

Validation Expérimentale et Ajustement du Modèle Numérique d'une Suspension Semi-Active Intégrant un Amortisseur Magnétorhéologique

S. BOUKERROUM^a, N. HAMZAOU^b

a. USTHB/FGMGP, LMA, BP 32 El Allia 16111, Bab Ezzouar Alger, Algérie

b. INSA de Lyon, LVA, Bâtiment A de S^T Exupéry, 25 bis avenue Jean Capelle 69621 Villeurbanne, France

Résumé :

Ce présent travail consiste en une analyse des performances d'une suspension de véhicule à deux degrés de liberté, régie par une loi paramétrique du type semi-active à commande continuellement variable modifiée (CCVM), et intégrant un amortisseur MagnétoRhéologique (MR). Deux modèles de dynamique interne de l'amortisseur MR ont été analysés. Il s'agit des modèles de Bouc-Wen et de Bouc-Wen modifié, avec une confrontation de leurs performances sur la base des réponses calculées du modèle numérique et mesurées expérimentalement sur un banc d'essai d'une suspension semi-active intégrant un amortisseur MR et contrôlée par la chaîne de contrôle dSPACE. Afin de valider les performances de nouvelles lois de commande, on a recours le plus souvent à des études expérimentales parfois très complexes et onéreuses. Pour pouvoir disposer d'un modèle d'amortisseur MR plus représentatif, susceptible de se substituer à l'expérimentation dans d'autres études, il est donc nécessaire de le valider en temps réel à travers une confrontation 'calcul-essai', où le recalage (ajustement) est l'un des objectifs de cette confrontation pour une meilleure représentativité du modèle numérique. Un rapprochement entre les réponses mesurées et celles calculées pour les mêmes caractéristiques dynamiques du banc d'essai reste possible, en ajustant les paramètres les plus influents du modèle numérique. Les résultats de cette étude ont montré que le modèle de Bouc-Wen modifié est plus représentatif du comportement réel d'un amortisseur MR, vu sa sensibilité aux faibles vitesses, lors des transitions entre les phases de compression et de détente de l'amortisseur.

Mots clés : Suspension semi-active, Amortisseur MR, Modèle de Bouc-Wen, Modèle de Bouc-wen modifié, Loi de Commande, Contrôle en temps réel.

Abstract:

The present work is an analysis of the vehicle suspension performance with two degrees of freedom, governed by a semi-active modified of a continuously variable command (MCVC) law type, and incorporating a magnetorheological damper (MR). Two models of the MR damper internal dynamics have been analyzed. It is the Bouc-Wen and modified Bouc-Wen models with a comparison of their performances on the basis of the calculated from the numerical model and experimentally measured responses on a test bench with a semi-active suspension incorporating a MR damper and controlled by the dSPACE control chain. To validate the performances of new control laws, we use most often the experimental studies which are very complex and expensive. To have a MR damper model more representative, may substitute for experimentation in other studies, it is necessary to validate in real time through a confrontation 'calculation-test', where the retiming (adjustment) is one of this confrontation objectives for a better numerical model representatively. A rapprochement between the measured responses and those calculated for the same dynamic characteristics of the test bench is possible by adjusting the most influential parameters of the numerical model. The results of this study showed that the modified Bouc-Wen model is more representative of the real behaviour of an MR damper, given its sensitivity at low speeds, during transitions between compression and expansion phases of the damper.

Keywords: Semi-active suspension, MR damper, Bouc-Wen model, Modified Bouc-Wen model, Control law, Real time control.

1 Modèles dynamiques

La figure 1 représente le schéma fonctionnel d'une suspension semi-active à deux degrés de liberté modélisant le quart de véhicule et intégrant un amortisseur MR dans la suspension secondaire. Dans cette étude, la dynamique interne de cet amortisseur est régie par deux modèles distincts : Le modèle de Bouc-Wen [1] qui tient compte de l'hystérésis et le modèle de Bouc-Wen modifié qui en plus, tient compte de l'effet de l'accumulateur [3].

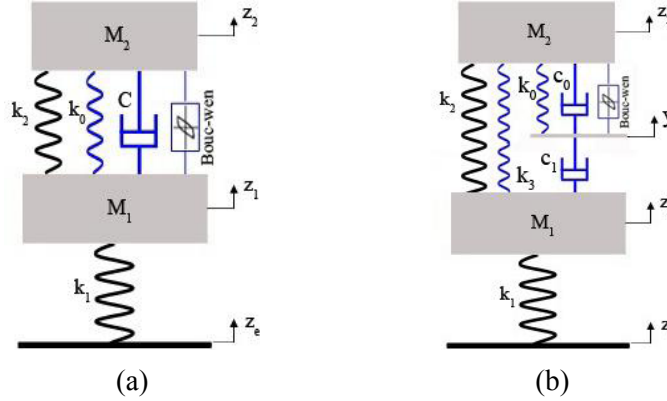


FIG 1. Suspension semi active à 2d°dl intégrant un amortisseur MR avec les modèles de Bouc-Wen (a) et de Bouc-Wen modifié (b)

La variation de l'amortissement est obtenue par modification de la viscosité de l'huile de l'amortisseur MR commandé par un courant continu. A partir de la mesure des accélérations par des capteurs disposés sur les deux masses vibrantes, on peut commander en temps réel la force d'amortissement développée par l'amortisseur, en utilisant un algorithme de contrôle déduit de la loi de commande semi-active du type continuellement variable modifiée [2].

2 Suspension secondaire passive

2.1 Modèle de Bouc-Wen

Le modèle de Bouc-Wen (figure 1.a) est extrêmement souple et peut traiter une grande variété de comportements par hystérésis [1,3]. En considérant les équations de mouvement et les paramètres qu'introduit ce modèle, la force dissipative générée par la suspension secondaire s'écrit :

$$F_d = c\dot{z}_r + k_0 z_r + \alpha z \quad (1)$$

Où z_r et \dot{z}_r , sont respectivement le déplacement et la vitesse relatifs de la masse suspendue M_2 . z est la fonction d'hystérésis proposée par Wen [1]. Sa variation est donnée par l'équation :

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{z}_r| z |z|^{n-1} - \beta \dot{z}_r |z|^{n-1} - \beta \dot{z}_r |z|^n + A \dot{z}_r \quad (2)$$

2.2 Modèle de Bouc-Wen modifié

Pour mieux prévoir la réponse de l'amortisseur aux basses vitesses (par la présence de l'accumulateur), une version modifiée (figure 1.b) du modèle de Bouc-Wen a été présentée par Spencer [1]. Pour obtenir les équations correspondant à ce modèle, seule la section supérieure est considérée, où la variable y tirée des équations de mouvement de ce système est donnée par :

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} [\alpha z + c_0 \dot{z}_2 + k_0 (z_2 - y) + c_1 \dot{z}_1] \quad (3)$$

La force dissipative totale générée par le système est alors la somme des forces des sections supérieure et inférieure du système :

$$F_d = c_0(\dot{z}_2 - \dot{y}) + k_0(z_2 - y) + k_1 z_r + \alpha z \quad (4)$$

La fonction z d'un tel modèle est donc donnée par l'équation :

$$\dot{z} = -\gamma |(\dot{z}_2 - \dot{y})| z |z|^{n-1} - \beta (\dot{z}_2 - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{z}_2 - \dot{y}) \quad (5)$$

3 Suspension secondaire semi-active

3.1 Modèle de Bouc-Wen

Pour cette loi de commande, la force dissipative F_d donnée par l'équation (1), est régie cette fois-ci par la loi de contrôle semi active à commande continuellement variable modifiée qui découle de la loi ON/OFF [4] ci-après :

$$F_d = \begin{cases} C_d \dot{z}_r + k_0 z_r + \alpha z; & \text{si } \dot{z}_2 \dot{z}_r > 0 \\ C_{\min} \dot{z}_r + k_0 z_r + \alpha z; & \text{si } \dot{z}_2 \dot{z}_r \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Contrairement à la loi ON/OFF, à la condition $\dot{z}_2 \dot{z}_r > 0$, l'amortisseur développe une force dissipative de coefficient d'amortissement C_d pouvant prendre selon le cas les valeurs suivantes :

$$C_d = \begin{cases} C_{\max} & \text{si } C_s \left(\frac{\dot{z}_2}{\dot{z}_r} \right) > C_{\max} \\ C_s \left(\frac{\dot{z}_2}{\dot{z}_r} \right) & \text{si } C_p < C_s \left(\frac{\dot{z}_2}{\dot{z}_r} \right) \leq C_{\max} \\ C_p & \text{si } C_s \left(\frac{\dot{z}_2}{\dot{z}_r} \right) \leq C_p \end{cases} \quad (7)$$

Où :

C_{\max} : est la valeur maximale de l'amortissement du système semi actif (CCVM).

C_{\min} : est la valeur minimale de l'amortissement du système semi actif (CCVM).

C_s : est la valeur optimale de l'amortissement du système "SKYHOOK".

C_p : est la valeur optimale de l'amortissement du système passif.

3.2 Modèle de Bouc-Wen modifié

La force dissipative totale F_d générée par le système passif et donnée par l'expression (4), obéit cette fois-ci à la fonction condition de la même loi de commande ci-dessous :

$$F_d = \begin{cases} C_{0d}(\dot{z}_2 - \dot{y}) + k_0(z_2 - y) + k_3 z_r + \alpha z; & \text{si } \dot{z}_2 \dot{z}_r > 0 \\ C_{0\min}(\dot{z}_2 - \dot{y}) + k_0(z_2 - y) + k_3 z_r + \alpha z; & \text{si } \dot{z}_2 \dot{z}_r \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

Où le coefficient d'amortissement C_{0d} peut prendre des valeurs selon les conditions (7).

4 Banc d'essai expérimental

Le banc d'essai expérimental représenté par la figure 2, a été monté au LVA de l'INSA de Lyon. Il reproduit les éléments du modèle dynamique à 2 d°dl de la figure 1, et intègre un amortisseur du type MR : le RD-1005-3 de LORD Corporation [5] commandé par un contrôleur de courant de la chaîne de contrôle.

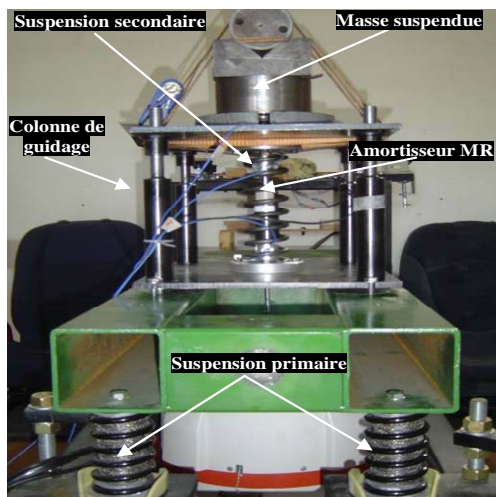


FIG 2. Banc d'essai expérimental d'une suspension à 2 d°dl

Cette chaîne d'acquisition et de contrôle du banc d'essai est composée d'un système de contrôle dSPACE, muni du logiciel ControlDesk s'exécutant sous environnement Matlab/Simulink. L'organigramme de contrôle en temps réel de la suspension secondaire du banc d'essai est représenté par la figure 3.

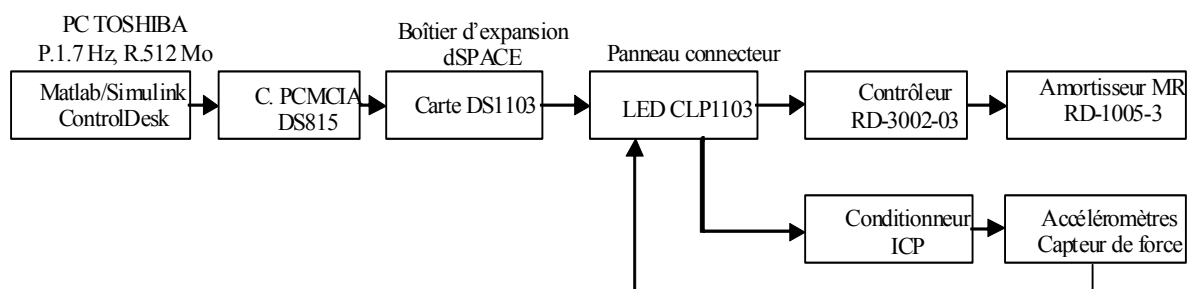


FIG 3. Organigramme d'acquisition et de contrôle de la suspension secondaire

5 Résultats et discussion

5.1 Evolution de la force d'amortissement

La figure 4 représente les courbes de réponse à une entrée sinusoïdale de la force d'amortissement mesurée et celle calculée pour une simulation numérique utilisant les modèles de Bouc-Wen et de Bouc-Wen modifié comme dynamique interne de l'amortisseur MR gouverné par la loi (CCVM).

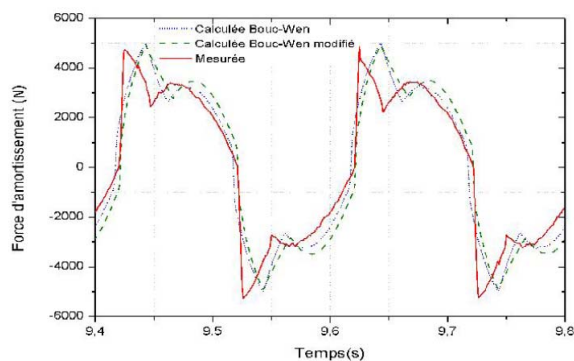


FIG 4. Force d'amortissement en fonction du temps

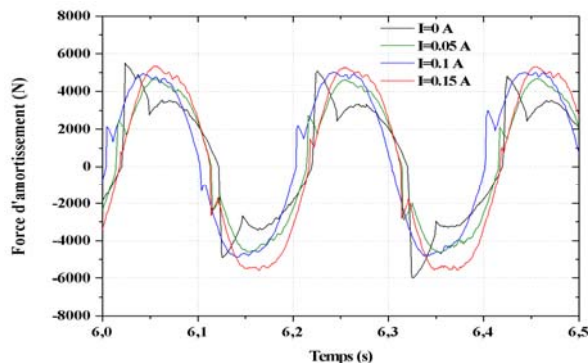


FIG 5. Force d'amortissement mesurée en fonction du courant I

En ajustant le courant continu délivré à l'amortisseur MR, on peut quantifier par des fonctions polynomiales (tableau 1) les paramètres (α , β ; γ ; n ; A) des expressions (2) et (5) caractérisant la fonction d'hystérésis de la dynamique interne de cet amortisseur. A partir de la figure 4, on peut constater que les courbes de la force dissipative calculées à partir de ces deux modèles, se rapprochent en termes de fréquence et d'amplitude de la force mesurée. Cette dernière croît en fonction du courant délivré à l'amortisseur jusqu'à saturation pour $I=1.5A$ (figure 5).

TAB 1. Fonctions polynomiales des paramètres du modèle de Bouc-Wen [6]		
α	N/m	$2.11 \times 10^3 i + 1.68 \times 10^3$
n	/	$0.12 i + 1.58$
A	/	$0.5 \times 10^5 i + 2.5 \times 10^5$
β	m^{-2}	$-0.45 \times 10^6 i + 3.18 \times 10^6$
γ	m^{-2}	$0.39 \times 10^6 i + 3.6 \times 10^6$

5.2 Réponses à une excitation aléatoire (bruit blanc)

Les réponses mesurées à une excitation aléatoire du type bruit blanc (figure 6), sont représentées pour la suspension secondaire contrôlée par le schéma (CCVM). Les performances de ce schéma sont comparées à celles d'une suspension passive (figure 6.f) avec un coefficient d'amortissement constant égal à C_{min} (sans courant délivré à l'amortisseur MR) et pour la même excitation.

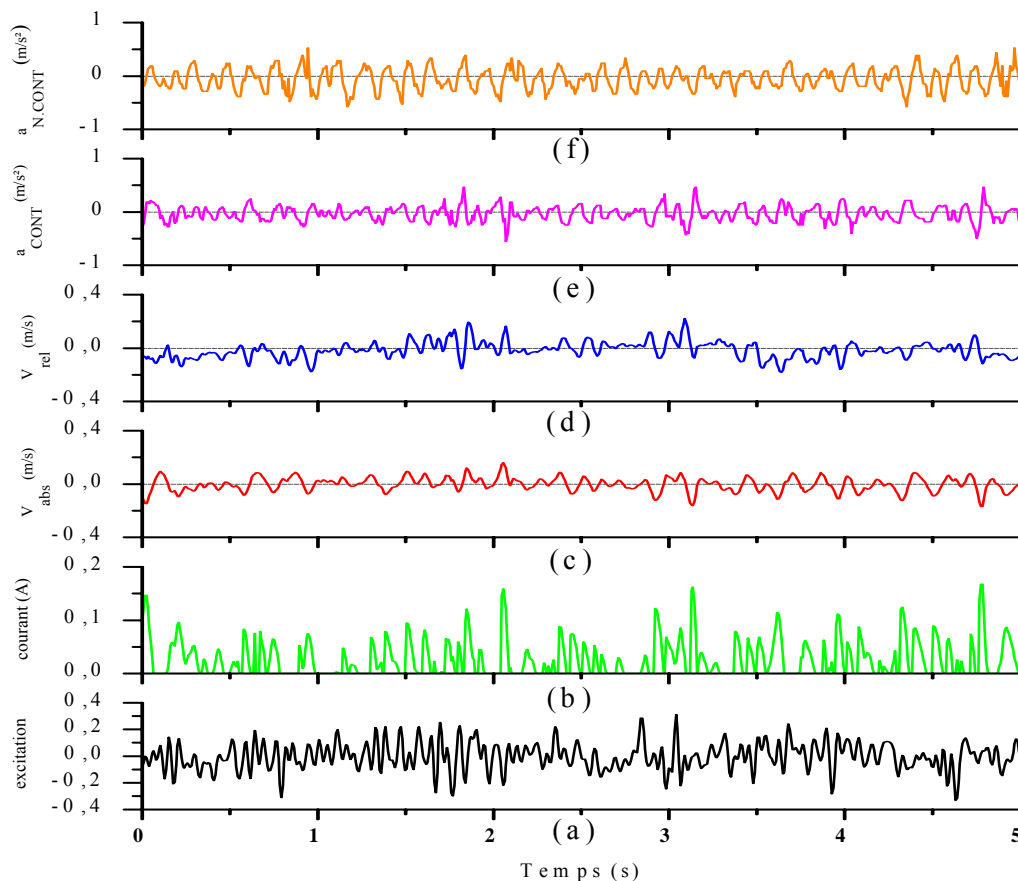


FIG 6. Réponses mesurées du schéma de contrôle (CCVM) à une excitation bruit blanc

Le courant délivré par le contrôleur à l'amortisseur MR de manière continue (figure 6.b) est compris entre deux valeurs limites : $I=0$ A pour un amortissement C_{min} , et $I=0.15A$ pour l'amortissement C_{max} . Ce courant délivré à l'amortisseur MR, obéit parfaitement à la loi de commande (CCVM), dont les paramètres de

contrôle sont représentés par les figures 6.c et 6.d. Ce schéma de contrôle entraîne une réduction significative des amplitudes d'accélération de la masse suspendue (figure 6.e), comparativement au cas passif (figure 6.f).

6 Conclusion

Les résultats de cette analyse, nous ont montré l'intérêt d'intégrer la dynamique interne de Bouc Wen modifié pour prévoir le comportement de l'amortisseur MR. En effet, on a pu vérifier l'efficacité de ce modèle élaboré par Spencer [1], qui relativement au modèle de Bouc-Wen, il est plus représentatif de l'amortisseur MR, car il rapproche le comportement du modèle numérique du modèle réel en particulier aux faibles vitesses, lors des transitions. En adoptant un schéma de contrôle approprié et en ajustant finement le courant I délivré à l'amortisseur MR suivant la fonction objective à atteindre, on peut ajuster les paramètres du modèle numérique pour approcher le modèle expérimental.

Ce travail nous a permis d'un autre coté de contrôler et de valider expérimentalement une suspension semi-active intégrant un amortisseur MR, piloté par la loi de commande continuellement variable modifiée (CCVM). Avec une excitation du type sinusoïdal, nous avons pu valider expérimentalement les programmes de contrôle sous Simulink/Matlab et exécutés en temps réel avec ControlDesk de dSPACE. En générant une excitation aléatoire au système de suspension, le temps de réponse entre l'instant où le courant est délivré à l'amortisseur et la mesure instantanée de l'accélération de la masse suspendue qui en résulte reste très faible, et comparable au temps de réponse du modèle numérique.

References

- [1] B. F. Spencer and al, (1997): "Phenomenological Model of a Magneto-Rheological Damper". *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE.123, pp. 230-238.
- [2] B. J. Chan and C. Sandru, (2003) "A Ray-Tracing Approach to Simulation and Evaluation of a Real-time Quarter Car Model with Semi-Active Suspension System Using Matlab", *Proceedings of DETC'03, Chicago, Illinois USA*, September 2-6.
- [3] Y. K. Wen, (1976) "Method for Random Vibration of Hysteresis Systems", *Journal of engineering mechanics division*. ASCE, vol 102, No EM2, pp 249-263.
- [4] J. Alanoly and S. Sankar, (1987) "A New Concept in Semi-Active Vibration Isolation", ASME, *Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design*, Vol 109, pp. 242-247.
- [5] Rheonetic RD-1005-3 MR damper. *Lord Corporation product bulletin*, 2001.
- [6] K. K. Ahn, D. Q. Truong and M. A. Islam, (2009) "Modeling of a Magneto-Rheological (MR) Fluid Damper Using a Self Tuning Fuzzy Mechanics", *Journal of Mechanical Science and Technology* 23, 1485~1499.
- [7] W. H. Liao and C. Y. Lai, (2002) "Harmonic Analysis of a Magneto-Rheological Damper for Vibration Control". *SMART material and structures*, pp 288-296.