

Rapport de projet de fin d'étude

La récupération d'énergie vibratoire



Abdel-hakim MAHIR

Tuteurs de projet : M Alexandre BOE,
Nicolas DEFRANCE, Thomas VANTROYS

Sommaire

Introduction	3
I. Etude générale des différentes méthodes de récupération d'énergie vibratoire	4
A. Ressources mécaniques possibles.....	4
B. Les différentes méthodes de récupération d'énergie.....	4
II. Etude d'un générateur piézoélectrique.....	8
A. Couplage électromécanique des matériaux piézoélectriques.....	8
B. Les différents modes de couplage électromécanique	9
C. Types de matériaux piézoélectriques et critères de choix du matériau	10
D. Choix du matériau	12
III. Génération et stockage de l'énergie électrique.....	13
A. Premiers tests réalisés avant réception du MFC.....	13
B. Circuits d'interface standard	16
C. Charge d'une batterie.....	22
IV. Optimisation électrique	24
A. Les systèmes de gestion de l'énergie	24
B. Systèmes commercialisés	28
C. Circuit de charge d'une capacité avec régulateur	30
Conclusion	32
Annexes.....	33
Annexes.....	37

INTRODUCTION

Depuis quelques années, de nombreuses recherches sont faites sur la question de l'autonomie énergétique et notamment sur l'alimentation de capteurs.

Les capteurs embarqués ont gagné en précision, fiabilité, robustesse tout en se miniaturisant mais ils sont toujours limités par la durée de vie de leur système d'alimentation électrique. Une alternative prometteuse est de récupérer l'énergie mécanique ambiante afin d'assurer l'autonomie énergétique nomade.

La récupération d'énergie vibratoire vise ainsi à réaliser des micro-générateurs électriques de taille centimétrique permettant d'alimenter des systèmes électroniques en absorbant l'énergie « ambiante » présente dans le milieu environnant. Une application prometteuse est donc l'alimentation de capteurs autonomes communicants. Le développement de ces réseaux autonomes répond à un besoin grandissant de mesurer, d'analyser et de contrôler l'évolution de notre environnement naturel, le comportement de constructions civiles ou militaires, ou encore l'état de santé de notre corps humain.

A l'heure actuelle, ces capteurs sont alimentés par des piles qui imposent une maintenance régulière et posent des questions environnementales (recyclage notamment). S'il est possible de substituer ces piles par des micro-générateurs, alors l'utilisation de ce type de capteur se généralisera, et permettra de développer des systèmes mécatroniques plus performants.

I) Etude des méthodes de récupération d'énergie vibratoire

Le cahier des charges de mon projet est de réaliser un module de récupération d'énergie vibratoire. Pour réaliser cela, j'ai d'abord lu divers documents au sujet de la récupération d'énergie vibratoire pour choisir la solution optimale. Je vous présente donc tout d'abord un résumé global de mes recherches qui sont surtout théoriques.

A) Ressources mécaniques possibles

Les formes d'énergie présentes dans l'environnement sont diverses. Voici les ressources qui pourraient être exploitées dans le cadre de ce projet :

- Mouvements humains : -volontaires : pédaler, tourner une manivelle, tirer...
-Naturels : efforts sous les pieds, articulations
- Vibrations mécaniques : dans l'environnement (machines, appareils électroménagers...), caractérisées en fréquence et en accélération
- Vibrations acoustique : -seuil d'audition : 1pW/m^2
-bruit de 100 dB : 10mW/m^2

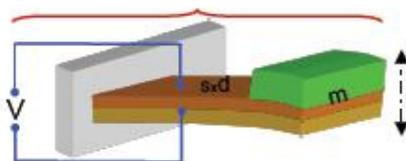
B) Les différentes méthodes de récupération d'énergie

Il existe trois principales méthodes de récupération d'énergie :

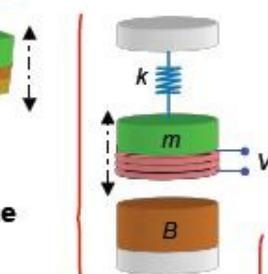
Conversion de l'énergie vibratoire

■ 3 méthodes classiques de conversion de puissance :

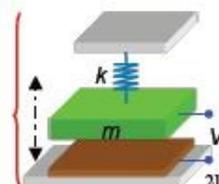
➤ piézoélectricité



➤ électromagnétisme (induction)

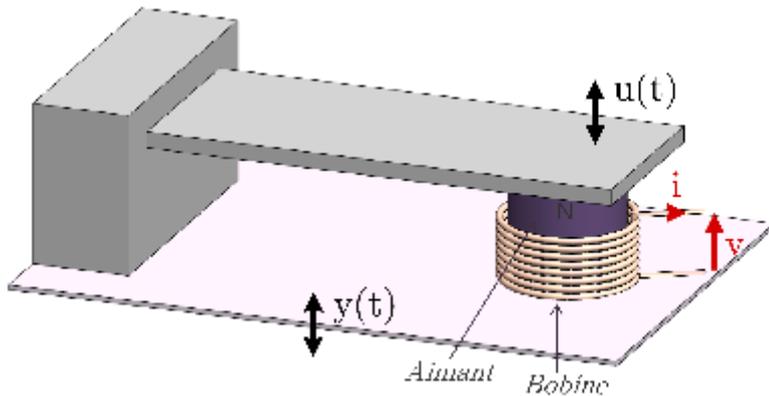


➤ électrostatique



1) Transduction électromagnétique

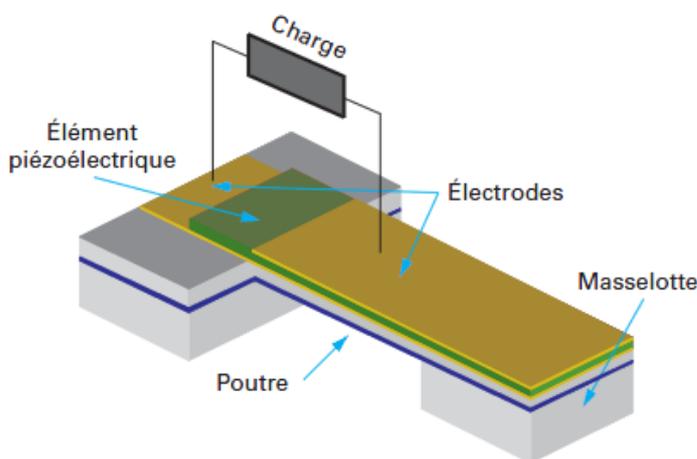
Exemple de transducteur électromagnétique



Un transducteur de type électromagnétique se compose d'un ou plusieurs aimants créant un champ magnétique constant, ainsi que d'une bobine plongée dans ce champ. Un système mécanique résonant tel qu'une poutre encastree permet de générer un déplacement relatif $u(t)$ entre l'aimant et la bobine lorsque le système est excité par une vibration $y(t)$. Le changement au cours du temps du flux magnétique à travers la surface entourée par la bobine crée une tension V proportionnelle à la vitesse de changement du flux magnétique ϕ et au nombre de tours N de la bobine, selon la loi de Faraday :

$$V = -N \frac{d\phi}{dt}$$

2) Transduction piézoélectrique



Le principe d'un dispositif piézoélectrique de récupération d'énergie est représenté sur la figure ci-dessus. Il est typiquement constitué d'une poutre encastree, dont une extrémité est liée à la structure vibrante. Les vibrations de la poutre induisent une déformation du matériau piézoélectrique créant ainsi sa polarisation. La masselotte a l'avantage d'engendrer un plus grand débattement et elle permet aussi un ajustement de la fréquence de résonance et augmente la bande passante.

→cf annexe modèle de transduction piézoélectrique

3) Transduction électrostatique

Un générateur électrostatique est basé sur la variation de force électrique entre deux armatures d'un condensateur en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Il existe deux principaux cycles de fonctionnement : à charge constante ou à tension constante.

L'équation suivante exprime l'énergie électrique récupérable : $E = \frac{1}{2} V^2 * (C_{\min} - C_{\max})$

Avec : V tension aux bornes de la structure

C_{\min} et C_{\max} les capacités maximales et minimales de la structure

Les convertisseurs électrostatiques nécessitent une source extérieure pour polariser la structure en début de cycle. Cette source est souvent d'une valeur très importante (> 100 V), Cette polarisation est nécessaire à chaque début de cycle mais des solutions ont été proposées. Toutefois c'est sans nul conteste un inconvénient majeur.

Voici un tableau récapitulant les avantages et inconvénients de chaque méthode de récupération d'énergie :

Type	Avantages	Inconvénients
Piézoélectrique	<ul style="list-style-type: none"> -Compact -Plus ou moins fortes tensions générées -Fort couplage pour les monocristaux -Compatible avec intégration MEMS 	<ul style="list-style-type: none"> -Dépolarisation -Fragilité des éléments pzt -Haute impédance -Faible couplage pour les polymères frittés
Electromagnétique	<ul style="list-style-type: none"> -Forts couplages -Absence de matériaux intelligents 	<ul style="list-style-type: none"> -Intégration MEMS difficile -Faibles tensions générées
Electrostatique	<ul style="list-style-type: none"> -Forte tension générée -Compatible avec fabrications MEMS 	<ul style="list-style-type: none"> -Source de tension ou charge externe requise -Contraintes mécaniques et capacitifs

La solution piézoélectrique est la plus prometteuse car elle a le coefficient de couplage électromécanique le plus élevé, ne nécessitant pas de polarisation. Les systèmes piézoélectriques sont bien adaptés aux technologies de fabrication des microsystemes (MEMS).

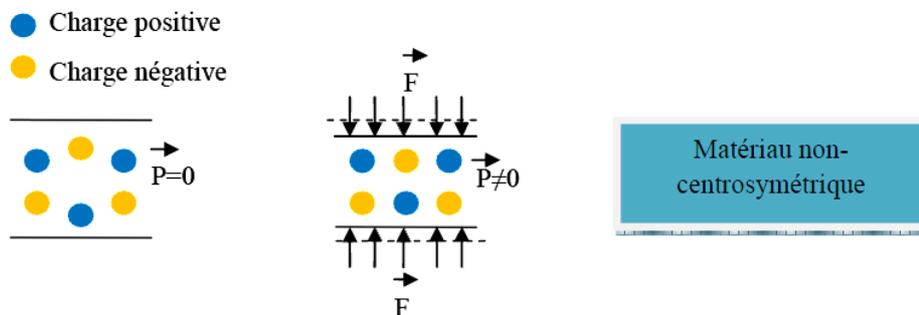
II) Etude d'un générateur piézoélectrique

La piézoélectricité, découverte en 1880 par les frères Pierre et Jacques Curie, est une propriété particulière des corps possédant une anisotropie cristalline (dépendant de la direction). Elle se manifeste par deux effets :

- l'effet direct se caractérise par la polarisation du matériau sous l'action d'une contrainte mécanique ;
- l'effet inverse, quant à lui, correspond à l'apparition d'une déformation mécanique sous l'effet d'un champ électrique appliqué au matériau.

On trouve cet effet piézoélectrique dans certains matériaux (cristaux, céramiques, polymères ou composites). Il naît du décalage des barycentres des charges positives et négatives de la maille cristalline provoqué par la déformation mécanique de cette maille (cf. Figure ci-dessous). De ce fait, la propriété piézoélectrique est fortement liée à la symétrie de la maille sachant qu'une maille "centrosymétrique" (i.e qui possède un centre de symétrie) ne peut donner lieu à un cristal piézoélectrique.

Illustration à l'échelle microscopique de l'effet piézoélectrique



A) Couplage électromécanique des matériaux piézoélectriques

Le coefficient de couplage électromécanique d'un matériau piézoélectrique représente son efficacité à convertir une énergie mécanique en une énergie électrique. Le couplage dépend de la qualité du matériau, qui est fortement liée à l'orientation du réseau cristallin. Il dépend aussi du mode de couplage électromécanique (cf partie suivante).

Voici l'expression du coefficient de couplage électromécanique en mode générateur :

$$k^2 = \frac{\text{énergie_electrique}}{\text{énergie_mécanique}}$$

B) Les différents modes de couplage électromécanique

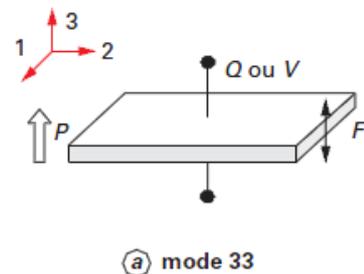
Le mode de couplage traduit la façon dont la mécanique et l'électrique interagissent entre eux. Deux modes de couplages sont classiquement exploités :

-le mode 33 où la déformation est dans le même sens que la polarisation

-le mode 31 où la déformation est perpendiculaire à la polarisation

Un système d'axe 1, 2, 3 est habituellement utilisé pour identifier les directions. L'axe 3 est l'axe de polarisation du matériau.

Les systèmes d'équations suivant récapitulent les couplages au sein de matériaux piézoélectriques :



- Pour le mode 33

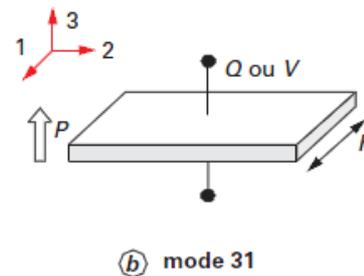
$$S_3 = s_{33} * T_3 + d_{33} * E_3$$

$$D_3 = d_{33} * T_3 + \epsilon_{33} * E_3$$

- Pour le mode 32

$$S_1 = s_{11} * T_1 + d_{31} * E_3$$

$$D_3 = d_{31} * T_3 + \epsilon_{33} * E_3$$



Avec S déformée,

S déformation relative

T contrainte mécanique (Pa)

E champs électrique (V/m)

D déplacement électrique (C/m²)

s souplesse (m²/N)

d constante piézoélectrique (C/N)

ϵ permittivité (F/m)

C) Types de matériaux piézoélectriques et critères de choix du matériau

Les matériaux piézoélectriques sont très variés. Ils peuvent être :

- Cristallins (quartz..)
- Céramiques (PZT...)
- polymères (PVDF...)
- piézocomposites (Macro Fiber Composite MFC de Smart-Material Corporation...)

Le choix du matériau se base sur les paramètres suivants :

- Le couplage électromécanique k (vu dans la partie précédente)
- La raideur des matériaux piézoélectriques ou le module d'Young ($Y_p=1/s_{11}$)

Un matériau piézoélectrique à faible raideur aide à obtenir de basses fréquences de résonances.
- Le facteur de qualité Q_m : Il est important de choisir le matériau avec le meilleur facteur de qualité pour minimiser les pertes mécaniques dans la structure
- Les pertes diélectriques ($\tan(\delta)$): Ces pertes doivent bien entendu être minimisées
- La plage de variation de température ($-20 < T < 80^\circ$) limitée par la température de Curie

Tableau : propriété des matériaux piézoélectriques

Matériau	ϵ^T	d_{33} (10^{-12} m/V)	d_{31} (10^{-12} m/V)	k_{33}	k_{31}	$Tan(\delta)$ (%)	Q_m	Y_{31} (GPa)	Y_{33} (GPa)	λ_p
Quartz	4.5	2.31	0.727	-	-	-	10^4 - 10^6	-	-	-
Soft PZT	4100	620	-260	0.73	0.36	2.7	72	51	59	6.1
Hard PZT	1350	300	-109	0.68	0.33	0.35	1400	63	76	25
PMN-PT	4200	2000	-930	0.9	0.72	0.4	33	124	108	514
PZN-PT	7256	2721	-1425	0.94	0.85	0.4	33	157.3	99	700
AlN	10	6.8	2.625	0.31		0.1	-	-	-	6.9
ZnO	11	12.3	5.1	0.46	0.18	-	-	-	-	-
PVDF	13	9	1	0.18	0.2	-	20	-	-	-

La valeur λ_p est une valeur représentant l'efficacité en termes de conversion mécano-électrique. A travers ce tableau de comparaison on en déduit que les monocristallins ont la meilleure efficacité de conversions. Ce facteur ne tient toutefois pas en compte le coût de chacun des matériaux. Les monocristaux sont très cher à fabriquer. Pour des applications de masse, les recherches se focalisent sur l'amélioration des propriétés des céramiques polycristallines pzt.

Par ailleurs l'usage du mode 33 est intrinsèquement le plus intéressant quel que soit le matériau.

Dans le cadre du projet, je souhaiterais faire une application de puissance microsource pour un élément pzt (ie pour une fréquence de résonance entre 10 Hz et 200Hz, je devrais récupérer une énergie de l'ordre du μW).

Voici les éléments pzt auxquelles je me suis particulièrement intéressé :

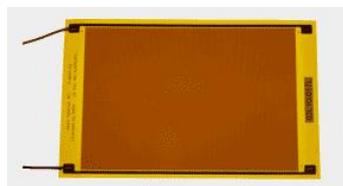
- pastille massive céramique pzt



- transducteur piézocéramique (prix : 70 centimes)



- MFC (Macro Fiber Composite) (prix : 40 euros)



- PZT piézocéramique (USA)



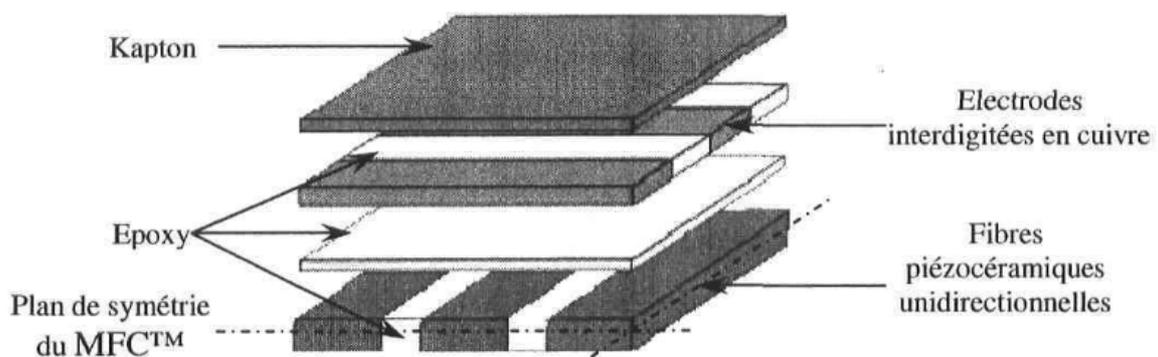
d) Choix du matériau

Suite à l'étude réalisée, j'ai voulu commander un pzt piézocéramique car ses performances et ses caractéristiques sont optimisées. Toutefois ce matériau était vendu uniquement par pack ou à l'étranger (USA, Chine). J'ai finalement commandé un matériau de type MFC. Ces caractéristiques et ses performances sont également intéressantes.

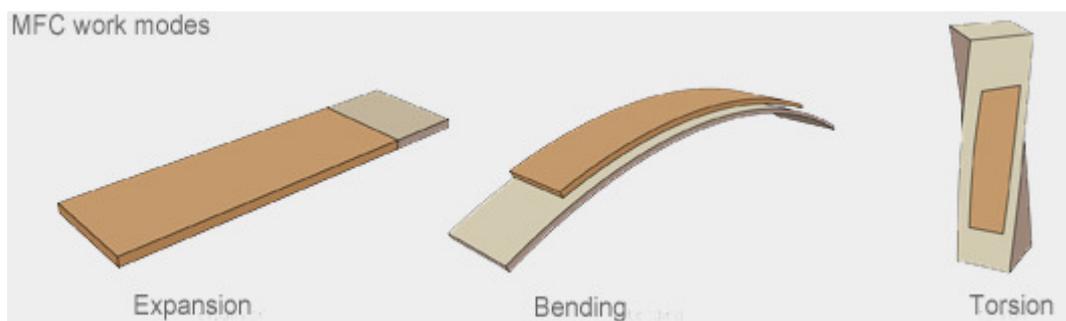
J'ai passé la commande d'un MFC avec la compagnie Smart Material en Allemagne.

Le MFC est basé sur le principe des actionneurs à fibres actives et comporte trois constituants principaux : l'époxy, les fibres piézoélectriques et des électrodes. Comme le montre la figure ci-dessous, le MFC est composé d'une couche de fibres rectangulaires unidirectionnelles de PZT-5A dans une matrice d'époxy, placée entre deux ensembles comportant une fine couche d'époxy et un arrangement d'électrodes en cuivre. Ces électrodes sont elles mêmes couvertes par un film de Kapton.

Composition de l'actionneur MFC



L'avantage est qu'il est souple, durable et fiable. De plus, il peut travailler à la fois sur le mode d33 et d31. La tension générée maximum peut atteindre **1500 Volts**.



III) Génération et stockage d'énergie électrique

A) Premiers tests réalisés avant la réception du MFC

1) Génération d'énergie sur le principe de la méthode électromagnétique

En attendant de recevoir le MFC, j'avais réalisé une première expérience pour générer de l'énergie sur le principe de la méthode électromagnétique.

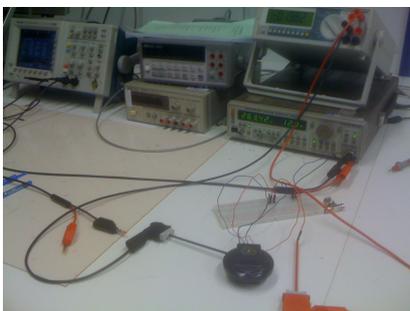
Un haut parleur utilise ce principe là. En effet un haut parleur contient un aimant en mouvement enroulé d'une bobine. Ainsi, n'ayant pas de système vibrant j'ai superposé 2 hauts parleurs. Afin d'alimenter le haut parleur et de mettre en mouvement la bobine de ce haut parleur, je l'ai alimenté par une tension alternative de tension 12 Volts crête à crête. Ce haut parleur en mouvement génère le déplacement de l'aimant du second haut parleur. J'ai donc utilisé un voltmètre pour mesurer la tension générée.

Voici les résultats obtenus :

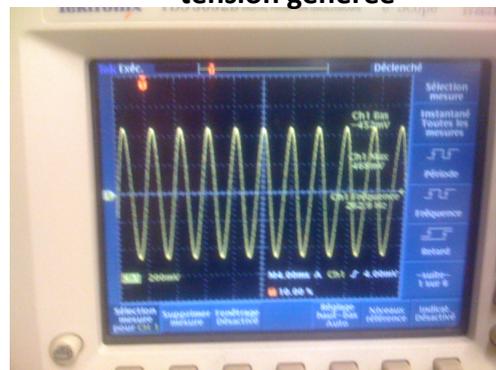
Fréquence	200 Hz	300 Hz	350 Hz	400 Hz	600 Hz	2 kHz
Tension crête à crête	400 mV	1,4 V	2,048 V	2, 048 V	568 mV	1 kHz

Le courant obtenu était toutefois très faible.

Image du circuit électrique



tension générée



2) Analyse de la variation de la tension via un arduino

Par ailleurs, J'ai acheté **deux transducteurs céramiques pzt**.

J'ai analysé en fonction de la pression que l'on imposait, que l'on pouvait obtenir une **tension d'environ 2 volts**. Toutefois ce transducteur céramique est adapté pour une fréquence de résonance de 4kHz.

J'ai également analysé via un arduino connecté au pc les variations de la tension générée en fonction de la pression que l'on exerce sur le transducteur pzt.

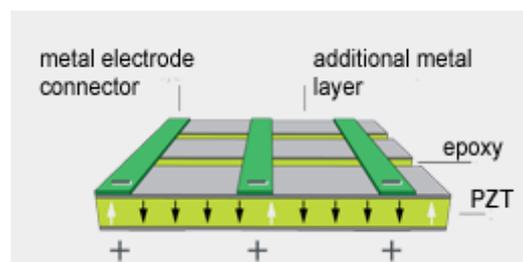
En attendant la réception du MFC j'ai travaillé le début du mois de janvier sur le développement d'un programme arduino permettant de récupérer la valeur de la tension générée par l'élément piezoélectrique.

Ainsi l'idée est de pouvoir mesurer la tension générée par un élément piézoélectrique placé dans un environnement quelconque (exemple : pont, chaussure, moteur...) en fonction des mouvements réalisés.

3) Présentation du MFC reçu

J'ai reçu le MFC fin janvier. J'ai choisi un MFC de type P2. Comme il a été dit dans la seconde partie le mode 33 (type P1) semble plus intéressant. Toutefois dans le cadre du projet, le type P1 n'est pas vraiment adapté car il génère une tension beaucoup trop élevée (de l'ordre de 1000 Volts) et donc une sortie de courant très faible en raison de la façon dont a été conçu le MFC. Pour minimiser les pertes d'énergie et obtenir un meilleur rendement, il est donc préférable dans notre cas d'utiliser un type P2.

Les dimensions du MFC sont 18mm*14mm.



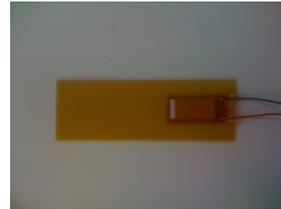
MFC type P2,P3 (mode d31)

Il n'est pas vraiment possible de produire de l'énergie que par la vibration du MFC. Il faut positionner le MFC à l'écart de l'axe neutre pour induire la moins de déformation due aux vibrations. J'ai donc attaché le MFC à un substrat (ex : fibre de verres) de telle sorte que le MFC soit tendu et qu'une pression soit exercée lorsque la fibre de verre se déforme.

Pour 'attacher le MFC' à la fibre de verre, j'ai utilisé une colle Epoxy. Pour avoir un rendement optimal, il a fallu réaliser le collage à 60 °C pendant 2h.



MFC



MFC attaché à une fibre de verre

J'ai donc pu réaliser par la suite des expériences sur un système vibrant au laboratoire de l'institut de recherche sur les composants logiciels et matériels pour l'information et la communication avancée de Lille (IRCICA). Toutefois j'étais très contraint par les disponibilités du laboratoire en janvier-février car des chercheurs travaillent sur ce système.

L'IRCICA dispose d'un pot vibrant électromagnétique qui fonctionne dans la bande audio, quelques Hz à 20 kHz. Pour régler le pot vibrant, un signal électrique est envoyé, à l'aide d'un GBF et d'un amplificateur de puissance.

Une masse de 5 grammes a été attachée sur la fibre de verre pour amplifier les vibrations. Il est important de rappeler que l'on peut **modifier la valeur de la fréquence de résonance du MFC en modifiant la masse ou le dimensionnement de la fibre de verre.**



Fibre de verre+MFC encastrés sur le pot vibrant

Ayant à ma disposition le MFC, je vais donc vous présenter les circuits standards de récupération d'énergie ainsi que les expériences réalisées.

B) Circuits d'interface standard

1) Approche standard AC

Le schéma de principe d'un dispositif de récupération d'énergie piézoélectrique avec une simple charge résistive est représenté sur la figure ci-dessous et l'image montre les formes d'onde de la tension aux bornes de la résistance (en jaune) et le déplacement x de la masse (en violet).

Ce circuit peut être utilisé pour calculer la charge optimale R , la puissance maximale P ainsi que la fréquence de résonance. Il était nécessaire de réaliser tout d'abord ce circuit pour avoir également un ordre de grandeur des valeurs délivrées par le MFC.

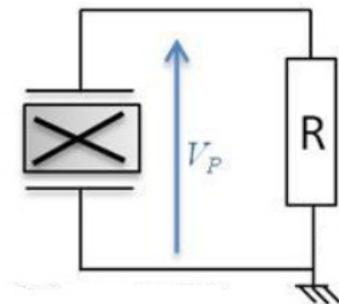


Schéma du circuit avec une résistance



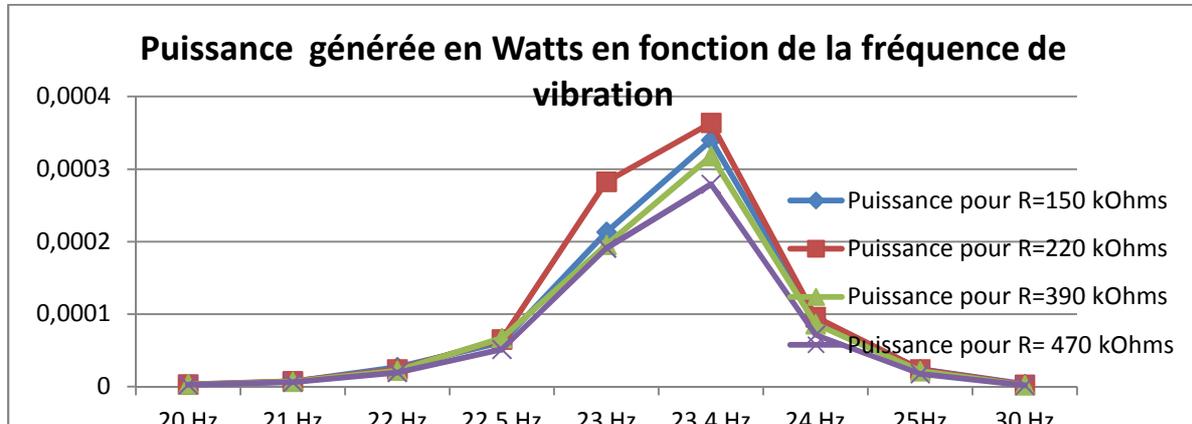
Allure de la tension et du déplacement x

Des mesures ont été réalisées pour plusieurs valeurs d'amplitude de vibration. Un amplificateur de puissance permettait de régler l'amplitude de vibration. Pour une amplitude faible de 80 mVpp ($x < 0,2\text{mm}$), on atteignait une tension à vide de 7,5 Volts crête à crête alors que pour une amplitude de 400 mVpp ($x > 1\text{mm}$) on obtenait une tension à vide d'environ 43 Volts crête à crête. Voici ci-dessous les résultats des valeurs des tensions crête à crête obtenus pour amplitude de 400 mVpp avec une résistance R variable :

Fréquence	R=150 k Ω	R=220 k Ω	R=390 k Ω	R=470 k Ω
20Hz	1,82 V	2,3 V	3,18 V	3,2 V
21Hz	2,9 V	3,6 V	4,7 V	4,8 V
22Hz	5,7 V	6,5 V	8,32 V	8,6 V
22,5Hz	8,56 V	10,7 V	14,48 V	13,9 V
23Hz	16 V	22,3 V	24,7 V	26,8 V
23,4Hz	20,2 V	25,3 V	31,5 V	32,4 V
24Hz	10,6 V	13 V	16,4 V	16,4
25Hz	5,4 V	6,5 V	8,2 V	8,2 V
30Hz	2,1 V	2,2 V	2,5 V	2,5 V

On peut alors conclure que la fréquence de résonance vaut 23,4 Hz.

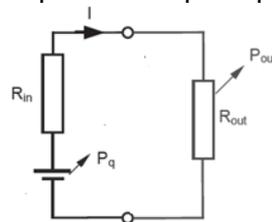
On sait que $P=(U_{eff})^2/R$. On en déduit que la puissance maximale pour les vibrations étudiées est égale à 360 μ W :



On constate que l'on atteint au maximum 360 μ W pour une résistance $R=220$ k Ω . Il existe donc une valeur d'une résistance pour laquelle la puissance récupérée est maximisée.

Si l'on considère que l'élément piézoélectrique est un générateur de tension U_q avec une résistance interne R_{in} et que l'on place une résistance R_{out} représentant la charge, on peut alors calculer le rendement η de transfert de puissance qui dépend de R_{out} :

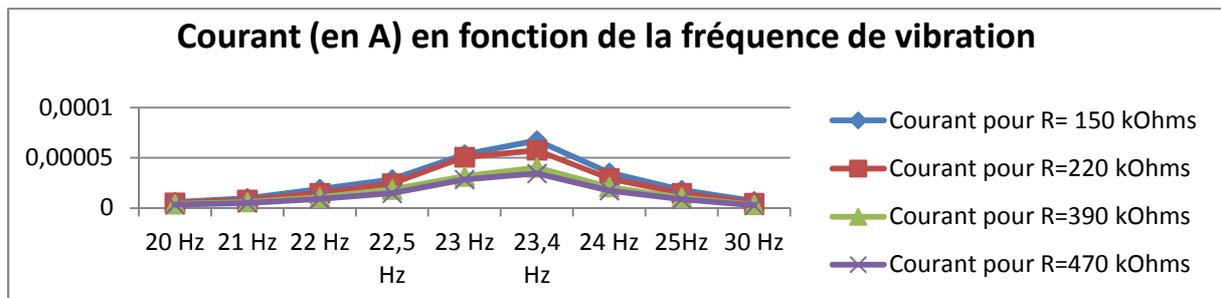
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_q} = \frac{R_{out}}{R_{in} + R_{out}}$$



Modèle du MFC avec une charge R

Il existe donc bien une valeur de R pour laquelle la puissance générée est maximisée.

Par ailleurs on obtient une amplitude du courant vraiment très faible de l'ordre de 70 μ A :



La faible valeur du courant est la contrainte principale du MFC.

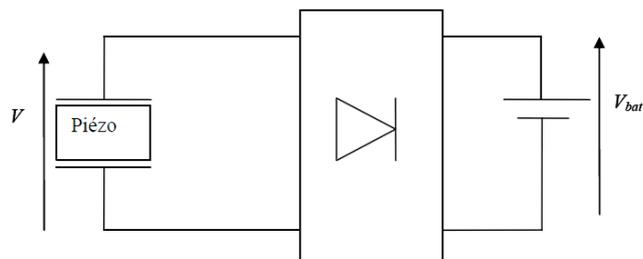
2) Approche standard DC

Les caractéristiques électriques des générateurs piézoélectriques ne sont généralement pas très favorables : tension élevée et alternative, faible courant, impédance de sortie élevée.

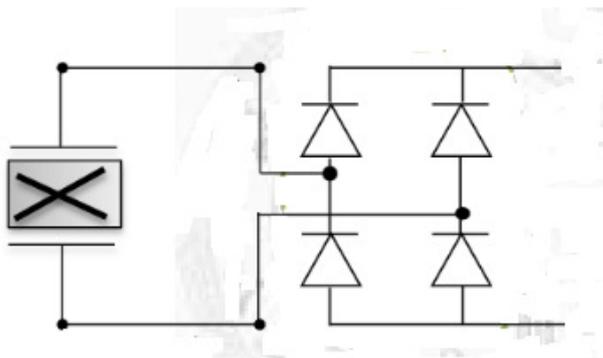
L'énergie produite par ces générateurs piézoélectriques n'est ainsi généralement pas utilisable directement pour l'alimentation de dispositifs électroniques classiques.

On utilise en règle générale un module de récupération d'énergie dans lequel le générateur piézoélectrique est couplé à un pont de diode permettant de convertir la tension alternative en tension continu. Le pont de diode est suivi d'une batterie ou d'une capacité de filtrage.

Schéma équivalent du système de récupération d'énergie

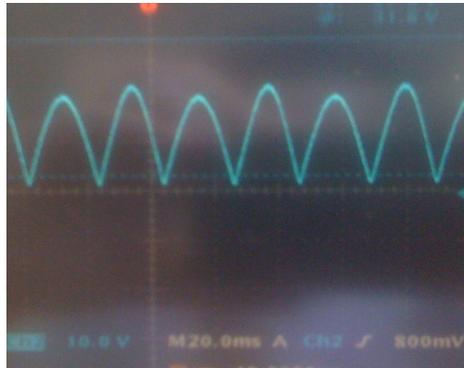


Analyse expérimentale d'un circuit avec pont de diode :



On étudie désormais uniquement à la fréquence de résonance $f=23,4$ Hz.

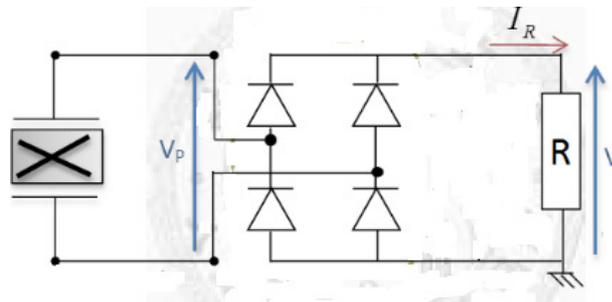
J'ai d'abord vérifié que le pont de diode redresse bien la tension en sortie. Le pont de diode a une tension de claquage de 200 Volts et le courant qui la traverse doit être inférieur à 1A. On obtient bien une tension redressée :



Allure de la tension à la sortie du pont de diode

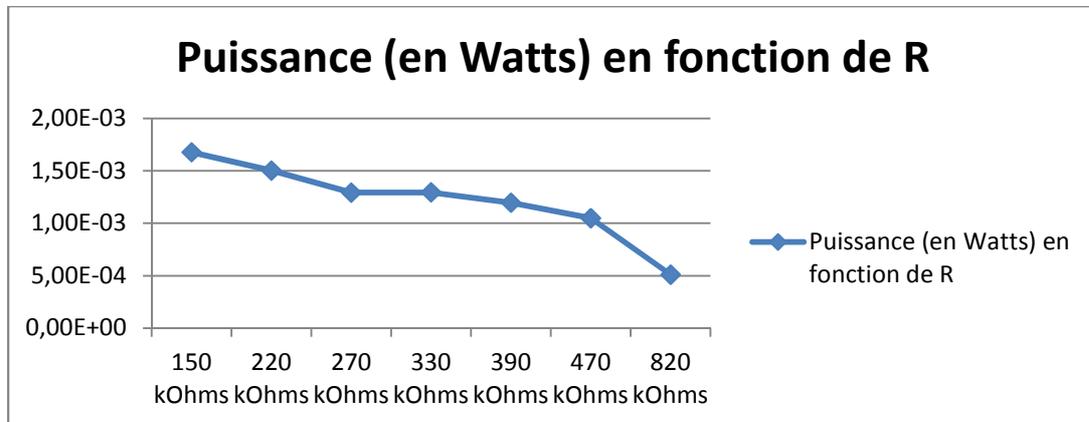
Si on se place dans les mêmes conditions et avec les valeurs optimales de la partie précédente ($f=23,4\text{Hz}$, $R=220\text{k}\Omega$, amplitude de 400 mVpp) et que l'on ajoute le pont de diode suivi d'une résistance comme sur le schéma ci-dessous, on obtient une tension efficace $U_{\text{eff}}=11,7\text{ Volts}$.

Ainsi on a une puissance qui vaut $P=622\text{ }\mu\text{W}$ et donc qui est plus élevée que précédemment car la tension est redressée.



J'ai par la suite réalisé des mesures de tension pour une amplitude nettement plus élevée correspondant à 750 mVpp (déplacement $x>3\text{ mm}$). On atteint pour ces valeurs là une tension moyenne de $23,54\text{ Volts}$ en sortie du pont de diode à la fréquence de résonance. A vide, on atteint environ 70 Volts .

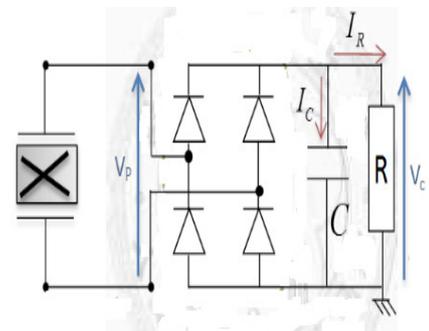
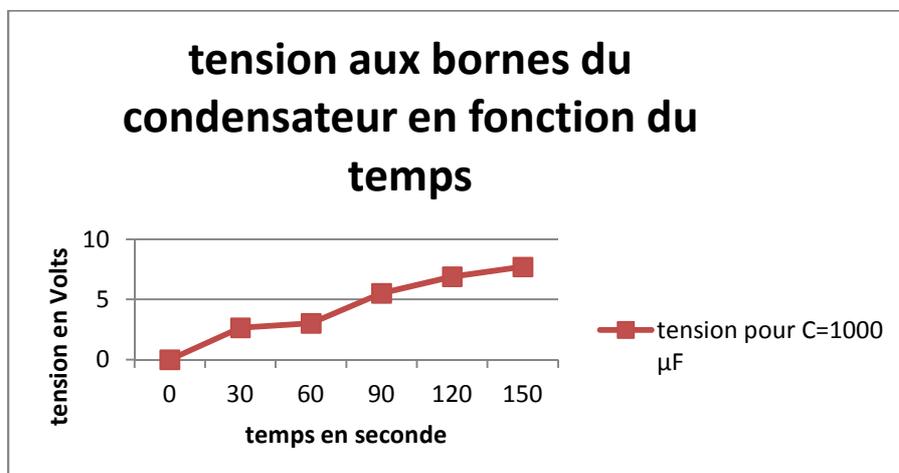
Voici la courbe ci-dessous de la puissance (en W) en fonction de la valeur de la résistance.



Dans cette étude, on constate que la puissance récupéré d'une tension redressée avec un pont de diode peut être de l'ordre 1,5m Watts. Le courant est de l'ordre de 100 μ A. Je n'ai pas réalisé les tests pour de plus faibles valeur de résistances car je n'ai pas réussi à obtenir d'autres créneaux horaires pour réaliser des expériences étant donnée que des chercheurs travaillent sur le même système vibratoire.

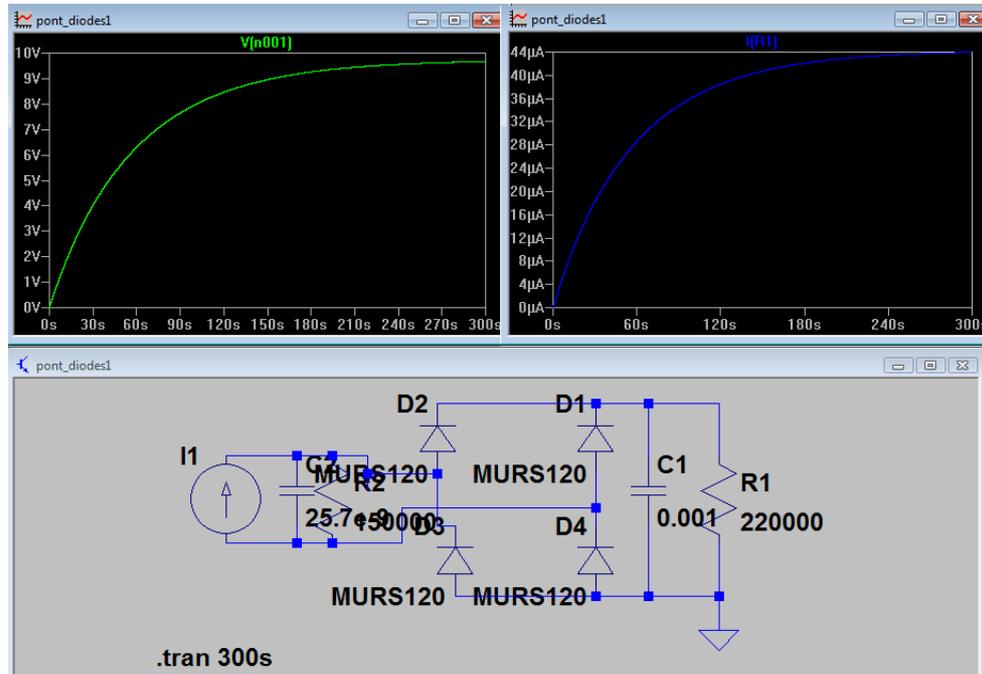
Ajoutons désormais un condensateur pour stocker l'énergie à la place de la résistance. J'ai procédé en 2 étapes.

J'ai visualisé la charge du condensateur sans la résistance dans le circuit. Voici ci-dessous la courbe représentant l'évolution de la tension aux bornes du condensateur pour une capacité de 1000 μ F.



Ensuite j'ai déchargé le condensateur sur une résistance de 100 kOhms. On constate que la résistance consomme 90% de l'énergie emmagasinée par le condensateur en 2 min environ. La résistance joue en fait le rôle d'une pile qui se charge.

Le schéma équivalent ci-dessous est la simulation sur le logiciel LTSpice du circuit testé précédemment.



Modélisation d'un circuit de récupération d'énergie avec pont de diode, capacité et résistance

Le modèle générale d'un élément piézoélectrique peut être représenté par un générateur de courant, en parallèle avec une capacité et une résistance. La valeur de la capacité (2,7 nF) était donnée dans la datasheet du MFC. La valeur de la résistance n'étant pas précisée, j'ai choisi une valeur plutôt élevée (150 kOhms) sachant qu'un MFC a une forte impédance. Enfin la valeur délivrée par le générateur de courant (300 µA) a été choisi de sorte à avoir un courant inférieur à 200 µA aux bornes de la capacité.

On se place donc dans les mêmes conditions que précédemment ($R=220$ kOhms, $C=1000$ µF, pont de diode 200V-1A). On constate que la résistance se charge en 180 secondes environ pour atteindre une tension de 9,5 Volts. C'est plutôt cohérent avec les résultats expérimentaux obtenus.

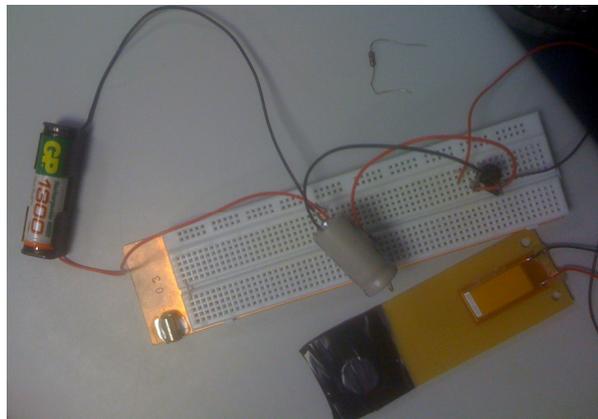
C) Charge d'une batterie

J'ai décidé d'acheter une pile rechargeable Nickel-hydrure métallique, NiMH (1300 mAh et 1,2 Volts) qui remplace la résistance sur le circuit précédent.

La méthode de stockage de puissance est donc un circuit qui charge une pile NiMH. J'ai choisi ce type de pile car les piles NiMH ont une très grande densité de charge et ne nécessitent pas de régulateur de tension à incorporer dans le circuit.

Le circuit est constitué d'un pont de diode, d'un condensateur qui vaut 1000 μ F et de la batterie NiMH en parallèle comme sur l'image ci-dessous.

Circuit de chargement d'une batterie NiMH



La simplicité de ce circuit permet une construction facile et compacte du circuit sans autres composants qui induiraient une dissipation de la puissance supplémentaire.

Résultat obtenu : Je n'avais plus accès au laboratoire. J'ai donc réalisé une autre étude expérimentale → Marcher avec le MFC dans la chaussure. J'ai analysé après 10 min, puis 15 min et enfin 30 min l'évolution de la charge dans la batterie.



Pour déterminer l'évolution de la charge, je retirais la batterie du circuit puis je branchais la batterie à une résistance de 15 Ohms. La charge était donc mesurée aux bornes de la résistance.

Charge après 10 min : +0,005 Volts aux bornes de la résistance R. On passe de 1,190 à 1,195

Après 15 min, 1,20 Volts

Après 30 min : 1, 203 Volts

A la fréquence de résonance, il a été prouvé par Henry A. Sodano qu'il est possible de recharger une batterie assez rapidement avec un pzt monolithique piézoceramique (environ 20 minutes).

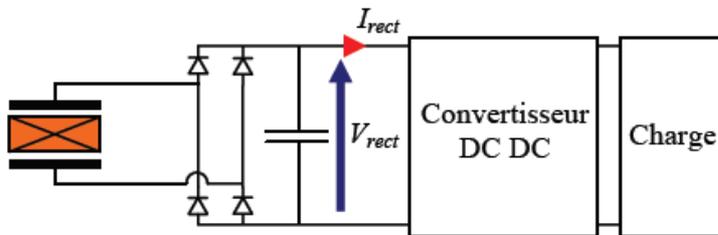
Il reste toutefois long et difficile de recharger une batterie avec un MFC, probablement car le courant est trop faible.

Différentes méthodes d'optimisation de stockage énergétique ont été étudiées récemment pour améliorer le faible rendement dû principalement au faible courant généré par les éléments piézoélectriques.

Dans la prochaine partie je vais donc vous présenter des exemples de systèmes d'optimisation du stockage de l'énergie.

IV) Optimisation électrique

Pour optimiser le rendement, on utilise en général un convertisseur DC-DC. Ce convertisseur peut avoir plusieurs rôles : Soit imposer une tension constante sur la charge (régulation de tension), soit imposer un rapport V_{rect}/I_{rect} égal à la résistance optimale de façon à optimiser la puissance fournie par le micro-générateur (adaptation d'impédance).



Différentes solutions sont envisageables.

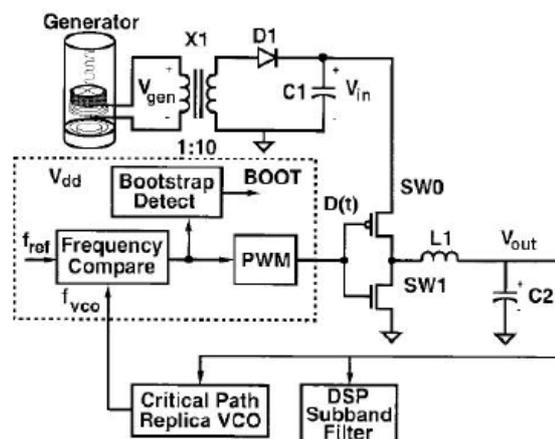
A) Les systèmes de gestion de l'énergie

Plusieurs systèmes de récupération d'énergie ont été réalisés au cours des dix dernières années mais une majorité d'entre eux utilisent une source secondaire.

Je vais donner des exemples de réalisations de systèmes autonomes dans cette partie qui me semblent pertinent.

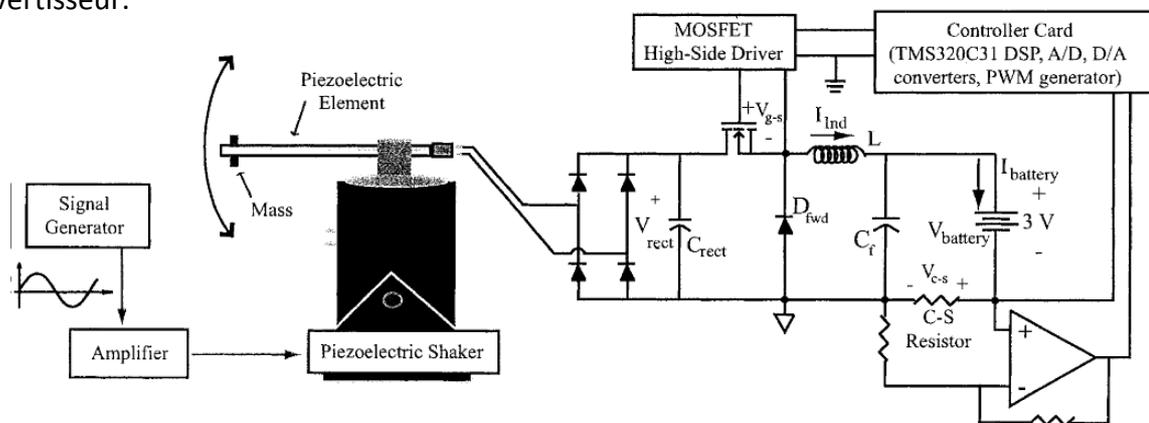
Le système autonome proposé par Amirtharajah, est un DSP (Digital Processor Signal) alimenté par un générateur électromagnétique. Le circuit de passage de l'énergie entre le générateur et le DSP est constitué d'un transformateur qui joue le rôle d'un élévateur de tension suivi par un redresseur et un convertisseur DC/DC. Le schéma du circuit est présenté sur la ci-dessous.

Système de conversion d'énergie pour alimenter un DSP



A l'université de Pennsylvanie, Ottman présente une structure de récupération d'énergie en 2002. Cette structure optimise l'énergie qui passe entre le générateur piézoélectrique et la batterie. Il contient un redresseur et un convertisseur DC-DC. Ottman a utilisé un hacheur abaisseur de tension dont le rapport cyclique de commutation est automatiquement adapté de façon à maximiser la puissance de sortie.

Il a fallu ajouter un circuit de contrôle du rapport cyclique car le rapport cyclique a une grande influence sur le courant dans la batterie. Les résultats ont montré que l'énergie récupérée pouvait être augmenté de **400%** par rapport à une charge directe sans convertisseur.



Solution proposée par Ottman

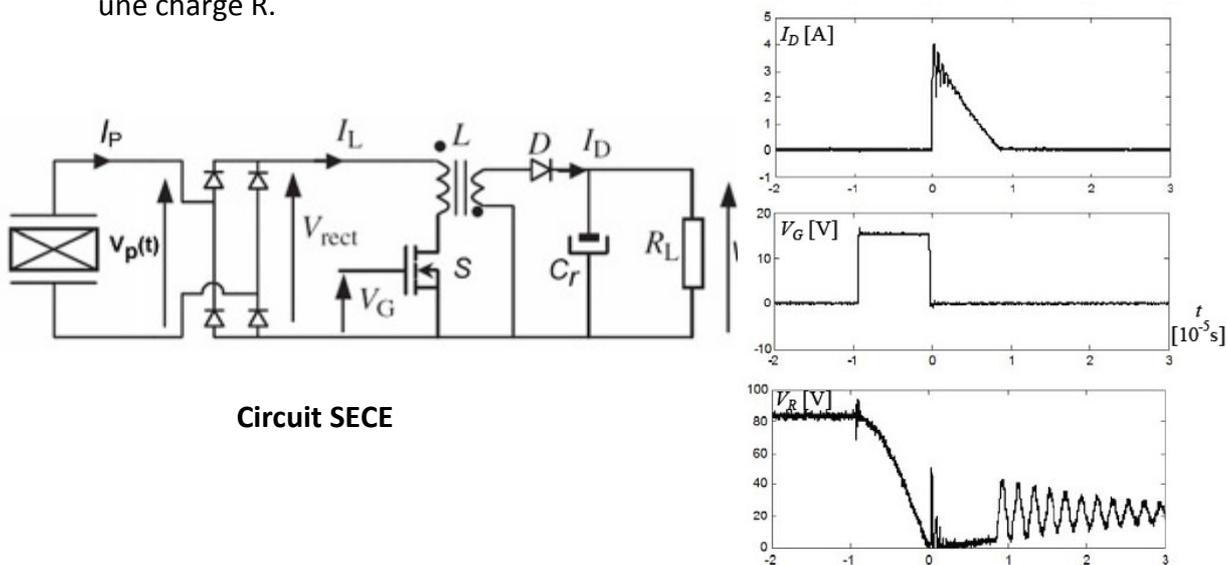
Constatant que pour des niveaux de sollicitations suffisamment élevés la valeur optimale du rapport cyclique est à peu près constante, Ottman a développé un hacheur abaisseur de tension autoalimenté dont le rapport cyclique de commutation reste constant. Les résultats pour la charge d'une batterie en utilisant ce système indiquent une amélioration de 325% par rapport à une charge directe.

Par ailleurs, d'autres convertisseurs sont en études actuellement car ils consomment peu de puissance : les convertisseurs Buck-Boost et Flyback. Cf annexe 2 le principe de fonctionnement de ces convertisseurs

Autre technique intéressante. La technique SECE (Synchronized Electrical Charge Extraction) apparaît être compétitive au niveau de la puissance extraite tout en permettant de transférer à la charge le maximum d'énergie quelle que soit son impédance.

Cette technique utilise un circuit composé d'un pont de diode et d'un convertisseur de type flyback. Un circuit de commande est nécessaire pour contrôler la séquence de commutation de l'interrupteur (le transistor MOSFET joue le rôle d'interrupteur). Le convertisseur est commandé par la tension de grille V_G du transistor MOSFET T. Cette tension est déterminée par un circuit de contrôle qui vérifie la tension maximum de V_R et lorsque V_R est nulle. Lorsque la tension V_R atteint une tension maximum, une tension de 15V est appliquée sur la grille du transistor. Le transistor est alors passant (interrupteur fermé) et permet le transfert vers l'inductance L de l'énergie provenant de l'élément piézoélectrique.

Quand toutes les charges sont transférées, le transistor devient bloqué (ie interrupteur ouvert) et l'inductance se décharge dans la capacité de stockage qui alimente une charge R.



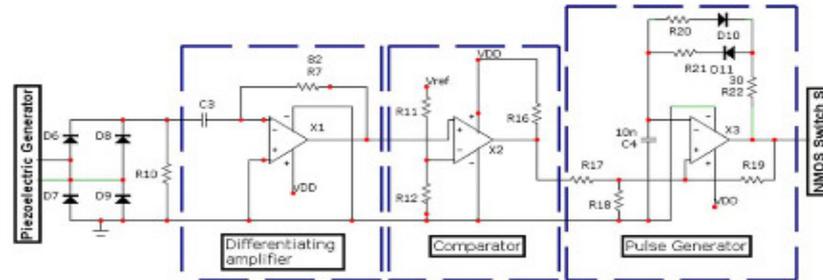
Circuit SECE

Allure des paramètres lors de la commutation

La puissance récupérée est alors 3 fois plus grande. Le convertisseur flyback délivre alors une puissance utile de 12.3mW pour une résistance de charge comprise entre 500Ω et 55kΩ, ce qui correspond à une tension de sortie comprise entre 2.5V et 25V d'après Badel. Toutefois

La consommation du convertisseur flyback est de 5mW. La complexité de la réalisation du circuit de commande est un des obstacles de ce convertisseur.

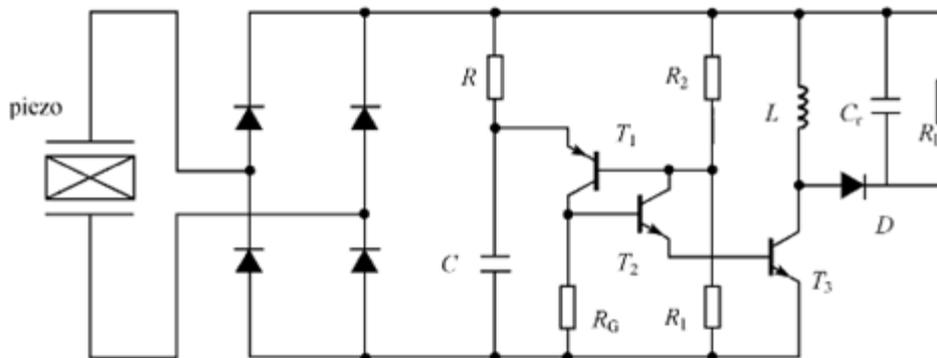
J.Y. Lee a réalisé un circuit de commande dans un de ces travaux en 2008 (cf lien en bibliographie).



Circuit de commande du MOSFET

Sa solution est plutôt complexe car il a dû mettre en œuvre un circuit boot-strap pour fournir l'énergie initiale nécessaire.

Une autre solution pour le circuit SCE a été proposée par Jinhao Qiu.



Circuit SCE autonome d'extraction de charge de J. Qiu

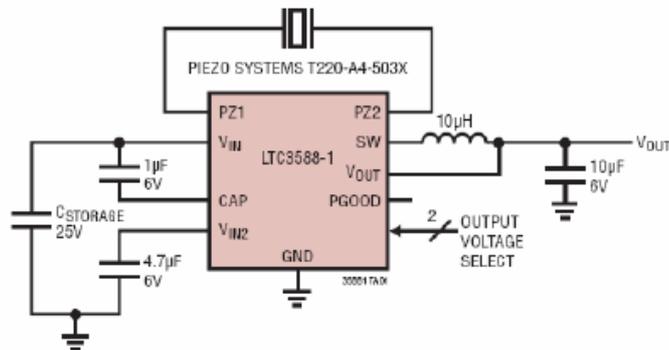
Le circuit de déclenchement du signal de commande du transistor 3 est composé de deux transistors T1 et T2. T1 est de type PNP alors que T2 et T3 sont de types NPN. T1 et T2 forment un PUT (Programmable Unijonction transistor), et est utilisé comme un déclenchement permettant au transistor T3 d'être passant ou non au moment nécessaire.

Quand la tension V à la sortie du pont de diode atteint un maximum, la valeur de la tension V_{e1} au niveau de l'émetteur de T1 moins la tension V_{c2} sur le collecteur de T2 et la base de T3 est maximisée. Donc, le switch T3 est donc passant immédiatement, et l'énergie électrique est alors transférée à l'inductance L.

B) Systèmes commercialisés de récupération d'énergie vibratoire

Les systèmes de récupération d'énergie que je vais présenter sont très récents et ont été proposés par Linear Technology. Le premier est le LTC3588.

100mA Piezoelectric Generator Power Supply

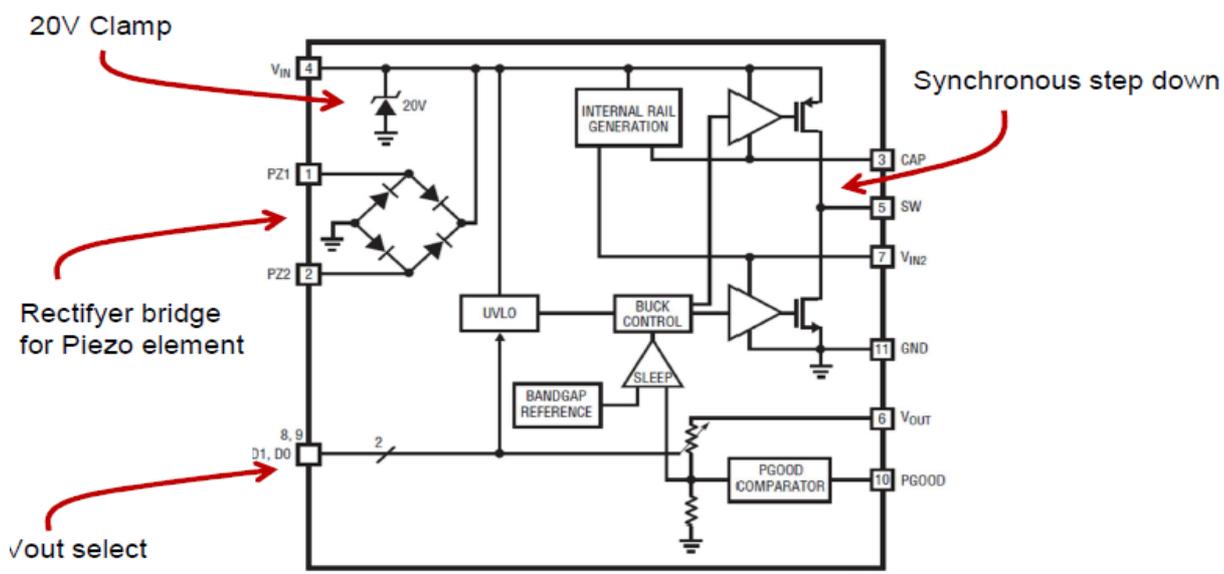


Le LTC3588 est une solution complète et optimisée de récupération d'énergie vibratoire. Cette solution autoalimentée est optimisée pour des sources de faibles puissances telles que les éléments piézoélectriques. Le circuit intègre un redresseur en pont à faibles pertes, avec un convertisseur abaisseur de fort rendement de type Buck-Boost. Il permet alors d'avoir en sortie une tension régulée programmable (1,8 V, 2,5 V, 3,3 V ou 5V) pour l'alimentation de microcontrôleurs, de capteurs, d'émetteurs...

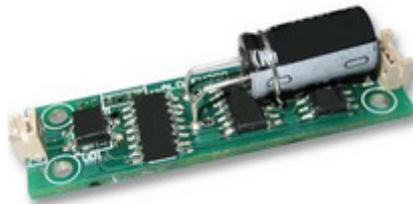
Toutefois il n'accepte que des tensions comprises entre 2,7 Volts et 20 Volts. Il est donc plutôt adapté à des pzt piézo-céramiques qui peuvent atteindre 20 Volts.

Dimitri Nikolov et ses collègues ont cherché à modéliser le fonctionnement de cette solution en 2012 dans leur rapport. (cf bibliographie). Une simulation du système via LTSpice peut être obtenue sur le site de Linear Technology.

LTC3588



Le second dispositif intéressant de Linear Technology sont les modules EH300-EH301. Contrairement au LTC3588, ces modules acceptent des tensions très élevées pouvant atteindre 500Volts. Ils peuvent ainsi accepter l'énergie provenant de nombreux types de sources d'énergie électrique et stocker cette énergie pour alimenter des circuits et systèmes électriques conventionnels de 3,3 V et 5 V. Ils sont complètement auto-alimentés, toujours en mode actif, et adaptés aux applications d'échantillons de données ou de surveillance conditionnelle. Toutefois je n'ai pas de détails sur le fonctionnement exacte de ce module.



Module EH300A avec une capacité qui se charge

Les modules EH300 sont donc plus adaptés lorsque l'on utilise des MFC. Le prix du module est de l'ordre de 50 euros.

Yaowen Yang a notamment réalisé des expériences avec un MFC et ce module. (cf bibliographie)

C) Circuit de charge d'une capacité avec un régulateur de tension

La tension à la sortie du MFC étant trop élevée, il est préférable de réduire la tension pour pouvoir réutiliser l'énergie stocké.

Je souhaitais initialement analyser la variation de la tension sur une capacité via un arduino mais il s'avère qu'il m'était impossible de le réaliser à moins de réduire de façon importante la tension générée par le MFC (passage de 150 Volts à 5 Volts). Il existe très peu de régulateur permettant de réduire une aussi grande tension.

La méthode de stockage d'énergie ci-dessous utilise un régulateur de tension ainsi qu'une capacité permettant d'accumuler l'énergie. Voici le schéma complet du circuit :

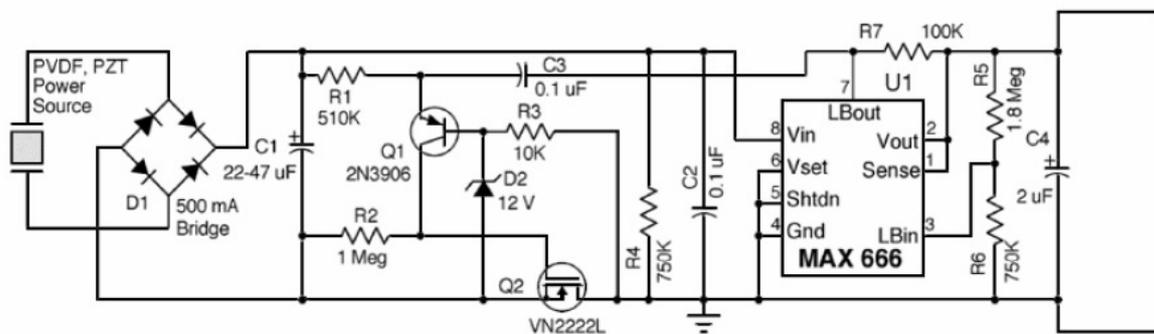


Schéma du circuit de charge

Le circuit proposé est la modification d'une réalisation de Kymissis qui avait conçu un circuit permettant d'alimenter un émetteur RF.

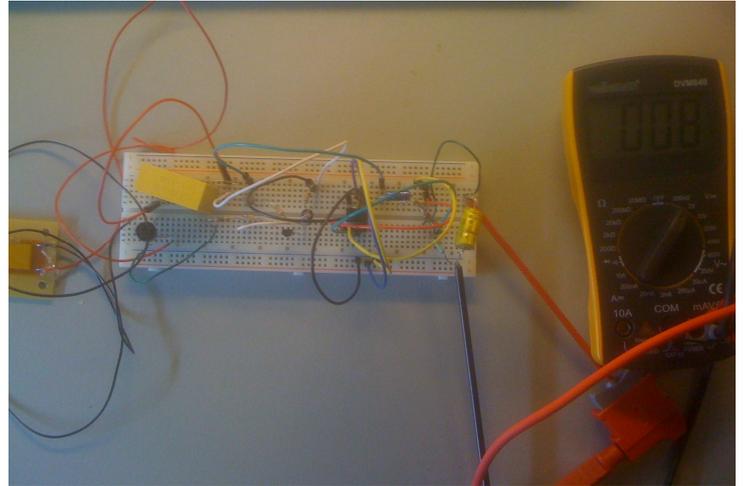
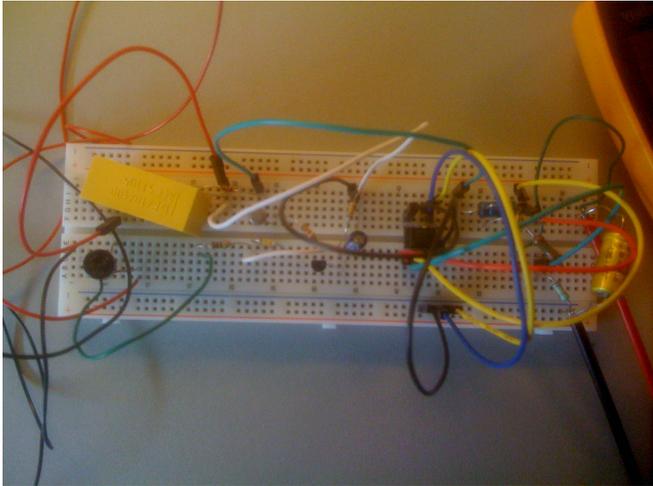
Le principe de fonctionnement de ce circuit est comme suit :

Tout d'abord la tension générée par le MFC est redressée puis stockée dans le condensateur C1. Une fois que le condensateur C1 est chargé, il libère sa charge via la diode zener (12 Volts) ce qui provoque la commutation du transistor NPN Q1 et déclenchant le transistor MOSFET Q2, afin de relier de tout relier à la masse pour que la capacité C1 se décharge.

Le MAX666 est un régulateur de tension qui produit une tension de 5 Volts DC lorsque C1 se décharge. Une fois que C1 s'est déchargé au-delà de 4.5 Volts, le MAX666

envoie une pulsation négative qui commute Q1 sur off, permettant ainsi à C1 de redémarrer le process de chargement.

Dans l'état « off », le circuit a une haute impédance permettant ainsi à C1 de se charger rapidement.



Images du circuit de récupération d'énergie réalisée

Je n'ai pas encore eu l'occasion de tester ce circuit sur le pot vibrant en raison de l'absence de créneau disponible pour réaliser l'expérience à l'IRCICA.

Aux USA, avec un circuit similaire A. Sodano a réussi à charger une batterie de 40 mAh- 1,2 Volts avec un élément pzt piezocéramique en uniquement 30 minutes à la fréquence de résonance du système.

Conclusion

En conclusion, la récupération d'énergie vibratoire est un sujet de recherche assez délicat car l'objectif principal est de réaliser des circuits de récupération d'énergie autonome avec des composants qui consomment très peu d'énergie.

Ce sujet est toutefois un domaine porteur. Il suffit pour s'en convaincre d'observer l'explosion récente du nombre de publications et de brevets sur ce thème et le programme de grande ampleur mené aux Etats-Unis par le département recherche et développement du ministère de la défense pour ce genre de dispositif (chaussure piézoélectrique, bouton poussoir...). La réalisation de micro-générateurs autonomes correspond à un réel besoin, que ce soit pour l'alimentation de dispositifs électroniques portables d'usage courant, ou dans le cadre des réseaux de capteurs sans fil.

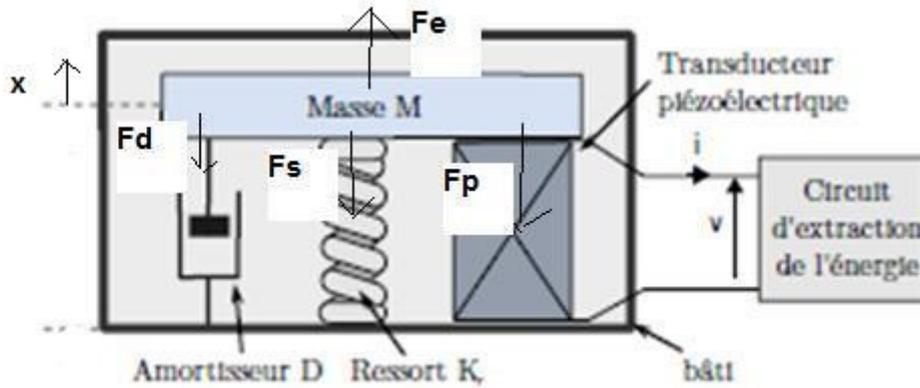
Suite aux résultats obtenus lors des expériences réalisés, j'ai recherché quelques types de capteurs et émetteurs-récepteurs actuels qui pourraient être alimenté par un MFC malgré la faible puissance générée (**Cf annexe 3**).

A travers ce projet j'ai appris d'importants enseignements dans ces différentes phases de projet: l'effort d'anticipation, la capacité analytique, l'étude théorique, la méthodologie pour effectuer le choix d'un matériau et plus globalement le cheminement pour atteindre une solution optimale...

Etant donné la complexité et l'étendu de mon sujet, j'ai passé beaucoup de temps sur la partie théorique. Je suis conscient qu'il y a des contraintes de temps mais il semblait nécessaire de s'attarder sur la compréhension du sujet et les différentes pistes de recherches. Lorsque j'ai reçu ma commande MFC, j'ai par ailleurs été contraint par les disponibilités d'accès au pot vibrant du laboratoire.

Annexe I

Modèle mécanique d'un générateur piézoélectrique



Equations de l'élément piézoélectrique :

$$F_p = K_p \cdot x + \alpha \cdot V$$

$$i = \alpha \cdot x' - C_o \cdot V'$$

Où K_p rigidité de l'élément piézoélectrique quand il est court-circuité

C_o Capacité bloquée de l'élément piézoélectrique

α facteur de force, ie rapport entre la force F_p et la tension V à déformation nulle

Equations du système :

Bilan des forces

$$M \cdot x'' = F_E - (F_d + F_s + F_p) \Rightarrow M \cdot x'' = F_E - (D \cdot x' + K \cdot x + K_p \cdot x + \alpha \cdot V)$$

$$\text{et } I = \alpha \cdot x' - C_o \cdot V'$$

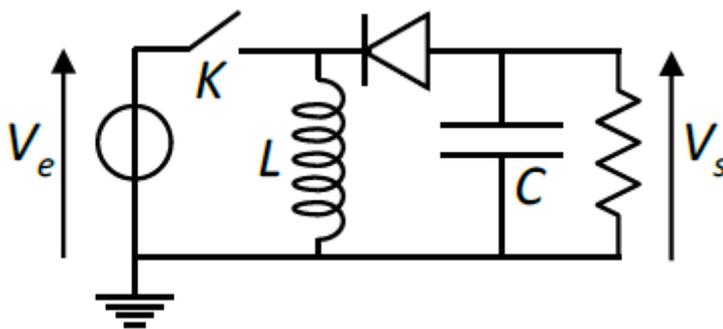
La fréquence de résonance vaut :
$$f_o = \frac{1}{2\Pi} \sqrt{\frac{K + K_p}{M}}$$

Annexe II

Principes de fonctionnement des convertisseurs Buck-Boost et Fly-Back

Le convertisseur fonctionne en 2 temps :

- Etape 1 : on ferme K, l'inductance se charge, la diode est bloquée.
- Etape 2 : on ouvre K, l'inductance transfère son énergie vers la charge



Le flyback est un convertisseur DC/DC à découpage présentant une isolation galvanique entre l'entrée et la sortie. Son fonctionnement peut être résumé en 2 étapes :

- Etape 1 : on ferme K_p , K_s est ouvert. L'énergie de l'entrée est transférée dans le circuit magnétique via le bobinage primaire L_p ; puis on ouvre K_p .
- Etape 2 : on ferme K_s , K_p est ouvert. L'énergie stockée dans le noyau magnétique est transférée vers la charge via le bobinage secondaire L_s .

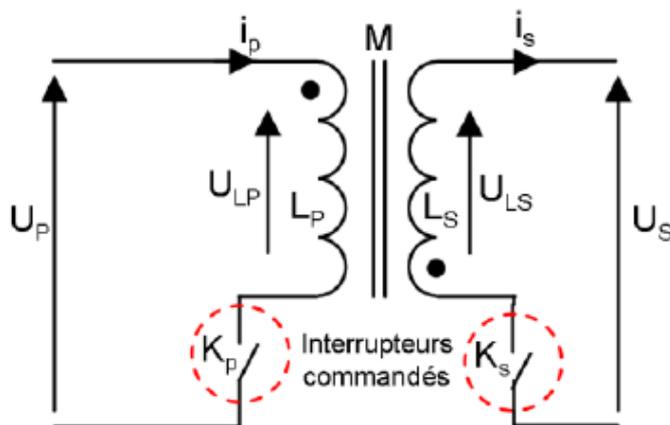


Figure V-8. Convertisseur Flyback

Annexe III

Dans cette annexe, nous présentons les besoins énergétiques pour alimenter les capteurs et les émetteurs/récepteurs actuels, et notamment ceux qui pourraient être utilisés par le MFC suite à notre étude.

Le Tableau 1 représente les spécifications énergétiques pour quelques exemples de microcapteurs. Le Tableau 2 résume les spécifications énergétiques pour quelques exemples d'émetteurs RF. Dans le Tableau 3 sont reportés des spécifications de microcontrôleurs.

Tableau 1 : spécification de microcapteurs

Type	Fournisseur	Tension d'alimentation (V)	Puissance (μ W)
Accéléromètre capacitif	Analog Devices	2	400
Capteur de température	Analog Devices AD7416	2,7-5,5	60
Capteur de pression	Freescale MPXY8000	2,1-3,6	4300

Tableau 2 : spécification d'émetteurs RF

Fournisseur	Référence	Tension d'alimentation (V)	Puissance (mW)
Toumaz	Sensium	1	3
Chipcon	CC1100	1,8	25
Analog Devices	ADF7025	2,3	46

Tableau 3 : spécification de microcontrôleurs

Fournisseur	Référence	Tension d'alimentation (V)	Puissance (μ W)
Holtek	HT47C10L	1,2	60
Microsensors	MS3110	5	14500

Bibliographie

- Modeling and simulation of piezoelectric energy harvesting power supply chip
Dimitar NIKOLOV, Emil MANOLOV and Davy PISSOORT
- www.linear.com/
- Site web de Smart Material
- Macro-Fiber Composites for Sensing, Actuation and Power Generation
Henry A. Sodano
- Generation and Storage of Electricity from Power Harvesting Devices
HENRY A. SODANO, DANIEL J. INMAN AND GYUHAE PARK
- Energy harvesting systems using piezo-electric macro fiber composites
Jan Kuzmann
- Récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes
Emmanuel Arroyo
- Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear
J. G. Rocha, L. M. Gonçalves, P. F. Rocha, M. P. Silva, and S. Lanceros-Méndez
- Vibration energy harvesting using macro-fiber composites
Yaowen Yang, Lihua Tang and Hongyun Li
- Maximize Piezoelectric Energy Harvesting Using Synchronous Charge Extraction Technique For Powering Autonomous Wireless Transmitter
Y.K. Tan, Graduate Member, IEEE, J.Y. Lee and S.K. Panda, Senior Member, IEEE
- Conception et optimization d'un transducteur électrodynamique pour la récupération d'énergie vibratoire
Didier Mammosser
- Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply
Geffrey K. Ottman, Member, IEEE, Heath F. Hofmann, Member, IEEE, Archin C. Bhatt, and George A. Lesieutre
- Piezoelectric power transducers and its' interfacing circuitry on energy harvesting and structural damping applications
Yu-Yin Chen
- Comparison between four piezoelectric energy harvesting circuits
Jinhao QIU, Hao JIANG, Hongli JI, Kongjun ZHU
- Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire
Adrien Badel