

Représentation - Simulation de Générateurs Thermoélectrique au travers de la Représentation Energétique Macroscopique

Ludovic HORREIN^{1,2}, Alain BOUSCAYROL¹, Yuan CHENG², Clément DUMAND²

1. Université de Lille1 Sciences et Technologies / Laboratoire L2EP / Réseau MEGEVH

2. PSA Peugeot Citroën / Département R&D, Science de l'Energie Propulsion Conversion / Réseau MEGEVH

RESUME – La réduction de la consommation énergétique dans tous les domaines (automobile, industrie, habitation...) est une nécessité écologique et économique. Les pertes énergétiques, issues de différents phénomènes (résistance, frottement...) se manifestent dans la quasi-totalité des cas par un dégagement de chaleur. La valorisation de ces chaleurs, si elles sont en quantité suffisante, peut être une solution pour réduire la consommation d'énergie globale du système. Le générateur thermoélectrique est un convertisseur utilisant l'effet Seebeck pour convertir de l'énergie thermique en énergie électrique. L'objectif de cet article est de modéliser et simuler ces modules. La validation sera également présentée. Les modèles seront organisés en fonction du formalisme REM (Représentation Energétique Macroscopique) afin de déduire, ultérieurement, une structure de commande de ces modules et de les coupler aux systèmes déjà organisés avec cet outil de représentation.

MOTS-CLES – Valorisation thermique, Convertisseur thermoélectrique, Effet Seebeck, Représentation, REM.

1. Introduction

Les effets dus aux changements climatiques sont de plus en plus visibles et les efforts déjà réalisés pour réduire leurs conséquences sont à poursuivre et à amplifier. Dans cette optique, la réduction de la consommation d'énergie des systèmes est une étape importante. Cela passe par une conception et une gestion d'énergie optimale des différents systèmes de conversion d'énergie [1][2]. Le milieu automobile n'échappe pas à la règle et bien que le rendement des moteurs thermiques ait pu être amélioré ces dernières années, ils ne seront jamais comparables à leurs équivalents électriques. Cela est lié au fait que, pour fonctionner, ces types de convertisseur ont besoin de produire de grandes quantités de chaleur à partir du carburant et que seule une partie de cette chaleur est transformée en énergie mécanique. L'énergie restante sous forme de chaleur est dissipée dans l'eau de refroidissement ou les gaz d'échappement.

En partant de ce constat, une solution consiste à valoriser cette énergie thermique excédentaire. Pour cela, elle peut être, comme cela est déjà fait, conservée sous forme de chaleur et servir à chauffer l'habitacle ou réguler thermiquement le bloc moteur. Dans le cas de véhicule hybride, la récupération de cette chaleur dans le but de chauffer la batterie peut être envisagée [3]. Néanmoins, dans certaines conditions comme le roulage sur l'autoroute, les puissances thermiques dissipées sont bien plus élevées que les besoins de chauffage de l'habitacle ou du moteur. Une grande quantité d'énergie thermique reste à valoriser. Avec les progrès effectués sur l'étude des matériaux semi-conducteurs, les générateurs thermoélectriques (GTE) commencent à être considérés comme une solution intéressante [4].

Les outils de représentation sont utiles pour organiser les modèles afin d'en faire ressortir différentes propriétés. Le formalisme de Représentation Energétique Macroscopique (REM) [5], permet l'analyse des différents flux d'énergies d'un système. Il permet aussi l'établissement d'une structure de commande basée sur l'inversion de modèle. L'utilisation de ce formalisme a déjà permis de réaliser de nombreuses études dans différents domaines, y compris dans celui des véhicules automobiles. L'étude d'un véhicule, de la modélisation jusqu'à l'implantation de la commande dans le prototype, a pu être réalisée avec l'appui de ce formalisme [6]. Une extension des modèles du véhicule, au domaine thermique, a également été effectuée avec la REM [7].

L'objectif de cet article est de présenter une organisation originale du modèle d'un générateur thermoélectrique (ou module à effet Seebeck) sous le formalisme REM. Ce travail sera adapté à des modules commerciaux et leurs performances seront comparées aux résultats constructeurs. Dans un premier temps, le principe et le modèle du comportement du module seront présentés. A partir de ce modèle, une représentation sous le formalisme REM en sera déduite. Les résultats seront alors comparés aux données constructeurs pour évaluer la justesse du modèle utilisé.

2. Modélisation du générateur thermoélectrique

D'après l'effet Seebeck (1824), une jonction PN soumise à une différence de température provoquera l'apparition d'un champ électrique. A l'inverse, l'effet Peltier (1834) énonce que la circulation d'un courant dans une jonction provoque un transfert de chaleur [8]. En fonction des propriétés des matériaux utilisés de chaque côté de la jonction, le sens de transfert de la chaleur peut être contrôlé.

Un module thermoélectrique est une succession de jonctions PN utilisée dans le but de fournir une puissance électrique significative ou de permettre un transfert significatif de chaleur. Dans cet article, seul le mode de fonctionnement "génération électrique" est considéré. La Figure 1 représente les sens de transfert de puissance dans la jonction.

La tension générée par effet Seebeck est liée à la différence de température de chaque côté du module [9].

$$U_{see} = \alpha_{pn}(T_c - T_f) \quad (1)$$

Le paramètre α_{pn} est le pouvoir thermoélectrique (PTE) de l'ensemble de la jonction PN. Si une charge électrique est connectée au module, un courant I_m circulera à travers le module et l'effet Seebeck provoquera un transfert de puissance de la source chaude vers la source froide. La différence entre la puissance prélevée du côté chaud $P_{c\alpha}$ et la puissance fournie à la source froide $P_{f\alpha}$ est égale à la puissance électrique générée P_α .

$$P_{c\alpha} = \alpha_{pn} I_m T_c \quad (2)$$

$$P_{f\alpha} = \alpha_{pn} I_m T_f \quad (3)$$

Il faut garder à l'esprit que les éléments P et N restent des matériaux qui possèdent une certaine résistivité électrique et conductivité thermique dépendant de la nature de ces matériaux.

L'effet Joules transforme la puissance électrique en puissance thermique. On émet l'hypothèse que cette puissance thermique générée par effet Joules est équi-répartie entre la source chaude P_{cj} et froide P_{fj} . Le phénomène de conductance thermique des matériaux provoque un transfert thermique P_λ de la source chaude à la source froide.

Les équations permettant de prendre en compte les effets de résistance électrique et de conductance thermique seront présentées dans la version finale de l'article.

Afin de bien comprendre la répartition de puissance dans le module (Seebeck, Joules et conductance), elles peuvent être placées sur le schéma Figure 2.

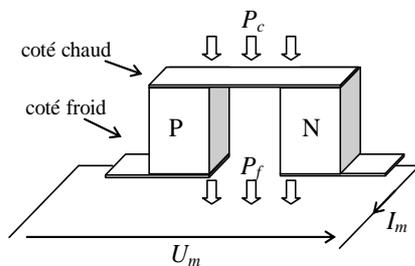
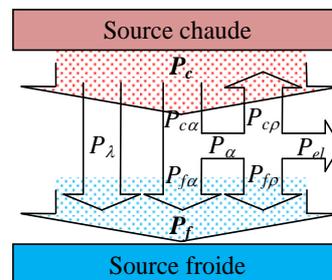


Figure 1 : Schéma d'une jonction



P_c, P_f :	Puissance de la source chaude et froide
P_λ :	Transfert par conductance thermique
$P_{c\alpha}, P_{f\alpha}, P_\alpha$:	Transfert et conversion par effet Seebeck
P_{cp}, P_{fp} :	Conversion par effet Joules
P_{el} :	Puissance électrique utilisable

Figure 2 : Flux d'énergie dans le module

3. Représentation du générateur thermoélectrique

L'organisation des modèles est utile pour limiter les erreurs, les contre-sens physiques ainsi que pour mettre en évidence certaines propriétés. La représentation d'état permet, par exemple, d'étudier la stabilité des systèmes et leurs dynamiques [10]. Le Bond graph sera quant à lui utilisé pour mettre en lumière les échanges énergétiques dans le système [11]. La Représentation Énergétique Macroscopique (REM) est un outil de représentation qui permet d'étudier les échanges énergétiques et de déduire une structure de commande simple par inversion de modèle [5]. Chaque sous-système (ou ensemble de sous-système) est représenté par un (ou plusieurs) pictogramme(s) qui sont connectés ensemble par 2 flèches représentant les variables d'action et de réaction (Table 1). Le produit de ces deux variables correspond à la puissance instantanée échangée entre les éléments connectés. Ainsi les transferts de puissance entre chaque sous-système sont directement visualisables. Ainsi pour représenter la puissance électrique, la tension U [V] et le courant I [A] sont utilisés. La puissance thermique sera, elle, obtenue à partir de la température T [K] et du flux entropique qs [J/(s.K)]. Également, la REM s'accorde à respecter le principe de causalité qui impose que la conséquence soit déterminée à partir de la cause (et non l'inverse).

Le principe et les avantages de la REM seront présentés de façon plus détaillée dans la version finale de l'article.

Comme cela est expliqué dans la partie 2, l'effet Seebeck convertit une partie du transfert de chaleur de la source chaude vers la source froide en énergie électrique.

Le formalisme REM, impose l'utilisation du flux entropique. Le flux entropique généré par l'effet Seebeck qs_α dépend du courant appliqué au module I_m , au même titre que la tension générée U_α dépend de la différence de température ΔT .

$$\Delta T = T_c - T_f \quad (4)$$

$$\begin{cases} U_\alpha = \alpha_{pn} \Delta T \\ qs_\alpha = \alpha_{pn} I_m \end{cases} \quad (5)$$

Avec le formalisme REM, la conversion thermoélectrique (5) se représente par un rond orange dont les sorties sont la tension U_α et le flux entropique qs_α . La répartition des puissances de Seebeck (séparation de la puissance qui sera transformée en électricité avec le transfert de puissance de la source chaude à la source froide) est représentée à l'aide du pictogramme de couplage (double carré orange).

La représentation ne change pas les équations, elle permet juste de les organiser suivant certaines règles. Ainsi la multiplication du flux entropique envoyé à la source froide avec la température de la source froide permet de retrouver l'équation (3). Le même raisonnement entre le flux entropique prélevé à la source chaude et la température de cette source est valable pour retrouver l'équation (2)

La REM de l'exemple ci-dessus concernant l'effet Seebeck est représentée sur la Figure 3.

La mise sous le formalisme REM de l'ensemble du module (incluant les effets Joules et de conductance thermique) sera complétée dans la version finale. Néanmoins, la représentation est donnée en Figure 4

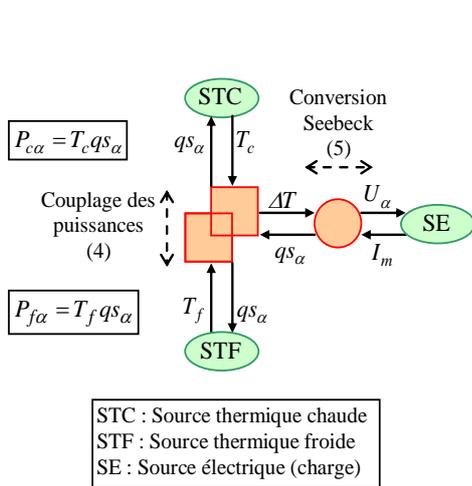


Figure 3 : Représentation Energétique Macroscopique de l'effet Seebeck

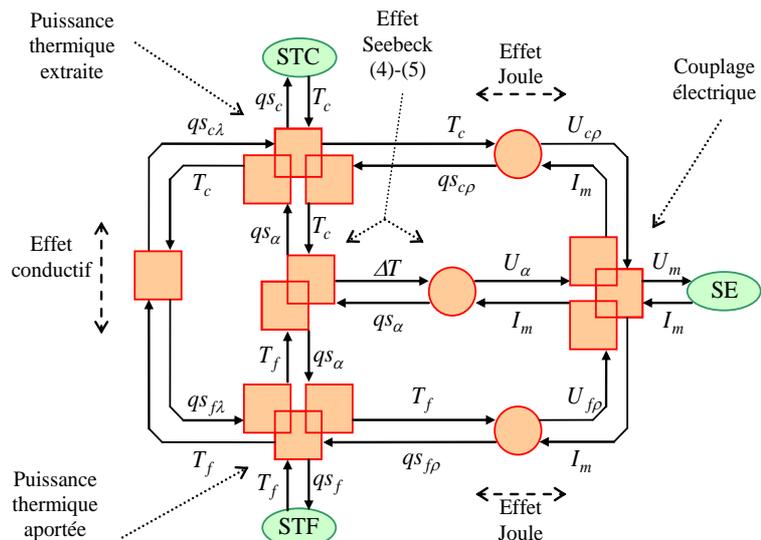


Figure 4 : Représentation du GTE sous le formalisme REM

4. Simulation du générateur thermoélectrique

La représentation du module a été implantée dans le logiciel Matlab Simulink. La simulation a été effectuée pour un module composé de 127 jonctions de matériaux de type BiSn (bismuth pour la jambe P et étain pour la jambe N). La simulation a été effectuée pour différentes valeurs de courant ($0 < I_m < 3$) et différents écarts de température ($50 < \Delta T < 200$). Le rendement et la puissance électrique utile (P_{el}) ont été tracés en fonction du courant et pour les différentes températures (Figure 5). A l'image d'une cellule photovoltaïque, on remarque que les performances du convertisseur thermoélectrique dépendent fortement de la façon dont il est commandé. La courbe noire représente les points de fonctionnement où la puissance (ou le rendement) est maximale pour chaque différence de température. Ainsi nous pouvons voir la nécessité de mettre en place un convertisseur (de type hacheur) commandé à l'aide d'une stratégie de gestion d'énergie (de type MPPT ou MEPT) afin de toujours travailler au plus proche du meilleur point de fonctionnement.

Plus de détails relatifs aux paramètres de la simulation ainsi que la comparaison des résultats de simulation avec les données constructeurs seront exposés dans la version finale

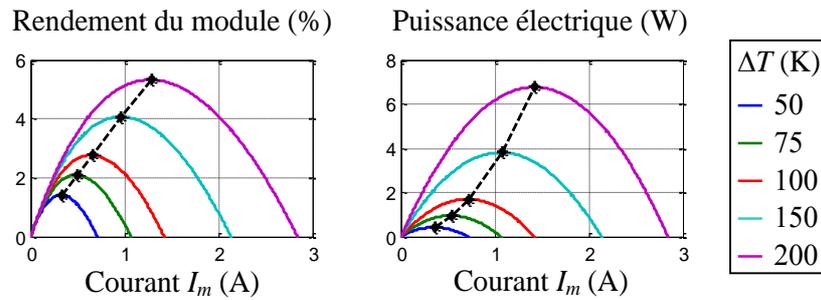


Figure 5 : Rendement et puissance d'un module

5. Conclusion

Après avoir exposé les relations régissant le comportement du module de conversion thermoélectrique, une organisation originale (REM) du modèle a été proposée pour visualiser facilement les flux d'énergie. La pertinence du modèle et de sa représentation associée a pu être vérifiée à l'aide des données issues de fabricant de générateur TE. La sensibilité des performances du GTE vis-à-vis du courant appliqué à celui-ci montre la nécessité de mettre en place des stratégies de type MPPT ou MEPT. Par la suite, cette représentation du GTE pourra être couplée avec les autres représentations de système, déjà développé avec l'aide de la REM, pour étudier la pertinence de la récupération d'énergie thermique.

6. Références (d'autres références seront ajoutées dans la version finale)

- [1] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, A. Emadi, "Modern Electric, Hybrid Electric Vehicles and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and design", *CRC Press*, ISBN 0849331544, 2005
- [2] W. Günselmann, « Technologies for increased energy efficiency in railway systems », *EPE'05*, Dresden (Germany), September, 2005
- [3] C. Alaoui, « Solid-state thermal management for Lithium-Ion EV Batteries », *Vehicular Technology, IEEE transactions on*, vol.62, no. 1, pp. 98 – 107, January 2013
- [4] J.M. Fournier, C. Salvi et J. Stochkolm, « Thermoélectricité : le renouveau grâce aux nanotechnologies », *Technique de l'ingénieur*, Ref. 5100, Avril 2006
- [5] A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, M. Pietrzak-David, « Multimachine Multiconverter System: application for electromechanical drives », *European Physics Journal – Applied Physics*, vol. 10, pp. 131 - 147, May 2000.
- [6] T. Letrouve, « Structuration de la commande de la simulation au prototype d'un véhicule hybride double parallèle au travers de la REM », *Thèse de doctorat*, Université de Lille1 (France), Mars 2013
- [7] L. Horrein, A. Bouscayrol, M. El Fassi, « Thermal energetic model model of an Internal combustion engine for simulation of a thermal vehicle », *VPPC'12*, Seoul (Korea), October 2012
- [8] D. Pollock, « Thermoelectricity: Theory, Thermometry, Tool », *Astm Intl* , ISBN 080310409, Chap. 4, January 1985
- [9] D. Champiera, J. P. Bédécarratsb, T. Kouksoua, M. Rivalettoa, F. Strubc, P. Pignolet, « Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove », *Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1518 – 1526, March 2011
- [10] L. A. Zadeh, C. A. Desoer, "Linear System Theory: The State Space Approach", Dover Publication, ISBN : 9780486466637, 2008
- [11] H. Paynter, "Analysis and design of engineering systems", MIT Press, 1961

Table 1 : Pictogrammes de la REM

	Variables d'action et de réaction		Source d'énergie (ex. batterie)		Accumulateur d'énergie (ex. condensateur)
	Convertisseur monophysique (ex. hacheur)		Convertisseur multiphysique (ex. résistance thermique)		Distribution d'énergie (ex. couplage parallèle)