

# CFA/VISHNO 2016

## Développement de bancs de mesure pour la caractérisation des pickups électromagnétiques

E. Brasseur, A. Novak, P. Lotton, B. Lihoreau et L. Guadagnin  
Université du Maine (LAUM), Avenue Olivier Messiaen - UFR Sciences, 72085 Le  
Mans, France  
[emmanuel.brasseur@univ-lemans.fr](mailto:emmanuel.brasseur@univ-lemans.fr)



LE MANS

Les microphones (pickups) de guitares électriques sont des transducteurs électromagnétiques sensibles à la vitesse des cordes de la guitare. Dans le cadre des recherches menées au LAUM concernant la caractérisation de ces capteurs, un premier banc de mesure a été développé. Ce banc permet de mesurer simultanément la tension de sortie du pickup et la vitesse d'une corde, lorsque celle-ci est soumise à une excitation impulsionnelle effectuée à l'aide d'un plectre automatisé. Un deuxième dispositif expérimental a été développé permettant de mesurer la réponse du pickup lorsqu'une portion de corde, montée sur un pot vibrant et placée devant le capteur, est soumise à un mouvement sinusoïdal entretenu contrôlé en fréquence et en amplitude. Le comportement du pot-vibrant étant non-linéaire, la vitesse de la corde est distordue, ce qui introduit des erreurs non négligeables dans l'analyse des résultats expérimentaux. Par conséquent un système de contrôle actif a été développé qui consiste à ajouter, en temps réel, à la tension d'excitation du pot vibrant des harmoniques supérieures, contrôlés en amplitude et en phase de manière à générer une vitesse de la corde purement sinusoïdale. Afin de maîtriser au mieux les paramètres des pickups à caractériser, l'étude est menée sur une série de pickups monoplots réalisés au laboratoire. Les différentes étapes de conception des bancs de mesures, les contraintes techniques, les choix technologiques ainsi que le processus de réalisation des pickups seront présentés. La présentation du système de contrôle actif permettant la linéarisation de la vitesse générée par la source du deuxième banc de mesure fera l'objet d'un point particulier.

## 1 Introduction

Les pickups de guitares électriques sont des transducteurs électromagnétiques qui contribuent de façon importante au son généré par l'instrument. Dans le but de mieux comprendre la physique de ces pickups, le LAUM mène une recherche sur le sujet [1]. Ce projet repose en partie sur des études expérimentales et sur deux bancs de mesure présentés dans ce document.

Les pickups simple bobinage de guitare électrique (Figure 1) sont composés de 6 plots aimantés (de type AlNiCo 2 ou AlNiCo 5, aimantés de 300 à 1100 Gauss, de diamètre 5 mm et de longueur comprise entre 10 mm et 20 mm), espacés de quelques millimètres (distance entre les cordes) et entourés d'un bobinage de fil de cuivre dont le nombre de tours peut varier de 6 000 à 10 000 et dont le diamètre est de 56  $\mu\text{m}$ , 63  $\mu\text{m}$  ou 71  $\mu\text{m}$ .

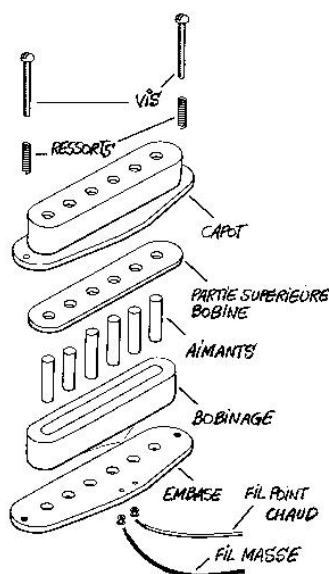


Figure 1: Pickup simple bobinage, vue éclatée  
Musique et Technique 3 [2]

Le principe de fonctionnement est illustré sur la Figure 2 dans le cas d'un pickup élémentaire

constitué d'un seul plot magnétique couplé à une corde métallique. Sous l'effet de la vibration de corde métallique, le champ magnétique issu de l'aimant permanent se trouve perturbé. Cette perturbation se traduit par une variation de flux magnétique à travers la bobine, une tension induite est ainsi générée aux bornes de la bobine, image de la vibration de la corde .

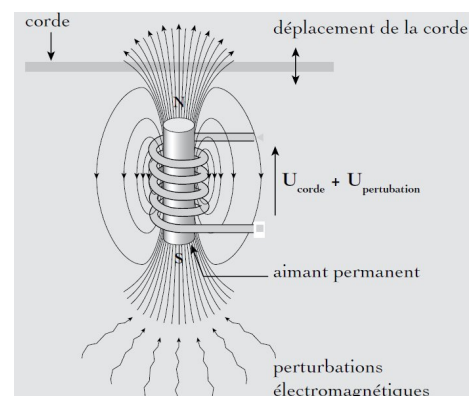


Figure 2: Principe de fonctionnement (Musique et Technique 3 [2])

Le mouvement d'une corde ne s'effectue pas dans un plan, mais peut être considéré comme la superposition de 2 mouvements dans des plans perpendiculaires. Nous considérerons donc 2 polarisations de la corde, l'une suivant l'axe y (axe parallèle à la table de la guitare), et l'autre suivant l'axe z (axe perpendiculaire à la table) (Figure 3) Les 2 polarisations suivant y et suivant z contribuent au signal de sortie du pickup.

Les pickups peuvent donc être représentés par un système permettant la génération d'une grandeur électrique de sortie (la tension électrique  $U_s$ ) à partir de 2 grandeurs vibratoires d'entrée (les vitesses  $V_y$  et  $V_z$  suivant l'axe y et z respectivement).

Afin de caractériser ces pickups, nous avons développé deux dispositifs expérimentaux permettant de mesurer les grandeurs d'entrées (vibrations de cordes) et la grandeur de sortie (signal électrique).

Le premier dispositif permet de caractériser un pickup lorsqu'une corde est excitée par un plectre de manière répétable. Le second dispositif permet de contrôler le déplacement de la corde (amplitude, fréquence et polarisation). Les 2 bancs sont présentés dans la suite.

## 2 Premier banc de mesure

### 2.1 Contraintes / Cahier des charges

Le dispositif expérimental est conçu afin de permettre une mesure des différentes grandeurs d'entrée et de sortie, dans un contexte réaliste.

Les éléments composants ce dispositif sont :

- une corde tendue et encastrée sur un support,
- un emplacement permettant de positionner le capteur à différentes positions sous la corde,
- un système de déplacement 3 axes permettant de positionner le pickup de façon précise,
- un moyen de mesure des vibrations de cordes suivant les 2 polarisations y et z,
- un système automatique d'excitation de corde,
- un système d'acquisition de données.

Le dispositif doit permettre une bonne répétabilité et reproductibilité des mesures. Il doit être suffisamment flexible pour permettre le placement du pickup à proximité du chevalet ou à proximité du manche. La hauteur du pickup doit pouvoir être ajustée de façon très fine. L'acquisition des vibrations de corde et de la sortie électrique du pickup doit être synchronisée.

## 2.2 Réalisation

### 2.2.1 Support de corde

Pour le support de cordes, le choix a été fait de se rapprocher d'une configuration réelle de guitare : un support en bois de masse suffisamment importante pour réduire les vibrations de structure, sur lequel a été installé un accastillage de guitare (mécaniques, sillet, chevalet, cordier). (Figure 3) Le diapason (longueur de corde à vide) correspond à celui d'une Les Paul Junior (distance chevalet-sillet  $L = 63$  cm). Une encoche pratiquée dans le support en bois permet de positionner le pickup sous la corde.

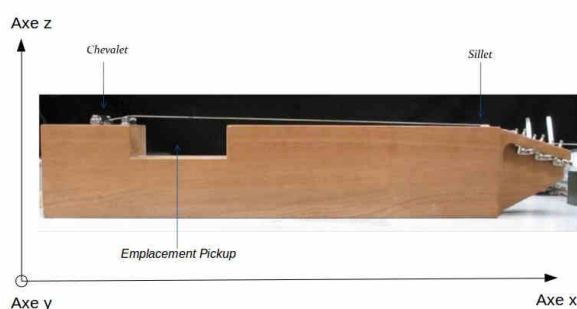


Figure 3: Support de corde et accastillage

### 2.2.2 Support de pickup

Afin de positionner le capteur sous la corde, il a été choisi d'utiliser des platines de déplacement. Afin de déplacer le pickup suivant l'axe x, un bras de déplacement (Stepping Motor Type 4H5618C0408) est positionné parallèlement au corps de l'instrument. Sur ce bras, une première platine de translation manuelle micrométrique (Newport M-UMR8.51) est installée pour permettre le déplacement suivant l'axe y. Puis une deuxième platine de déplacement motorisée (Zaber Tech T-LMS025B) est installée permettant le réglage de la hauteur de capteur suivant l'axe z. Cette dernière platine est pilotée par un PC de contrôle afin d'automatiser les mesures pour des hauteurs de pickups différentes.

### 2.2.3 Mesure des vibrations de corde

Pour la mesure des vibrations de cordes, nous avons tout d'abord utilisé une caméra rapide (Phantom v5.1) permettant d'acquérir des séries d'images, à une cadence suffisamment élevée pour visualiser les déplacements de la corde. Un système de miroir placé à 45 degrés permet de visualiser les déplacements suivant les 2 polarisations. (Figure 4)



Figure 4: Mesure de vibrations de cordes à l'aide d'une caméra rapide

Cette méthode permet de visualiser les déplacements de la corde dans les 2 polarisations et de synchroniser la capture d'image avec le signal de sortie du capteur, en utilisant un même signal de déclenchement pour la caméra et la carte d'acquisition. Les images sont des matrices de dimension  $X*Y$  et les éléments de ces matrices sont des chiffres qui correspondent aux nuances de gris qui composent l'image. 255 correspond à la couleur blanche, 1 correspond à la couleur noire. En moyennant les éléments d'une même colonne ou en travaillant sur une seule ligne de la matrice image il est possible de tracer l'évolution des nuances de gris le long de cette ligne. La corde étant plus foncée que le reste de l'image, le tracé de la moyenne des nuances de gris le long de la ligne (Figure 5) met en évidence l'emplacement de la corde.

Cette méthode est fastidieuse (traitement à effectuer pour chaque image), impose des temps de traitement relativement longs et nécessite des espaces de stockage

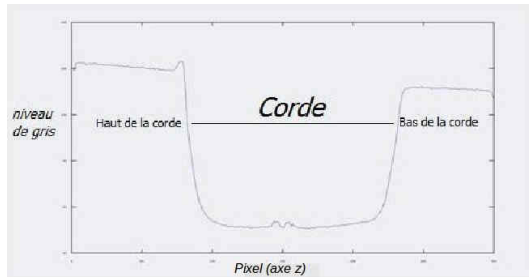


Figure 5: Représentation des niveaux de gris d'une image

des données importants. De plus, la résolution de la caméra (1024x1024 pixels) limite fortement la précision de la mesure.

Une autre solution pour les mesures de vibrations de corde est d'utiliser deux vibromètres lasers (têtes Polytec OFV 505 et OFV 303, associées respectivement à 2 contrôleurs OFV 5000 et OFV 3001), placés de manière à mesurer les vitesses des deux polarisations de corde. Cette méthode demande plus de moyens expérimentaux mais apporte une meilleure précision, ne demande pas de gros moyens de stockage de données et ne nécessite pas des algorithmes de traitement trop lourds.

Les sorties de ces deux vibromètres et la sortie du pickup sont reliées directement à une carte d'acquisition (Ni PCI 6143), permettant une acquisition synchrone des signaux.

#### 2.2.4 Excitation de corde

Enfin, pour réaliser une excitation automatisée et répétable de la corde, une platine de translation motorisée (Zaber Tech T-LMS025B) est utilisée. Sur cette platine, un plectre est fixé de façon à reproduire une excitation au plus proche des conditions réelles de jeu. Cette platine est également contrôlée par un programme GNU Octave.

Ce programme permet de paramétrer la hauteur du capteur (et ainsi de réaliser automatiquement des mesures pour des distances pickup-corde différentes), d'exciter la corde et d'acquérir les signaux issus des 2 vibromètres et de la sortie du pickup.

Une vue d'ensemble du banc de mesure est présentée en Figure 6.

### 2.3 Mesures et résultats

Des campagnes de mesures ont donc pu être menées avec ce dispositif. Dans un premier temps, il a été nécessaire de vérifier la répétabilité des mesures. Les courbes temporelles issues du pickup et du vibromètre mesurant la vitesse suivant la polarisation y (Figure 7) nous permettent de vérifier la répétabilité sur l'enveloppe globale du signal, sur le maximum d'amplitude ou encore sur la décroissance du signal.

En travaillant dans le domaine fréquentiel, il est également possible de vérifier la répétabilité des mesures

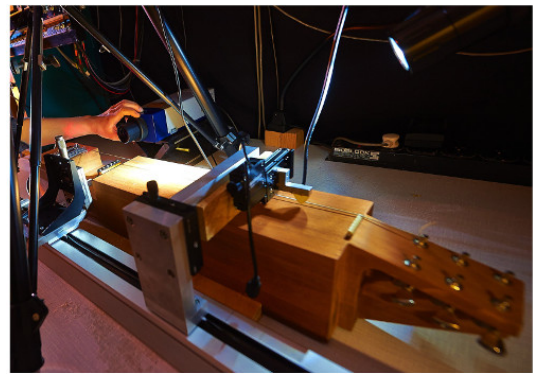


Figure 6: Vue d'ensemble du banc de mesure

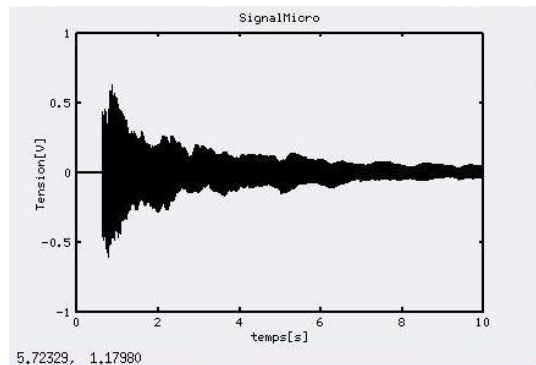


Figure 7: Signal temporel pickup

en comparant les fréquences et niveaux de chacune des harmoniques (Figure 8).

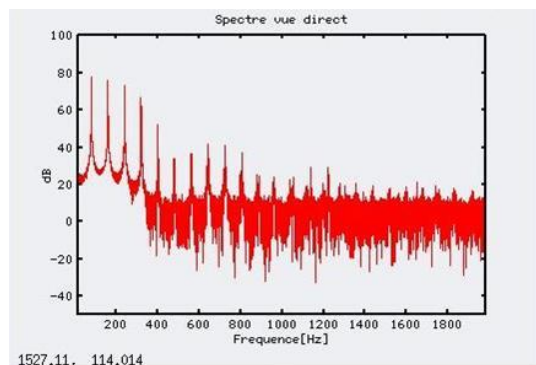


Figure 8: Signal fréquentiel polarisation y

Des premiers résultats ont pu être observés concernant le niveau maximum de signal en sortie de pickup en fonction de la distance entre le pickup et la corde (Figure 9).

Une autre observation a également pu être faite sur la décroissance du signal (sustain) en fonction de la distance corde-pickup. Le sustain est estimé en calculant le temps nécessaire pour que l'énergie du signal soit atténuée de 15 dB (Figure 10). Nous observons un phénomène de décroissance du sustain, en fonction de la distance corde-pickup, pour des distances inférieures à 6 mm.



Figure 9: Niveau de sortie du pickup en fonction de sa distance par rapport à la corde

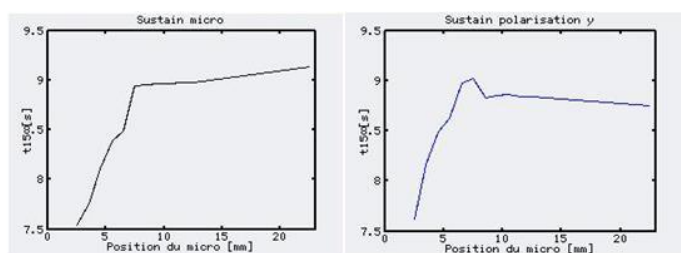


Figure 10: Décroissance du signal en fonction de la distance corde/pickup

## 2.4 Conclusion / Perspectives

Ce premier banc de mesure a permis de réaliser des séries de mesures en jouant sur différentes positions de capteurs. Cependant la complexité des vibrations de cordes en oscillations libres, associée au caractère décroissant de celles-ci ne nous permet pas de caractériser directement le pickup. Il est nécessaire de concevoir un second dispositif qui permet une excitation de corde parfaitement maîtrisée et connue. De plus, les caractéristiques mécaniques des pickups du commerce n'étant pas bien connues (aimantation des plots, nombre de tours de bobinage, diamètre du fil...), des pickups monoplots sont réalisés au laboratoire.

## 3 2eme banc de mesure

### 3.1 Contraintes / Cahier des charges

Compte tenu de ce qui précède, le deuxième banc de mesure doit comporter les composantes suivantes :

- une corde (ou portion de corde) rigide positionnée sur un support vibrant,
- un système de déplacement 3 axes permettant de positionner le pickup de façon précise devant la corde (en position de mesure de la polarisation suivant l'axe y ou suivant l'axe z),
- un moyen de mesure des vibrations de corde,
- un système d'acquisition de données.

Comme pour le banc précédent, les notions de répétabilité et reproductibilité sont essentielles.

## 3.2 Réalisation

### 3.2.1 Excitation de corde

Afin de s'affranchir des modes supérieurs de vibration de corde, une portion de corde est collée sur un support rigide (Figure 11). Ces supports sont constitués d'une plaque en époxy de dimension 2 cm x 10 cm sur laquelle une portion de corde est collée. Ces supports sont soumis à une vibration par l'utilisation d'un pot vibrant (LDS V406), associé à un amplificateur (LDS PA100E) permettant des déplacements suffisamment importants (jusqu'à +/- 2 mm) à une fréquence de 82 Hz (corde Mi grave d'une guitare). Un cylindre en aluminium permet la jonction entre le pot vibrant et les supports de corde.

Plusieurs supports de corde sont réalisés, avec plusieurs longueurs de corde différentes, afin de tester la longueur utile de corde (Figure 11).



Figure 11: Supports de corde

### 3.2.2 Réalisation de pickups monoplots

Une série de pickups monoplots est également réalisée. Cela permet de faire varier un seul paramètre du pickup et de pouvoir ainsi mesurer l'influence de ce paramètre. Une série de 3 pickups est réalisée, comprenant respectivement 6000 tours de bobinage, 8000 tours puis 10000 tours. Une autre série est conçue en faisant varier la hauteur de bobinage (Figure 12).

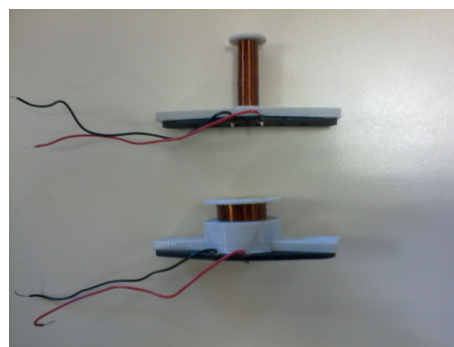


Figure 12: Exemple de pickups monoplots réalisés au laboratoire

Pour réaliser ces capteurs, les plans du support sont saisis sous le logiciel FreeCAD puis réalisés à l'aide d'une imprimante 3D MakerBot Replicator 2X. Le bobinage du fil de cuivre est réalisé avec une bobineuse TANAC AX3.

### 3.2.3 Support de pickup

Les pickups sont positionnés devant la portion de corde vibrante en utilisant un système de déplacement 3 axes Newport M462 Series, permettant un positionnement optimal du capteur devant la corde, et autorisant un réglage fin de la distance corde-pickup.

Le banc de mesure dans son ensemble est présenté en Figure 13.

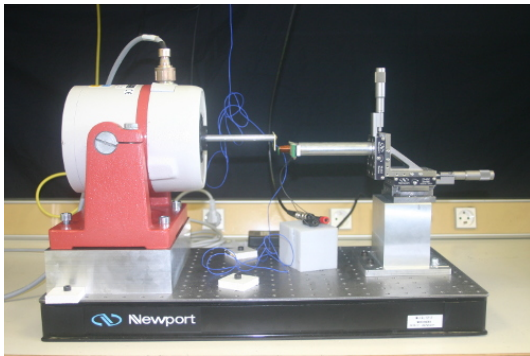


Figure 13: Vue d'ensemble du 2e banc de mesure

### 3.2.4 Acquisition Interfaçage

La génération du signal d'excitation et l'acquisition des voies capteurs se font à l'aide d'une carte son RME Fireface 400, interfacée sous Matlab.

### 3.2.5 Affranchissement des non-linéarités de la source

Le comportement du pot-vibrant étant non-linéaire, la vitesse de la corde est distordue, ce qui introduit des erreurs non négligeables dans l'analyse des résultats expérimentaux, comme illustré en Figure 14a.

Afin d'éviter que les non-linéarités provenant de la source influencent les mesures des non-linéarités du système étudié, nous utilisons un système de contrôle actif [3] qui permet de linéariser l'accélération créée par le pot vibrant et mesurée par un accéléromètre (PCB 352C23).

Pour ce faire, la technique consiste à ajouter des harmoniques supérieures à la tension d'excitation  $u(t)$  du pot vibrant. La tension d'excitation peut alors être décrite comme

$$u(t) = U_1 \sin(\omega_0 t) + \sum_{k=2}^N U_k \sin(k\omega_0 t + \phi_k), \quad (1)$$

$N$  étant le nombre d'harmoniques ajoutées à la tension d'entrée. Le but du contrôle actif est d'éliminer les harmoniques supérieures contenues dans le signal d'accélération  $a(t)$  mesuré par l'accéléromètre, de sorte

que ce signal d'accélération soit presque purement sinusoïdal. Ainsi, nous pouvons écrire

$$a(t) = A_1 \sin(\omega_0 t + \varphi_1) + e(t), \quad (2)$$

$e(t)$  étant un signal d'erreur que l'on souhaite annuler en utilisant la technique de contrôle actif. Nous pouvons donc supposer que l'accélération créée par le pot vibrant, ainsi que la vitesse et le déplacement, sont purement sinusoïdaux comme illustré en Figure 14b.

### 3.2.6 Affranchissements des perturbations électro-magnétiques du pot vibrant

Les pickups réalisés étant des capteurs électro-magnétiques, ceux-ci sont sensibles au champ magnétique important généré par le pot vibrant. Afin de résoudre ce problème, il a tout d'abord été envisagé d'éloigner le capteur de la source en utilisant une tige suffisamment longue (60 cm) sur laquelle est fixé le support de corde. De nouveaux problèmes dus à des phénomènes de vibration et de torsion de cette tige ont rapidement permis d'écarter cette solution.

Il a donc été choisi d'utiliser un blindage autour du pot vibrant afin de s'affranchir de toute perturbation électromagnétique non désirée. Le matériau utilisé est du mu-métal, matériau dont la perméabilité magnétique ( $\mu_r$ ) est de 150000.

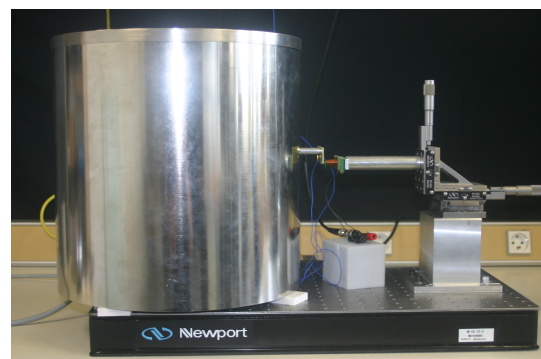


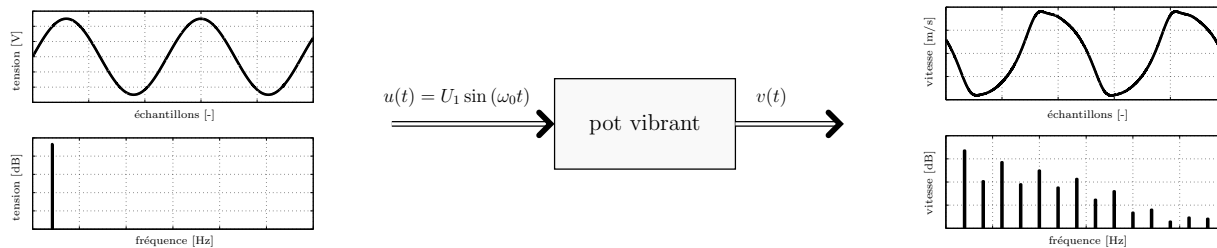
Figure 15: Vue d'ensemble du 2e banc de mesure avec blindage

## 3.3 Résultats

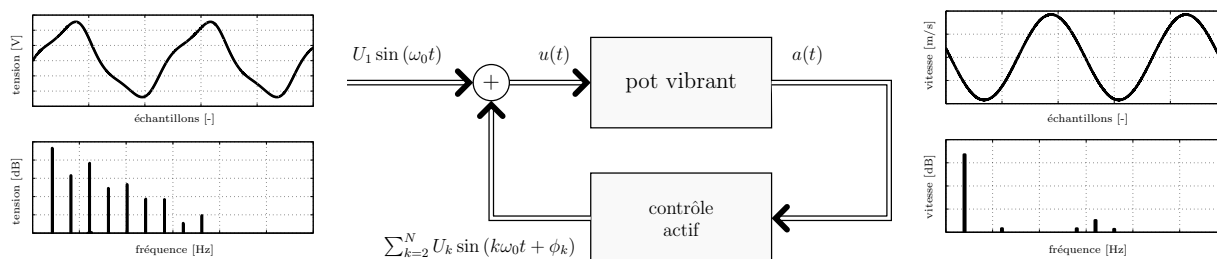
Une des premières observations faites avec ce dispositif est que l'influence de la polarisation  $z$  est environ 10 fois plus importante sur le signal de sortie du pickup que l'influence de la polarisation  $y$  (en valeur RMS).

## 4 Conclusion

Deux dispositifs ont été conçus afin de pouvoir mettre en évidence les phénomènes physiques associés à la problématique des pickups de guitare. Ces 2 dispositifs sont à ce jour fiables et robustes, et permettent de réaliser des études expérimentales sur ces capteurs.



(a) Le comportement du pot-vibrant étant non-linéaire, la vitesse de la corde est distordue.



(b) Le signal de tension d'excitation est déformé par le contrôle actif de telle manière que la vitesse de la corde est pratiquement un signal harmonique pur.

Figure 14: Schéma de principe du contrôle actif.

## Remerciements

Stagiaires et étudiants ayant travaillé sur le projet :

- Gireg Chavin-Collin
- Vivien Dumas
- Fabien Seince
- Aurore Balloche

## References

- [1] P. Lotton, B. Lihoreau and E. Brasseur, Experimental Study of a Guitar Pickup, *ISMA 2014*.
- [2] P. Lotton, J. Carbonneaux, G. Lemarquand et V. Lemarquand, Microphones et amplification dans la guitare électrique (2008).
- [3] A. Novak, P. Lotton and L. Simon, Dynamic measurement of loudspeaker suspension parameters using an active harmonic control technique, Audio Engineering Society Convention 136, Audio Engineering Society (2014).