

Dynamique critique des véhicules à deux roues motorisés : Modélisation et stabilisation LQG du mouvement de roulis

Hamid Slimi^{1*}, Hichem Arioui², Lydie Nouveliere³ et Saïd Mammar⁴

1, 2, 3, 4 : *Laboratoire IBISC, Université d'Evry, 40, rue de Pelvoux 91020, Evry - France.

Contact: hamid.slimi@ibisc.univ-evry.fr

Résumé

Ce papier est consacré à la modélisation et à la stabilisation de véhicules de types 2-roues et plus particulièrement au mouvement de roulis d'une moto. Le modèle proposé inclut les forces de contact pneumatique-chaussée et la stabilisation par mouvement d'inclinaison du conducteur. Le modèle conducteur-moto est alors stabilisé en utilisant la commande LQ. Un modèle est finalement ajouté afin d'assurer le suivi d'un signal de référence. Les résultats de simulation présentés dans cet article montrent l'efficacité de l'approche.

Abstract

This report is devoted to the modelling and the stabilization of the roll motion of a motorcycle. The proposed model processes a nonlinear tire-road interaction forces, and includes the rider leaning movement for stabilization. The embedded rider-motorcycle model is then stabilized using LQG control. An LQ controller is finally added in order to ensure reference model tracking. Simulation results show the effectiveness of the approach.

Mots-clés : Dynamique de moto, Dynamique de roulement, Aide au Conducteur, Simulateur.

Keywords: Motorcycle dynamics, Roll dynamics, Rider assistance, Simulator.

1. Introduction

Depuis 2002, le gouvernement Français a décidé de faire du combat contre les accidents de la route; un des grands programmes de ses mandats successifs. Malgré les résultats encourageants obtenus depuis l'installation des systèmes de contrôle de vitesse (radars), la moto reste le mode de transport terrestre le plus dangereux : le nombre de morts reste élevé malgré une diminution globale forte pour les véhicules, et si on tient compte du nombre de kilomètres parcourus, le risque de décès pour un conducteur de moto est 21 fois plus élevé que pour les autres usagers de la route [12].

Depuis une vingtaine d'année, les voitures légères se sont progressivement équipées de dispositifs passifs et actifs de sécurité. Aujourd'hui la majorité des voitures sont équipées d'un ou plusieurs "airbags" et de systèmes d'ABS. En notant que l'ABS est obligatoire depuis trois ans pour tout véhicule neuf vendu dans l'union européenne. Par ailleurs, les systèmes plus puissants tels que l'ESP, les systèmes d'aide au freinage et des systèmes de commande de traction se démocratisent.

Pendant la même période, le retard pris par les deux roues (moto et scooters) s'accroît continuellement. Comme exemple, l'ABS, qui existe depuis presque 15 ans, est encore réservé à peu de modèles. Le répartiteur de forces de freinage est moins onéreux mais reste toujours marginal

dans l'ensemble du marché. Des "Airbags" de moto, dont le développement semble difficile ne semble pas pouvoir s'imposer car sa diffusion demeure pour le moment très restreint.

La modélisation des systèmes est le point de départ de tout processus d'automatisation. Elle s'impose pour la simulation, la conception, l'estimation/identification, la prédiction, la détection de défauts, le diagnostic de pannes, l'identification et la commande. Le modèle mathématique du système est tentative de reproduction de la réalité, et est construit en formulant de nombreuses hypothèses simplificatrices ; il ne représente qu'imparfaitement la réalité.

Sur la base d'un modèle donc imparfait, on va concevoir une loi de commande pour assurer des performances désirées telles que : précision, rapidité, rejet des perturbations et poursuite de trajectoire de référence; c'est la commande optimale. Cette dernière est une loi de commande par retour d'état qui a l'avantage de présenter de nombreux paramètres de synthèse et donc de réglage. L'avantage de ces compensations en réaction est bien sûr de permettre de tenir compte en permanence de l'état réel du système physique, et donc de réagir sur celui-ci en conséquence pour obtenir le comportement souhaité.

Le modèle combine un module de commande de stabilisation qui permet la stabilisation du mouvement de roulis de la moto par l'action sur le couple de direction ou par l'action sur l'angle d'inclinaison du conducteur par rapport à la moto.

L'approche de synthèse de la loi de commande assure la stabilité du système par les deux configurations suivantes :

- Rétroaction seulement sur le couple de direction
- Rétroaction sur les deux : couple de direction et angle d'inclinaison du conducteur.

De façon générale, cet article, consacré à la modélisation et à la stabilisation des véhicules de type de 2-roues est organisé comme suit :

La section 2, donne un bref aperçu des résultats d'une étude d'accidentologie, quelques cas appropriés de la perte de commande y sont détaillés.

Dans la section 3, une description d'un modèle dynamique pour les caractéristiques de système de conducteur-moto et de la dynamique du pneumatique est présentée.

Dans les sections 4 et 5 l'approche simultanée de stabilisation est présentée. Des contrôleurs sont synthétisés en utilisant la commande LQ.

Des résultats de simulations effectuées sont présentés dans le paragraphe 6. Des manœuvres sont exécutées pour des mouvements de maintien d'équilibre en ligne droite et en virage. Des conclusions sont fournies dans la section 7.

2. Accidentologie

Une étude récente d'accidentologie a indiqué que plus de 70% des accidents de motos en urbain et en péri-urbain se produisent à la vitesse de moins de 50km/h [12]. Il montre également que dans 15% des accidents le motocycliste est le seul impliqué.

En outre, quand un véhicule tiers est impliqué dans l'accident, le conducteur de moto est responsable dans 37% des cas, le véhicule tiers dans 50% des cas. Les 13% restants sont dus à l'échec de temps de réaction et aux défauts de l'infrastructure.

L'étude détaillée de 200 accidents de moto mène à l'isolement de 47 cas de perte de commande dus à l'incompatibilité entre le conducteur et la machine. Cette incompatibilité est due à la surestimation des performances d'exécution du conducteur ou de la moto ou à la mauvaise interprétation de l'environnement. On a noté que dans 75% des accidents, le conducteur tente une manœuvre de secours, principalement de freinage et de braquage pour éviter le danger.

3. Modélisation de véhicule

Depuis le modèle rigide de deux corps proposé dans [1], des modèles plus complexes allant jusqu'à sept corps ont été étudiés dans [2, 4]. La complexité a été généralement rendue nécessaire pour permettre l'étude d'un certain nombre de détails sur le comportement spécifique pendant l'accélération, le freinage et le braquage [3, 5, 6].

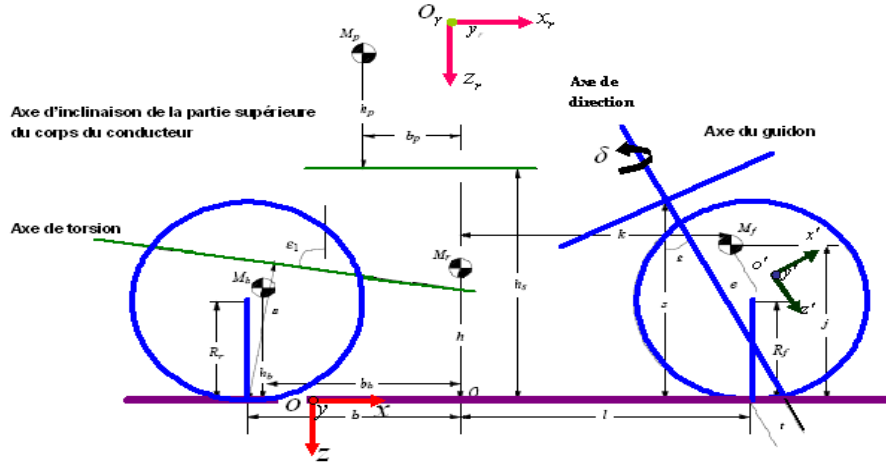


Fig.1. Corps et dimensions de moto.

Le modèle développé ici dispose de quatre corps rigides jointifs et est inspiré de ceux présentés dans [7, 8]. Il inclut le mouvement de la partie supérieure du corps de conducteur. Les quatre corps rigides pour l'ensemble "Conducteur-moto" est subdivisé en :

- Partie avant: fourchette avant, guidon, roue avant et amortisseurs,
- Armature arrière: moteur tournant dans l'axe transversal, le châssis, le corps inférieur et des jambes du conducteur,
- Roue arrière,
- Partie supérieure du corps du conducteur: la partie supérieure du corps du conducteur (tronc, tête, bras...).

Ce modèle à quatre corps rigides peut être réduit à seulement trois corps rigides en mettant le corps "Roue arrière" dans le corps "Armature arrière". Dans ce cas, il n'est plus possible de modéliser les mouvements de la partie arrière à savoir le "twisting" et le "swinging arm".

3.1 Présentation du modèle

La description du mouvement d'un véhicule (un deux roues par exemple) découle de l'application des principes fondamentaux de la mécanique des corps solides. Ces principes 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. Ils sont tous les deux appliqués ci-dessous au système (Motocycle-Conducteur).

À partir de l'application des lois fondamentales de la dynamique (lois de Newton), les équations du mouvement sont obtenues en recueillant l'équation latérale de mouvement, l'équation de lacet, l'équation de roulis, l'équation de la partie charnière de fourche et finalement les deux équations de relaxation de forces de pneus avant et arrière. Nous n'allons pas nous lancer dans une démonstration de ces différentes équations, mais nous présenterons seulement de manière synthétique les éléments essentiels des modèles non linéaire et linéaire. De ces équations, nous définissons les modèles des systèmes non-linéaire et linéaire après linéarisation.

Le modèle non linéaire est régi par une équation différentielle de la forme :

$$\dot{x} = F(x, u), x \in R^n, u \in R^m \quad \text{Où } F \text{ est une fonction non-linéaire.}$$

Le modèle linéaire obtenu après linéarisation en utilisant les "séries de Taylor" admet 8 variables d'états :

$$x = [v, \dot{\phi}, r, \dot{\delta}, \phi, \delta, F_f, F_r]^T$$

Où v est la vitesse latérale, $\dot{\phi}$ la vitesse de roulis, r la vitesse de lacet, $\dot{\delta}$ la vitesse de l'angle de direction avant, ϕ l'angle de roulis, δ l'angle de direction avant, F_f et F_r sont les forces latérales avant et arrière de contact pneumatique-chaussée.

Les entrées de commandes sont au nombre de 4 entrées indépendantes, représentées par le couple de commande conducteur, le mouvement de roulis de conducteur (angle, vitesse et accélération). Ces entrées sont regroupées dans le vecteur de commande :

$$u_1 = \tau, u_2 = [\phi_r, \dot{\phi}_r, \ddot{\phi}_r]^T \quad u = [u_1, u_2] = [\tau, \phi_r, \dot{\phi}_r, \ddot{\phi}_r]^T$$

La linéarisation se fait en admettant les hypothèses simplificatrices suivantes :

$$\Delta \dot{x}_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial F_i(x, u)}{\partial x_j} \Big|_{x_0, u_0} \Delta x_j + \sum_{j=1}^p \frac{\partial F_i(x, u)}{\partial u_j} \Big|_{x_0, u_0} \Delta u_j$$

Ce qui donne, une représentation d'états suivante, pour le système linéaire :

$$\begin{cases} E \cdot \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = C \cdot x + D \cdot u \end{cases}$$

Où E, A, B, C et $D = 0$ sont des matrices avec toujours :

$$x = [v, \dot{\phi}, r, \dot{\delta}, \phi, \delta, F_f, F_r]^T \quad \dot{x} = [\dot{v}, \ddot{\phi}, \dot{r}, \ddot{\delta}, \dot{\phi}, \dot{\delta}, \dot{F}_f, \dot{F}_r]^T$$

3.2 Phénomène transitoire et dynamique du pneu

La dynamique de déformation transversale a fait l'objet de plusieurs travaux. Pour décrire le comportement du pneumatique face à des variations. Dans [10], Pacejka décrit les variations de la force latérale et du moment d'auto-alignement par un modèle du premier ordre, en réponse à des valeurs faibles de l'angle de glissement (notion de la longueur de relaxation). La notion de la longueur de relaxation a été utilisée aussi dans [4]. Ainsi pour décrire le transitoire, la variation de F_y est représentée par une équation différentielle du premier ordre. Avec : C_y la rigidité du glissement latéral et σ_y la longueur de relaxation ou longueur roulée de retard, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{\sigma_f}{u} \dot{F}_f = -\frac{C_{f\dot{f}}}{u} v - \frac{C_{f\dot{f}} \cdot l_f}{u} \dot{\psi} + \frac{C_{f\dot{f}} \cdot t}{u} \dot{\delta}_f - F_f \\ \frac{\sigma_r}{u} \dot{F}_r = -\frac{C_{f\dot{r}}}{u} v + \frac{C_{f\dot{r}} \cdot l_r}{u} \dot{\psi} - F_r \end{cases}$$

3.3 Réponse du modèle e boucle ouverte

L'analyse de la boucle ouverte ne peut se faire qu'à des vitesses longitudinales pour lesquelles la moto est stable. Ce modèle de moto est instable pour une gamme étendue de vitesse longitudinale 5m/s à 120 m/s. La stabilité est seulement obtenue autour du 20 m/s. Ceci peut être vérifié par le tracé des pôles du système. Ici nous traçons les parties réelles des pôles en

fonction des vitesses longitudinales pour une gamme de 0 m/s à 120 m/s (figure 2.10). Les modèles linéaires sont obtenus par la linéarisation autour de la vitesse longitudinale constante.

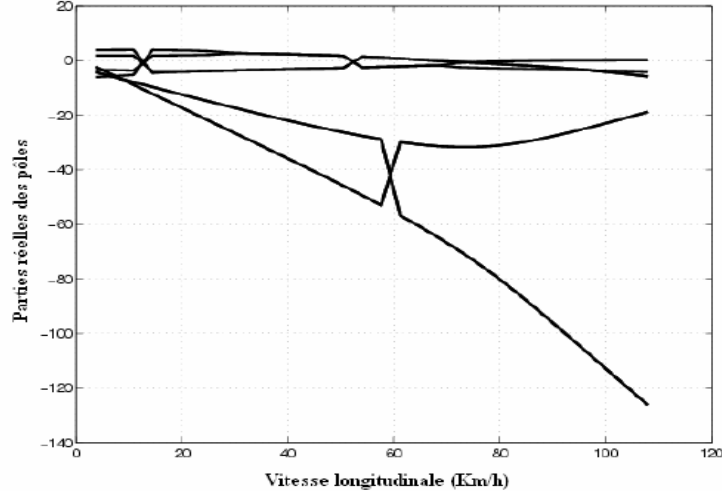


Fig. 2. Tracé des parties réelles des pôles en fonction de la vitesse longitudinale.

3.4 Modèle Conducteur

La moto étant instable pour une large gamme de vitesse, nous décidons d'adjoindre un modèle conducteur qui permettra dans un premier temps d'obtenir la stabilisation de la moto par des mouvements d'inclinaison de la partie supérieure de son corps. Ce modèle permettra aussi d'envisager la stabilisation par couple de direction (Figure.2.6.). Ce modèle du conducteur contient plusieurs composants, [8].

Le premier s'appelle le modèle structurel, il représente la dynamique humaine neuromotrice. Ce composant représente la partie haute fréquence de compensation du conducteur et est généralement modélisé par un retard pur $\tau_p = 0.2.s$ et un filtre passe-bas de second ordre avec le facteur atténuateur $\zeta_n = 0.707$ et la fréquence normale $\omega_n = 10rad/s$.

Le deuxième composant qui correspond aux actions prédictives du conducteur, est représenté par le filtre de premier ordre, où le temps τ_L constant est représentatif de la charge mentale du conducteur.

Le troisième composant est un gain simple représentant l'action proportionnelle du conducteur à l'angle de roulis perçu de la moto par rapport à l'angle de roulis désiré. Il faut noter que tous ces paramètres ne sont pas constants et sont seulement valides pour des configurations restreintes de la moto et du conducteur. Ce modèle est bouclé par une action proportionnelle à la différence entre l'angle de roulis désiré ϕ_{des} et l'angle de roulis réel ϕ de la moto. Ce type de commande par conducteur suppose que le conducteur essaie de stabiliser la moto en inclinant à gauche et à droite la partie supérieure de son corps [8].

Notons que cette première action de commande peut (ou ne pas) réaliser la stabilisation selon la vitesse longitudinale.

Le modèle final du couple moto-conducteur est obtenu en incluant dans le modèle de moto, le modèle du conducteur qui fait intervenir le couple de direction T et l'angle de roulis de la partie supérieure du corps du conducteur ϕ . L'entrée de commande est le couple d'angle de direction qui sera commandé en partie par le conducteur selon l'angle de roulis désiré.

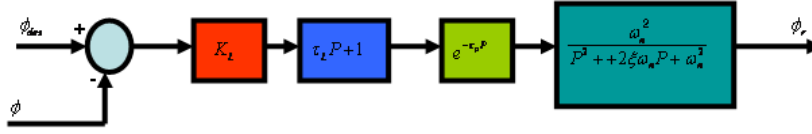


Fig.3. Modèle de stabilisation par mouvement de buste.

4. Synthèse d'une commande stabilisante (LQG)

L'objectif de la commande linéaire quadratique (LQ) est de formuler le problème de commande par retour d'état en terme d'optimisation d'un critère qui traduit un compromis entre l'effort demandé à la commande (actionneurs) et les contraintes qu'on veut imposer à l'état. En effet ces contraintes et l'effort demandé aux actionneurs ne sont pas vraiment pris en compte explicitement dans le cas de la commande modale [11]. Tout ce qu'on peut dire c'est que plus le système doit être rapide plus de grandes amplitudes de commandes sont nécessaires. Or ces amplitudes sont limitées par les actionneurs. Le problème de commande LQ est de déterminer la loi de commande optimale $u_{opt}(t) = -K.x$ qui minimise le critère quadratique suivant :

$$J = \frac{1}{2} \lim_{t_1 \rightarrow +\infty} \left\{ \int_{t_0}^{t_1} [x^T(t).Q(t).x(t) + u^T(t).R(t).u(t)] dt \right\}$$

Avec $Q(t) \geq 0$, est une matrice de pondération qui donne un poids différent à chaque composante du vecteur d'état dans le critère, $R(t) > 0$ est une matrice de pondération de la commande qui affecte un poids différent à chaque composante du vecteur de commande.

La synthèse de la commande linéaire quadratique (LQ), nécessite la connaissance du vecteur d'état. Cependant, dans la majorité des problèmes de commande, on ne dispose que d'une connaissance partielle du vecteur d'état comme dans le cas du modèle de la moto. Dans ce cas là, on fait appel à la commande (LQG), qu'est la commande LQ associée à un filtre de Kalman [9].

5. Application à la stabilisation du mouvement de roulis du système Moto-Conducteur

A l'aide d'une centrale inertielle on mesure les vitesses angulaires ; $\dot{\phi}$ et r , et à l'aide d'un capteur d'angle de braquage (angle de direction avant), on mesure δ_f .

5.1. Choix des matrices de pondération

Les matrices de pondération sont, généralement, choisies diagonales où [11]:

$$Q = \text{diag} (q_1, q_2, \dots, q_q) \quad R = \text{diag} (r_1, r_2, \dots, r_m)$$

Pour faire une évaluation initiale de Q et R, on se basera sur le calibrage physique des entrées-sorties correspondantes, en prenant (Règle de Bryson)

$$r_i = \left[\frac{1}{\sup(u_i)} \right]^2, \quad i=1, 2, \dots, m \quad q_i = \left[\frac{1}{\sup(y_i)} \right]^2, \quad i=1, 2, \dots, q$$

6. Résultats de simulation

On montre ici uniquement l'ensemble de simulation qui concerne la dynamique du système moto-conducteur en poursuite.

On suppose que la moto est sur une section de route droite (ligne droite), à une vitesse fixée à 20 m/s avec l'angle de roulis égal à zéro. Le conducteur par l'intermédiaire du couple appliqué sur le guidon, réalise un double changement de voie (manœuvre chicane).

Dans ce qui suit la stabilisation est réalisée uniquement par la rétroaction sur le couple de direction figure (4).

Les figures.5. , montrent la réponse des différents états du système pour une manœuvre chicane sur le couple de direction. La réponse du système en angle de roulis est correcte et le système est stable. On observe également, une bonne estimation des états non mesurable qui suivent fidèlement celles du modèle de référence.

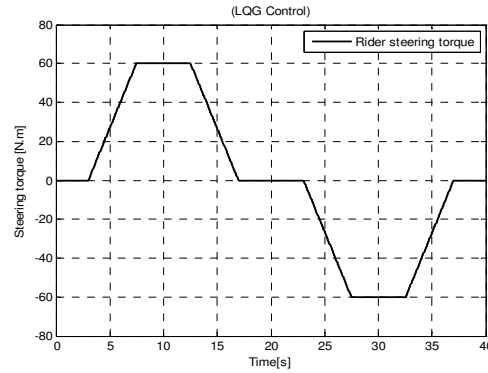


Figure.4. Entrée en couple de direction

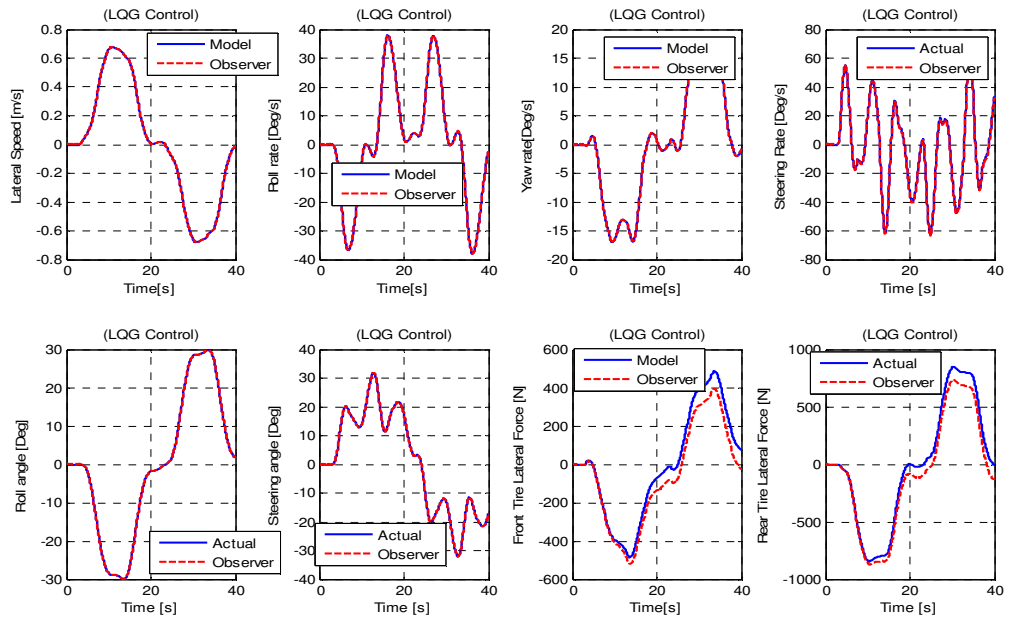


Figure.5. états stables du système et leurs estimées

7. Conclusion

Dans cet article, quelques aspects généraux des développements d'un modèle de moto sont présentés en incluant le pneumatique, et des aspects de stabilité sont discutés. Par la suite, un modèle de conducteur reproduisant le mouvement d'inclinaison de la partie supérieure du corps du conducteur est ajouté au modèle. Cette commande du conducteur peut ou ne pas stabiliser la moto. Un procédé de synthèse de commande est développé pour la stabilisation du mouvement de roulis du modèle au moyen du couple de direction avant. La méthode de commande LQ associée à un estimateur de Kalman (LQG) est utilisée pour la stabilisation robuste. Le contrôleur est synthétisé pour le suivi d'un modèle de référence. Les résultats de simulation prouvent que le contrôleur synthétisé assure un bon suivi des manœuvres en roulis. Les résultats prouvent également que les performances demeurent.

Cependant, l'utilisation d'une méthode de séquençage de gain en fonction de la vitesse s'avère nécessaire afin de conserver de bonnes performances en cas de variation de la vitesse longitudinale.

8. Bibliographie

1. R.S. Sharp, *The stability and control of motorcycles*. Jour. Mech. Eng. Sci. 13(5), 316–329, 1971.
2. R.S. Sharp, and D.J.N. Limebeer, *A motorcycle model for stability and control analysis*. Multi-body System Dynamics 6(2), 123–142, 2001.
3. R.S., Sharp, *Stability, Control and steering responses of motorcycles*. Vehicle System Dynamics 35(4–5), 291–318. and Zeitlinger, Lisse.Vienna. 334–342, 2001.
4. R.S., Sharp, S. Evangelou and D.J.N. Limebeer. *Improvements in the modelling of motorcycle dynamics*. In: ECCOMAS Thematic Conference on Advances in Computational Multibody Dynamics (J.A.C. Ambrósio, Ed.). Lisbon. MB2003-029 (CD-ROM), 2003.
5. R.S., Sharp, *The stability of motorcycles in acceleration and deceleration*. In: Inst. Mech.Eng. Conference Proceedings on "Braking of Road Vehicles". MEP. London, 45–50; 1976.
6. R.S., Sharp, *Variable geometry active rear suspension for motorcycles*. In: Proc. of the 5th International Symposium on Automotive Control (AVEC 2000). Ann Arbor MI. 85–592, 2000.
7. R.S., Sharp, *Vibrational modes of motorcycles and their design parameter sensitivities*. In: Vehicle NVH and Refinement, Proc Int Conf. Mech. Eng. Publications, London. Birmingham, 107–121, 1994.
8. H. C., Lai Liu, J.S., Lee, D.T., Wang, L.S., *Design parameters study on the stability and perception of riding comfort of the electrical motorcycles under rider leaning*, Mechatronics, 13, 49–76, 2003.
9. B. Mourillion. *Notes de cours de master RVSI : Estimation Filtrage et localisation*. Université d'Evry Val d'Essonne, France. 2007.
10. E. Bakker, H. B. Pacejka, and L. Lidner. *A new tire model with an application in vehicle dynamics studies*. SAE paper, (n.890087), 1989. -47–
11. P. De Larminat, *Automatique : Commande des systèmes linéaires*. 2ème édition revue et augmentée, Edition Hermès, Paris 1993-1996.
12. Sécurité routière, *la sécurité routière en France, bilan de l'année 2006, la documentation française*, Paris, 2007.