

Annulation des non-linéarités générées en sortie de transducteurs : cas des excitations sinusoïdales

Antonin Novak, Laurent Simon, Pierrick Lotton
LAUM - UMR 6613 CNRS
Le Mans Université
Avenue Olivier Messiaen
72085 Le Mans CEDEX 9
E-mail : antonin.novak@univ-lemans.fr

Résumé

Le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans a récemment développé une méthode simple qui permet de corriger un signal périodique distordu en sortie d'un dispositif d'excitation en utilisant une correction harmonique du signal d'entrée. Cet article donne un aperçu de la méthode et une vue d'ensemble des bancs expérimentaux pour lesquels la méthode a été mise en œuvre. Pour l'ensemble des cas expérimentaux étudiés, la distorsion qui se produit en sortie du dispositif d'excitation est rejetée au niveau du bruit de fond.

Abstract

The Acoustics Laboratory of the University of Le Mans has recently developed a simple method to correct a distorted periodic signal at the output of an excitation device using a harmonic correction of the input signal. This paper provides an overview of the method and an overview of the experimental benches for which the method has been implemented. For all the experimental cases studied, the distortion that occurs at the output of the excitation device is rejected to the background noise level.



Les problèmes non linéaires suscitent un grand intérêt et une grande attention de la part des ingénieurs, physiciens et autres scientifiques car la plupart des systèmes réels qu'ils étudient sont intrinsèquement non linéaires. Dans ce contexte, afin d'obtenir expérimentalement les effets non linéaires que l'on souhaite observer, il est généralement nécessaire d'avoir recours à de grandes amplitudes d'excitation. C'est en particulier le cas pour les études expérimentales dans le domaine de l'acoustique non linéaire ou des vibrations non linéaires. Une fois les valeurs d'excitation élevées atteintes, on peut mesurer les grandeurs physiques telles que la pression acoustique, le déplacement, l'accélération ou autres, et en déduire des informations importantes sur le comportement non linéaire du système étudié.

Pour obtenir expérimentalement ces valeurs d'excitation élevées, nous utilisons des transducteurs qui agissent comme des actionneurs. Dans le domaine de l'acoustique et des vibrations, les transducteurs utilisés (haut-parleurs,

chambres de compression, pots vibrants) sont généralement imparfaits en raison de leur comportement non linéaire : des composantes non désirées peuvent apparaître en sortie de ces systèmes en plus de la partie utile du signal.

C'est le cas, par exemple, pour certaines mesures vibratoires en régime non linéaire qui nécessitent l'excitation d'une structure ou d'un matériau par un pot vibrant qui, lui-même, peut présenter un comportement non linéaire intrinsèque. Dans certains cas, pour lesquels les non-linéarités du pot vibrant restent faibles, il est possible de négliger le caractère non linéaire de l'excitateur. Mais dans d'autres situations, notamment à fort niveau, le pot vibrant peut présenter des non-linéarités substantielles qui lui sont propres et qui ne sont plus négligeables. Étant donné que ce pot vibrant est utilisé pour étudier le comportement non linéaire de la structure testée, il est nécessaire de s'affranchir de l'influence des non-linéarités du pot vibrant pour étudier correctement le comportement de la structure testée.

Ce problème peut être généralisé à la plupart des cas dans lesquels nous étudions expérimentalement des systèmes non linéaires, quels que soient le domaine d'application et le type de transducteurs utilisés. La question qu'il convient de se poser, mais qui est très souvent négligée, voire ignorée, est de savoir comment séparer les non-linéarités créées par le dispositif d'excitation de celles créées par l'objet étudié, ou comment diminuer voire supprimer la distorsion créée par le dispositif d'excitation tout en conservant le même niveau d'excitation.

Le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans a récemment développé une méthode [1] qui corrige le signal de sortie distordu du dispositif d'excitation en modifiant le signal d'entrée. Un signal périodique est appliqué à l'entrée du dispositif d'excitation et, après analyse du signal distordu en sortie du dispositif, le signal d'entrée est modifié de telle sorte que les composantes spectrales indésirables en sortie du dispositif d'excitation sont éliminées après quelques itérations de traitement en temps réel.

L'hypothèse sur laquelle repose cette méthode est que les pots vibrants ou les haut-parleurs utilisés comme dispositifs d'excitation se comportent de manière quasi-linéaire à faible amplitude et deviennent non linéaires à

plus fort niveau (ce qui est vrai pour la plupart des dispositifs d'excitation utilisés en acoustique et en vibrations). Cela permet d'estimer la réponse en fréquence linéaire (FRF) de ces systèmes pour les signaux de faible amplitude. Cette FRF est ensuite utilisée dans l'algorithme de correction pour calculer le poids des harmoniques (en amplitude et en phase) qu'il faut injecter dans le signal d'entrée afin d'annuler les harmoniques en sortie du dispositif d'excitation.

L'algorithme est simple, efficace et rapide, et parvient généralement à atteindre la cible souhaitée en quelques secondes. Les limites identifiées jusqu'à présent sont les suivantes : l'algorithme peut échouer (a) si le dispositif n'a pas de réponse linéaire dominante ; (b) si l'algorithme impose au dispositif d'excitation un déplacement supérieur à son excursion maximale autorisée ; (c) en cas de perturbations dues au réseau électrique (50 Hz) ou de toute autre interférence périodique, l'algorithme pouvant devenir instable si une composante à corriger correspond à la fréquence de l'interférence externe.

Dans ce qui suit, la méthode proposée est brièvement décrite, puis plusieurs bancs expérimentaux sur lesquels la méthode a été utilisée avec succès sont présentés.

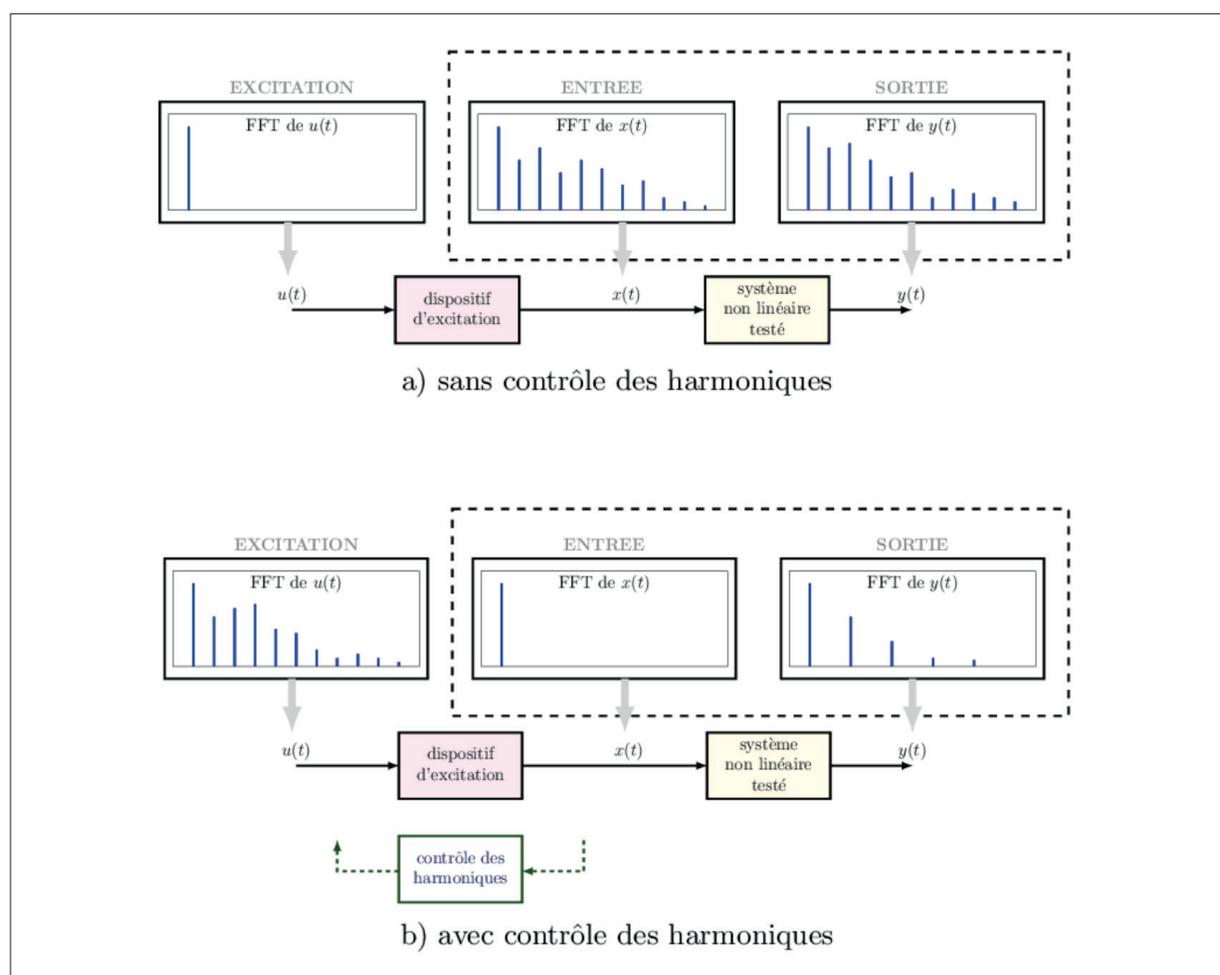


Fig. 1 : Montage de mesure typique d'un banc d'essai non linéaire : a) aucune correction harmonique n'est appliquée, b) la correction harmonique est utilisée pour éliminer les composantes indésirables du signal $x(t)$
 Typical measurement setup of a non-linear test bench: a) no harmonic correction is applied, b) harmonic correction is used to remove unwanted components from the signal $x(t)$

Description de la méthode

Considérons un système physique non linéaire piloté par un signal d'entrée sinusoïdal $x(t)$ (déplacement, force mécanique, pression acoustique, etc.) fourni par un dispositif d'excitation (pot vibrant, chambre à compression, haut-parleur, etc.). Le dispositif d'excitation utilisé pour la mesure est généralement lui-même piloté par un signal électrique $u(t)$ créé soit par un générateur de signal, soit par un dispositif d'acquisition de données qui permet une génération facile de signaux. Pour un dispositif d'excitation linéaire, si le signal d'entrée $u(t)$ est un signal sinusoïdal, la sortie $x(t)$ sera également un signal sinusoïdal de même fréquence. Toutefois, si le dispositif d'excitation n'est pas linéaire, le phénomène de distorsion harmonique peut apparaître : des composantes supplémentaires correspondant à des multiples entiers de la fréquence d'entrée fondamentale sont alors générées dans le signal de sortie $x(t)$, comme représenté schématiquement à la figure 1(a). Si le signal d'entrée $u(t)$ est composé de plusieurs composantes harmoniques, une distorsion harmonique de chaque composante et une distorsion d'intermodulation entre chaque paire de composantes peuvent apparaître dans le signal de sortie $x(t)$.

Par conséquent, les distorsions observées dans le signal de sortie $y(t)$ du système testé seront la conséquence des non-linéarités de deux systèmes non linéaires en série : le dispositif d'excitation et le système étudié.

Correction harmonique

L'idée de base de la correction harmonique consiste à injecter des composantes harmoniques dans le signal $u(t)$ de telle sorte que les composantes harmoniques indésirables du signal $x(t)$ disparaissent. Le schéma fonctionnel de cette procédure, y compris le bloc de contrôle des harmoniques, est représenté sur la figure 1(b), avec les spectres de puissance correspondants dans le cas d'une génération d'onde sinusoïdale pure. Il est évident que dans l'application réelle l'accès au signal $x(t)$ est indispensable. En d'autres termes, nous devons utiliser un capteur tel que microphone, accéléromètre, capteur de déplacement ou tout autre capteur capable de mesurer le signal $x(t)$. Si le dispositif d'excitation se comporte de manière quasi-linéaire à faible amplitude et devient non linéaire à plus fort niveau, ce qui est le cas pour la plupart des dispositifs d'excitation utilisés en acoustique et vibrations, l'algorithme de correction harmonique peut être décrit par les trois étapes suivantes.

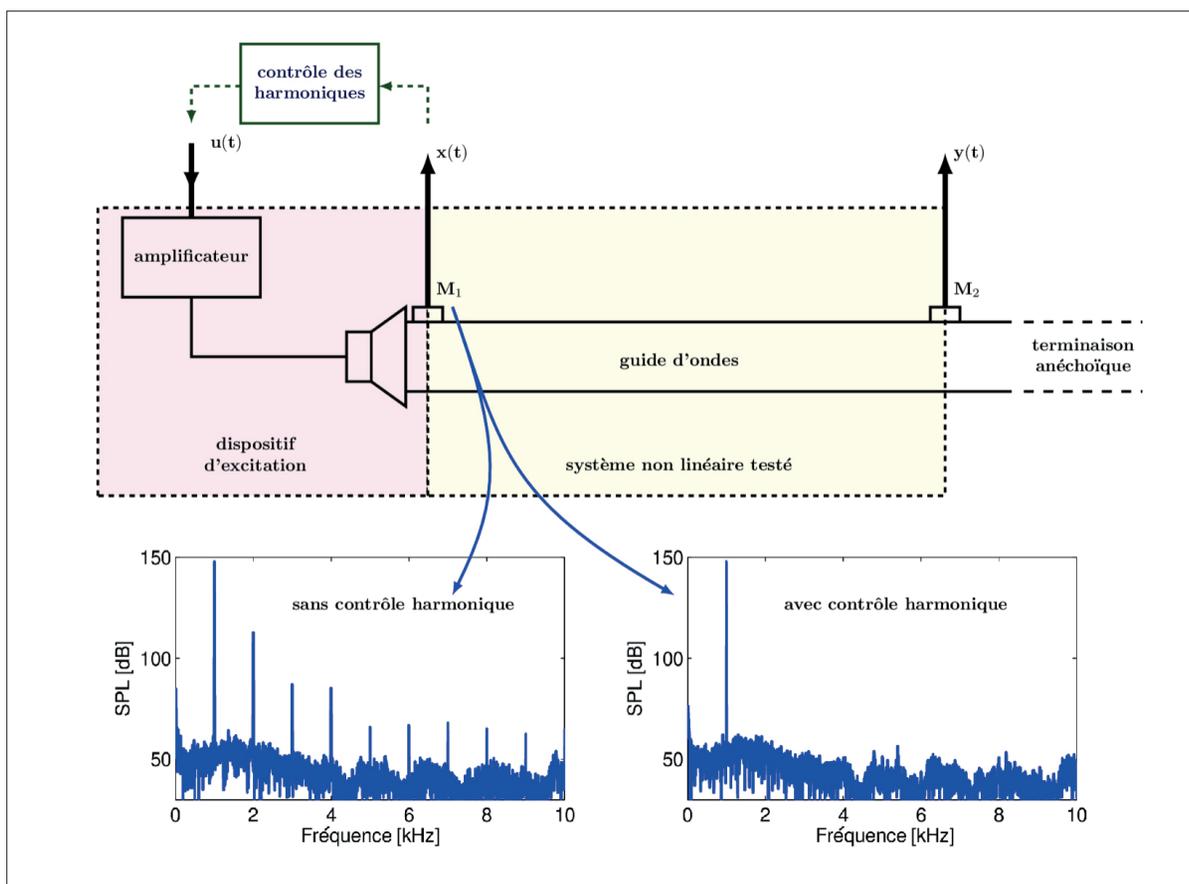


Fig. 2 : Exemple 1 - Correction harmonique du signal de pression acoustique mesuré par le microphone M_1 à la sortie de la chambre de compression
 Example 1 - Harmonic correction of the sound pressure signal measured by microphone M_1 at the output of the compression driver

Dans un premier temps, nous estimons la FRF (linéaire) du dispositif d'excitation à l'aide d'un signal de faible amplitude (assez faible pour ne générer aucune distorsion au-dessus du niveau de bruit de fond). Cette FRF est utilisée dans les étapes suivantes pour estimer l'amplitude et la phase des harmoniques à injecter dans le signal d'entrée. Dans un second temps, on génère un signal sinusoïdal $u(t)$ à l'entrée du dispositif d'excitation et on acquiert le signal $x(t)$. Une séquence de signal $x(t)$ (par exemple 4 800 échantillons) est utilisée pour calculer les coefficients de la série de Fourier en utilisant un algorithme de transformée de Fourier rapide (FFT). L'amplitude et la phase des harmoniques supérieurs du signal $x(t)$ sont ensuite utilisés pour prédire quels harmoniques (amplitude et phase) doivent être injectés au signal $u(t)$ pour la séquence suivante. Pour ce faire, on utilise la FRF linéaire estimée au début de la procédure. Les harmoniques supérieurs à injecter sont calculés comme le rapport des harmoniques du signal $x(t)$ et de la FRF à la fréquence particulière de chaque harmonique considéré. Ce rapport est ensuite soustrait (ajouté avec la phase opposée) du signal $u(t)$. Enfin, l'algorithme de correction harmonique est calculé de manière récursive sur des séquences successives sans chevauchement (du même nombre d'échantillons) de la sortie du dispositif d'excitation $x(t)$. À chaque fois, le rapport entre les harmoniques indésirables restants du signal $x(t)$ et la FRF est soustrait du signal $u(t)$ jusqu'à ce que les harmoniques indésirables se réduisent au niveau du bruit de fond. Cet algorithme est résumé visuellement en figures 1 et 2, pages précédentes. Plus de détails peuvent être trouvés dans [1].

Quelques exemples d'application

Dans cette partie, nous montrons plusieurs cas d'application pour lesquels la méthode a déjà été utilisée avec succès et sans laquelle la mesure serait soit impossible à effectuer, soit entachée d'une erreur due à la non-linéarité de la source.

Propagation acoustique non linéaire

Pour des intensités sonores élevées et pour des distances de propagation suffisantes, les phénomènes non linéaires acoustiques se traduisent par une déformation du signal de pression acoustique pouvant conduire à la formation d'ondes de choc. En effet, de petites perturbations non linéaires locales de l'onde acoustique dues à un niveau de pression acoustique élevé sont cumulatives le long de la propagation et peuvent déformer considérablement la forme d'onde pour des distances source-récepteur suffisamment grandes [5]. Pour démontrer expérimentalement ce phénomène, on excite l'extrémité d'un guide d'ondes avec une onde acoustique sinusoïdale en utilisant un haut-parleur ou une chambre de compression et on mesure la pression acoustique après quelques mètres de propagation. Pour une excitation de pression suffisamment élevée (>130 dB), la déformation de l'onde sonore après quelques mètres de propagation doit être observée.

Néanmoins, comme le dispositif d'excitation (haut-parleur ou chambre de compression) se comporte de manière non linéaire, l'onde sonore générée à l'intérieur du guide d'ondes est déformée dès le début de la propagation. Étant donné que des amplitudes d'excitation plus élevées conduisent à une distorsion plus importante due au dispositif d'excitation, il devient difficile d'observer correctement le phénomène voulu.

La technique de correction harmonique peut être utilisée pour éviter un tel problème en imposant une pression acoustique purement sinusoïdale à la position du premier microphone M1, comme le montre la figure 2. Les deux spectres, celui sans correction et celui avec la correction harmonique appliquée sont représentés sur la figure 2 à côté du schéma. La chambre de compression génère une onde de pression acoustique d'environ 150 dB SPL. Alors que le signal de pression non corrigé contient des harmoniques (par exemple, le deuxième harmonique est proche de 115 dB SPL), tous les harmoniques supérieurs sont ramenés au niveau du bruit de fond (50 dB SPL) en utilisant la technique de correction harmonique.

Une fois que le signal capté par le microphone M1 est purement sinusoïdal, on peut récupérer le signal du microphone M2 (voir figure 2). Si une distorsion apparaît dans le signal du microphone M2, l'origine de cette distorsion est alors uniquement due à la propagation dans le guide d'ondes et non à la source [2].

Caractérisation de pick-ups de guitare

Une autre application dans laquelle la technique de correction harmonique a été utilisée est la mesure de la distorsion des pick-ups de guitares électriques. Un pick-up est un capteur magnétique non linéaire qui capte les vibrations des cordes et les traduit en un signal électrique. Il est essentiellement composé d'un ensemble d'aimants permanents entourés d'une bobine électrique. Une corde ferromagnétique qui vibre à proximité du pick-up provoque une variation du flux magnétique à travers la bobine et, selon la loi de Faraday, une tension électrique est alors induite aux bornes de la bobine (figure 3).

Le problème principal rencontré pour la mesure de la tension de sortie d'un pickup est que le signal d'excitation du pickup est la vitesse de vibration d'une corde, par nature difficile à contrôler. Pour surmonter ce problème, un dispositif de mesures spécifique illustré en figure 3 est utilisé. Un morceau de corde ferromagnétique est collé sur une plaque composite reliée rigidement à un pot vibrant électrodynamique utilisé comme source de déplacement de la corde. Le morceau de corde est alors placé face au pick-up et peut osciller autour de sa position de repos avec une amplitude de déplacement et une fréquence imposées par le pot vibrant. Pour analyser le pick-up d'un point de vue non linéaire, on souhaite que le pot vibrant se comporte de manière linéaire. Pour cette raison, nous avons utilisé la technique de contrôle harmonique en utilisant comme signal de référence un accéléromètre fixé sur la plaque composite [3].

Le montage expérimental et le résultat d'une correction harmonique sont présentés en figure 3. Le pot vibrant entraîne le morceau de corde avec une accélération de 500 m/s^2 à 50 Hz, ce qui correspond à un déplacement de 5 mm. Les harmoniques supérieurs sont atténués de plus de 60 dB grâce à la technique de correction harmonique.

Caractérisation de haut-parleurs

La dernière application présentée dans cet article concerne l'étude des non-linéarités des haut-parleurs. En effet, un haut-parleur est un dispositif qui comporte de nombreuses sources de non-linéarités. L'une des sources principales provient des suspensions du haut-parleur en raison de la géométrie complexe et du comportement viscoélastique des matériaux dont elles sont faites.

La membrane du haut-parleur testé est ici excitée de manière pneumatique par un autre haut-parleur, les deux haut-parleurs étant couplés par un caisson fermé (figure 4). Un microphone est placé à l'intérieur du caisson pour mesurer la pression et en déduire la force appliquée sur

la membrane du haut-parleur à tester. La mesure de cette force, couplée à celle du déplacement de la membrane, permet d'étudier les propriétés mécaniques de l'équipage mobile du haut-parleur testé.

Si la force appliquée au haut-parleur testé est purement sinusoïdale, on peut observer dans le signal de déplacement des harmoniques supérieures qui proviennent alors du comportement non linéaire des suspensions du haut-parleur testé. Ce signal de déplacement déformé peut être utilisé pour étudier plus en profondeur le comportement non linéaire lié à la physique du haut-parleur testé [4].

Dans l'exemple de la figure 4, page suivante, on peut voir que la pression sonore générée à l'intérieur du boîtier atteint 140 dB SPL. Si aucune correction harmonique n'est appliquée, le signal de pression contient de nombreux harmoniques, les 2^e et 3^e harmoniques atteignant 115 dB SPL. Pour éviter que ces harmoniques ne corrompent la mesure, nous appliquons la technique de correction harmonique qui rejette les harmoniques les plus élevés au niveau du bruit de fond.

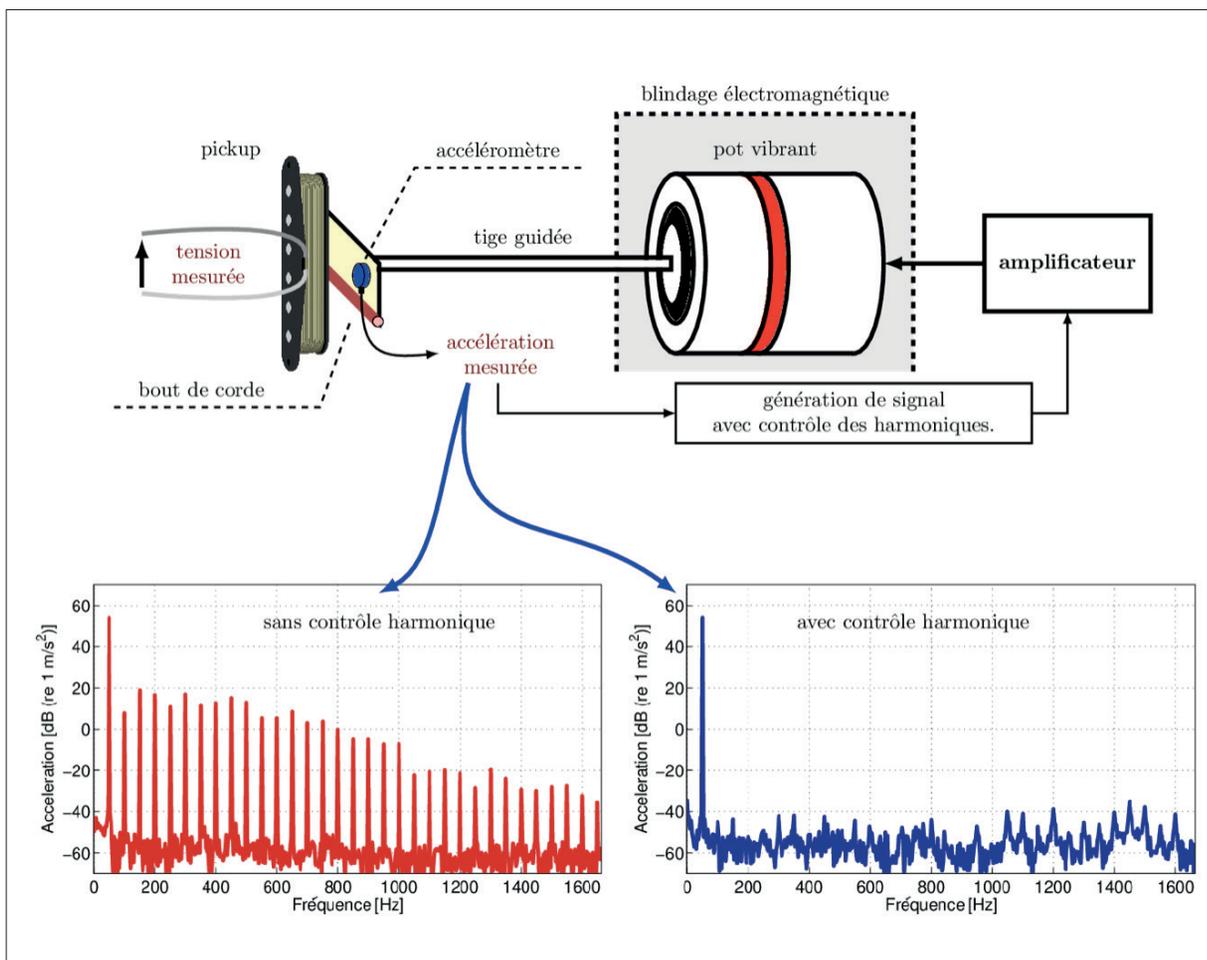


Fig. 3 : Exemple 2 - Correction harmonique du déplacement de la corde mesuré par un accéléromètre pour la mesure des non linéarités du pickup
 Example 2 - Harmonic correction of the string displacement measured by an accelerometer for the measurement of pickup non-linearities

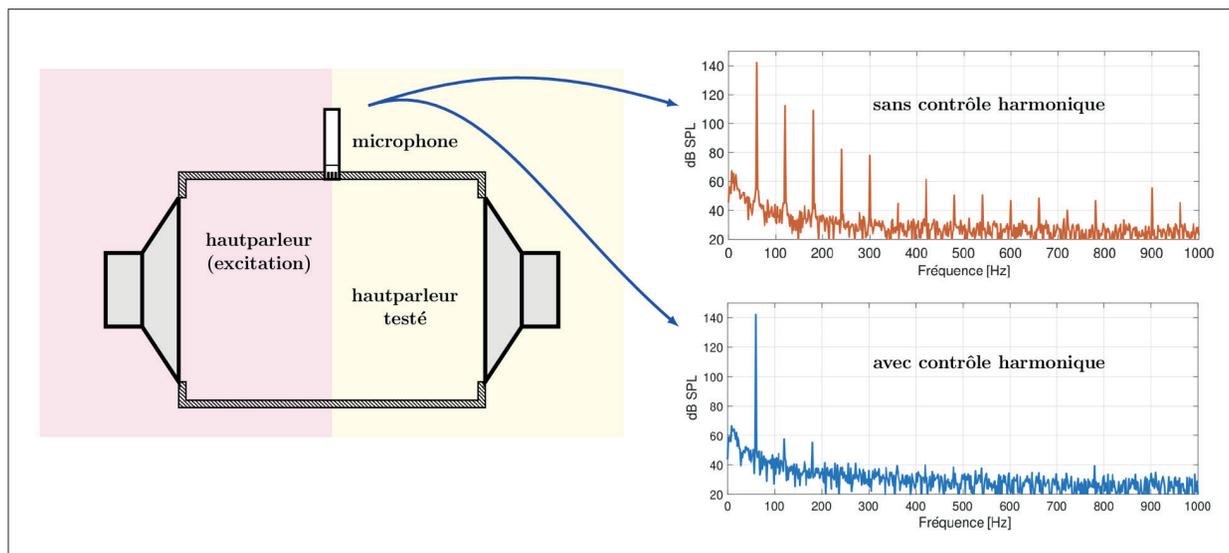


Fig. 4 : Exemple 3 - Correction harmonique de la pression acoustique à l'intérieur du boîtier. Le signal de pression corrigé est utilisé pour exciter la membrane du haut-parleur testé
Example 3 - Harmonic correction of the sound pressure inside the enclosure. The corrected pressure signal is used to excite the diaphragm of the tested loudspeaker

Conclusion

La méthode simple et efficace présentée dans cet article peut être utilisée pour différentes mesures non linéaires en acoustique, en vibration, en électroacoustique ou pour tout autre domaine dans lequel le comportement du dispositif d'excitation est non linéaire. Cette technique permet d'éliminer les composantes harmoniques indésirables du signal de sortie du dispositif d'excitation ou de les atténuer jusqu'au niveau de bruit de fond. Cette méthode, qui utilise l'injection harmonique, fonctionne bien avec des signaux périodiques tels que les signaux harmoniques. La méthode ne fonctionne pas pour des signaux non périodiques comme des signaux de musique, par exemple. D'autres techniques sont en cours de développement pour les signaux non périodiques.

Références bibliographiques

- [1] A. Novak, L. Simon & P. Lotton (2018), "A simple predistortion technique for suppression of nonlinear effects in periodic signals generated by nonlinear transducers", *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 420(0), pp. 104-113
- [2] A. Novak, B. Maillou, P. Lotton & L. Simon (2014), "Nonparametric Identification of Nonlinear Systems in Series", *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*. Vol. 63(8), pp. 2044-2051
- [3] A. Novak, B. Lihoreau, P. Lotton, E. Brasseur & L. Simon (2018), "Experimental Study Of Guitar Pickup Nonlinearity", *Proc. of the 18th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-18)*, Aveiro, Portugal
- [4] A. Novak, L. Simon, P. Lotton & M. Melon (2019), "Predistortion Technique for Generating Spectrally Clean Excitation Signals for Audio and Electro-Acoustic Nonlinear Measurements", *Audio Engineering Society Convention 146*, Dublin, Ireland
- [5] A. Hirschberg, J. Gilbert, R. Msallam, and A. P. J. Wijnands. Shock waves in trombones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 99(3) :1754-1758, March 1996