

Alimentation autonome sans fil et sans batterie par électrothermogénération

V.Boitier¹, L. Segui¹, B. Estibals¹, C. Arnaud², T. Anfré² and C. Maurin²

¹LAAS-CNRS, Université de Toulouse, France, ²Arcelor Mittal, Fos Sur Mer, France

RESUME – L'électrothermogénération est bien adaptée pour récupérer de l'énergie électrique en présence d'un gradient thermique permanent. cet article présente la réalisation d'une alimentation électrique destinée à un capteur d'O₂ en milieu industriel. Le retour d'expérience permet de montrer quelques considérations techniques à prendre en compte pour réussir son alimentation.

Mots-clés—*Thermogénérateur, TEG, MPPT, supercapacités, capteur sans fils, WSN, Energy Harvesting, gradient thermique.*

1. INTRODUCTION

L'amélioration des process industriels nécessite une instrumentation fine. C'est en particulier le cas chez Arcelor Mittal à la cokerie de Fos/Mer. La mesure du taux d'oxygène des boîtes à fumée (BAF) (cf Fig. 2) qui récupèrent les fumées de combustion des fours de la cokerie est une donnée importante pour optimiser la cuisson du charbon.

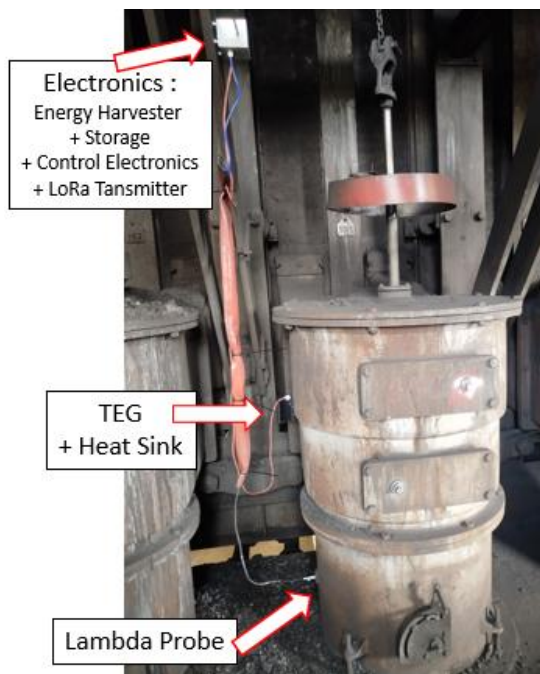


Fig. 1. Sur la BAF instrumentée: dissipateur/thermogénérateur + capteur, en hauteur : stockage/communication/gestion énergie

Dans un environnement industriel étendue, complexe, une solution de mesure avec transmission sans fil est bien adaptée. Pour cela, un réseau LoRa interne performant a été mis en place sur le site et est opérationnel.

Il reste à solutionner le problème de la fourniture d'énergie au nœud de capteur communicant. L'expérience a montré qu'une simple batterie ne convenait pas à long terme dans ce contexte industriel : température ambiante proche parfois de 60°C, capteur énergivore (sonde Lambda, 400J/cycle de mesure avec une préchauffe longue 12V, 1,5A, 20s), et une cadence de mesure souhaitée inférieure à 15mn. Pour ce type

d'application, les supercapacités constituent une alternative intéressante aux batteries. L'existence d'une source chaude permanente (cf Fig. 2 partie gauche) car les fours de la cokerie ne s'arrêtent jamais et donc d'un gradient thermique permanent, entre 50°C et 150°C, permet d'utiliser un thermogénérateur (TEG *ThermoElectroGenerator*) qui fournira la puissance électrique nécessaire [1] pour recharger les supercapacités.

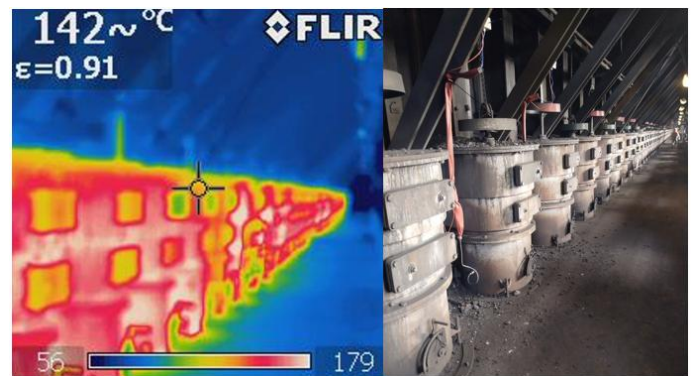


Fig. 2. Image thermique et dans le visible d'une batterie de BAF.

Une électronique de contrôle pilote les différentes phases (réveil de la partie capteur, préchauffe de la sonde, mesure, transmission LoRa et retour en mode de veille) en fonction du niveau d'énergie disponible dans les supercapacités (déclenchement du cycle dès que V_{SC} atteint 4,8V). La cadence ΔD des mesures sera variable et dépendante de la valeur de puissance récupérée, ce qui est acceptable pour cette application de surveillance de procédé tant que $\Delta D < 15$ min.

La partie 2 présentera un état de l'art sur la thermogénération pour l'alimentation de capteurs sans fils. La partie 3 détaillera la solution technique retenue. La partie 4 montrera quelques résultats expérimentaux et mettra en avant quelques points techniques à respecter. Les perspectives futures seront abordées dans la dernière partie.

2. ETAT DE L'ART

Lorsque les deux faces d'un module Peltier (Fig. 3) ne sont pas à la même température (présence d'un gradient thermique), une partie de la puissance thermique passant à travers le module du côté chaud vers le côté froid est transformée en électricité (effet Seebeck). La difficulté principale est d'obtenir un gradient thermique entre des surfaces proches (typiquement quelques millimètres) et de le maintenir dans le temps (éviter la thermalisation). La modélisation d'un module reste assez simple pour un modèle valable en 1^{ère} approximation [2][3].

La thermogénération a suscité un grand intérêt pour récupérer en électricité une partie de l'énergie thermique dissipée et perdue dans les moteurs thermiques [4] mais la transition vers l'automobile électrique a coupé cet élan. La

recupération des chaleurs fatales est aussi un champ d'utilisation des TEG, on trouve ainsi des systèmes capables de générer plusieurs kW électriques [5] bien que les rendements énergétiques de ces dispositifs restent faible (quelques %)

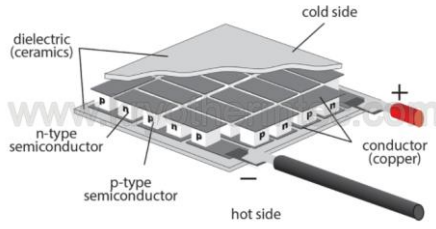


Fig. 3. Ecorché d'un module Peltier [6]

On trouve dans le commerce et dans la littérature des thermogénérateurs associés à des fours de cuisine ou des poêles [7] pour fournir un peu d'électricité dans des zones non reliées au réseau électrique. Pour les randonneurs, il existe aussi quelques produits (type BioLite-CampStove). On notera sur les notices des produits de ce type la mise en garde de destruction des TEG si la température chaude dépasse une limite donnée, ce qui peut advenir si le côté « froid » n'est plus maintenu à une température acceptable (absence d'eau dans une casserole par exemple) ou si la ventilation forcée s'arrête [8]). Les températures maximales admissibles sont voisines de 300°C (Everredronics, Marlow, Teconversion, EspressoMilkCooler, Thermonamic, ...) et peuvent atteindre 600 à 800°C (TecTeg) mais des TEG low cost tiennent à peine les 100°C. Il convient donc de bien le choisir en fonction du gisement potentiel.

Quelques papiers montrent aussi la possibilité d'utiliser aussi la thermogénération pour fournir l'énergie nécessaire à l'alimentation de capteurs sans fil dans des contextes particuliers comme l'utilisation de la chaleur des eaux usées [9]. Enfin des applications avec de très faibles gradients thermiques (contact être humain) et une électronique adaptée (ultra low power) sont proposées dans la littérature [10]. L'alimentation électrique d'engin spatiaux est aussi un domaine de prédilection des Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG) comme pour le Rover Curiosity.

S'il est facile de trouver des solutions commerciales sur étagères pour les alimentations autonomes basées sur l'énergie photovoltaïque, c'est beaucoup plus rare pour les solutions utilisant l'électrothermogénération ([11]). Une phase de bureau d'étude pour trouver le système adapté est malheureusement souvent nécessaire. Le travail présenté ici pourrait aider les utilisateurs à développer plus rapidement leurs propres applications.

Pour des applications type IoT, des circuits électroniques dédiés existent (LT3109, BQ25570, SPV1040). De tels circuits optimisent la récupération d'énergie, gèrent le stockage et fournissent une tension régulée en sortie.

Sur le plan du stockage de l'énergie, les températures potentiellement élevées (jusqu'à 80°C) sont défavorables à l'utilisation d'accumulateurs rechargeables classiques (à l'exception de quelques produits Lithium de chez Saft par exemple [12]. Notre choix s'est donc porté vers des supercapacités Maxwell [13]) qui supportent les températures élevées et ont peu d'autodécharge.

3. MODELISATION

L'assemblage du générateur thermique et du dissipateur de

chaleur est illustré à la Fig. 4. Le TEG est caractérisé électriquement par son coefficient Seebeck α (V/°C) et sa résistance électrique R (Ω). La modélisation électrique standard donne la relation électrique suivante :

$$V_{TEG} = \alpha \cdot \Delta T_{TEG} - R \cdot I_{TEG} \quad \text{Eq.1}$$

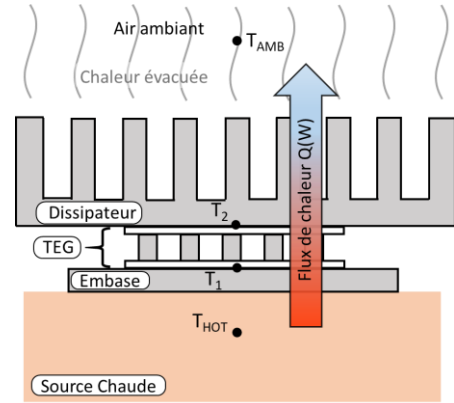


Fig. 4. Modélisation de l'ensemble TEG + dissipateur thermique

Sur le plan thermique, l'assemblage est modélisé à l'aide du modèle simple illustré à la Fig. 5, en utilisant une analogie électrique où le flux thermique Q (W), la température T (°C) et la résistance thermique R_{th} (°C/W) ont pour analogues respectifs le courant électrique I (A), le potentiel V (V) et la résistance électrique R (Ω).

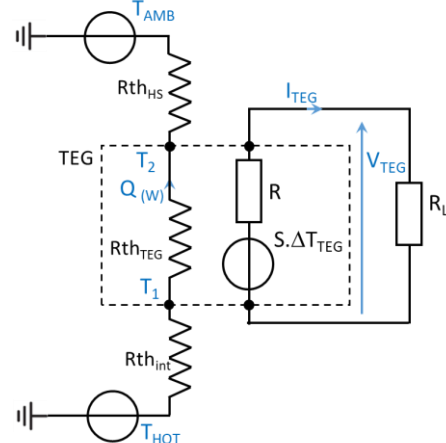


Fig. 5. Modélisation électrique et thermique par analogie électrique du système (selon [14])

Le TEG et le dissipateur thermique sont modélisés par leurs résistances thermiques respectives R_{th_TEG} et R_{th_HS} (HS pour Heat Sink). R_{th_int} modélise le contact entre la plaque de base du TEG et le dissipateur thermique. La faible résistance thermique de la base en aluminium placée entre la source chaude et le TEG a été omise (environ 0,04°C/W), de même que celle de l'interface TEG/dissipateur.

Q (W) est le flux thermique moyen à travers le TEG, T_{HOT} , T_2 and T_{AMB} (°C) sont les températures respectives de la source chaude, de l'interface TEG/dissipateur et de l'air ambiant. Le modèle proposé permet d'obtenir

$$\Delta T = T_{HOT} - T_{AMB} = (R_{th_TEG} + R_{th_HS} + R_{th_int}) \cdot Q \quad \text{Eq.2}$$

et:

$$\Delta T_{TEG} = T_1 - T_2 = R_{th_{TEG}} \cdot Q \quad \text{Eq.3}$$

ce qui nous permet d'exprimer le gradient à travers le TEG, ΔT_{TEG} comme suit :

$$\Delta T_{TEG} = \frac{R_{th_{TEG}}}{R_{th_{TEG}} + R_{th_{HS}} + R_{th_{int}}} \cdot \Delta T = \beta \cdot \Delta T \quad \text{Eq.4}$$

avec :

$$\beta = \frac{R_{th_{TEG}}}{R_{th_{TEG}} + R_{th_{HS}} + R_{th_{int}}} < 1 \quad \text{Eq.5}$$

Ce modèle suppose que les paramètres du modèle sont constants, une hypothèse valable si les températures varient peu. Il ne prend pas en compte les aspects dynamiques (*on suppose un régime permanent*) ni les phénomènes plus complexes liés à la convection avec l'air ambiant. Néanmoins, il permet d'estimer la puissance électrique récupérable en fonction du TEG et du dissipateur thermique choisi.

En pratique, les incertitudes liées aux échanges de chaleur avec le milieu ambiant (air ventilé ou non, variations de la température du point chaud, de la température de l'air ambiant, etc.) sont importantes. Il n'est donc pas utile de disposer d'un modèle plus détaillé.

La tension en circuit ouvert V_{OC} aux bornes du TEG est définie par la relation suivante :

$$V_{OC} = \alpha \cdot \Delta T_{TEG} \quad \text{Eq.6}$$

L'expression de la puissance électrique fournie par le TEG en fonction de la tension du TEG est une parabole (Fig. 6) dont l'équation est la suivante :

$$P_{TEG} = \frac{1}{R} (V_{OC} - V_{TEG}) \cdot V_{TEG} \quad \text{Eq.7}$$

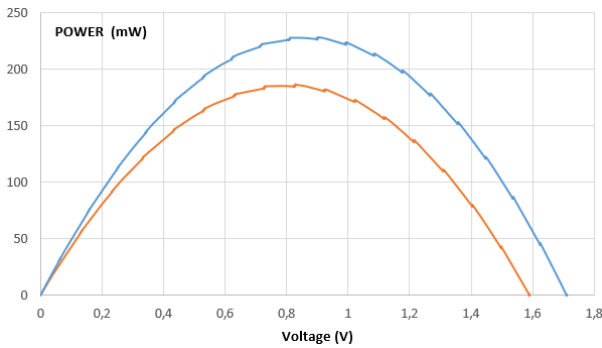


Fig. 6. Caractéristiques expérimentales réalisées au laboratoire, 5 minutes (courbe bleue) ou 2 heures (courbe orange) après avoir fixé le système sur une plaque chauffante. $T_{AMB} = 25^\circ\text{C}$, $T_{HOT} = 80^\circ\text{C}$

Si le TEG circule sur une impédance équivalente adaptée R_L ($R_L = R$), la puissance électrique est maximale et égale à :

$$P_{MAX} = \frac{V_{OC}^2}{4.R} = \frac{(\alpha \cdot \Delta T_{TEG})^2}{4.R} \quad \text{Eq.8}$$

Le circuit intégré connecté au TEG effectuera l'adaptation de l'impédance électrique, réglant V_{TEG} voisine de $V_{OC}/2$. Dans

ce cas, maximiser la puissance électrique signifie maximiser V_{OC} et donc ΔT_{TEG} . Pour ce faire, la résistance thermique du dissipateur de chaleur et la résistance de contact entre la plaque de base et la source chaude doivent être aussi faibles que possible (β aussi proche que possible de 1).

4. SIMULATION

L'objectif des simulations COMSOL effectuées est d'estimer le gradient thermique effectif à travers le TEG ΔT_{TEG} en fonction du gradient thermique global ΔT entre la paroi chaude et l'air ambiant. ΔT_{TEG} peut alors être utilisé pour prédire la puissance électrique récupérable.

Dans un premier temps, des mesures de températures sur l'ensemble TEG + dissipateur thermique (TEG/HS) ont été menées sur site et au laboratoire avec des résultats sensiblement différents.

Note : Les essais sur sites sont indispensables car il est pratiquement impossible (à un coût raisonnable) de recréer un environnement similaire aux conditions expérimentales sur site (géométrie complexe, aérations latérales, zones chaudes au sol, latéralement, ...)

Note : les essais au laboratoire restent indispensables car ils permettent de valider le bon fonctionnement du dispositif et de recréer des conditions similaires, ce qui est intéressant pour tester différents circuit d'extraction de la puissance électrique du TEG par exemple.

Ces essais sur site ont permis d'ajuster les paramètres des modèles du TEG et des contacts pour retrouver les valeurs expérimentales initiales réalisées sur site. La simulation permet alors de tester les performances d'autres géométrie du dissipateur.

La simulation présentée (Fig. 7) est paramétrée en supposant la convection naturelle autour de l'ensemble TEG + dissipateur thermique (TEG/ dissipateur) avec une température de l'air ambiant de 50°C et une paroi à 170°C .

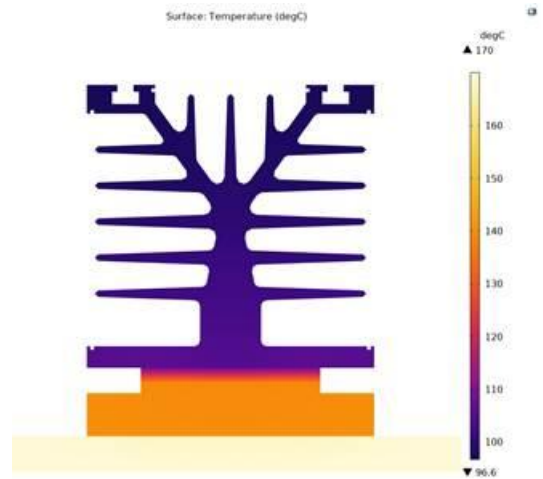


Fig. 7. Simulation Comsol avec $T_{HOT} = 170^\circ\text{C}$, $T_{AMB} = 50^\circ\text{C}$

Pour que la simulation soit en bonne correspondance avec les températures mesurées lors des premiers essais menés sur site, il a fallu insérer dans le modèle une résistance thermique de contact entre la paroi chaude et la base en aluminium de l'ensemble TEG/ dissipateur. Cela a permis de retrouver le saut de température significatif d'environ 15°C mesuré à l'interface.

Ceci montre qu'un soin particulier doit être apporté à ce contact pour maximiser ΔT_{TEG} .

Note : Pratiquement, cela impose de venir passer à la toile émeri la zone de contact visée sur la BAF, pour enlever la rouille éventuelle et assurer la planéité du support avant de dépoussiérer correctement la zone. Ne pas oublier les gants épais pour travailler sur cette zone très chaude! Une fine couche de graisse thermique est ensuite étalée avec un support type carte de crédit sur la base du TEG/ dissipateur (Fig. 9-a) qui est encore à température ambiante. Le TEG/ dissipateur est alors placé en posant un bord puis toute la face, mais en la retenant pour éviter un choc brutal compte tenu de l'attraction des aimants. Un peu de rotation assure enfin une répartition homogène de la graisse thermique, qui va durcir par la suite.

Plus simplement, le modèle électrothermique équivalent en régime permanent fournit également une estimation fiable du gradient réel à travers le TEG pour une différence de température donnée entre la paroi chaude et l'air ambiant. Les valeurs typiques pour un contact soigné donnent β entre 0,3 et 0,4 ; 0,4 dans notre cas.

$$\Delta T_{TEG} \approx 0,4 . \Delta T \quad \text{Eq.9}$$

5. SOLUTION TECHNIQUE

5.1. TEG/Dissipateur

Le thermogénérateur utilisé est un produit 5x5 cm² de TEConversion qui supporte 340°C en permanence sur sa face chaude , le coefficient de Seebeck $\alpha = 0.0721\text{V}/^\circ\text{C}$, la résistance électrique R est entre 3 et 5 Ω . Compte tenu de l'environnement extrêmement poussiéreux, il est indispensable de choisir un TEG avec une encapsulation latérale. Le TEG est associé avec un dissipateur ayant la résistance thermique la plus petite possible (1K/W). Ce dissipateur de 600g vient malheureusement alourdir l'ensemble et augmenter son volume (Fig. 8 et Fig. 9-a). Il est cependant nécessaire pour dissiper la chaleur qui traverse le TEG et maintenir ainsi un gradient convenable.

L'ensemble TEG/dissipateur a une masse de 1kg, pour un volume proche de 0,8 litre (10cmx10cmx8cm)

La base en aluminium comporte 6 trous non traversants. Des aimants (*SmCo*, T_{max} 250°C) sont positionnés dans ces trous et calés contre la partie non évidée. Les différentes parties sont assemblées à l'aide de vis serrées à un couple constant (4Nm). Des isolateurs de vis en nylon (T_{max} 160°C) évitent les ponts thermiques entre les vis et le dissipateur. Une fine couche de graisse thermique est interposée entre toutes les pièces en contact, à l'exception du TEG qui est recouvert d'une couche de graphite.

Un câble en silicone à deux fils a été utilisé pour relier le bloc incluant le TEG et le bloc assurant le stockage et la gestion de l'énergie. Ce câble résiste à des températures allant de -60 à +80°C. Un domino en porcelaine fixé au dissipateur thermique assure les connexions entre le TEG et le câble vers l'électronique (Fig. 9 b).

Note : Suite à deux défaillances inattendues de TEG au bout d'une journée sur site, le constructeur nous a précisé qu'une fois mis en place, le TEG ne doit pas être désassemblé, or les deux TEG défaillants avaient été utilisés pour des tests préalables au laboratoire.

Note : l'ensemble dissipateur / thermogénérateur sera placé de tel façon que le domino soit protégé des dépôts de

poussières, ce qui évite un risque de mise en court-circuit.

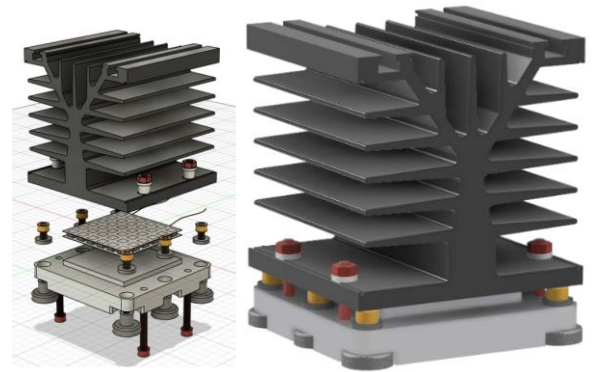


Fig. 8. ensemble dissipateur / thermogénérateur.
(a) vue éclatée (b) vue après montage.

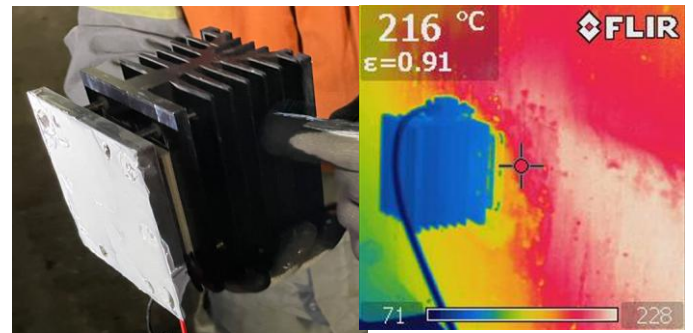


Fig. 9. ensemble dissipateur / thermogénérateur
(a) embase avec graisse thermique (b) vue dans l'infrarouge.

5.2. Electronique

La structure de l'alimentation est illustrée à la Fig. 10. L'ensemble électronique avec son boîtier a une masse de 300g (dont 100g de supercondensités). La **récupération d'énergie** est assurée par un circuit intégré SPV1040. Il accepte une tension V_{TEG} comprise entre 0,3 et 5,5V. Il incorpore une fonction de recherche de puissance maximale (*type P&O*). Pour protéger le circuit, la PWM à 100kHz se bloque si le courant de pic atteint 1,8A ou si la température atteint 155°C. Ce circuit est également protégé contre les inversions de polarité.

Le **stockage** est assuré par 4 supercondensateurs Maxwell (visible sur la Fig. 11) de 100F, 2.6V chacun, montés en 2S2P sans équilibrage. Ils fournissent les 400J nécessaires pour effectuer un cycle de mesure complet.

Alimenté par les supercondensateurs, un **élevateur DC/DC**, construit autour d'un contrôleur PWM LTC1619, fournit les 12V nécessaires à la charge. La charge se compose d'une sonde Lambda, d'un modem LoRa et d'une électronique de contrôle (*non détaillée ici*) pour déclencher le cycle de mesure lorsque la tension V_{SC} est suffisante.

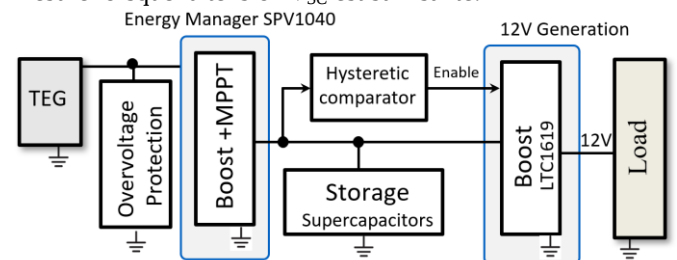


Fig. 10. Structure électronique du dispositif de récupération et stockage de l'énergie.



Fig. 11. Electronique (de bas en haut: modem, Supercapacités, carte électronique)

Note : L'entrée V_{TEG} du SPV1040 supporte 5,5V. En fonctionnement normal, le gradient aux bornes du TEG ne permet pas d'atteindre une telle tension. Toutefois dans deux cas de figures la tension peut dépasser la limite autorisée. C'est le cas à la mise en service (le dissipateur est entièrement à la température ambiante) ou lors d'un dépoussiérage des ailettes du dissipateur avec une bombe de gaz, ce qui entraîne un refroidissement rapide et important du dissipateur. Une protection contre les surtensions a donc été rajoutée (Fig. 12) pour pallier à ces situations avec une diode zener (seuil 4,7V). Elle active un transistor pnp qui vient progressivement court-circuiter l'entrée et limiter ainsi la tension V_{TEG} .

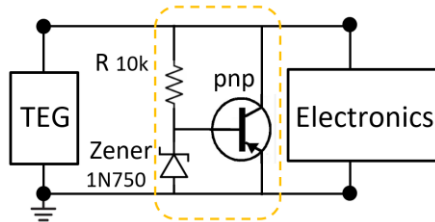


Fig. 12. Protection contre les surtensions en entrée de la partie électronique.

6. RÉSULTATS

La Fig. 13 montre 4 mois de mesures. Deux informations sont données, la cadences des mesures ΔD et le gradient thermique ΔT entre la température T_{HOT} mesurée sur la paroi chaude de la boîte à fumée, près de la plaque de base, et la température T_{AMB} mesurée à 10 cm du dissipateur. ΔD évolue inversement au gradient thermique. Un gradient suffisant (120°C) dans la première partie permet d'assurer une cadence voisine de 10 minutes. A partir du jour 90, la batterie de la cokerie où est installé la boîte à fumée instrumentée a changé de mode de fonctionnement, ce qui se traduit par une diminution notable du gradient et une augmentation de la durée entre deux communications. C'est encore plus visible à partir du jour 127, le gradient est alors voisin de 35°C , avec une batterie juste maintenu en « cocon » avec une température minimale. La recharge est très lente, ce qui induit une cadence voisine de 5h.

La Fig. 14 montre la relation entre l'évolution de V_{SC} et permet de visualiser les cycles de charge/décharge des supercondensateurs. La fin de décharge des supercondensateurs

correspond au moment de l'émission radio des données à la fin de la phase de mesure dans le cycle complet.

L'analyse des courbes de charge des supercondensateurs permet de déterminer la puissance moyenne stockée $\langle P_{SC} \rangle$. Une valeur maximale de 800 mW est atteinte pour un temps de recharge de 11 minutes et un gradient de 120°C . Avec un gradient de 65°C le temps de recharge est proche d'une heure, la puissance stockée reste légèrement supérieure à 140 mW.

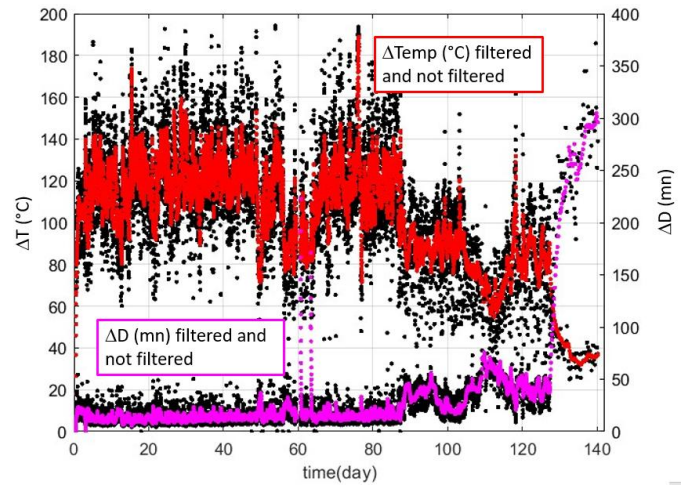


Fig. 13. Mesures à partir du 20/02/2024

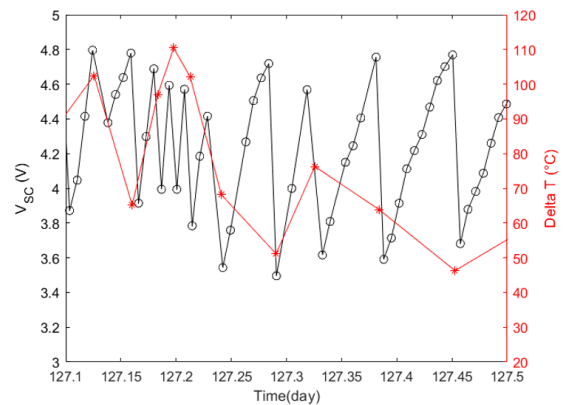


Fig. 14. Evolution de la durée de cyclage quand ΔT diminue.

7. ANALYSE DES RÉSULTATS ET CONCLUSION

Tout d'abord, le système installé est pleinement fonctionnel (les tests durent depuis plus de 6 mois). La présence d'un gradient thermique permanent, bien que variable selon la température ambiante et les phases de fonctionnement des BAFs, est bien adapté pour utiliser l'électrothermogénération. Nous avons validé le bon fonctionnement de l'électronique jusqu'à $+80^\circ\text{C}$ (mesures en laboratoire). La récupération d'énergie électrique est optimale (mode MPPT) si la tension aux bornes du TEG reste supérieure à 1 V, ce qui correspond à un gradient de 35°C . Cette condition est toujours vérifiée lors du fonctionnement normal des cokeries.

Les super-condensateurs dont la résistance a été évaluée à $+80^\circ\text{C}$ fonctionnent bien sans dégradation notables des performances.

La fixation par aimant s'est révélée efficace. L'expérience a montré qu'une fois le système positionné, un déplacement involontaire du TEG (dû à une personne ou à un équipement qui heurte le TEG) augmente considérablement la résistance

thermique du contact entre la semelle et la boîte à fumée, ce qui dégrade grandement les performances. Pour éviter cela, le système TEG a été positionné sur le côté de la BAF plutôt que sur l'avant. Cette modification améliore considérablement les performances, car la température de contact de la BAF est plus élevée dans cette zone ($>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans certains cas). Le gradient thermique est donc supérieur à celui avec le positionnement sur le panneau avant. Toutefois, cela induit des périodes avec $T_{\text{HOT}} > 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (au-delà de la température recommandée pour les aimants). Le système est resté fixé (la graisse thermique se durcit avec le temps et agit comme une colle) mais une analyse est en cours pour vérifier que les aimants n'ont pas perdu de la force d'attraction.

En conclusion, le système présenté est opérationnel (durée tests > 6 mois) et offre une densité de puissance maximale de 1W/kg ou 1W/litre . Depuis la première version, des améliorations ont été apportées pour aboutir à une version fiabilisée (circuit intégré de récupération d'énergie plus adapté, thermogénérateurs supportant une température plus haute, protection contre les surtensions,). Quelques points sont encore à améliorer : intégration globale monobloc, amélioration du design du dissipateur. Enfin, il nous reste à analyser l'influence de l'encrassement sur les performances à long terme.

8. REFERENCES

- [1] V. Boitier, L. Segulier et al., «Récupération d'énergie avec un thermogénérateur et stockage sur supercondensateurs pour alimenter un capteur sans fil basse consommation en environnement industriel.», la revue 3EI n°102 oct., 2020
- [2] Boitier, V., Estibals, B. and Segulier, L. (2023) Powering a Low Power Wireless Sensor in a Harsh Industrial Environment: Energy Recovery with a Thermoelectric Generator and Storage on Supercapacitors. *Energy and Power Engineering*, 15, 372-398. <https://doi.org/10.4236/epe.2023.1511022>
- [3] V. Boitier, L. Segulier, et al., La thermoélectricité pour l'alimentation de capteurs sans fil : une application industrielle, Symposium de génie électrique (SGE 2023), 5 - 7 juillet 2023, Lille, France.
- [4] M.A. Zoui, S.Bentouba, J.G. Stocholm and M. Bourouis, « A Review on Thermoelectric Generators: Progress and Applications », *Energies* 2020, 13(14), 3606; <https://doi.org/10.3390/en13143606>
- [5] H. Hachiuma, PowerMems School, Powermems 2017
- [6] <https://kryothermtec.com/thermoelectric-cooler-technology.html>
- [7] D. Champier, « Thermoelectric generators : a review of applications », *Energy Conversion and Management* 140 (2017) 167–181, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070>
- [8] <https://tecteg.com/wp-content/uploads/2020/07/TEG10W-Specification-and-instructions-for-use-Flat-plate.pdf>
- [9] S.Mathis, J.M.Gruber , Energy self-sufficient systems for monitoring sewer networks , 21. ITG/GMA- Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2022", 10.-11. Mai 2022, Nuremberg, Germany 10.48550/arXiv.2204.03748
- [10] H. Park, D. Lee, "Energy harvesting using thermoelectricity for IoT (Internet of Things) and E-skin sensors", *J. Phys.: Energy* 1 (2019) 042001 <https://doi.org/10.1088/2515-7655/ab2f1e>
- [11] <https://moiz-eh.com/>
- [12] <https://saft.com/en/energizing-iot/introducing-our-selector-guide>
- [13] <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/cells/>
- [14] Y Apertet et al, " Internal convection in thermoelectric generator models " 2012 *J. Phys.: Conf. Ser.* 395 012103