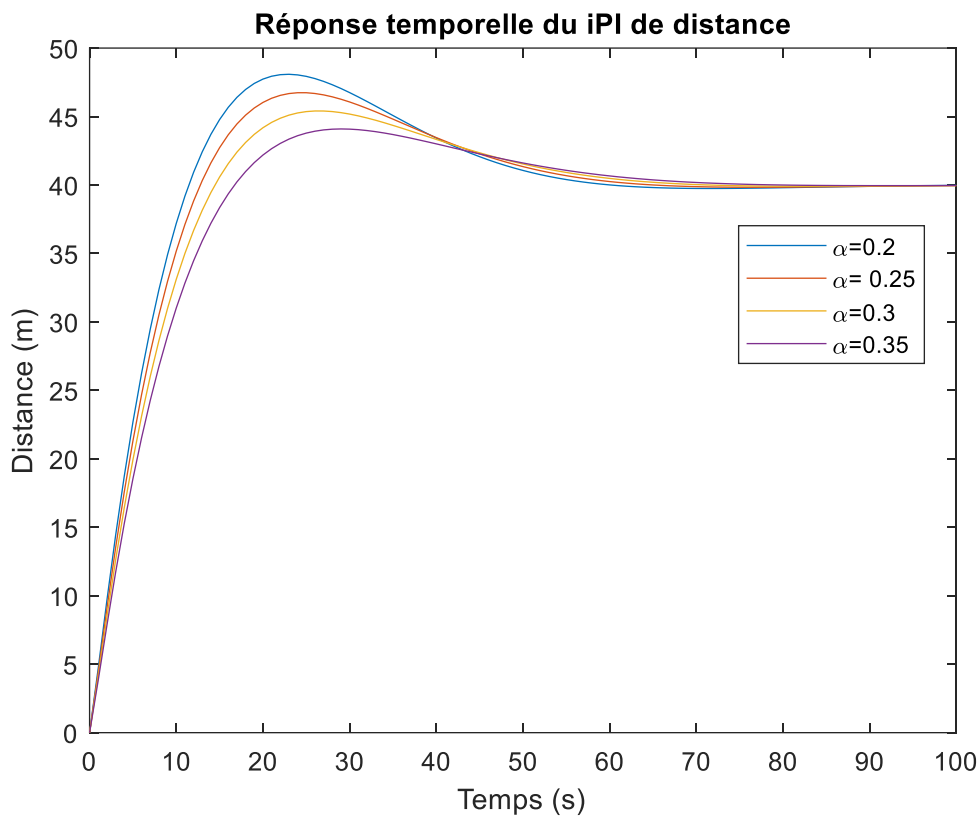


Figure 35 : les variations d'alpha sur le contrôleur iPI de distance

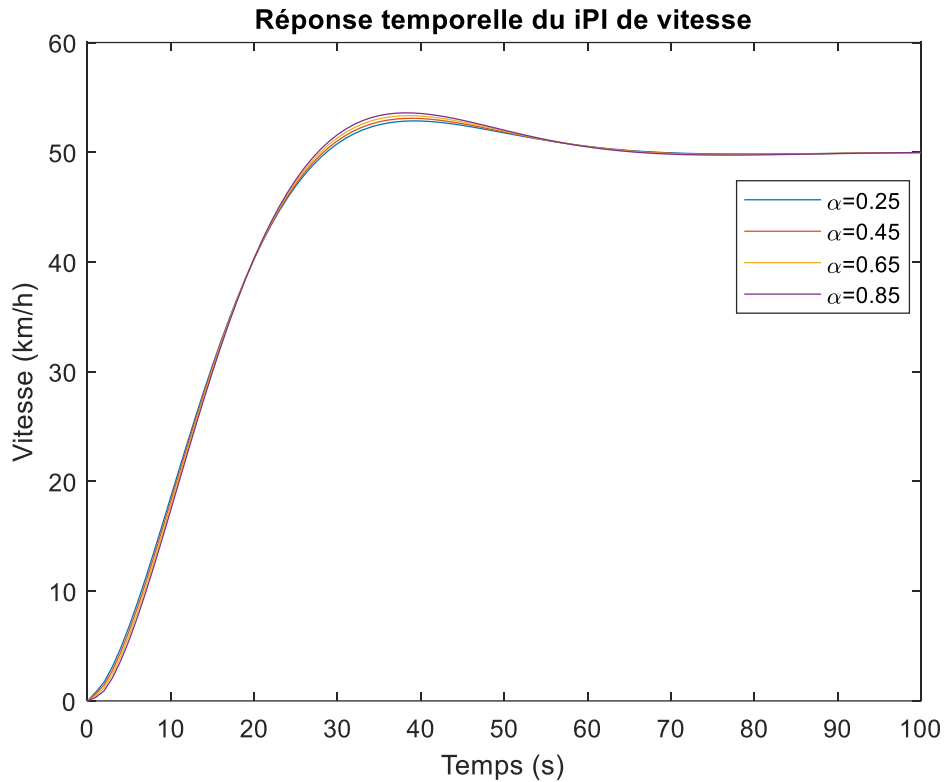


Figure 36 : les variations d'alpha sur le contrôleur iPI de vitesse

- **Discussion :**

On constate que pour un meilleur résultat, alpha vari :

- Pour le contrôleur de distance : $0.2 < \alpha < 0.8$
- Pour le contrôleur de vitesse : $0.1 < \alpha < 1$

Dans notre cas, on a utilisé $\alpha = 0.45$ pour le contrôleur de vitesse, et $\alpha = 0.35$ pour le contrôleur de distance.

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 le montre les figures suivantes :

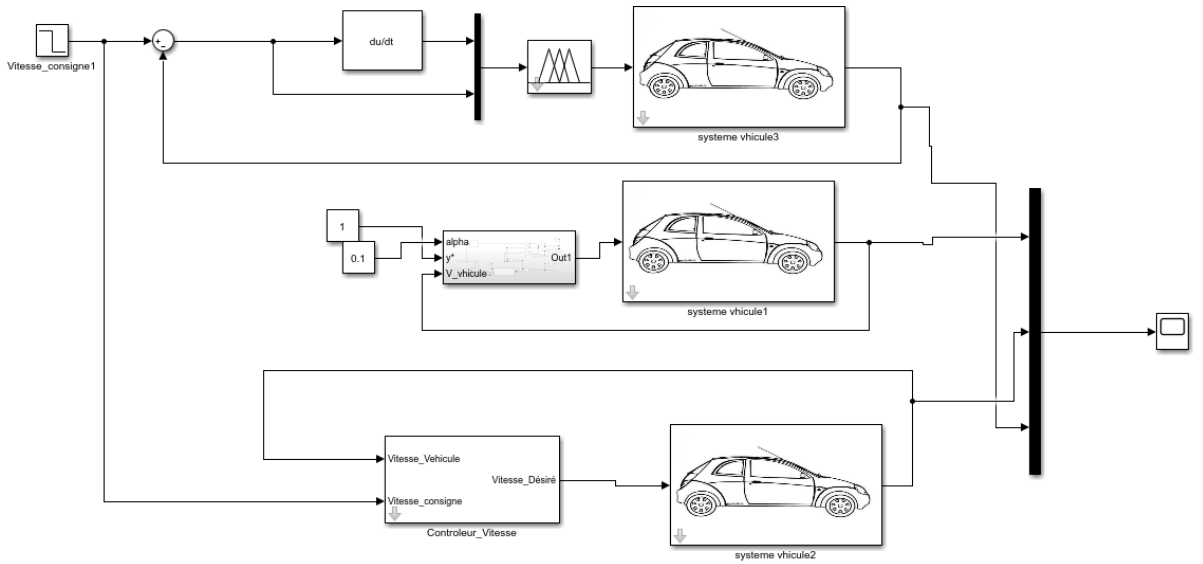


Figure 37 : Comparaison des contrôleurs iPI, PID flou et classique de vitesse

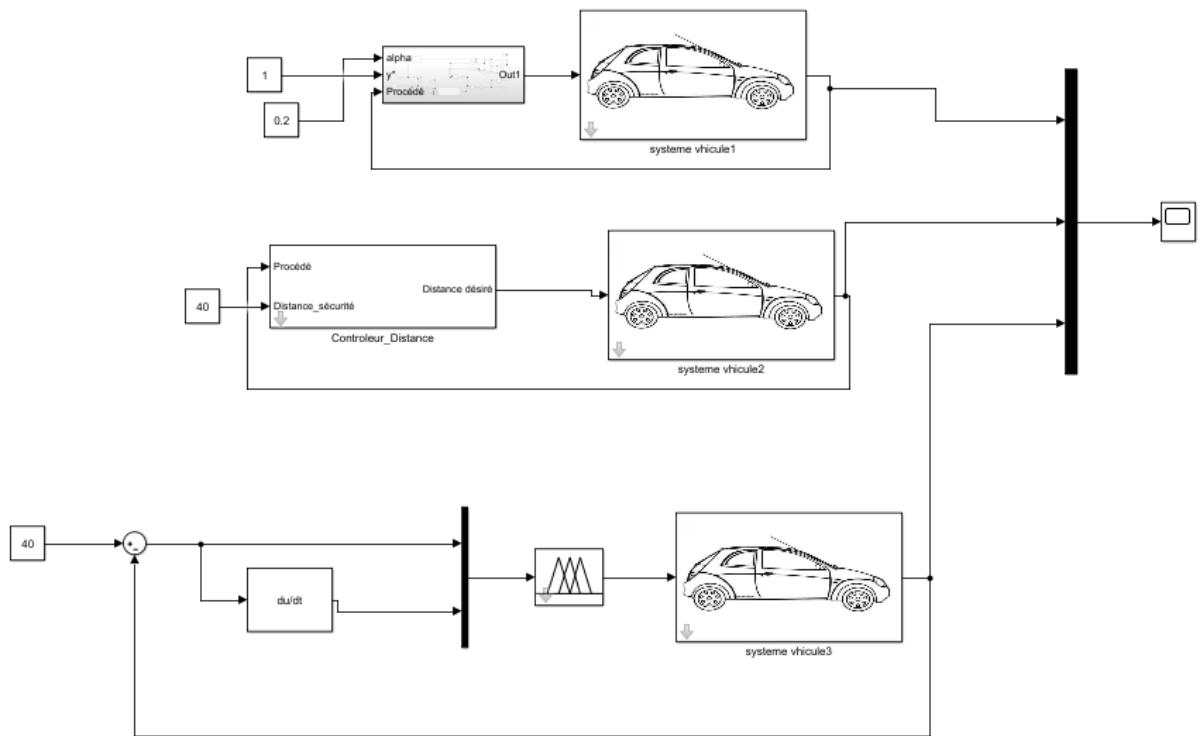


Figure 38 : Comparaison des contrôleurs iPI, PID flou et classique de distance

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

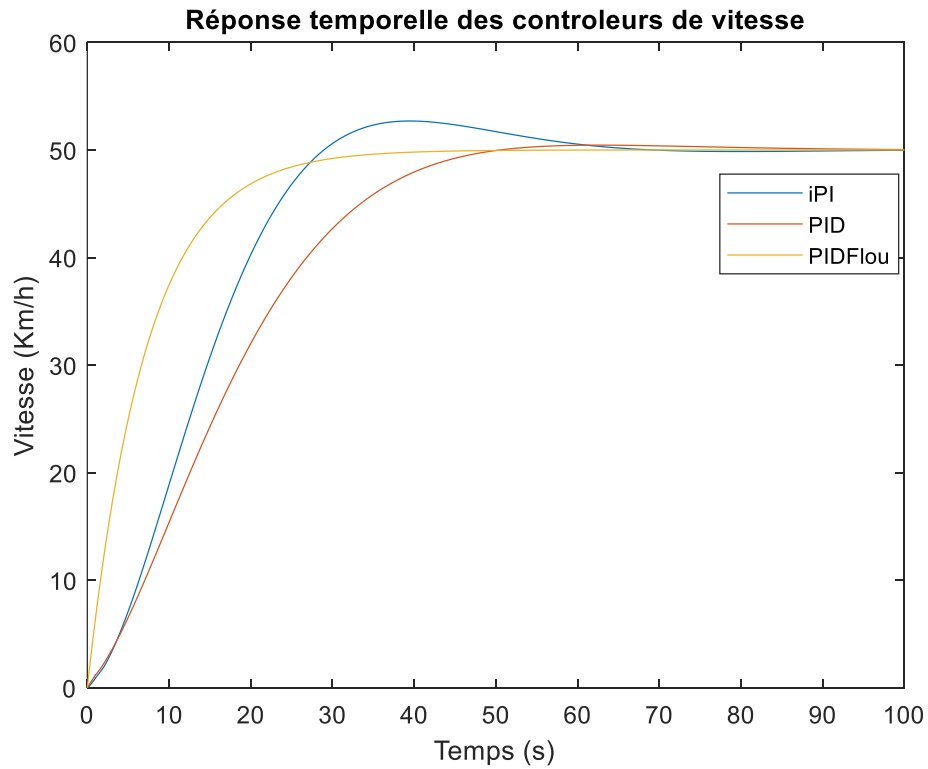


Figure 39 : Réponse temporelle des régulateurs de vitesse

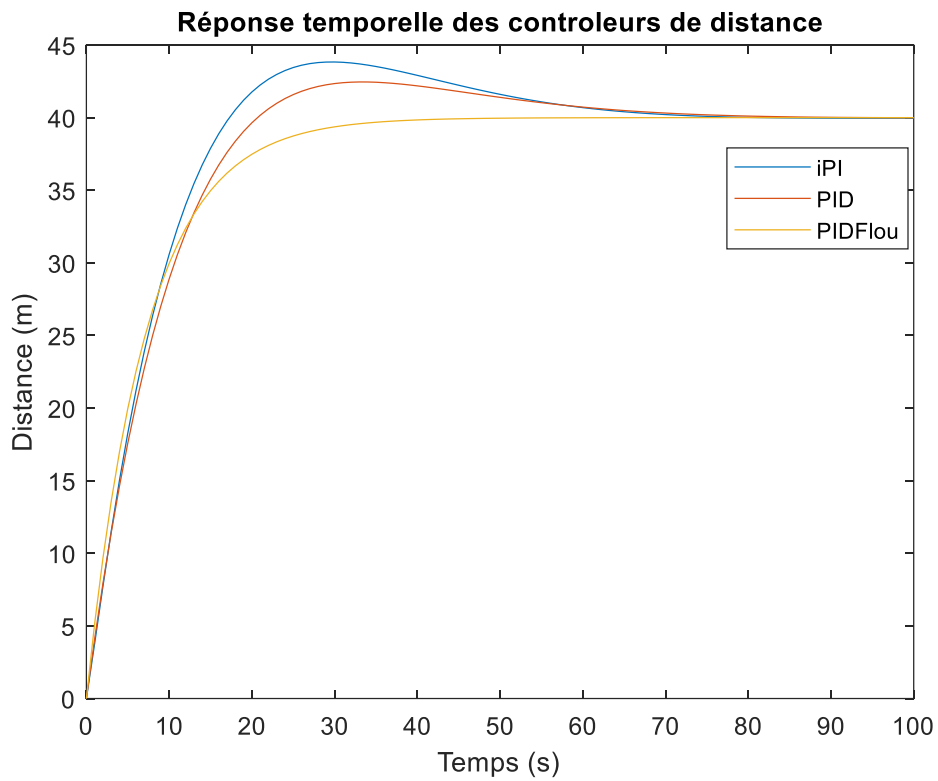


Figure 40 : Réponse temporelle des régulateurs de distance

- **Discussion :**

Cette comparaison montre que :

- Le comportement de l'iPI (de vitesse et de distance) est légèrement meilleur que celui du PID classique, il est plus rapide et mieux précis.
- Le PID flou dans tous les cas reste le meilleur choix.
- L'écart-type de chacun des régulateurs est :

$$iPI(\text{distance}) = 0.2655$$

$$PID(\text{distance}) = 0.4456$$

$$PID\text{ Flou}(\text{distance}) = 0.0523$$

$$iPI(\text{vitesse}) = 0.1831$$

$$PID(\text{vitesse}) = 0.1957$$

$$PID\text{ Flou}(\text{vitesse}) = 0.1370$$

4.4. Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait une étude sur le PI intelligent et l'élaboration d'une commande sans modèle. Ensuite on a appliqué les trois méthodes de commande (PID classique et flou, et iPI) sur un système de véhicule, afin de faire une étude comparative entre eux.

Après la simulation, on conclut que :

- Le régulateur flou donne de meilleures réponses par rapport aux régulateur PID et iPI
- L'iPI est plus efficace que le régulateur PID classique.

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 établi. Nous avons également comparé le contrôleur iPI aux contrôleur PID classique et Flou.

Enfin, nous pourrons 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] Larafi Bentouhami, « Contrôle de la Dynamique Latérale d'un véhicule avec Estimation des Forces de Contact Roue-Sol », Magister, départ. De l'électrotechnique, Univ Batna, le 15/12/2010.
- [2] Boualem Badji, « Caractéristique du comportement non linéaire en dynamique du véhicule », Thèse Doctorat, départ. De l'automatique, Univ Belfort-Montbéliard, le 15/12/2009
- [3] GENTIANE VENTURE, « Identification des paramètres dynamiques d'une voiture », Thèse Doctorat, départ. Robotique, Univ de Nantes, le 25/11/2003
- [4] Ahmed Chaïbet, « Contrôle latérale et longitudinale pour le suivi de véhicule », Thèse Doctorat, départ. Automatique, Univ d'Evry Val d'Essonne, le 29/06/2006
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] Alina BESANCON-VODA & Sylviane GENTIL. Régulateur PID analogiques et numériques. Edition Technique d'ingénieur 2012.
- [9] 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.
- [10] Maurice Rivoire & Jean-Louis Ferrier, Cours d'automatique, Asservissement-Régulation Commande analogique. Edition CHIHAB Alger 1994.
- [11] MENOUN Idhir & REHRAH Ferhat, « Etude comparative des régulateurs PID et Flou Application à un moteur à courant continu (MCC) », Mémoire Master, départ. Génie électrique, Univ Abderrahmane Mira, Bejaïa 2011/2012
- [12] Jean-Marie Flaus, « La régulation industrielle ; régulateur PID, Prédictifs et flous », Edition HERMES, Paris 1994.
- [13] BERNADETTE BOUCHON-MEUNIER, « La logique floue et ses applications », Edition Addison-Wesley France SA 1995.
- [14] J. Godjevac, « Idées nettes sur la logique floue. Presse polytechnique et universitaire romande Lausanne 1999 ».

Bibliographie

- [15] 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.
- [16] Michel FLIESS & Cedric JOIN, "Model-free control", Projet NON-A, INRIA Lille Nord-Europe, France 20 novembre 2003
- [17] 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.
- [18] Andrea-Novel, B, Fliess, M, Join, C, Mounier, H, & Steux (2010), "A mathematical explanation via intelligent" PID controllers of the strange ubiquity of PIDs", in 18th Medit. Conf. Control Automat., Marrakech.
- [19] John Agee, selçuk Kizir & Z. Bingul, "Intelligent proportional-integral (iPI) control of a single link flexible joint manipulator", Article in Journal of Vibration and Control · November 2013
- [20] Bilal Kadri, "Model Free Adaptive Fuzzy Control: Beginners Approach", VDM Verlag M. (2009).