



HAL
open science

Récupération de l'énergie des vibrations d'une poutre piézoélectrique

Vincent Boitier, Antoine Belinger

► **To cite this version:**

Vincent Boitier, Antoine Belinger. Récupération de l'énergie des vibrations d'une poutre piézoélectrique. La Revue 3E.I, 2016, 83, pp.46-52. hal-01245174

HAL Id: hal-01245174

<https://hal.science/hal-01245174>

Submitted on 16 Dec 2015

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Récupération de l'énergie des vibrations d'une poutre piézoélectrique.

Vincent Boitier¹, Antoine Belinger²

vboitier@laas.fr, antoine.belinger@laplace.univ-tlse.fr

¹ Université de Toulouse, UPS, LAAS, 7 Ave du colonel Roche, F-31400 Toulouse, France

² Université de Toulouse, UPS, LAPLACE, 118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse, France

RESUME : Le bureau d'étude présenté dans cet article s'intéresse à la récupération de l'énergie vibratoire à l'aide d'une poutre piézoélectrique. Le dispositif mis en œuvre dans ce BE est assez loin des réalités industrielles mais il a l'avantage d'être facilement reproductible et peu onéreux. Dans un premier temps les étudiants découvrent le fonctionnement du piézoélectrique à travers une modélisation électromécanique issu d'essais expérimentaux. Après validation, sur un système de récupération basique (pont de diode) étudié à la fois d'un point de vue expérimental et par simulation, le modèle est utilisé sur un système de récupération plus performant (SSHI). Les étudiants peuvent ainsi comprendre le fonctionnement de ce dispositif assez complexe à mettre en œuvre expérimentalement dans un BE de 16 heures.

Mots clés : poutre piézoélectrique, récupération énergie, commande SSHI, piezoelectric, energy harvester.

1 INTRODUCTION.

Des dispositifs communicants basse consommation sont de plus en plus utilisés pour la domotique ou le suivi de santé des personnes [1], [2]. La récupération de l'énergie issue de vibrations ambiantes [3] est une alternative pour éviter l'utilisation des piles ou augmenter la durée de vie des systèmes. Nous présentons ici les possibilités offertes par un récupérateur piézoélectrique (membrane piézoélectrique fixée sur une poutre vibrante) pour alimenter un module de communication sans fil basse consommation. Ce module constitue la brique de base d'un réseau de capteurs sans fil. Le dispositif piézoélectrique est présenté dans une première partie avec son système d'excitation et de mesures. La deuxième partie montre les expérimentations nécessaires à la modélisation et explicite le modèle qui en découle. La récupération d'énergie est ensuite mise en œuvre dans la troisième partie avec une comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux issus de simulations pour le dispositif le plus simple. La dernière partie analyse la quantité d'énergie nécessaire pour alimenter le module de communication et la compare avec l'énergie effectivement récupérée. Les convertisseurs à intercaler éventuellement entre le stockage et la charge sont aussi évoqués dans cette partie.

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL.

Pour des raisons de coût et de disponibilité, le récupérateur est constitué d'une poutre vibrante (réglet métallique) sur laquelle une membrane piézoélectrique est collée (buzzer-piézo : Kingstate KPSG-100). Le réglet est fixé sur un bâti. Pratiquement, le bout de la poutre peut être excité de façon régulière (par le vent [4]), ou épisodiquement (le bout de la règle est déplacé manuellement). L'excitation peut aussi venir du mouvement du bâti (par exemple un vélo [5] ou un moteur [6]). Pour nos essais, le bâti est fixé et un

électro-aimant piloté par un ampli audio LM12 est utilisé pour mettre la poutre en vibration (fig.1). La fréquence et le niveau d'excitation sont réglés par un générateur de fonction. Un accéléromètre un axe (ICP réf 333B32) et son conditionneur (Anicia CEI) délivre une tension image de l'accélération (fig.2). L'accéléromètre sert aussi de masse sismique.

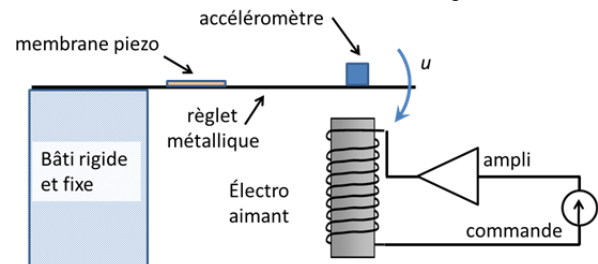


fig.1 Dispositif d'excitation et de mesure.



fig.2 Poutre piézoélectrique et accéléromètre.

3 MODELISATION.

La déformation d'une membrane piézoélectrique induit une polarisation du matériau piézoélectrique et un transfert de charge proportionnel à la contrainte :

$$q = \alpha \cdot u \quad (\text{Eq. 1})$$

où q est la charge déplacée (C), α le coefficient de déformation (C/m) et u la déformation (m).

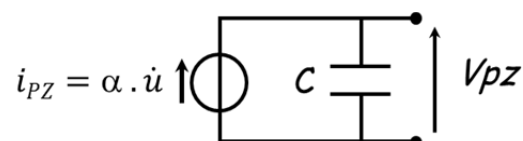


fig.3 Modèle électrique à la résonance.

Classiquement, dans une première approche, on modélise au voisinage de la résonance le dispositif poutre et membrane piézoélectrique par une source de courant i_{PZ} en parallèle avec un condensateur C (fig.3).

3.1 Détermination de f_{res}

Afin de déterminer la fréquence de résonance de la poutre on procède à un essai de lâcher. On applique une contrainte constante sur la poutre puis on relâche cette contrainte. L'essai présenté fig.4 permet de déterminer la fréquence des oscillations amorties qui sera confondue avec la fréquence propre compte tenu du faible taux d'amortissement. Soit : $f_{res} = 18$ Hz.

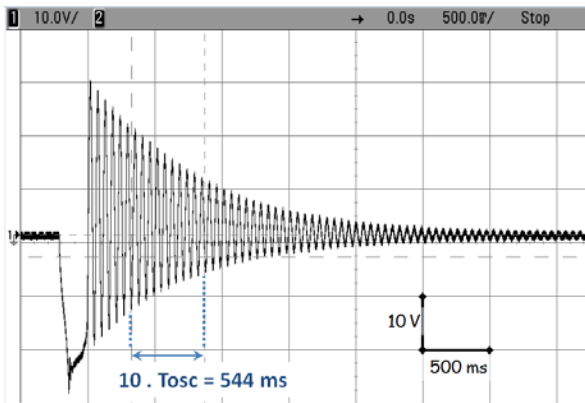


fig.4 $V_{PZ}(t)$. A $t=300$ ms on applique une déformation constante, puis, à $t=500$ ms, on relâche le réglet.

3.2 Détermination de C

Le système étant initialement au repos, on déconnecte le piézo de l'oscilloscope; puis on applique une déformation constante, cela se traduit par un déplacement de charge vers la capa C ; comme la déformation persiste, $u = c^{te}$ et $\dot{u} = 0$. Le courant qui arrive dans C est nul, V_{PZ} reste constante.

A $t = t_A$ (cf fig.5), on connecte l'oscilloscope aux bornes du piézoélectrique (la capacité C va se vider à travers l'impédance de l'oscilloscope ($R_{OSC} = 1$ M Ω , $C_{OSC} = 12$ pF) avec une constante de temps $R_{OSC}.C$. La visualisation de cette décharge (fig.5) permet de déterminer C (l'influence de C_{OSC} est ici négligeable). On trouve : $C = 70$ nF ([4] donne C entre 65 et 85 nF). Il est intéressant de mener le même essai avec une sonde atténuatrice pour oscilloscope pour voir l'effet de la résistance de la sonde et confirmer la valeur de la capacité par une autre mesure ($R_{OSC} = 10$ M Ω , $C_{OSC} = 15$ pF pour la N2862B).

3.3 Détermination de α .

3.3.1 1^{ère} méthode utilisant un accéléromètre.

La tension aux bornes de la capacité interne du piézoélectrique est donnée par l'équation :

$$q' = C.V_{PZ} \quad (\text{Eq. 2})$$

Lorsque le piézoélectrique n'est pas relié à un circuit, la charge déplacée q et la charge q' de C se confondent,

soit :

$$\alpha.u = C.V_{PZ} \quad (\text{Eq. 3})$$

Pour déterminer α , il est nécessaire de connaître une image de la déformation, notée u .

Mesurer u avec précision est difficile avec le matériel présent en salle de TP (règles) mais on peut accéder à l'aide de l'accéléromètre monté à l'extrémité du réglet à \ddot{u} . Avec $k = 12,2$ (m/s²)/V, la tension V_{acc} en sortie du conditionneur est liée à \ddot{u} par :

$$\ddot{u} = k.V_{acc} \quad (\text{Eq. 4})$$

ce qui donne :

$$\alpha.k.V_{acc} = C.V_{PZ}'' \quad (\text{Eq. 5})$$

En excitant de façon sinusoïdale la poutre piézoélectrique et en supposant un régime linéaire et sinusoïdal (à la fois pour u et pour V_{PZ}) à la pulsation ω , la relation précédente devient pour les valeurs efficaces :

$$\alpha.k.V_{acc_{eff}} = C.\omega^2.V_{PZ_{eff}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Cette relation permet de déterminer α .

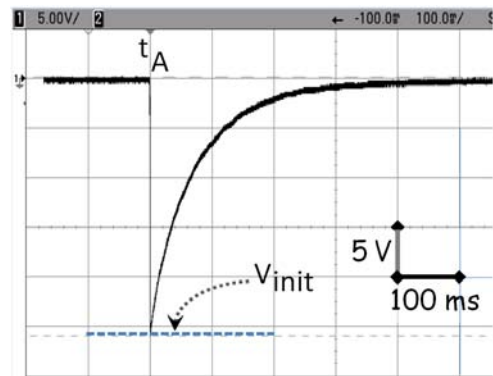


fig.5 Evolution de V_{PZ} . On réalise la connexion à l'oscilloscope à $t = t_A$.

D'un point de vue pratique, l'hypothèse de linéarité n'est pas toujours complètement vérifiée (le signal d'accélération peut contenir des harmoniques). On fera donc soit une mesure directe, soit la FFT de V_{PZ} et de V_{acc} pour déterminer les valeurs efficaces des fondamentaux. On rappelle que la mesure en dBv est liée à la valeur efficace par

$$X_{dBv} = 20 \log\left(\frac{V_{eff}}{1V_{eff}}\right) \quad (\text{Eq. 7})$$

Une série d'essais menés autour de la résonance entre 14 et 24 Hz conduit à une valeur de $\alpha = 1,45.10^{-4}$ C/m avec un écart-type de 5 % par rapport à la moyenne.

3.3.2 2^{ème} méthode, sans accéléromètre.

On peut aussi utiliser une méthode statique. Dans un premier temps on s'assure que V_{PZ} est nul et que la sonde est débranchée. On déforme ensuite la poutre en notant l'écart u . (rq1 : u est compté positivement vers le bas. La déformation induit un transfert de charge et donc une tension aux bornes de la membrane piézoélectrique. On reconnecte la sonde, on

obtient une allure similaire à celle présentée *fig.5*. On relève la valeur initiale V_{init} de la décroissance de la tension V_{PZ} . Les résultats sont présentés *fig.6*.

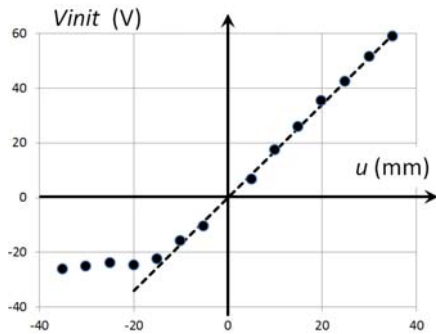


fig.6 Tension maximale en fonction de l'écartement.

On constate une saturation dans le comportement de la membrane piézoélectrique courbée vers le haut, mais dans la zone de linéarité : $V_{init} = 1,75 \cdot 10^3 \times u$. En utilisant l'Eq.8 tirée de l'Eq.3 à $t = t_A^+$ on trouve $\alpha = 1,23 \cdot 10^{-4}$ C/m. Les résultats sont bien concordants avec le § 3.3.

$$q = \alpha \cdot u = C \cdot V_{init} \quad (\text{Eq. 8})$$

4 RECUPERATION DE L'ENERGIE

4.1 Structure élémentaire.

L'objectif de cette partie est de concevoir un système de récupération et de stockage des charges déplacées lors des mouvements de la poutre et la membrane piézoélectrique afin d'alimenter le datalogger. Au vu du caractère alternatif de la tension produite par le transducteur, la solution la plus simple à mettre en œuvre est le redresseur monophasé à filtrage capacitif.

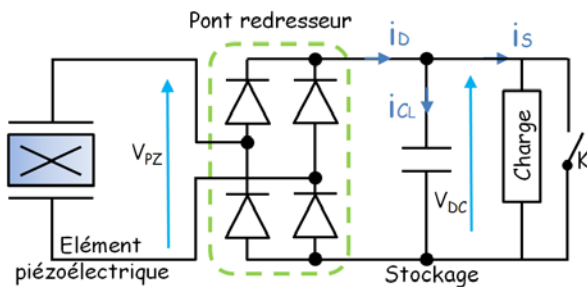


fig. 7 montage élémentaire (d'après [7])

Les étudiants câblent le montage présenté en *fig.7*, en remplaçant la charge (datalogger) par une sonde de tension (la résistance de charge est alors l'impédance de la sonde, soit 10 M Ω). La tension V_{PZ} est relevée en utilisant une sonde d'isolation à haute impédance et envoyée sur l'oscilloscope. Simultanément on relève la tension V_{DC} (cf *fig.8*). A $t = t_B$, l'interrupteur K initialement fermé est ouvert.

4.2 Validation du modèle

Cette partie permet de valider le modèle de l'élément piézoélectrique obtenu précédemment. En régime

sinusoïdal, la mesure de l'accélération maximale permet de remonter à la vitesse maximale et avec le coefficient de déformation α , de déterminer la valeur maximale du courant délivrée par la source équivalente de courant (cf *fig.3*).

Lors d'un essai correspondant à la charge d'un condensateur $C_L=1\mu\text{F}$, on a relevé, en plus de $V_{PZ}(t)$ et de $V_{DC}(t)$: $V_{acc_{max}} = 3,44\text{V}$ et $f = 18\text{Hz}$, soit

$$\dot{u}_{max} = k \cdot \frac{V_{acc_{max}}}{2\pi f} \quad (\text{Eq. 9})$$

On trouve $\dot{u}_{max} = 0.372 \text{ ms}^{-1}$. En dérivant l'Eq.1, on obtient :

$$i_{PZ_{max}} = \alpha \cdot \dot{u}_{max} \quad (\text{Eq. 10})$$

soit $i_{PZ_{max}} = 53,6 \mu\text{A}$. Cette valeur de courant vient (avec $C = 70\text{nF}$) compléter le modèle utilisé dans le logiciel PSIM . On peut ainsi simuler le circuit (*fig.9*) et comparer avec l'expérimentation.

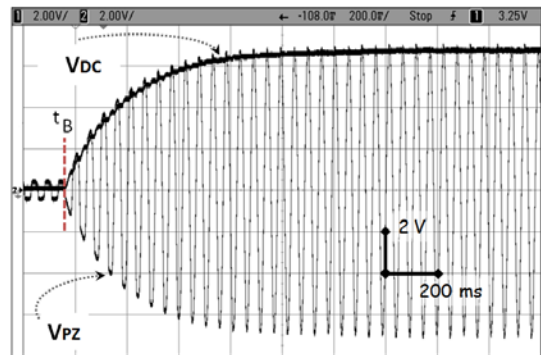


fig.8 Evolution de $V_{PZ}(t)$ et de $V_{DC}(t)$.

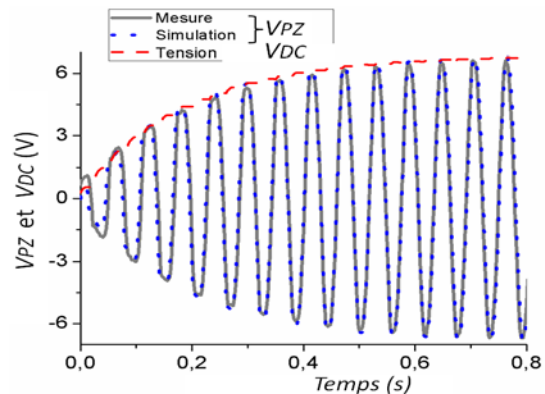


fig.9 Comparaison simulation /mesure pour $V_{DC}(t)$ et $V_{PZ}(t)$.

Les résultats obtenus confirment la validité du modèle électrique du piézoélectrique, aussi bien pour la valeur de la capacité C que pour la constante électromécanique α .

4.3 Première utilisation du modèle

Ce modèle est ensuite utilisé dans PSIM en rajoutant le dispositif de récupération. Dans un premier temps, l'interrupteur S2 reste dans la position donnée sur la *fig.10*. On ne simule qu'un redresseur débitant sur une source de courant continu constante I_S (en changeant I_S , on modifie la consommation de la charge). Afin de

comprendre le fonctionnement et de calculer la puissance récupérable en régime permanent, les étudiants observent les courants et tensions en entrée et en sortie du redresseur à filtrage capacitif (fig.11). Cette partie est importante pour la compréhension du système car les courants sont difficilement mesurables en pratique.

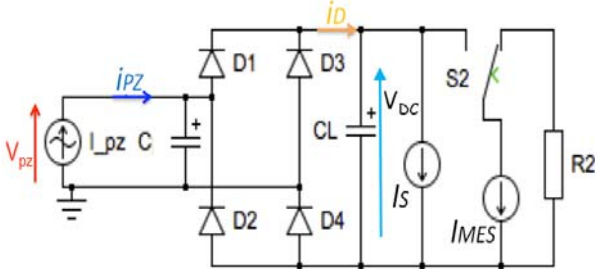


fig.10 : Modèle du dispositif complet (récupérateur, stockage, charge).

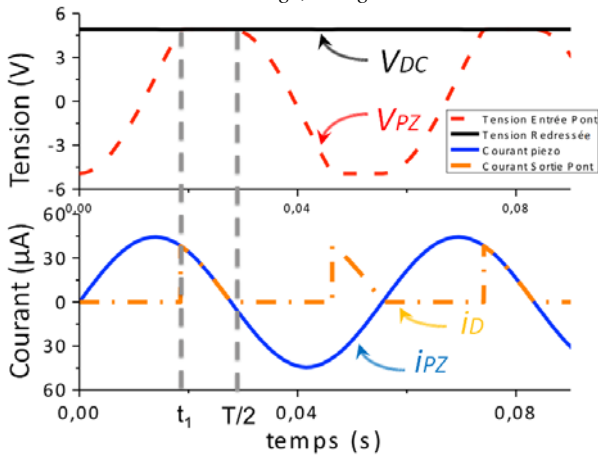


fig.11 Tension et courant en entrée et sortie du pont.

En supposant que la valeur de C_L est suffisante pour que V_{DC} reste constante et en supposant les diodes parfaites, les calculs du régime permanent peuvent se mener de façon analytique comme présenté ci-dessous.

De $t = 0$ à $t = t_1$ le pont de diode ne conduit pas, le courant i_{PZ} charge la capacité du piézoélectrique, et permet de faire monter la tension à ses bornes de $-V_{DC}$ à $+V_{DC}$ en un temps :

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \text{Arcos}\left(1 - \frac{2 \cdot C \cdot \omega \cdot V_{DC}}{i_{PZ_max}}\right) \quad (\text{Eq. 11})$$

En sortie du redresseur, l'énergie E transférée entre l'instant t_1 et $T/2$, s'exprime de la manière suivante :

$$E = \int_{t_1}^{T/2} V_{DC}(t) \cdot i_D(t) dt = \frac{V_{DC} \cdot i_{PZ_max}}{\omega} \cdot (1 - \cos \omega t_1) \quad (\text{Eq. 12})$$

La puissance moyenne fournie en sortie du pont vaut :

$$\langle P_{PZ} \rangle = E / \left(\frac{T}{2}\right) \quad (\text{Eq. 13})$$

En injectant le temps t_1 dans l'équation précédente, on trouve :

$$\langle P_{PZ} \rangle = \frac{2}{\pi} \cdot V_{DC} \cdot i_{PZ_max} \cdot \left(1 - \frac{C \cdot \omega \cdot V_{DC}}{i_{PZ_max}}\right) \quad (\text{Eq. 14})$$

On constate que la puissance fournie dépend de la tension de l'étage continu et du courant i_{PZ_max} (qui est fonction de la déformation maximale). Cette expression permet de tracer la puissance récupérée en fonction de la tension de l'étage continu. Sur la fig.12, on présente l'évolution de la puissance fournie à la charge en fonction de la tension V_{DC} pour différents courants (et donc différents niveaux d'excitation de la poutre).

Lorsque l'Eq.14 est nulle V_{DC} est maximale, on trouve alors :

$$V_{DC_max} = i_{PZ_max} / C \omega \quad (\text{Eq. 15})$$

Les étudiants utilisent l'outil de simulation avec $i_{PZ_max} = 53 \mu\text{A}$ et $C_L = 10 \mu\text{F}$. En modifiant le courant consommé par la charge (I_S), ils relèvent P et V_{DC} et obtiennent les points en "o" sur la fig.12. Le calcul analytique et les simulations donnent des résultats similaires (courbe bleue et points o). Par rapport à l'expression analytique, la simulation permet de comprendre intuitivement que la puissance fournie (et donc dissipée dans la charge) est directement liée au niveau de la tension redressée. Le problème de l'adaptation d'impédance est abordé ici par la simulation mais il peut être aussi étudié pratiquement en faisant varier la résistance de charge R_C et en calculant la puissance P_C fournie en régime établi à partir de la mesure de V_{DC} .

$$P_C = V_{DC}^2 / R_C \quad (\text{Eq. 16})$$

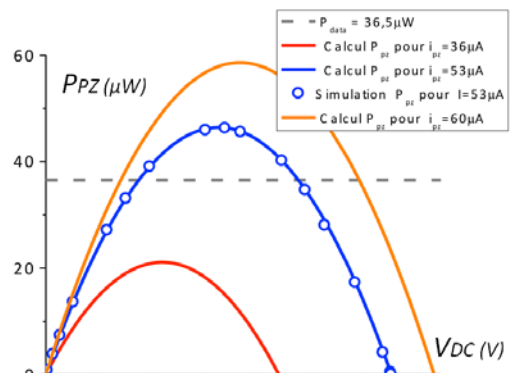


fig.12. Puissance fournie par le récupérateur P_{PZ} vs V_{DC} .

4.4 Alimentation d'un datalogger

On cherche ici à modéliser la consommation du datalogger Jennic 5148 qui présente une consommation continue en mode veille $I_S = 7 \mu\text{A}$ sous 5V, et une consommation momentanée en mode actif I_{MES} lorsqu'il effectue une mesure et envoie une donnée. Cette consommation est de 16mA sous 5V pendant $T_{MES} = 12\text{ms}$ soit une énergie E_{MES} de 937µJ. Les mesures et les transmissions s'effectuent toutes les $T_{CYCLE} = 10$ min. Ces consommations sont modélisées respectivement en fig.10 par la source de courant continue I_S et la source I_{MES} qui n'est connectée au

condensateur de stockage que pendant 12 ms à chaque cycle par la commutation de l'interrupteur S2.

Le récupérateur piézoélectrique doit donc fournir une puissance moyenne sur un cycle de mesure de :

$$\langle P \rangle = V_{DC} \cdot I_S + \frac{E_{MES}}{T_{CYCLE}} \quad (\text{Eq. 17})$$

En supposant que C_L absorbe les pics de consommation sans chute notable de tension, on se ramène au cas simulé en §4.3 *fig.12* avec : $\langle P_{PZ} \rangle = \langle P \rangle = 36,5 \mu W$ et donc $i_{PZ_max} = 53 \mu A$ et $V_{DC} = 5V$.

Afin de garantir une tension de bus V_{DC} quasiment constante, nous dimensionnons la capacité C_L afin que la chute de tension de V_{DC} n'excède pas 0,5V lors des courtes phases de mesure et transmission.

$$E_{MES} = \frac{1}{2} C_L \cdot (V_{max}^2 - V_{min}^2) \quad (\text{Eq. 18})$$

ce qui donne une valeur C_L voisine de 400 μF

Le dimensionnement du système étant maintenant complet les étudiants valident par simulation l'alimentation électrique du datalogger par le piézoélectrique (associé au pont de diode). Ces simulations étant relativement lourde (on simule une durée totale de 30 minutes en prenant en compte les signaux redressés à 36 Hz). Il est important de régler au plus juste le nombre de points par période lors des phases de test (pas plus de 5 soit un pas de calcul de 5 ms).

On observe le fonctionnement du système sur la *fig.13*. On voit clairement que la tension aux bornes du condensateur rentre dans le gabarit prévu, les impulsions de courant (courbe rouge : transmission de mesure) ne viennent pas trop faire chuter la tension du condensateur C_L .

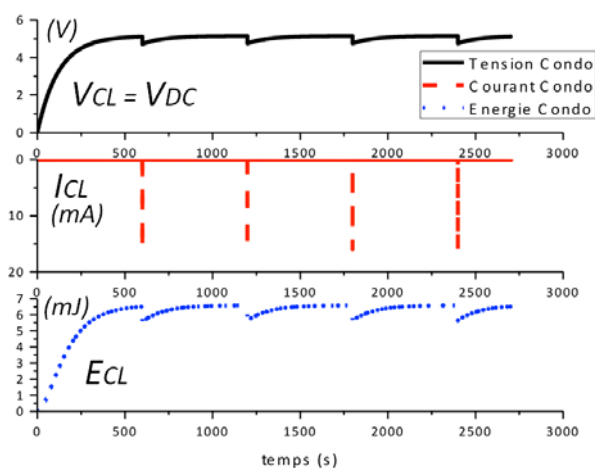


fig.13 Evolution des paramètres du condensateur C_L : tension courant et énergie.

Le dispositif est correctement dimensionné pour l'application mais (cf *fig.12*) il ne fonctionne pas au point de fonctionnement ou la puissance récupérable

est maximale (ce point se situe dans nos conditions à une tension d'environ 3,5V). En effet comme nous l'avons vu précédemment la puissance récupérable dépend très fortement de la tension V_{DC} .

La récupération n'est vraiment pas optimale, car comme on peut voir sur la *fig.11* le courant i_D en sortie du redresseur est nul pendant une grande partie de la période. En effet, à chaque alternance, la tension aux bornes du piézoélectrique doit s'inverser, et la dynamique de cette inversion est proportionnelle à la fréquence d'excitation du piézoélectrique.

Pour améliorer la récupération d'énergie, de nombreuses techniques existent [8]. Il est aussi possible d'une part d'adjoindre à ce dispositif un mini convertisseur afin d'adapter l'impédance de la charge vue du dispositif de récupération et d'autre part d'utiliser une autre structure de commande comme nous l'aborderons dans le paragraphe suivant avec une structure SSHI.

5 STRUCTURE SSHI.

Cette partie présente une commande plus performante que la structure précédemment étudiée. Il existe plusieurs dispositifs de type SSHI (Synchronized Switch Harvesting on Inductor) [9], le principe est globalement le même pour tous, il consiste à inverser très rapidement la tension aux bornes du piézoélectrique lorsque le courant i_{PZ} passe par zéro. De cette façon le courant i_{PZ} et la tension aux bornes du piézoélectrique sont remis en phase (contrairement au simple pont diode). Nous proposons dans ce bureau d'étude d'étudier la structure SSHI parallèle présentée en *fig.14*

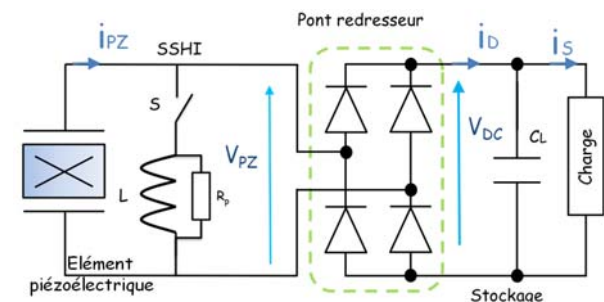


fig.14 Schéma du SSHI parallèle.

Une inductance L est insérée en parallèle du piézoélectrique. Cette inductance n'est connectée au reste du circuit (via l'interrupteur S) que pendant un temps très court nécessaire à l'inversion de la tension aux bornes de C ce qui correspond en première approximation à la demi période du circuit résonnant LC . Nous choisissons d'avoir une durée d'inversion $t_{inv} = 0,1ms$ (afin que cette durée soit négligeable devant la période de résonance de la poutre). La valeur de l'inductance est donc :

$$L = \frac{t_{inv}^2}{\pi^2 \cdot C} = 14.4 \text{ mH} \quad (\text{Eq. 19})$$

Ce dispositif étant assez complexe à mettre en place (commande de l'interrupteur), les étudiants utilisent la simulation afin de le comparer au redresseur à filtrage capacitif. Afin que la simulation soit réaliste l'inductance n'est pas parfaite ; nous lui rajoutons une résistance R_p en parallèle qui tient compte des pertes globales, afin d'avoir une valeur réaliste nous choisissons $R_p=3k\Omega$. Il est important de noter que R_p représente ici un élément dissipatif, nous aurions pu choisir une résistance en série avec l'inductance modélisant les pertes joules ou encore une résistance de pertes dans l'élément piézoélectrique.

Pour piloter l'interrupteur à la fermeture, il faut détecter le passage par 0 du courant i_{pZ} . L'ouverture se faisant après une durée t_{inv} . Différentes méthodes ont été développées pour cela [10] [11]. Plus simplement, le modèle de la fig.15 est utilisé pour la simulation.

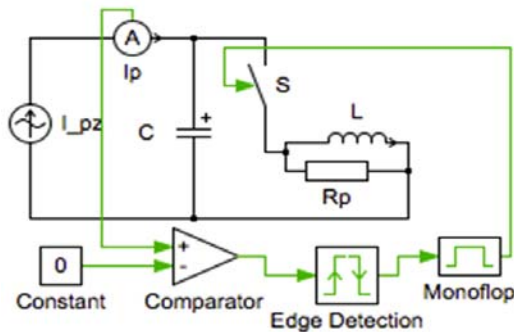


fig.15 Structure SSHI - Commande de l'interrupteur.

Le comparateur et le détecteur de front vont détecter les passages par zéro du courant, un monostable permet de régler la durée de fermeture de l'interrupteur à t_{inv} . Le dispositif est ensuite simulé en utilisant les mêmes paramètres que ceux utilisés avec le pont de diode i.e. $C_L=10\mu F$ et $i_{pZ_{max}}=53\mu A$.

Le dispositif est ensuite simulé de la même manière que le redresseur à diodes. On peut donc observer les formes d'ondes suivantes sur la fig.16:

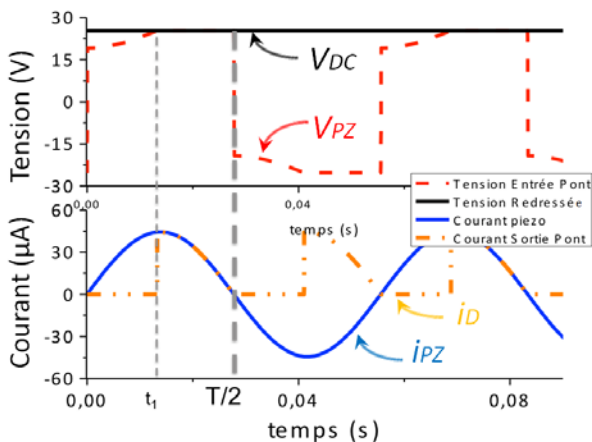


fig.16 : tensions et courants en entrée et en sortie du redresseur

On observe que la tension aux bornes du piézoélectrique et le courant i_{pZ} sont bien en phase. A $t=0$ la tension V_{PZ} n'est pas égale à $-V_{DC}$ car elle vient d'être inversée à l'aide du SSHI parallèle. Cela revient à considérer que les charges stockées sur la capacité du diélectrique sont inversées par un transfert via l'inductance. Du fait de la présence de la résistance R_p l'inversion n'est pas complète, la tension V_{PZ} arrive à une valeur $V_1=V_{DC}$, le pont est donc bloqué. La tension V_{PZ} augmente jusqu'à la conduction du pont de diode qui débute à $t=t_1$ lorsque $V_{PZ}=V_{DC}$. Par rapport au simple pont de diode le temps de conduction est donc accru, par effet cumulatif, la tension aux bornes du condensateur est elle aussi accrue. Il est important de noter qu'en absence d'éléments dissipatifs, la tension passe directement à $\pm V_{DC}$ lors de la fermeture de l'interrupteur du SSHI. Dans ce cas, la tension du bus continu V_{DC} ne cesse de croître: à chaque période la totalité des charges déplacées par le piézoélectrique est transférée à la capacité du bus continu C_L . La valeur V_1 est déterminée analytiquement en ne considérant que le circuit L-C- R_p ; c'est la tension aux bornes de C après la première pseudo demi-période de fonctionnement.

$$V_1 = V_{DC} \cdot \exp\left(-\frac{\pi}{2R_p} \sqrt{\frac{L}{C}}\right) \quad (\text{Eq. 20})$$

Le calcul de la puissance se fait de la même manière que pour le pont de diode car elle est transmise entre t_1 et $T/2$. En considérant que le transfert de puissance se fait dans une source de courant continue I_S on obtient :

$$\langle P_{PZ} \rangle = \frac{1}{C\omega} (2i_{pZ_{max}} - \pi I_S) \frac{I_S}{1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2R_p} \sqrt{\frac{L}{C}}\right)} \quad (\text{Eq. 21})$$

On peut remarquer dans l'équation précédente qu'avec une inductance parfaite (sans pertes : R_p infinie) la puissance théoriquement récupérable est infinie. Lors de la réalisation de ce type de système une attention particulière doit être accordée au bobinage de la self.

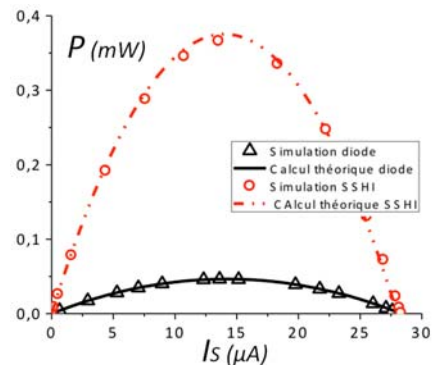


fig.17 Puissances récupérables avec un dispositif SSHI et avec un simple redresseur à filtrage capacitif.

Au final, les étudiants peuvent comparer les puissances fournies par chacun des systèmes en fonction du courant consommé par la charge. Les résultats sont présentés sur la fig.17.

Comme pour le pont de diode on observe que la puissance récupérable (tout comme la tension de bus continue) évolue en fonction du courant consommé. Le dispositif SSHI permet de récupérer bien plus de puissance. Si l'on considère qu'entre le SSHI et le datalogger on dispose d'un système sans perte permettant d'adapter l'impédance (c'est à dire de garantir la tension de bus quel que soit le courant), on peut alors travailler au point où la puissance récupérable est la plus élevée (370 μ W pour le SSHI et 46 μ W pour le pont de diode seul). Le temps pour récolter l'énergie nécessaire à la mise en marche initiale du datalogger (507 mJ) serait donc de :

- 1350 s soit 22,5 minutes pour le dispositif SSHI
- 10870 soit 3 heures pour le pont de diode

On voit donc ici clairement l'avantage du SSHI .

Ce dispositif reste complexe à mettre en place et les simulations présentées utilisent des caractéristiques idéales (à l'exception des pertes dans la bobine). Il faudrait prendre en compte la consommation de l'interrupteur MOS ainsi que celle de sa commande pour être plus proche de la réalité.

6 CONCLUSION.

Ce travail a été réalisé par des étudiants lors d'un bureau d'étude de 16 h en M2 CESE (Conversion de l'Energie et Systèmes Electriques). Les premiers objectifs visés ont été atteints :

- intéresser les étudiants,
- les inciter à trouver par eux-mêmes les manipulations à réaliser en vue de la modélisation du dispositif,
- réfléchir sur la validité des mesures obtenues,
- faire le lien sur un système original entre les aspects expérimentation, modélisation et simulation.

Les étudiants se sont aussi posé des questions relatives aux problèmes d'adaptation d'impédance pour optimiser le transfert de puissance. Enfin ils ont pu avoir une initiation à des commandes adaptées performantes vis-à-vis de la récupération d'énergie et originales par rapport à leurs acquisitions antérieures.

La taille importante du dispositif expérimental de récupération est critiquable mais justifiée pour un dispositif appelé à passer en de nombreuses mains. Les dimensions du réglelet permettent aussi de fixer facilement l'accéléromètre. Des poutres piézoélectriques (MIDE) de petite taille et des circuits intégrés dédiés (Linear) existent et sont disponibles commercialement.

Dans la continuité de ce bureau d'étude, une réalisation en cours va utiliser ces éléments pour montrer la miniaturisation possible de tels dispositifs.

7 REFERENCES

- [1] IoT <https://sen.se/>
- [2] <https://jawbone.com/up>
- [3] www.perpetuum.com ; <http://www.microgensystems.co/>
- [4] Dibin Zhu, S. P. Beeby, M. J. Tudor, N. R. Harris and N. M. White, *Airflow Energy Harvester for Wireless Sensing in Air Duct. Conf. PowerMEMS 2011, Seoul, Korea.*
- [5] D. Vasic, C. Yu-Yin, F. Costa, *Self-powered piezoelectric energy harvester for bicycle, 39th Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, 2013, pp. 1856–1861.*
- [6] *Approche illustrée des bases de l'électronique, Y. Bernard, Vol 7, Num Hors série 1, 2008, CETSIS 2007.*
- [7] D.Vasic, F.Costa, *Applications des éléments piézoélectriques en électronique de puissance, Techniques de l'ingénieur, D3235*
- [8] S. Boisseau, P. Gasnier, M. Gallardo, G. Despesse, *Self-starting power management circuits for piezoelectric and electret-based electrostatic mechanical energy harvesters, , PowerMems 2013,*
- [9] Adrien Badel, *récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire, thèse, juillet 2008.*
- [10] Yuan-Ping Liu and Dejan Vasic, *Self-Powered Electronics for Piezoelectric Energy Harvesting Devices, 2012, <http://dx.doi.org/10.5772/51211>*
- [11] Romain Monthéard, *Récupération d'énergie aéroacoustique et thermique pour capteurs sans fil embarqués sur avion, thèse, 2014.*