



HAL
open science

Choix de transducteur piézoélectrique pour la récupération d'énergie de vibration sur un vélo en vue de développer un générateur d'énergie électrique

Erika Minazara, Dejan Vasic, François Costa, Vincent Loyau

► To cite this version:

Erika Minazara, Dejan Vasic, François Costa, Vincent Loyau. Choix de transducteur piézoélectrique pour la récupération d'énergie de vibration sur un vélo en vue de développer un générateur d'énergie électrique. CSAME 2007, Sep 2007, Toulouse, France. <hal-00843231>

HAL Id: hal-00843231

<https://hal.science/hal-00843231v1>

Submitted on 16 May 2024

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.



HAL Authorization



CHOIX DE TRANSDUCTEUR PIÉZOÉLECTRIQUE POUR LA RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE DE VIBRATION SUR UN VÉLO EN VUE DE DÉVELOPPER UN GÉNÉRATEUR D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE POUR APPAREILS NOMADES

MINAZARA Ericka, VASIC Dejan, COSTA François, LOYAU Vincent
SATIE UMR 8029 CNRS, 61 avenue du président Wilson, 94235 Cachan Cedex, France
minazara@satie.ens-cachan.fr; Dejan.VASIC@satie.ens-cachan.fr;
Francois.COSTA@satie.ens-cachan.fr; Vincent.LOYAU@satie.ens-cachan.fr

Résumé

Ce papier expose la conception d'un générateur piézoélectrique, récupérateur d'une partie de l'énergie contenue dans les vibrations mécaniques disponible sur un vélo. Quelques types de générateurs déjà existants sont commentés afin de justifier notre choix d'un transducteur de type poutre avec masse inertielle. Nous présentons par la suite un modèle analytique simple du transducteur choisi. Nous comparons les résultats théoriques et les résultats issus de l'expérience obtenus à partir du générateur que nous avons réalisé. Une puissance électrique maximum de 3,5 mW a été atteinte à la fréquence de résonance du transducteur, fréquence choisie dans la gamme de vibration du vélo, soit à titre d'exemple 12,5 Hz pour une accélération de vibration d'environ 0,5 g (avec $1\text{ g} = 9,81\text{ ms}^{-2}$).

Mots Clés : Récupération d'énergie, vibrations mécaniques, bicyclette, générateur piézoélectrique, appareils nomades

Abstract

In this study we propose to design a piezoelectric generator that harvests vibration energy available on a bicycle. Some types of already existing generators are discussed about in order to justify our choice of a transducer such a beam type with inertial mass. We present thereafter a simple analytical model of the transducer. We compare theoretical and experimental results obtained from the generator that we have realised. A maximum electric output of 3.5 mW was reached at the frequency of resonance of the transducer, frequency chosen in the range of the bicycle vibration, for instance 12.5 Hz for an acceleration of approximately 0.5 g (with $1\text{ g} = 9.81\text{ ms}^{-2}$).

Key words: Energy harvesting, mechanical vibration, bicycle, piezoelectric generator, portable devices

De nos jours nous rencontrons de plus en plus d'applications utilisant des transducteurs piézoélectriques. Leur utilisation comme source d'énergie électrique commence timidement à attirer l'attention des chercheurs, soucieux par exemple de l'autonomie des petits appareils électroniques embarqués de faible consommation (inférieure à 1 Watt) tels que les capteurs¹. Ceux-ci sont alimentés par des accumulateurs d'une durée de vie limitée; qui ont besoin d'être rechargées et même remplacées régulièrement. Pour des appareils se trouvant dans des endroits isolés ou difficiles d'accès, cet entretien s'avère contraignant et parfois coûteux. Si nous réussissons à convertir l'énergie mécanique de vibration présente dans le milieu ambiant en puissance électrique, nous pourrions indéfiniment recharger les piles, supprimant leur contrainte d'entretien et augmentant considérablement leur autonomie.

Le principe de la récupération d'énergie de vibrations sur un vélo, à l'aide de matériaux piézoélectriques, est illustré dans la figure 1. Dans l'étude nous avons commencé par évaluer les niveaux et fréquence de vibration produite par un vélo. Les vibrations ont été mesurées à différents endroits du vélo afin de repérer l'endroit permettant de récolter le plus d'énergie de vibration. Nous avons ensuite choisi un transducteur piézoélectrique adapté au mode de vibration le plus puissant que nous avons pu détecter sur notre vélo expérimental. Nous avons mené une expérience sur pot

vibrant qui simule le rôle du vélo, pour évaluer la puissance qu'on peut récupérer d'une telle vibration avec le transducteur choisi. Un modèle simple d'un transducteur piézoélectrique est présenté. Les résultats expérimentaux et théoriques sont comparés.

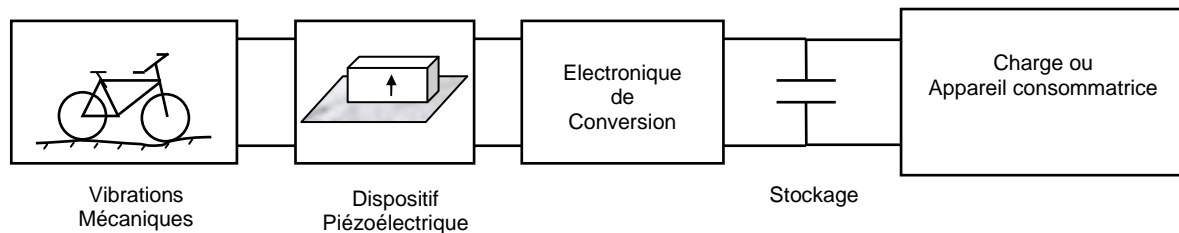


Figure 1 : Schéma de principe d'un générateur piézoélectrique

I. ÉTAT DE L'ART

La littérature évoque différents types de générateurs piézoélectriques qui ont fait l'objet d'études et d'expérimentations. Les plus connus sont: le générateur en KIT complet de la société américaine ACI (figure 2a) qui comprend un transducteur "Piezoelectric Fiber Composite" (PFC), capable de produire une puissance de 120 mW pour une vibration de 25 Hz et d'alimenter une horloge à écran LCD qui consomme 0,7 mJ par minute, celui du MIT/NASA utilisant un "THUNDER" (figure 2b), placé dans une chaussure, qui peut produire 1,8 mW avec la marche (cette application est à visée militaire), enfin celui de Kim et al. utilisant un "Cymbal" (figure 2c), capable de produire 39 mW débitant sur une charge 400 k Ω à 100 Hz et sous une force de 7,8 N (application à visée de récupération d'énergie de vibration d'un moteur de voiture). Force est de constater que pour chacune des applications citées ci-dessus, la géométrie ainsi que la source d'énergie mécanique qui sollicite chacun des transducteurs piézoélectriques sont notablement différentes. Il s'en déduit qu'il convient d'adapter les transducteurs au type d'application ciblée, afin d'assurer une récupération optimale d'énergie.



Figure 2 : Transducteurs types PFC, THUNDER et Cymbal

Ce choix du transducteur constitue sans doute la tâche majeure de la conception d'un générateur piézoélectrique. Les études relatives dans ce papier traitent d'une application donnée, celui de la récupération d'énergie sur un vélo.

II. VIBRATION D'UN VÉLO

Un vélo en mouvement est constamment en vibration; ces vibrations proviennent soit des mouvements des roues sur la piste, laquelle peut être plus ou moins rugueuse, soit des mouvements du cycliste (les efforts à répétition sur les pédales, le corps qui vrille...). L'ensemble des vibrations se propage à l'ensemble du vélo. Nous avons mesuré des vibrations sur un vélo. Le vélo considéré (figure 3) n'est pas muni d'amortisseur. Pour connaître le gisement de vibration sur un vélo, nous avons fait des mesures de vibration en différents points du vélo, sur différentes pistes et à des vitesses variées.

Nous avons équipé le vélo de 4 accéléromètres (figure 3 et 4) et d'un appareil portable d'acquisition de vibrations, SVAN 948, comportant 4 voies d'acquisition de données (figures 5). Il est alors possible de réaliser quatre acquisitions simultanées de signaux de vibrations provenant de quatre endroits différents du vélo.



Figure 3 : Vélo instrumenté de capteur d'accélération



Figure 4 : Fixation verticale d'un accéléromètre sur le cadre

Les 4 accéléromètres identiques, de type WILCOXON modèle 784A et de sensibilité 100 mV/g, sont respectivement placés aux endroits suivants: 1-Fourche, 2-Guidon, 3- Selle, 4- Cadre. La figure 4 illustre la fixation d'un accéléromètre sur la structure du vélo. Les accéléromètres sont montés sur des supports mécaniques qui les maintiennent dans l'axe vertical. La pression dans les pneus est fixée à 3 bars. Les accéléromètres sont montés verticalement de façon à ne mesurer que la composante prépondérante des vibrations, la verticale. En effet, quand on roule à vélo on ressent naturellement de plus fortes vibrations dans les sens haut-bas (verticalement), que dans d'autres directions.

L'appareil SVAN 948 fait un calcul à partir d'un algorithme de transformée de Fourier rapide (FFT) de vibrations et sauvegarde en mémoire l'amplitude des FFT ainsi qu'un historique des mesures de vibrations dans le domaine temporel.

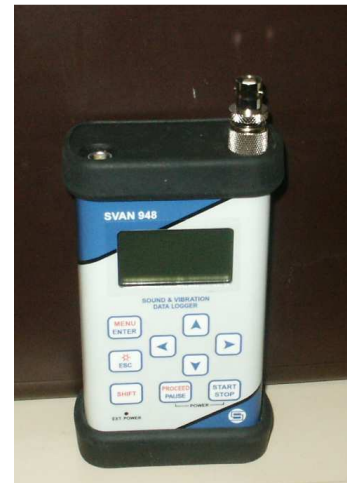


Figure 5 : Photo de l'appareil d'acquisition de données de vibration, SVAN 948

Une fois le vélo instrumenté, nous avons fait plusieurs séries de mesure. L'influence des différents profils ou rugosités de piste (figure 6), piste cyclable, terre battue, piste usée, piste pavée, sur la vibration a été étudiée. En effet, nous définissons la rugosité d'une piste pavée, par exemple, par la largeur d'un pavé mesuré dans le sens de roulement du vélo. Cette largeur de pavé est comprise entre 10 cm et 15 cm dans le cas de la piste que nous avons testée.



Piste terre battue

Piste cyclable

Piste irrégulière

Piste pavée

Figure 6 : Profils des pistes testées. Echelle 1 cm pour 20 cm

L'influence de la vitesse de déplacement sur la vibration a aussi été étudiée. La vitesse a été mesurée grâce à un tachymètre électronique. Chaque série de mesure d'accélération de la vibration correspond à une vitesse constante de déplacement. Nous avons adopté un protocole de mesure illustré en figure 7.

En effet, pour être certain de faire des mesures à vitesse constante nous avons utilisé la possibilité de retarder le début de la mesure existant sur l'appareil. Ainsi toutes les données de vibrations acquises ont été mesurées après la phase d'accélération (de durée t_r) du vélo lorsque sa vitesse est stabilisée (figure 7).

Nous avons comparé les niveaux de vibrations selon les pistes et la vitesse de déplacement. Les figures 8 affichent simultanément les quatre spectres de vibration respectivement au niveau de la fourche, guidon, selle et le cadre.

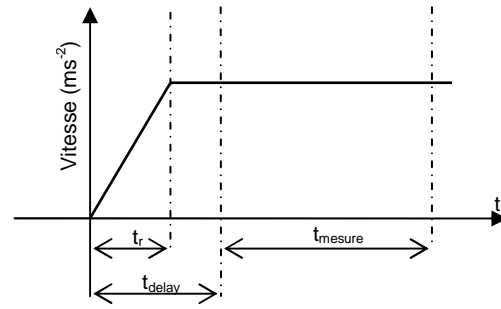
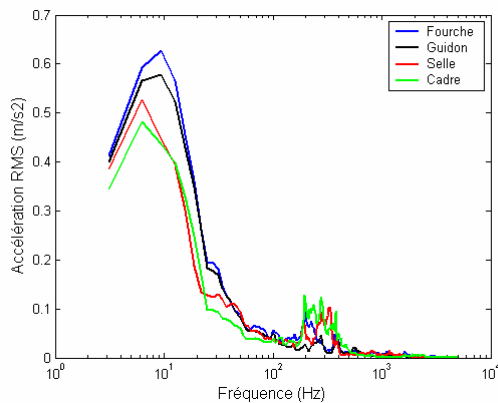
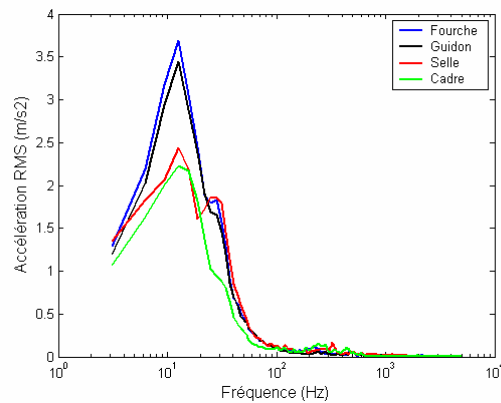


Figure 7 : Protocole de mesure concernant la vitesse.



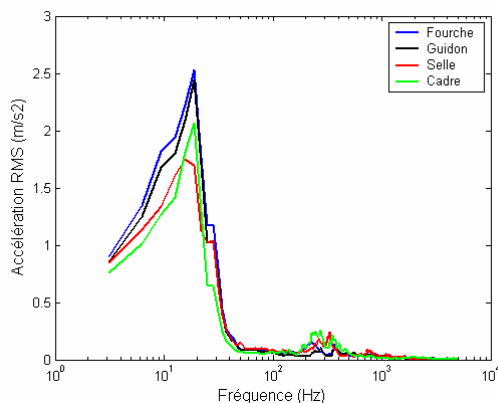
a) Piste cyclable vitesse 11km/h



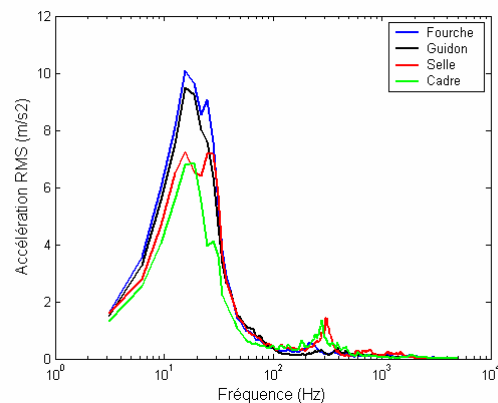
b) Piste pavée vitesse 8km/h

Figure 8 : Mesure de vibration à moyenne vitesse à l'exemple des pistes cyclable et pavé

La différence de niveau de vibration entre la partie avant et la partie arrière du vélo est sans doute due à la répartition des masses. En effet, la roue arrière supporte plus de poids et est donc plus amortie; par conséquent on y mesure de plus faibles vibrations. Avec un cycliste de 60 kg sur un vélo d'environ 10 kg, une mesure approximative avec un pèse personne indique que 36% du poids soit 25 kg est supporté par la roue avant, et le reste (64%) soit 45 kg par la roue arrière. On constate que c'est à l'endroit de la fourche où se récolte le maximum de vibrations. On peut aussi observer que le niveau de vibrations évolue avec la vitesse; par exemple selon figure 8 et figure 9, sur piste cyclable, le niveau de vibrations sur la fourche, relatif à la fréquence centrale passe de 0,63 m/s² à 2,6 m/s² lorsque la vitesse passe de 11 km/h à 21 km/h.



Piste cyclable vitesse 21 km/h



Piste pavée vitesse 18 km/h

Figure 9 : Mesure de vibration à vitesse élevée à l'exemple des pistes cyclable et pavée

Le premier pic observé correspond à la fréquence de pédalage du cycliste; cette fréquence évolue avec la vitesse de déplacement du vélo comme le montre le tableau 1. Ce pic est observé à la même fréquence pour les quatre parties différentes testées du vélo.

Vitesse (km/h)	5,5	7,5	11	16	21
Fréquence (Hz)	3,1	6,3	9,4	15,6	18,8

Tableau 1 : Fréquence correspondant au premier pic selon la vitesse de déplacement du vélo sur piste cyclable.

En vue de délimiter la bande de fréquence intéressante pour la récupération d'énergie, nous avons défini la zone qui contient les 80% de l'énergie du signal de vibration. Le niveau d'énergie du signal de vibration est représenté par la somme du carré de l'amplitude du spectre. Son énergie est définie par $\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |X(f)|^2 df$ où t est le temps et f la fréquence. A remarquer que cette expression est une expression générale qui ne conduit pas à une "énergie physique". L'ajout d'un coefficient est souvent nécessaire pour respecter les unités physiques de l'énergie. Pour un signal discret ou échantillonné, l'identité de Parseval devient $\sum_{n=1}^N |x(nT_e)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |X(k)|^2$ où T_e est le pas temporel d'échantillonnage et N le nombre d'échantillon. Nous avons alors tracé la somme cumulée croissante des $\frac{1}{N} |X(k)|^2$ dans le domaine fréquentiel (figure13) et indiqué la zone à partir de laquelle on atteint les 10% et 90% de la somme totale.

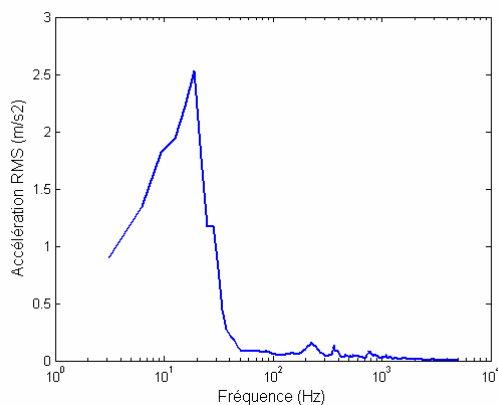


Figure 10 : Spectre de vibration sur la fourche, vélo roulant sur piste cyclable, vitesse 21 km/h.

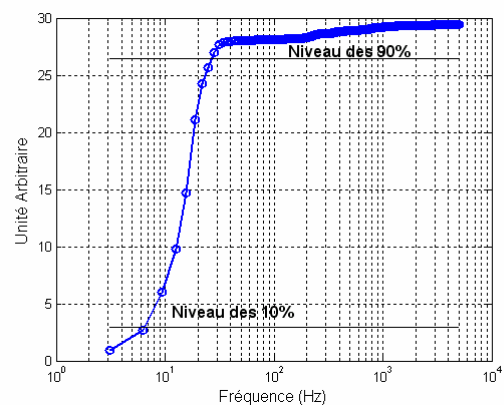


Figure 11 : Cumule croissant de l'énergie dans le domaine fréquentiel

Déduit des données de la figure 10, l'exemple de la figure11 montre que 80% d'énergie se trouve dans la bande 6,3 Hz à 28,1 Hz ceci pour le cas de vibration sur la fourche mesurée quand la vitesse de déplacement sur piste cyclable est égale à 21 km/h. La bande de fréquence de forte concentration d'énergie commune aux quatre types de piste testée à différentes vitesses se trouve entre 12,5 Hz et 28 Hz. Par conséquent, il est fondamental de réaliser un dispositif piézoélectrique qui résonne dans cette gamme de fréquences. Les niveaux mesurés de vibrations restent faibles puisqu'ils n'atteignent 10 ms^{-2} que dans le cas extrême de déplacement sur piste pavée. Par conséquent, les transducteurs rigides de type "Cymbal" ou "THUNDER" ne convient à l'application vélo que si on le place à l'interface de la selle et de la structure rigide du vélo où une forte contrainte est *a priori* disponible, précisément à l'endroit où le poids du cycliste vient appuyer régulièrement. Ce transducteur pourrait ainsi jouer deux rôles importants, celui de l'amortissement piézoélectrique de vibration au niveau de la selle et celui de générateur piézoélectrique. A l'endroit de la fourche ou du guidon, il est envisageable d'utiliser un transducteur de type PFC ou MFC "Micro Fiber Composite" qui se déforme assez facilement, de par leur faible rigidité, même pour de faibles niveaux de vibrations. Une structure en forme de poutre est la plus simple à réaliser. Nous avons donc confectionné un transducteur piézoélectrique type poutre dont la fréquence propre est dans la gamme [12,5 Hz ; 28 Hz], celle où le maximum d'énergie de vibration est disponible.

III. TRANSDUCTEUR PIÉZOÉLECTRIQUE DE TYPE POUTRE

Nous avons réalisé un transducteur expérimental dont le principe est représenté par la figure 12; et la photo de la figure 13. Il s'agit d'une poutre encastree d'un côté et libre de l'autre. Il est constitué d'une lame flexible en acier ressort, sur laquelle est placée une plaque de matériau piézoélectrique. Le matériau actif utilisé est un MFC ("Micro Fiber Composite"), souple doté d'une grande flexibilité, bonne tenue mécanique et peut durer plusieurs millions de cycles ($10E+08$) de fonctionnement. Nous avons utilisé la référence MFC 2814P2, fourni par "Smart Material". Les principales caractéristiques de ce matériau, ainsi que les données géométriques sont indiquées dans le tableau 2.

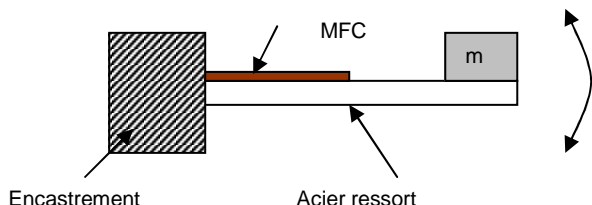


Figure 12 : Poutre métallique avec un élément piézoélectrique.



Figure 13 : Photo du transducteur poutre MFC

L'élément piézoélectrique MFC a été collé proche de l'encastrement de la poutre là où la contrainte est maximale, puisque plus la contrainte dans l'élément piézoélectrique est élevée plus l'énergie électrique produite est importante.

Module d'Young	Longueur x largeur	Épaisseur	Capacité	d31
30,34 GPa	28 mm x 14 mm	approx. 0,3 mm	approx. 26 nF	-1,7E+02 pC/N

Tableau 2 : Caractéristiques du MFC 2814P2 et données géométriques

Une masse inertielle est ajoutée en bout de poutre afin d'une part ajuster la fréquence, et d'autre part amplifier mécaniquement la contrainte au niveau de l'élément piézoélectrique. La connaissance de la raideur équivalente de la structure ainsi que la fréquence de fonctionnement visée nous a permis de déduire la valeur de la masse additionnelle adéquate. Les données relatives à la poutre sont rassemblées dans le tableau 3. Une masse additionnelle de 5,32g permet d'ajuster exactement la fréquence propre de la structure aux 12,5 Hz recherchés.

Longueur	Largeur	Épaisseur	Masse inertielle	Masse de la poutre seule	Masse du MFC
80 mm	25 mm	20 mm /100	5,32 g	3,1 g	0,64 g

Tableau 3 : dimensions de la poutre et de la masse inertielle

Autour de la fréquence de résonance du transducteur et dans le cas de faible déplacement pour lequel le mouvement reste linéaire, la structure comportant un élément piézoélectrique peut être modélisée par un système masse, piezo, ressort, amortisseur² comme le montre la figure 14.

Avec cette simple approche, la structure considérée équivaut une masse M reposant à la fois sur un ressort K , représentant la rigidité mécanique de la structure, sur un amortisseur ou dissipateur D , correspondant aux pertes mécaniques de la structure, et sur un élément piézoélectrique collé sur la structure. Le déplacement de la masse est u , I et V étant les courant et tension de sortie récoltés sur l'élément piézoélectrique.

Les équations piézoélectriques qui relient les variables mécaniques

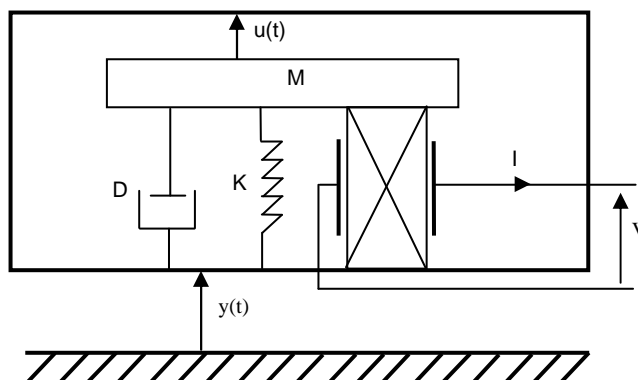


Figure 14 : Modèle équivalent d'une structure piézoélectrique vibrante

(u , F_p) et les variables électriques (I , V) sont indiquées par le système d'équations simple suivant (1).

$$\begin{cases} F_p = K_p u + \alpha V \\ I = \alpha \dot{u} - C \dot{V} \end{cases} \quad (1)$$

K_p est la rigidité de l'élément piézoélectrique quand il est court-circuité, C est la capacité bloquée de l'élément piézoélectrique et α est le facteur de force. On peut démontrer que le mouvement $u(t)$ de la masse M du générateur, pour une vibration donnée du générateur $y(t)$, est décrit par la classique équation différentielle mécanique:

$$M\ddot{u} + D\dot{u} + Ku + K_p u + \alpha V = -M\ddot{y} \quad (2)$$

L'excitation externe représentée par le déplacement $y(t)$ est considérée comme parfaitement sinusoïdale pour des fréquences proches de la résonance de la structure. Avec une approche simple, nous considérons qu'une charge purement résistive est directement connectée à l'élément piézoélectrique. Dans ce cas, la tension aux bornes de la charge est sinusoïdale. Considérant la deuxième équation piézoélectrique et la résistance R , la tension sur l'élément piézoélectrique autour de sa résonance peut être exprimée comme fonction du déplacement (3), où ω est la pulsation.

$$V = \frac{\alpha R}{1 + jRC\omega} j\omega u \quad (3)$$

L'expression (4), reliant la tension et le déplacement y , est obtenue en écrivant (2) dans le domaine fréquentiel (3).

$$\frac{V}{y} = \frac{jM\alpha R\omega^3}{(-M\omega^2 + jD\omega + K + K_p)(1 + jRC\omega) + j\alpha^2 R\omega} \quad (4)$$

A la résonance d'une structure sans perte visqueuse, l'expression (4) peut être simplifiée et donne (5):

$$\frac{V}{y} = \frac{M\alpha R\omega^2}{\alpha^2 R + D + jRCD\omega} \quad (5)$$

Avec (5), la puissance récupérée peut être exprimée comme fonction du déplacement et de la charge résistive R (6).

$$P = \frac{VV^*}{2R} = \frac{y^2}{2} \frac{M^2 \alpha^2 R \omega^4}{\left((\alpha^2 R + D)^2 + (RCD\omega)^2 \right)} \quad (6)$$

Pour une structure de faible couplage électromécanique, la variable α est proche de zéro, ce qui permet une simplification de l'expression de la puissance récupérée (6). Dans ce cas, cette puissance récupérée atteint son maximum P_{\max} pour une charge résistive optimale R_{opt} .

$$P = \frac{y^2}{2} \frac{M^2 \alpha^2 R \omega^4}{\left(1 + (RC\omega)^2 \right) D^2} \quad (7)$$

$$R_{\text{opt}} = \frac{1}{C\omega} \text{ and } P_{\max} = \frac{y^2 M^2 \omega^2 \alpha^2}{4D^2 C} \quad (8)$$

Nous pouvons considérer que l'effort appliqué au système est $F = My\omega^2$. Et l'expression (7) peut être écrite comme suit:

$$P = \frac{F^2}{2} \frac{\alpha^2 R}{\left(1 + (RC\omega)^2 \right) D^2} \quad (9)$$

Nous avons effectué une mesure de la puissance électrique récupérable à l'aide du transducteur réalisé. Une expérience sur un pot vibrant qui simule la vibration du vélo à 12,5 Hz a été menée. La vibration test est sinusoïdale et d'amplitude 0,5 g soit 5 m/s².

IV. RESULTAT EXPERIMENTAL.

Le banc expérimental est celui de la figure 15. En lieu et place d'un vélo, nous avons fait une étude monomodale qui ne tient pas compte de tous les contenus fréquentiels du vélo, la source de vibration est simulée par un pot vibrant. La fréquence et l'amplitude de vibrations sont choisies de façon à être représentative de l'harmonique la plus porteuse d'énergie. Cette fréquence peut être par exemple 12,5 Hz par référence à la bande de fréquence définie plus haut. Une résistance est

directement connectée sur les des électrodes du matériau actif. La figure 16 nous renseigne sur le niveau de puissance en fonction de la charge résistive qui peut être atteint dans ce cas précis.



Figure 15 : Dispositif expérimental

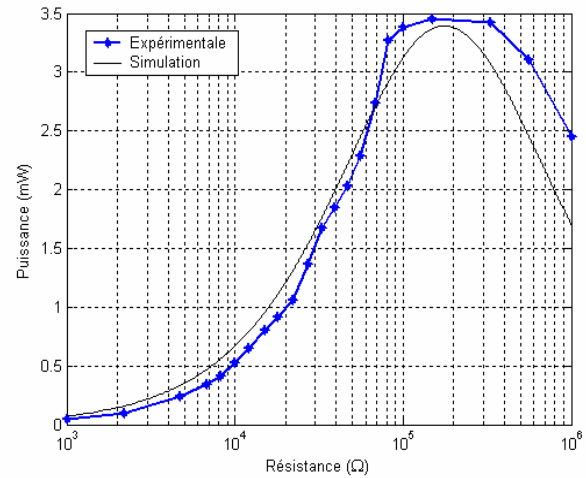


Figure 16 : Puissance expérimentale et simulation générée en fonction de charges résistives, vibration 5ms-2 et fréquence 12,5Hz où $M = 7g$, $\alpha = 0.00047 \text{ N/V}$ et $D = 0.0419 \text{ Nm}^{-1}\text{s}^{-1}$

L'expression de la puissance débitée dans la charge résistive R est donnée par $P = \frac{V_{eff}^2}{R}$ où V_{eff} est la tension efficace mesurée entre les deux électrodes du matériau piézoélectrique.

V. CONCLUSION

Nous avons acquis de nombreuses données de vibration sur un vélo, sans prétendre à l'exhaustivité. Partant de ces données, nous avons pu délimiter une bande de fréquence intéressante à exploiter pour la récupération d'énergie de vibration sur un vélo. Nous avons choisi et réalisé un transducteur piézoélectrique type poutre dont la fréquence propre est ajustée à la gamme de vibration du vélo. Un modèle simple qui relie la puissance électrique produite et l'accélération a été présenté et les résultats théoriques sont en accord avec les résultats expérimentaux. L'établissement des caractéristiques de la puissance générée en fonction de la charge résistive a permis d'évaluer le niveau de puissance électrique récupérable. Cette puissance est maximale pour des résistances proche de 100 kΩ. Pour une vibration d'amplitude 5 ms⁻² de fréquence 12,5 Hz elle atteint 3,5 mW pour une charge de 100 kΩ. Ces quelques mW sont largement suffisants pour recharger une batterie, pour alimenter une LED de signalisation, ou des petits appareils tels que compteur de vitesse, horloge...

VI. RÉFÉRENCES

HORWITZ S., KASYAP A., LIU F., JOHNSON D., NISHIDA T., NGO K., SHEPLAK M., and CATTAFESTA L., Technology development for self-powered sensors, presented at 1st Flow control Conference, June 24-26, 2002, St. Louis, MO.

GUYOMAR D., BADEL A., LEFEUVRE E., and RICHARD C., Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by non linear processing, IEEE transaction on UFFC 2005, vol. 52, NO. 4, (2005).