

Modélisation du conducteur pour le contrôle de la trajectoire d'un véhicule automobile

Chouki SENTOUH¹, Philippe CHEVREL², Franck MARS², Fabien CLAVEAU²

¹Univ Lille Nord de France, F-59000 Lille, France
UVHC, LAMIH, CNRS, UMR 8530, F-59313 Valenciennes, France
Chouki.Sentouh@univ-valenciennes.fr

²IRCCyN : Ecole Centrale de Nantes UMR CNRS 6597
1, rue de la Noë - P.B. 92101 -F-44321 Nantes Cedex 3, France.
Philippe.Chevrel@emn.fr, franck.mars@irccyn.ec-nantes.fr

Résumé—Le travail décrit dans ce papier propose un modèle cybernétique du conducteur pour le contrôle de la trajectoire d'un véhicule automobile, qui intègre explicitement la dynamique neuromotrice. Le modèle conducteur proposé prend en compte l'aspect visuel et retour d'effort en considérant le comportement anticipatoire et compensatoire du conducteur. Les paramètres inconnus du modèle sont identifiés en utilisant un concept d'identification "boîte grise", ainsi à partir des trajectoires de véhicule simulées, le système conducteur-véhicule est analysé par rapport aux variations paramétriques. Les résultats de simulation présentés à la fin de l'article montrent bien que le modèle développé peut être paramétré pour représenter différents styles de conduite.

Mots-clés—Modélisation du conducteur, interaction conducteur/véhicule, coopération Homme-Machine, contrôle de trajectoire, système neuromusculaire, identification paramétrique.

I. INTRODUCTION

Afin d'étudier le comportement dynamique d'un véhicule automobile et de tester les performances dynamiques en situations critiques de conduite, il est nécessaire d'utiliser un modèle de conducteur qui décrit convenablement son comportement de conduite. Ainsi, les futures générations d'assistances à la conduite automobile doivent être développées pour assurer une intervention lissée de l'automate en continu, tout en gardant le conducteur aux commandes sans générer d'interférences négatives [15], [16]. Cet objectif ne peut pas être atteint sans intégrer, dans la démarche de conception, un modèle du conducteur permettant d'effectuer des prédictions valides sur le comportement de celui-ci. La modélisation du conducteur représente donc un élément central afin de maintenir un référentiel commun d'analyse de la situation entre les deux partenaires (coopération conducteur-assistance), de régler l'intervention de l'automate sur l'action du conducteur ou de s'inspirer de la façon de faire du conducteur pour concevoir l'automate.

Il existe plusieurs modèles, dans la littérature, décrivant le comportement du conducteur pour le contrôle de la trajectoire [1], [3], [5], [8], [9]. Les premiers modèles représentaient juste le comportement compensatoire et ne modélisaient pas le comportement anticipatoire du conducteur [8], [13]. Hess & Modjtahedzadeh dans [6] proposent un modèle conducteur qui prend en entrée l'erreur de l'écart latéral par rapport au centre de la voie et produit comme sortie l'angle de braquage des roues avant. Ce modèle est

inspiré du modèle de coupure "crossover model" proposé par McRuer & Krendel et qui est caractérisé par un système opérateur-machine en boucle fermée stable et la fonction de transfert du système en boucle ouverte présente une pente de $-20dB/décade$ autour de la fréquence de coupure [7]. Des éléments pour le retour kinesthésique ont été rajoutés afin de modéliser les compensations du conducteur des hautes fréquences. Les paramètres du modèle sont obtenus en utilisant la théorie de la commande classique afin d'assurer la caractéristique de la réponse en boucle ouverte du système Homme-Machine, suggérée par McRuer et qui suppose que l'opérateur humain ajuste sa compensation de telle sorte que le gain de la fonction de transfert en boucle ouverte du système conducteur-véhicule représente un simple intégrateur au niveau de la région de coupure. Les blocs de ce modèle ont une interprétation physique (action prédictive du conducteur, temps de traitement de l'information visuelle, système neuromusculaire,...), cependant le modèle ne tient pas compte de l'aspect anticipatoire du conducteur.

Donges dans [1] a proposé un modèle à deux niveaux, anticipation et compensation, qui utilise les deux régions de la voie "proche" et "éloignée" afin de produire une meilleure navigation. L'information obtenue à partir de la région éloignée (*far region*) permet de prévoir et de compenser les changements de courbure de la route, et l'information obtenue à partir de la région proche (*near region*) permet de corriger la position du véhicule par rapport au centre de la voie. Land & Lee ont observé que, durant une prise de virage, les conducteurs passent plus de temps à regarder en direction du point tangent du virage [2]. Les auteurs proposent que l'angle, entre la direction du cap du véhicule et la direction du point tangent, est utilisé par les conducteurs pour anticiper les variations de la courbure de la route. En d'autres termes, regarder en direction du point tangent du virage peut fournir un signal d'entrée au système neuromoteur chargé du contrôle de la direction.

À la différence des modèles de contrôle qui intègrent l'information proche et lointaine pour calculer la courbure de la future trajectoire, le modèle de Salvucci & Gray développé dans [3] est fondé seulement sur une caractéristique de perception des points proche et lointain, à savoir la direction du regard visuel à chaque point. Salvucci & Gray exploitent les résultats de Donges et proposent un modèle

basé sur un contrôleur Proportionnel Intégral (PI) qui utilise les deux variables perceptuelles, l'angle visuel au point lointain, θ_{far} , et au point proche, θ_{near} (voir figure 1), pour trois scénarios : le point tangent en virage, le point de fuite en ligne droite et en présence d'un véhicule leader. Des études comportementales ont permis de vérifier

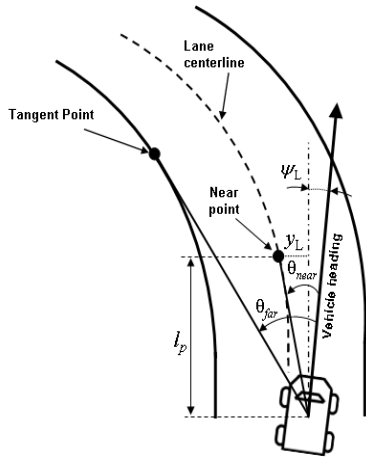


Fig. 1. Les angles visuels pour le contrôle anticipatoire et compensatoire

ces hypothèses [4]. L'avantage de ce modèle réside dans sa simplicité et qu'il est facilement identifiable. En revanche, l'inconvénient de ce modèle est que le contrôle de la trajectoire est basé uniquement sur l'information visuelle du conducteur. Par ailleurs, les compensations du couple au volant dues aux ressentis vestibulaires et Kinesthésique ne sont pas prises en compte. Une grande partie de l'information utilisée par l'être humain pour le contrôle est obtenue à partir des canaux vestibulaires et kinesthésiques. D'après McRuer et al. [14], des études sur simulateur ont montré que la présence d'un ressenti du mouvement ajouté à l'information visuelle permet d'obtenir des meilleures performances de conduite que lorsqu'on dispose que de l'information visuelle.

Cet article présente une stratégie de modélisation du comportement humain pour le contrôle de la trajectoire du véhicule. L'objectif est de développer un modèle conducteur structurel qui permet de rendre compte les mécanismes de performance d'un conducteur humain. Le document est organisé comme suit : la section 2 décrit l'architecture du modèle conducteur proposé en distinguant le contrôle visuel anticipatoire, le contrôle visuel correctif (compensatoire) ainsi que le retour kinesthésique dans le processus du braquage. Nous devons par la suite évaluer notre capacité à "renseigner" le modèle, i.e. à affecter des valeurs à ses paramètres afin qu'il reproduise le comportement d'un conducteur donné. L'ensemble du modèle est alors donné sous forme d'une représentation d'état qui sera identifiée dans la section 3. Les résultats d'identification obtenus à partir de trois trajectoires différentes sont présentés dans la partie 4 en donnant quelques idées sur la paramétrisation du modèle pour représenter différents styles de conduite.

II. ARCHITECTURE DU MODÈLE CONDUCTEUR

Cette partie décrit l'architecture du modèle conducteur proposée. Dans cette architecture, le couple d'auto alignement est pris en compte à travers la colonne de direction.

Le retour proprioceptif et kinesthésique est conçu à partir de l'angle au volant qui traduit la rotation du volant en tenant compte des couples résistants et le couple d'assistance. L'architecture du modèle conducteur est présentée sur la figure 2.

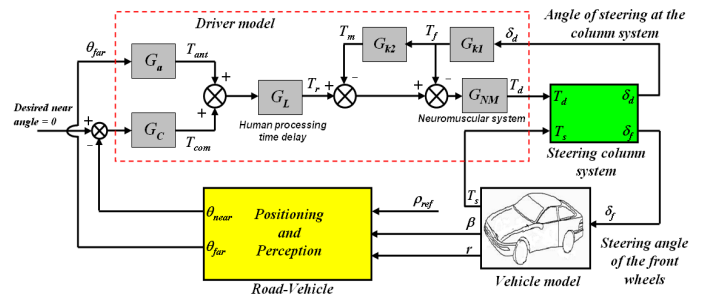


Fig. 2. Structure du modèle conducteur proposé

Concernant la perception de la scène visuelle par le conducteur lors d'une prise de virage, nous avons mis l'accent sur l'utilisation du point tangent. Ce point est connu pour être un point de fixation privilégié par les conducteurs pendant la négociation d'un virage [10], [1]. Le contrôle de la trajectoire par le conducteur est divisé en deux grandes étapes : anticipatoire et compensatoire et qui peuvent être exécutées de manière parallèle.

A. Le comportement anticipatoire

En terme de contrôle anticipatoire, le conducteur utilise uniquement le système visuel afin d'obtenir des informations sur les caractéristiques de la route à venir, en particulier le changement de sa courbure. Sur cette base, le conducteur prédit la trajectoire future du véhicule et fournit par le biais du volant une consigne de braquage anticipé avant d'entrer dans le virage. Dans le modèle proposé, le contrôle anticipatoire est représenté par le gain K_a (voir figure 2) qui génère un couple proportionnel à l'angle visuel au point tangent du virage θ_{far} (figure 2 avec $G_a = K_a$).

B. Le comportement compensatoire

En ce qui concerne le contrôle compensatoire, le conducteur utilise ses systèmes visuel, vestibulaire (e.g. accélération latérale) et kinesthésique (e.g. couple d'auto-alignement) pour compenser les écarts instantanés de la trajectoire. Il ajuste pour cela le couple appliqué sur le volant en utilisant l'information visuelle qui provient de la région proche devant le véhicule (l'angle visuel proche θ_{near}), afin de maintenir un écart latéral stable par rapport au centre de la voie. Cette action de compensation est modélisée par le compensateur G_c représenté par la fonction de transfert :

$$G_c = K_c \frac{T_L s + 1}{T_I s + 1} \quad (1)$$

où T_L et T_I sont les constantes de temps, respectivement, d'avance et de retard, et le gain K_c représente l'action proportionnelle du conducteur par rapport à l'erreur au niveau de l'angle visuel proche. Il a été observé en expérimentation que l'opérateur humain ajuste ses trois paramètres pour adapter sa capacité aux changements de la dynamique du

système. Donc, c'est une représentation de la nature adaptative de l'être humain lorsqu'il interagit avec différentes dynamiques du système [8].

Le retard pur représenté par le transfert $G_L = e^{-\tau_p s}$ est introduit afin de prendre en compte le délai du traitement de l'information (les activités du traitement sensoriel dans le système nerveux central et périphérique). Le temps de retard τ_p est considéré invariant et sa valeur est comprise entre 0.1sec et 0.2sec. Une approximation de Pade est utilisée, par la suite, pour représenter le retard pur G_L :

$$G_L = \frac{1 - \frac{\tau_p s}{2}}{1 + \frac{\tau_p s}{2}} \quad (2)$$

C. Le retour d'effort et la dynamique neuromusculaire

Lors de la conduite d'un véhicule automobile, le conducteur exerce des efforts sur le volant pour donner au véhicule la trajectoire souhaitée. Les efforts dus au contact pneu-chaussée et à la dynamique du véhicule remontent à travers la colonne de direction jusqu'au volant, où ils sont perçus par le conducteur. Les informations apportées au conducteur, au moyen de cet échange de flux (vitesses) et d'efforts (forces-couples), sont d'une grande utilité pour orienter le véhicule et ressentir les limites de son adhérence au sol. Afin de prendre en compte l'interaction entre le conducteur et le véhicule à travers le ressenti du couple d'auto-alignement (retour d'effort) par le conducteur, nous avons considéré la colonne de direction qui permet la conversion du couple conducteur en angle aux roues.

Les transferts G_{k1} et G_{k2} dans la figure 2 forment le retour kinesthésique du conducteur qui modélise la compensation des hautes fréquences. Le système neuromusculaire qui représente la dynamique de l'activation du muscle, représenté ici par le bloc G_{NM} , est approximé par un filtre de premier ordre suggéré par McRuer [8] :

$$G_{NM} = \frac{1}{T_N s + 1} \quad (3)$$

où T_N est la constante de temps du système neuromusculaire et sa valeur est fixée à 0.11sec [8].

Le contrôle compensatoire kinesthésique est divisé en deux parties : perception et action. La partie perception représente le transfert du couple résistant (le couple d'auto-alignement) à travers la colonne de direction vers les muscles des bras du conducteur. Cette phase de perception est modélisée par le transfert G_{k1} en utilisant l'angle au volant afin d'obtenir la vitesse angulaire du braquage au volant :

$$G_{k1} = K_D \frac{s}{s + \frac{1}{T_1}} \quad (4)$$

Le conducteur, en appliquant le couple nécessaire pour braquer le véhicule convenablement, fournit en particulier un couple additionnel afin de compenser le couple résistant perçu au niveau de la colonne de direction. Cette partie est modélisée par le compensateur G_{k2} :

$$G_{k2} = K_G \frac{T_{k1} s + 1}{T_{k2} s + 1} \quad (5)$$

La sortie du système neuromusculaire représente le couple fourni par le modèle conducteur T_d . Les paramètres T_N ,

T_1 , τ_p et K_D sont supposés connus d'après [6] et [8]. Nous devrons par la suite "renseigner" le modèle et affecter des valeurs à ses paramètres afin qu'il reproduise le comportement d'un conducteur donné.

III. ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE CONDUCTEUR

A. Le modèle conducteur sous forme d'une boîte grise

Le modèle conducteur représenté dans la figure 2 contient onze paramètres dont quatre sont fixés. Afin de pouvoir identifier les différents paramètres du modèle, une voie consiste à lui associer une réalisation dans l'espace d'état. Le modèle sous forme d'une représentation d'état est donné par :

$$\begin{cases} \dot{x}_d = A_d x_d + B_d u_d + K_d e_d \\ y_d = C_d x_d + D_d u_d + e_d \end{cases} \quad (6)$$

où :

$$A_d = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_N} & -\left(\frac{T_{k1}}{T_{k2}} K_G + 1\right) \frac{1}{T_N} & \frac{-1}{T_{k2} T_N} & \frac{1}{T_N} & \frac{-1}{T_1 T_N} \\ 0 & -\frac{1}{T_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(T_{k2} - T_{k1})}{T_{k2}} K_G & -\frac{1}{T_{k2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{2}{\tau_p} & \frac{4}{\tau_p T_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1} \end{bmatrix},$$

$$B_d = \begin{bmatrix} K_a \frac{1}{T_N} & \frac{T_L}{T_1} K_c \frac{1}{T_N} & -K_D \left(\frac{T_{k1}}{T_{k2}} K_G + 1\right) \frac{1}{T_N} \\ 0 & 0 & -\frac{K_D}{T_1} \\ 0 & 0 & \frac{(T_{k2} - T_{k1})}{T_{k2}} K_G K_D \\ -\frac{4}{\tau_p} K_a & -\frac{2T_L}{\tau_p T_1} K_c & 0 \\ 0 & -\frac{(T_1 - T_L)}{T_1} K_c & 0 \end{bmatrix}$$

$x_d = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T$ est le vecteur d'état du modèle conducteur, où $x_1 = T_d$ est le couple conducteur, et les autres états représentent la combinaison linéaire entre l'entrée et la sortie de chaque bloc de l'architecture. $u_d = [\theta_{far} \ \theta_{near} \ \delta_d]^T$ et $y_d = T_d$ sont, respectivement, les entrées et la sortie du modèle, où δ_d représente l'angle au volant. Le vecteur des paramètres inconnus est donnée par : $\pi = [K_a \ K_c \ T_L \ T_1 \ K_G \ T_{k1} \ T_{k2}]^T$.

B. Le processus d'identification

Le but de cette partie est de montrer que le modèle continu structuré présenté précédemment i) a suffisamment de degrés de liberté pour reproduire le comportement des conducteurs et ii) peut être identifié à partir des données entrées-sorties (pas de problème d'identifiabilité). La méthode PEM "Prediction Error Method" a été utilisée, pour obtenir les paramètres qui minimisent la norme L_2 de l'erreur de prédiction [12].

Supposant que les entrées sont approximativement constantes durant deux temps d'échantillonnage, le modèle discrétisé est donné par :

$$\begin{cases} x(kT + T) = A_{dT}(\pi) x(kT) + B_{dT}(\pi) u(kT) + w_k \\ y(kT) = C_{dT}(\pi) x(kT) + v_k \\ x(0) = x_0 \end{cases} \quad (7)$$

où T représente le temps d'échantillonnage, v_k et w_k sont les bruits, respectivement, de l'état et de la sortie. Les matrices d'état discrétisées sont :

$$A_{dT}(\pi) = e^{A_d(\pi)T}; B_{dT}(\pi) = \int_0^T e^{A_d(\pi)t} dt B_d(\pi)$$

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = A_{d_T}(\hat{\pi}) \hat{x}_k + B_{d_T}(\hat{\pi}) u(kT) + K(\hat{\pi}) e_k \\ \hat{y}_k = C_{d_T}(\hat{\pi}) \hat{x}_k \\ e_k = y(kT) - \hat{y}_k \end{cases} \quad (8)$$

On cherche ici à déterminer le vecteur $\hat{\pi}$ qui minimise la norme de l'erreur e_k : $\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|e_k\|^2$ où N est le nombre d'échantillons considérés. La difficulté principale vient du fait que le problème d'optimisation est non linéaire dans les paramètres. L'optimisation locale est effectuée en utilisant une initialisation judicieuse des paramètres. Cette méthode d'identification est implémentée dans "System Identification toolbox" de Matlab [12]. $K(\hat{\pi})$ peut être choisi de manière à se concentrer sur la bande passante *a priori* du conducteur. En prenant $K(\hat{\pi}) = 0$ conduit à une estimation d'erreur de sortie.

L'erreur de prédiction est : $\varepsilon_k(\pi) = (y_k - \hat{y}_{k/k-1}(\pi)) = e_k$. Où \hat{y}_k est équivalent à une prédiction à l'étape suivante donnée par :

$$\hat{y}_{k/k-1}(\pi) = W_u(z; \pi) u_k + W_y(z; \pi) y_k$$

avec :

$$\begin{aligned} W_u(z; \pi) &= C_{d_T}(\pi) (zI - A_{d_T}(\pi) + K(\pi) C_{d_T}(\pi))^{-1} B_{d_T}(\pi) \\ W_y(z; \pi) &= C_{d_T}(\pi) (zI - A_{d_T}(\pi) + K(\pi) C_{d_T}(\pi))^{-1} K_{d_T}(\pi) \end{aligned}$$

avec W_u et W_y stables et $K(\pi) = 0$, l'erreur de prédiction est en fait une prédiction de l'erreur de sortie.

IV. LES RÉSULTATS

Nous donnons dans cette partie une voie systématique pour obtenir le vecteur des paramètres, $\hat{\pi}$, du modèle conducteur à partir des trajectoires enregistrées sur un véhicule donné. Le test expérimental est effectué sur la piste de "Satory" à l'aide d'un véhicule instrumenté du "LIVIC". Afin de localiser le véhicule sur la voie en vue d'obtenir une mesure du déplacement latéral du véhicule ainsi que la position du point tangent du virage, ce dernier est équipé d'un GPS différentiel (DGPS) et une caméra en vision frontale. La précision du DGPS est de l'ordre de quelques centimètres et il fonctionne à une fréquence d'échantillonnage de 10Hz. Une caméra en vision frontale peut fournir alors le déplacement latéral, ainsi que l'erreur de cap à une fréquence de 10Hz et par la suite l'angle visuel proche, θ_{near} est calculé à partir de ces deux mesures. Un algorithme embarqué au véhicule permet de détecter en temps réel le point tangent du virage et fournir, à chaque instant d'échantillonnage, l'angle entre le cap du véhicule et le point tangent du virage θ_{far} (voir figure 3).

A. Résultats de l'identification

Nous donnons les résultats expérimentaux pour l'identification des différents paramètres du modèle conducteur à partir des mesures collectées sur la piste d'essai à l'aide du véhicule prototype instrumenté. Les paramètres supposés connus, d'après [8] & [6], dans la représentation 6 sont représentés dans le tableau I.

La Figure 4 illustre une comparaison entre la sortie du modèle identifié sans et avec le retour kinesthésique et les échantillons de mesures qui n'ont pas été utilisés dans le processus d'identification. Nous remarquons que la sortie



Fig. 3. Test expérimental sur la piste de "Satory".

du modèle sans retour kinesthésique (MSR) est proche à celle mesurée avec une fidélité de 54%. Comme on peut le constater sur la Figure 4, en considérant le retour kinesthésique, la sortie du modèle (MAR) est proche à celle du modèle original (conducteur humain) de 62% (fiabilité du modèle). La fidélité du modèle, en pourcentage, est calculée comme suit :

$$fit\% = \left(1 - \frac{norm(y - \hat{y})}{norm(y - y_{moy})} \right) \times 100$$

Où y est la sortie des données de validation et \hat{y} est la sortie du modèle identifié. Les échantillons utilisés ici n'ont pas servi à l'identification et permettent d'évaluer le caractère prédictif du modèle identifié. Les paramètres identifiés, avec et sans la compensation kinesthésique, sont donnés dans le tableau I. Nous pouvons remarquer d'après le tableau I que la constante de temps de l'avance de phase (lead time constant T_L) de la compensation visuelle diminue lorsqu'on considère la compensation kinesthésique. La diminution de T_L est compensée par le temps de l'avance de phase additionnel, T_{k1} , généré par G_{k2} du retour kinesthésique.

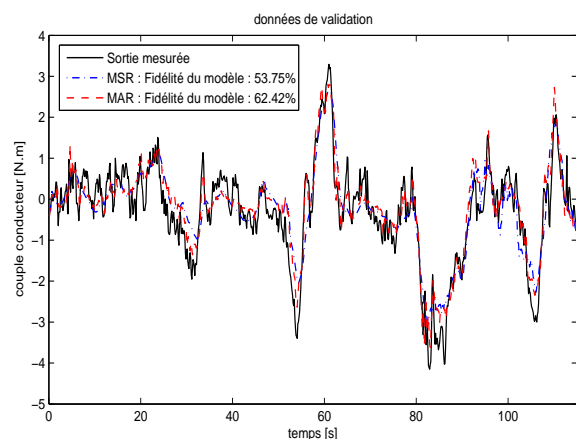


Fig. 4. Résultats d'identification : comparaison entre le couple conducteur mesuré et la sortie du modèle identifié sans le retour kinesthésique (MSR) et la sortie du modèle identifié avec le retour kinesthésique (MAR) en utilisant les données de validation.

D'après McRuer & Krendel, il a été observé en expérimentation que les systèmes homme-machine présentent une caractéristique en boucle ouverte autour de la

TABLE I

LES PARAMÈTRES CONNUS ET IDENTIFIÉS DU MODÈLE CONDUCTEUR.

Les paramètres connus			
T_N	T_1	τ_p	K_D
0.11 sec	2.5 sec	0.151 sec	1
Les paramètres estimés			
paramètres	avec comp. kines.	sans comp. kines.	
T_L	0.43	6.76	
T_I	1.20	1.42	
K_a	3.10	3.61	
K_c	3.88	2.21	
T_{k1}	1.12	--	
T_{k2}	0.0046	--	
K_G	-2.72	--	

fréquence de coupure du système où le gain présente une inclinaison de $-20dB/décade$ dans la région de coupure (autour de ω_c) et le système est stable en boucle fermée. Le comportement souhaitable du système conducteur-véhicule en boucle ouverte, suggéré par McRuer, peut fournir une indication sur la validité du modèle conducteur [6]. La Figure 5 montre le gain et la phase de la fonction de transfert du système Conducteur-Véhicule en boucle ouverte. La fréquence de coupure du système est de $\omega_c = 2.44rad/s$, avec une marge de phase de 34.4° . Nous pouvons ainsi remarquer d'après la figure 5 que la réponse fréquentielle en boucle ouverte du système conducteur-véhicule est un simple intégrateur au niveau de la région de coupure (autour de ω_c) avec une pente de $-19.34dB/décade$. Le pic au niveau de l'amplitude entre les fréquences 10 et $12rad/s$ résulte du retour kinesthésique G_{k1} et G_{k2} . Nous pouvons remarquer que la bande passante du système est plus large en considérant le retour kinesthésique et donc un domaine de validité du modèle conducteur plus large.

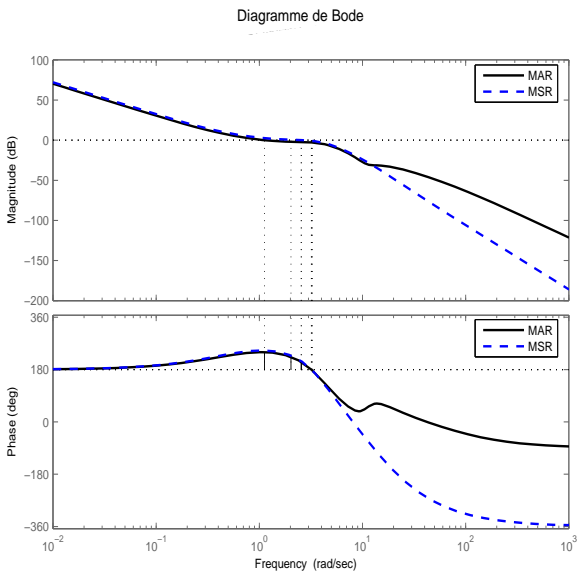


Fig. 5. Caractéristique du système conducteur-véhicule en boucle ouverte suggérée par McRuer.

B. Résultats de simulation

Cette partie propose d'analyser les réponses du système conducteur-véhicule et ainsi d'étudier la possibilité de paramétrer le modèle conducteur afin de représenter différents

styles de conduite. Dans cette étude, trois styles de conduite différents ont été étudiés : le premier conducteur (*Driver 1*) assure un suivi de voie en abordant le virage avec une distance maximale au point tangent du virage (pas de minimisation de θ_{far}). Ce comportement peut représenter un comportement d'un conducteur débutant. Le second conducteur (*Driver 2*) essaie de suivre le centre de la voie avec un minimum d'écart latéral. Ce comportement peut être considéré comme une négociation parfaite d'un virage. Le troisième conducteur (*Driver 3*) aborde le virage avec une trajectoire qui minimise l'angle visuel au point tangent du virage. Ceci permet de minimiser l'accélération latérale en coupant le virage, et ce comportement peut représenter le comportement d'un conducteur expérimenté [11]. Les paramètres obtenus pour chaque conducteur sont représentés sur le tableau II. Les résultats montrent que la stratégie

TABLE II

RÉSULTATS D'OPTIMISATION POUR L'IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE CONDUCTEUR.

Paramètres	<i>Driver1</i>	<i>Driver2</i>	<i>Driver3</i>
K_a	15.01	12.09	56.85
K_c	22.14	89.75	35.28
T_L	2.79	0.41	1.20
T_I	0.012	0.27	0.14
K_G	-0.98	-12.27	-0.67
T_{k1}	0.65	1.10	1.87
T_{k2}	0.035	1.13	0.019
écart latéral	0.38	0.21	0.45

de conduite pour le troisième conducteur donne beaucoup d'importance à l'action proportionnelle du contrôle anticipatoire, alors que les deux autres stratégies des conducteurs 1 & 2 nécessitent moins d'importance. Ces deux derniers donnent beaucoup d'importance à la tâche du contrôle compensatoire, comme nous pouvons le constater par l'augmentation du gain proportionnel du contrôle compensatoire, K_c , par rapport au gain proportionnel du contrôle anticipatoire, K_a . Ainsi, le gain proportionnel pour le retour d'effort, K_G , est important pour le deuxième conducteur qui cherche à suivre parfaitement le centre de la voie avec un écart latéral minimal.

La figure 7 montre la réponse du véhicule obtenue avec les trois modèles conducteurs. Nous pouvons remarquer d'après la figure, que le conducteur 2 suit, parfaitement, le centre de la voie et donc, le conducteur voudrait compenser cet écart par des actions sur le volant, d'où le phénomène de "chattering" observé sur la figure 6-c. Ceci peut être aussi expliqué par les paramètres du modèle conducteur, où les gains proportionnels, K_c et K_G sont grands, ce qui veut dire que le conducteur donne beaucoup d'importance à l'angle visuel proche et aux compensations kinesthésiques. La comparaison de la moyenne de l'écart latéral est représentée sur le tableau II. Nous pouvons remarquer d'après les résultats que le second conducteur minimise l'écart latéral, $moy(y_L) = 0.21m$. En revanche, le troisième conducteur coupe le virage pour prendre la ligne droite et donc minimise l'accélération latérale dans le virage. Ce comportement est obtenu en minimisant l'angle visuel au point tangent du virage, θ_{far} (voir figure 6-a).

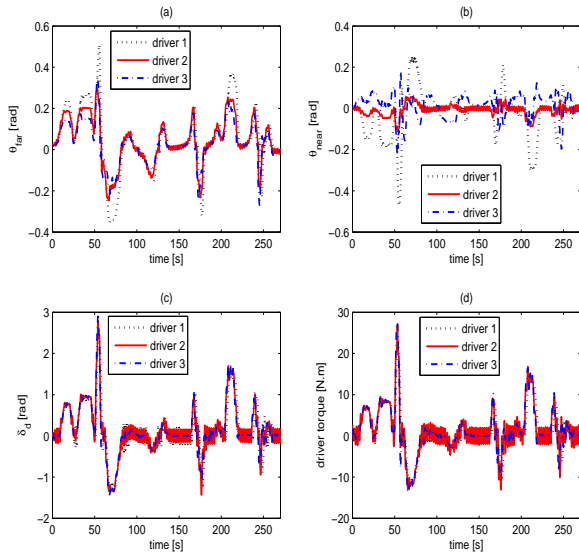


Fig. 6. Les entrées/sorties du modèle conducteur pour trois stratégies différentes de conduite.

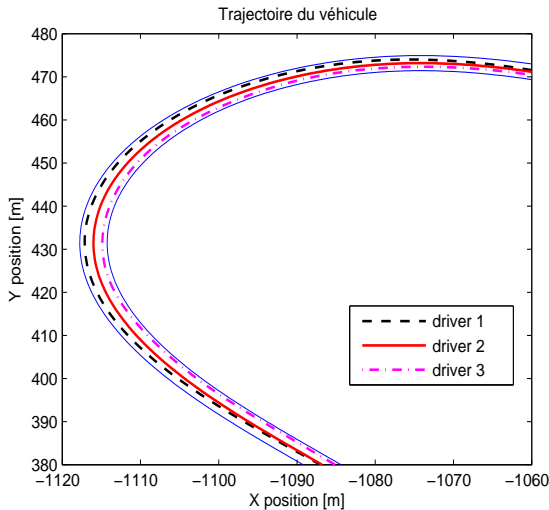


Fig. 7. La réponse du modèle conducteur pour trois stratégies différentes de conduite.

V. CONCLUSION

Dans ce papier, un modèle conducteur pour le contrôle de la trajectoire a été présenté. Ce modèle intègre la stratégie visuelle pour l'anticipation et la compensation et prend en compte l'interaction entre le conducteur et le véhicule à travers la sensation du retour d'effort au niveau de la colonne de direction. Ceci permet de fournir au modèle un domaine de validité plus large. De plus, une procédure pour déterminer les paramètres du modèle afin de caractériser un comportement d'un conducteur donné à partir des données entrées/sorties mesurées ou simulées a été aussi présentée. Les paramètres inconnus du modèle ont été identifiés en utilisant une technique d'identification à partir des entrées/sorties enregistrées, sans connaître ou faire des hypothèses concernant le modèle du véhicule utilisé. Ce modèle conducteur est dédié à la fois pour établir des scénarios de simulation et la conception du contrôle par-

tagé de la trajectoire entre l'automate et le conducteur, où il peut être intégré dans le processus de conception du contrôleur de l'assistance afin d'obtenir des prédictions sur le comportement du conducteur.

Actuellement, nous travaillons sur la validation du modèle conducteur sur simulateur. Ainsi, le modèle présenté ici a quelques limitations. Par exemple, uniquement les situations de maintien de voie ont été considérées, donc le modèle sera enrichi de façon à modéliser des situations de changement de voie dans le cas d'évitement d'obstacle ou de dépassement et le suivi de véhicule, en prenant en compte le couplage entre le braquage et la vitesse.

REMERCIEMENT

Ces travaux de recherche ont été soutenus par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), le Campus International sur la Sécurité et l'Intermodalité des Transports, la Région Nord-Pas-de-Calais, la Communauté Européenne, la Délégation Régionale à la Recherche et à la Technologie, le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, et le Centre Nationale de la Recherche Scientifique. Les auteurs remercient chaleureusement le support de ces institutions.

RÉFÉRENCES

- [1] E. Donges, *A two-level model of driver steering*, Human Factors, 1978, 20(6), pp. 691-707.
- [2] M. F. Land, and D. N. Lee, *Where we look when we steer*, Nature, 1994, 369, pp. 742-744.
- [3] D. Salvucci, and R. Gray, *A two-point visual control model of steering*, Perception, 2004, 33(10), pp. 1233-1248.
- [4] F. Mars, *Driving around bends with manipulated eye-steering coordination*, Journal of Vision, 2008, 8(11), Article 10, pp. 1-11, doi :10.1167/8.11.10.
- [5] C. C. Macadam, *Development of a Driver Model for Near/At-Limit Vehicle Handling*, Final Technical Report UMTRI-2001-43, 2001, The University of Michigan Transportation Research Institute, Cambridge, MA.
- [6] R. A. Hess, and A. Modjtahedzadeh, *A control theoretic model of driver steering behavior*, Control Systems Magazine, IEEE Vol. 10, Issue 5, Aug 1990 pp. 3-8.
- [7] D. McRuer, and E. S. Krendel, *Dynamic response of human operators*, Defense Documentation Center, WADC-TR-56-524, Oct. 1957.
- [8] D. McRuer, and D. Graham, *Human pilot dynamics in compensatory systems : theory, models and experiments with controlled-element and forcing function variations*, Wright-Patterson Air Force Base (OH) : Technical Report, AFFDLTR-65-15, 1965.
- [9] M. Weigel, P. Lugner, and M. Plöchl, *A driver model for a truck-semitrailer combination*. Vehicle System Dynamics, Vol. 41, ISBN 90 265 1972 9, 2004, pp. 321-331.
- [10] M. F. Land, and J. Horwood, *Which parts of the road guide steering?*, Nature, 1995, 377, pp. 339-340.
- [11] J. Ph. Lauffenburger, M. Basset, F. Coffin and G. L. Gissinger, *Driver-aid system using path-planning for lateral vehicle control*, Control Engineering Practice 11, pp. 217-231, 2003.
- [12] L. Ljung, *System Identification : Theory for the User*, Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hal PTR, 1999.
- [13] G. Ornstein, *The Automatic Analog Determination of Human Transfer Function Coefficients*, Med. Electron. Bio. Eng. 1 (3), 1963.
- [14] D. McRuer, L. G. Hofmann, H. R. Jex, G. P. Moore, A. V. Phatak, D. H. Weir, and J. Wolkovitch, *New Approaches to Human-Pilot/Vehicle Dynamic Analysis*, Technical Report AFFDL-TR-67-150, WPAFB, 1968. 150, WPAFB.
- [15] L. Bainbridge, *Ironies of automation*, Automatica, vol. 19, no. 6, pp. 775-779, 1983.
- [16] J.M. Hoc, F. Mars, I. Milleville, É. Jolly, M. Netto, J.M. Blosseville *Human-Machine Cooperation in Car Driving for Lateral Safety : Delegation and Mutual Control*, Le Travail Humain, vol. 69, no 2, pp. 153-182, 2006.