

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



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



## Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

**Master (LMD)**

**Spécialité : AUTOMATIQUE ET SYSTEMES**

**Filière : AUTOMATIQUE**

Intitulé :

La commande prédictive appliquée au contrôle latéral du véhicule

Présenté par :  
BEKKOUCHE Abdelmoumen  
BELGOURARI Larbi

Devant le jury composé de :

Dr LABANE Chrif  
Dr MEKKAOUI Mohamed  
Dr MERAH Abdelkader

Président  
Encadreur  
Examineur

Soutenu le Promotion 2019-2020

# Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier le bon Dieu, de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour mener à terme notre formation de Master et pouvoir réaliser ce travail de recherche.

Nous tenons à exprimer nos profonds remerciements à notre encadreur Dr. MEKKAOUI MOHAMED pour sa disponibilité, ses précieux conseils et ses orientations, et la confiance qu'il nous a témoigné tout au long de ce travail.

Nous remercions également Dr MERAH AEK et Dr LABAN CHRIF de nous avoir honorés de ses présences pour examiner ce travail.

Enfin nos remerciements à tous les enseignants de département électrotechnique spécialité Automatique ainsi que tous les étudiants. Au bonheur des plus chers.

Introduction générale .....	01
-----------------------------	----

## CHAPITRE 01

<b>1Introduction:</b> .....	<b>03</b>
<b>1.1Mouvements et organes du véhicule:</b> .....	<b>04</b>
<b>1.1.1Les mouvements du véhicule:</b> .....	<b>04</b>
<b>1.1.2Les organes du véhicule:</b> .....	<b>05</b>
<b>1.1.2.1La caisse:</b> .....	<b>05</b>
<b>1.1.2.2Les roues (le pneumatique):</b> .....	<b>06</b>
<b>1.1.2.3Le moteur à combustion:</b> .....	<b>06</b>
<b>1.1.2.4Le circuit électrique:</b> .....	<b>07</b>
<b>1.1.2.5Le circuit de freinage:</b> .....	<b>07</b>
<b>1.1.2.6La suspension :</b> .....	<b>07</b>
<b>1.1.2.7Direction, angle de braquage, pince, voie et empattement:</b> .....	<b>07</b>
<b>1.1.2.8La transmission:</b> .....	<b>08</b>
<b>1.1.2.9Carrossage et angle de chasse:</b> .....	<b>08</b>
<b>1.1.2.10L'essieu:</b> .....	<b>08</b>
<b>1.2Les forces de résistance à l'avancement de véhicule:</b> .....	<b>09</b>
<b>1.2.1Force de résistance aérodynamique <math>w F</math>:</b> .....	<b>09</b>
<b>1.2.2Force de résistance au roulement <math>F_{roul}</math>:</b> .....	<b>09</b>
<b>1.2.3Force de gravité <math>F_{grav}</math>:</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2.4La force d'inertie:</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2.5Le Frottements internes:</b> .....	<b>10</b>
<b>1.3Modélisation de véhicule:</b> .....	<b>10</b>
<b>1.3.1Dynamique du véhicule:</b> .....	<b>10</b>
<b>1.3.1.1Principe de Newton:</b> .....	<b>10</b>
<b>1.4.1Adhérence:</b> .....	<b>15</b>
<b>1.4.2Comportement longitudinal:</b> .....	<b>15</b>
<b>1.4.3Comportement transversal:</b> .....	<b>15</b>
<b>1.5Expression de l'angle de dérive des pneumatiques:</b> .....	<b>16</b>
<b>1.6Expression des efforts latéraux et longitudinaux:</b> .....	<b>18</b>
<b>1.6.1 Effort latéral:</b> .....	<b>18</b>
<b>1.6.2Effort longitudinal:</b> .....	<b>19</b>
<b>1.7Modèle dynamique du véhicule:</b> .....	<b>19</b>
<b>1.7.1Schémas symboliques:</b> .....	<b>20</b>
<b>1.8Modèle cinématique:</b> .....	<b>21</b>
<b>1.8.1Équations du modèle:</b> .....	<b>22</b>
<b>1.8.2Schéma symbolique du modèle:</b> .....	<b>22</b>

1.8.3L'effet d'une courbure: .....	23
1.9Conclusion .....	23

## CHAPITRE 02

<b>1. Introduction: .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Concepts de base: .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2 Principe de la commande prédictive:.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3 Eléments d'une commande prédictive: .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4 Historique de la commande prédictive: .....</b>	<b>27</b>
<b>2.5 Les différents types d'algorithmes prédictifs: .....</b>	<b>28</b>
<b>2.5.1Cas linéaire: .....</b>	<b>28</b>
<b>2.5.1.1 La commande prédictive à base de modèle (MPC):.....</b>	<b>28</b>
<b>2.5.1.2 Stratégie générale de la commande prédictive MPC:.....</b>	<b>28</b>
<b>2.6 Définition du modèle du système: ... ..</b>	<b>30</b>
<b>2.7 Recherche d'un prédicteur optimal: .....</b>	<b>31</b>
<b>2.8 Critère à minimiser:.....</b>	<b>33</b>
<b>2.8.1Expression du critère sous forme analytique: .....</b>	<b>33</b>
<b>2.8.2Expression du critère sous forme matricielle: .....</b>	<b>34</b>
<b>2.9 Le principe du fonctionnement du MPC:.....</b>	<b>35</b>
<b>2.10 Structure de base de l'algorithme MPC: .....</b>	<b>36</b>
<b>2.11 Conclusion: .....</b>	<b>36</b>

## CHAPITRE03

<b>3.1introduction .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2Formulation du problème .....</b>	<b>39</b>
<b>3.3La dynamique latéral du véhicule.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.1Les mouvements du véhicule et les forces extérieurs .....</b>	<b>40</b>
<b>3.4Première idée de la commande .....</b>	<b>41</b>
<b>3.5Les tests de simulation.....</b>	<b>42</b>
<b>3.5.1Les tests du modèle dynamique.....</b>	<b>42</b>
<b>3.5.2Les applications numériques.....</b>	<b>42</b>
<b>3.6Test du comportement sur une ligne droite.....</b>	<b>44</b>
<b>3.7Test du changement de la voie.....</b>	<b>48</b>
<b>3.8Test du glissement de véhicule.....</b>	<b>51</b>
<b>3.9Conclusion.....</b>	<b>54</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>55</b>

# LISTE DE FIGURES

## CHAPITRE01

Figure1.1 Les mouvements du véhicule .....	05
Figure1.2 La caisse.....	06
Figure1.3 le pneumatique .....	06
Figure1.4 La suspension .....	07
Figure1.5 Braquage, voie et empattement .....	08
Figure.1.6 Les forces de résistance à l'avancement de véhicule.....	09
Figure.1.7 angle de dérivé de la roue avant gauche .....	16
Figure1.8 Schéma bloc du modèle dynamique.....	21
Figure1.9 Modèle géométrique du véhicule.....	21
Figure.1.10 Schéma de bloc du modèle cinématique .....	22

## CHAPITRE02

Figure2.1 Représentation temporelle du principe de la commande prédictive .....	26
Figure2.2 Stratégie de commande prédictive .....	27
Figure2.3 La méthodologie du MPC .....	29
Figure2.4 Le schéma fonctionnel de la structure de base des algorithmes MPC .....	30
Figure2.5 Le schéma fonctionnel de la structure de base des algorithmes MPC .....	36

## CHAPITRE03

Figure.3.1Les organes de la dynamique lateral du véhicule .....	39
Figure.3.2 Les different mouvements de véhicule .....	40
Figure3.3La boucle de commande .....	41

<b>Figure3.4</b> Shèma bloc du modèle dynamique.....	<b>42</b>
<b>Figure.3.5</b> Schéma bloc de boucle de commande sous simulink .....	<b>43</b>
<b>Figure3.6</b> Variation de l'ècart latèrale .....	<b>44</b>
<b>Figure3.7</b> Variation de l'ècart latéral .....	<b>45</b>
<b>Figure3.8</b> Variation du signal de commande (braquage) .....	<b>46</b>
<b>Figure3.9</b> Variation du angle de cap .....	<b>47</b>
<b>Figure3.10</b> Variation de l'ècart latèral .....	<b>48</b>
<b>Figure3.11</b> Variation du signal de commande (braquage).....	<b>50</b>
<b>Figure3.12</b> Variation de l'angle de cap.....	<b>51</b>
<b>Figure3.13</b> Variation de l'ècart latèrale.....	<b>52</b>
<b>Figure3.14</b> Variation de commande (braquage).....	<b>53</b>
<b>Figure3.15</b> Variation de l'angle de cap.....	<b>54</b>

# Resume

Notre objectif est de tester les techniques de commande prédictive pour le contrôle du véhicule afin d'avoir un contrôleur non linéaire robuste vis-à-vis les perturbations, nous avons présenté notre modèle de véhicule pour cela nous a permis de rappeler les différents modèles analytiques utilisés pour représenter l'évolution de l'écart latéral du véhicule en fonction de l'angle de roues, de la vitesse et du rayon de courbure de la route, et la théorie de la commande prédictive appliquées sur des systèmes mono variables. Nous allons dans un premier volet exposer les fondements et les principes des commandes des contrôleurs basés sur des approches récentes.

Notre travail est dédié à la simulation de notre contrôleur sous MATLAB / Simulink. Ces tests nous ont donné de bons résultats pour contrôler notre système non linéaire et le garder sur la position désirée durant son chemin avec une vitesse constante.

Comme perspective, la suite logique de ce travail est :

-Il s'agit d'un modèle plus complet avec plus de degrés de liberté (couplage entre la dynamique latérale, la dynamique longitudinale et la suspension).

Commander un véhicule dans le modèle fortement couplé selon le choix de la variable  $v_x$

Introduire une fonction exponentielle dans la loi de commande

-Étudier la commande par mode prédictive sur les systèmes multi variables.

# Introduction générale

La conduite automobile reste une activité dangereuse qui produit de nombreux dégâts humains et économiques. Les accidents par sortie de voie représentent selon les statistiques 30% à 40% des sinistres : direction erronée du véhicule suite à un endormissement, une imprudence ou une vitesse excessive, ou encore par perte de contrôle due à l'inexpérience, une mauvaise visibilité ou une adhérence amoindrie. Ceci motive un effort important de recherche visant à aider le conducteur et sécuriser la conduite routière. Les aides sont développées sur trois niveaux.

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

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

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

Dans ce mémoire, nous décrivons la dynamique de la voiture par un modèle dynamique à trois degrés de liberté avec  $X$  et  $Y$  comme position et l'angle de cap comme orientation. La commande est uniquement consacrée au déplacement latéral du véhicule.

Il est nécessaire de noter que le déplacement latéral d'une voiture est sensible aux interventions du conducteur par rapport à la conduite longitudinale. Le problème pour la conduite latérale reste complexe du fait que plusieurs paramètres interviennent tel que l'angle de glissement (généralement non contrôlé directement). Néanmoins l'angle de braquage



pourra être contrôlé et par conséquent de même pour l'angle de cap, nous considérons la commande prédictive appliquée au control latéral du véhicule.

Le mémoire subdivise en trois parties distinctes. Dans la première partie nous faisons la modélisation dynamique d'un véhicule et nous décrivons les principaux éléments qui interviennent dans la dynamique du véhicule. Dans la seconde partie nous allons voir les fondements théoriques et la commande prédictive. Dans la troisième partie on va appliquer notre loi de commande pour la dynamique latérale d'un véhicule pour cela nous avons utilisé une commande prédictive sous l'environnement Matlab-Simulink. Ou nous allons simuler notre plusieurs teste de notre commande et analyser les résultats.

La fin de mémoire sera dédiée à la conclusion générale et les perspectives.

# Chapitre 1:

## Modélisation de véhicule

## **1.Introduction**

En automatique, la majorité des approches de la commande non linéaire exige la disponibilité d'un modèle mathématique du système, et ceci n'est pas toujours réalisable à cause de l'imprécision et l'incertitude liées aux paramètres mal connus, difficilement identifiables et des dynamiques négligées. D'autre part, les performances assurées seront directement liées à l'exactitude du modèle utilisé. Par conséquent, les automaticiens sont confrontés au problème de définir un modèle mathématique précis sachant que les systèmes deviennent de plus en plus complexes, les méthodes de modélisation traditionnelles s'avèrent souvent incapables de représenter le comportement global d'un système. L'utilisation des contrôleurs basés sur l'expertise humaine peut être une alternative à la commande de ce type de systèmes.

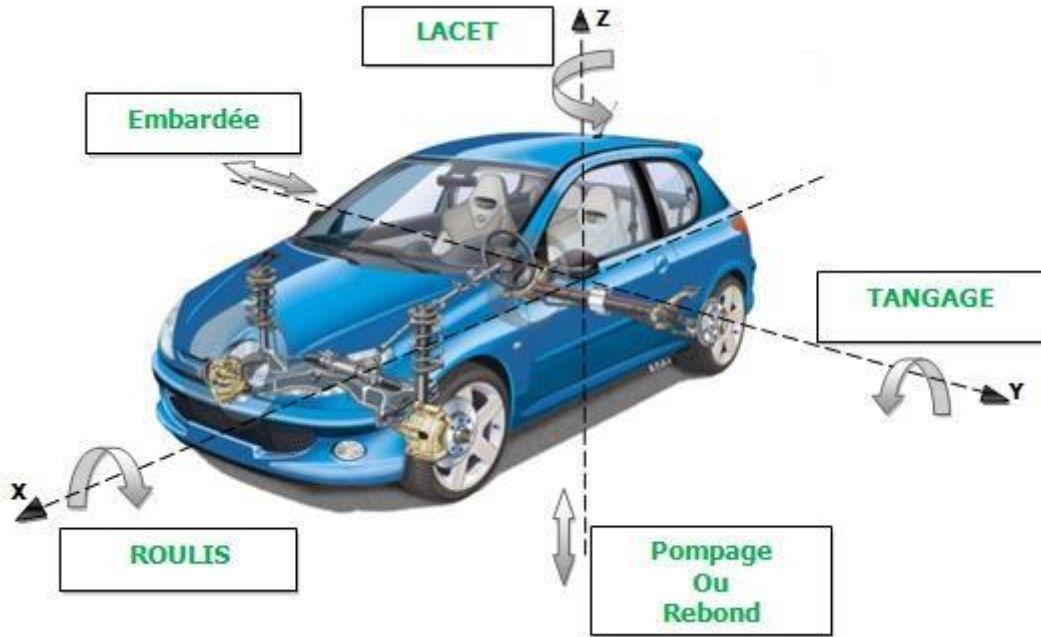
Dans ce chapitre, nous nous intéressons exclusivement à la modélisation de la dynamique longitudinale et latérale du véhicule. Le modèle est obtenu en énonçant les deux principes fondamentaux de la dynamique et en décrivant les forces et les moments agissant sur le véhicule dans le bon repère. Pour compléter les développements, nous y intégrons aussi le pneumatique qui constitue l'interface avec l'environnement extérieur qu'est la route permettant ainsi d'avoir une forme explicite des efforts longitudinaux et latéraux.

### **1.1 Mouvements et organes du véhicule:**

#### **1.1.1 Les mouvements du véhicule:**

Le véhicule représenté sur la Figure (1.1) possède six degrés de liberté constitués par un ensemble de rotations et de translations. La translation sur l'axe  $x$  caractérise le déplacement longitudinal du véhicule et le déplacement latéral se fait selon l'axe  $y$ . La translation sur l'axe  $z$  permet le mouvement vertical  $Z$  de la caisse du véhicule par l'intermédiaire de ses suspensions. La rotation autour de l'axe  $Z$  autorise le déplacement angulaire de lacet  $W$ , elle définit également son cap. De plus, la grandeur  $\beta$  qui constitue l'angle entre le cap et le vecteur vitesse  $V$  du véhicule, est l'angle de dérive.

La rotation autour de l'axe  $x$  définit l'angle de roulis, phénomène en particulier ressenti lorsque le véhicule se déplace dans un virage. La dernière rotation définit le mouvement de tangage par le déplacement angulaire. Il intervient par exemple lors des phases d'accélération et de freinage.



**Figure 1.1 Les mouvements du véhicule**

### **1.1.2 Les organes du véhicule:**

Un véhicule est un ensemble de corps reliés entre eux par plusieurs liaisons visant d'une part à assurer le mouvement du châssis mais aussi le confort des passagers qu'il transporte. Il est composé d'un châssis, et d'un système de liaison au sol comprenant : les pneumatiques, les roues, les trains et les suspensions. La dynamique du système de direction n'est pas pris en compte et l'angle au volant est directement appliqué aux roues.

#### **1.1.2.1 La caisse:**

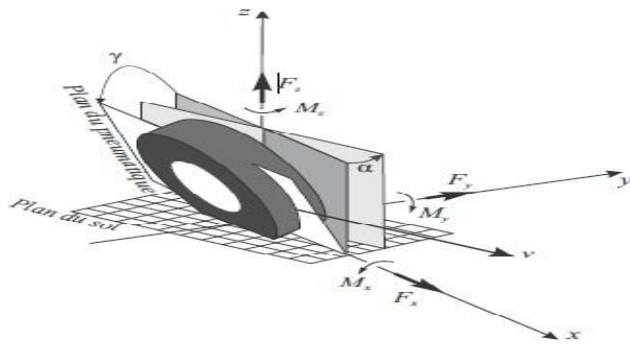
La caisse est composée du châssis et de la carrosserie. Elle est considérée comme un corps rigide ou plutôt comme une masse suspendue dont chaque extrémité est reliée à une roue à travers un système de suspension. Par hypothèse le repère du véhicule est confondu à celui de la caisse ce qui explique que le mouvement du véhicule soit en partie défini par le mouvement de translation et de rotation de la caisse.



**Figure 1.2 La caisse**

**1.1.2.2 Les roues (le pneumatique):**

La roue est considérée comme un corps rigide enveloppé de pneumatique. C'est au niveau de l'interface pneumatique/chaussée que se développent les forces nécessaires à la traction du véhicule. Les quatre roues du véhicule ont pour rôles principaux de fournir les forces motrices ou de freinage pour développer les efforts longitudinaux qui permettent d'accélérer et de freiner le véhicule. Ce sont elles qui permettent de mobiliser l'adhérence de la chaussée.



**Figure 1.3 le pneumatique**

**1.1.2.3 Le moteur à combustion:**

Le moteur à combustion utilise l'énergie produite par l'explosion d'un mélange air/essence pour créer un mouvement de rotation. L'explosion actionne des pistons à l'intérieur des cylindres. Généralement, il y a 4 cylindres dans un moteur. Ils sont réglés de sorte que l'un des 4 soit toujours dans la phase d'explosion. Le mouvement circulaire ne s'arrête donc jamais.

#### **1.1.2.4 Le circuit électrique:**

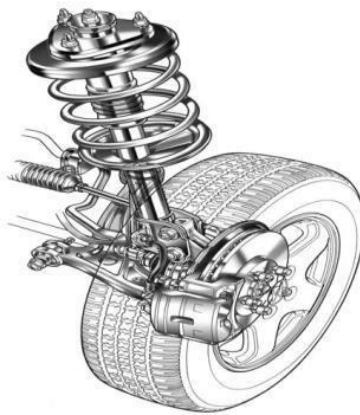
Il démarre le moteur. Il stocke et distribue l'électricité vers les éléments de sécurité (phares, clignotants) et de confort (lève-vitre, autoradio).

#### **1.1.2.5 Le circuit de freinage:**

Il ralentit, arrête et maintient à l'arrêt le véhicule.

#### **1.1.2.6 La suspension :**

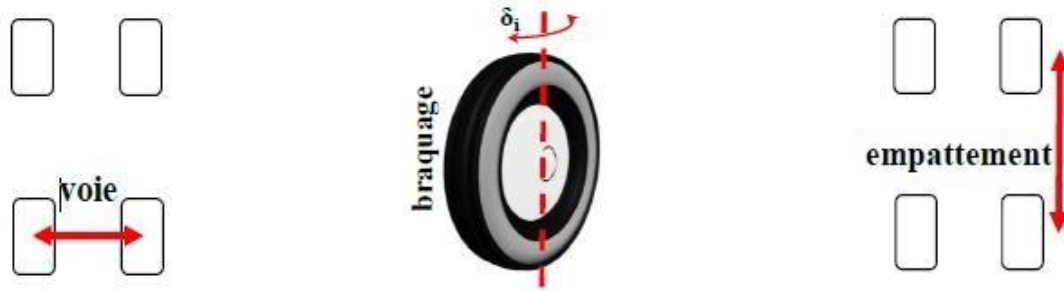
Grâce aux amortisseurs, elle assure une liaison entre la route, les roues et l'auto pour plus de confort et de tenue de route.



**Figure 1.4 La suspension**

#### **1.1.2.7 Direction, angle de braquage, pince, voie et empattement:**

- La direction se compose du volant, de la colonne de direction et de la crémaillère qui transforme la rotation du volant en une translation afin de faire tourner les roues directrices.
- Le braquage  $\delta_i$ , est l'angle de rotation des roues avant autour de leurs axes verticaux. Il est dû principalement à l'action du conducteur sur le volant.
- La pince est l'angle de rotation des roues arrière autour de leurs axes verticaux. Cet angle est dû uniquement à la cinématique et à l'élasto cinématique de strains.
- La voie est la distance entre les deux roues d'un même essieu.
- L'empattement est la distance entre les deux roues d'un même côté.



**Figure 1.5 Braquage, voie et empattement**

#### **1.1.2.8 La transmission:**

Le mouvement de rotation produit par le moteur est communiqué aux roues grâce à la transmission. Celle-ci est composée, entre autres, de :

- ✓ L'embrayage, qui permet d'interrompre l'entraînement des roues par le moteur le temps de changer de vitesse.
- ✓ La boîte de vitesses, qui permet d'adapter la vitesse du véhicule au type de route.

#### **1.1.2.9 Carrossage et angle de chasse**

Lorsque la voiture est soulevée ou enfoncée, les plans de la roue ne restent pas perpendiculaires à celui de la route : le véhicule prend du carrossage. C'est l'angle  $\pi$  formé par l'axe d'inclinaison de la roue (donnée par la fusée ou le porte moyeu) par rapport à l'horizontale. Cette inclinaison a plusieurs rôles :

- Permettre au poids du véhicule de reposer aussi près que possible de la base de la fusée pour diminuer le porte à faux (déport) Permettre de garder les roues perpendiculaires au sol sur route bombée.
- Aider l'inclinaison des pivots à faire coïncider l'axe des pivots et le point de contact du pneumatique au sol (diminution du déport qui provoque un couple nuisible)

Un carrossage est négatif lorsque le hauts des roues s'écartent et il est positif lorsqu'ils se rapprochent.

Une roue directrice s'oriente suivant un axe de pivotement incliné par rapport à la verticale vers l'arrière ou l'avant du véhicule et forme l'angle de chasse. La chasse donne la stabilité aux roues directrices et améliore les sensations au volant.

#### **1.1.2.10 L'essie**

C'est l'ensemble des organes qui relie la roue au train à l'exception des éléments de directions et de suspensions. L'essieu assure la compatibilité avec l'environnement physique, les performances attendues et la sécurité d'utilisation. [1]

## 1.2 Les forces de résistance à l'avancement de véhicule:

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



Figure. 1.6 Les forces de résistance à l'avancement de véhicule

### 1.2.1 Force de résistance aérodynamique $w F$ :

Comme tout objet en mouvement, un véhicule est exposé à un ensemble d'efforts aérodynamiques dont le torseur est calculé au centre d'inertie du véhicule. Il se résume à la traînée longitudinale qui affecte principalement les performances en accélération, et la poussée latérale constituant une perturbation externe influant surtout la stabilité du guidage et la portée verticale. L'effort aérodynamique peut être approché par l'équation suivante:

$$\begin{aligned} F_{wx} &= K_x v_x |v_x| \\ F_{wy} &= K_y v_y |v_y| \end{aligned} \quad (1.1)$$

Où  $k_x, k_y$  se sont des coefficients qui représentent le produit entre la densité de l'air, la surface de référence obtenue par projection frontale ou latérale du véhicule et le coefficient de pénétration dans l'air.

### 1.2.2 Force de résistance au roulement Froul:

Lorsque le véhicule roule, un moment apparaît autour de l'axe latéral du pneu. En effet, le rayon de la roue  $R_w$  à l'arrêt est différent de celui en roulement. Cette différence crée une zone de contact, qui une fois soumit à la charge verticale, génère un moment de résistance au roulement. La force de résistance au roulement est en fonction de la charge verticale et d'un coefficient de résistance au roulement  $C_{rr}$  :

$$F_{rouli} = F_{zij} C_{rr} \quad (1.2)$$



### 1.2.3 Force de gravité $F_{grav}$ :

Les forces de gravité,  $F_{grav}$ , n'entrent en jeu que si la route parcourue présente des pentes. Les forces de gravité sont d'autant plus grandes que la pente est forte et que la masse du véhicule grande.

$$F_{grav} = g M_v \sin(\alpha) \quad (1.3)$$

Où  $M_v$  est la masse du véhicule en,  $g$  l'accélération de la pesanteur (9.81 m/s<sup>2</sup>),  
 $\alpha$ , l'angle de la pente.

### 1.2.4 La force d'inertie:

La force d'inertie est liée à la masse du véhicule. Les frottements peuvent être réduits en optimisant les transmissions mécaniques en utilisant du lubrifiant (des produits utilisés en général pour réduire les frottements).

### 1.2.5 Les frottements internes:

Les frottements internes sont les frottements internes du moteur et de la transmission. C'est une force intérieure, car la réaction correspondante s'exerce aussi sur le véhicule, c'est une perte de rendement. [2]

## 1.3 Modélisation de véhicule:

### 1.3.1 Dynamique du véhicule

Nous nous intéressons dans cette section aux différentes étapes permettant de calculer les positions, les vitesses et les accélérations du véhicule en translation et en rotation. Les principes fondamentaux de la dynamique concernent, d'une part, l'équilibre des forces extérieures agissant sur le véhicule et d'autre part, l'équilibre des moments dynamiques du véhicule par rapport aux moments extérieurs. D'une manière générale, ils s'énoncent comme suit [3] :

#### 1.3.1.1 Principe de Newton

La somme des forces extérieures  $\vec{F}_{ext}$  appliquées à un corps solide en mouvement dans une direction donnée, est égale au produit de la masse du corps isolé par son accélération  $\vec{\gamma}_a$  dans cette direction.

$$\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{\gamma}_a \quad (1.4)$$

### 1.3.1.2 Deuxième principe

La somme des moments de torsion sur un axe donné est égale au produit du tenseur d'inertie et de l'accélération de rotation  $\vec{\Omega}$  suivant cet axe.

$$\sum \vec{M}_0 = I \frac{d}{dt} \vec{\Omega} \quad (1.5)$$

### Hypothèse 1.1

Pour des raisons de simplification, nous ne retiendrons dans la suite que trois degrés de liberté dans le mouvement du véhicule. Pour cela, plusieurs hypothèses sont nécessaires

[3] :

- a) La route est considérée plane sans pente ni côte, et sans dévers
- b) Le mouvement de translation se réduit à deux degrés de liberté : la translation longitudinale et la translation latérale, en revanche le mouvement vertical est négligé.
- c) Le mouvement de rotation se résume à un seul degré de liberté qui correspond au mouvement du lacet . Les deux autres degrés de liberté : le roulis et le tangage ne sont pas pris en ( $\Theta=0, \Phi=0$ )
- d) Le centre de gravité du véhicule est confondu avec l'origine de repère lié au véhicule

$$C_G = O_v \quad (1.6)$$

### 1.3.2 Mouvements de translation

Nous développons dans cette sous section l'expression du deuxième membre de l'équation (1.4), qui nécessite l'expression de l'accélération du véhicule

#### 1.3.2.1 Calcul de l'accélération absolue $\vec{\gamma}_a$

En utilisant les lois de composition des vitesses, l'accélération absolue au centre d'inertie du véhicule, confondu avec l'origine du repère associé au véhicule s'écrit :

$$\vec{\gamma}_a(C_G)_{R_v} = \vec{\gamma}_r(C_G)_{R_v} + \vec{\gamma}_c(C_G)_{R_v} + \vec{\gamma}_e(C_G)_{R_v} \quad (1.7)$$

Ou :

$\vec{\gamma}_r$  Accélération relative  
 $\vec{\gamma}_C = 2\vec{\omega}_{R_v/R_a} \wedge \vec{V}_r$  Accélérations de Coriolis  
 $\vec{\omega}_{R_v/R_a}$  Vitesse angulaire de  $R_v/R_a$   
 $\vec{\gamma}_e$  Accélération d'entraînement

$\vec{V}_r$  Vitesse relative du centre de gravité du véhicule

### 1.3.2.2 Détermination de la vitesse relative $\vec{V}_r$

La vitesse relative du point dans le repère est nulle. L'accélération relative est obtenue par dérivation de cette vitesse, elle est donc nulle elle aussi.

$$\vec{V}_r = 0, \text{ donc } \vec{\gamma}_r = 0 \quad (1.8)$$

### 1.3.2.3 Détermination de l'accélération de Coriolis $\vec{\gamma}_C$ .

L'accélération de Coriolis s'obtient en effectuant le produit vectoriel de la vitesse de rotation  $\vec{\omega}$  par la vitesse relative du centre de gravité  $\vec{V}_r$

Puisque la vitesse relative est nulle, l'accélération de Coriolis l'est aussi :

$$\vec{\gamma}_C = 2\vec{\omega}_{R_v/R_a} \wedge \vec{V}_r = 0 \quad (1.9)$$

### 1.3.2.4 Détermination de l'accélération d'entraînement $\vec{\gamma}_e$

L'accélération d'entraînement est calculée de la manière suivante Dans un premier temps, on dérive la vitesse d'entraînement, donnée par la relation :

$$\vec{V}_e(C_G)_{R_v} = \vec{V}_a(O_v)_{R_v} \quad (1.10)$$

Où :  $\vec{V}_a(O_v)_{R_v}$  est la vitesse du point par rapport au repère absolu

Nous obtenons :

$$\begin{aligned}
 \vec{\gamma}_e(C_G)_{R_v} &= \frac{d}{dt} (\vec{V}_e(C_G)_{R_v}) \\
 &= \frac{d}{dt} (\vec{V}_a(O_v)_{R_v}) \\
 &= \vec{\gamma}_a(O_v)_{R_v}
 \end{aligned} \quad (1.11)$$

L'accélération  $\overline{\gamma}_a(\mathbf{O}_v)_{R_v}$  s'obtient en dérivant  $\overline{V}_a(\mathbf{O}_v)_{R_v}$  dans le repère intermédiaire mobile :

$$\begin{aligned}\overline{\gamma}_a(\mathbf{O}_v)_{R_v} &= \frac{d}{dt}(\overline{V}_a(\mathbf{O}_v)_{R_v}) + \overline{\omega} \wedge \overline{V}_a(\mathbf{O}_v)_{R_v} \\ &= \begin{pmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}_{R_v} + \begin{pmatrix} \dot{\Psi} v_x \\ \dot{\Psi} v_y \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}_{R_v} \\ &= \begin{pmatrix} \dot{v}_x - \dot{\Psi} v_x \\ \dot{v}_y + \dot{\Psi} v_y \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}_{R_v}\end{aligned}\quad (1.12)$$

$$\overline{\gamma}_a(\mathbf{O}_v)_{R_v} = \begin{pmatrix} \dot{v}_x - \dot{\Psi} v_x \\ \dot{v}_y + \dot{\Psi} v_y \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}_{R_v}\quad (1.13)$$

En remplaçant  $\overline{\gamma}_a$  dans l'équation (1.2), on obtiendra :

$$m \begin{pmatrix} \dot{v}_x - \dot{\Psi} v_x \\ \dot{v}_y + \dot{\Psi} v_y \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}_{R_v} = \Sigma F_{ext}\quad (1.14)$$

### 1.3.2 Mouvements de rotation

Le calcul du moment dynamique est obtenu par dérivation du théorème de Koenig. Ce moment est exprimé dans le repère lié au véhicule défini comme suit:

$$\overline{K}(\mathbf{O}_v)_{R_v} = \overline{K}(\mathbf{C}_G)_{R_v} + \overline{OC}_G \wedge m \overline{\gamma}_a(\mathbf{C}_G)_{R_v}\quad (1.15)$$

Avec :

$\overline{K}(\mathbf{O}_v)_{R_v}$  Le moment dynamique en dans le repère  $R_v$

$\overline{K}(\mathbf{C}_G)_{R_v}$  Le moment dynamique du centre de gravité du véhicule

$\overline{\gamma}_a(\mathbf{C}_G)_{R_v}$  l'accélération du centre de gravité du véhicule dans le repère  $R_v$

#### Procédure de calcul :

Nous commençons par la détermination du moment cinétique

$$\overline{\sigma}(\mathbf{C}_G) = I \overline{\Omega}'\quad (1.16)$$

Où  $\vec{\Omega}$  est la vitesse de rotation du repère véhicule par rapport au repère absolu et  $I$  est la matrice des moments d'inertie du véhicule, elle prend la forme suivante :

$$I = \begin{pmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{pmatrix} \quad (1.17)$$

$$\vec{K}(C_G) = \frac{d}{dt}(\vec{\sigma}(C_G)) = \frac{d}{dt}(\vec{\sigma}(C_G)) \underbrace{\vec{\omega} \wedge \vec{\sigma}(C_G)}_{=0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ I_z \ddot{\Psi} \end{pmatrix}_{R_v} \quad (1.18)$$

$$\text{Avec } \vec{OC}_G \wedge m \vec{\gamma}_a(C_G)_{R_v} = 0 \quad (1.19)$$

Après avoir calculé tous les éléments du moment dynamique en , son expression finale est obtenu par la sommation (1.19) avec (1.18) qui doit être exprimée dans le repère véhicule

$$\vec{K}(O_v)_{R_v} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ I_z \ddot{\Psi} \end{pmatrix}_{R_v} \quad (1.20)$$

En remplaçant dans (1.5), on obtient :

$$\Sigma \vec{M}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ I_z \ddot{\Psi} \end{pmatrix}_{R_v} \quad (1.21)$$

### Le pneumatique

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. Leurs amplitudes dépendent de l'adhérence et des forces d'appuis verticales agissant au niveau des deux trains et varient aussi au cours du temps sous l'effet des accélérations longitudinales ou latérales. On parle alors de report de charge.

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

### 1.4.1 Adhérence

L'adhérence du pneumatique dépend en premier lieu des caractéristiques du pneu (type

Qualité, usure, pression de gonflage, température). Elle est généralement caractérisée par une variable  $\mu \in ]0, \cong 1[$ . La signification physique de  $\mu$  dépend de sa valeur dans l'intervalle considéré. Lorsque, l'adhérence est maximale et le contact pneu/sol est alors considéré comme excellent. A l'opposé, lorsque la chaussée est supposée verglacée, ce qui se traduit par une adhérence quasi nulle. Les coefficients intermédiaires correspondent à des chaussées humides et des chaussées très glissantes. Les valeurs intermédiaires font la transition entre les types de chaussées. Souvent l'adhérence agit comme un terme proportionnel dans l'expression de la force.

### 1.4.2 Comportement longitudinal

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, cette relation est définie comme étant la caractéristique d'adhérence longitudinale du pneumatique sur le sol. La vitesse relative du pneumatique par rapport au sol définit un glissement longitudinal sans dimension, exprimé en pourcentage.

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

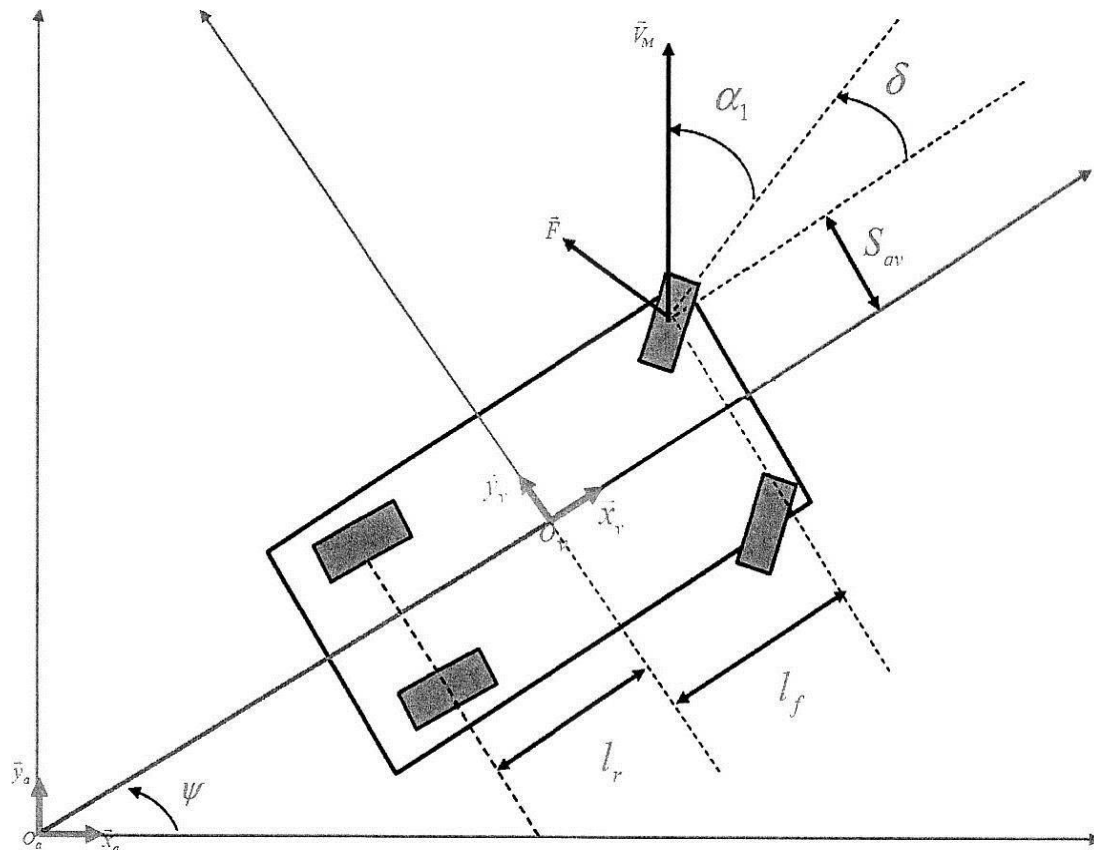
$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_i = \frac{r_{roue_i} \omega_{roue_i} - v_{x_i}}{v_{x_i}} < 0 \text{ si } v_{x_i} > r_{roue_i} \omega_{roue_i} \Rightarrow \textit{freinage} \\ \lambda_i = \frac{r_{roue_i} \omega_{roue_i} - v_{x_i}}{v_{x_i}} > 0 \text{ si } v_{x_i} < r_{roue_i} \omega_{roue_i} \Rightarrow \textit{traction} \end{array} \right. \quad (1.22)$$

### 1.4.3 Comportement transversal

Les forces transversales ou connues sous le nom de forces de guidage prennent naissance lorsqu'il y a présence simultanée d'un angle de dérive et d'une force d'appui verticale. Cet angle de dérive est défini dans ce cas comme l'angle à la surface de contact pneu/sol entre l'axe longitudinal de la roue et le vecteur de vitesse du point de contact.

## 1.5 Expression de l'angle de dérive des pneumatiques

L'angle de dérive des pneumatiques noté  $\delta$  peut être calculé comme suit : D'après la figure (1.7) [2]:



$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (1.23)$$

**Fig. 1.7- angle de dérivé de la roue avant gauche**

Le vecteur de vitesse du point M est calculé par :

$$\begin{aligned} \vec{V}_M^v &= \frac{d}{dt}(\overline{O_a M_l}) \\ &= \frac{d}{dt}(\overline{O_a O_v}) + \frac{d}{dt}(\overline{O_a M_l}) \end{aligned} \quad (1.24)$$

Les dérivés de vecteurs sont respectivement :

$$\frac{d}{dt}(\overline{O_a O_v}) = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.25)$$

## Remarque 1.2

Dans notre cas, nous supposons que les différents angles sont faibles. Nous utilisons l'approximation du modèle bicyclette du fait de la symétrie, correspondant à

$$\frac{d}{dt}(\overrightarrow{\overline{O_a M_i}}) = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \dot{\Psi} l_f \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}_{R_v} \quad (1.26)$$

Alors l'équation (1.24) s'écrit

$$\vec{V}_M^v = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y + \dot{\Psi} l_f \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}_{R_v} \quad (1.27)$$

Exprimons maintenant le vecteur de vitesse dans le repère lié à la roue :

$$(\vec{V}_{M_i})_{R_r} = \theta_{v \rightarrow r} (\vec{V}_{M_i})_{R_v} \quad (1.28)$$

Le passage du repère véhicule au repère roue est donné par la matrice de rotation :

$$\theta_{v \rightarrow r} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_i) & \sin(\delta_i) & \mathbf{0} \\ -\sin(\delta_i) & \cos(\delta_i) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

## Remarque 1.3

Représente l'angle de braquage des roues, où l'indice  $i$  est employé pour la numérotation des roues, En multipliant (1.29) par (1.27), l'expression finale de la vitesse vaut

$$\vec{V}_M^r = \begin{pmatrix} v_x \cos(\delta_i) + (v_y + \dot{\Psi} l_f) \sin(\delta_i) \\ -v_x \sin(\delta_i) + (v_y + \dot{\Psi} l_f) \cos(\delta_i) \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}_{R_r} \quad (1.30)$$

A partir de l'équation (1.23), l'expression de l'angle de dérive du pneumatique est :

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left( \frac{v_x \cos(\delta_i) + (v_y + \dot{\Psi} l_f) \sin(\delta_i)}{-v_x \sin(\delta_i) + (v_y + \dot{\Psi} l_f) \cos(\delta_i)} \right) \quad (1.31)$$



## Angle de dérive des roues avant

Du fait de la symétrie du véhicule, l'angle de dérive de la roue droite est égal à l'angle de dérive de la roue avant gauche

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \delta_i - \left(\frac{v_y + \psi l_f}{v_x}\right) \quad (1.32)$$

## Angle de dérive des roues arrière

Nous considérons dans notre cas, que seules les roues avant sont directrices. De plus, pour le calcul des angles de dérive arrières, on remplace par

$$\alpha_3 = \alpha_4 = -\left(\frac{v_y + \psi l_f}{v_x}\right) \quad (1.33)$$

## 1.6 Expression des efforts latéraux et longitudinaux

### 1.6.1 Effort latéral

Dans la plupart des modèles dynamiques linéaires de véhicules, on utilise un modèle de force de contact linéaire. En notant  $c_i$  le coefficient de raideur du pneumatique, on définit les forces de guidage latéral par:

$$F_{y_i} = \mu c_i \alpha_i \quad (1.34)$$

Lorsque ces forces seront associées au modèle bicyclette, on utilisera généralement des coefficients de raideur identique pour les deux pneus avant d'une part et les deux pneus arrière d'autre part.

On notera alors

$$\begin{cases} c_f = c_1 = c_2 \\ c_r = c_3 = c_4 \end{cases} \quad (1.35)$$

Cette modélisation même très simpliste des phénomènes d'interaction permet d'élaborer des modèles linéaires de véhicule qui prennent en compte la dérive. Ces modèles peuvent servir à étudier la dynamique et permettent de mettre en évidence les principales caractéristiques du véhicule et d'évaluer l'influence des différents paramètres comme l'adhérence, la masse ou la vitesse. Ces modèles sont aussi ceux qui sont utilisés pour la synthèse de lois de commande.

Quoi qu'il en soit, le modèle linéaire perd sa validité lorsque l'angle de dérive devient important.

En général ce modèle reste valide lorsque  $\alpha_i$  ne dépasse pas quelques degrés. Au-delà, on

observe des phénomènes de saturation et un modèle non linéaire est alors souvent nécessaire.

### 1.6.2 Effort longitudinal

Nous devons faire un rappel sur la façon de décrire la force longitudinale fonction de glissement longitudinal.

$$\Sigma(F_x) = \dot{v}_x - \Psi v_y \quad (1.36)$$

Où

Est le coefficient de raideur des pneumatiques (supposé le même pour toutes les roues(*i*))

Est la valeur maximale positive du glissement longitudinal

#### Remarque 1.5

Sous l'hypothèse de roulement sans glissement au contact pneumatique/chaussée cela veut dire que l'équation (1.22) égale à zéro ( $= 0$ ), cela va nous permettre d'écrire le modèle sans l'expression de la force.

## 1.7 Modèle dynamique du véhicule

$$\Sigma(F_x) = \dot{v}_x - \Psi v_y \quad (1.37)$$

$$\Sigma(F_y) = \dot{v}_y + \Psi v_x \quad (1.38)$$

$$\Sigma(M_z) = I_z \ddot{\Psi} \quad (1.39)$$

Avec la masse du véhicule et le moment d'inertie par rapport à l'axe vertical.

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

$$c_f = c_r = C \quad (1.40)$$

Où L est la distance en essieu

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

$$\dot{v}_x = v_y \dot{\Psi} + \frac{c}{m} \cdot \frac{v_y}{v_x} + \frac{L.c}{2.m} \cdot \frac{\dot{\Psi}}{v_x} \delta. \quad (1.41)$$

est l'axe longitudinal, est l'axe latéral, est l'axe vertical.

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

$$\dot{v}_y = -v_x \dot{\psi} + \frac{c}{m} \cdot \delta - \frac{2 \cdot c}{m} \cdot \frac{v_y}{v_x} \quad (1.42)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{Lc}{2I_z} \delta - \frac{L^2}{2I_z} \cdot \frac{\dot{\psi}}{v_x} \quad (1.43)$$

Le caractère non linéaire de ces relations conduit à un modèle différentiel non linéaire dans le repère lié à la route.

En supposant la vitesse longitudinale à peu près constante nous obtenons un modèle dynamique non linéaire relativement simple:

$$\dot{v}_x = v_y \dot{\psi} + \frac{c}{m} \cdot \frac{v_y}{v_x} \pm \frac{L \cdot c}{2 \cdot m} \cdot \frac{\dot{\psi}}{v_x} \delta \quad (1.44)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{Lc}{2I_z} \delta - \frac{L^2}{2I_z} \cdot \frac{\dot{\psi}}{v_x} \quad (1.45)$$

### 1.7.1 Schémas symboliques

Nous allons représenter ces deux modèles dynamiques du véhicule par des schémas blocs, tels que nous les avons programmés sous *SIMULINK* les gain set constant de temps sont donnés pour l'application numérique suivante:

$$L=3$$

On pose

$$\left(\frac{m \cdot v_x}{2 \cdot c}\right) \cdot \dot{v}_y + v_y = \left(\frac{v_x}{2}\right) \cdot \delta - \left(\frac{m \cdot v_x^2}{2 \cdot c}\right) \dot{\psi} \quad (1.46)$$

Les équations de Laplace du modèle sont:

$$\left(\frac{2 \cdot I_z \cdot v_x}{L^2 \cdot c}\right) \cdot \dot{\Psi} + \Psi = \left(\frac{v_x}{L}\right) \cdot \delta \quad (1.47)$$

$$\dot{y} = v_x \sin(\psi) + v_y \cos(\psi) \quad (1.48)$$

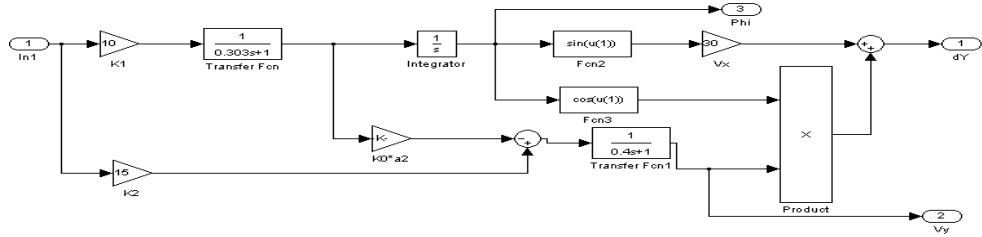


Fig. 1.8 - Schéma bloc du modèle dynamique

### 1.8 Modèle cinématique

Nous allons ici nous intéresser à un modèle plus simple du véhicule qui est appelé en mécanique classique (modèle cinématique). On considère dans ce cas que l'inertie et la masse du véhicule sont négligeables. Considérons la figure 1.9 qui représente le modèle géométrique du véhicule, où  $CG$  est le centre de gravité,  $L$  est la distance entre les essieux avant et arrière du véhicule et  $m$  est le point milieu

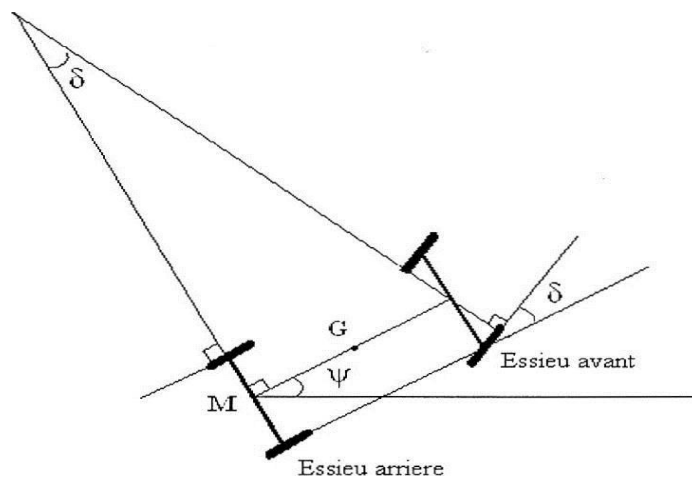


Fig. 1.9 Modèle géométrique du véhicule

Notons  $R$  le rayon de courbure c'est-à-dire la distance  $OM$ , nous avons la relation géométrique suivante

$$\tan \delta = L/R \quad (1.49)$$

La distance parcourue dans un intervalle de temps s'écrit :

$$v_x \cdot dt = R \cdot d\Psi \quad (1.50)$$

### 1.8.1 Équations du modèle

Exprimons les vitesses du point  $M$  dans le repère lié à la route.

$$\dot{x}_M = v_x \cdot \cos\Psi \quad (1.51)$$

$$\dot{y}_M = v_x \cdot \sin\Psi \quad (1.52)$$

Or, la position du centre de gravité est définie par rapport au point  $M$  par la relation suivante:

$$X = \dot{x}_M + (L/2) \cdot \cos\Psi \quad (1.53)$$

$$Y = \dot{y}_M + (L/2) \cdot \sin\Psi \quad (1.54)$$

C'est la position latérale qui nous intéresse pour définir les équations du modèle.

De tout ce qui précède, on extrait le modèle cinématique non linéaire suivant:

$$\dot{X} = v_x \cdot \cos\Psi - (L/2) \cdot \sin\Psi \dot{\Psi} \quad (1.55)$$

$$\dot{Y} = v_x \cdot \sin\Psi + (L/2) \cdot \cos\Psi \dot{\Psi} \quad (1.56)$$

$$\dot{\Psi} = (v_x/L) \cdot \tan\delta = (v_x/L) \cdot \delta \text{ (par approximation)} \quad (1.57)$$

### 1.8.2 Schéma symbolique du modèle

On pose  $L=3m$ ;  $k_0 = v_x = 30$ ;  $k_1 = (v_x/L) = 10$ ;  $k_3 = L/2 = 1.5m$

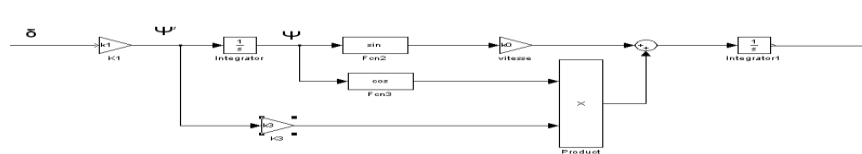


Figure. 1.10 Schéma de bloc du modèle cinématique

### 1.8.3 L'effet d'une courbure

Nous avons jusqu'à présent considéré que la route était parfaitement droite, c'est-à-dire avec une courbure nulle (rayon de courbure infinie). Dans le cas d'une conduite sur autoroute, le parcours n'est pas toujours une ligne droite.

On a constaté que la perturbation due à la courbure peut être modélisée par une équivalente en entrée sur l'angle au volant directement proportionnelle ( $K_c$ ) à la courbure.

Donc le modèle en ligne courbée est le même modèle en ligne droite mais en augmentant l'angle de braquage par/.

et  $R$  le rayon de courbure.

$$\delta_{courbure} = \delta_{Droite} + L/R \quad (1.58)$$

## 1.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter la partie mécanique de véhicule. Ainsi, de rappeler les différents modèles analytiques utilisés pour représenter l'évolution de l'écart latéral du véhicule en fonction de l'angle de cap et de braquage de roues. Le modèle dynamique est le plus abouti, car il prend en compte la masse et l'inertie du véhicule ainsi que les différentes forces qui lui sont appliquées. Dans ce travail nous nous sommes intéressés au modèle cinématique car il est plus simple ainsi nous restons toujours dans les modèles non linéaires.

# Chapitre2 :

## commande prédictive

## **2.Introduction**

La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique.

Elle constitue un domaine ample et varié et intègre des disciplines comme la commande optimale, la commande multi-variable et la commande avec contrainte.

Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Elle est utilisée dans diverses applications, notamment dans les systèmes robotiques, des machines électriques, la surveillance et la conduite des procédés biotechnologiques.

La commande prédictive est un terme général qui englobe un ensemble de méthodes différentes (PFC, DMC, GPC, MPC...). Néanmoins, toutes ces techniques utilisent la même philosophie de contrôle et le principe de fonctionnement est le même [5]

### **2.1.Concepts de base**

Toutes les techniques proposées dans la littérature ont en commun les concepts suivants:

- 1- Utilisation d'un modèle pour construire la prédiction des signaux intéressants : États ou sorties.
- 2- Connaissance de la trajectoire à suivre sur un horizon au moins aussi long que l'horizon De prédiction.
- 3- Minimisation d'un critère le plus souvent quadratique incluant l'erreur de poursuite Et l'effort de commande.
- 4- Utilisation d'un algorithme de résolution produisant en temps réel la solution optimale /ou sous optimale/admissible.
- 5- Application du premier élément de la séquence de commande calculée.
- 6- Répétition de la procédure à la période d'échantillonnage suivante· selon le principe de L'horizon fuyant. [6]

Le modèle de prédiction est fondamental à l'application de la commande prédictive, il constitue la cheville de la loi de commande, il faut donc le construire avec le plus grand soin. Le principe de l'horizon fuyant est tel qu'à chaque période d'échantillonnage, il est nécessaire de calculer une séquence de commandes en boucle ouverte, améliorées par l'arrivée de nouvelles mesures obtenues sur le procédé. La loi de commande prédictive est ainsi implémentée par une suite de problèmes d'optimisation. [7]

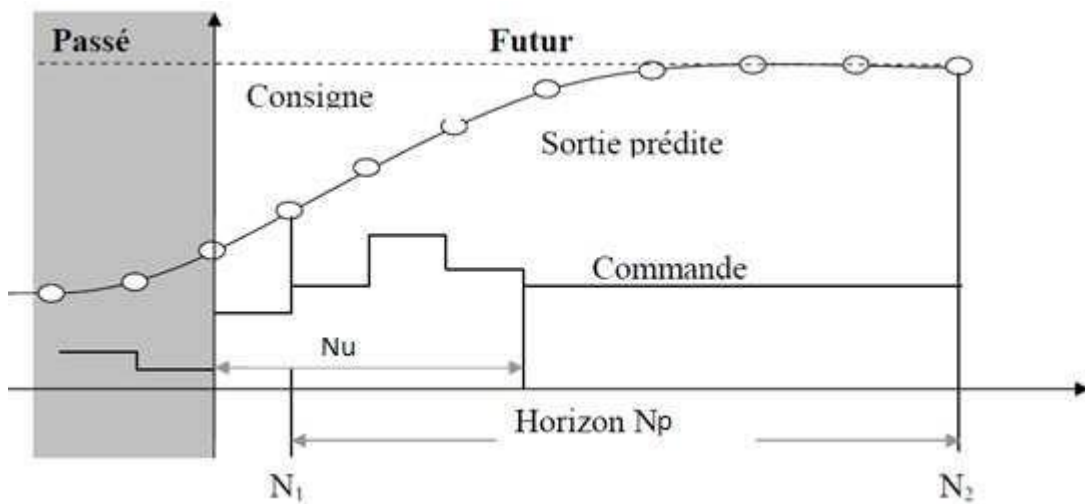
### **2.2Principe de la commande prédictive**

De manière générale, la loi de commande prédictive est obtenue à partir de la méthodologie



suivante [8] :

- Prédire les sorties futures du processus sur l'horizon de prédiction défini, en utilisant le modèle de prédiction. On dénote  $y(t + k / t)$ ,  $k = 0 \dots\dots N$ , les sorties prédites et par  $N$  l'horizon de prédiction. Ces sorties sont dépendantes des valeurs de sorties et d'entrées du processus à commander connues jusqu'au temps  $t$ .
- Calculer la séquence de signaux de commande, dénotée par  $u(t + k / t)$ ,  $k = 0 \dots\dots N - 1$ , en minimisant un critère de performance afin de mener la sortie du processus vers une sortie de référence. On dénote par  $w(t + k / t)$   $k = 0 \dots\dots N_p$  le signal de référence. D'habitude le critère de performance à minimiser est un compromis entre une fonction quadratique des erreurs (différence entre  $y(t + k / t)$  et  $w(t + k / t)$ ) et un coût de l'effort de commande. Par ailleurs, la minimisation d'une telle fonction peut être soumise à des contraintes sur l'état et plus généralement à des contraintes sur la commande.
- Le signal de commande  $u(t / t)$  est envoyé au processus tandis que les autres signaux de commande sont oubliés. Au temps  $t + 1$  on acquiert la sortie réelle  $y(t + 1)$  et on recommence le calcul. La commande prédictive est basée sur une prédiction explicitée du comportement futur du système, et sur une optimisation du signal de commande futur.

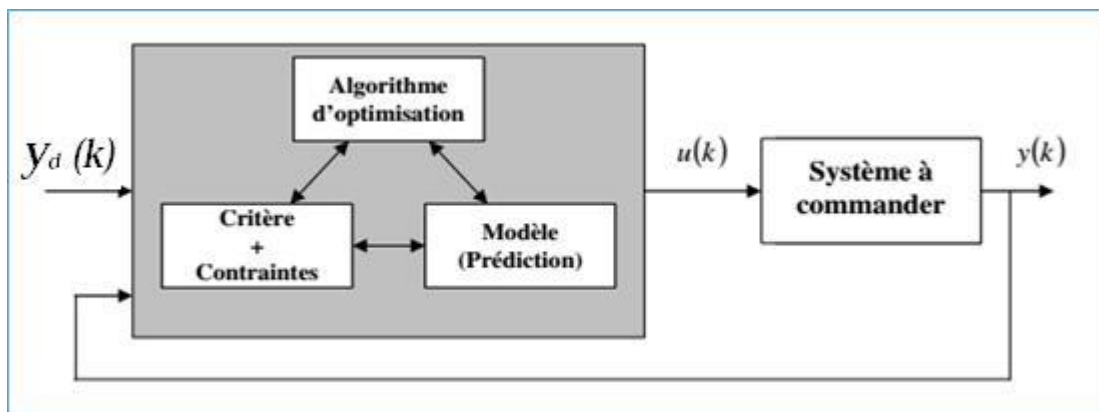


**Figure. 2.1 Représentation temporelle du principe de la commande prédictive**

## 2.4.Éléments d'une commande prédictive

Tous les algorithmes de la commande prédictive possèdent les mêmes éléments Figure (2.2), et différentes options peuvent être considérées pour chaque élément, ce qui donne une multitude d'algorithmes. Ces éléments sont :

- 1- Le modèle du système (pour la prédiction),
- 2- Le critère de performances (la prédiction)
- 3- L'algorithme d'optimisation (pour déterminer la séquence de commande)



**Figure (2.2) : Stratégie de commande prédictive. [8]**

Pour l'implémentation de la stratégie prédictive, la structure de base de la figure (2.2) est mise en œuvre. Un modèle sert à prédire les futures sorties du système, grâce aux valeurs courantes et passées de la commande et aux commandes optimales futures. Ces dernières sont calculées par une méthode d'optimisation, qui prend en compte la fonction de coût (qui dépend aussi des consignes futures), et éventuellement des contraintes. Donc, Le modèle du système à commander joue un rôle central dans la commande prédictive. Le modèle choisi doit être capable de prendre en compte la dynamique du processus pour prédire précisément les sorties futures. [9]

## 2.5 Historiques de la commande prédictive

Elle a fait ses débuts en 1962 suite aux travaux de Zedeth et Whalen. Elle sera connue plus tard dans le monde industriel, particulièrement dans le secteur de la pétrochimie, suite aux travaux de Richalet et al [10].

Grâce à sa capacité à prendre en compte les contraintes, à contrôler les systèmes multi- variables et la possibilité qu'elle offre d'utiliser différentes structures de modèle, la commande prédictive (non linéaire (NMPC)) est à présent largement reconnue comme l'une des techniques de contrôle les plus puissantes si ce n'est la seule approche possible dans beaucoup de problèmes de contrôle à résoudre. Au fil du temps, beaucoup d'améliorations ont été faites sur cette technique, notamment les travaux de Mayne et Michalska. Aujourd'hui, elle est également adaptée à la commande des systèmes rapides.

## **2.6. Les différents types d'algorithmes prédictifs**

### **2.6.1. Cas linéaire**

#### **2.6.1.1. La Commande Prédictive à base de modèle (MPC)**

Bien que chacun des algorithmes présente des spécificités, la commande prédictive, connue sous le nom de MPC (Model Predictive Control) ou MBPC (Model-Based Predictive Control), regroupe l'ensemble de ces stratégies. Concrètement, la formulation MPC du problème de la commande prédictive fait appel à une représentation d'état du système et permet donc l'application des outils classiques d'analyse de la stabilité et de la robustesse. Si cette notion de prédiction du comportement futur du système peut être considérée comme la principale spécificité de la commande MPC, on peut rappeler qu'il est habituel, dans la théorie de commande, de faire appel à la prédiction. Le prédicteur de Smith ou le prédicteur d'état traitant les systèmes à retard sur l'entrée peuvent être cités comme exemples. [11]

La philosophie de la commande prédictive se résume à utiliser un modèle interne pour prédire le comportement du système et choisir la meilleure décision au sens d'un certain coût tout en respectant les contraintes. [12]

#### **2.6.1.2. Stratégie générale de la commande prédictive MPC**

De manière générale, la loi de commande prédictive est obtenue à partir de la méthodologie suivante :

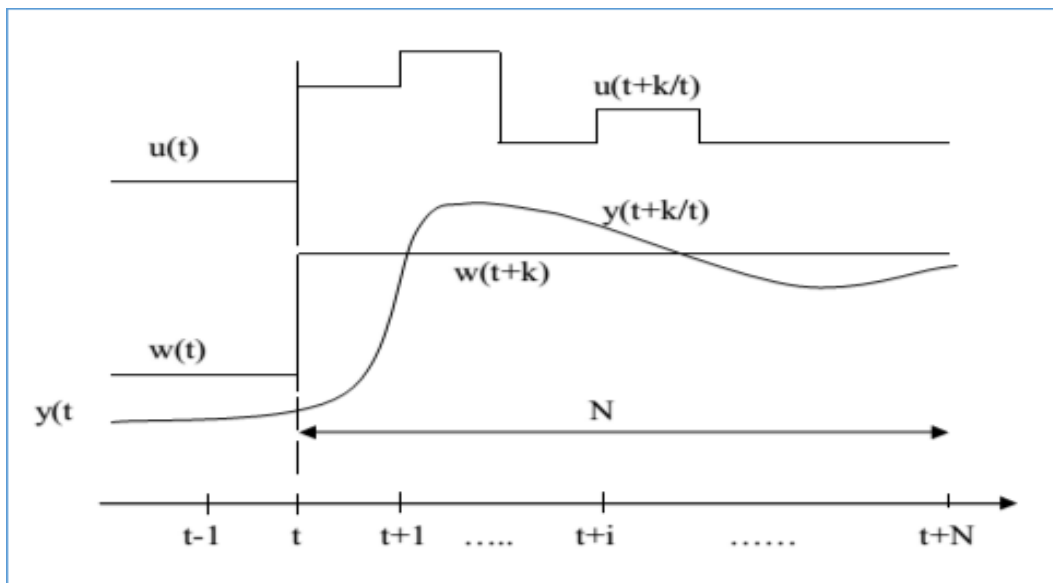
1- Prédire les sorties futures du processus sur l'horizon de prédiction défini, en utilisant le modèle de prédiction. On dénote  $y(t + k|t)$ , avec ( $k = 0 \dots N$ ), les sorties prédites et par  $N$  l'horizon de prédiction. Ces sorties sont dépendantes des valeurs de sorties et d'entrées du processus à commander connues jusqu'au temps  $t$ .

2- Calculer la séquence de signaux de commande, dénotée par  $u(t + k|t)$ ,  $k = 0 \dots N - 1$ , en minimisant un critère de performance afin de mener la sortie du processus vers une sortie de

référence dénotée par  $w(t + k|t)$ ,  $k = 0 \dots N$ . D'habitude le critère de performances à minimiser est un compromis entre une fonction quadratique des erreurs entre  $y(t + k|t)$  et  $w(t + k|t)$  et un coût de l'effort de commande. Par ailleurs, la minimisation d'une telle fonction peut être soumise à des contraintes sur l'état et plus généralement à des contraintes sur la commande.

3- Le signal de commande  $u(t/t)$  est envoyé au processus tandis que les autres signaux de commande sont oubliés. Au temps  $t + 1$  on acquiert la sortie réelle  $y(t + 1)$  et on recommence au premier.

La figure (2.3) illustre cette méthodologie et sa mise en oeuvre utilise la structure de base montrée dans la figure (2.4). Les deux boucles fondamentales à remarquer sur cette figure sont le modèle et l'optimiseur. Le modèle doit être capable de capturer la dynamique du processus, de prédire les sorties futures de manière précise et sa mise en oeuvre doit être facile, l'optimiseur fournit les actions de commande. En présence de contrainte la solution est obtenue via des algorithmes itératifs, avec plus de temps de calcul, évidemment. [11]



**Figure (2.3) : La méthodologie du MPC. [11]**

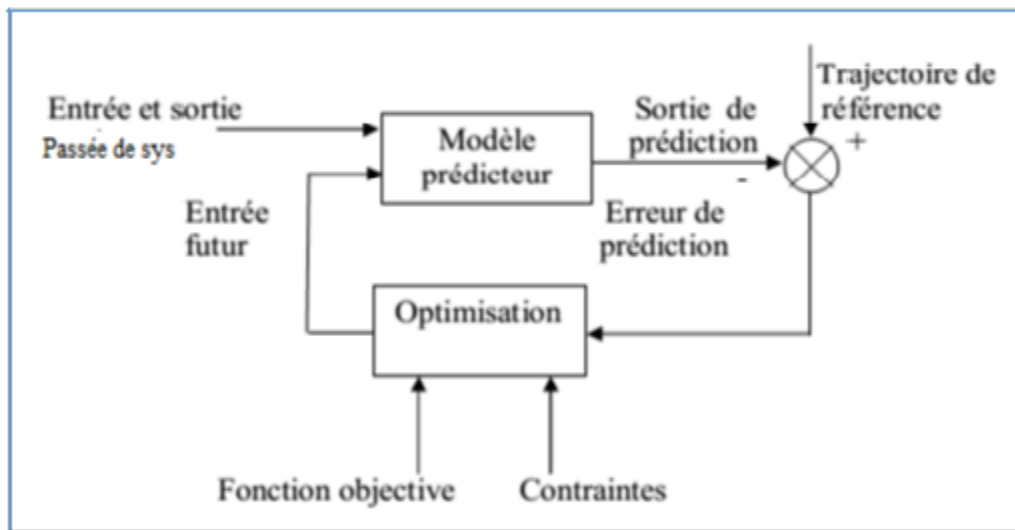


Figure (2.4) : Le schéma fonctionnel de la structure de base des algorithmes MPC [11]

## 2.7 Définition du modèle du système

La présence du modèle numérique est une condition nécessaire pour le fonctionnement de la GPC, puisqu'il permet de calculer la sortie prédite sur un horizon fini.

Il peut être obtenu directement par transformée en Z de la fonction de transfert continue du processus, si l'on dispose de cette fonction, ou être le résultat d'une identification du système. Toutes les méthodes utilisées conduisent alors à une relation de la forme :

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + C(q^{-1})\xi(t) \quad (2.1)$$

Avec :

$y$ : sortie.

$u$  : Commande appliquée à l'entrée.

$\xi$  : Séquence aléatoire centrée non corrélée avec l'entrée.

$C(q^{-1})\xi(t)$  : Terme lié aux perturbations.

$q^{-1}$  : Opérateur retard.

Les polynômes A et B sont définis par :

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \quad (2.2)$$

$$B(q^{-1}) = 1 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b} \quad (2.3)$$

Cette relation nous donne la fonction de transfert discrète suivante :

$$\frac{Y(x)}{U(x)} = z^{-1} \frac{\sum_{j=0}^{n_b} b_j z^{-j}}{1 + \sum_{j=1}^{n_a} a_j z^{-j}} = z^{-1} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (2.4)$$

## 2.8 Recherche d'un prédicteur optimal

L'un des points fondamentaux de la méthodologie prédictive est la recherche d'une équation de prédiction afin de prévoir le comportement du processus dans le future. Pour cela, posons  $\hat{y}(t + j/t)$  la sortie estimée à l'instant  $t+j$ , connaissant la sortie à l'instant présent  $t$ . cette sortie peut se décomposer de la façon suivante :

$$\hat{y}(t+j/t) = \sum_{i=1}^j g_i \Delta u(t+j-i) + \rho_j \quad (2.5)$$

Ou:

$$\rho_j = \sum_{i=j+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+j-i) \quad (2.6)$$

Le premier terme représente la réponse forcée et correspond aux incréments de commandes future et présent. Les  $\rho_j$  représente la réponse libre et sont dus aux incréments de commande passées. Les  $g_i$  sont les coefficients de la réponse indicielle du système, et sont définis par  $g_i = S_1(iT_e)$  et  $S_1$  la réponse indicielle du système continu, et  $T_e$  la période d'échantillonnage.

Si l'on note  $y^*(t + j)$ , la réponse libre (entrée nulle) à partir des conditions initiales à l'instant  $t$ , on peut écrire en fonction des incréments de commandes passées :

$$\rho_j = y^*(t + j) = \sum_{i=0}^{\infty} g_i \Delta u^*(t + j + i) \quad (2.7)$$

Avec :

$$\Delta u^*(t + j - i) = 0 \text{ pour } i \leq j$$

Les incréments de la réponse libre sont obtenus à partir du modèle par :

$$A (q^{-1}) \Delta y^*(t + j) = B (q^{-1}) \Delta u^*(t + j - 1) \quad (2.8)$$

Tel que:  $\Delta u^*(t + j) \equiv 0$  pour  $j \geq 0$

Le calcul de la réponse libre à effectuer à chaque itération est donné par les expressions récurrentes suivantes :

$$\Delta y^*(t + j) = \sum_{i=j}^{n_b} b_i \Delta u(t + j - i) - \sum_{i=j a_i}^{n_a} \Delta y^*(t + j - i) \quad (2.9)$$

$$\rho_i = \rho_{j-1} + \Delta y^*(t + j) \quad (2.10)$$

Avec :

$$\rho_0 = y(t) \quad (2.11)$$

Grâce à ces résultats, il est possible de calculer l'estimée de la sortie, sur un horizon de prédiction donné N. Il est possible de transcrire l'équation (2.5) sous forme matricielle.

Posons alors :

$$\hat{y}_N = [\hat{y}(t+1) \dots \hat{y}(t+N)]^T \quad (\text{sorties futures, estimées})$$

$$\hat{u}_N = [\Delta u(t) \dots \Delta u(t+N-1)]^T \quad (\text{incrément des commandes futures})$$

$$\rho_N = [\rho_1 \dots \rho_N]^T$$

L'équation de prédiction matricielle se résume finalement à la relation :

$$\hat{y}_N = G_N \hat{u}_N + \rho_N \quad (2.12)$$

Où  $G_N$  est la matrice des coefficients de la réponse indicielle du modèle

$$G_N = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \dots & 0 \\ g_N & g_{N-1} & \dots & g_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & 0 & \dots & 0 \\ s_{12} & s_{11} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{1N-1} & s_{1N-2} & \dots & 0 \\ s_{1N} & s_{1N-1} & \dots & s_{11} \end{bmatrix}$$

avec :  $s_{1k} = s_1(kT_e)$

## 2.9 Critère à minimiser

### 2.9.1 Expression du critère sous forme analytique

Une fois l'équation de prédiction est définie, la méthode suppose la minimisation d'un critère quadratique de la forme

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} [w(t+j) - \hat{y}(t+j)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} \Delta u(t+j-1)^2 \quad (2.13)$$

Où l'on suppose :  $\Delta u(t+j) = 0$  pour  $j \geq N_u$

avec :

$\hat{y}$ : sortie prédite.

$\Delta u$  : Incrément de commande.

$W$  : Consigne.

$N_1, N_2$  : Horizon de prédiction sur la commande.

$h$  : Facteur de pondération sur la commande.

Le critère (2.13) comprend un terme quadratique sur l'erreur et sur l'incrément de commande. Sa minimisation analytique fournit la séquence de commandes futures dont seule la première sera effectivement appliquée.

L'expression du critère appelle plusieurs remarques :

- Si l'on dispose effectivement des valeurs de la consigne dans le future, on utilise toutes ces informations entre les horizons  $N_1$  et  $N_2$  de façon à faire converger la sortie prédite vers cette consigne.
- On retrouve l'aspect incrémental du système en considérant  $\Delta u$  dans le critère.



- Le coefficient  $\lambda$  permet de donner plus ou moins de poids à la commande par rapport à la sortie, de façon à assurer la convergence lorsque le système de départ présente un risque d'instabilité.

### 2.9.2 Expression du critère sous forme matricielle :

$$j = (G + \rho - w)^T (G \hat{u} + \rho - w) + \lambda \hat{u}^T \hat{u} \quad (2.14)$$

avec :

$$w = [w(t+N_1) \dots \dots w(t+N_2)]^T;$$

$$\hat{y} = [y(t+N_1) \dots \dots y(t+N_2)]^T = G \hat{u} + \rho ;$$

$$\hat{u} = [\Delta u(t) \dots \dots \Delta u(t + N_u - 1)]^T ;$$

$$\rho = [\rho_{N_1} \dots \rho_{N_2}]^T;$$

$$G = \begin{bmatrix} s_{1N_1} & s_{1N_1-1} & \dots & \dots \\ s_{1N_1+1} & s_{1N_1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{1N_2} & s_{1N_2-1} & \dots & s_{1N_2-1} \end{bmatrix}$$

G : matrice de dimension  $(N_2 - N_1 + 1) \times N_u$ .

La solution optimale est ensuite obtenue par dérivation de (2.14) par rapport au vecteur des incréments de commande :

$$J = [\hat{u}^T G^T + (\rho - w)^T][G \hat{u} + (\rho - w)] + \lambda \hat{u}^T \hat{u}$$

$$J = \hat{u}^T [G^T G + \lambda I_{N_u}] \hat{u} + \hat{u}^T G^T (\rho - w) + (\rho - w)^T G \hat{u} + (\rho - w)^T (\rho - w)$$

$$\frac{\partial j}{\partial \hat{u}} = 2\{G^T G + \lambda I_{N_u}\} \hat{u} + 2G^T (\rho - w)$$

La solution optimale correspond à :

$$\frac{\partial j}{\partial \hat{u}} = 0$$

Donc la solution optimale est donnée par :

$$\tilde{u}_{opt} = [G^T G + \lambda I_N]^{-1} G^T (w - \rho) \quad (2.15)$$

Il apparaît ainsi que la matrice  $G^T$ .  $G$  est de dimension  $N_u \times N_u$  et  $\tilde{u}_{opt}$  de dimension  $N_u \times 1$ . Considérons le cas particulier où  $N_u$  vaut 1 ; des simplifications peuvent alors être apportées :

La matrice  $G^T$ .  $G$  devient scalaire et la solution devient :

$$\hat{u}_{opt} = \frac{G^T (\rho - w)}{G^T G + \lambda} = \frac{s1^T (\rho - w)}{G^T G + \lambda} \quad (2.16)$$

La solution donnant la commande à appliquer à l'instant présent est donnée par :

$$u(t) = u(t - 1) + \frac{s1^T (\rho - w)}{G^T G + \lambda} \quad (2.17)$$

avec

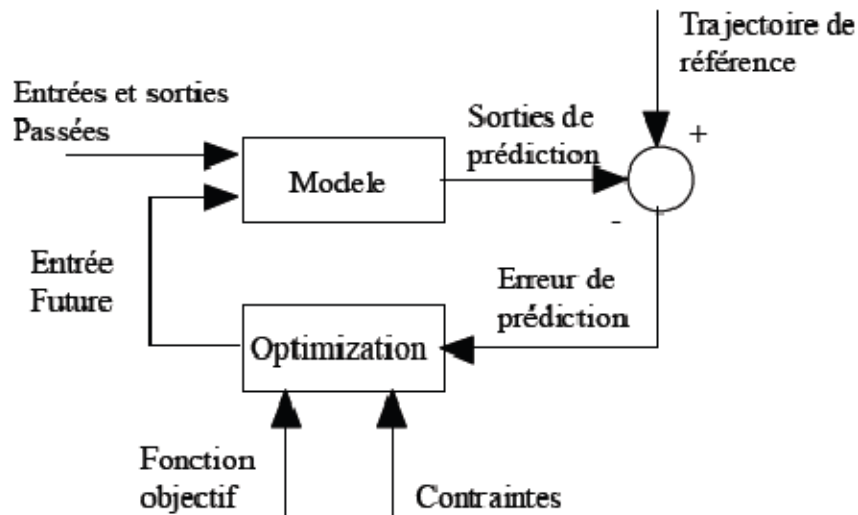
$$S_1 = [s_{1N_1} \quad s_{1N_1+1} \quad \dots \quad s_{N_2}]$$

## 2.10 Le principe du fonctionnement du MPC

Le principe de fonctionnement du MPC peut être caractérisé ainsi:

1. À chaque instant  $k$ , en disposant d'un modèle et de connaissance de la sortie en  $k$  du système, on fait la prédiction de la sortie pour un certain horizon  $N$ , (dénommé horizon de prédiction), les sorties prédites sont dénotées  $y(k+i/k)$  où  $k=1,2,\dots,Np$ .
2. La prédiction de la sortie, est faite en calculant le vecteur des futurs signaux de commande  $\{u(k+i/k), i=0,1,\dots,N-1\}$  à travers l'optimisation d'une fonction objectif. Des contraintes sur la sortie ou sur la commande peuvent être également imposées.
3. Le premier élément  $\{u(k)\}$  du vecteur du signal de commande optimale  $\{u(k+i/k), i=0,1,\dots,N-1\}$  issu du problème précédent est appliqué au système et le reste est rejeté car à l'instant suivant la nouvelle sortie  $\{y(k+1)\}$  est disponible et en conséquence l'étape 1 est répétée. Ceci est connu comme le concept de l'horizon fuyant (ou mobile)

## 2.11 Structure de base de l'algorithme MPC



**Figure 2.5** Le schéma fonctionnel de la structure de base des algorithmes MPC.

Tous les algorithmes MPC ont :

- Un modèle de prédiction.
- Une fonction objective pour calculer la stratégie optimale de commande.
- Les différences portent sur le type de la fonction objectif, le traitement de l'erreur de prédiction et sur le modèle de prédiction.

## 2.12 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté un résumé historique sur l'évolution de la commande prédictive, ainsi que son principe de fonctionnement.

On a présenté en particulier la commande prédictive généralisée (GPC) et la commande prédictive par modèle MPC, on a décrit les principaux éléments qui apparaissent dans chacune de ces méthodologies.

# Chapitre 3:

Application du  
prédicative et  
simulation

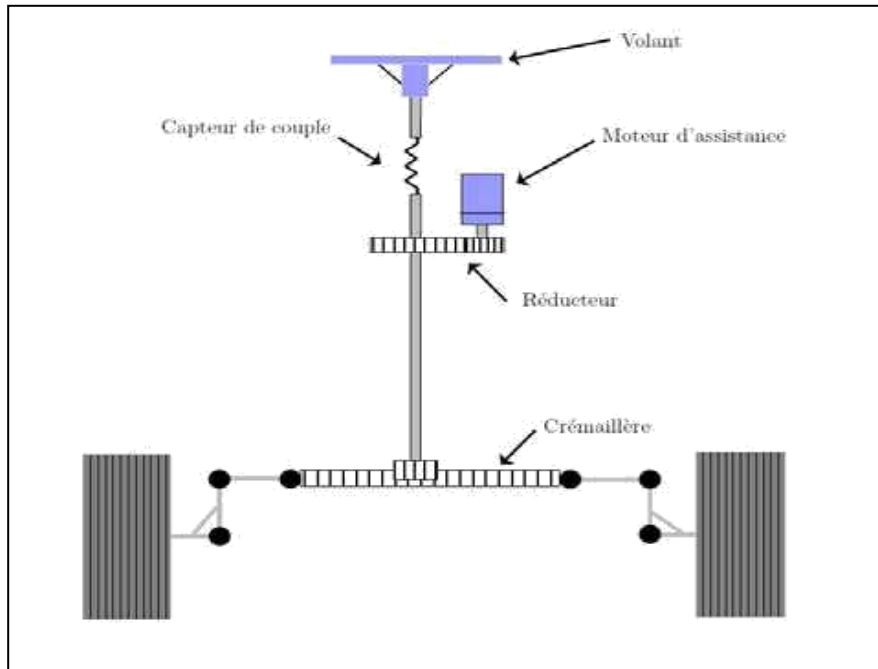
### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter un exemple d'application pour mettre en évidence la performance de la commande décrite au chapitre précédent et mieux appréhender leurs limitations. Nous prenons le modèle dynamique pour tester la fiabilité de la méthode développée. Nous utiliserons pour la simulation « MATLAB/Simulink » et les résultats sont présentés et discutés.

La dynamique latérale du véhicule est régie par le volant, la colonne de direction, les roues directrices et le contact pneu/chaussée comme le montre la figure (3.1). Ces éléments Le véhicule est un système mécanique complexe dans la mesure où il possède des caractéristiques non linéaires introduites notamment par des organes de liaison tels que des ressorts et amortisseurs. De plus, il est l'objet de nombreuses variations de paramètres tels que la masse, la vitesse et l'adhérence. Cependant, les dynamiques d'un véhicule peuvent être décrites par un modèle non linéaire détaillé, mais souvent sont simplifiées pour cibler une application bien définie comme l'assistance au contrôle latéral.

Dans ce dernier cas, un modèle linéaire simple dit « bicyclette » à trois degrés de liberté est largement utilisé pour la synthèse de l'assistance. Ce modèle se base sur le découplage entre les dynamiques latérales et longitudinales. Il considère le véhicule comme un corps rigide, et il suppose qu'il y a une seule roue pour chaque train, en projetant les deux roues du train sur l'axe central du véhicule. La roue résultante aura un angle de braquage équivalent à l'angle de braquage des deux roues. Le modèle bicyclette aura ainsi 3 degrés de liberté seulement, correspondant aux mouvements permettent au véhicule de se déplacer latéralement par action du conducteur sur le volant.

Dans le cadre de l'application considérée, un moteur d'assistance est installé sur la colonne de direction pour assister le conducteur dans ses manœuvres.



**Figure 3.1.** Les organes de la dynamique latérale du véhicule

### 3.2 Formulation du problème

Notre but est d'installer un système qui imite le comportement d'un conducteur humain et qui modifie l'angle de braquage des roues ( $\delta$ ) et la vitesse angulaire du lacet ( $\dot{\psi}$ ) pour que le véhicule suive le chemin désiré.

Notre conducteur doit observer et analyser l'écart latéral puis prend une décision, pour cela on lui définit les paramètres suivants :

- l'angle de cap  $\psi$  ou bien (lacet), comme étant l'angle entre l'axe symétrique de véhicule et la tangente du chemin.

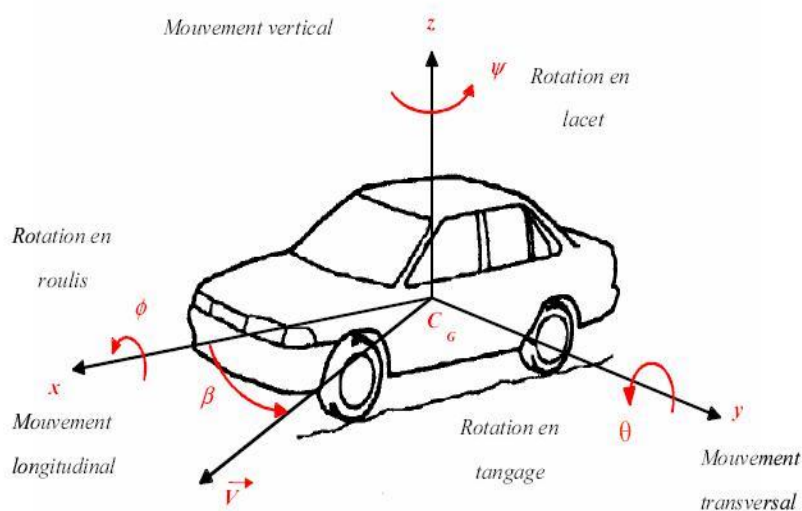
- l'angle de braquage  $\delta$  étant l'angle entre les roues avant et les roues arrière du véhicule, on peut le varier selon l'ajustement du volant.

Il est très important de signaler que l'angle de cap et l'angle de braquage sont orientés tous les deux dans le même sens qui est le sens inverse de rotation des aiguilles d'une montre (positif).

### 3.3. La dynamique latérale du véhicule

#### 3.3.1. Les mouvements du véhicule et les forces extérieures

En se focalisant sur la dynamique latérale, cette section présente le modèle de véhicule utilisé pour la synthèse de l'assistance. Ce modèle est obtenu en considérant le véhicule comme un corps rigide qui ne subit aucune déformation et qui présente ainsi six degrés de liberté : trois rotations de la caisse et trois mouvements de translation (figure 3.2). Les mouvements de translations s'effectuent selon trois axes : un axe longitudinal  $C_GX$ , un axe transversal  $C_GY$ , et un axe orthogonal  $C_GZ$ . Les mouvements de rotation s'effectuent selon les axes mentionnés précédemment et portent chacun un nom bien spécifique : la rotation de roulis caractérisée par l'angle  $\phi$ , la rotation de tangage caractérisée par l'angle  $\theta$ , et la rotation de lacet (ou de cap) caractérisée par l'angle  $\psi$ .



**Figure 3.2.** Les différents mouvements de véhicule

Dans cette première étude d'application, nous choisissons de modéliser la dynamique latérale au moyen du modèle de bicyclette par rapport au véhicule cible, ce qui équivaut au changement de variables qui peut être fait pour exprimer la dynamique par rapport au centre de la route. Ce modèle montre un compromis approprié entre la complexité et la performance, étant d'usage courant à des fins de conception de commande.

### 3.4. Première idée de la commande.

Le but du contrôle latéral est d'agir sur le véhicule pour poursuivre un chemin en gardant une distance de poursuite  $y_r$  entre l'axe symétrique de véhicule et la ligne médiane de la route.

L'écart réel  $y$  sera fourni par un système de captage (système de vision par exemple), plus l'erreur  $e = y_r - y$  est petite plus le véhicule s'approche du trajet désiré, d'où l'idée de choisir  $e$  comme entrée de notre correcteur. La figure (3.3) présente le système de commande en boucle classique qui est très compatible avec ce qu'on doit faire en pratique.

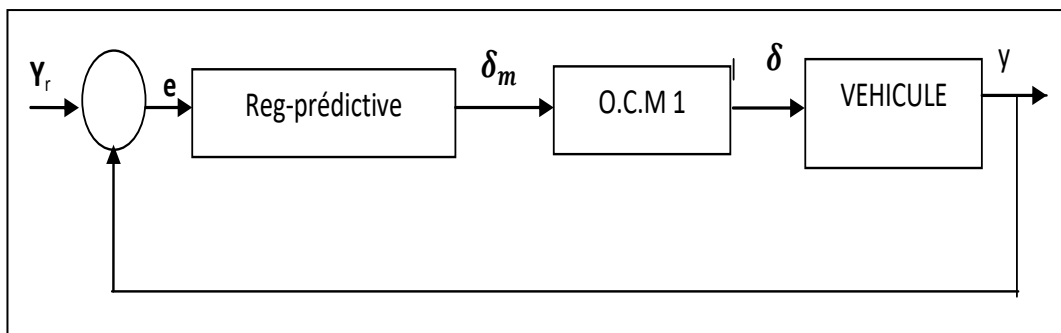


Figure.3.3 - La boucle de commande

Ce régulateur a une structure identique à un système à réglage par feedback classique.

Il est constitué de :

$Y_r$ : L'écart latéral désiré (la consigne).

$Y$ : L'écart réel (la mesure).

$E$ : L'erreur (l'entre du Correcteur).

$O.C.M 1$ : Organe de commande, ou le moteur qui agit sur la direction  $\delta$ .

$Reg -prédictive$ : Régulateur par la technique prédictive.

: Le signal de commande fourni par le  $reg-prédictive$ .  $\delta_m$

: La grandeur réglante  $1.\delta$



### 3.5 Les tests de simulation :

La position initial du véhicule est repérée par zéro et l'écart désiré par  $y_d=150\text{cm}=1.5\text{m}$

#### 3.5.1 Les tests du modèle dynamique

Système non linéaire ( $v_x$  constante) :

#### 3.5.2. Les applications numériques :

On détermine les valeurs numériques choisies pour cet effet.

-la vitesse considérée constante pendant toute la durée de la simulation est égale à

108km/h=30m/s

-la masse du véhicule  $m = 1200\text{kg}$ .

-l'inertie  $I_z = 2047\text{kg/m}$ .

-la longueur du véhicule  $L = 3\text{m}$ .

-l'écart désiré  $y_d = 150\text{cm}=1.5\text{m}$

Les entrées du contrôleur sont les distances en centimètres et les angles en radians.

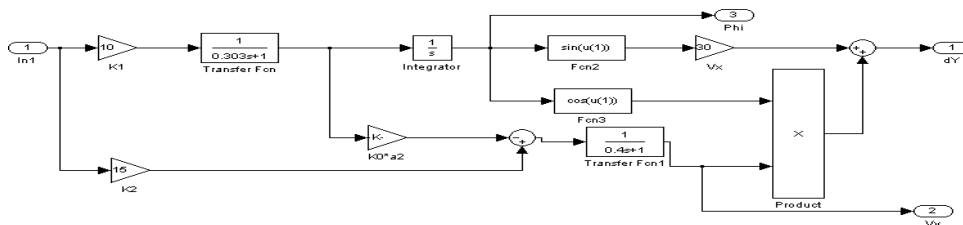


Figure.3.4 – schéma bloc du modèle dynamique

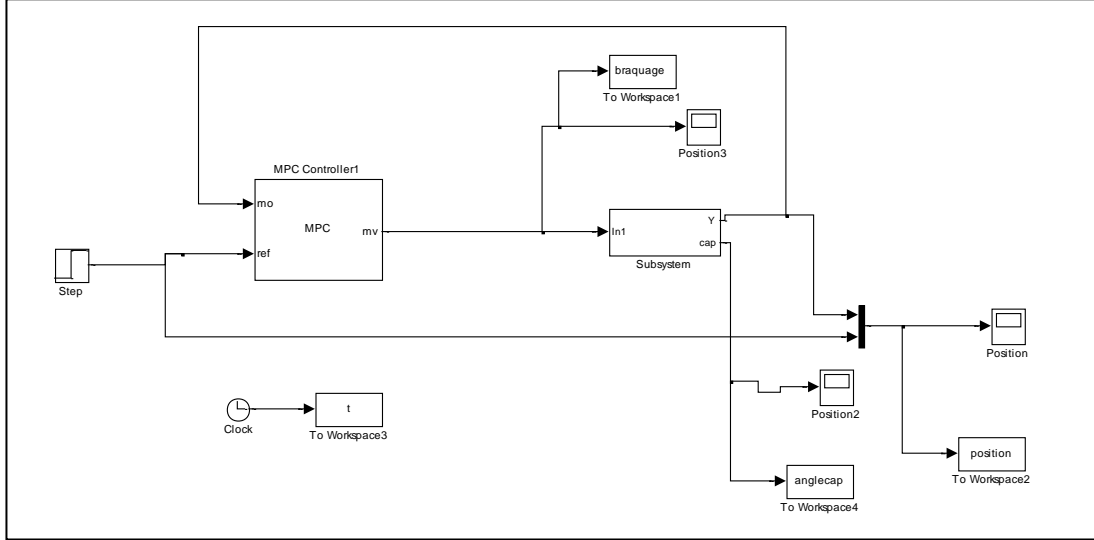


Figure.3.5 – schéma bloc de boucle de commande sous simulink

La représentation de l'espace d'état du système est rappelée ici pour la commodité du lecteur

$$\dot{x}(t) = A_c(v_x)x(t) + B_c u(t) \quad (3.1)$$

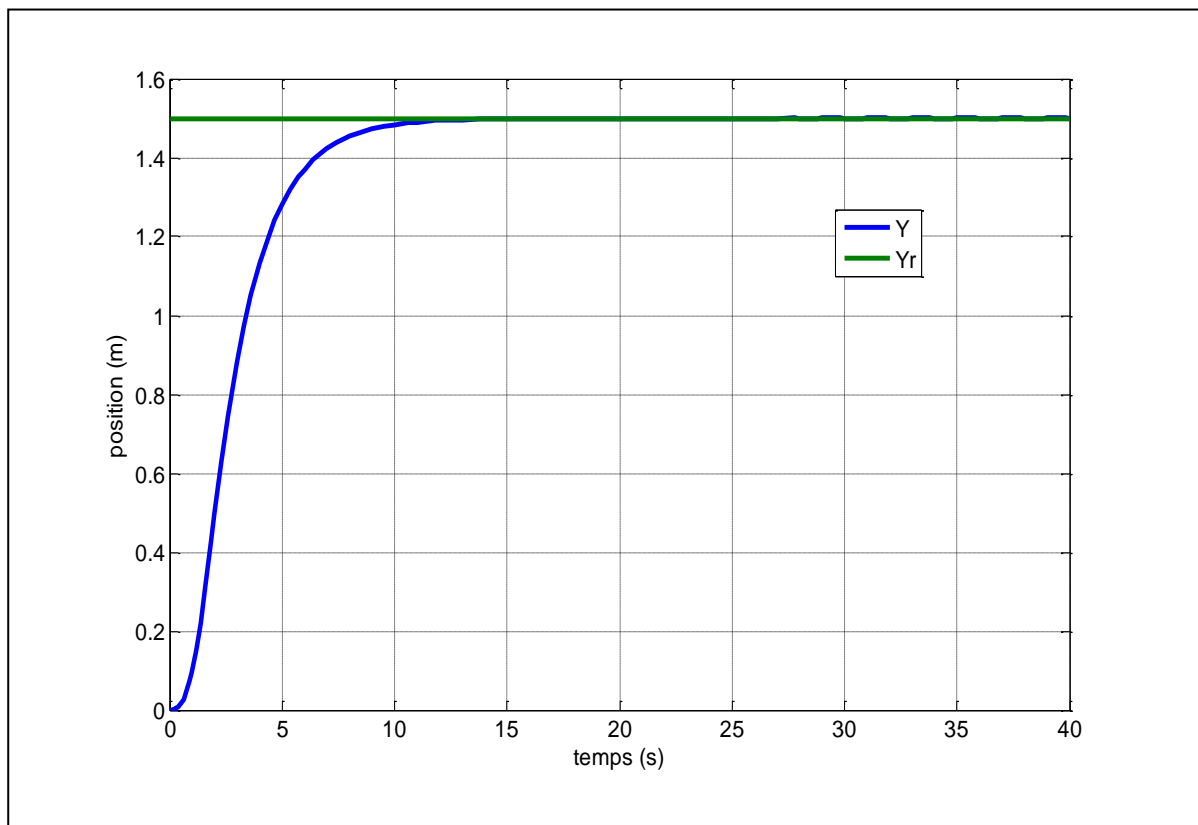
$$y(t) = C_c x(t), \quad (3.2)$$

Avec:

$$A_c(v_x) = \begin{pmatrix} \frac{-(C_f l_f^2 + C_r l_r^2)}{I_z v_x} & \frac{(C_f l_f - C_r l_r)}{I_z} & \frac{-(C_f l_f - C_r l_r)}{I_z v_x} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{(C_r l_r - C_f l_f)}{m v_x} & \frac{(C_f + C_r)}{m} & \frac{-(C_f + C_r)}{m v_x} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$B_c = \begin{pmatrix} \frac{C_f l_f}{I_z} \\ 0 \\ \frac{C_f}{m} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.4) \quad , \quad C_c = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -x_m & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

### 3.6. Test du comportement sur une ligne droite :



**Figure.3.6** – variation de l'écart latérale

On remarque que Le système arrive à son état de stabilité après un régime transitoire de 13 sec avec un cun dépassement. Notre controleur nous a donnée un bon resultats pour ce teste Cette simulation est le resultat d'un scenario de la commande predecive donneé par les valeurs suivante :

Intervalle de contrôle (control interval) = 1.

Horizon de prediction (prediction horizon) =10

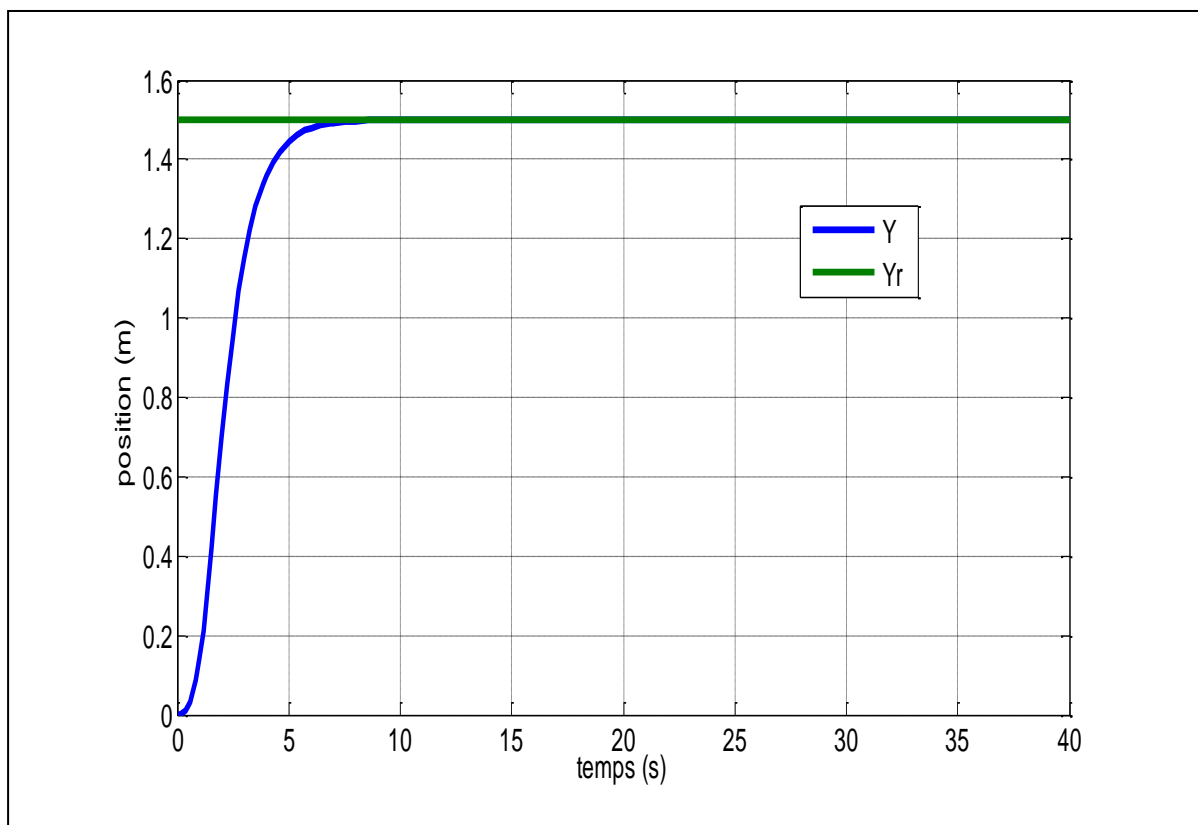
Horizon de contrôle (control horizon) = 2.

On vas simuler plusieurs scenario pour reduire notre regime transitoire. Les valeurs suivantes :

Intervalle de contrôle (control interval) = 1.

Horizon de prediction (prediction horizon) = 7

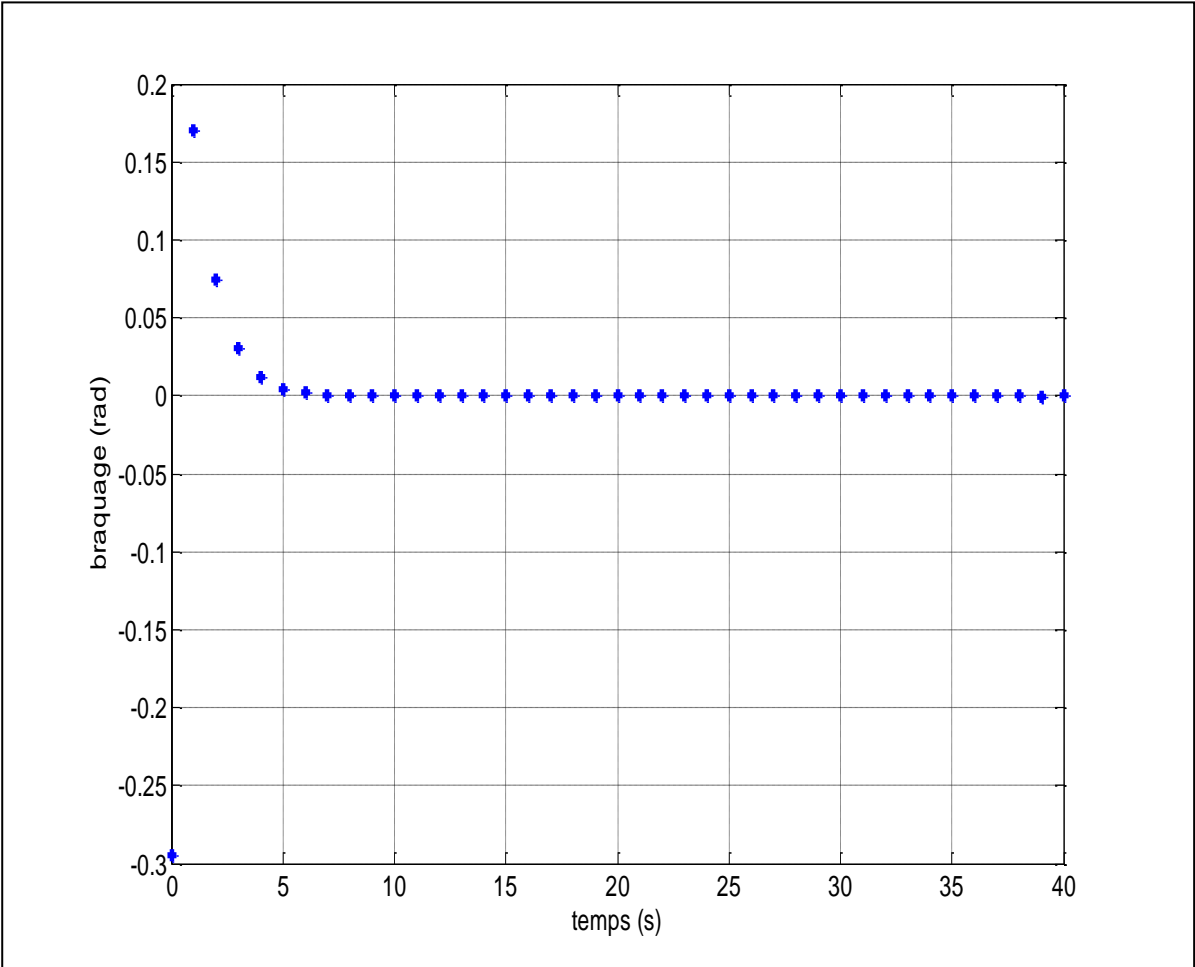
Horizon de contrôle (control horizon) = 2.



**Figure.3.7** – variation de l'écart latérale

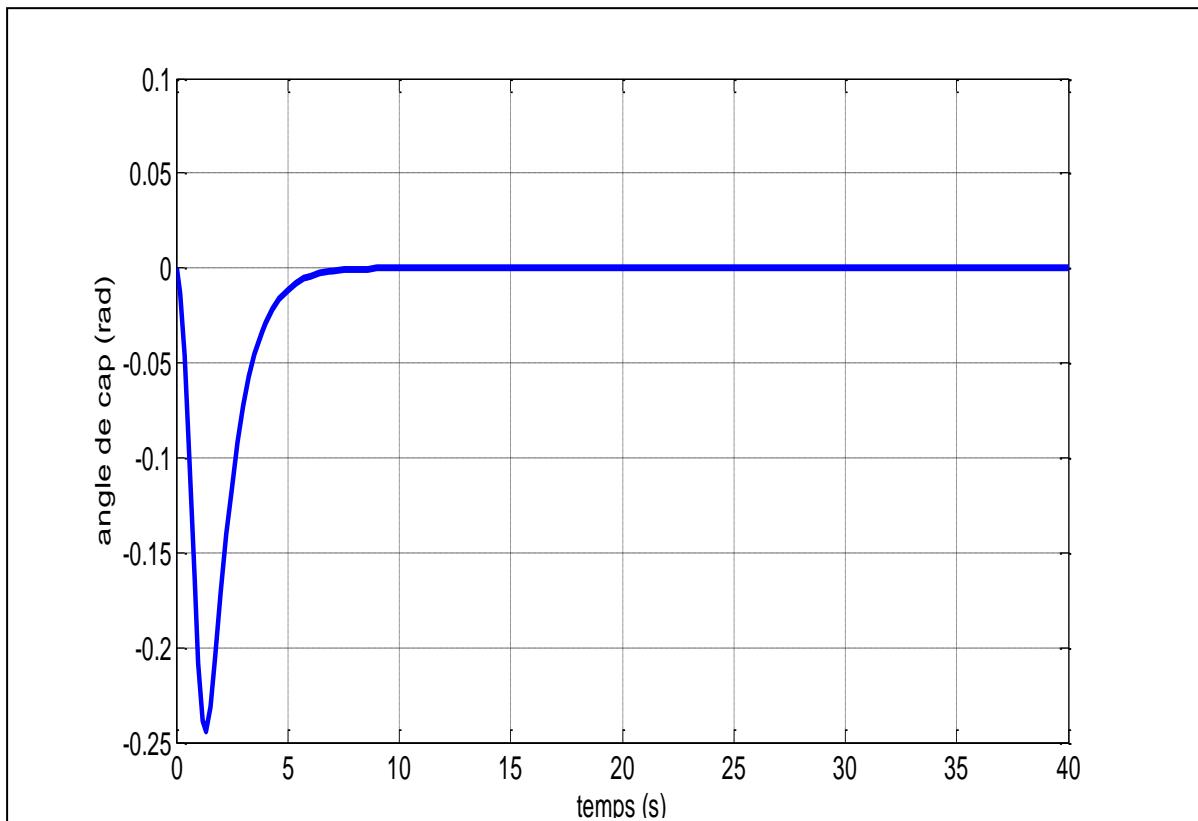
La figure (3.7) indique que le temps de régime transitoire est égale à 7sec (le temps que la mesure atteinte la consigne), le dépassement est éliminé et une erreur statique nulle dans le régime permanent. . Donc on a réduit le régime transitoire du 14 sec au 7 sec.

La sortie du bloc prédictive est un signal de commande discret comme se présenté dans la figure (3.8). La commande de notre boucle indique que le temps de régime transitoire est égale à 7sec (le temps que la mesure atteinte la consigne) nous remarquons que signal de commande fournie par notre contrôleur prédictive est tend ver 0 a partir du 7eme seconde.



**Figure.3.8** – variation du signal de commande (braquage)

La figure (3.9) présente la variation du angle de cap du véhicule dans ce teste de ligne droite, nous remarquons que cette variation est tend ver 0 a partir du 7eme sec.

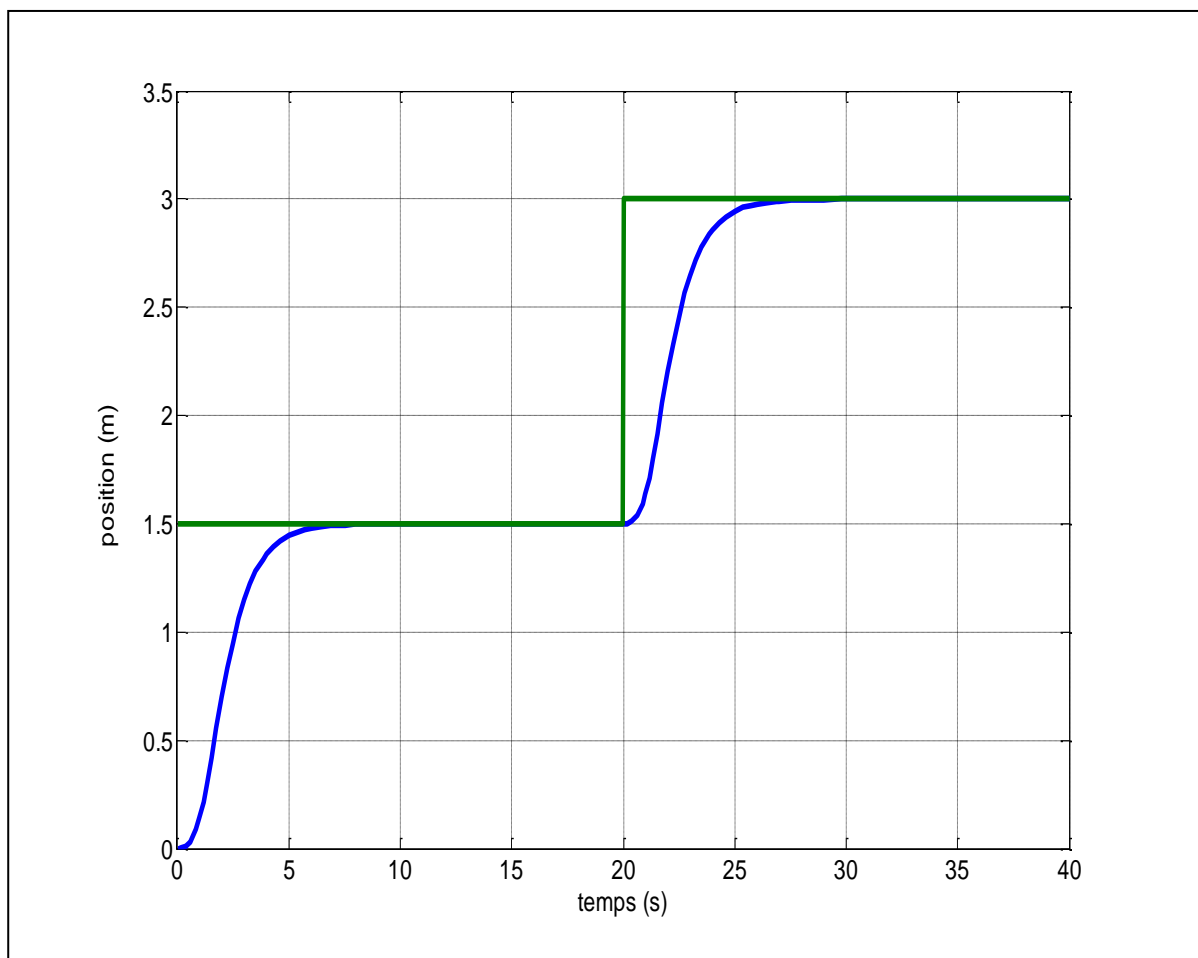


**Figure.3.9** – variation du angle de cap

D'après les figures (3.7), (3.8) et (3.9) nous pouvons dire que notre contrôleur prédictive (MPC) a bien réagi dans ce teste et assure un contrôle latérale de notre véhicule sans dépassement. Nous remarquons aussi que le régime transitoire dans ce teste est de 7 sec c.-à-d. Que après la 7 ème sec le véhicule est sur la première line de la route et le braquage ainsi l'angle de cap sont tend ver 0 des la 7 sec

### 3.7. Test du changement de la voie :

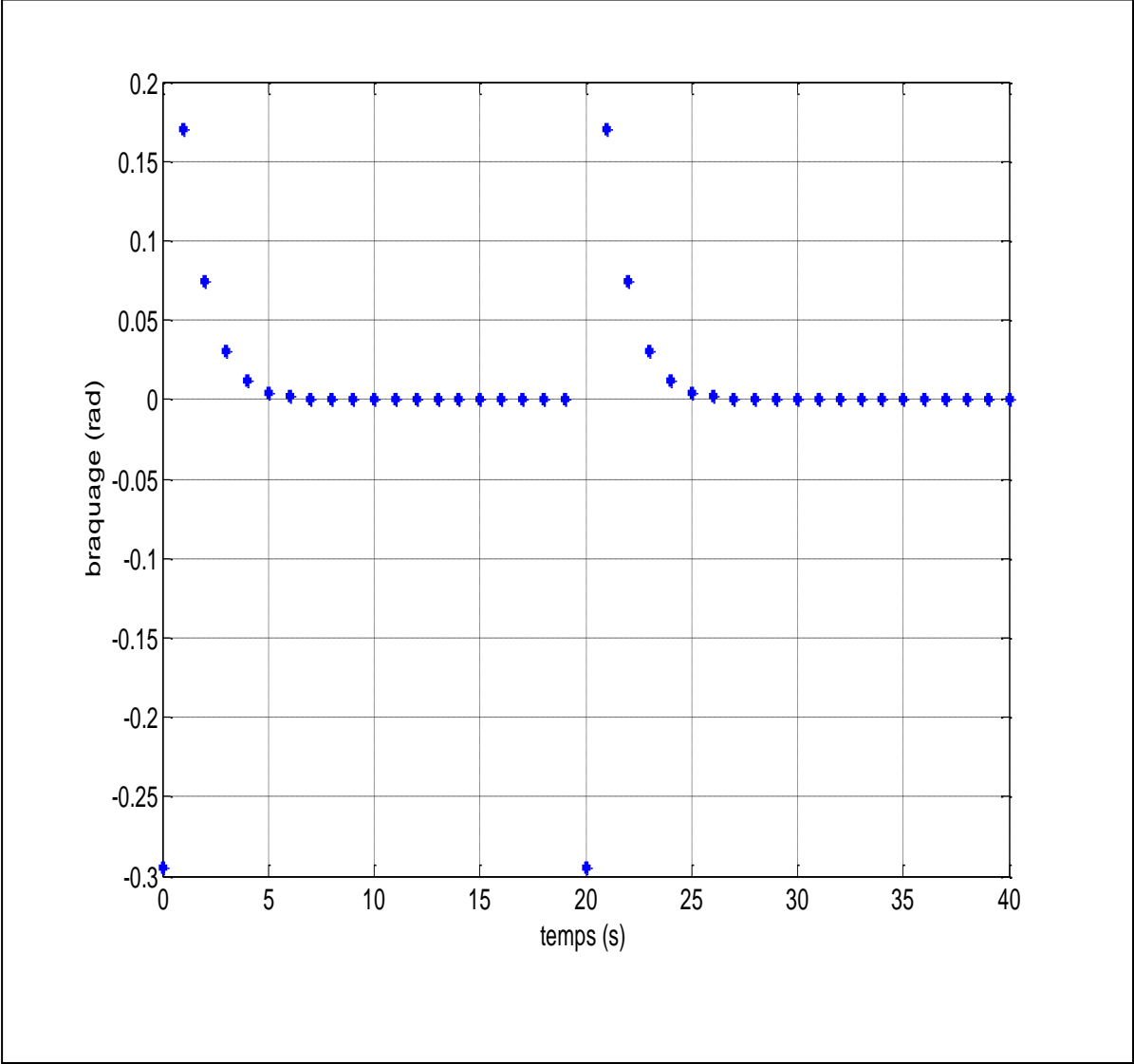
Dans ce teste on va applique un changement de la consigne qui nous a permis de tester notre contrôleur pour le passage de notre vehicule de la première voie de autoroute a la deuxième voie.



**Figure.3.10** – variation de l'écart latérale

D'après la figure (3.10) nous remarquons que notre contrôleur a biens suivie le changement de la consigne.

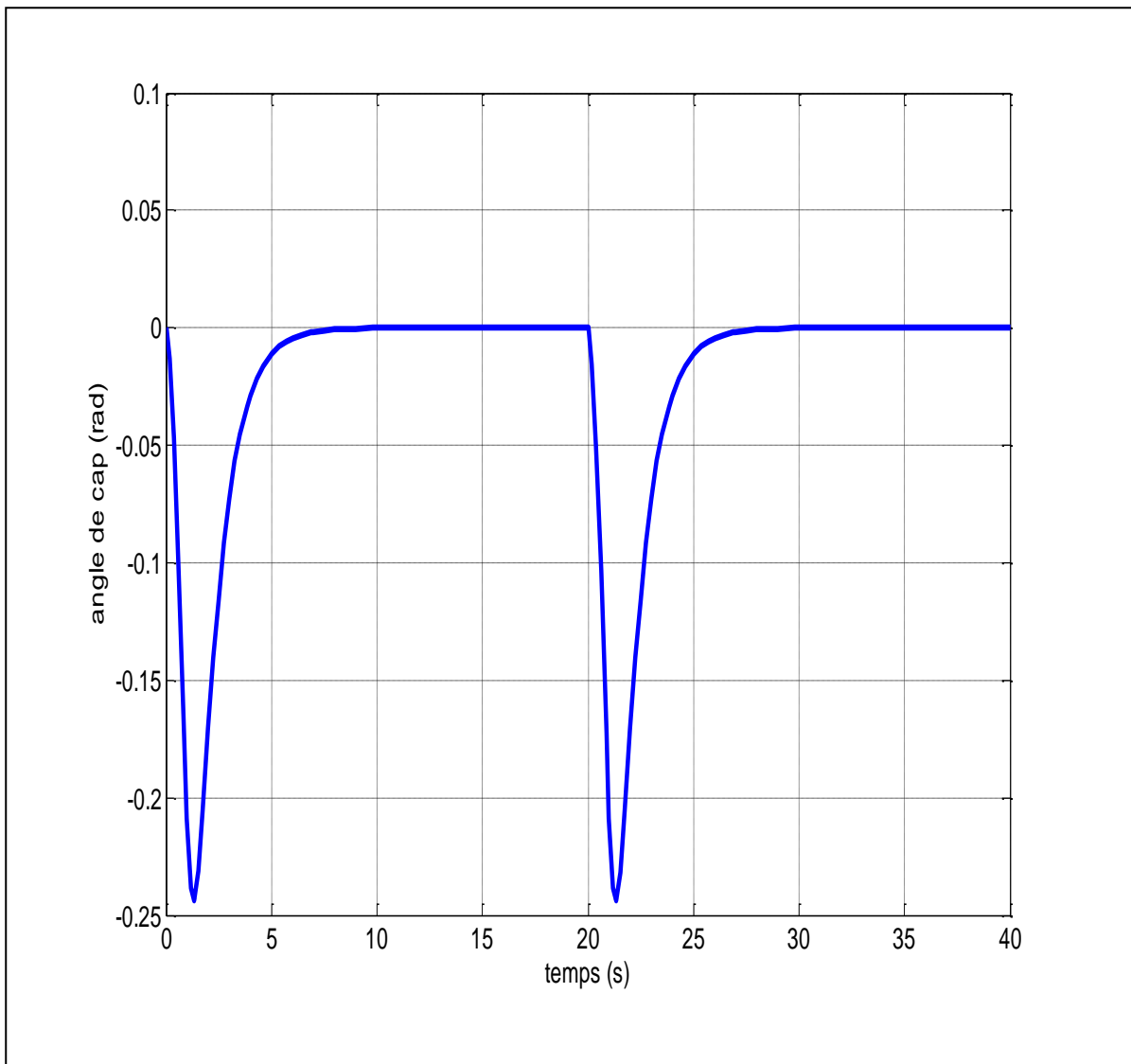
La figure (3.11) présente la variation du signal de commande de notre contrôleur (MPC) dans ce teste.



**Figure.3.11** – variation du signal de commande (braquage)



La figure (3.12) présente la variation du ange de cap de notre véhicule dans ce teste.



**Figure.3.12** – variation de l’angle de cap

D’après les figures (3.10), (3.11) et (3.12) nous pouvons dire que notre contrôleur prédictive (MPC) a bien réagi dans ce teste et assure le changement de voie de notre véhicule sans dépassement.

### 3.8. Test du glissement de véhicule :

Dans ce teste on va applique un glissement du vehicule c.-à-d. le vehicule sort de sa position dans la première voie de l'autoroute a cause d'un glissement. Ce teste est modélisé comme un échelon de 0.5 mètre. .

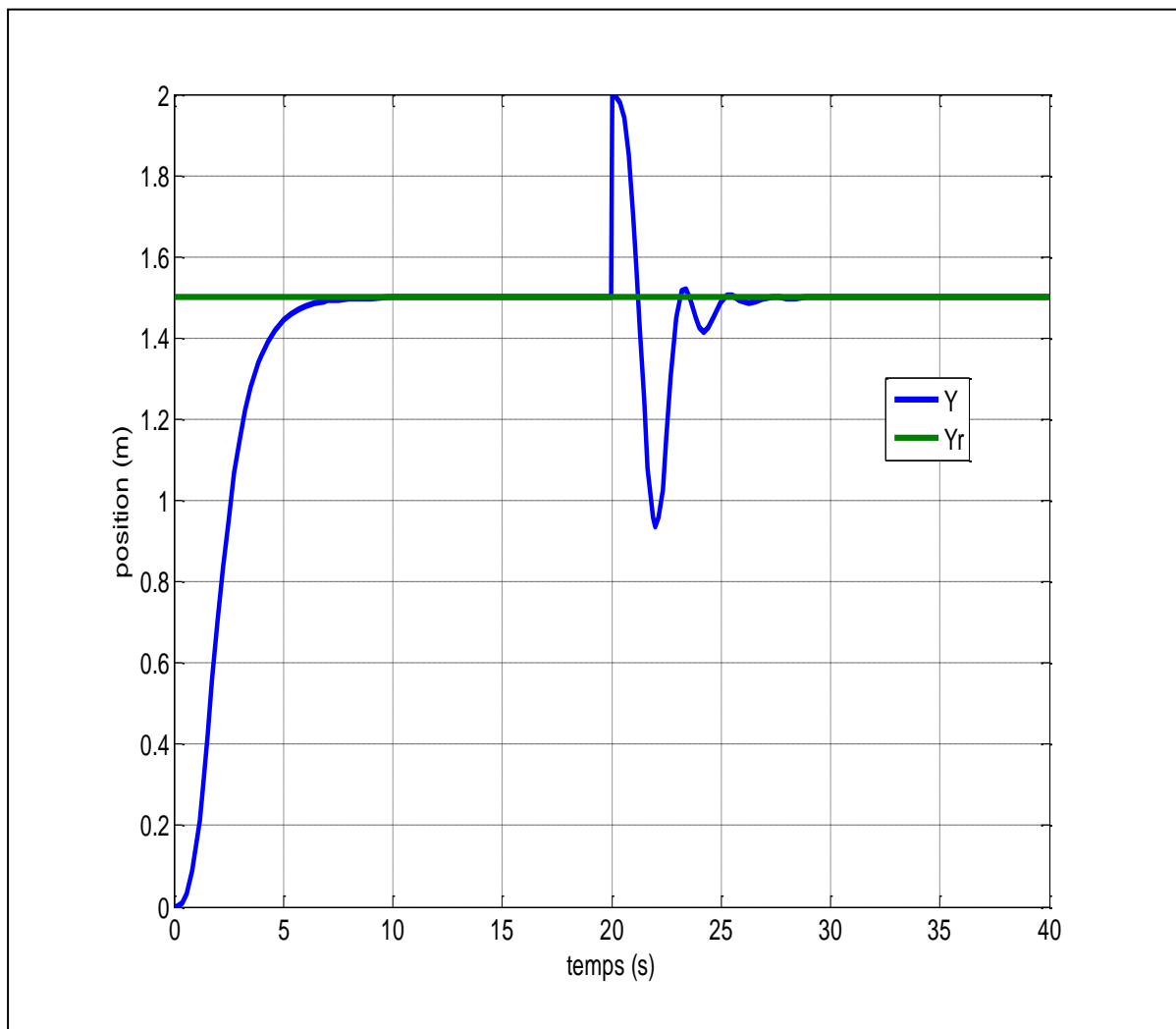


Figure.3.13 – variation de l'écart latérale

La figure (3.14) présente la variation du signal de commande de notre contrôleur (MPC) dans ce teste.

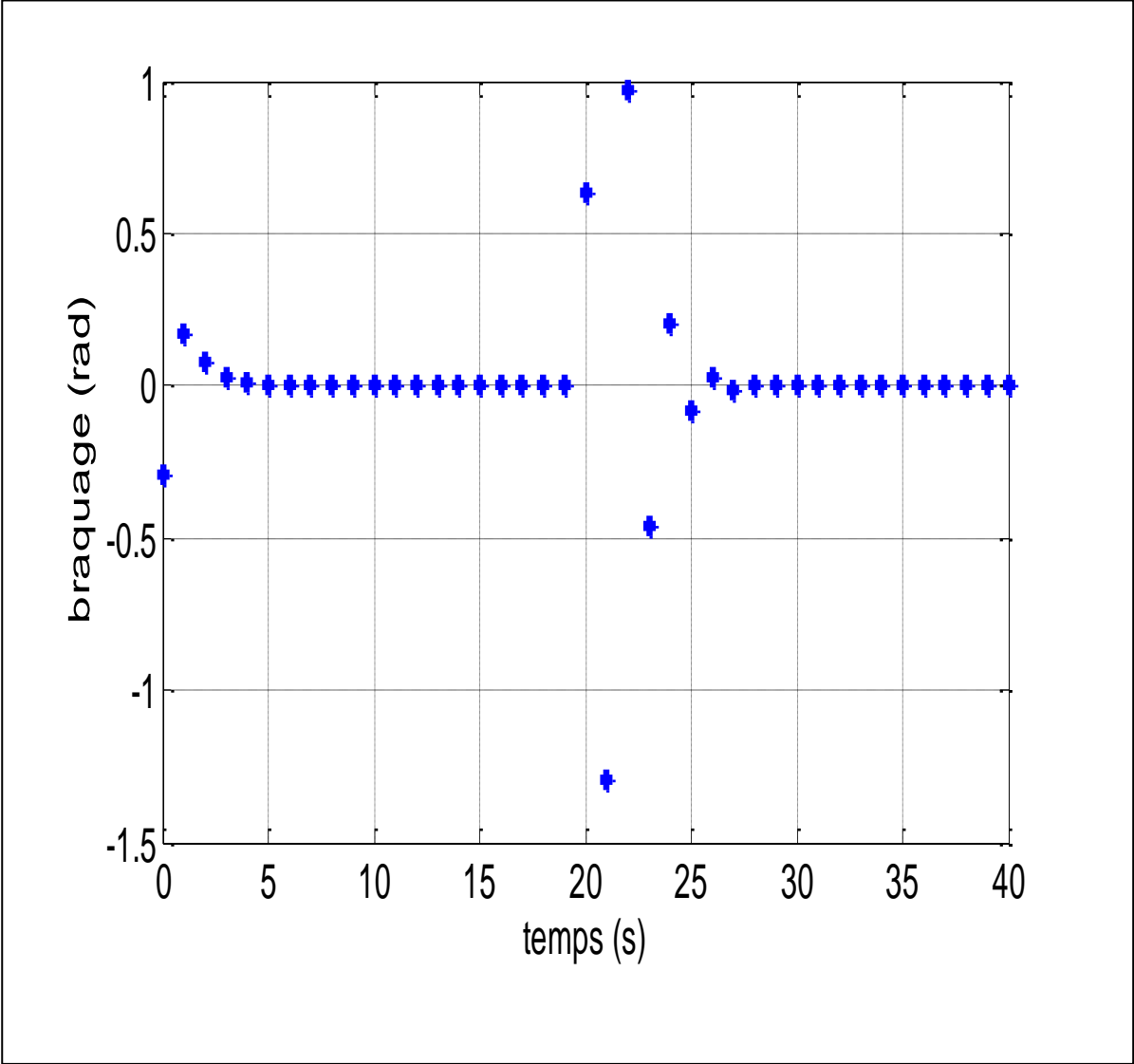
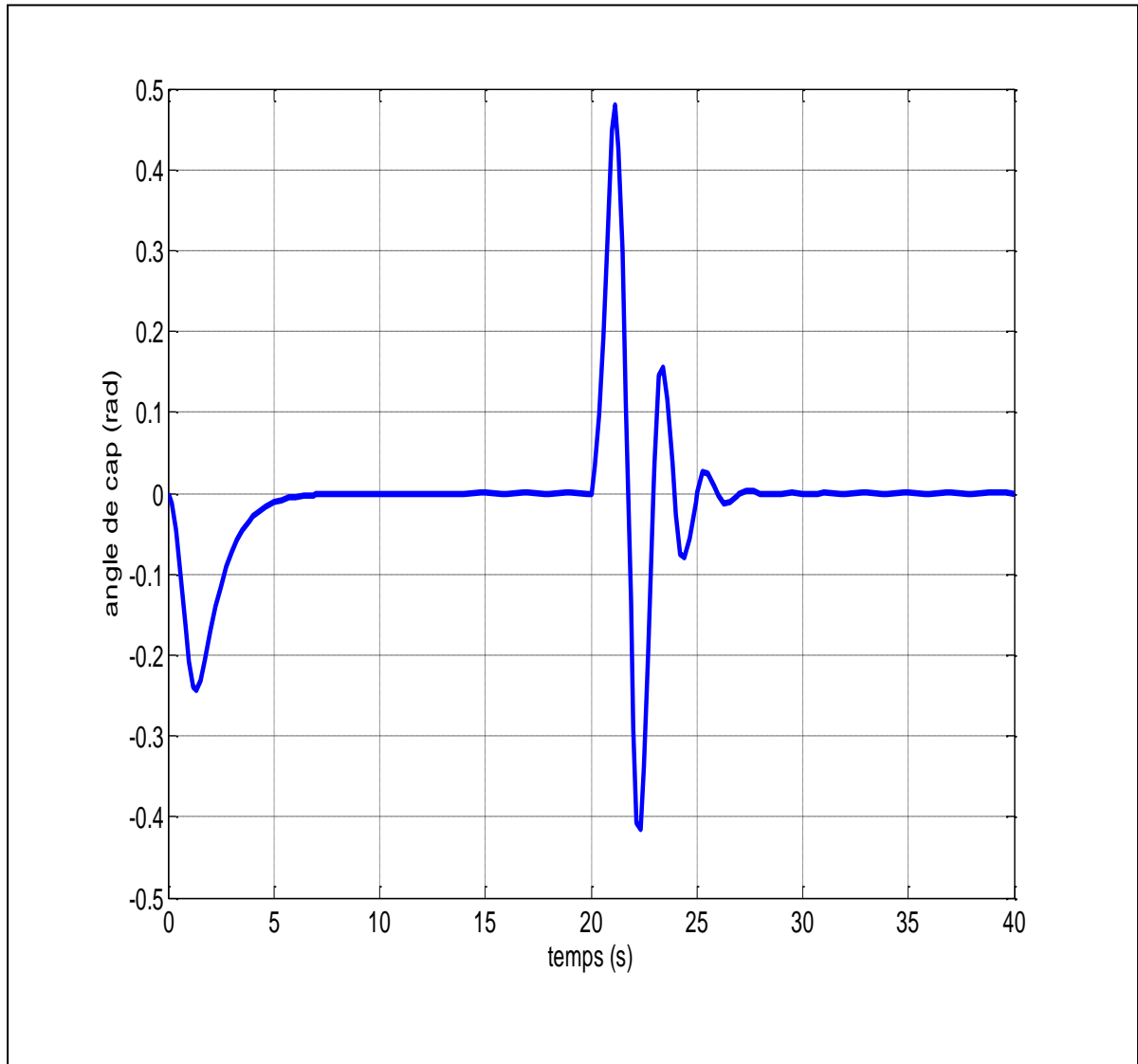


Figure.3.14 – variation du signal de commande (braquage)

La figure (3.15) présente la variation du angle de cap de notre véhicule dans ce teste.



**Figure.3.15** – variation de l'angle de cap

D'après les figures (3.13), (3.14) et (3.15) nous pouvons dire que notre contrôleur prédictive (MPC) a bien réagi dans ce teste et remettre le vehicule sur la première voie après ce dérapage a cause d'un glissement. .

### **4.3 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous sommes attelés à la correction de notre système par le predictive controleur( MPC) puis on a passé à la simulation de dans les différentes situations de la route c'est –à-dire ligne droite , changement de voie ainsi le glissement ou bien derapage .

Les tests effectués nous ont démontré que le controleur accomplissent parfaitement la tâche qui leur incombe (erreur de poursuite presque nulle ) et robuste face aux perturbations

## Conclusion général

Notre objectifs est de tester les techniques de commande predictive pour le contrôle du véhicule afin d'avoir un contrôleur non linéaire robuste vis-à-vis les perturbations.

Dans une première étape nous avons présenté notre modèle de véhicule pour cela nous a permis de rappeler les différents modèles analytiques utilisés pour représenter l'évolution de l'écart latéral du véhicule en fonction de l'angle de roues, de la vitesse et du rayon de courbure de la route.

Dans une deuxième étape nous avons présenté la théorie de commande prédictive appliquées sur des systèmes mono variables. Nous allons dans un premier volet exposer les fondements et les principes des commandes des contrôleurs basés sur des approches récentes. Le troisième chapitre a été consacré à exposer la boucle de régulation et d'élaborer une synthèse de commande prédictive appliquée au control latérale du véhicule.

La dernière partie de notre travail est dédié à la simulation de notre contrôleur sous MATLAB / Simulink. Ces tests nous ont donné de bon résultats pour contrôler notre système non linéaire et le garder sur la position désiré durant Son chemin avec une vitesse constante. Comme perspective, la suite logique de ce travail est :

- Il s'agit d'un modèle plus complet avec plus degrés de liberté (couplage entre la dynamique latérale, la dynamique longitudinale et la suspension).

Commander un véhicule dans le modèle fortement couplé selon le choix de la variable

Introduire une fonction exponentielle dans la loi de commande

- Étude la commande par mode prédictive sur les systèmes multi variable.

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] Salim Maakaroun. Modélisation et simulation dynamique d'un véhicule urbain innovant en utilisant le formalisme de la robotique. Automatique / Robotique. Ecole des Mines de Nantes, 2011. Français. <NNT : 2011EMNA0014>. <tel-0064283>
- [2] Les étudiants: Rabotte Moussa et Seredj Abed. Développement d'un système d'aide à la conduite pour maintenir le véhicule sur la voie /université Dr. Tahar Moulay de Saïda faculté de technologie Filière électrotechnique
- [3] Contrôle latérale d'un véhicule par la commande logique flou/Université Dr. Tahar Moulay de Saïda Faculté de Technologie Département d'Electrotechnique 2016/2017
- [4] Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'OranUSTO/ Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en AUTOMATIQUE/ Contrôle latérale d'un véhicule par mode glissant
- [5] YACIA Sofiane ET TAOUINET M\_Rafik «Commande Prédictive d'un Redresseur à MLI Triphasé»
- [6] S. Olaru, «Contribution A L'étude De La Commande Prédictive Sous Contraintes Par Approche Géométrique », Thèse De Doctorat, Université Paris Xi Orsay, France, 2005.
- [7] O. Bourebia, «Commande Prédictive Floue Des Systèmes Non Linéaires», Thèse De Doctorat, Université Mentouri De Constantine, 2011.
- [8] A. Benbrahim, «Commande Prédictive Généralisée D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents», Mémoire De Magistère, Université De Batna, 2009.

[9] A. Bezzini, «Commande Prédicative Non Linéaire En Utilisant Les Systèmes Neuro-Flous Et Le Algorithmes Génétiques», Mémoire De Magister, Université Mohamed Khider De Biskra, 2013.

[10] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud & J. Papon. Model predictive heuristic control: Application to industrial processes". Automatica, Vol. 14, pp. 413-428, 1978.

[11] M.B. Ben Slimen, «Conception De Lois De Commande Structurées (Hiérarchisées, Décentralisées) Pour Les Chaines De Traction Pilotées», Thèse De Doctorat, Université De Nantes, France, 2011.

[12] N. Petit, « Commande Prédicative », Notes De Cours Option Procède Environnement, Ecole Centrale Paris, 2005-2006.

[13] Louay Saleh. Contrôle Latéral Partagé d'un Véhicule Automobile. Automatique / Robotique. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2012.

[14] Louay Saleh. Contrôle Latéral Partagé d'un Véhicule Automobile. Automatique / Robotique. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2012.

[15] Louay Saleh. Contrôle Latéral Partagé d'un Véhicule Automobile. Automatique / Robotique. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2012.