

CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME DE RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE À FAIBLE GRADIENT POUR UN CAPTEUR SANS FILS

G. Buchmeier⁽¹⁾, M Ortega⁽¹⁾, E. Avina⁽¹⁾, J. Hoyos⁽¹⁾

(1) Département de Génie électrique et informatique, INSA Toulouse – France,

Résumé : Cet article présente la conception et implémentation d'un capteur sans fil. En passant par l'extraction d'énergie thermique, le dimensionnement du stockage, le profil de consommation, le logiciel embarqué dans le microcontrôleur destiné, la récupération des données dans un ordinateur, on arrive à avoir un capteur de température sans fil avec une autonomie acceptable pouvant être implémenté dans n'importe quel milieu avec le gradient de température nécessaire.

Mots clés : Energie thermique, capteur sans fil, récupération, super condensateur, extracteur d'énergie, stockage, Seebeck, logiciel embarqué

1. INTRODUCTION

L'évolution de WSN a donné lieu au besoin de repenser la manière comme les capteurs intelligents sont alimentés. Les piles sont aujourd'hui la source d'énergie la plus utilisée pour les capteurs sans fils, mais cette source présente plusieurs inconvénients, notamment sa recharge n'est pas toujours facile à faire, surtout quand le capteur se trouve dans un lieu isolé.

En dépendant de l'environnement et la consommation du capteur la récupération de différentes sortes d'énergie ambiante peut être une des possibles solutions. Il est possible de profiter des conditions de l'environnement comme le gradient thermique, vibrations et énergie solaire.

En sachant que la plupart des environnements sont le lieu d'échanges thermiques, où de l'énergie évacuée sous forme de chaleur peut être récupérée et convertie en électricité [1], la récupération d'énergie thermique devient une solution envisageable.

2. THEORIE DE LA RECUPERATION D'ENERGIE THERMIQUE

Pour pouvoir comprendre cette théorie, il faut d'abord savoir comment physiquement nous pouvons récupérer de l'électricité pour notre système grâce à un changement thermique, ceci est appelé un effet thermoélectrique. Cet effet consiste en un phénomène physique qui est présent dans quelques matériaux, il lie la chaleur traversée dans le matériau et le courant parcouru dans celui-ci [1].

Il existe deux grands effets thermoélectriques, l'effet Seebeck et Peltier, dans notre cas nous allons nous concentrer sur l'effet Seebeck.

2.1. Effet Seebeck:

Le principe de cet effet se produit avec une différence de températures entre les jonctions de plusieurs corps conducteurs, comme résultat nous avons une tension sur le matériau, cette tension dépend du gradient de température et des propriétés du matériau. Pour chaque matériaux il existe un coefficient appelé Seebeck qui est exprimé en VK-1 et qui caractérise la tension résultant d'un écart de 1K. Les métaux présentent des coefficients de Seebeck de quelques μ VK-1. Par contre les semi-conducteurs ont des coefficients plus importants car ils ont une faible conductivité thermique [2].

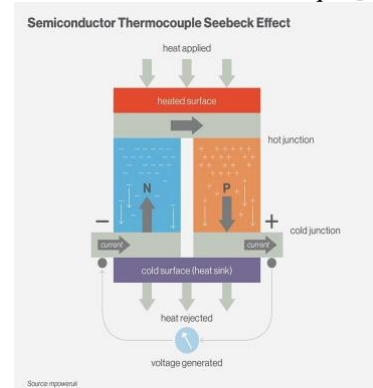


Figure 1. Effet Seebeck sur un thermocouple [3] Coniques.

3. CONCEPTION DU SYSTEME DE RECUPERATION D'ENERGIE.

Le système doit être capable de mesurer la température et l'humidité ambiante et communiquer cette information à une station central, qui se chargera de récupérer toutes les données du réseau de capteurs.

Nous cherchons profiter d'un gradient thermique faible pour fournir assez d'énergie pour que le

système marche de manière autonome. Pour cela un petit thermo générateur capable de fournir une quantité d'énergie importante est utilisé.

Malheureusement, l'énergie fourni pour le thermo générateur ne suffit pas pour alimenter le microcontrôleur et les capteurs externes du système, dès lors une étape d'amplification est nécessaire. Nous utilisons un circuit d'extraction qui permet d'augmenter la tension fournie pour le thermo générateur à 2,7 V.

Un super condensateur est utilisé comme élément de stockage, puis qu'il va nous permettre de faire face au pic de consommation du système et stocker l'énergie suffisante pour que le système continue à marcher même quand le gradient thermique décroît.

Un switch entre le circuit d'alimentation et le microcontrôleur est nécessaire pour permettre de stocker l'énergie suffisante pour démarrer le microcontrôleur, ainsi qu'un LDO pour réguler la tension qui l'alimente afin d'éviter un fonctionnement imprévisible du microcontrôleur du fait d'une alimentation variable.

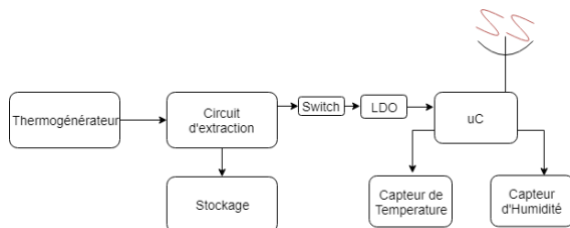


Figure 2. Diagramme de bloc du système général.

3.1. Thermo générateur :

Le thermo générateur nous permet de récupérer une tension en fonction de la différence de température qui aura sur son côté froid et sur son côté chaud. Comme ce que nous voulons est d'avoir un grand gradient de température nous ajoutons un dissipateur avec de la pâte thermique dans le côté froid pour ralentir le réchauffement de celui-ci. Nous allons utiliser comme thermogénérateur le RS 693-7030, qui peut nous fournir dans les meilleurs des cas une tension de 4.6V et en circuit ouvert 2.3V avec un courant de 1.32A [5].

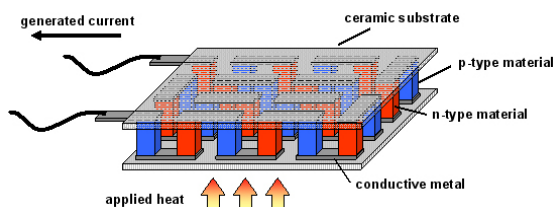


Figure 3. Exemple d'un module Seebeck [4]

3.2. Extracteur d'énergie :

On utilise un Solar energy click qui utilise le Texas Instruments BQ25570 - un chargeur nano-

haute puissance avec chargeur boost et convertisseur buck, conçu pour fonctionner avec des éléments de récupération d'énergie de très faible puissance, tels que les générateurs thermoélectriques.

Il charge les supercondensateurs externes ou le supercondensateur intégré de 220 mF. Pour ce faire, on utilise les capacités de charge et de récupération d'énergie du BQ25570, ainsi que les fonctions intelligentes de gestion de la nano-alimentation. Il permet également d'alimenter les périphériques à faible consommation d'énergie en utilisant l'énergie stockée, ce qui permet de continuer à utiliser des périphériques. C'est une solution idéale pour des réseaux de capteurs sans fil.

3.3. Microcontrôleur :

Nous avons essentiellement deux parties dans le projet : le «end device» et le «access point». La première s'agit du circuit de récupération d'énergie, dans lequel nous allons connecter un microcontrôleur qui va pouvoir être alimenté pour l'énergie qui est extraite du thermo générateur et stockée dans le super condensateur. C'est lui aussi, qui va être connecté aux capteurs externes et qui va envoyer les données mesurées vers le «access point». Le «access point» s'agit d'un autre microcontrôleur qui est connecté à un ordinateur via USB et qui va être responsable de recevoir les données nous avons une interface graphique capable de montrer les mesures des capteurs en temps réel.

Pour le «access point» et également pour le «end device», nous avons utilisé le microcontrôleur MSP430F2274. En fait, nous avons utilisé l'outil de développement eZ430-RF2500 qui nous fournit l'interface matérielle et logicielle pour déployer le projet.

3.4. Capteurs externes :

L'idée initiale de notre projet était d'utiliser deux capteurs différents (un de température et un autre d'humidité) pour récupérer des quantités physiques de l'environnement dans la région du thermo générateur.

Le capteur d'humidité pour ce projet doit être capable de fonctionner à une tension d'alimentation d'ordre de 2.7V puisque le super condensateur ne peut pas fournir une tension plus grande que celle-là. La référence utilisée est la HIH-5030-001 qui correspond aux spécifications de tension d'alimentation et basse consommation (0.54mW)

Le capteur de température que nous allons utiliser dans ce projet est le LMT86, parce qu'il peut être alimenté entre 2.2V et 5.5V et a une consommation de 0.15 mW. Nous allons travailler dans des températures comprises entre 0 et 40 degrés Celsius, selon la datasheet pour cette puce nous

aurons des tensions qui varieront entre 2.16V et 1.67V [6].

3.5. Profil de consommation :

A partir des données des fiches techniques des composants utilisés une estimation de consommation par cycle est menée à bien.

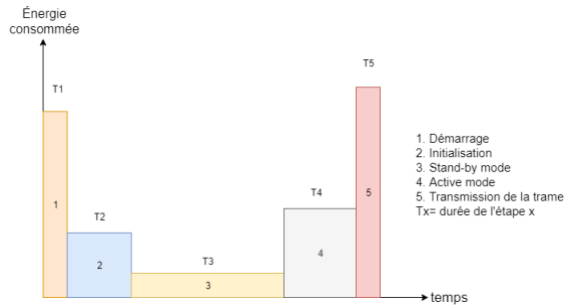


Figure 4. Profil de consommation au démarrage.

Nous nous intéressons qu'au régime permanent, c'est à dire les étapes 3,4 et 5.

La consommation des étapes est calculé de manière suivante :

$$E3 = T3 \text{ PSB} = 60s * 1,4 \text{ uA} = 8,4 \text{ uJ}$$

PSB est la puissance consommée du microcontrôleur en mode Stand-by.

Nous voulons prendre de mesures toutes les minutes, dès lors $T3 = 60s$ et pour estimer les temps qui prends mesurer la température et l'humidité, la constante de temps liée à l'ADC est tenue compte, ainsi que les constantes de temps des capteurs

$T4,CT = 100ms$ durée des mesures de température

$T4,CH = 35ms$ durée des mesures d'humidité.

Afin d'être efficient par rapport à la consommation, les capteurs seront alimentés par les portes de sortie de manière que le microcontrôleur alimente un capteur à la fois et qu'il reste allumé seulement le temps nécessaire pour prendre la mesure.

En détaillant le profil de consommation de l'étape 4, nous calculons sa consommation.

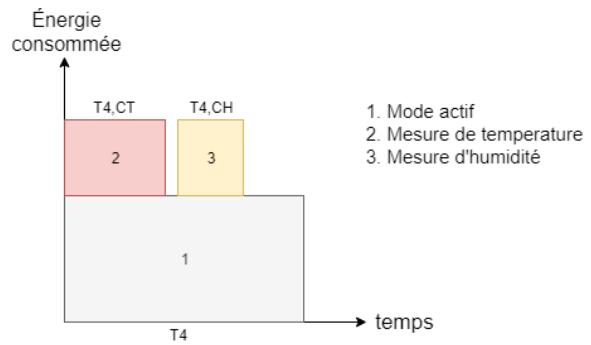


Figure 5. Profil de consommation à l'étape 4

$PMA = 2,7V * 390 \text{ uA} = 1,05 \text{ mW}$ puissance consommée en mode actif

$PCH = 2,7V * 200 \text{ uA} = 540 \text{ uW}$ puissance consommée par le capteur d'humidité

$PCT = 2,7V * 5,8 \text{ uA} = 15 \text{ uW}$ puissance consommée par le capteur de température

$$E4 = T4 \text{ PMA} + T4,CH \text{ PCH} + T4,CT \text{ PCT} = 200 \text{ ms} * 1,05 \text{ mW} + 100 \text{ ms} * 540 \text{ uW} + 35 \text{ ms} * 15 \text{ uW}$$

$$E4 = 264 \text{ uJ}$$

Finalement, la consommation de l'étape 5 est calculée.

$$E5 = T5 \text{ PTX} = 100 \text{ ns} * 21,2 \text{ mA} = 2,12 \text{ nJ} \text{ (Negligable)}$$

Donc l'énergie totale par cycle est égale à :

$$E_{\text{Total/cycle}} = E3 + E4 + E5 = 348 \text{ uJ}$$

3.6. Élément de stockage:

Pour dimensionner la supercapacitance, il est nécessaire d'estimer l'énergie qui le thermogénérateur puisse fournir par cycle.

Pour un gradient thermique de $T = T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}} = 70C - 30C = 40C$, nous obtenons une tension de 0,65 V et un courant de 0,37A (avec charge). En supposant un gradient constant pendant un cycle, l'énergie fourni par le thermogénérateur est égale à :

$$E_{\text{Fournie/cycle}} = V_{\text{TH}} * I_{\text{TH}} * T_{\text{cycle}} = 650 \text{ mV} * 370 \text{ mA} * 60,2 \text{ s} = 14,47 \text{ J}$$

Alors, la valeur du condensateur pour stocker l'énergie fournie est égale à :

$$C = 2 * E_{\text{Fournie/Cycle}} / V^2 = 2 * 14,47 \text{ J} / 2,7^2 = 3,96 \text{ F}$$

4. SOFTWARE LOGICIEL STRUCTURE

La structure de notre code, implémenté sur le programme IAR embedded possède la structure montrée en figure 6.

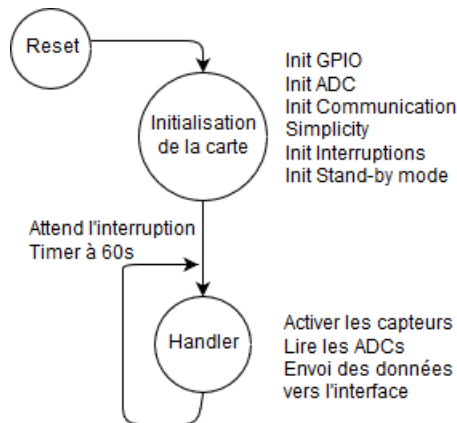


Figure 6. Structure du code

Nous avons repris le code exemple pour la communication pour pouvoir tester qu'effectivement nous pouvions connecter deux modules (un access point et un end point). Après avoir assuré cette communication, nous avons connecté le capteur à un ADC pour récupérer la mesure et à un GPIO pour faire l'habilitation de ce dernier, ce pin d'habilitation est important puisque c'est celui-ci qui nous permet de contrôler quand le capteur est alimenté, donc nous réduisons la consommation de notre système. Ensuite le microcontrôleur devrait se mettre en stand-by mode et attendre l'interruption pour relancer une nouvelle mesure, mais malheureusement nous n'avons pas eu le temps de faire cette étape, à cause de la partie de communication et des problèmes matériels.

5. RESULTATS:

Nous avons fait une manipulation pour vérifier si notre système marchait comme le prévu. Pour ce faire, nous avons un "Access Point" qui est connecté à un ordinateur pour recevoir les données du "End Device" et les afficher sur l'écran. Ces données qui sont montrées sont la température mesurée par un capteur externe et le niveau de tension du "end Device". Le "End Device" est alimenté par la carte de récupération d'énergie et est connecté au capteur de température LMT86. Le but du "End Device" est de faire la mesure de température et l'envoyer au "access point". La carte de récupération d'énergie est connectée également à un set de supercondensateurs (faisant 4.5F) et à un thermogénérateur. Ce dernier transforme l'énergie thermique en électrique pour alimenter la carte de récupération et le set de supercondensateurs stockent cette énergie. Lors de la faute d'une source thermique, les supercondensateurs vont fournir l'énergie nécessaire pour le microprocesseur.

D'abord, une validation de la charge de la super capacitance est faite afin de constater si notre chaîne

d'alimentation (Thermo générateur, circuit d'extraction et élément de stockage) marche correctement.

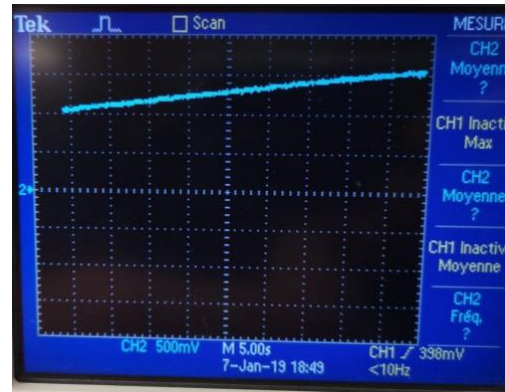


Figure 7. Charge de la super capacitance à un gradient de 40C

Dans cette manipulation, nous avons cherché à montrer que les supercondensateurs sont capables de maintenir le système fonctionnel quand il n'y a pas d'autre source. La figure 8 montre la manipulation faite et la figure 9 montre les valeurs de température mesurées avec un thermomètre et celle qui a été mesurée avec le "end device" et envoyée vers l'ordinateur.

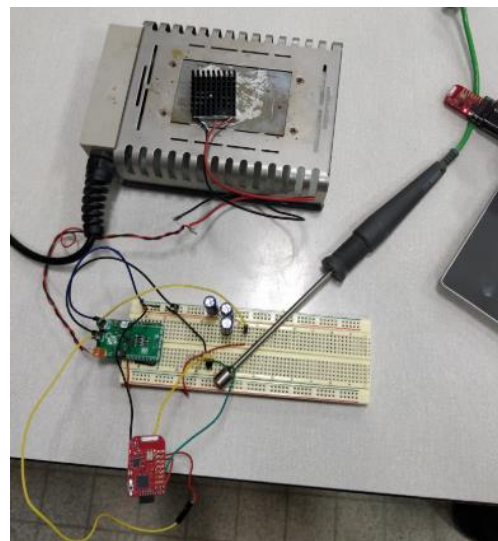


Figure 9. Manipulation du système

Nous avons vu que la température mesurée avec le thermomètre digital est de 23.7°C et celle montrée sur l'écran de l'ordinateur est de 25.9°C.

La différence est due à des imprécisions du capteur et de la conversion de l'ADC, cependant, c'est une bonne représentation du réel.

Nous avons aussi vérifié que la tension fournie à la carte du microprocesseur est constante lorsque la tension sur les supercondensateurs sont supérieure à un seuil. Ce dernier constat est important pour assurer que le microprocesseur et le capteur de température puissent fonctionner correctement.

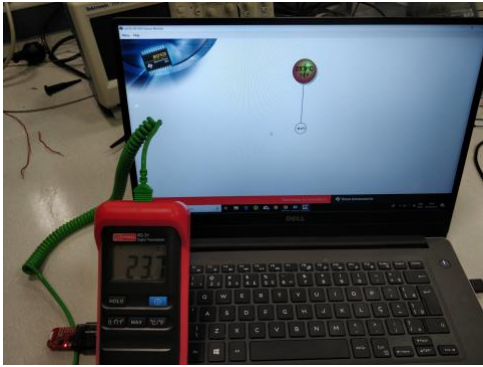


Figure 10. Récupération des mesures dans l'ordinateur

CONCLUSION

L'utilisation d'un thermo générateur pour la récupération d'énergie thermique d'un environnement soumis qui présente un gradient thermique faible est envisageable pour alimenter un système communicant simple qui ne consomme pas beaucoup d'énergie.

Les étapes les plus délicates dans la conception d'un système autonome alimenté par une source d'énergie alternative sont la charge de l'élément de stockage puisqu'elle peut prendre beaucoup de temps et aussi le refroidissement de la jonction à froid du thermo générateur qui doit garantir un gradient constant et par conséquent une source d'énergie constante.

REFERENCES

- [1] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermo%C3%A9lectricit%C3%A9>
- [2] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-effet-seebeck-15835/>
- [3] <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/Seebeck-effect>
- [4] <https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/metal-and-ceramic-science/thermoelectrics.html>
- [5] <https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/1447/0900766b814473ae.pdf>
- [6] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmt86.pdf>
- [7] <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-hih5030-5031-series-product-sheet-009050-2-en.pdf>