



Commande robuste pour l'assistance au contrôle latéral d'un véhicule routier

Thibaut RAHARIJAONA

SUPELEC-Gif sur Yvette

en collaboration avec le LIVIC (Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructures-Conducteurs)-Satory

Plan

- Introduction
- Modélisation véhicule, actionneur, conducteur
- Méthodologie de commande
- Application à l'assistance au contrôle latéral
- Analyse de robustesse de l'assistance
- Conclusion et perspectives

Introduction

- Tendance mondiale actuelle
 - La route « intelligente »
 - La file de véhicules automatisée
 - Le contrôle de chaque véhicule
- Automatisation d'un véhicule
 - Contrôle longitudinal
 - **Contrôle latéral**
- Développement actuel chez les constructeurs automobiles
 - Aide à la conduite en longitudinal (ABS, ACC, freinage d'urgence, ...)
 - Contrôle latéral partiel en phase de développement croissante (Contrôle Dynamique de la Stabilité, ESP, ...)
 - **Assistance à la conduite**

Introduction

- Problématique
 - 37 % des accidents en France impliquent des véhicules seuls
 - Ils se manifestent par des pertes de contrôle et des sorties de route causées par des défaillances du **véhicule**, du **conducteur**, de l'infrastructure.
 - Un facteur accidentogène prépondérant \Rightarrow **la vitesse excessive**
- Solutions
 - Détection de situations limites
 - Dispositif d'alerte
 - **Braquage actif** utilisant la **perception de la route**
- Objectifs
 - Amélioration de la sécurité et du confort des usagers de la route
 - Minimisation du coût économique et respect de l'environnement

Le programme ARCoS 2004

- Problématique
 - Améliorer la sécurité routière par une approche globale du système Véhicule - Infrastructure - Conducteur
- 3 types de moyens, aux ambitions graduées :
 - Information du conducteur (pas d'action)
 - Interventions d'urgence
 - **Actions coopératives**
- 4 fonctions principales :
 - Réguler les interdistances entre véhicules
 - Prévenir les collisions
 - Alerter les véhicules en amont
 - **Prévenir les sorties de route**

60 partenaires
académiques
et industriels

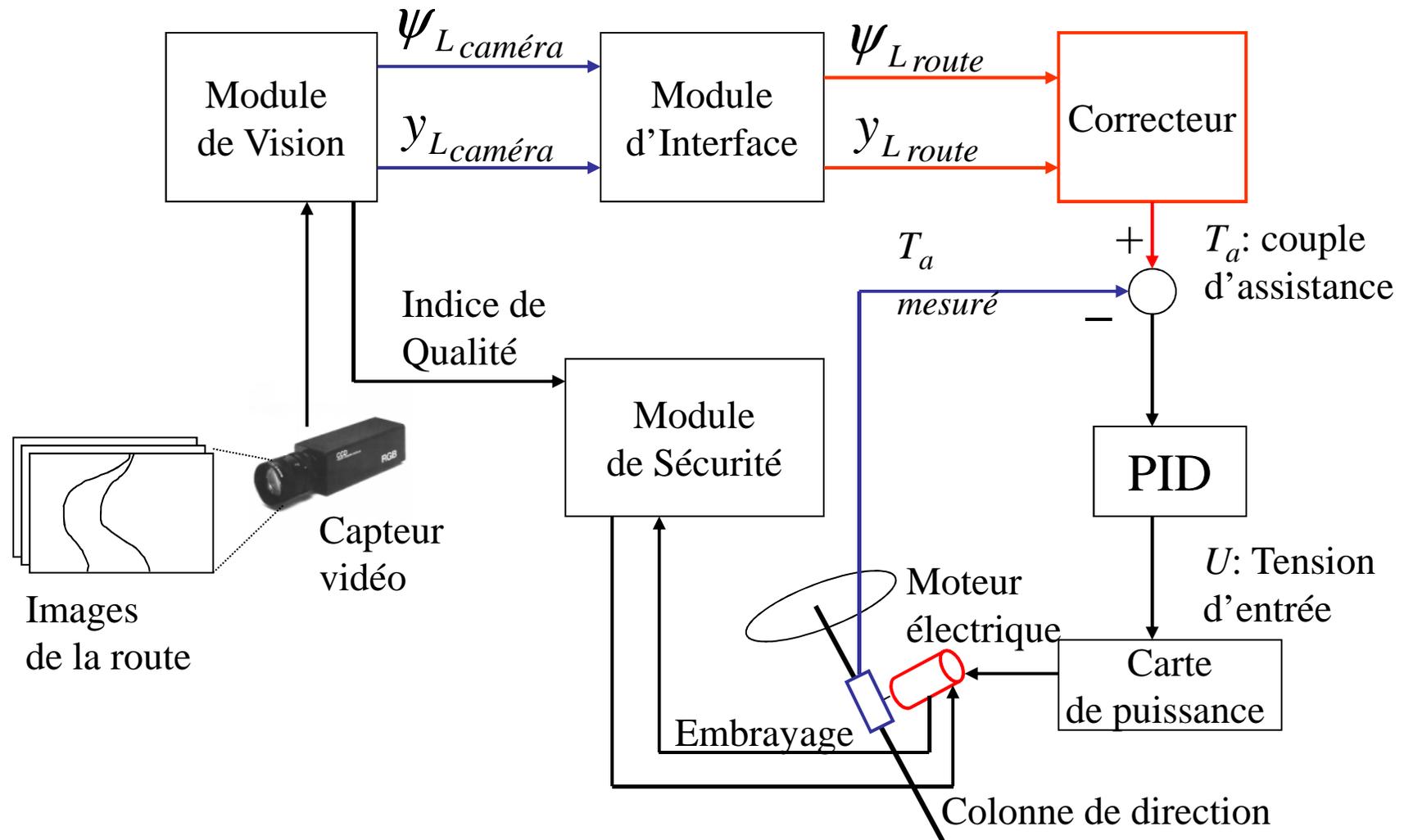
L'ambition des travaux de Thèse

- Collaboration avec le LIVIC
 - Concevoir un système d'aide à la conduite pour le suivi de voie, dans le cadre d'un contrôle partagé avec le conducteur
- Objectifs : améliorer le maintien dans la voie
 - en situation de suivi de route ou de changement de voie
 - en présence de perturbations : rafales de vent, perte d'adhérence, ...
- Informations disponibles :
 - Perception de la route et des marquages
- Moyen d'action :
 - Couple d'assistance appliqué à la colonne de direction

Instrumentation du véhicule



Architecture générale



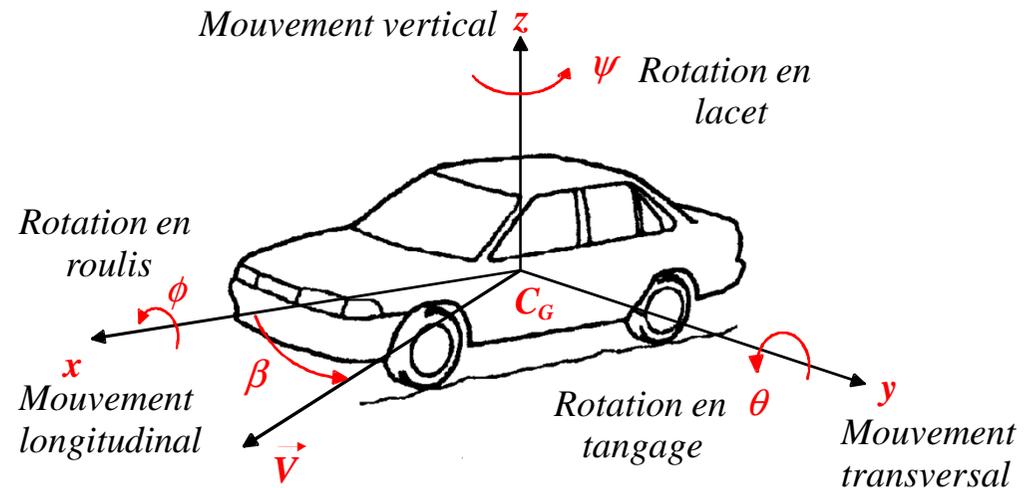
Plan

- Introduction
- **Modélisation véhicule, actionneur, conducteur**
- Méthodologie de commande
- Application à l'assistance au contrôle latéral
- Analyse de robustesse de l'assistance
- Conclusion et perspectives

Modélisation du véhicule

- Point de départ

- Les 6 degrés de liberté du véhicule



- Séparation des modes longitudinal et latéral

Mode longitudinal	Mode latéral
x	y \rightarrow β
z	ψ
θ	ϕ

- Application du Principe Fondamental de la Dynamique

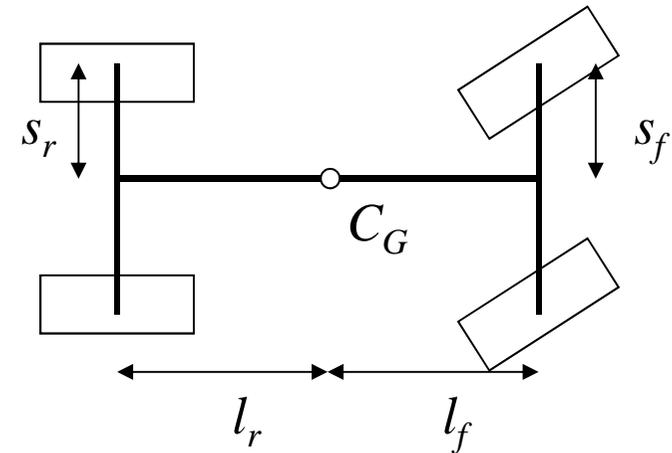
$$\sum \vec{F}_{ext} = m \vec{\gamma}$$

$$\sum \vec{M}_{ext} = I \frac{d\vec{\Omega}}{dt}$$

Modélisation du véhicule

- Caractéristiques du véhicule

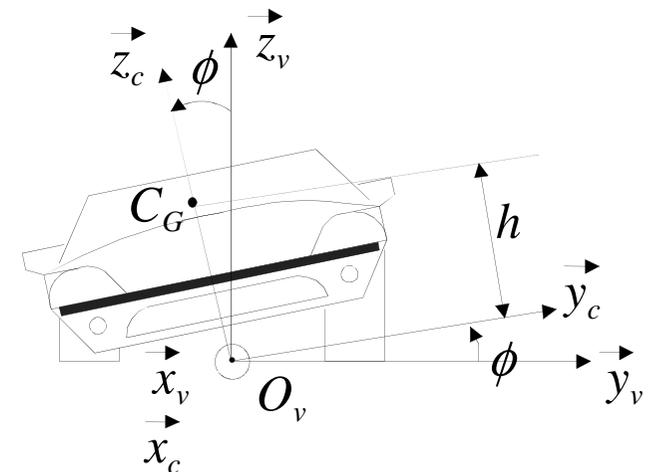
m_s, m	Masse suspendue et masse totale
l_f, l_r	Empattement avant et arrière
s_f, s_r	Demi-voie avant et demi-voie arrière
h	Hauteur du centre de gravité



- Définition du mouvement du véhicule

projection ↪ Mouvement dans le repère caisse
 ↪ Mouvement dans le repère route

➡ Mouvement en latéral et en angle de cap

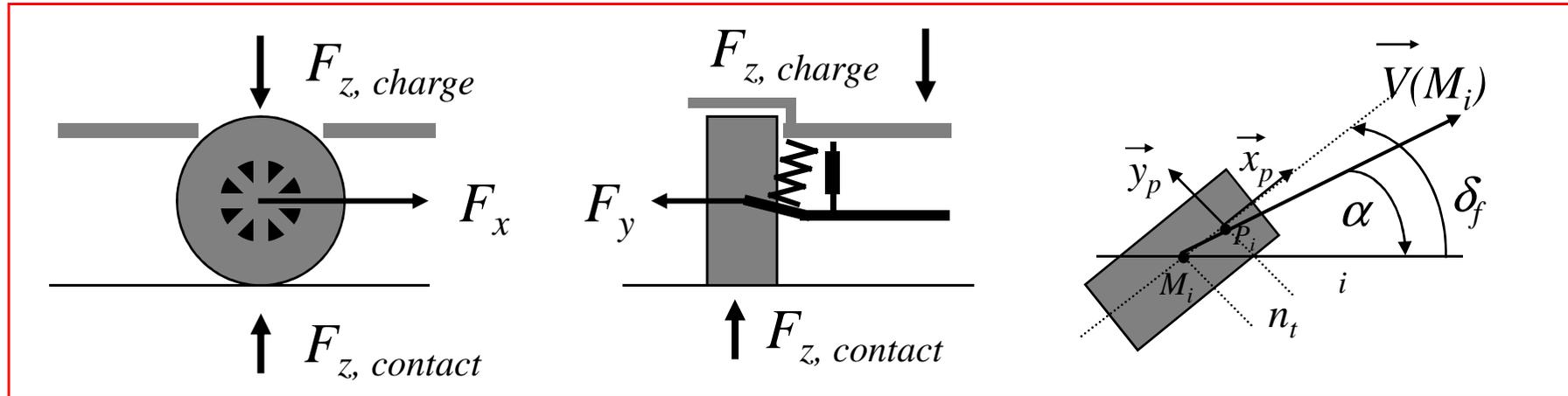


Modélisation du véhicule

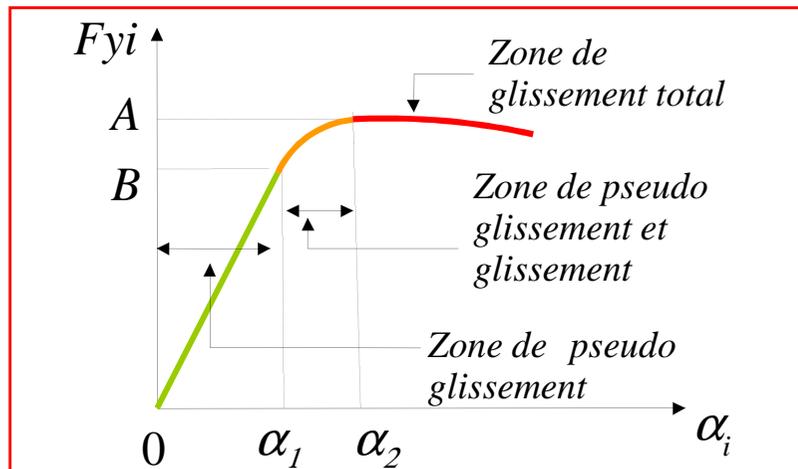
- Formulation des modèles du véhicule
 - Modèle 4 roues non linéaire
 - Modèle bicyclette linéaire :
 - Vitesse fixe
 - Vitesse variable

Modélisation du véhicule

- Forces de Guidage des pneumatiques



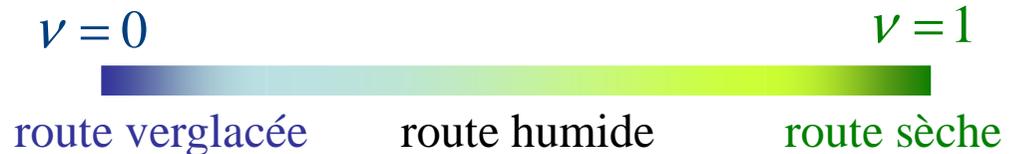
- Allure et expression des forces latérales



$$F_{y1} = F_{y1G} + F_{y1D} = -\nu c_f (\alpha_{1G} + \alpha_{1D})$$

$$F_{y2} = F_{y2G} + F_{y2D} = -\nu c_r (\alpha_{2G} + \alpha_{2D})$$

ν est le coefficient d'adhérence



Modélisation du véhicule

- Linéarisation du modèle

- Hypothèses : angles faibles, termes de puissances supérieures à 1 négligeables

- Conséquence : $F_{y1} + F_{y2} = 2 v c_f \left(\delta_f - \beta - \frac{l_f}{v} \dot{\psi} \right) + 2 v c_r \left(-\beta + \frac{l_r}{v} \dot{\psi} \right)$

- Passage au repère route

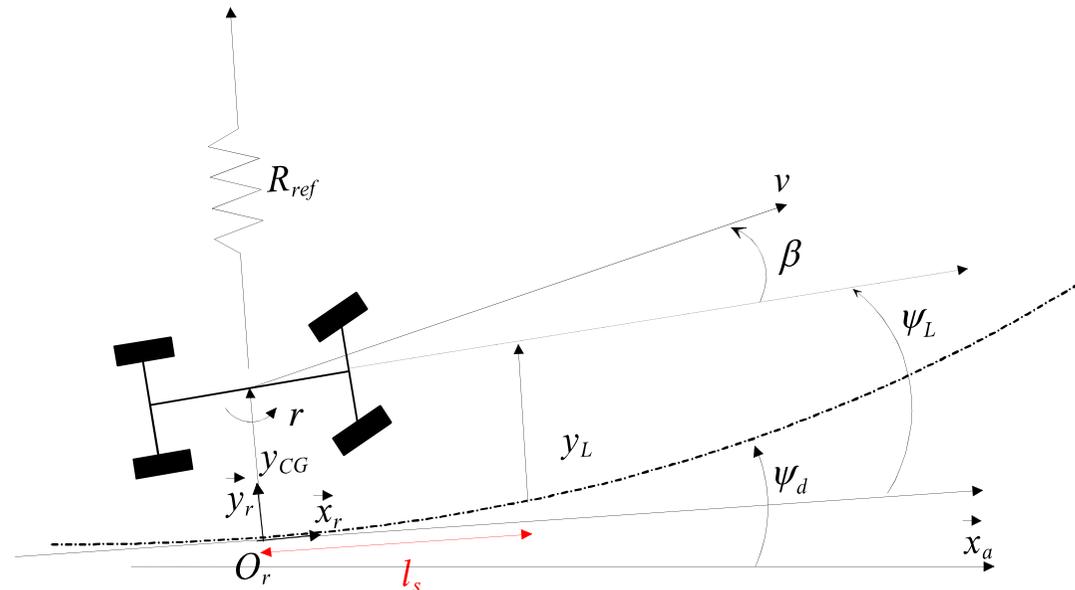
$$\dot{\psi}_d = v \rho_{ref} = v / R_{ref}$$

$$\psi_L = \psi - \psi_d$$

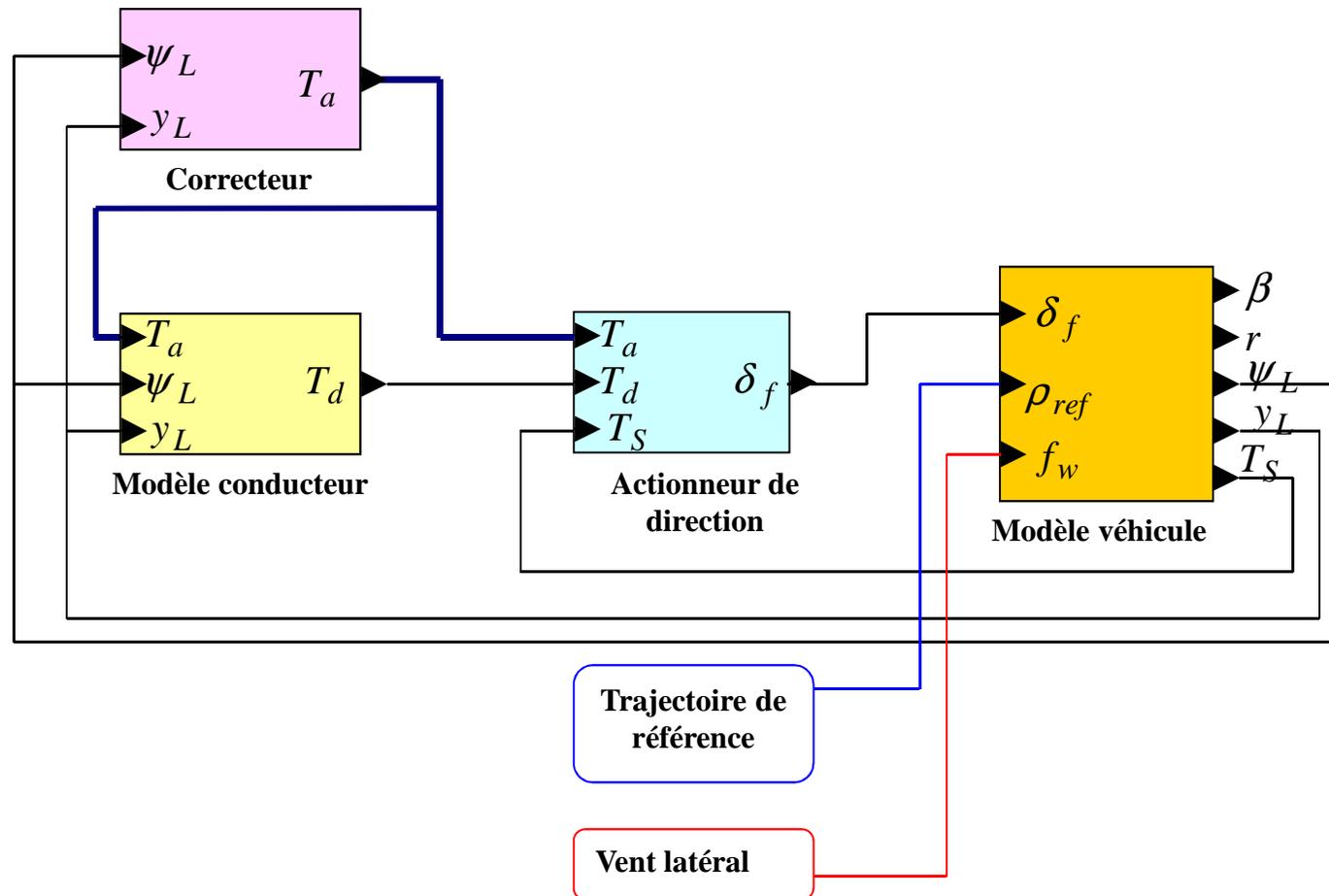
$$\dot{y}_r = v (\beta + \psi_L)$$

$$y_L = y_r + l_s \psi_L$$

↑ Paramètre d'anticipation dans le cadre d'une vision frontale



Méthode d'obtention du modèle de commande



Modélisation du véhicule

- Expression du modèle linéarisé

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi}_L \\ \dot{y}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{V} & -1 + \frac{a_{12}}{V^2} & 0 & 0 \\ a_{21} & \frac{a_{22}}{V} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ V & l_s & V & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ r \\ \psi_L \\ y_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_1}{V} \\ b_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_f + \begin{bmatrix} \frac{e_{11}}{V} \\ e_{22} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f_w + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -V \\ 0 \end{bmatrix} \rho_{ref}$$

β : angle de dérive

r : vitesse de lacet

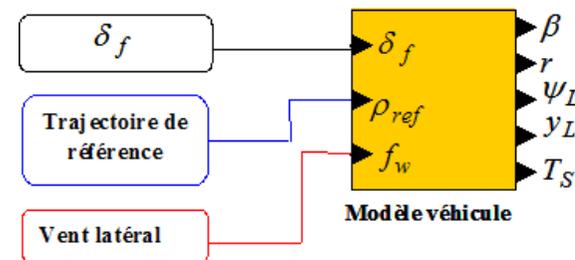
ψ_L : erreur sur l'angle de cap

y_L : déplacement latéral

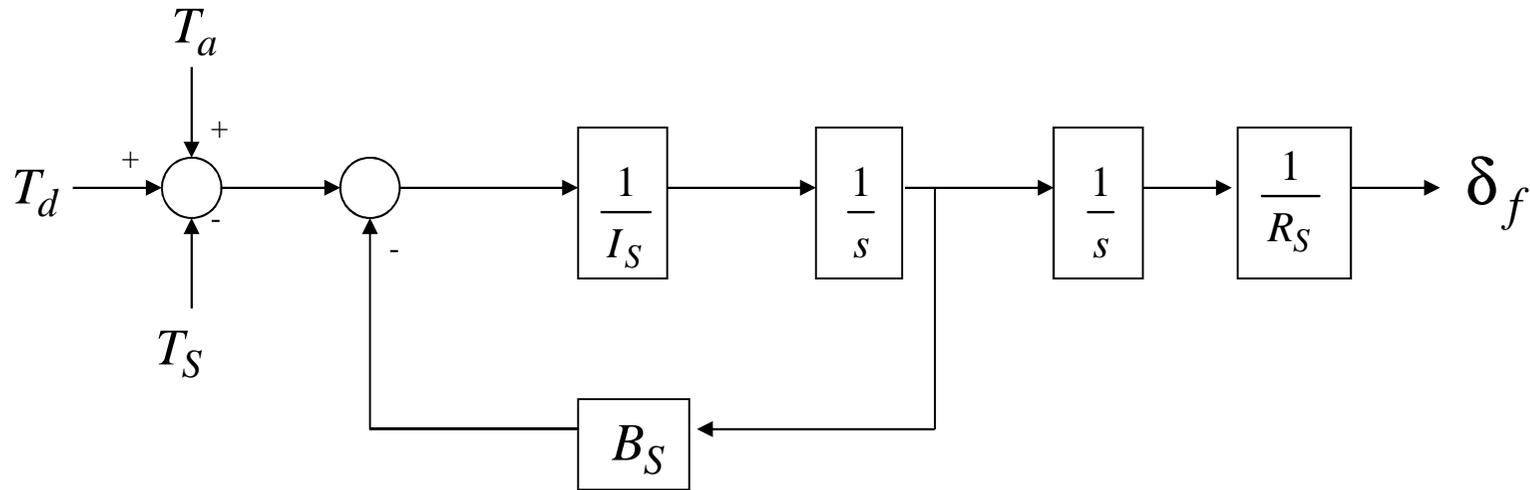
f_w : force de vent latéral

V : vitesse longitudinale

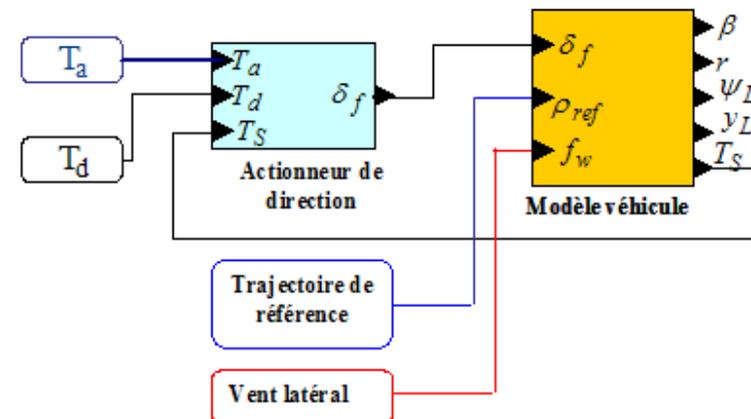
δ_f : angle de braquage des roues avant



Modélisation de la colonne de direction

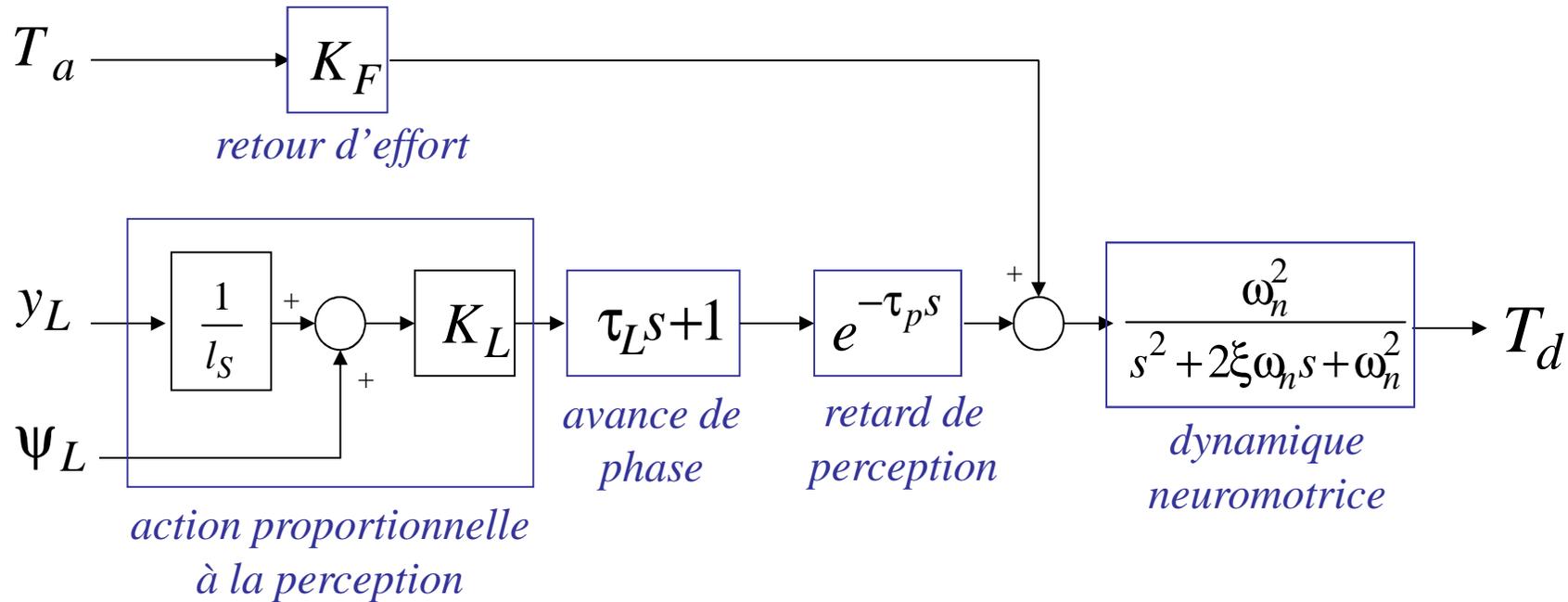


- T_a : couple d'assistance
- T_d : couple conducteur
- T_S : couple d'auto alignement
- δ_f : angle de braquage des roues



Modélisation du conducteur

[MH93],[DM00]

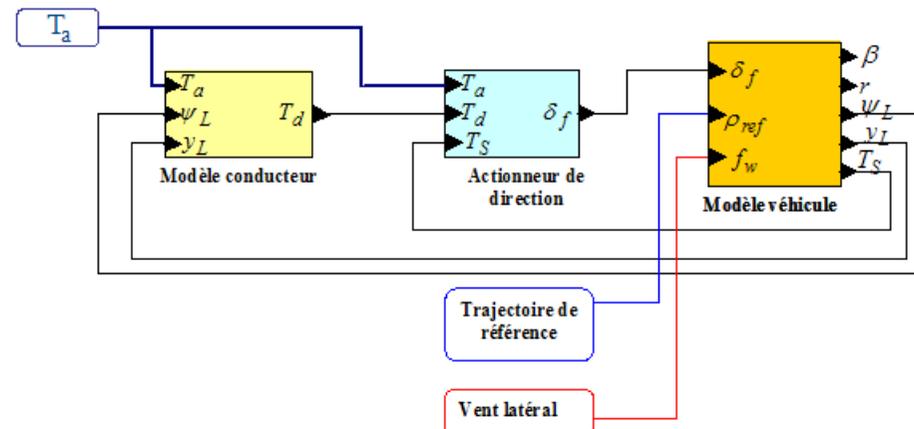


T_a : couple d'assistance

y_L : déplacement latéral

Ψ_L : erreur sur l'angle de cap

T_d : couple conducteur



Plan

- Introduction
- Modélisation véhicule, actionneur, conducteur
- **Méthodologie de commande**
- Application à l'assistance au contrôle latéral
- Analyse de robustesse de l'assistance
- Conclusion et perspectives

Méthodologie de commande

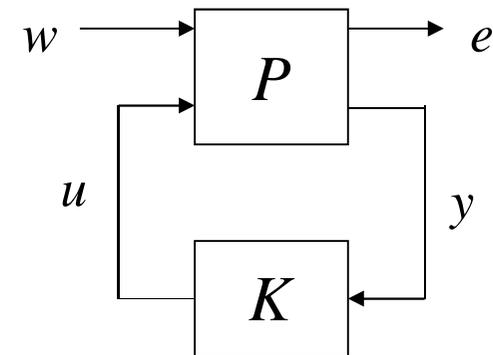
- Problématique
 - Le véhicule est un système incertain (variation de paramètres : vitesse, adhérence, masse, ...)
 - Et sujet à des perturbations extérieures (courbure de route, vent latéral)
- Exigences
 - Stabilité robuste du système bouclé face aux variations de paramètres et rejet de perturbations
 - Structure de commande permettant de faire de l'assistance à la conduite en prenant en considération **les capacités du conducteur** pour le suivi de voie
 - Construction d'un correcteur d'ordre réduit.
- Méthode envisagée
 - Modéliser les incertitudes du système
 - Utiliser les techniques d'optimisation H_∞ et LPV

Méthodologie de commande

- Principe général de la commande H_∞

Objectif : Calculer un correcteur dynamique K qui stabilise le système bouclé et tel que :

$$\|\mathbf{T}_{w \rightarrow e}\|_\infty < \gamma$$



w : entrées extérieures
 e : signaux à contrôler
 y : mesures disponibles
 u : commandes

- Méthodes de résolution du problème H_∞ standard

Résolution par les équations de Riccati

Résolution par LMI

Méthodologie de commande

- Résolution par LMI

$$\begin{bmatrix} \mathcal{N}_R & 0 \\ 0 & I_{n_w} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} AR + RA^T & RC_e^T & B_w \\ C_e R & -\gamma I_{n_e} & D_{ew} \\ B_w^T & D_{ew}^T & -\gamma I_{n_w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{N}_R & 0 \\ 0 & I_{n_w} \end{bmatrix} < 0 \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \mathcal{N}_S & 0 \\ 0 & I_{n_e} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A^T S + SA & SB_w & C_e^T \\ B_w^T S & -\gamma I_{n_w} & D_{ew}^T \\ C_e & D_{ew} & -\gamma I_{n_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{N}_S & 0 \\ 0 & I_{n_e} \end{bmatrix} < 0 \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} R & I_n \\ I_n & S \end{bmatrix} \geq 0 \quad (3)$$

$$\min_{\gamma, R=R^T, S=S^T} \gamma \text{ sous les contraintes (1), (2) et (3)}$$

\mathcal{N}_R et \mathcal{N}_S sont des bases des noyaux $[B_u^T, D_{eu}^T]$ et $[C_y, D_{yu}]$ respectivement

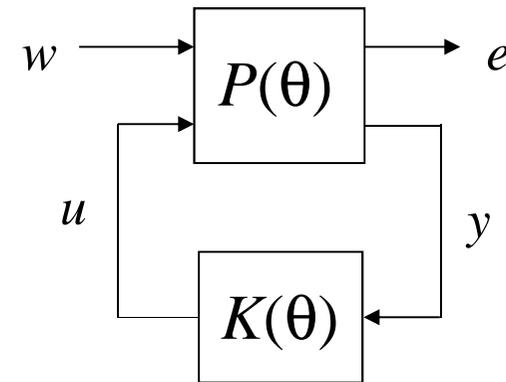
Méthodologie de commande

- Généralités sur le séquençement de gain
 - **Problématique :**
 - Systèmes à dynamique fortement variable selon l'état de fonctionnement.
 - Exemple : aéronautique, automobile,...
 - Un seul correcteur ne suffit pas pour garantir de bonnes performances sur l'ensemble du domaine
 - **Le principe est d'utiliser une structure fixe de correction en adaptant les paramètres en fonction des grandeurs mesurables**
 - Problèmes : comment passer d'un correcteur à un autre ? Comment garantir la stabilité du système ?
 - **Plusieurs approches**
 - Techniques d'interpolation
 - Techniques LPV

Méthodologie de commande

- Système Linéaire à Paramètres Variants :

système LPV = système linéaire
dont les coefficients dépendent d'un
vecteur $\theta(t)$ mesuré en temps réel



w : entrées extérieures
 e : signaux à contrôler
 y : mesures disponibles
 u : commandes

Objectif : Calculer un correcteur dynamique $K(\theta)$ stabilisant le système bouclé et tel que :

$$\sup_{w(t) \in L_2} \frac{\|e\|_2}{\|w\|_2} < \gamma$$

Méthodologie de commande

◇ Synthèse de correcteur H_∞ -LPV par approche polytopique

- Cas envisagé : $P(\theta)$ linéaire en θ
chaque composante $\theta_i \in [\underline{\theta}_i ; \bar{\theta}_i]$

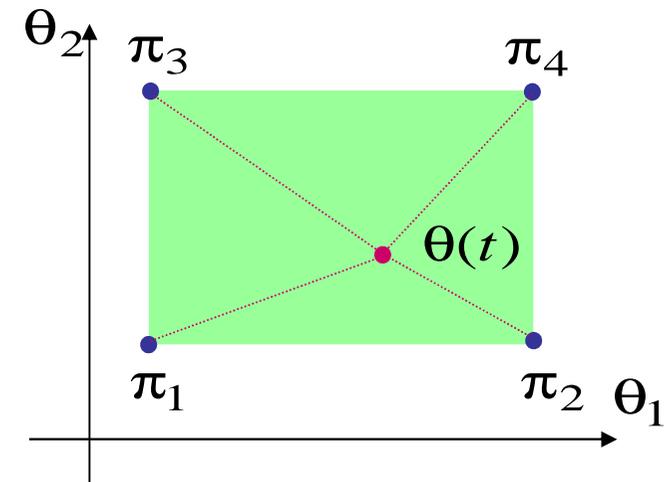
$$\Rightarrow \begin{cases} \theta(t) = \sum \alpha_i(t) \pi_i & / \quad \sum \alpha_i(t) = 1 \\ P(\theta(t)) = \sum \alpha_i(t) P(\pi_i) \end{cases}$$

- Correcteur solution :

$$K(\theta(t)) = \sum \alpha_i(t) K(\pi_i)$$

- Recherche des $K(\pi_i)$:

- ensemble de problèmes H_∞ couplés (1 pour chaque sommet)
- résolution d'un problème de minimisation sous contraintes d'inégalités matricielles linéaires (LMI)



Méthodologie de commande

◇ Synthèse de correcteur H_∞ -LPV avec contrainte d'ordre

Le problème de synthèse consiste à résoudre le système LMI et la contrainte de rang suivants :

$$\begin{bmatrix} \mathfrak{N}_R & 0 \\ 0 & I_{n_w} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A(\pi_i)R + RA(\pi_i)^T & RC_e(\pi_i)^T & B_w(\pi_i) \\ C_e(\pi_i)R & -\gamma I_{n_e} & D_{ew}(\pi_i) \\ B_w(\pi_i)^T & D_{ew}(\pi_i)^T & -\gamma I_{n_w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathfrak{N}_R & 0 \\ 0 & I_{n_w} \end{bmatrix} < 0 \quad i=1, \dots, 2^{\dim(\theta)}$$

$$\begin{bmatrix} \mathfrak{N}_S & 0 \\ 0 & I_{n_e} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A(\pi_i)^T S + SA(\pi_i) & SB_w(\pi_i) & C_e^T(\pi_i) \\ B_w(\pi_i)^T S & -\gamma I_{n_w} & D_{ew}(\pi_i)^T \\ C_e(\pi_i) & D_{ew}(\pi_i) & -\gamma I_{n_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathfrak{N}_S & 0 \\ 0 & I_{n_e} \end{bmatrix} < 0 \quad i=1, \dots, 2^{\dim(\theta)}$$

$$\begin{bmatrix} R & I_n \\ I_n & S \end{bmatrix} \geq 0$$

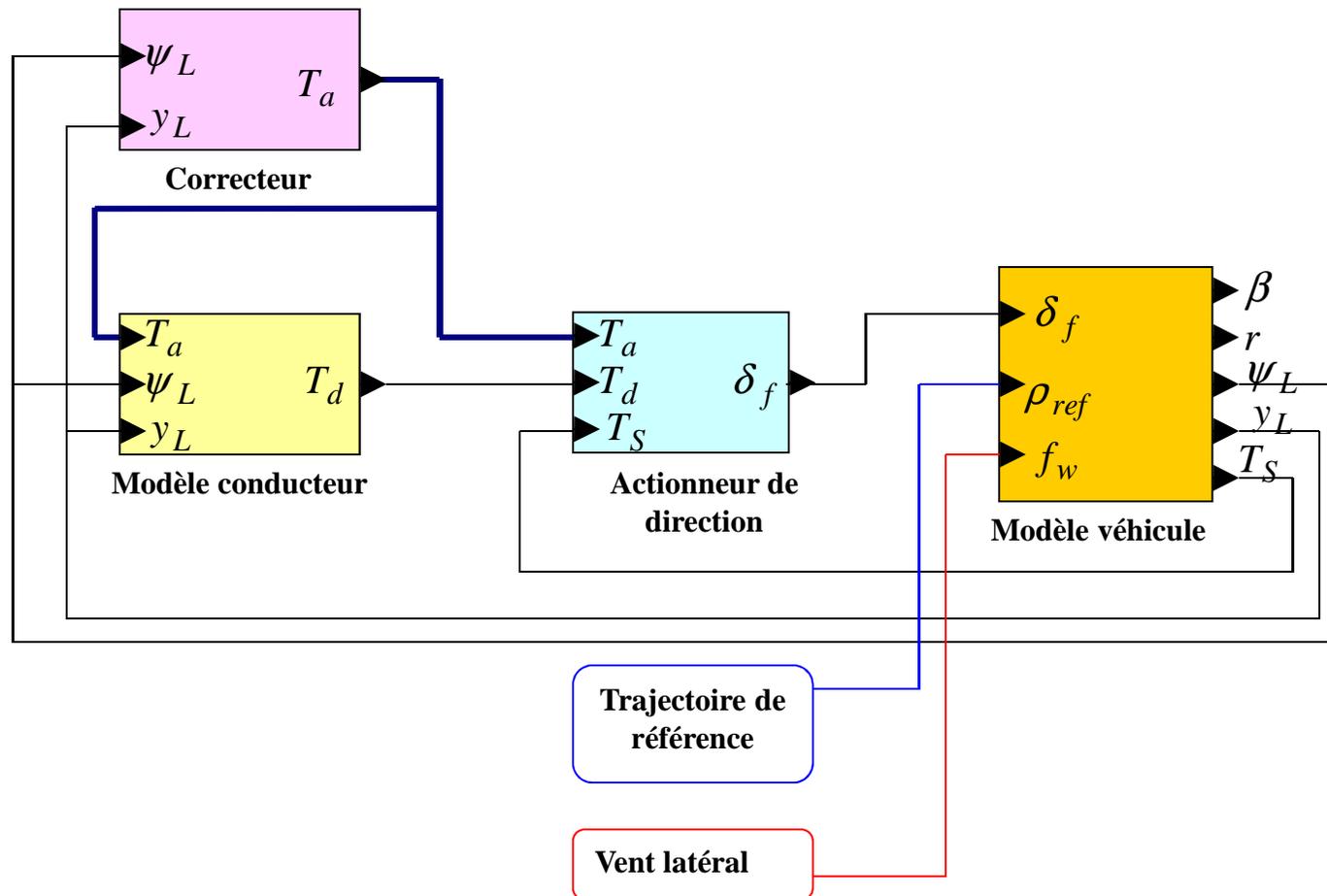
$$\text{rang} \begin{bmatrix} R & I_n \\ I_n & S \end{bmatrix} \leq n + r \Leftrightarrow \text{rang}(RS - I_n) \leq r$$

Algorithme de la Trace

Plan

- Introduction
- Modélisation véhicule, actionneur, conducteur
- Méthodologie de commande
- **Application à l'assistance au contrôle latéral**
 - vitesse longitudinale constante
 - vitesse longitudinale variable
- Analyse de robustesse de l'assistance
- Conclusion et perspectives

Stratégie de commande choisie : vitesse longitudinale constante



Objectifs de commande

- Pour les manœuvres principales, en ligne droite et en courbe, de :
 - maintien de voie
 - changement de voie

Déplacement latéral	< 20 cm
Erreur sur l'angle de Cap	< 0,01 radian
Accélération latérale	< 0,2 g
Amplitude de T_a	< 10 N.m

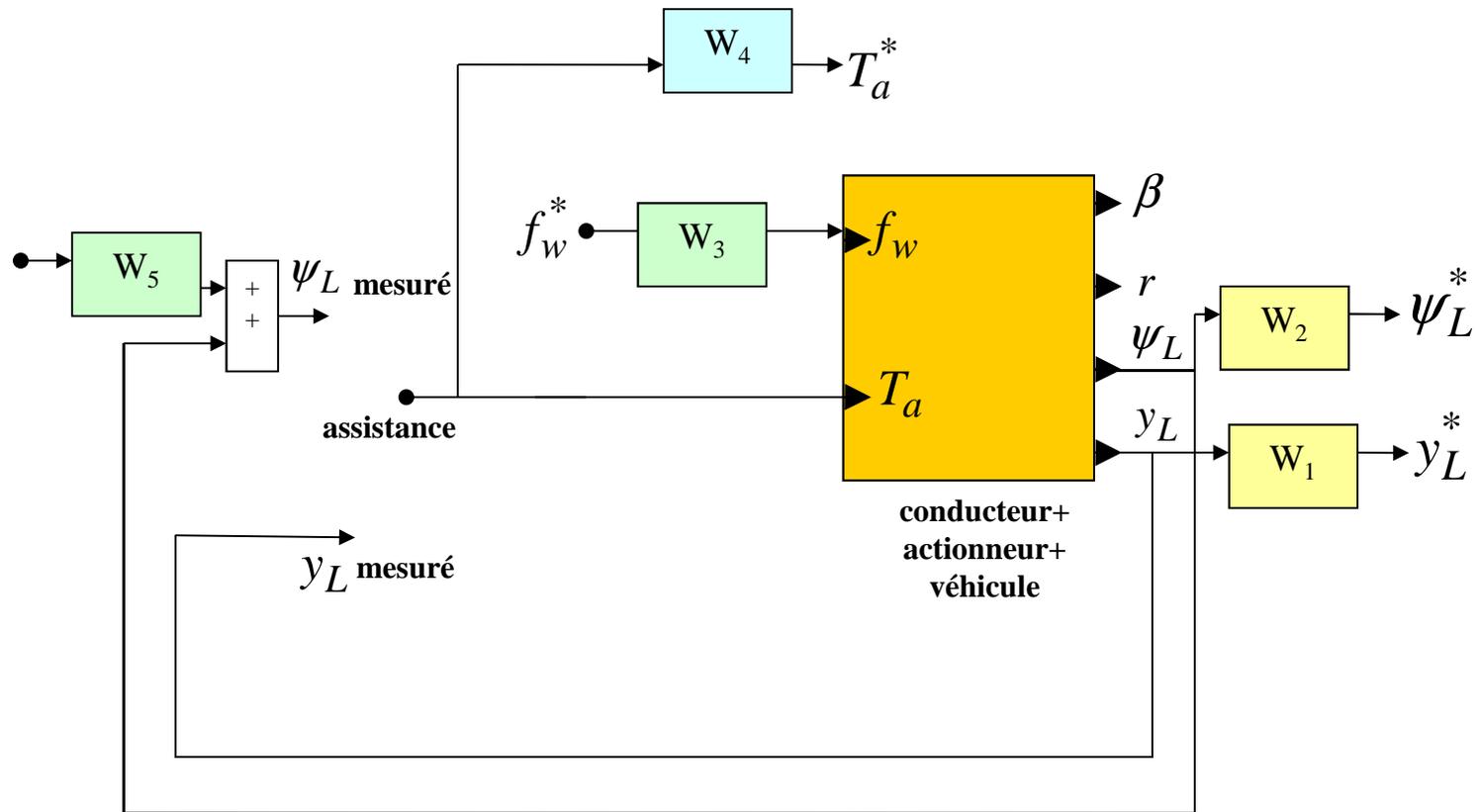
- Certains paramètres sont incertains :

Adhérence des pneumatiques, caractéristiques du conducteur, masse,...

⇒ Problème de **stabilisation robuste** par rapport aux variations de paramètres et de **rejet de perturbations**

Application à l'assistance au contrôle latéral: Schéma de Synthèse

Synthèse H_∞ d'un correcteur à 2 entrées (y_L, ψ_L)
pour $V = 10 \text{ m.s}^{-1}$ (vitesse longitudinale) et $\nu = 0,8$ (adhérence)



Choix des filtres de Pondération

$W_i(s)$: filtre du premier ordre paramétré par G_0 : gain statique
 G_∞ : gain HF
 ω_0 : pulsation à 0 dB

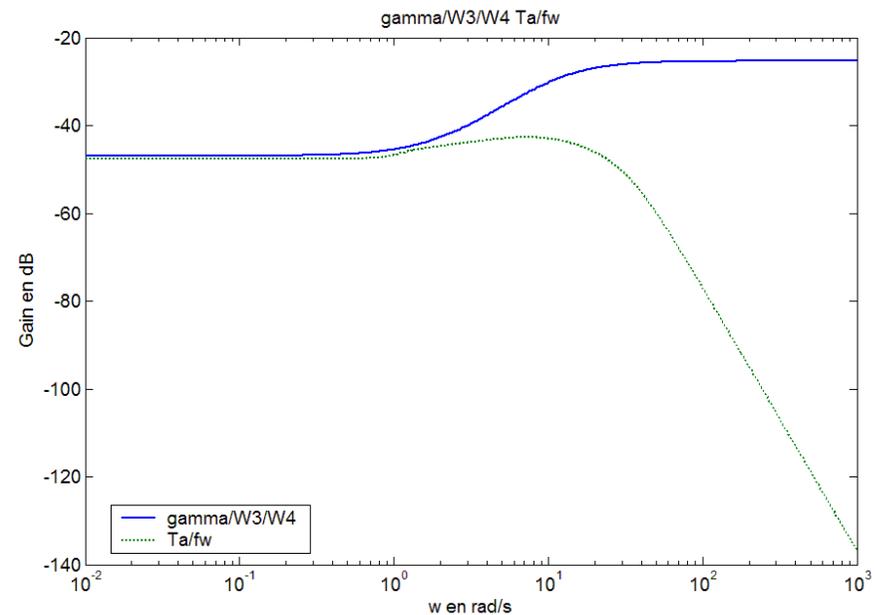
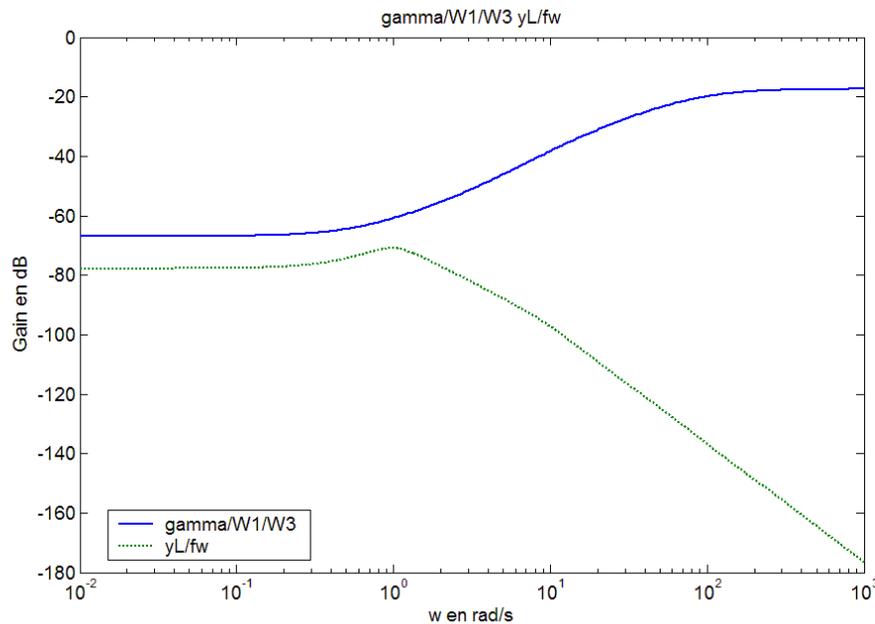
$$W_i(s) = \frac{G_\infty \sqrt{|G_0^2 - 1|} s + G_0 \omega_0 \sqrt{|G_\infty^2 - 1|}}{\sqrt{|G_0^2 - 1|} s + \omega_0 \sqrt{|G_\infty^2 - 1|}}$$

	Objectif	Réalisation
W₁	Contrôle y_L	$G_0 \gg 1$
W₂	Limite Ψ_L	$G_0 = G_\infty = cst$
W₃	Prend en compte f_w et privilégie les basses fréquences	$G_0 > G_\infty$
W₄	Pénalise les basses fréquences	$G_0 \gg G_\infty$
W₅	Pondère les contributions des 2 mesures y_L et Ψ_L	$G_0 = G_\infty = cst$

$\Rightarrow \gamma_{opt} = 2,7 \quad \text{deg}(\mathbf{K}) = 13$, réduit a posteriori à l'ordre 4

Allure fréquentielle du système augmenté

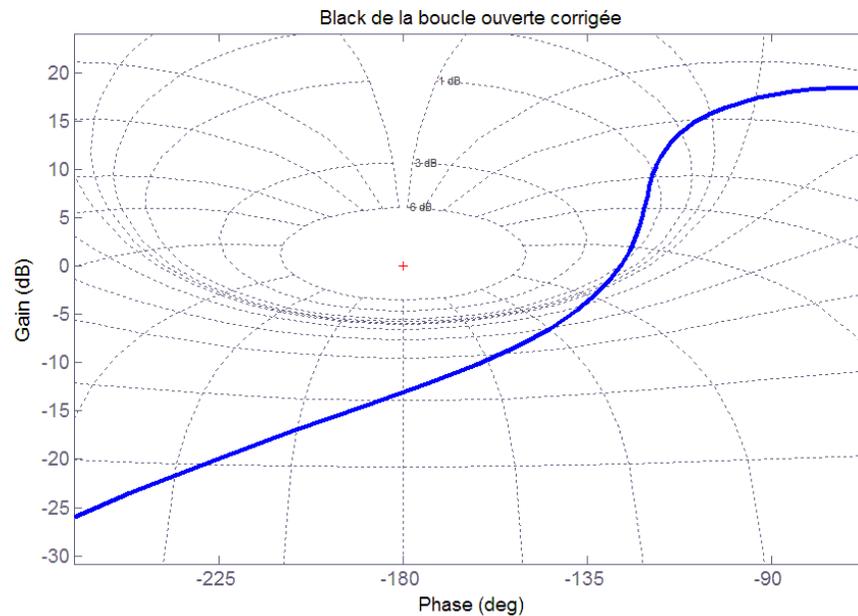
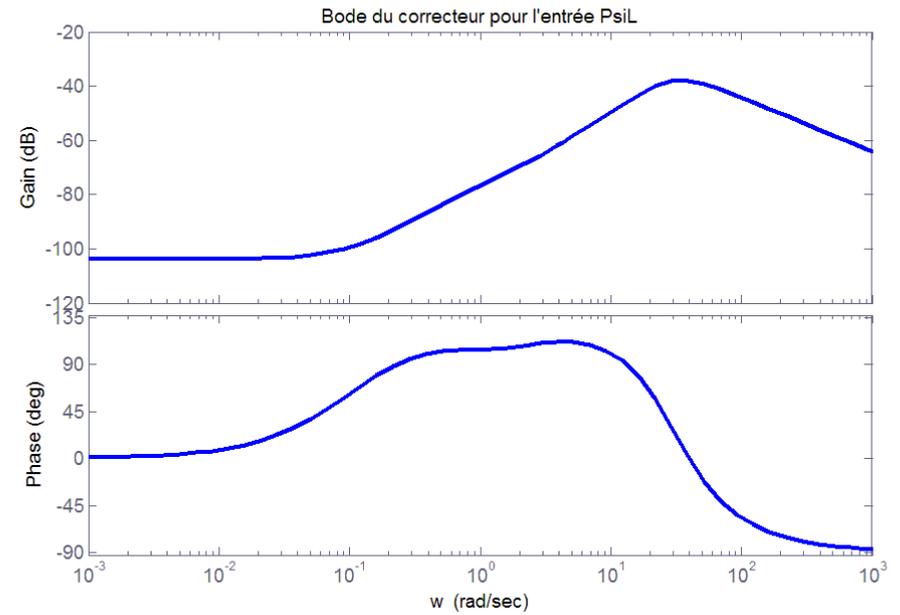
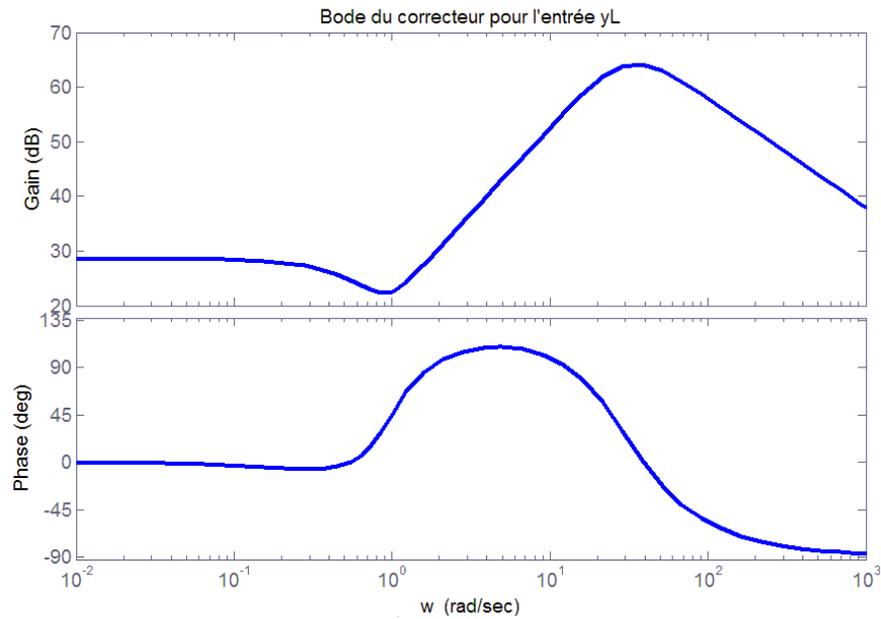
- Diagrammes de Bode des transferts: $\left| \frac{y_L}{f_w} \right|$ et $\left| \frac{T_a}{f_w} \right|$



Faibles Gains aux basses fréquences
⇒ Conforme aux exigences du contrôle partagé

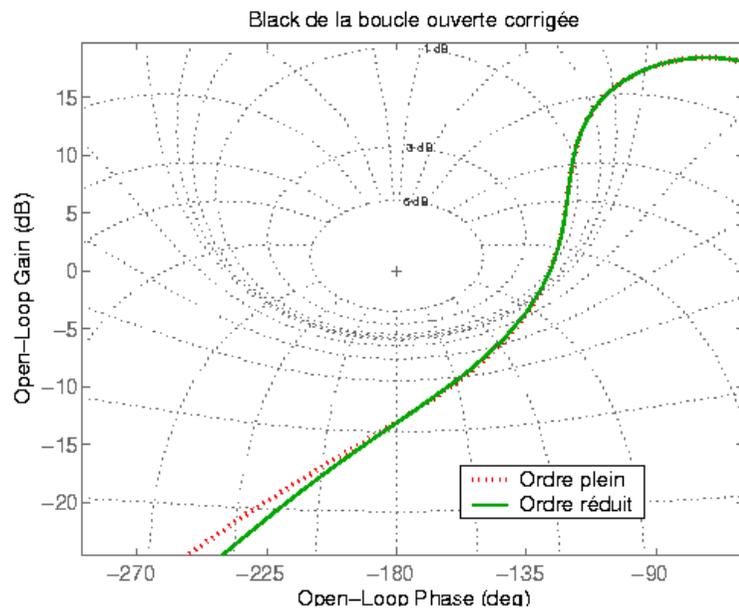
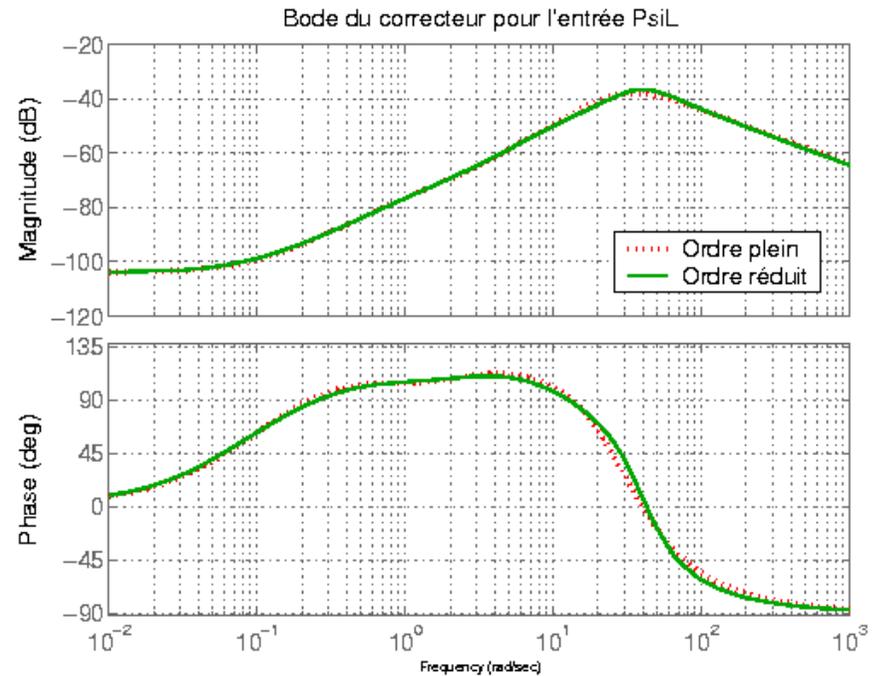
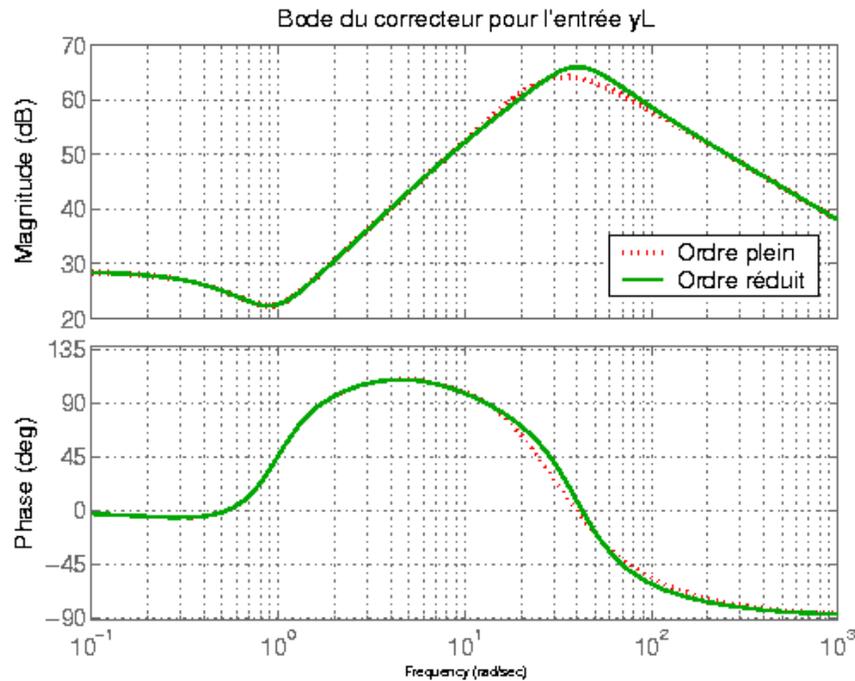
Le conducteur manœuvre **seul** son véhicule aux basses fréquences

Analyse fréquentielle



$$\begin{cases} MG = 15\text{dB} \\ M\Phi = 55^\circ \end{cases}$$

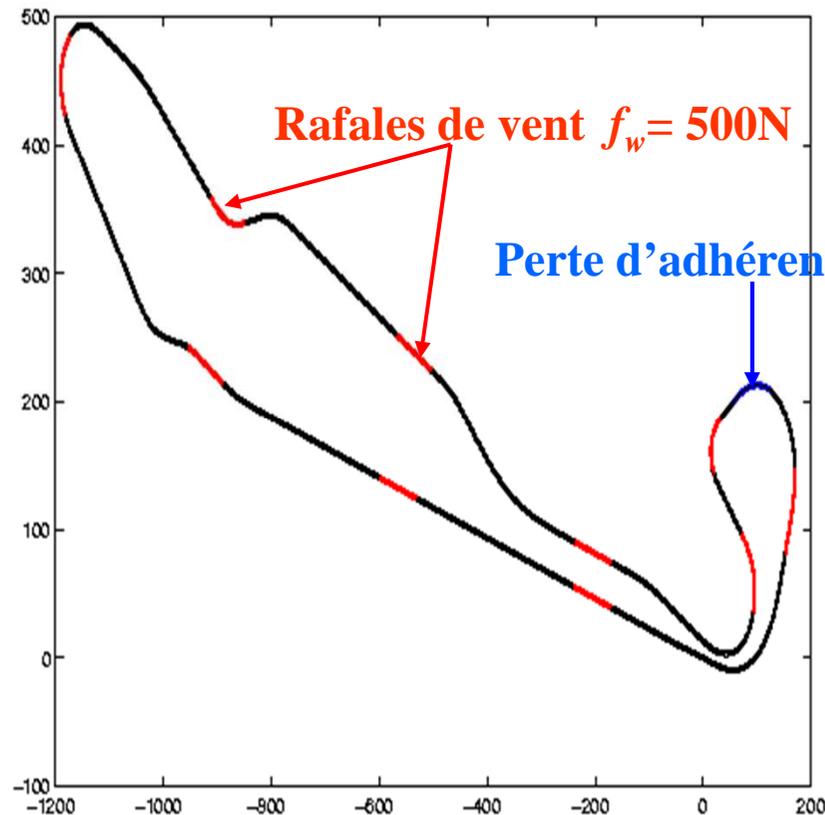
Analyse fréquentielle du correcteur réduit



Le correcteur réduit par troncature des valeurs singulières de Hankel est de degré 4

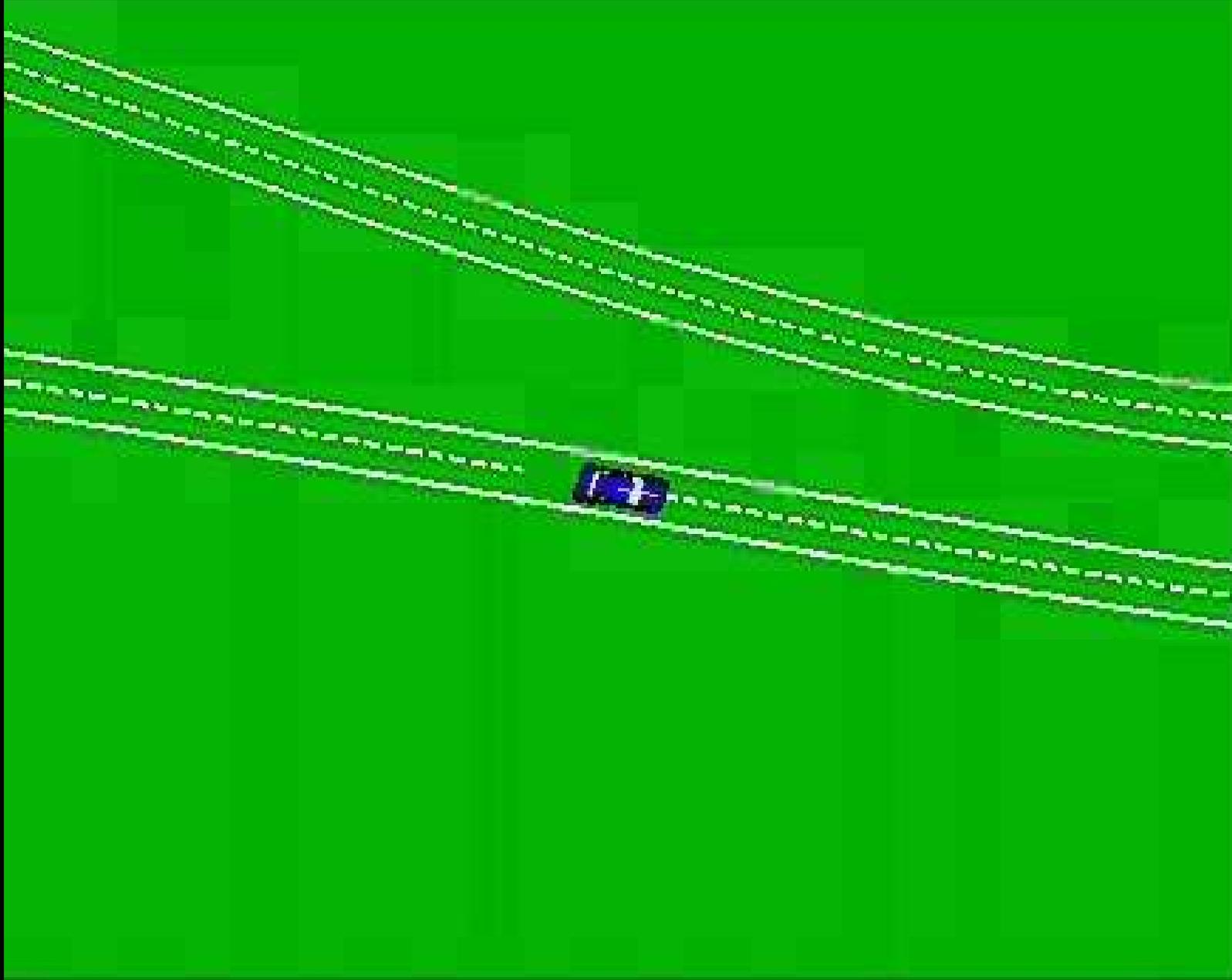
Simulations temporelles

Comportement de l'assistance en présence d'un **vent latéral** et en situation de **perte d'adhérence** sur piste d'essai cartographiée

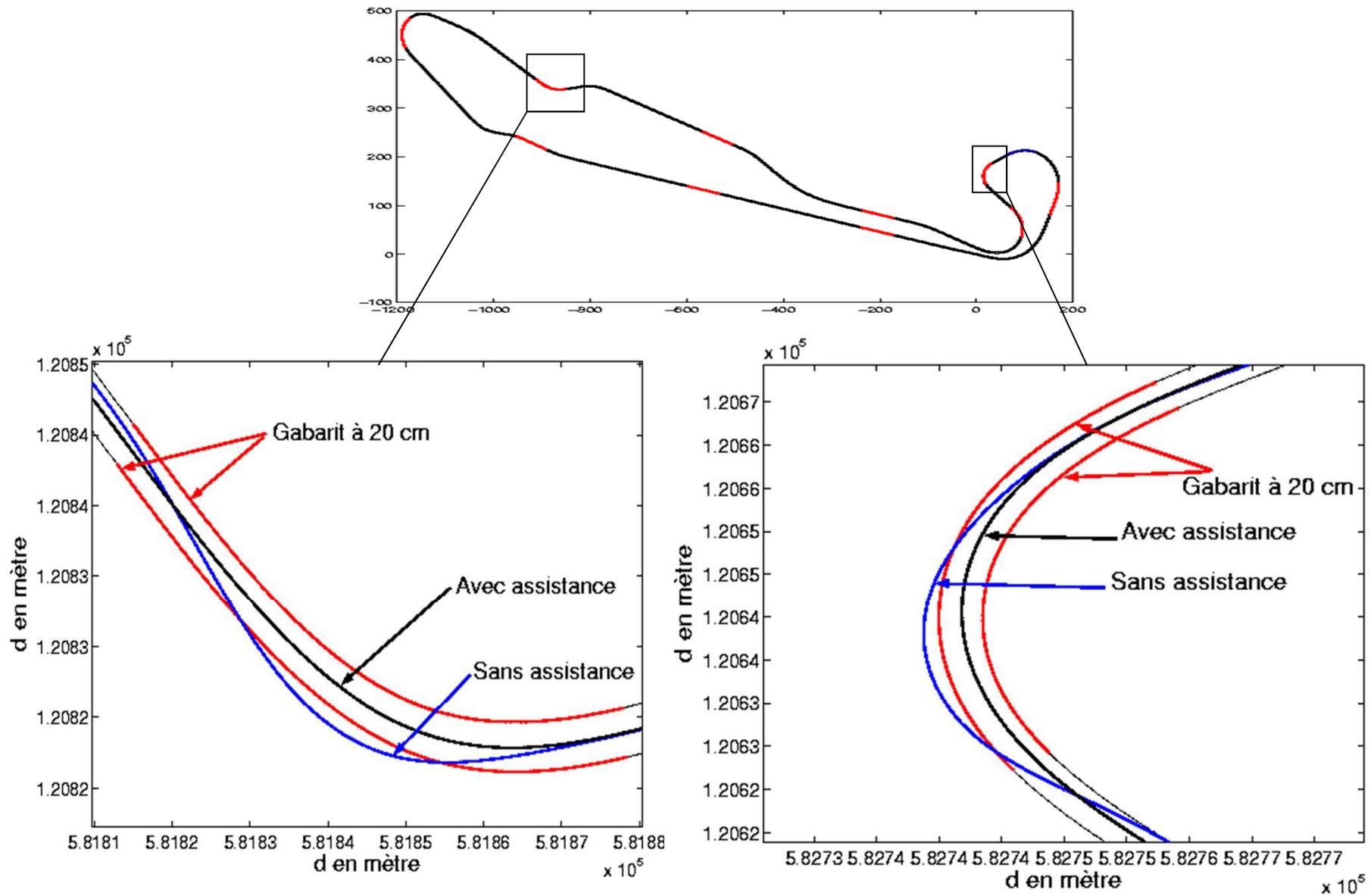


- Caractéristiques de la piste d'essai
 - localisation : Satory
 - digitalisation centimétrique
 - courbures très marquées
 - dynamique latérale fortement sollicitée
- Utilisation des modèles
 - générateur de trajectoire de référence : le **modèle bicyclette linéaire**
 - approximation précise du véhicule réel : le **modèle 4 roues**

Etude de l'interaction **conducteur/assistance**



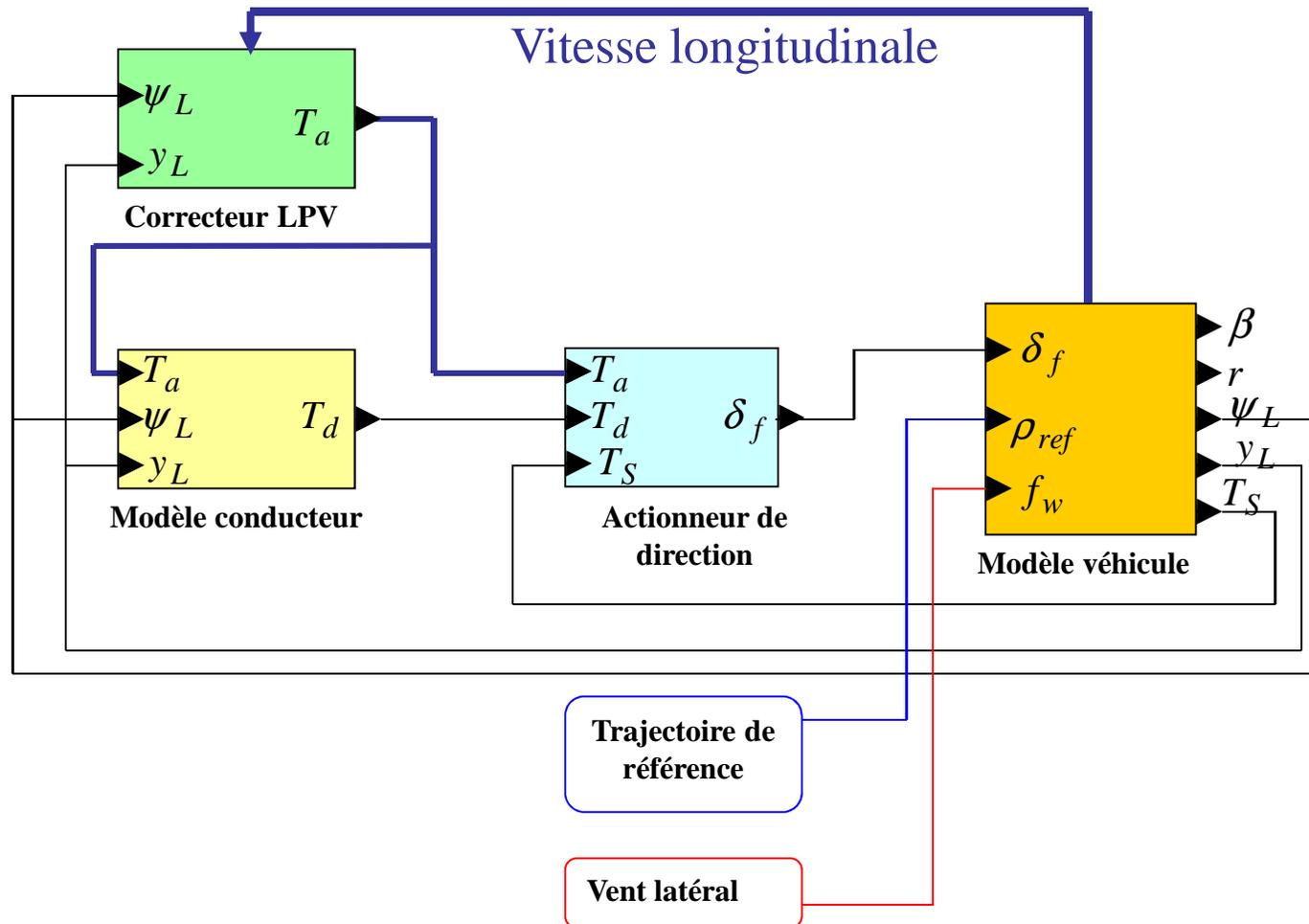
Comportement de l'assistance aux points critiques



Plan

- Introduction
- Modélisation véhicule, actionneur, conducteur
- Méthodologie de commande
- **Application à l'assistance au contrôle latéral**
 - vitesse longitudinale constante
 - **vitesse longitudinale variable**
- Analyse de robustesse de l'assistance
- Conclusion et perspectives

Assistance au contrôle latéral : correcteur séquencé par la vitesse longitudinale



Construction du correcteur LPV d'ordre plein

- Mise en œuvre :
 - la plupart des coefficients de $P(\theta)$ sont en $1/V$
 - les autres sont constants ou en $1/V^2$

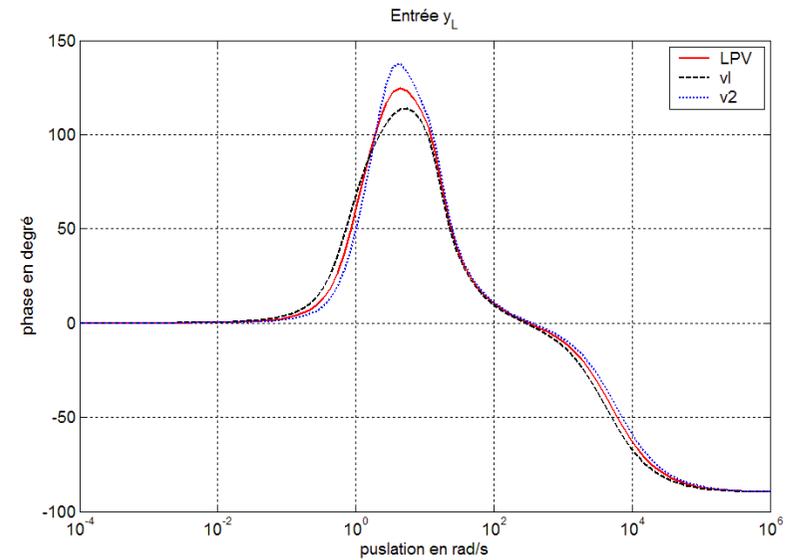
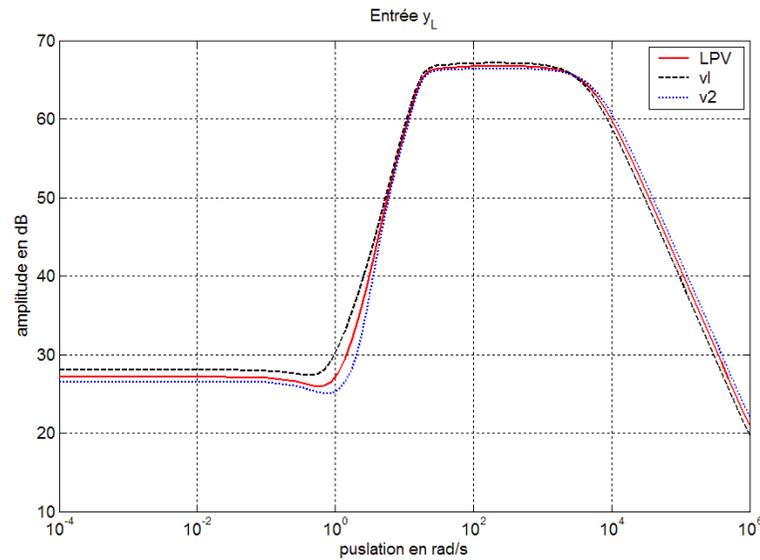
$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{1}{V(t)} = W_0 + W_1 \delta(t) \quad ; \quad \delta(t) \in [-1; +1] \\ \text{DL au 1er ordre des termes en } V \text{ et } 1/V^2 \end{cases}$$

- Sommets choisis : $V_1 = 10 \text{ m/s}$; $V_2 = 20 \text{ m/s}$

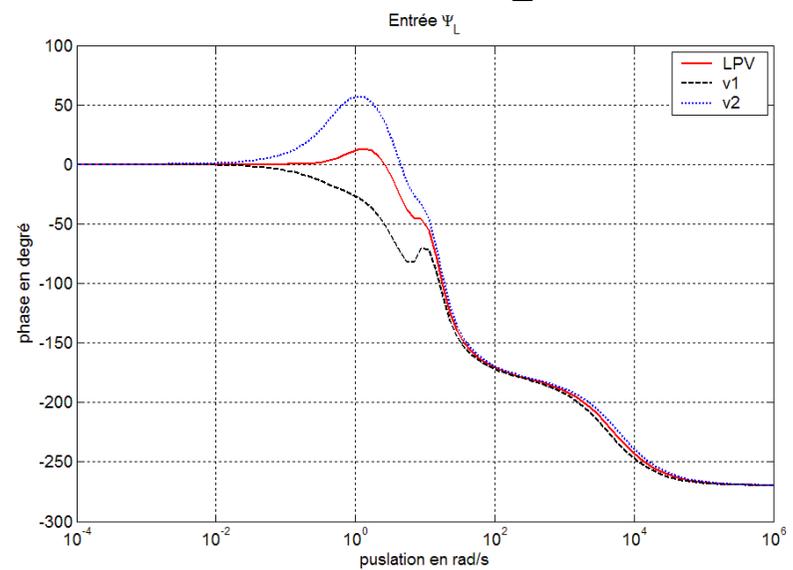
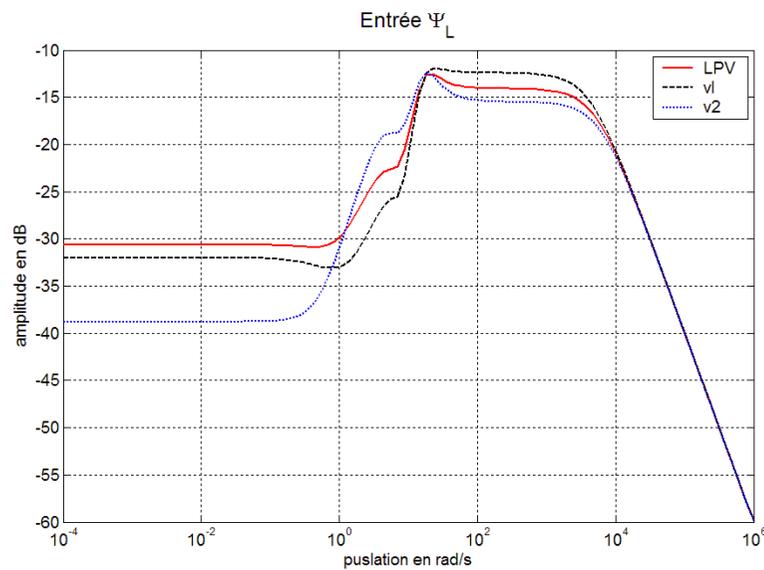
$$\Rightarrow \begin{cases} K(\theta(t)) = \frac{1 + \delta(t)}{2} K(V_1) + \frac{1 - \delta(t)}{2} K(V_2) \\ \delta(t) = \frac{1/V(t) - W_0}{W_1} \end{cases}$$

Analyse fréquentielle

$$v_1 = 10\text{m/s} \quad v_2 = 20\text{m/s} \quad \text{et} \quad \nu = 0,8$$

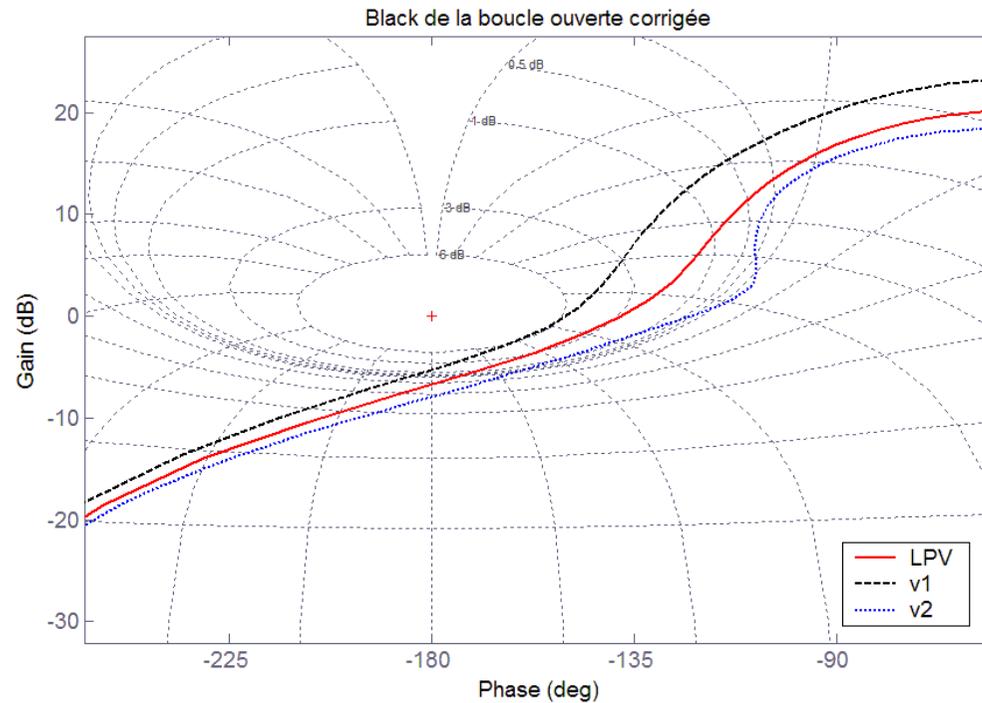


Diagrammes de Bode du correcteur pour l'entrée y_L



Diagrammes de Bode du correcteur pour l'entrée Ψ_L

Analyse fréquentielle

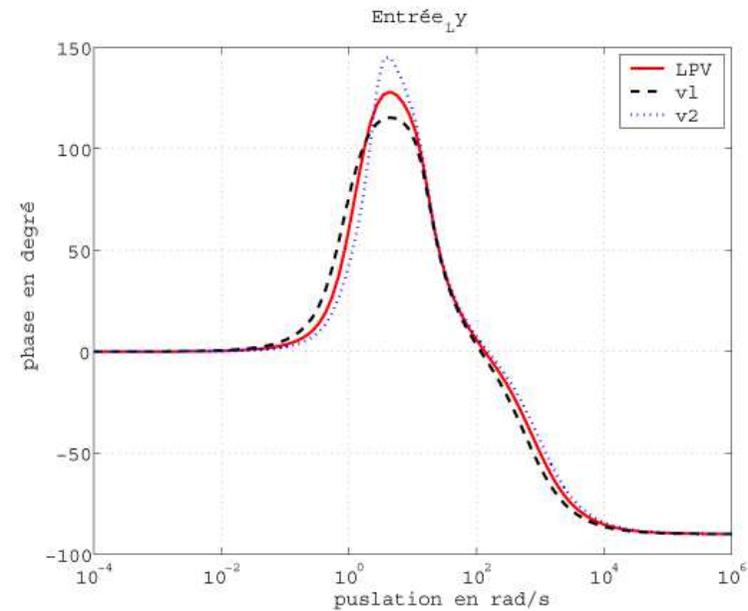
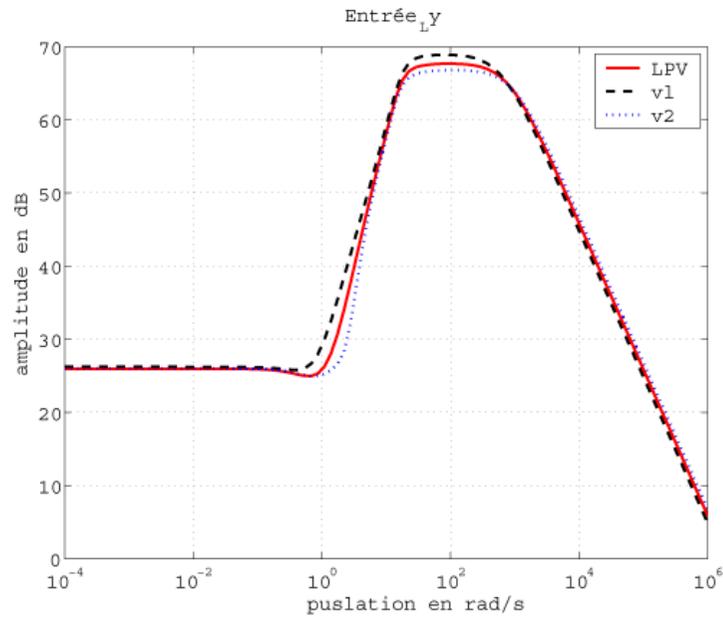


Conclusion

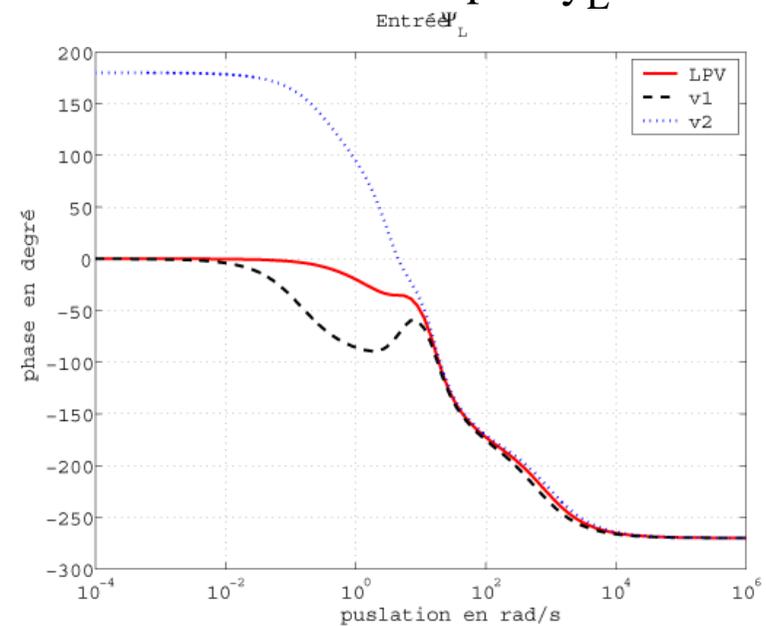
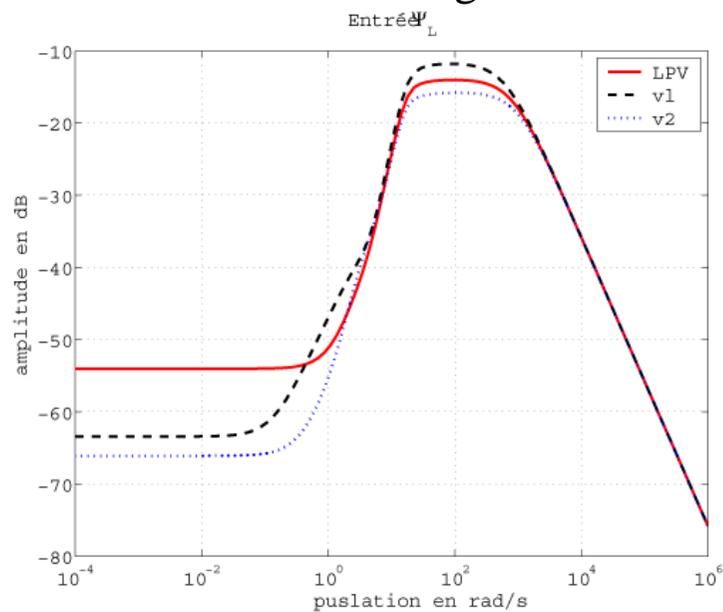
- La réponse du correcteur évolue **très régulièrement** entre les 2 sommets

⇒ Vers une synthèse LPV **avec contrainte d'ordre**

Construction du correcteur LPV avec contrainte d'ordre



Diagrammes de Bode du correcteur LPV réduit pour y_L



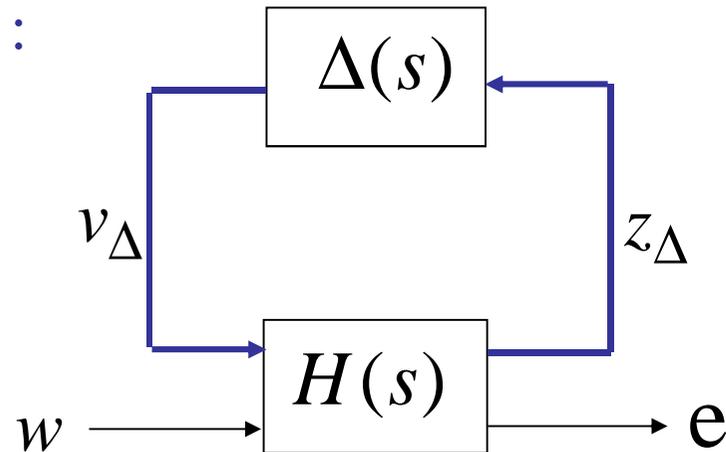
Diagrammes de Bode du correcteur LPV réduit pour ψ_L

Plan

- Introduction
- Modélisation véhicule, actionneur, conducteur
- Méthodologie de commande
- Application à l'assistance au contrôle latéral
 - vitesse longitudinale constante
 - vitesse longitudinale variable
- **Analyse de robustesse de l'assistance**
- Conclusion et perspectives

Analyse de robustesse de l'assistance

- Schéma d'analyse :



$\Delta(s)$: contient les incertitudes

$H(s)$: matrice de transfert du système commandé

v_Δ, z_Δ : signaux faisant intervenir les incertitudes

w : entrées

e : sorties

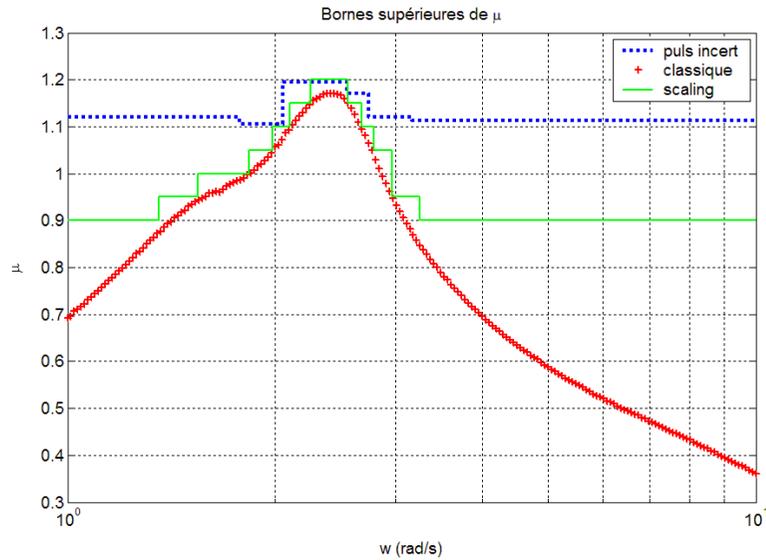
Analyse de robustesse de l'assistance

- Trois méthodes sont utilisées :
 - Echantillonnage en fréquence
 - ν -analyse
 - Scaling en fréquence

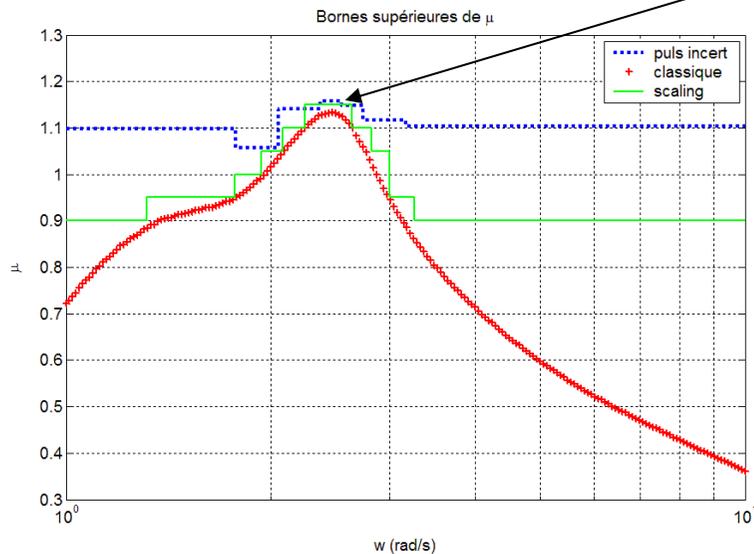
} évitent l'échantillonnage en fréquence
- Trois correcteurs réduits sont testés :
 - Réduction par agrégation
 - Réduction par troncature des v.s de Hankel
 - Synthèse par minimisation de la trace
- Paramètres nominaux du véhicule et leurs variations

Paramètres du véhicule	Valeurs nominales	Variations des paramètres
ν	0,65	[0,3;1]
V	10 m/s	[8;12](m/s)
m	1500 kg	[1350;1650](kg)

Analyse des correcteurs réduits *a posteriori* en boucle ouverte



$\bar{\mu}$ pour la réduction par agrégation



$$\bar{\mu} = 1,16$$

Le système bouclé est **stable** si :

$$\|\Delta(s)\|_{\infty} < 1/1,16 = 0,86$$

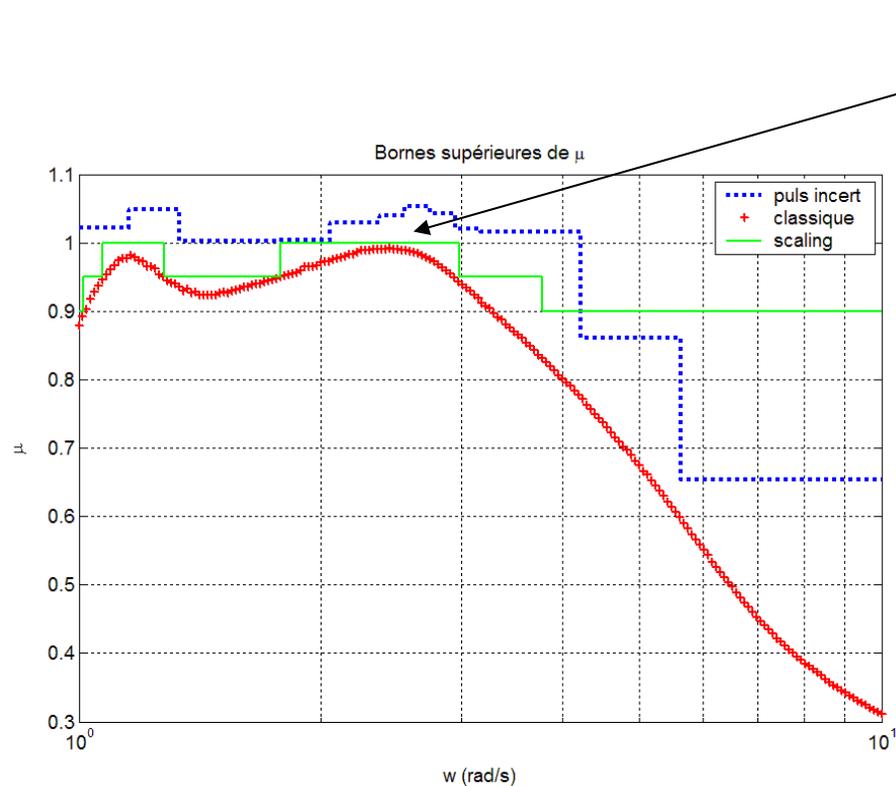
Les intervalles admissibles dans lesquels

La stabilité est **garantie** sont :

$$\begin{cases} v \in [0,34;0,95] \\ V \in [8,1;11,6](\text{m/s}) \\ m \in [1368;1625](\text{kg}) \end{cases}$$

$\bar{\mu}$ pour la réduction par troncature des v.s de Hankel

Analyse d'un correcteur synthétisé par l'algorithme de la Trace



$$\bar{\mu} = 1$$

Le système bouclé est **stable** si :

$$\|\Delta(s)\|_{\infty} < 1$$

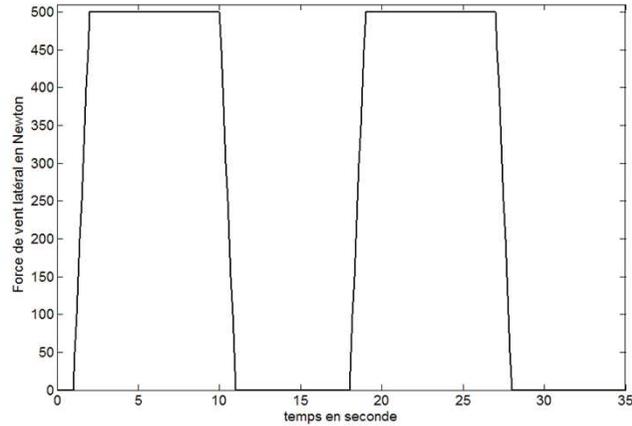
Les intervalles admissibles dans lesquels
La stabilité est **garantie** sont :

$$\begin{cases} v \in [0, 3; 1] \\ V \in [8; 12](\text{m/s}) \\ m \in [1350; 1650](\text{kg}) \end{cases}$$

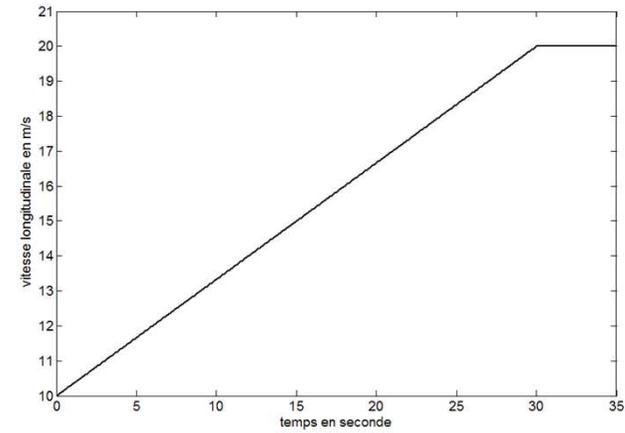
Conclusion

La robustesse de la stabilité déduite de l'analyse est satisfaisante

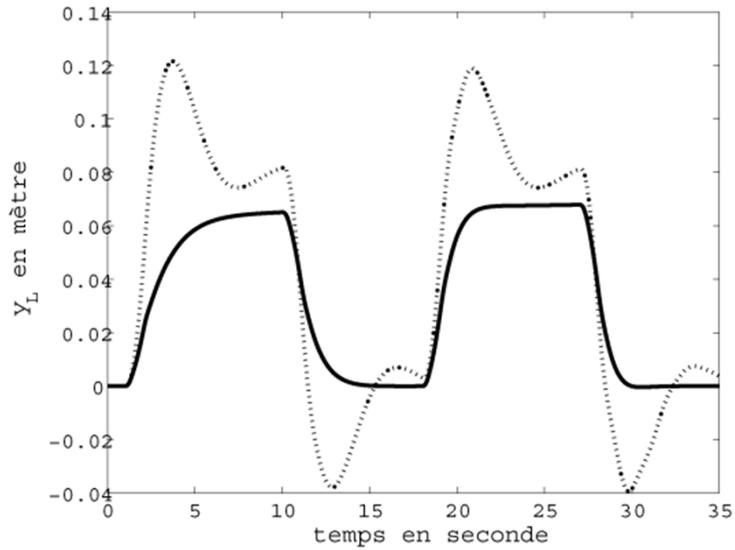
Comparaison des stratégies H_∞ et LPV



Rafales de vent $f_w = 500\text{N}$

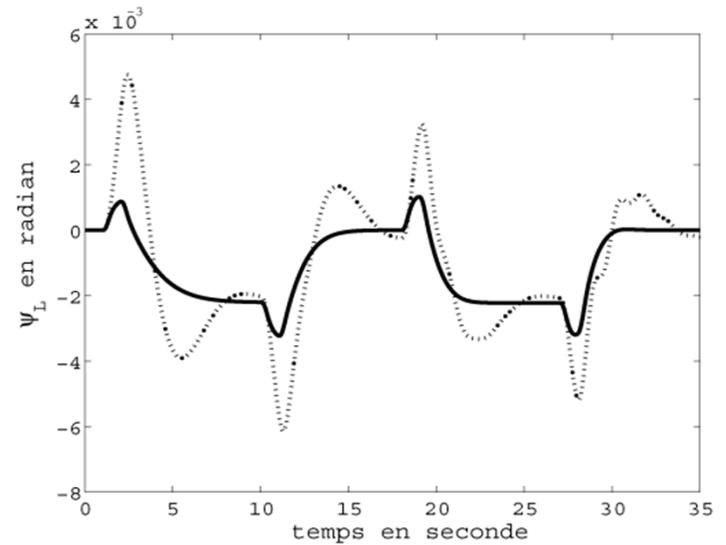


Profil de vitesse



Déplacement latéral y_L

$$y_L < 7\text{cm}$$

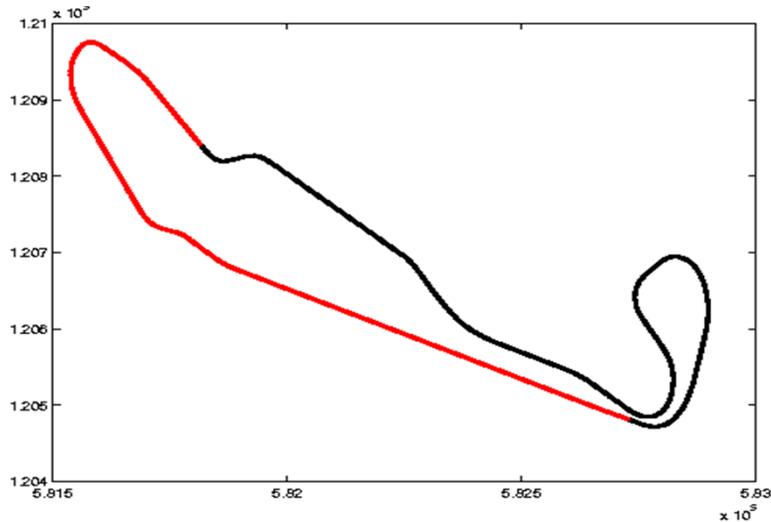
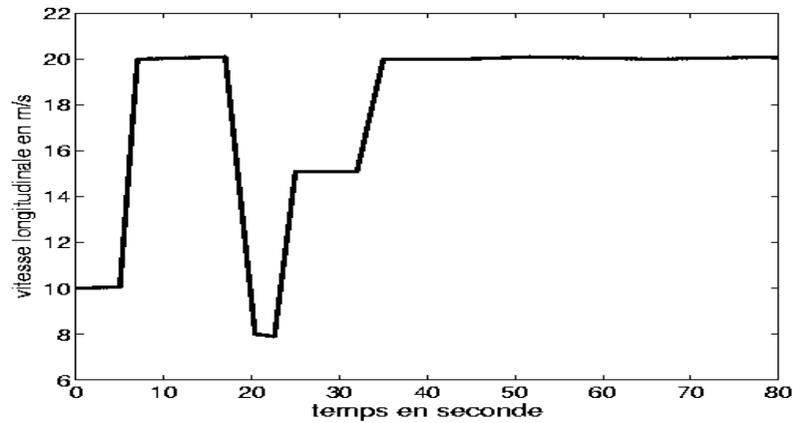


Erreur sur l'angle de cap ψ_L

$$\psi_L < 0,003\text{radian}$$

Application du correcteur séquencé

Comportement de l'assistance en présence de rafales de vents sur la piste d'essai cartographiée de Satory





Plan

- Introduction
- Modélisation véhicule, actionneur, conducteur
- Méthodologie de commande
- Application à l'assistance au contrôle latéral
 - vitesse longitudinale constante
 - vitesse longitudinale variable
- Analyse de robustesse de l'assistance
- Conclusion et perspectives

Conclusion et Perspectives

- Conclusion

- L'ensemble des simulations satisfait les spécifications de **performances** et de **robustesse** requises faces aux **variations paramétriques** (masse, adhérence, vitesse longitudinale,...) et aux **perturbations extérieures** (rafales).
- Le séquençement de gain améliore les résultats
- Le développement de ces stratégies d'assistance au contrôle latéral fournit des résultats très prometteurs

- Perspectives

- Implantation sur un banc de test reproduisant l'équipement d'une Peugeot 307 des commandes H_∞ et LPV.
- Couplage d'une action sur l'angle braquage et sur le freinage.
- Application de la généralisation de l'approche polytopique à la méthode proposée par [Pac94] et [AG95].
- Développement d'une méthodologie d'interpolation de correcteurs LPV réduits