

# Etude et mise en oeuvre de la récupération d'énergie thermique

A. A. BEKDOUCHE

Faculté des Sciences

Université de Montpellier

Montpellier, France

amineadelbekdouche@etu.umontpellier.fr

**Abstract**—La récupération d'énergie se présente comme une solution prometteuse dans le domaine de l'IoT, offrant autonomie et éliminant le besoin de remplacer les batteries. Cet article explore la récupération d'énergie thermique en utilisant des générateurs thermoélectriques (TEG), approfondissant les bases théoriques de la récupération et la physique gouvernant ce processus, tout en illustrant la structure des TEG.

De plus, nous examinons l'unité centrale du système, l'unité de gestion de l'alimentation (PMU), qui est chargée de garantir une solution de stockage fonctionnelle, de maintenir l'alimentation du système, et de redresser et réguler la tension d'entrée récupérée des générateurs. Nous proposons ensuite une application IoT MKR WAN GPS, suivie d'un système d'alimentation implémentant l'unité de gestion de puissance LTC3108.

Le système présenté est ensuite examiné et discuté. En fin de compte, nos résultats indiquent que bien que la récupération d'énergie soit prometteuse, les générateurs thermoélectriques ne génèrent actuellement pas suffisamment de puissance. Néanmoins, les utiliser pour les applications IoT reste faisable grâce à l'unité de gestion de l'alimentation disponible. Ces unités ont la capacité de fonctionner avec aussi peu que  $0,12 \mu\text{W}$ , ce qui est extrêmement bas. De plus, elles offrent des fonctionnalités telles qu'un indicateur de puissance fiable et un système de gestion basé sur la priorité d'alimentation, où le microcontrôleur a la priorité, suivi par la sortie, le stockage étant la dernière priorité.

**Index Terms**—Récupération d'énergie, IoT, Nœuds de capteurs, Capteurs autonomes, Générateurs thermoélectriques, Cellule Peltier, Unités de gestion de l'énergie, Arduino, GPS, LoRa

## I. INTRODUCTION

L'utilisation croissante des objets connectés est indéniable. Selon un rapport de l'Ademe, en 2021, le nombre d'appareils connectés a atteint dix milliards à l'échelle mondiale [1]. Ce chiffre a grimpé à 40 milliards en 2023, et la Commission européenne estime qu'il dépassera les 49 milliards d'ici 2026 [2]. Parallèlement, le marché des objets connectés devrait atteindre 1500 milliards de dollars en 2025, soit dix fois plus qu'en 2018, marquant une croissance spectaculaire pour cette technologie.

Cette expansion du marché des objets connectés stimule la recherche et le développement pour relever les défis qui se posent. Dans le cadre d'Horizon Europe, la Commission européenne a investi 100 millions d'euros dans le domaine de "De l'informatique en nuage à l'IoT" pour des projets planifiés entre 2022 et 2025. Ces investissements s'appuient

sur le succès des projets antérieurs financés par Horizon 2020, qui disposait d'un budget de 150 millions d'euros.

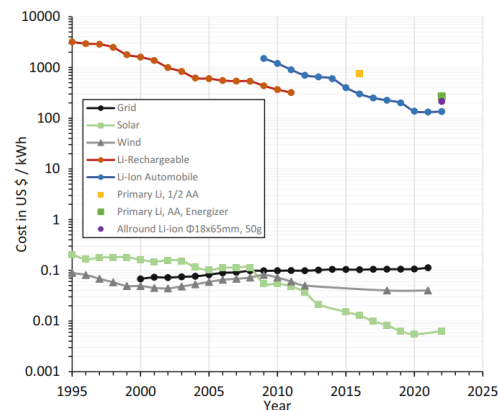


Fig. 1. Coût de l'énergie provenant de diverses sources et sous diverses formes, à partir de statistiques et de prix disponibles publiquement [3].

Cependant, le déploiement des objets connectés rencontre des difficultés, notamment sur le plan énergétique, surtout dans les régions éloignées des réseaux de distribution. Pour résoudre ce problème, le développement de batteries à forte autonomie et la réduction de la consommation énergétique des appareils constituent des solutions, mais restent limités. En effet, outre les préoccupations environnementales, l'utilisation de batteries nécessite des remplacements fréquents et peut s'avérer coûteuse. La Figure 1 montre l'évolution des coûts de l'énergie provenant de diverses sources et sous diverses formes.

Une autre solution prometteuse, qui a bénéficié de l'amélioration de l'efficacité énergétique des composants électroniques, est la récupération d'énergie ambiante.

## II. LA RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE

Souvent, la quantité d'énergie ambiante récupérée ne suffit pas à maintenir un système IoT en fonctionnement permanent (voir Figure 2 et Figure 4). Ainsi, l'objectif est de développer des méthodes pour collecter cette énergie ambiante, la stocker jusqu'à ce qu'elle atteigne un seuil minimal de fonctionnement, puis la consommer, et répéter ce processus indéfiniment. Comme illustré sur la Figure 3, le système passe l'énergie du milieu à travers un transducteur, produisant ainsi

de l'énergie électrique qui est gérée par une unité de gestion de puissance (PMU) afin de stocker cette énergie ou d'alimenter notre système.

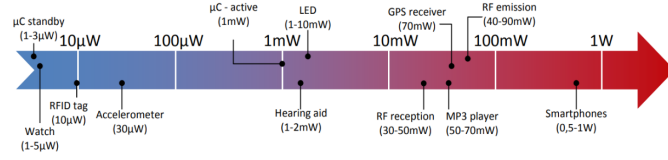


Fig. 2. Consommation typique des objets connectés [4].

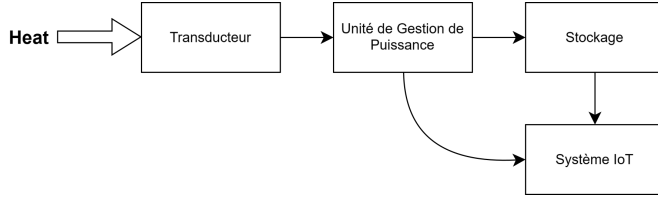


Fig. 3. Répartition de l'énergie dans un système IoT utilisant un récupérateur thermoélectrique

L'énergie ambiante peut prendre différentes formes, ce qui conduit à l'utilisation de différents types de générateurs. Cet article se focalisera sur l'énergie thermique en particulier.

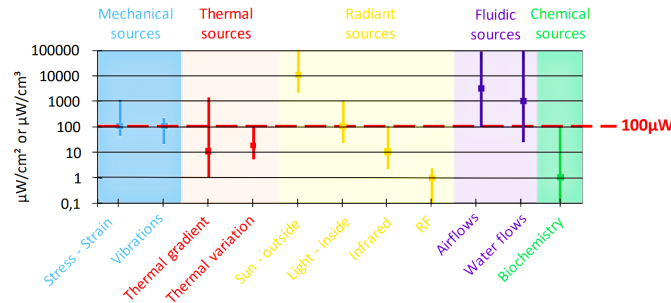


Fig. 4. Sources ambiantes et densités de puissance avant conversion [4].

## A. La Thermo-électricité [5]

1) *Principe de Seebeck*: Ce principe, découvert par Thomas Seebeck en 1824, montre que soumettre un barreau à un gradient de température produit un champ électrique proportionnel à ce gradient (voir formule X). Alpha représente le coefficient de Seebeck ou le pouvoir thermoélectrique (PTE).

2) *Propriétés thermoélectriques des matériaux*:

- La conductivité thermique : La chaleur se transporte du côté chaud vers le côté froid d'un barreau selon la loi de Fourier. Dans les métaux, elle se transporte par des électrons, tandis que dans les isolants, elle se transporte par les phonons. Dans les semi-conducteurs, les deux modes de transport sont présents.
- Conductivité électrique : L'application d'un champ électrique sur un barreau isotherme entraîne une densité de courant électrique proportionnelle à la conductivité du matériau. Contrairement à la conductivité thermique qui

varie sur 4 grandeurs, la conductivité électrique varie sur 24 ordres de grandeurs.

- Pouvoir thermoélectrique (PTE) : C'est également le coefficient de Seebeck. Plus le caractère métallique est prononcé plus le pouvoir thermoélectrique (en valeur absolue) est faible.
- Facteur de mérite thermoélectrique : Il combine la conductivité thermique faible, la conductivité électrique élevée et un PTE puissant. Il est exprimé par une formule qui décrit les performances des matériaux pour les applications thermoélectriques.

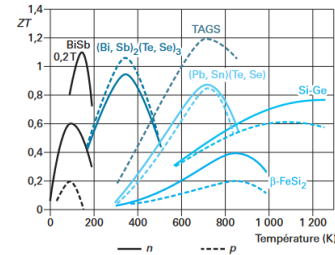


Fig. 5. Dépendance en température du ZT des matériaux conventionnels [5].

3) *Matériaux thermoélectriques disponibles*: Une liste de matériaux conventionnels en fonction de leur facteur de mérite est présentée sur la Figure 5.

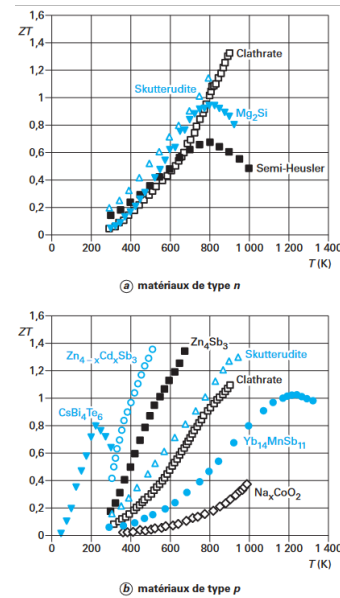


Fig. 6. Dépendance en température du ZT des matériaux émergents [5].

4) *Matériaux thermoélectriques en cours de développement*: Une liste de matériaux émergents est présentée sur la Figure 6.

## III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

### A. Conception du système IoT

1) *Description des systèmes IoT visés*: En ce qui concerne les systèmes IoT qui sont compatibles avec la récupération

d'énergie, nous avons opté pour le travail avec les nœuds de capteur. Il y a trois modules intégrés dans un nœud de capteur : le microcontrôleur, le module de communication et le capteur. La Figure 7 présente une vue d'ensemble d'un nœud de capteur. La forme générale de la consommation

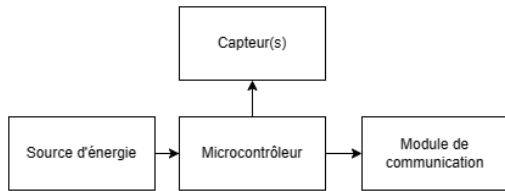


Fig. 7. Représentation du système IoT étudié [4].

d'énergie d'un nœud de capteur est la suivante (c.à.d. Figure 8). Cette forme se distingue par trois modes de fonctionnement distincts :

- 1) L'état de non-activité : c'est la phase où notre système consomme le moins d'énergie.
- 2) La partie où notre mesure commence et où la consommation augmente.
- 3) La transmission : Cette étape se distingue par un pic de consommation et une durée extrêmement courte.

Dans les zones où l'énergie récupérée n'est pas suffisante pour alimenter notre fonction, nous employons des unités de stockage. L'utilisation des supercondensateurs est recommandée en raison de leur cycle de recharge quasi-infini et de la disponibilité de l'énergie ambiante, ce qui les empêche de se décharger rapidement.

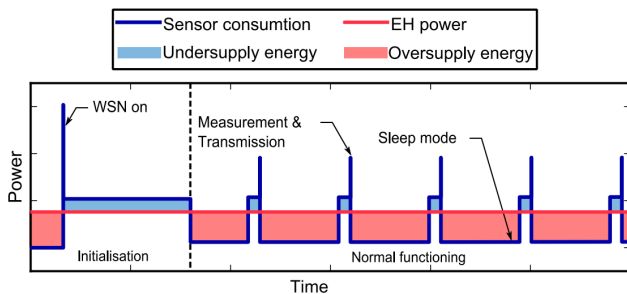


Fig. 8. Consommation énergétique typique des nœuds de capteur [6].

2) *Les protocoles de communication compatibles*: Les diverses applications des objets connectés ont contribué à la diversion des protocoles de communication associés. Trois grandes catégories sont identifiées, selon deux critères : la portée et la nature. Ces types de réseaux comprennent : les réseaux à courte portée WLAN ou WPAN, les réseaux à longue portée LongRange et les réseaux mobiles.

Chaque catégorie comprend différents protocoles qui présentent des avantages et des inconvénients en fonction de l'application visée. En ce qui concerne la récupération d'énergie, nous nous concentrons principalement sur les technologies à faible consommation d'énergie, telles que NFC-RFID, ZigBee, BLE, Z-Wave, Wi-Fi HaLow, LoRa, SigFox, Ingenu et LTE-NB-IoT [7].

Le protocole LoRa a été sélectionné en tant que protocole le plus couramment employé pour les traqueurs GPS. Le LoRa est compatible avec la récupération d'énergie grâce à son avancement technologique, avec sa faible consommation d'énergie et son débit de communication fonctionnel. D'après le graphique "Fig. 9", le SigFox est supérieur à LoRa en termes de caractéristiques, mais il est limité à l'utilisation du cloud SigFox, un service payant, et la technologie est moins développée. De cette façon, LoRa reste notre option privilégiée.

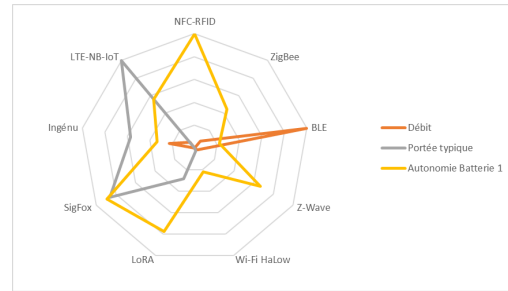


Fig. 9. Comparaison entre les différents protocoles de communication IoT [7] [8].

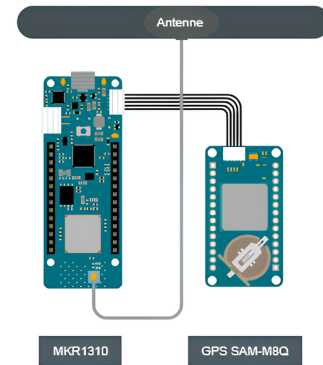


Fig. 10. Circuit de mise en œuvre du système IoT étudié [9].

3) *La carte de développement et le capteur*: Le système étudié dans cet article est représenté dans la figure X. Ce système est un traqueur GPS, il utilise un Arduino MKR1310 en combinaison avec un module GPS; Le MKR1310 possède un module de communication LoRa intégré. Une mise en œuvre du système est disponible sur le site du fabricant [9]. Pour l'optimiser, afin d'atteindre une consommation minimale, on propose le mode de fonctionnement suivant : Pour une performance supérieure, le forum d'Arduino contient de discussions bien détaillées sur les étapes à suivre concernant la gestion de puissance des MKRs, voir [10].

### B. Générateur Thermoélectrique (TEG)

Les générateurs thermoélectriques (TEGs), également connus sous le nom de cellules de Peltier, sont composés de plusieurs jonctions PN disposées en série, intercalées entre deux plaques céramiques. La structure de base des TEGs est présentée dans la Figure 12. L'utilisation de matériaux

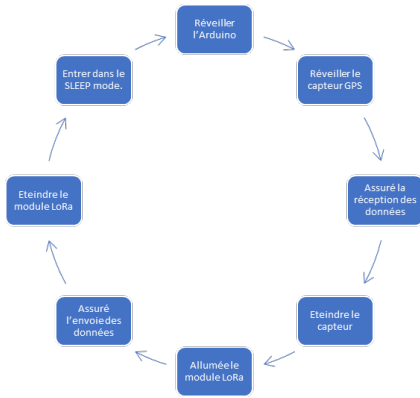


Fig. 11. Diagramme de fonctionnement du système IoT étudié

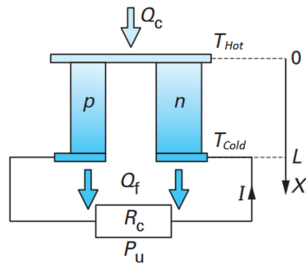
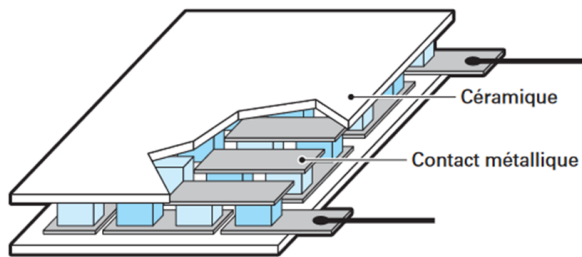


Fig. 12. Cellule basique d'un générateur thermoélectrique [5].

semi-conducteurs est essentielle pour maximiser le facteur de mérite et ainsi obtenir des rendements supérieurs. Dans un matériau de type p, le flux de courant est dans le même sens que le flux de chaleur, tandis que dans un matériau de type n, c'est l'inverse. En combinant ces deux types de matériaux, il est possible de créer plusieurs cellules et d'obtenir une tension plus élevée ainsi qu'un courant important. Le matériau couramment utilisé pour les conducteurs de type n et p, fonctionnant à des températures ambiantes, est le bismuth Bi2Te3. Une représentation d'une cellule de Peltier est illustrée sur la Figure 13. Le rendement des TEGs idéal



Module thermoélectrique constitué par l'assemblage d'un certain nombre de thermocouples, qui peut varier de quelques unités à plusieurs dizaines d'unité.

Fig. 13. Module themroélectrique [5].

dépend principalement du facteur de mérite, comme illustré sur la figure 14. Les performances typiques des TEGs sont

également présentées sur la figure x. On remarque que la puissance maximale pouvant être obtenue est de l'ordre de quelques milliwatts, ce qui est parfait pour alimenter des objets connectés. Cependant, la différence de température associée est difficile à atteindre et à maintenir dans des cas pratiques. En fonctionnement à température ambiante, on peut s'attendre à une différence de quelques degrés Celsius, ce qui génère une puissance inférieure à 1mW.

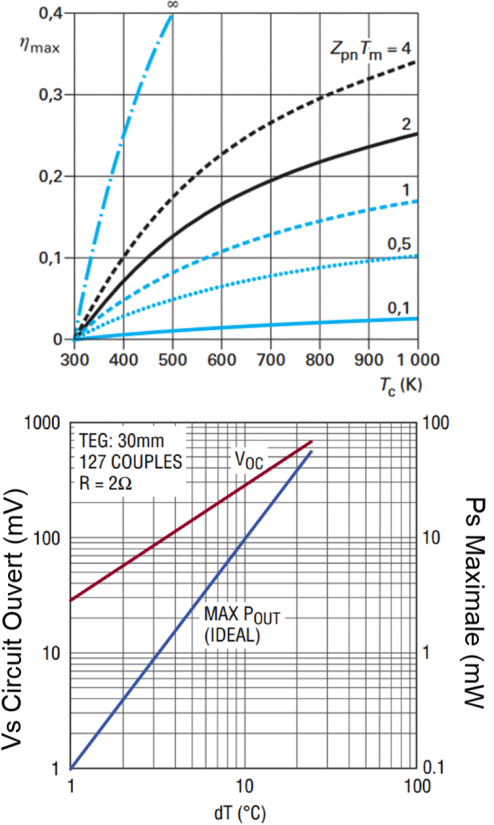


Fig. 14. Performances des modules thermoélectrique en fonction de la température [5].

Pour optimiser les performances des TEGs, différentes structures peuvent être utilisées, mais le choix dépend de la plage de fonctionnement spécifique de notre TEG. Pour des informations plus détaillées, un article complet sur la thermoélectricité, qui constitue la principale source de notre étude, est disponible dans les ressources techniques de l'ingénieur.

Il convient de préciser que l'utilisation de la structure à plusieurs étages, illustrée, vise à augmenter la différence de température entre les deux plaques, permettant ainsi d'obtenir une puissance fournie plus importante.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de travailler avec le générateur MULTICOMP PRO MPDT-AR-030-2A, qui offre un refroidissement de 21W avec un ventilateur intégré. Cette sélection est principalement destinée à une utilisation en laboratoire. Pour des applications plus compactes, un autre module recommandé est le CUI INC CP85438. Pour

plus de détails, veuillez consulter les spécifications fournies par Analog Devices [11].

### C. Unité de Gestion de Puissance (PMU)

L'énergie extraite par le récupérateur n'est pas compatible avec l'alimentation directe du système. Un abaisseur/élévateur est nécessaire dans ce cas, suivi par un régulateur pour répondre aux fluctuations de la récupération. Dans le cas où le récupérateur fournit une tension alternative, un redresseur doit précéder la chaîne de transmission. Pour assurer un transfert maximal de puissance, une adaptation d'impédance à celle du transducteur est indispensable. L'adaptation est cruciale non seulement pour le transfert de puissance, mais également pour isoler le transducteur de l'influence de l'électronique du système IOT. En plus, l'adaptation minimise les pertes liées à l'impédance de sortie, maximisant ainsi le transfert d'énergie. Pour atteindre une bonne adaptation, une régulation dynamique de l'impédance est proposée. Cela est connu sous le nom du maximum PowerPoint tracking MPPT. Dans des situations particulières, on peut améliorer notre récupération en imposant un courant ou une tension précise au transducteur. Cela ajoute des pertes évidemment, mais cette technique a démontré des performances plus élevées. Un dernier point sur les PMU est le démarrage actif. Cette capacité de démarrer à partir d'un état énergétique épuisé s'avère très importante pour la récupération d'énergie. Cela revient au fait que le transducteur rencontre des phases longues d'inactivité où le système reste sans énergie. L'utilisation des éléments passifs garantit le démarrage froid. Pour le redressement passif, on peut utiliser des diodes à faible tension de seuil, comme les diodes de Schottky. Il est possible d'obtenir un élévateur passif en utilisant le contrôle d'hystérésis dans une topologie similaire au voleur de Joule en passant par un transformateur. En résumé, le diagramme de la Figure 15 présente les étapes nécessaires pour la gestion de puissance [3].

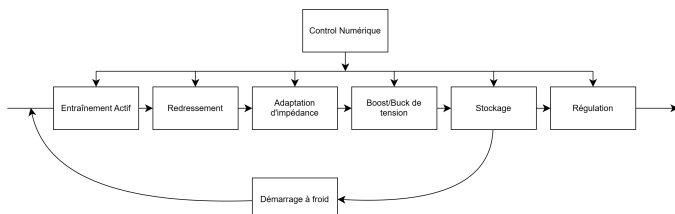


Fig. 15. Diagramme typique des fonctionnalités d'une unité de gestion de puissance [3].

Dans le but de satisfaire ces exigences, ANALOG DEVICES propose une sélection de PMU spécialement conçue pour les récupérateurs d'énergie. Cette liste est accessible sur leur site officiel, et un lien direct pour accéder à la base de données des PMU qui nous intéressent est indiqué dans les références [5]. Selon la liste fournie, les unités de gestion conçues pour les récupérateurs thermoélectriques possèdent des caractéristiques intéressantes. On remarque que LTC3109 offre l'option de détection automatique de polarité pour les applications dans lesquelles le gradient de chaleur est

imprédictible. Le LTC3108, Le PMU étudié, et le LTC3108-1 ont le même fonctionnement, à l'exception du fait que le dernier a une tension de sortie librement ajustable. Les ADP sont développés pour une utilisation universelle des récupérateurs.

La description de la LTC3108 est disponible sur la datasheet [13] on tient seulement à préciser que le rapport d'enroulement du transformateur détermine la tension minimale d'entrée, pour un rapport de 1 :100 on peut atteindre les 20mV mais cela implique un courant de sortie faible. La figure x montre l'effet du rapport d'enroulement sur le courant de sortie pour différentes rapport. Pour le rapport choisie une capacité de 1nF branché en entrée est recommandée. Le schéma block de fonctionnement du LTC3108 est présenté dans la Figure 16.

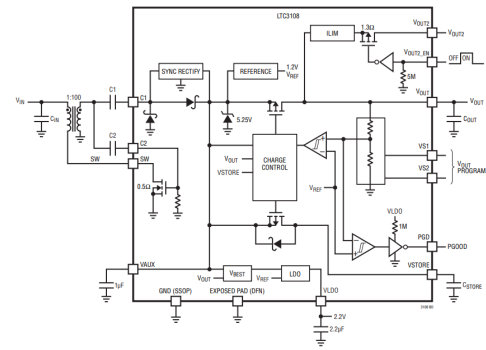


Fig. 16. Diagramme de Fonctionnement du LTC3108 [13].

### D. Supercondensateur

Le supercondensateur représente une unité de stockage d'énergie électrique en forme électrostatique. Cette unité possède un cycle de recharge illimité, ce qui la rend plus utile au développement long terme. Un inconvénient de ces unités est la décharge rapide, cette décharge ne pose pas de problème au récupérateurs thermoélectrique puisque notre système utilise son énergie immédiatement à sa disponibilité. Le dimensionnement des supercondensateurs est en fonction de la puissance demandée et la durée de fonctionnement du système. Dans notre cas ce dimensionnement est établie selon la formule suivante [3]:

$$C_{SR} \geq \frac{[6A + I_Q + I_{LDO} + (I_{BR} \cdot t \cdot f)] \cdot T_{SR}}{5.25 - V_O} \quad (1)$$

La consommation actuelle de notre système est estimée à atteindre 49 mA pendant la mesure. La consommation du module LoRa est estimée à atteindre 128 mA lors de la transmission. The Things Network propose un envoi de 10 messages par jour, soit une fréquence de  $1,16 \times 10^{-4}$  Hz. En considérant un débit minimal de 0,3 Kbps pour une consommation d'énergie minimale, la durée de transmission des données GPS (42 bits) est estimée à 0,14 s. Avec une tension de sortie de 5V et une durée de charge de 6 s, soit la moitié de la durée de transmission, la capacité de notre supercondensateur devrait être de 343,9 mF [14].



### E. Conception du circuit final

ANALOG DEVICE propose un circuit d'évaluation pour les TEGs ainsi qu'un circuit d'application [13]. Pour notre étude on a utilisé la carte d'évaluation DC1582B-A [15]. Cette carte intègre l'unité de gestion de puissance, la LTC3108, avec le circuit de récupération. Ainsi le circuit finale de notre étude est donné dans la Figure 17.

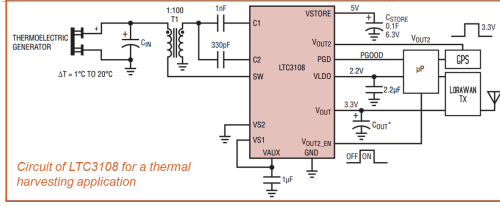


Fig. 17. Circuit finale proposé par ANALOG DEVICE [13].

## IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### A. Séquencage de Démarrage du Système

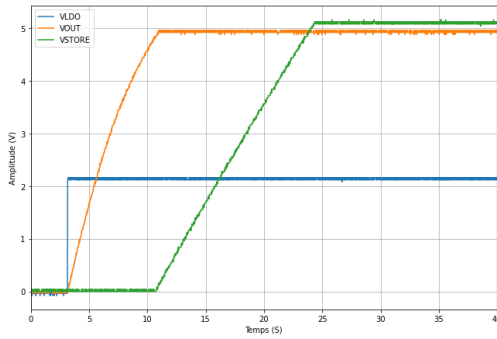


Fig. 18. Séquencage de démarrage du système

Le séquençement, comme illustré dans la Figure 18, accorde la priorité à l'alimentation du microcontrôleur. Ensuite, l'alimentation du module de communication ainsi que du capteur est assurée. La charge du supercondensateur est maintenue en dernière position afin de garantir que notre système puisse exécuter ses tâches en cas de disponibilité énergétique suffisante. Il est à noter que tant que l'unité de stockage n'est pas chargée, les composants du système IoT fonctionnent en mode Low Power. Le temps de charge et d'alimentation dépendra de l'implémentation spécifique du système ; pour plus d'informations, veuillez consulter la datasheet.

### B. Réaction du Système à la Perte de Puissance

En cas de perte d'énergie, notre système continue de fonctionner sur la réserve du supercondensateur. Comme illustré dans "Fig. 18", dès que la charge de la batterie passe en dessous d'un seuil défini, l'alimentation la suit en retour jusqu'à ce que la décharge exponentielle du système soit atteinte. À ce moment-là, notre système repasse en mode Low Power sans délai, dès que la tension de sortie (Vout) chute. L'indicateur permettant de détecter cette chute de tension est le Power Good, comme détaillé dans la section Indicateur de Bonne Alimentation (Power Good).

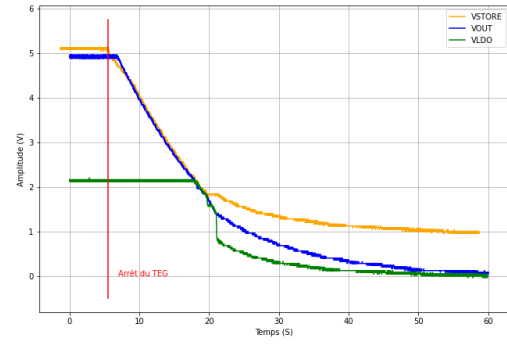


Fig. 19. Fonctionnement sur l'énergie fournie par le supercondensateur

### C. Réponse Pratique : Entrée de Train d'Impulsions Rectangulaires

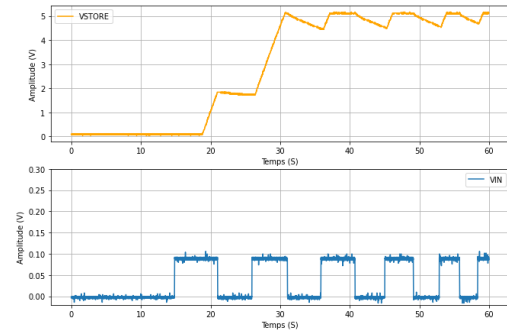


Fig. 20. Evolution de charge du supercondensateur pour une entrée discontinue

La durée de chargement de la batterie dépend de la tension fournie par le TEG. En pratique, l'énergie fournie connaît des périodes d'inactivité pendant le fonctionnement. "Fig. 19" illustre un test du fonctionnement du supercondensateur dans ce cas. Il est à noter que tant que le supercondensateur n'est pas chargé, sa décharge pendant les périodes d'inactivité se déroule selon deux modes de fonctionnement distincts. Tout d'abord, si la tension est approximativement supérieure à 2V, notre supercondensateur dépendra principalement des tensions d'alimentation pour garantir que le système reste actif le plus longtemps possible. En revanche, si la tension est inférieure à ce seuil, notre système ne dépendra pas des alimentations car ils seront éteints, ce qui prolonge la durée de décharge. Il convient de noter que le temps de charge est plus rapide que celui de la décharge, ce qui garantit que même lors de périodes d'inactivité plus longues que celles d'activité, notre système reste capable de remplir ses tâches et d'alimenter les fonctions IoT désirées.

### D. Indicateur de Bonne Alimentation (Power Good)

La réponse de l'indicateur Power Good est présentée sur "Fig. 20". Cet indicateur est principalement utilisé pour indiquer au microcontrôleur que les alimentations de sortie Vout 1 et Vout 2 sont disponibles. Cependant, ce signal ne nous informe pas sur l'état de charge du supercondensateur.

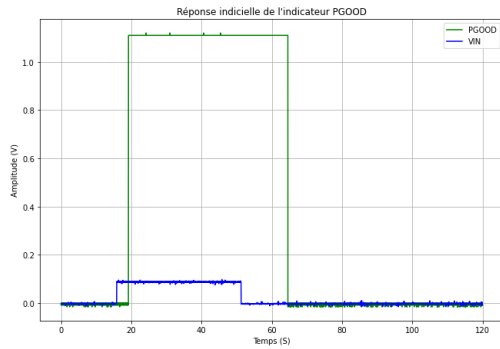


Fig. 21. Evolution de l'indicateur PGood en fonction de l'énergie disponible dans le système

Une estimation de cela est possible et peut être prise en compte lors de la programmation du microcontrôleur. Tant que l'indicateur est actif, notre unité de stockage devrait se charger. En théorie, avec un compteur intégré dans le microcontrôleur, il est possible d'approximer le moment où le supercondensateur est rempli. Cela peut poser des problèmes, car le supercondensateur tente de maintenir cet indicateur et se décharge pour l'assurer. Cependant, dans tous les cas, nous sommes sûrs de deux choses : si PGood est désactivé, alors le supercondensateur se décharge ; s'il est activé et reste actif pendant une durée suffisamment longue, alors nous pouvons être sûrs que le supercondensateur est chargé et que la fonction peut être exécutée.

#### E. Qualité du Signal de Sortie

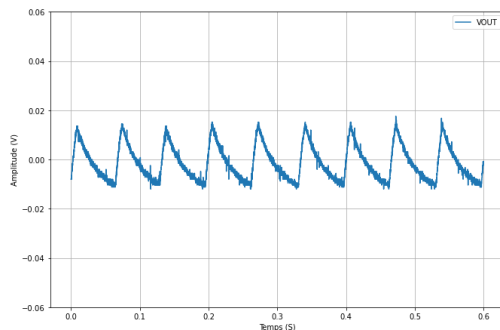


Fig. 22. Ondulations du signal de sortie Vout.

Le signal de sortie présente des ondulations de 20 mV autour de la valeur d'alimentation, comme illustré dans "Fig. 21". En théorie, cela ne pose aucun problème pour l'alimentation des composants électroniques, et pour une alimentation de 5 V, cela représente une ondulation de 0,4 %. Il convient de préciser que ces ondulations sont influencées par la charge en cours et la capacité de sortie du système alimenté.

#### V. CONCLUSION

Les progrès actuels dans les transducteurs thermoélectriques permettent de fournir une faible puissance avec un rendement capable d'alimenter des fonctions IoT de base telles que les

nœuds de capteurs. Cependant, l'élément clé du récupérateur reste l'unité de gestion de puissance, dotée de fonctionnalités essentielles pour garantir une exploitation optimale du dispositif. L'unité de stockage, notamment le supercondensateur, est indispensable au fonctionnement des nœuds IoT, assurant une alimentation stable et continue.

La qualité du signal d'alimentation est satisfaisante, tandis que l'indicateur d'alimentation demeure un outil crucial dans la gestion du système IoT, permettant de surveiller et de contrôler efficacement l'état de charge. Le récupérateur se distingue par sa capacité de charge rapide et de décharge lente, ce qui le rend parfaitement adapté à l'environnement énergétique ambiant.

Dans ce contexte, la priorité est accordée au bon fonctionnement du système IoT, et plus précisément au microcontrôleur, qui représente un élément crucial dans l'intégration réussie du récupérateur dans un système IoT. En résumé, grâce à ces avancées technologiques et à une conception bien pensée, le récupérateur d'énergie thermique se positionne comme une solution prometteuse pour alimenter efficacement les applications IoT à faible consommation d'énergie, ouvrant ainsi la voie à de nombreuses possibilités d'innovation dans ce domaine.

#### REFERENCES

- [1] "https://www-techniques-ingenieur-fr.ezpm.scdi-montpellier.fr/actualite/articles/plus-dobjet-connectes-plus-de-pollution-113190/", Plus d'objet connectés égale plus de pollution ?, Techniques de l'ingénieur.
- [2] "https://digital-strategy.ec.europa.eu/fr/policies/internet-things-policy", Politique européenne de l'internet des objets, Commission Européenne.
- [3] Michail E. KIZIROGLOU and Eric M. YEATMAN, "Energy Harvesters and Power Management".
- [4] Sebastien BOISSEAU, "Autonomie des Systèmes : Récupération d'énergie, Gestion d'énergie et Electronique basse consommation Electronique", Université Grenoble Alpes (France), 2019. fftel-02102388.
- [5] J. Bertrand LENOIR, Jean-Pierre MICHENAUD, Anne DAUSCHER, "Thermoélectricité : des principes aux applications", Techniques de l'ingénieur Réf K730 V2.
- [6] Amirouche OUMAZIZ, Florian HUET, Sonia BEN DHIA, "Alimentation de capteurs communicants par systèmes de récupération et de stockage d'énergies ambiantes à bas coût", TELECOM'2019 & 11èmes JFMMA, Jun 2019, Saïdia, Maroc. fhal-02138449.
- [7] Khaldoun AL AGHA, Daniel ETIEMBLE, "Introduction à l'internet des objets", Techniques de l'ingénieur Réf H8050 V1.
- [8] Pierre KASSAA, "L'internet des Objets (IoT) et les réseaux haut et bas débit, est-ce un outil essentiel pour une ville intelligente et moins Polluée ?", OGERO Telecom, BEYROUT - LIBAN.
- [9] "https://docs.arduino.cc/tutorials/mkr-wan-1310/wan-and-gps/", MKR WAN 1310 avec MKR GPS Shield, Arduino Documentation.
- [10] "https://forum.arduino.cc/t/how-can-i-achieve-the-104-a-power-consumption/619331", Discussion sur les étapes à suivre pour diminuer la consommation énergétique du MKR1310, Arduino Forum.
- [11] "https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/dc2080a.html#eb-documentation", DC2080A Evaluation Board, Analog Devices.
- [12] "https://www.analog.com/en/product-category/energy-harvesting.html", Energy Harvesting Power Management Units, Analog Devices.
- [13] "https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3108.pdf", LTC3108 DataSheet, Analog Devices.
- [14] "https://lora.readthedocs.io/en/latest/duty-cycle-time-on-air-toa", LoRa Documentation, ReadTheDocs.
- [15] "https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/dc1582b-a.html#eb-overview", DC1582B-A Evaluation Board, Analog Devices.