



Stratégie d'isolation active-Integral estimated-Force Feedback

Thierry Verdot, Manuel Collet

► To cite this version:

Thierry Verdot, Manuel Collet. Stratégie d'isolation active-Integral estimated-Force Feedback. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03421301

HAL Id: hal-03421301

<https://hal.science/hal-03421301>

Submitted on 9 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Stratégie d'isolation active Integral estimated-Force Feedback

T. VERDOT^a, M. COLLET^a

a. Institut FEMTO ST, Département Méc'Appli, 24 rue de l'Epitaphe, 25000 BESANCON

Résumé :

La stratégie d'isolation active présentée dans cet article permet d'introduire un amortissement sky-hook dans un isolateur électromécanique afin de stabiliser sa dynamique tout en conservant ses performances d'isolation en haute fréquence. Son originalité réside dans l'emploi d'un capteur de débattement relatif pour estimer l'effort transmis puis dans l'utilisation de cette estimation pour effectuer la rétroaction en force. Suite à la description de son principe de fonctionnement, une brève étude théorique du système bouclé est effectuée. Nous présentons enfin la mise en œuvre expérimentale de la stratégie Integral estimated-Force Feedback sur une micro suspension active piézocomposite.

Abstract :

The active isolation strategy presented in this paper is used to introduce sky-hook damping in a mechanical isolator which stabilizes its dynamics while preserving its insulation performance at high frequency. Its originality lies in the use of a relative displacement sensor to estimate the transmitted force and then in the use of the estimated-force to perform Integral Force Feedback. After description of its working principle, a brief study of the closed loop system is conducted. Finally, we present experimental implementation of the Integral estimated-Force Feedback strategy on a piezoelectric micro active suspension device.

Mots clés : stratégie d'isolation active ; amortissement sky-hook ; rétroaction par intégration de l'effort estimé.

1 Introduction

Dans tout dispositif d'isolation passif, l'ajout d'amortissement permet d'atténuer la surtension à la résonance mais s'accompagne inévitablement d'une perte des performances d'isolation en haute fréquence. Il est ainsi souvent nécessaire de limiter la raideur de la suspension ou d'augmenter la masse de l'ensemble suspendu ce qui entraîne un débattement plus important en basse fréquence et accroît les risques de collision ou de rupture de la suspension. Pour s'affranchir de ce compromis, la méthode la plus répandue consiste à introduire un amortissement de type *sky-hook* qui permet d'atténuer la surtension à la résonance et de conserver les performances d'isolation haute fréquence comme illustré en FIG. 2. Ce type d'amortissement est obtenu en équipant l'isolateur d'un actionneur en parallèle de l'étage de suspension pour imposer une contre-réaction proportionnelle à la vitesse absolue de la plateforme. Cette dernière se retrouve alors activement liée à un amortisseur "accroché au ciel" ou *sky-hook*, représenté en FIG. 1.

La problématique essentielle dans un référentiel inertiel, réside dans le seul fait d'obtenir un signal de commande proportionnel à la vitesse absolue de la plateforme. La solution la plus intuitive consiste à utiliser un accéléromètre disposé sur la plateforme terminale. L'intégration de la mesure puis son amplification permet d'obtenir la commande à imposer à l'actionneur via une boucle de rétroaction négative. Lorsque la plateforme isolée est rigide, l'emploi d'un capteur mesurant l'effort transmis à la plateforme aboutit à un résultat similaire. L'utilisation de la stratégie par retour de force est néanmoins recommandée par [1, 2] car elle permet de garantir la stabilité d'un ensemble isolé flexible.

Les difficultés rencontrées pour intégrer un capteur de force [3, 4, 5] ont conduit progressivement à renoncer à la stratégie de rétroaction par intégration de force (ou IFF-*Integral Force Feedback*) pour proposer une

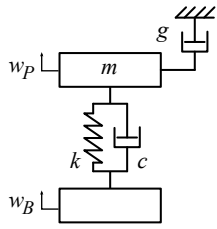


FIG. 1 – Isolateur mécanique équipé d'un amortisseur passif (c) et sky-hook (g).

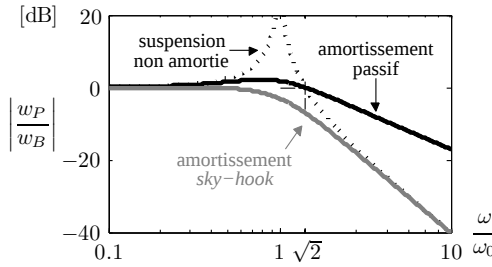


FIG. 2 – Transmissibilité de l'isolateur de la FIG. 1 en fonction de la nature de l'amortissement.

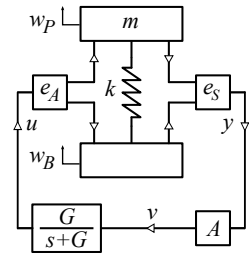


FIG. 3 – Architecture d'un isolateur *Integral estimated-Force Feedback*.

stratégie d'isolation active originale, présentée ici. Suite à la description de son principe de fonctionnement, nous effectuons l'étude théorique du système en boucle fermée. Nous présentons enfin sa mise en œuvre, effectuée sur une micro suspension active piézocomposite.

2 Synthèse de la stratégie d'isolation

La stratégie *Integral estimated-Force Feedback* (IeFF) élaborée au cours des travaux de thèse [6] permet d'ajouter un amortissement *sky-hook* dans une suspension électromécanique équipée d'un capteur de débattement relatif comme illustré en FIG. 3. Pour une suspension dont l'amortissement naturel et négligeable et en considérant les transducteurs idéalement linéaires, l'équilibre mécanique de la plateforme isolée et la mesure du débattement s'écrivent :

$$m\ddot{w}_P = -k\Delta w + e_A u \quad (1)$$

$$y = e_s \Delta w \quad (2)$$

La dénomination *Integral estimated-Force Feedback* adoptée pour la stratégie proposée souligne sa parenté avec la stratégie IFF et l'utilisation de l'estimation de l'effort pour son application. Imaginons que la mesure de l'effort transmis $f_P = m\ddot{w}_P$ soit disponible et que l'isolateur actif soit initialement au repos ; à savoir $u(t_0) = 0$ et $\dot{x}_P(t_0) = 0$. L'application de l'IFF consiste à établir la commande sous la forme (3) puis à prescrire cette commande à l'actionneur pour obtenir un amortissement *sky-hook* de valeur Gm .

$$e_A u(t) = -G \int_{t_0}^t f_P(\tau) d\tau = -Gm\dot{w}_P(t) \quad (3)$$

Considérons qu'il soit impossible de mesurer l'effort transmis. L'effort de rétroaction est connu *a priori* car proportionnel à la commande imposée par le contrôleur que nous cherchons à construire. L'équilibre de la plateforme isolée (1) suggère alors d'employer la mesure du débattement relatif (2) pour estimer l'effort transmis sous la forme $\tilde{f}_P = e_A(-Ay + u)$. L'utilisation de l'effort estimé $\tilde{f}_P$ à la place de l'effort transmis f_P dans la rétroaction (3) permet d'établir l'expression de la consigne sous la forme (4).

$$u(t) - u(t_0) = -G \int_{t_0}^t [-Ay(\tau) + u(\tau)] d\tau \quad (4)$$

Considérant la consigne initiale nulle, le transfert du contrôleur à insérer dans la boucle s'écrit sous la forme (5). Il s'agit d'un simple intégrateur dont le gain statique A permet d'ajuster la qualité d'estimation. L'estimation exacte est obtenue lorsque le gain statique de boucle ouverte (noté a) est unitaire. Pour cette valeur, le contrôleur IeFF permet d'obtenir un amortissement *sky-hook* dont le coefficient d'amortissement réduit, noté ξ_{sky} , est fixé par le rapport entre la fréquence de coupure de l'intégrateur G et la fréquence de résonance de l'isolateur mécanique $\omega_0 = \sqrt{k/m}$.

$$\frac{u}{y} = A \frac{G}{j\omega + G} \quad \text{où} \quad \begin{cases} A = a \frac{k}{e_A e_s} \\ G = 2\xi_{sky}\omega_0 \end{cases} \quad (5)$$

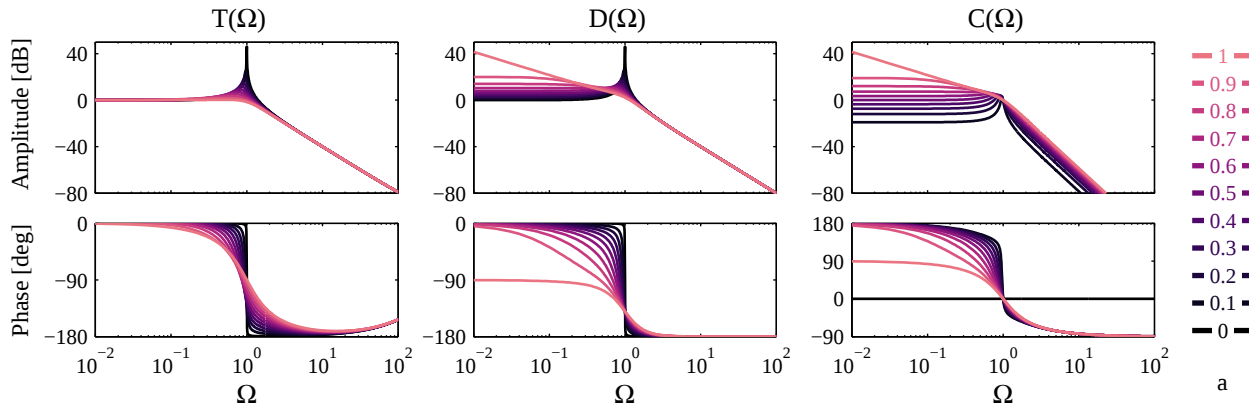


FIG. 4 – Evolution des transferts du système bouclé en fonction du gain de boucle (a) pour un objectif d'amortissement fixé à $\xi_{sky} = 60\%$.

3 Etude théorique du système bouclé dans l'espace des paramètres contrôleur

L'estimation parfaite n'est pas réalisable en pratique en raison des incertitudes sur les différents paramètres de l'isolateur électromécanique et du contrôleur, ce qui impose de conserver le paramètre a pour l'étude du système bouclé. Sa mise en équation, effectuée dans le référentiel inertiel lié à la base de l'isolateur, permet d'exprimer les transferts nécessaires à son dimensionnement. Nous indiquons ici la transmissibilité de la suspension active (T), le transfert entre la force de rappel élastique et la force d'inertie d'entraînement (D) et le transfert entre la force de contrôle et la force d'inertie d'entraînement (C) exprimés en fonction de la fréquence réduite $\Omega = \omega/\omega_0$.

$$T(\Omega) = \frac{(m)}{(m)} \frac{\ddot{w}_P(\Omega)}{\ddot{w}_B(\Omega)} = \frac{j\Omega + (1-a)G/\omega_0}{j\Omega(1-\Omega^2) + (1-a)G/\omega_0} \quad (6)$$

$$D(\Omega) = -\frac{k}{m} \frac{\Delta w(\Omega)}{\ddot{w}_B(\Omega)} = \frac{j\Omega + G/\omega_0}{j\Omega(1-\Omega^2) + (1-a)G/\omega_0} \quad (7)$$

$$C(\Omega) = \frac{e_A}{m} \frac{u(\Omega)}{\ddot{w}_B(\Omega)} = -\frac{j\Omega + aG/\omega_0}{j\Omega(1-\Omega^2) + (1-a)G/\omega_0} \quad (8)$$

L'application du critère de Routh-Hurwitz sur le dénominateur commun aux transferts du système bouclé permet de déterminer les valeurs de paramètres (9) pouvant être adoptées sans risque d'instabilité. La limite de stabilité en $a = 1$ indique que l'application de la stratégie IeFF permet de "converger" vers la stratégie IFF en s'approchant du gain statique de boucle ouverte unitaire sans toutefois pouvoir l'atteindre en raison du risque d'instabilité encouru.

$$0 < G/\omega_0 \quad \text{et} \quad 0 < a < 1 \quad (9)$$

Les transferts théoriques du système bouclé sont tracés en FIG. 4. Bien que l'IFF soit inaccessible, la transmissibilité d'un isolateur actif IeFF possède toutes les caractéristiques d'un amortissement *sky-hook*. L'augmentation du gain de boucle permet d'obtenir la stabilisation de la dynamique de suspension sans dégradation de sa performance d'isolation en haute fréquence. Elle n'affecte pas non plus la transmissibilité basse fréquence et cela quel que soit le choix des paramètres de contrôle comme l'indique la valeur statique de la transmissibilité $T(0)$. En contrepartie, la stabilisation de la dynamique de l'isolateur obtenue en augmentant le gain de boucle s'accompagne d'une amplification de la consigne imposée à l'actionneur et du débattement relatif de la suspension en basse fréquence. Le caractère instable de la boucle fermée pour $a = 1$ se traduit par le changement radical de la forme des transferts dont les amplitudes statiques deviennent alors infinie.

Dans l'étude théorique complète de l'IeFF effectuée dans [6], il est établi qu'un objectif d'amortissement fixé à $\xi_{sky} = 60\%$ permet d'atteindre des performances honorables avec un gain de boucle limité. En raison de niveaux de commande et de débattement modérés, cette configuration favorable est adoptée pour l'application concrète de cette stratégie.

4 Mise en œuvre expérimentale

L'architecture associée à la stratégie IeFF a été déclinée pour un microsystème piézocomposite fonctionnant selon un degré de liberté [6]. La plateforme au centre du dispositif est suspendue au cadre extérieur par un réseau de poutres silicium. Le cadre extérieur, d'encombrement 1 cm^2 , est fixé sur une table vibrante qui impose à l'ensemble son accélération ($\ddot{w}_B$). Les transducteurs sont intégrés au dispositif par l'intermédiaire d'un film PZT de $2.15\mu\text{m}$ d'épaisseur déposé par un procédé sol-gel. L'effet piézoélectrique transverse est exploité en équipant chaque transducteur de sa propre paire d'électrodes déposées en vis-à-vis sur les faces inférieures et supérieures du film. La forme des électrodes respecte la symétrie du système et permet d'obtenir un maximum d'autorité sur le mode de pompage à 2 514 Hz. Le transducteur central est utilisé comme capteur. Ses électrodes (V1 et V2) sont connectées à l'interface de mesure constituée d'un montage amplificateur dont l'entrée positive impose un courant nul et contraint les courants induits par le transducteur central à traverser la résistance R_S . La différence de potentiel aux bornes de R_S est amplifiée pour obtenir le signal de mesure (y) proportionnel au débattement de la suspension. L'interface de commande permet de garantir l'intégrité du transducteur externe employé comme actionneur. La résistance R_A , montée en parallèle de l'actionneur (entre V3 et V4) permet de dissiper les porteurs de charge libre accumulés sur les électrodes à l'arrêt de la commande et prévient ainsi tout risque de dépolarisation. La résistance R_L limite les courants haute fréquence empruntant les pistes du microsystème.

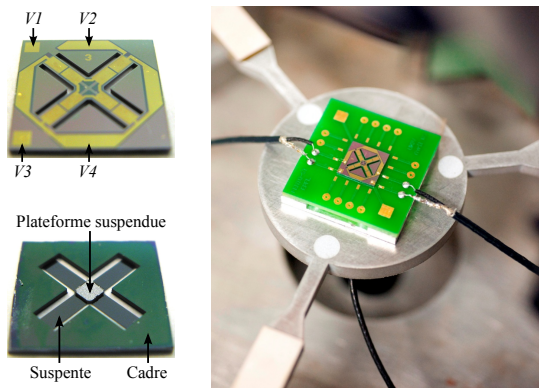


FIG. 5 – Vue détaillée du prototype de microsuspension active piézocomposite et vue du dispositif monté sur table vibrante.

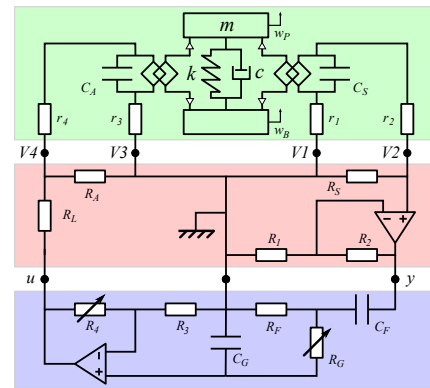


FIG. 6 – Schéma d'implantation de l'électronique de contrôle; de haut en bas : schéma simplifié de la suspension électromécanique en vert, interfaces de mesure (y) et de commande (u) en rouge et contrôleur IeFF en bleu.

La figure 7 regroupe les réponses en fréquence du système interfacé à une accélération de la table (tracée en pointillé). Sur l'accélération absolue de la plateforme (tracée en noir, en trait plein) on observe la surtension à la résonance de l'isolateur et l'atténuation obtenue au delà de la fréquence de coupure. La commande imposée étant nulle, le comportement du dispositif est analogue à celui d'un accéléromètre et la mesure de débattement relatif (tracée en bleu, en trait plein) est proportionnelle à l'accélération de la plateforme suspendue avec une sensibilité de 13 mV/g . La FIG. 8 correspond à la réponse du système à un bruit blanc imposé en entrée de l'interface de commande équipée de résistances R_A et R_L de valeur identique, égale à 680Ω . L'observation du transfert entre la commande et la mesure (en bleu) fait uniquement intervenir les modes symétriques du microsystème. La réalisation d'électrodes de référence distinctes pour chacun des transducteurs limite drastiquement le transfert électrique observé sur des dispositifs [4] et le signal de mesure est sensiblement proportionnel au débattement de la plateforme en basse fréquence. Le rapport $R_2/R_1 = 100$ adopté permet d'obtenir une sensibilité du capteur de débattement d'environ $1\text{ V}/\mu\text{m}$. La différence constatée à plus haute fréquence correspond à la contribution des modes de dynamique interne des suspentes à débattement de plateforme nul.

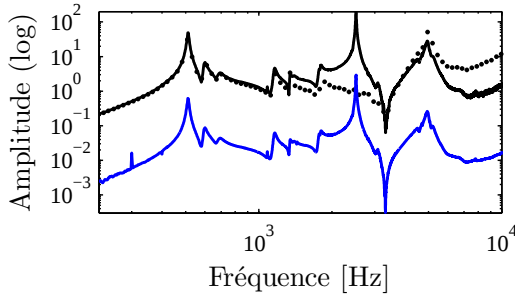


FIG. 7 – Réponses en fréquence au niveau accélération imposé $\ddot{w}_B$ (...). Niveaux d'accélération de la plateforme centrale $\ddot{w}_P$ (—) et du signal de mesure y (—)

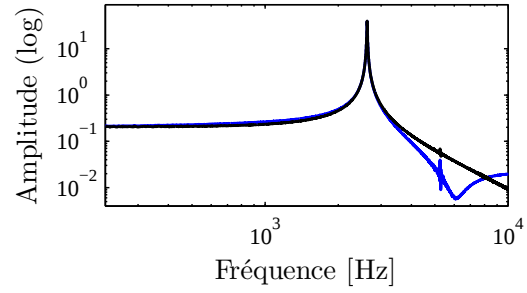


FIG. 8 – Réponses en fréquence à un bruit blanc imposé en entrée de l'interface de commande (u). Niveaux du débattement relatif Δw (—) et du signal de mesure y (—)

Le contrôleur IeFF employé pour la réalisation des essais expérimentaux est un circuit analogique constitué de trois sous-ensembles associés en série. L'amplificateur de tension non-inverseur (R_3, R_4) en sortie de boucle permet d'ajuster le gain statique de boucle associé au paramètre a du contrôleur. Il amplifie le signal sortant de l'intégrateur (R_G, C_G) dont la fréquence de coupure fixe l'objectif d'amortissement. Le filtre passe-haut (R_F, C_F), non mentionné dans les développements théoriques, permet d'atténuer la composante statique du signal de mesure due à une accélération permanente (la gravité) ou à un biais en sortie de l'amplificateur de mesure. En adoptant des condensateurs identiques $C_F = C_G = 100\text{ nF}$ et une résistance de filtre élevée ($R_F = 82\text{ k}\Omega$), le transfert du contrôleur (10) correspond au transfert d'un filtre passe-haut de fréquence de coupure 9.7Hz associé en série à un intégrateur dont la fréquence de coupure est ajustée en faisant varier la valeur de R_G . Il est tracé en FIG. 9 pour $R_4 = 0\Omega$.

$$\frac{u}{y} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \frac{1}{2} \frac{2/\tau_G}{j\omega + 2/\tau_G} \frac{j\omega}{j\omega + 1/(2\tau_F)} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \tau_G = R_G C_G \\ \tau_F = R_F C_F \end{cases} \quad (10)$$

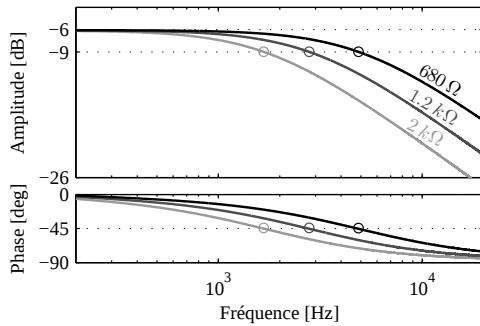


FIG. 9 – Transfert du contrôleur u/y pour R_4 nulle. L'objectif d'amortissement ξ_{sky} est fixé par le choix de R_G .

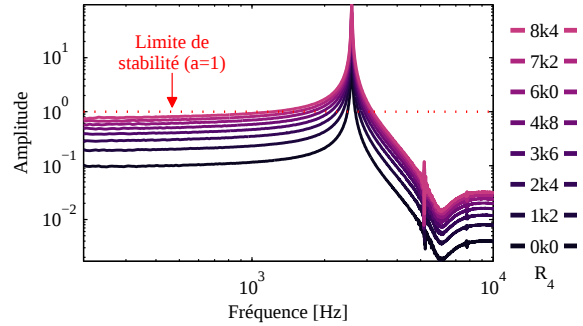


FIG. 10 – Transfert de la boucle ouverte pour R_G fixée à 1.2k Ω . La valeur de R_4 permet de faire varier la qualité d'estimation a .

Un objectif d'amortissement compris entre 35% et 100% est obtenu pour des valeurs de $R_G = 1/(\xi_{sky}\omega_0 C)$ comprises respectivement entre 2k Ω et 680 Ω . La valeur retenue pour la résistance $R_G=1.2\text{ k}\Omega$ correspond à un objectif d'amortissement à $\xi_{sky} = 58.9\%$ proche de celui adopté au cours de l'étude théorique. Le réglage du gain peut concrètement être effectué en observant l'amplitude du transfert du système en boucle ouverte tracé en FIG. 10. Dans un premier temps, l'amplificateur monté en suiveur (R_4 nulle) permet d'identifier le gain des différents sous-ensembles microsystème interfacé-contrôleur montés en série à environ $a_0 = 10\%$. Selon (9), le gain d'amplification ne doit pas excéder 10V/V ce qui correspond à un rapport $R_4/R_3 < 9$. L'emploi d'un potentiomètre $R_4 = [0 - 10]\text{ k}\Omega$ et d'une résistance $R_3=1.2\text{ k}\Omega$ permet d'effectuer le réglage du gain statique de boucle ouverte sans atteindre l'unité qui correspond à la limite de stabilité théorique du système bouclé.

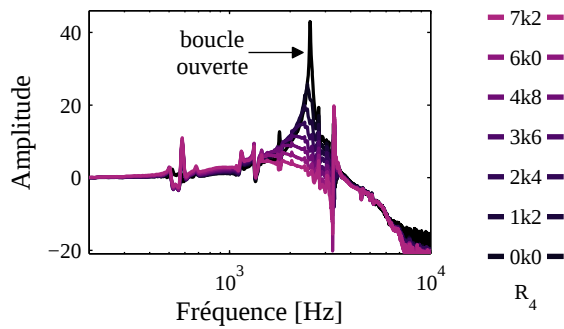


FIG. 11 – Amplitude de la transmissibilité $|\ddot{w}_P / \ddot{w}_B|$ du système bouclé ($R_G=1.2k\Omega$) en fonction de R_4 .

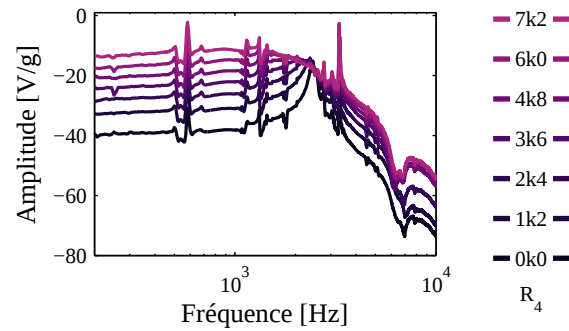


FIG. 12 – Amplitude du niveau de commande $|u / \ddot{w}_B|$ du système bouclé ($R_G=1.2k\Omega$) en fonction de R_4 .

La transmissibilité expérimentale du système bouclé entre l'accélération de la table imposée ($\ddot{w}_B$) et l'accélération de la plateforme suspendue ($\ddot{w}_P$) est tracée en FIG. 11 pour différentes valeurs du gain de boucle fixé par R_4 . Son évolution présente toutes les caractéristiques de l'amortissement *sky-hook* permettant d'obtenir une atténuation importante de l'amplitude à la résonance du mode de suspension (de l'ordre de -40dB) sans affecter la performance d'isolation haute fréquence ni la transmissibilité basse fréquence de l'isolateur passif. La commande synthétisée par le contrôleur a été simultanément enregistrée afin de tracer les transferts entre l'accélération imposée et le niveau de commande de la FIG. 12. Là encore, le comportement du système bouclé est conforme au transfert théorique C de la FIG. 4.

5 Conclusions

La stratégie d'isolation active *Integral estimated-Force Feedback* présentée dans cette communication constitue une réelle alternative aux stratégies par retour de force (ou d'accélération) traditionnellement employées pour implanter un amortissement *sky-hook* dans un isolateur mécanique embarqué. Son originalité réside dans l'emploi d'un capteur de débattement relatif pour estimer l'effort transmis à la plateforme isolée. Ainsi, à partir d'une grandeur relative mesurée dans le référentiel inertiel, l'estimation d'une grandeur absolue permet d'introduire activement un amortissement de type *sky-hook* qui stabilise la dynamique de l'isolateur mécanique sans en modifier la transmissibilité en basse fréquence et les performances d'isolation en haute fréquence. Elle a été appliquée avec succès sur un prototype de micro suspension active piézocomposite conçu spécifiquement pour son application au cours de travaux de thèse [6].

Références

- [1] A. Preumont, A. Francois, F. Bossens and A. Abu-Hanieh 2002 Force Feedback versus acceleration feedback in active vibration isolation *Journal of Sound and Vibration* **257/4** 605-613
- [2] S.J. Elliott, L. Benassi, M.J. Brennan, P. Gardonio and X. Huang 2004 Mobility analysis of active isolation systems *Journal of Sound and Vibration* **271/1-2** 297-321
- [3] Y. Meyer 2005 Contrôle actif de Micro-composants Electroniques, Thèse, *Université de Franche Comté, UFR Sciences et Techniques*
- [4] Y. Meyer, T. Verdot, M. Collet, J. Baborowsky, and P. Muralt 2007 Active isolation of electronic micro-components with piezoelectrically transduced silicon MEMS devices *Smart Mater. Struct.* **16** 128-134
- [5] T. Verdot and M. Collet 2007 Modelization and optimization of a Micro-Active Suspension used for vibration isolation of sensitive electronic components *18th International Conference of Adaptive Structures and Technologies (ICAST), Ottawa, 3-5 oct 2007*
- [6] T. Verdot 2011 Conception, fabrication et caractérisation d'un microsystème piézocomposite pour l'isolation active de composants sensibles aux vibrations, Thèse, *Université de Franche Comté, UFR Sciences et Techniques*