

Rapport de projet de fin d'étude de la formation Informatique Micro-électronique Automatique



Auteur : Quentin Sultana, IMA Système Autonome 5ème année.

Projet : Récupération d'énergie pour balise BLE

Tuteurs : Frédéric Giraud / Alexandre Boé / Thomas Vantrois

Remerciements : Je tiens à remercier Monsieur Vantrois, Monsieur Boé et Monsieur Giraud pour m'avoir accompagné, conseillé durant ce projet

Table des matières

I. Introduction.....	3
II. Contexte du projet.....	4
II.1 Organisation générale.....	4
II.2 Chaîne de l'énergie.....	4
II.2.1 Récupération de l'énergie dans l'environnement.....	4
II.2.2 Stockage de l'énergie.....	5
II.2.3 Management et mise en forme de l'énergie.....	5
II.2.4 Utilisation de l'énergie.....	5
II.3 Cahier des charges.....	5
II.3.1 Contrôleur.....	5
II.3.2 Capteurs.....	6
II.3.3 Protocole de communication.....	6
III. Modèle de consommation du module.....	7
III.1 Bluetooth-low-energy-ble-v4.....	7
III.2 Tests.....	7
III.3 Modèle.....	8
IV. Modèle de la récupération d'énergie.....	13
IV.1 Principe de fonctionnement.....	13
IV.2 Tests.....	15
IV.3 Modèle.....	17
V. Mise en forme de l'énergie.....	18
VI. Perspectives et limitations.....	19
VII. Conclusion.....	20
VIII. Bibliographie.....	21

I. Introduction

Le Bluetooth low energy a été développé avec l'optique d'économiser la durée de vie des batteries, pour permettre à des systèmes de durer 1 à 2 années grâce à des batteries bouton au lithium. La durée de vie de certains objets dépassant largement celle de la batterie, implique la problématique de la création d'un objet connecté capable de se recharger pour rester fonctionnel au cours du temps.

Dans ce rapport nous ferons dans un premier temps l'étude de la consommation du Bluetooth-low-energy-ble-v4 pour une application de mesure de la température. Cette étude prendra en compte les phénomènes de perturbations occasionnels.

Dans un second temps nous ferons l'étude du système de récupération d'énergie ainsi que l'étude de la mise en forme de l'énergie pour l'exploitation par le module BLE.

II. Contexte du projet

Le projet consiste à réaliser un système capable de communiquer à un utilisateur des informations venant de capteurs et de récupérer l'énergie de son fonctionnement dans l'environnement.

II.1 Organisation générale

Le système est organisé autour d'un système de récupération d'énergie, d'un contrôleur, de capteurs, de mémoire et d'un protocole de communication. On cherche à minimiser l'énergie consommée par l'ensemble du système.



Figure 1. Organisation générale

II.2 Chaîne de l'énergie

On peut diviser le système par sa chaîne d'énergie. Ce découpage permet de choisir les solutions technologiques à étudier.

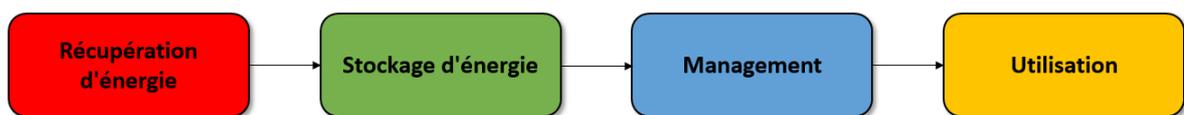


Figure 2. Chaîne de l'énergie

II.2.1 Récupération de l'énergie dans l'environnement

Il existe de nombreux moyens pour récupérer de l'énergie dans l'environnement. L'objectif est de trouver les sources les plus adaptées à l'environnement pour l'application.

On peut citer :

- La récupération de l'énergie par différence de température
- Les panneaux photovoltaïques
- La récupération de l'énergie des ondes radio
- La piézoélectricité

Dans ce projet nous utiliserons la piézoélectricité, le module de récupération ayant déjà fait partie d'une étude de IRCICA précédant le projet.

Pour maximiser la récupération de l'énergie il faut envisager la multiplication des récupérateurs.

II.2.2 Stockage de l'énergie

Le choix du système de stockage de l'énergie constitue une partie importante de la réalisation du système. La problématique sera de déterminer quel type de stockage nous utiliserons : batterie, super-capacité ou un hybride et de les dimensionner. Il faudra tenir compte des problèmes de décharge partielle influant sur la durée de vie du stockage.

II.2.3 Management et mise en forme de l'énergie

La quantité d'énergie récupérée par les patches piézoélectriques étant indexée sur leur tension d'alimentation, nous rencontrerons des problèmes de différences de tensions.

II.2.4 Utilisation de l'énergie

On cherche à minimiser l'énergie consommée par l'ensemble du système. Les solutions sont multiples, optimisation matérielle ou logicielle.

II.3 Cahier des charges

II.3.1 Contrôleur

Le microcontrôleur : il existe différents types de microprocesseurs. L'objectif est de choisir un support capable de consommer un minimum d'énergie tout en conservant une taille minimale. Nous avons déjà utilisé dans d'autres projets des microcontrôleurs de type Arduino et Raspberry pi. Ceux-ci ont pour avantage d'être prêts à l'emploi et faciles de prise en main. On peut s'orienter également vers un contrôleur ultra low power comme le STM32L ou le modèle proposé RFduino module optimisé pour le BLE.

	Consommation	Facilité de développement	Miniaturisation
Arduino	faible à très faible	bonne	faible
Raspberry pi	importante	très bonne	très faible
Ultra low power	très, très faible	difficile	forte

Table 1. Tableau comparatif des microprocesseurs envisagés

Après avoir réalisé des recherches sur les consommations, nous convenons lors des réunions de projet de choisir la solution RFduino. Celle-ci constitue le meilleur compromis entre facilité de développement et consommation.

II.3.2 Capteurs

On peut imaginer différents types de capteurs :

- Accéléromètre
- Gyroscope
- Pression atmosphérique et altitude
- Température
- GPS

On s'intéressera à la consommation de chaque capteur et leur fréquence d'échantillonnage nécessaire pour obtenir une mesure exploitable. Dans la première partie de notre projet, nous nous limiterons au seul capteur de température.

II.3.3 Protocole de communication

Nous nous concentrons sur le protocole BLE (Bluetooth Low Energie). Celui-ci étant standardisé, il nous permettra de recueillir de la documentation et réaliser des tests de consommation rapides.

III. Modèle de consommation du module

III.1 Bluetooth-low-energy-ble-v4

Le système de communication par Bluetooth Smart ou BLE est plus économique en énergie que ces précédentes versions en proposant une faible activité de la radio et permettant un système de fonctionner en mode « standby » ou en mode consommation réduite durant la majorité de sa période de fonctionnement. Le mode de fonctionnement de ce Bluetooth est statique car il reste dans un certain mode pour une certaine durée. Ces modes présentent des événements récurrents, qui peuvent nous permettre d'estimer la consommation moyenne. Chacun de ces modes peuvent être qualifiés comme des états ; ce qui nous permettra de faire des estimations malgré les changements d'intervalle de connexion par exemple. La première donnée est le courant moyen consommé dans les modes « publication » et « connexion » qui permettront de définir le temps de vie d'une batterie pour le système.

Il existe trois grandes composantes qui permettent d'identifier la consommation d'énergie moyenne pour un système utilisant le Bluetooth Smart :

- Standby
- Événements protocole
- Événements application

En fonction de l'utilisation du système utilisant le Bluetooth Smart ces composantes utiliseront plus ou moins d'énergie

Depuis le mode Standby le système ne se réveille que par une interruption extérieure ou par événement/interruption de l'horloge.

L'événement protocole a lieu quand la communication s'établit entre le module BLE et le récepteur.

Ce qui regroupe dans notre étude deux modes « publication » ou « advertising » et « connexion ».

L'événement application est spécifique à l'application en fonctionnement sur le module, par exemple un événement périodique tel que l'activation de convertisseur analogique/numérique dans le cadre d'une mesure. Suivant les applications, cette composante peut devenir majeur dans la consommation du système, il convient donc que cette partie soit optimisée.

L'événement application a typiquement lieu entre deux événements protocole, ce qui implique que plus la phase de publication ou de connexion est importante plus le processeur dispose de temps de traitement. Dans le cadre de ce projet, nous avons choisi d'utiliser le module RFduino comme support, celui-ci est muni d'un système de communication BLE ainsi qu'un capteur de température. Les tests suivant seront donc réalisés utilisant ce module pour une application de mesure de la température communicant avec un système androïde par liaison Bluetooth Smart.

III.2 Tests

Lors de ces tests nous cherchons principalement à identifier la consommation en énergie lors des phases :

- Standby
- Publication ou « Advertising »
- Connexion

Trame 1

La Trame 1 correspond à la phase d'advertising c'est-à-dire l'état où le système signale sa présence à un utilisateur potentiel.

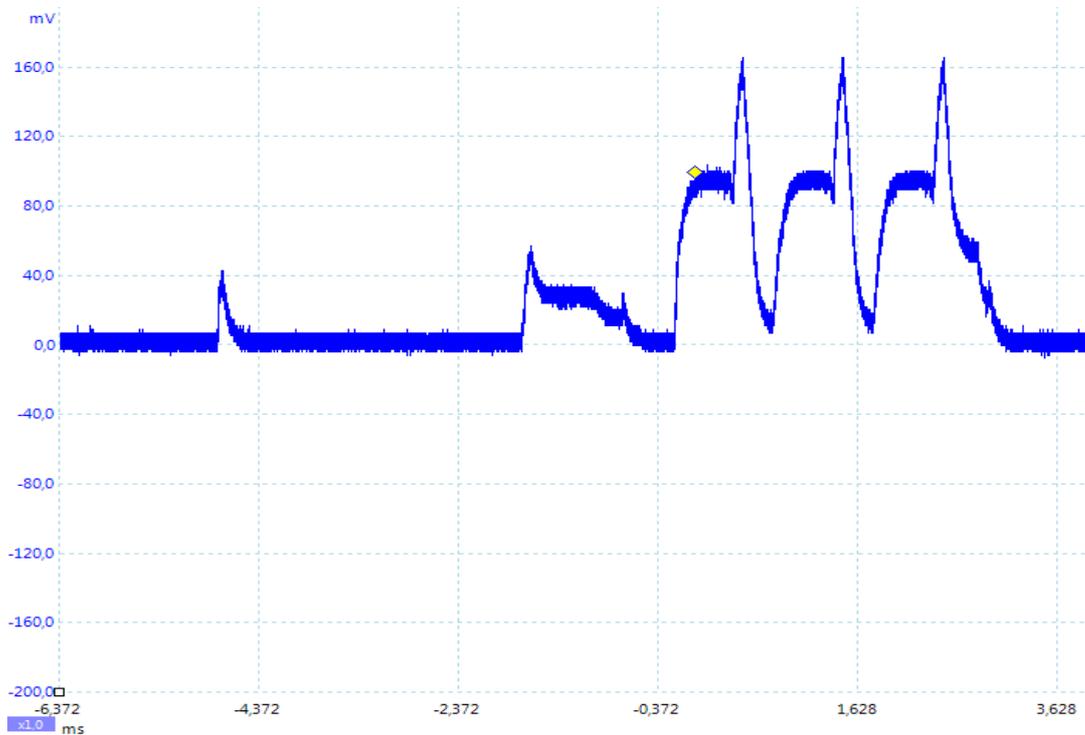
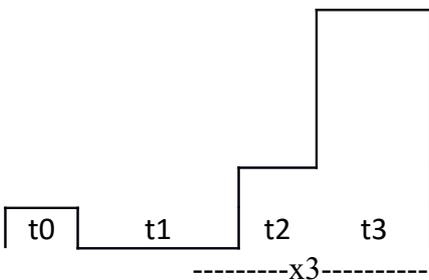


Figure 4. Forme d'onde trame 1

Forme d'onde de la trame 1



Énergie de la phase 1 : $[i_0 \cdot t_0 + (i_1 \cdot t_1 + i_2 \cdot t_2 + i_3 \cdot t_3) \cdot 3] \cdot V$

t0	t1	t2	t3
968μs	390μs	600μs	152μs

i0	i1	i2	i3
17mA	5mA	13mA	94mA

Trame 2

La trame 2 correspond au mode apparié pendant lequel s'effectue l'envoi de données. Cette trame varie en fonction du nombre d'octets transmis jusqu'à un maximum de 8 octets, auquel cas une autre trame est envoyée.

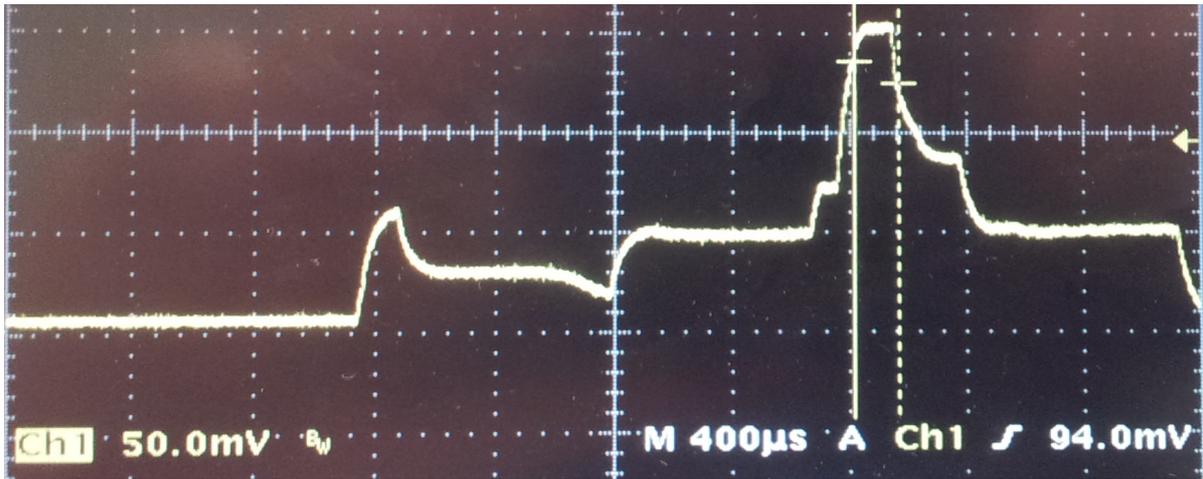
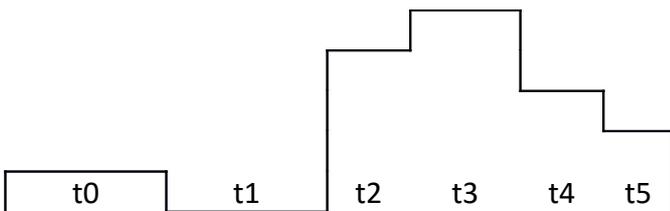


Figure 5. Forme d'onde trame 2

Forme d'onde de la phase 2



Énergie de la phase 2 : $[i_0 \cdot t_0 + i_1 \cdot t_1 + i_2 \cdot t_2 + i_3 \cdot t_3 + i_4 \cdot t_4 + i_5 \cdot t_5] \cdot V$

Pour 1 octet

t0	t1	t2	t3	t4	t5
250µs	810µs	70µs	150µs	230µs	390µs

i0	i1	i2	i3	i4	i5
27mA	5mA	57mA	76mA	60mA	33mA

Pour 2 octets

t0	t1	t2	t3	t4	t5
250µs	810µs	80µs	150µs	230µs	390µs

i0	i1	i2	i3	i4	i5
27mA	15mA	57mA	76mA	60mA	33mA

Pour 4 octets

t0	t1	t2	t3	t4	t5
250µs	810µs	90µs	150µs	230µs	390µs

i0	i1	i2	i3	i4	i5
27mA	40mA	57mA	76mA	60mA	33mA

Pour 8 octets

t0	t1	t2	t3	t4	t5
250µs	810µs	100µs	150µs	230µs	390µs

i0	i1	i2	i3	i4	i5
27mA	50mA	57mA	76mA	60mA	33mA

On constate que la majorité de la trame reste la même : il y a un changement d'intensité au temps t1 et une modification du temps t2.

Intensité consommée par le processeur : 60 µA

Intensité consommée par le convertisseur CAN : 5 mA

Le transfert de données est constitué de (Max 8 octets sinon on ajoute une trame 2 par tranche de 8 octets):

- 2 Trame 1
- 1 Trame 2
- Temps de latence

Ces informations nous permettent d'établir la courbe Figure 6.

On peut conclure sur ce graphique qu'à partir de 100s entre chaque trame d'advertising l'énergie consommée par la transmission est quasiment confondue avec l'énergie consommée par le processeur. Comme le temps entre chaque advertising conditionne le temps de réponse du système, on peut estimer que 100s est un bon compromis entre consommation énergétique et service client.

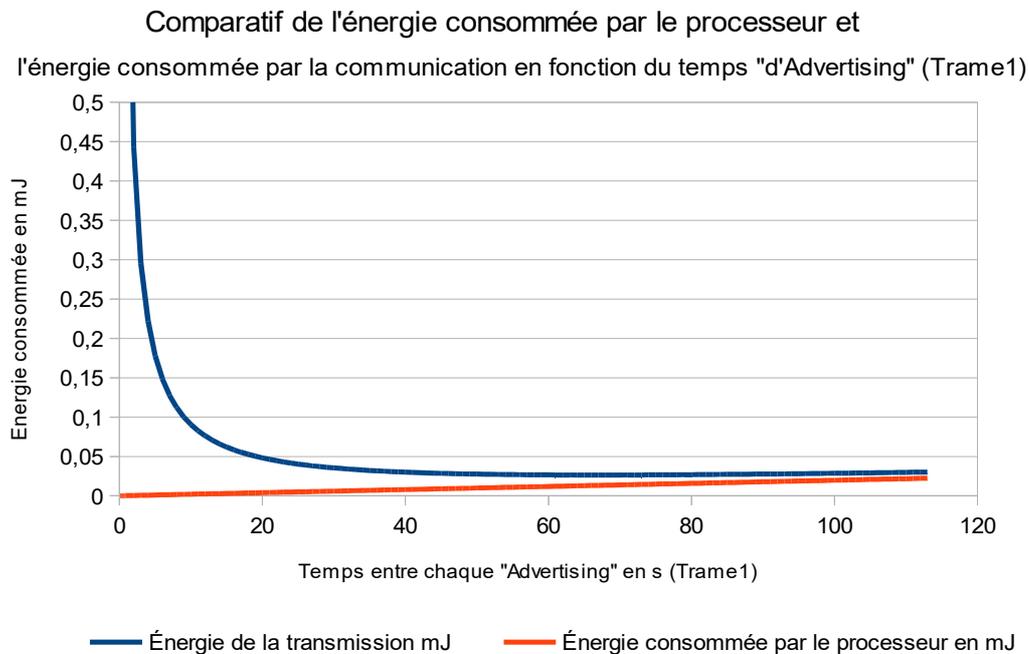


Figure 6. Courbe d'optimisation du temps d'advertising

On constate que le système consomme donc en moyenne **30μJ** pour une transaction totale. Cette valeur est importante car elle permettra de définir la faisabilité du système après l'étude du récupérateur.

Ces résultats étant toutefois pris dans des conditions idéales d'utilisation, nous cherchons à améliorer le modèle grâce à une étude statistique. On utilise pour ce faire un oscilloscope capable d'afficher les formes d'onde sur un ordinateur et d'enregistrer plusieurs échantillons de données au format Matlab.

On teste alors différentes configurations qui pourraient entraîner des perturbations sur la communication.

Distance	1m	2m	4m
moyenne(mA)	1,03	1,12	1,26
écart type (mA)	0,2	0,253	0,0241

Matériaux	Carton	Métal	Plastique
moyenne (mA)	1,02	1,03	1,01
écart type (mA)	0,246	0,249	0,242

Multiplication périphériques	A_Apairé/B_NonApairé	A_NonApairé/B_Apairé	A_Apairé/B_Apairé
moyenne A (mA)	0,33	0,2	0,46
écart type A (mA)	0,132	0,214	0,177
moyenne B (mA)	0,32	0,17	0,53
écart type B (mA)	0,166	0,138	0,22

Table 2. Écarts types et moyennes de courant de charge pour différentes configurations

On peut constater que l'éloignement du récepteur du nœud de capteur ainsi que la multiplication des périphériques augmentent légèrement la consommation énergétique du module. Ceci est probablement dû à des problèmes de collisions ou de pertes de trames.

IV. Modèle de la récupération d'énergie

IV.1 Principe de fonctionnement

Le récupérateur d'énergie fonctionne grâce à un patch piézoélectrique. Ce patch est capable de produire un courant à partir de la vélocité d'une impulsion suivant la formule :

$$i_m = N * \dot{w}$$

On propose la représentation simplifiée du patch en illustration Figure 7

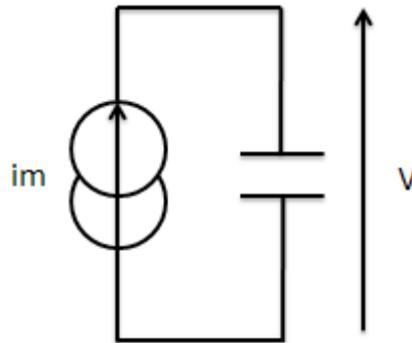


Figure 7. Représentation simplifiée du patch piézoélectrique

Pour récupérer de l'énergie il est couplé au système de la Figure 8

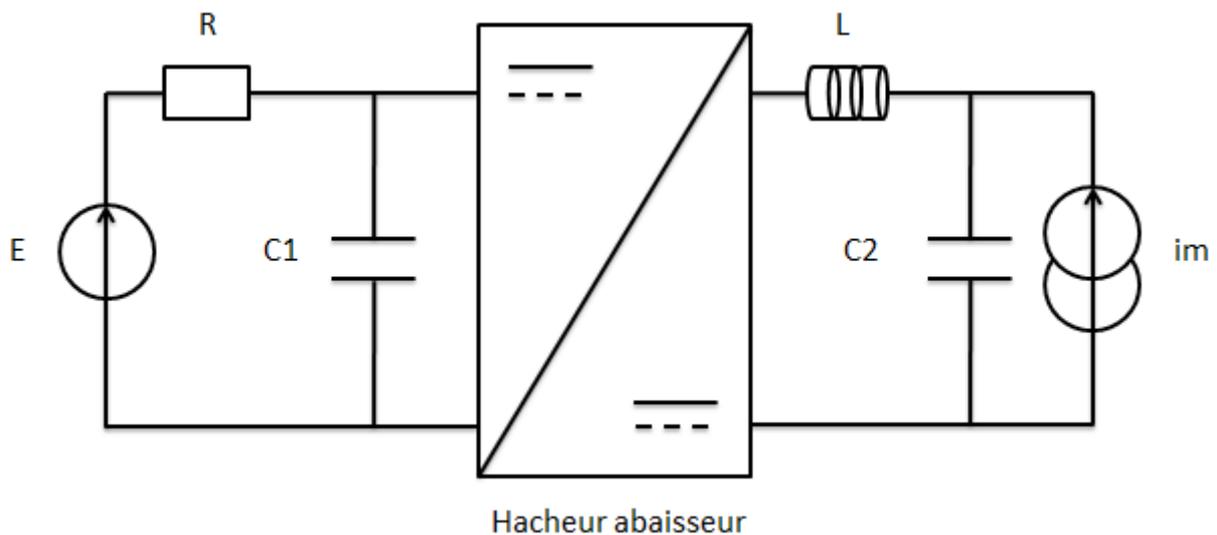


Figure 8. Représentation simplifiée du montage récupérateur d'énergie

L'objectif du système est de récupérer l'énergie produite par le patch. Pour ce faire le récupérateur va charger progressivement la capacité C1 on retrouvera donc aux bornes de C1 une différence de potentiel (ΔV) capable de générer une énergie suivant la formule

$$J = 1/2 * C1 * ((E + \Delta V)^2 - E^2)$$

Il faut alors choisir une valeur de C1 adaptée car si sa valeur est trop grande le temps de charge sera très long, en revanche si celle ci est trop faible nous obtiendrons des oscillations. Nous choisirons une valeur de 220nF pour nos tests (valeur ayant été retenue durant la conception du système par l'équipe de recherche de l'IRCICA).

La puissance du système est définie par l'expression suivante :

$$P = V * i_m$$

L'énergie s'exprime également comme étant :

$$E = V \int i_m dt$$

$$E = V * N \int \dot{w} dt$$

$$E = V * N * \Delta w$$

L'énergie produite par le système est donc dépendante de la tension d'alimentation V de la constante électromécanique N et du choc produit sur le patch piézoélectrique. Une impulsion sur le patch piézoélectrique est illustrée à la Figure 9

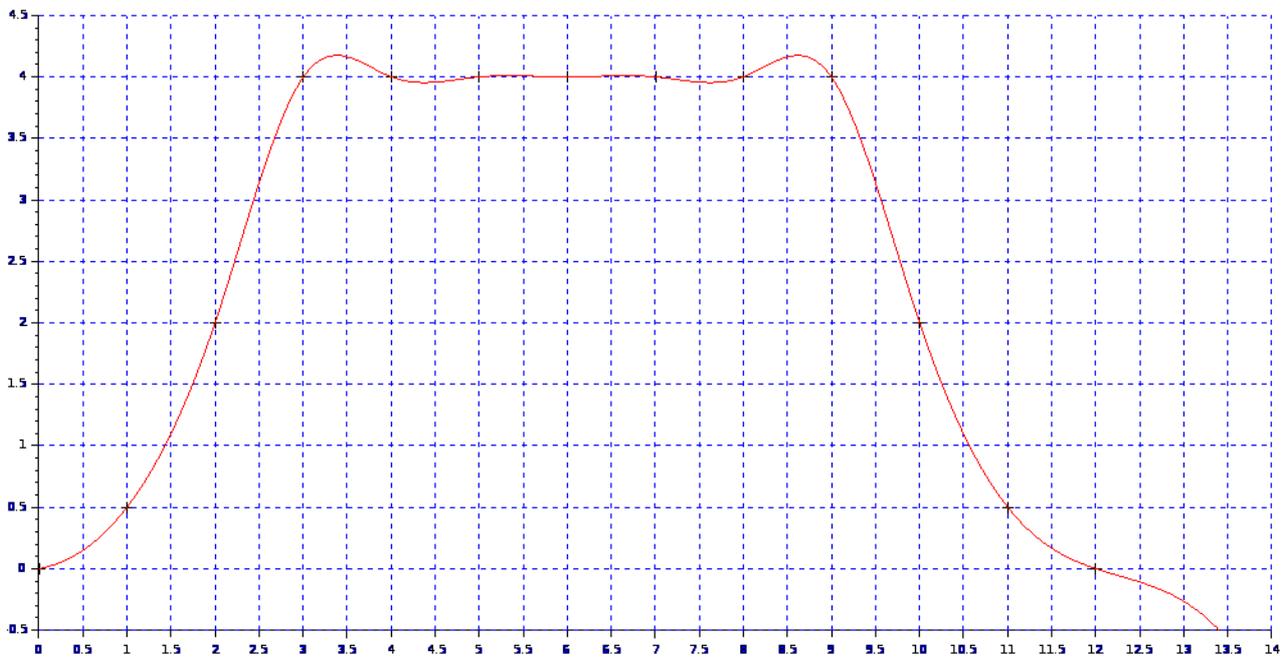


Figure 9. Exemple d'impulsion sur le patch piézoélectrique

La dérivée par rapport au temps de cette impulsion est visible Figure 10



Figure 10. Dérivée de l'impulsion figure 9

Il est donc important de « fenêtrer » la tension pour ne récupérer que la partie positive. Ce fenêtrage ainsi que la fréquence de commutation du hacheur est assurée par un microcontrôleur.

Dans la suite de notre étude nous ne tiendrons pas compte de la consommation de celui-ci.

L'énergie récupérée dépend donc de la tension d'alimentation du montage, dans la phase de test nous allons caractériser la courbe de l'énergie en fonction de la tension d'alimentation. On s'attend à avoir une courbe de gain proportionnelle de type αE puis au bout d'une certaine tension on s'attend à une inversion de la courbe, les pertes s'établissant en βE^2 et une courbe de la puissance « classique » suivent l'équation :

$$P = \alpha E - \beta E^2$$

IV.2 Tests

L'objectif de la phase de test étant d'établir la courbe de l'énergie produite en fonction de la tension d'alimentation du montage, nous allons réaliser plusieurs tests. Lors d'une phase de test il est nécessaire de ne faire varier qu'un seul paramètre à la fois. Or l'impulsion sur le Patch piézoélectrique étant réalisé à la main celle ci n'est pas uniforme. On réalise alors 10 tests pour chaque point de mesure.

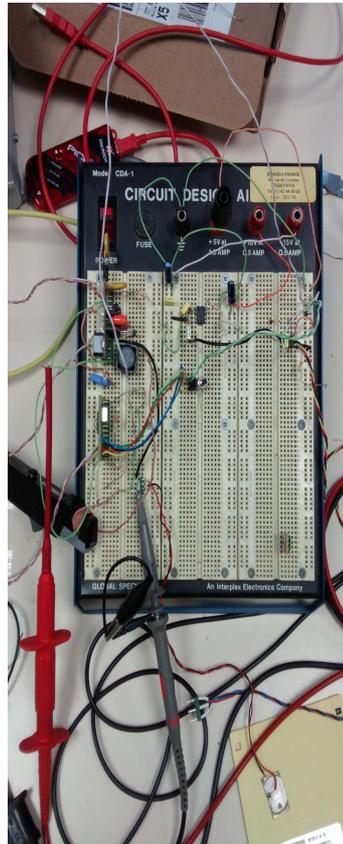


Figure 11. Montage de test Récupérateur piézoélectrique

On constate qu'un choc sur le patch piezo produit une énergie suivant la formule, $E = V * N * \Delta w$ N étant une constante électromécanique, on va faire varier V pour évaluer le gain en énergie. Cependant Δw est généré par un choc d'un stylo n'étant pas uniforme. Nous utilisons donc une méthode statistique qui consiste à retirer deux extremum et faire la moyenne de nos 10 mesures.

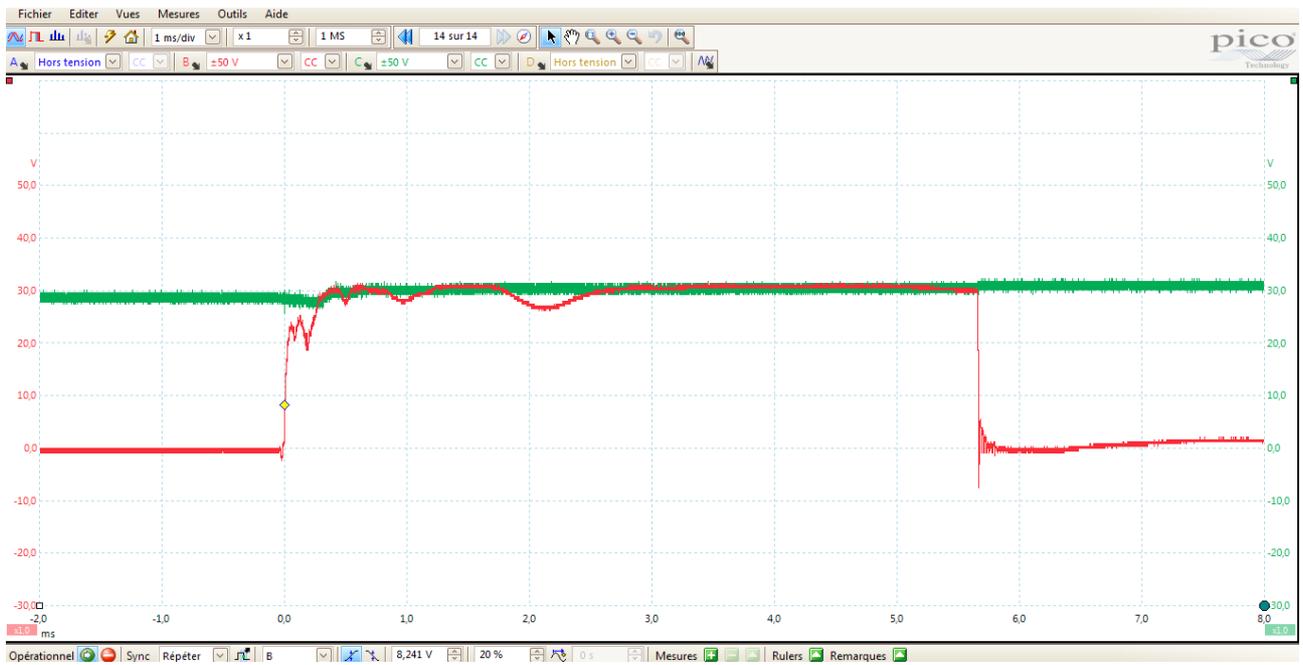


Figure 12. Tension patch piézoélectrique (rouge) / Tension C1 (vert)

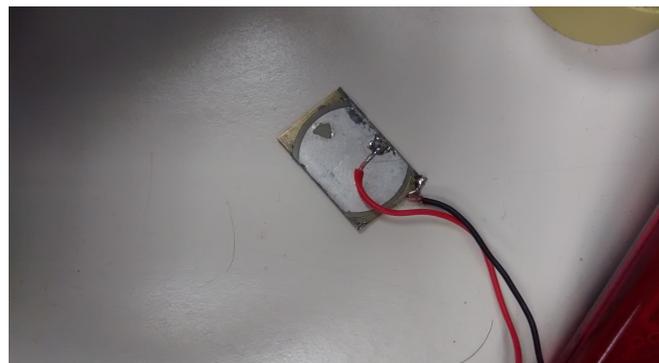


Figure 13. Patch piézoélectrique

IV.3 Modèle

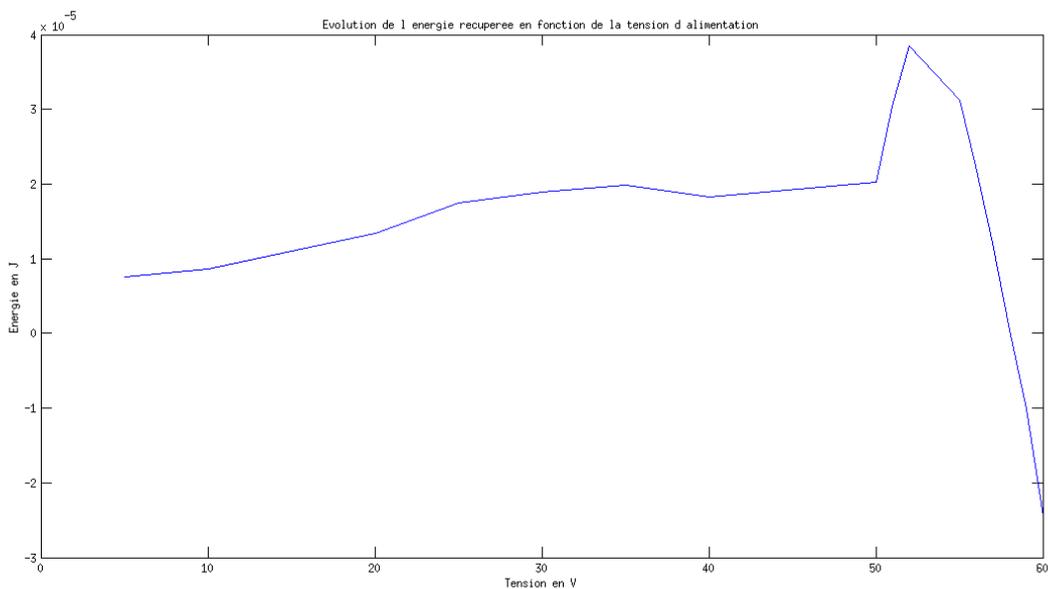


Figure 14. Modèle de l'énergie récupérée

On constate que le modèle n'est pas au premier abord compatible avec les résultats envisagés. Malgré tout on peut observer une partie quasi-linéaire de 10V à 45V après cette tension apparaît un pic qui me fait penser à une résonance. Après 50V l'énergie récupérée chute brusquement.

Cette « résonance » peut être caractéristique du patch comme étant à imputer à l'environnement de test. Il m'est difficile lors de cette étude d'en mesurer avec précision son origine.

Le système est capable de récupérer en pic **40μJ** par impact sous une tension de 50V. La « résonance » implique une contrainte supplémentaire en terme de stabilité de la source de tension, ci-celle ci est trop élevée, l'énergie récupérée chute brutalement. Il convient donc de réaliser un montage stable.

V. Mise en forme de l'énergie

Le montage récupérateur est capable de générer jusqu'à 40 μ J, l'ensemble de notre montage BLE-capteur consomme 30 μ J par minute. Il paraît donc à ce stade envisageable de créer un système rechargeable sur le long terme.

Cependant le récupérateur d'énergie fournit une tension de sortie de 50V or nous voulons alimenter notre montage BLE à 3,3V.

Nous envisageons deux solutions :

- Un régulateur de tension
- Un convertisseur Buck

La solution du régulateur n'est pas retenue car le régulateur possède un rendement trop faible.

Nous envisageons donc le convertisseur Buck : TPS54060 0.5-A, 60-V Step Down DC-DC Converter with Eco-Mode™ avec le montage Figure 15.

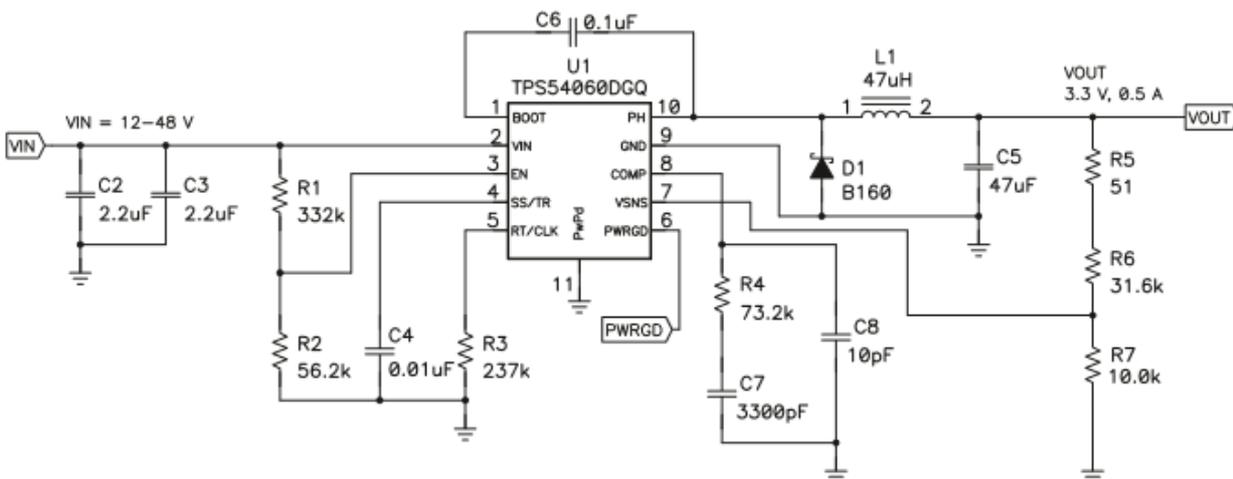


Figure 15. Convertisseur Buck pour sortie 3,3V

Concernant la batterie nous choisissons une super-cap de 0,033F de façon à pouvoir emmagasiner une énergie suffisante pour fonctionner plusieurs années sans rechargement et potentiellement indéfiniment à condition d'impulsions régulières sur les patches piézoélectriques.



Figure 16. Super-cap 0,033F

VI. Perspectives et limitations

Nous avons également cherché un modèle d'application à ce nœud de capteur. Les contraintes étant de trouver un objet durable (durée de vie supérieure à 2ans) susceptible d'être soumis à des chocs fréquents ponctuels.

Un des produits retenus est la chaise. En effet, celle ci semble rassembler tous les critères de choix pour notre système. De plus elle permet de multiplier les patches, ce qui permet de récupérer plus d'énergie ou de façon plus constante.



Figure 17. Emplacements possibles des patches piézoélectriques

Il convient de rappeler que cette étude ne prend pas en compte la consommation du micro-contrôleur permettant le fonctionnement du hacheur du récupérateur.

VII. Conclusion

Ce projet m'a permis de découvrir et d'étudier le fonctionnement d'un récupérateur d'énergie par piézoélectricité, technologie pouvant potentiellement devenir une source fiable de récupération pouvant être associée à un nœud de capteur communicant en BLE. Des recherches bibliographiques ainsi que l'aide de mes tuteurs m'ont permis de comprendre le fonctionnement de ces deux modules, de caractériser leur consommation et enfin de proposer une première approche des méthodes de réalisation d'un nœud de capteur à l'aide de ces deux systèmes.

Avec des modèles de ce genre ainsi que quelques améliorations sur la consommation du hacheur, il apparaît réaliste de proposer un nœud de capteurs avec une durée de vie très importante.

Ce projet m'a aussi permis de travailler en partenariat avec un laboratoire de recherche, d'échanger avec des spécialistes et d'établir de nouvelles méthodes de travail.

VIII. Bibliographie

Consommation du STM32L4

Series : <http://www.st.com/web/en/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1580?sc=stm32l4>

Réduction de la consommation de l'Arduino : <http://www.home-automation-community.com/arduino-low-power-how-to-run-atmega328p-for-a-year-on-coin-cell-battery/>

Consommation Raspberry : <https://www.raspberrypi.org/help/faqs/>

Module BLE : <http://redbearlab.com/blemini/>

Accéléromètre : <http://fr.farnell.com/analog-devices/adx1345bccz/accelerometre-3-axes-14lga/dp/1853935>

Capteur température : <http://fr.farnell.com/analog-devices/tmp36gt9z/capteur-temp-to-92-3/dp/1438760?ost=TMP36GT9Z> ou <http://fr.farnell.com/stmicroelectronics/stlm20w87f/capteur-de-temperature-analog/dp/1391131>

Accéléromètre + Gyroscope : <http://fr.farnell.com/invensense/mpu-6050/gyroscope-accelero-6-axes-i2c/dp/1864742>

Altimètre : <http://fr.farnell.com/freescale-semiconductor/mp13115a2/pressure-sensor-20-110kpa-8lga/dp/2009084?ost=MPL3115A2&categoryId=700000004367>

Explications norme BLE : chapters.comsoc.org/vancouver/BTLER3.pdf

<http://www.argenox.com/bluetooth-low-energy-ble-v4-0-development/library/a-ble-advertising-primer/>