

Représentation et Simulation de Générateurs Thermoélectriques au travers de la Représentation Energétique Macroscopique

Ludovic HORREIN^{1,2,3}, Alain BOUSCAYROL^{1,3}, Yuan CHENG^{2,3}, Clément DUMAND²

1. Université de Lille1 Sciences et Technologies / Laboratoire L2EP

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

3 Réseau MEGEVH (French network on HEV's)

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

Mots-clés— Valorisation thermique, Convertisseur thermoélectrique, Effet Seebeck, Représentation, REM.

1. INTRODUCTION

La réduction des émissions de gaz à effet de serre doit se poursuivre et s'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. En effet, pour fonctionner, les moteurs à combustion produisent de grandes quantités de chaleur et seule une partie de cette chaleur est transformée en énergie mécanique. L'énergie restante sous forme de chaleur est évacuée dans l'eau de refroidissement et les gaz d'échappement.

Une solution, pour augmenter le rendement d'un système, 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 les batteries peut aussi être envisagée [3]. Néanmoins, dans

certaines conditions comme le roulage sur 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 basés sur l'effet Seebeck sont considérés comme une solution intéressante [4] [5].

Les outils de représentation (ex. bond graph, espaces d'état...) sont utiles pour organiser les modèles afin d'en faire ressortir différentes propriétés (propriété dynamique, énergétique...). Le formalisme de Représentation Energétique Macroscopique (REM) [6], 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, initialement dédié aux systèmes électromécaniques a déjà permis de réaliser de nombreuses études dans différents domaines, y compris dans celui des véhicules automobiles. Ainsi, 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 sur plusieurs systèmes différents [7] [8]. Plus récemment, le formalisme REM a été étendu au domaine thermique (ex. pile à combustible [9]). Une extension thermique des modèles du véhicule à l'aide de la REM a été effectuée pour intégrer les échanges thermiques [10] [11].

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. Les paramètres de ce modèle seront adaptés à des modules commerciaux et leurs performances seront comparées aux résultats issus de données de fabricants.

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. La simulation sera effectuée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Les résultats seront alors comparés à données issues de fabricants pour évaluer la justesse du modèle utilisé.

Pour une meilleure compréhension de cet article, une nomenclature des variables est présente en annexe.

2. MODELISATION DU GENERATEUR THERMOELECTRIQUE

D'après l'effet Seebeck (1824), une jonction PN soumise à une différence de température provoque l'apparition d'un champ électrique. A l'inverse, l'effet Peltier (1834) énonce que la circulation d'un courant dans une jonction impose la circulation d'un flux de chaleur [12]. 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 Fig. 1 représente les sens de transfert de puissance dans la jonction.

La tension générée par effet Seebeck U_s est liée au gradient de température entre chaque côté du module [13].

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

Le paramètre α_{pn} est le pouvoir thermoélectrique (PTE) de l'ensemble de la jonction PN. En réaction à la connexion d'une charge électrique, un courant I_m circulera à travers le module. La puissance électrique alors produite P_s sera équivalent au produit courant tension.

$$P_s = \alpha_{pn} I_m (T_c - T_f) \quad (2)$$

Cette puissance électrique équivaut à la différence entre la puissance absorbée à la source chaude P_{cs} et la puissance fournie à la source froide P_{fs} par effet Seebeck.

$$P_{cs} = \alpha_{pn} I_m T_c \quad (3)$$

$$P_{fs} = \alpha_{pn} I_m T_f \quad (4)$$

Les éléments P et N de la jonction sont des matériaux qui possèdent une certaine résistivité électrique et conductivité thermique dépendant de la nature de ces matériaux.

L'effet Joule transforme une partie de la puissance électrique générée en puissance thermique P_j . On prend l'hypothèse que cette puissance thermique générée par effet Joule est équi-répartie entre la source chaude P_{cj} et froide P_{fj} .

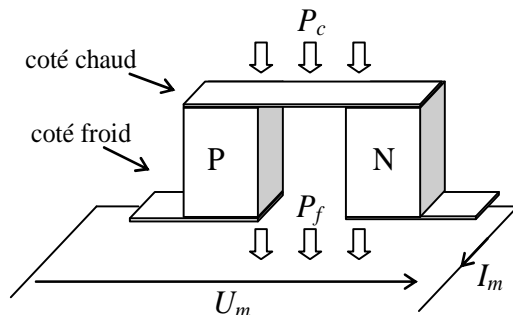


Fig. 1 : Schéma d'une jonction (génération électrique)

$$P_j = R_{pn} I_m^2 \quad \text{avec} \quad R_{pn} = \frac{\rho_p(T)}{S_p} L_p + \frac{\rho_n(T)}{S_n} L_n \quad (5)$$

$$P_{cj} = P_{fj} = \frac{R_{pn} I_m^2}{2} \quad (6)$$

Avec R_{pn} , la résistance électrique de la jambe P et de la jambe N. Cette résistance dépend des paramètres intrinsèques de la jonction (longueur L et section S) ainsi que de la résistivité électrique ρ .

Le phénomène de conductance thermique des matériaux provoque un transfert thermique P_λ de la source chaude à la source froide. Ce transfert de puissance dépend de la différence de température entre les 2 sources ainsi que du paramètre d'échange conductif K_{pn} .

$$P_\lambda = K_{pn}(T_c - T_f) \quad \text{avec} \quad K_{pn} = \lambda_p(T) \frac{S_p}{L_p} + \lambda_n(T) \frac{S_n}{L_n} \quad (7)$$

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

A l'aide de cette figure, la puissance thermique prélevée à la source chaude P_c , fournie à la source froide P_f ainsi que la puissance électrique générée utilisable P_{el} s'écrivent :

$$P_c = P_\lambda + P_{cs} - P_{cj} \quad (8)$$

$$P_f = P_\lambda + P_{fs} + P_{fj} \quad (9)$$

$$P_{el} = P_s - P_{cj} - P_{fj} = P_{cs} - P_{fs} - P_{cj} - P_{fj} \quad (10)$$

$P_c P_f$:	Puissance de la source chaude et froide
P_λ :	Transfert par conductance thermique
$P_{cs} P_{fs} P_s$:	Transfert et conversion par effet Seebeck
$P_{cj} P_{fj}$:	Conversion par effet Joules
P_{el} :	Puissance électrique utilisable

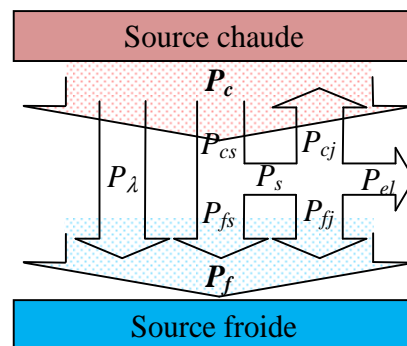


Fig. 2 : Flux d'énergie dans le module

3. REPRESENTATION DU GENERATEUR THERMOELECTRIQUE

3.1. Généralité sur la REM

L'organisation des modèles est utile pour améliorer l'interprétation, limiter 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 [14]. Le Bond graph sera utilisé pour la conception de système afin mettre en lumière les échanges énergétiques [15]. La REM (Représentation Energétique Macroscopique) est un outil de représentation qui permet d'étudier les échanges énergétiques et de déduire une structure de commande simple par inversion de modèle [6].

Avec la REM, chaque sous-système (ou ensemble de sous-systèmes) est représenté par un (ou plusieurs) pictogramme(s) selon la fonction énergétique qu'il réalise (Tableau 2, Annexe). Ainsi, une conversion d'énergie sera représentée par un carré orange si elle est de nature mono-physique ou par un rond orange si elle est multi-physique. Une distribution d'énergie sera quant à elle représentée par plusieurs carrés oranges imbriqués. Les phénomènes d'accumulation d'énergie (décrit par des relations différentielles) sont représentés par un rectangle orange barré. Pour finir les éléments sources, définissant les limites de l'étude, sont représentés par un ovale vert.

Les pictogrammes sont connectés entre eux par 2 flèches représentant les variables d'action et de réaction (Tableau 3 (Annexes)). 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.

La REM s'accorde également à respecter le principe de causalité qui impose que la conséquence soit déterminée à partir de la cause (et non l'inverse) [17]. Par exemple, un condensateur voit sa tension varier en fonction des charges électriques qui y sont stockées (et donc du courant qui le traverse). Ainsi, la tension est la conséquence du courant. C'est pourquoi l'équation du condensateur (11) doit être écrite sous forme intégrale (12) pour que la tension soit déterminée à partir du courant (et non pas que le courant soit déterminé en fonction de la tension). Dans le cas du condensateur, la sortie du pictogramme (rectangle orange barré) correspondra à la tension aux bornes de celui-ci. Le courant sera alors son entrée (Fig. 3).

$$I_{cond} = C \frac{d}{dt} U_{cond} + \frac{U}{R_{cond}} \quad (11)$$

$$U_{cond} = \frac{1}{C} \int_0^t (I_{cond} - \frac{U}{R_{cond}}) dt \quad (12)$$

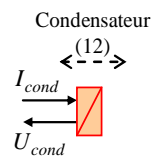


Fig. 3 : Représentation énergétique macroscopique d'un condensateur

3.2. REM des sources thermique

Sous le formalisme REM, les sources chaudes et froides sont représentées par un ovale vert (Fig. 4) puisqu'il s'agit des limites de l'étude. Différents modèles (statique, dynamique...) peuvent être utilisés à l'intérieur de ces pictogrammes en fonction des objectifs de l'étude. Un modèle statique simple consiste à supposer que la température de la source (chaude T_c ou froide T_f) est constante quel que soit le flux entropique (donc la puissance thermique) prélevé (source infinie). Afin de visualiser la variation de température en fonction de la puissance thermique extraite, un modèle dynamique est nécessaire (source imparfaite, non infinie). Si l'on considère que les sources sont thermiquement isolées avec l'air ambiant et qu'elles n'échangent de la chaleur qu'avec le module thermoélectrique, un modèle utilisant une capacité thermique est suffisant.

$$P_c = m_c C p_c \frac{d}{dt} T_c \quad (13)$$

Avec m_c et $C p_c$ étant la masse et la capacité calorifique de la source chaude.

L'utilisation de la REM impose l'utilisation de 2 variables dont le produit exprime la puissance. Ainsi, l'équation (13) est réécrite afin de faire apparaître le flux entropique prélevé à la source chaude q_{s_c} :

$$T_c q_{s_c} = m_c C p_c \frac{d}{dt} T_c \quad (14)$$

Enfin, pour respecter la notion de causalité, cette relation doit être reformulée afin d'exprimer la température en fonction de la variation de flux d'entropie (et donc de puissance thermique).

$$T_c = \exp\left(\frac{1}{m_c C p_c} \int_0^t q_{s_c} dt\right) + T_{c_init} \quad (15)$$

La même démarche peut être effectuée concernant la source froide.

$$T_f = \exp\left(\frac{1}{m_f C p_f} \int_0^t q_{s_f} dt\right) + T_{f_init} \quad (16)$$

Puisque la température est la conséquence de la variation d'entropie et parce que la REM s'accorde à respecter la causalité physique du système, nous pouvons constater que la variable de sortie des sources est la température (T_c , T_f). Ces deux variables de sortie seront donc imposées comme des entrées aux éléments qui seront connectés aux sources.

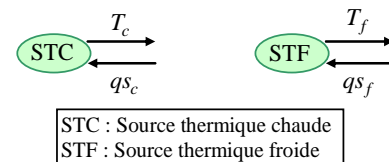


Fig. 4 : REM des éléments sources

3.3. REM de la conductivité thermique

Le transfert de puissance thermique P_λ par effet conductif (7) est décrit par un élément de conversion mono-physique (pictogramme carré orange) (Fig. 5).

Les températures des sources chaudes et froides sont imposées comme des entrées de ce pictogramme par la source chaude et froide. L'équation (7) est donc réécrite afin de déterminer les flux d'entropie prélevés à la source chaude $qs_{c\lambda}$ et fournis à la source froide $qs_{f\lambda}$ en fonction des différentes températures.

$$\begin{cases} qs_{c\lambda} = K_{pn} (T_c - T_f) / T_c \\ qs_{f\lambda} = K_{pn} (T_c - T_f) / T_f \end{cases} \quad (17)$$

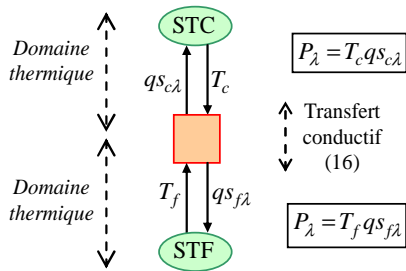


Fig. 5 : REM du transfert conductif de chaleur

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 (7). Le même raisonnement est valable entre le flux entropique prélevé à la source chaude et la température de cette source.

3.4. REM de l'effet Seebeck à vide

Lorsqu'aucune charge n'est connectée au module, le courant I_m est nul et les phénomènes de perte Joule sont nuls.

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

Le formalisme REM impose l'utilisation du flux entropique. Le flux entropique généré par l'effet Seebeck qs_s dépend du courant appliqué au module I_m (à vide $I_m=0$) au même titre que la tension générée U_s dépend de la différence de température ΔT .

$$\Delta T = T_c - T_f \quad (18)$$

$$\begin{cases} U_s = \alpha_{pn} \Delta T \\ qs_s = \alpha_{pn} I_m \end{cases} \quad (19)$$

Avec le formalisme REM, un élément de couplage mono-physique (Fig. 6) (double carré orange) sert à représenter le nœud de puissance entre :

- la puissance thermique prélevée par effet Seebeck à la source chaude P_{cs}
- la puissance thermique fournie par effet Seebeck à la source froide P_{fs}
- la puissance thermique qui sera transformée en électricité par effet Seebeck P_s

Les températures des deux sources sont imposées comme des entrées par ces dernières à l'élément de couplage. Au vu de la relation (18), et dans la mesure où les températures T_c et T_f sont imposées au sous-élément 'couplage des puissances' la variation de température ΔT ne peut être qu'une sortie de ce sous-élément. La variation de température ΔT sera donc une entrée du sous-élément 'Conversion de Seebeck' décrit par un élément de conversion multi-physique (rond orange). Au vu de l'équation (19), la tension U_s générée par effet Seebeck est une sortie de cet élément. C'est pour cette raison que le module de Seebeck est une source de tension et non pas une source de courant.

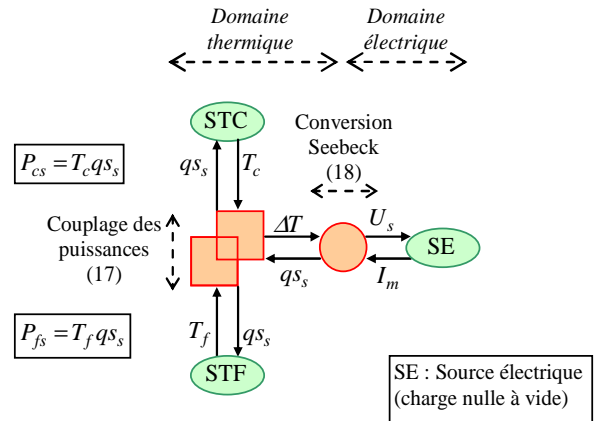


Fig. 6 : REM de l'effet Seebeck

3.5. REM de la prise en compte d'une charge sur l'effet Seebeck

Lorsqu'une charge électrique est connectée, un courant traverse les jambes P et N du module. Par effet Joule, une partie de la puissance électrique produite par effet Seebeck va être retransformée en puissance thermique. Pour rappel, nous considérons que la moitié de la puissance thermique générée sera transférée à la source chaude et que l'autre moitié sera transférée à la source froide. Ce phénomène, dépendant du courant traversant le module I_m , provoque une diminution de la tension produite par effet Seebeck (de U_s à U_m). Ce phénomène peut être décrit à l'aide de 2 conversions multi-physique (transformation de puissance électrique en puissance thermique et distribution du côté chaud) (transformation de puissance électrique en puissance thermique et distribution du côté froid) et d'un élément de couplage afin de séparer les puissances (Fig. 7).

$$\begin{cases} q_{s_{cj}} = \frac{1}{2} \left(\frac{P_j}{T_c} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{R_{pn} I_m^2}{T_c} \right) \\ U_{cj} = \frac{1}{2} \left(\frac{P_j}{I_m} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{R_{pn} I_m^2}{I_m} \right) = \frac{1}{2} R_{pn} I_m \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} q_{s_{fj}} = \frac{1}{2} \left(\frac{P_j}{T_f} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{R_{pn} I_m^2}{T_f} \right) \\ U_{fj} = \frac{1}{2} \left(\frac{P_j}{I_m} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{R_{pn} I_m^2}{I_m} \right) = \frac{1}{2} R_{pn} I_m \end{cases} \quad (21)$$

$$U_m = U_s - U_{cj} - U_{fj} \quad (22)$$

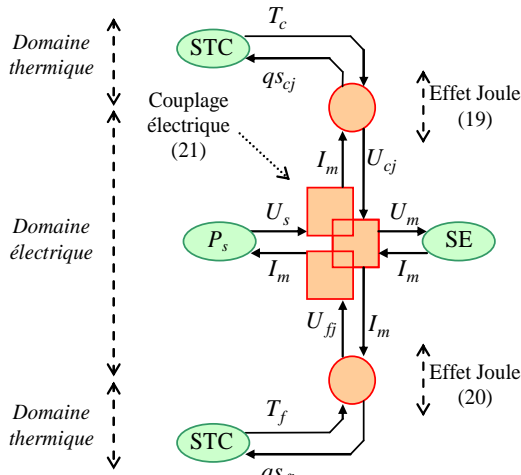


Fig. 7 : REM de l'effet Joule

3.6. REM du générateur thermoélectrique

Les flux entropiques prélevés ou apportés à la source chaude et froide par les trois phénomènes décrits dans cette partie (Seebeck, conduction thermique et Joule) sont sommés pour respecter les relations (8) et (9).

$$q_{s_c} = q_{s_{c\lambda}} + q_{s_{cs}} - q_{s_{cj}} \quad (23)$$

$$q_{s_f} = q_{s_{f\lambda}} + q_{s_{fs}} + q_{s_{fj}} \quad (24)$$

Ces deux équations sont décrites par deux éléments de couplage mono-physique (carrés orange imbriqués).

La REM des 3 sous-systèmes (Seebeck, conduction thermique et Joule) et de leurs couplages est présente ci-après (Fig. 8).

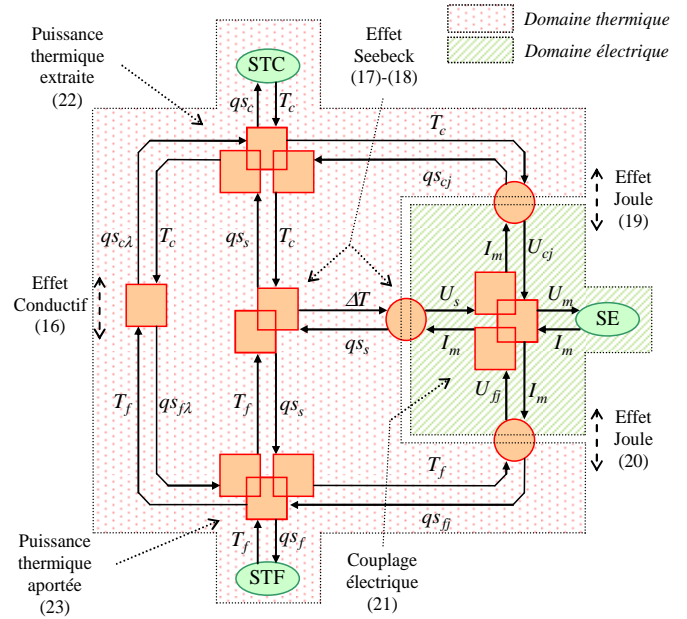


Fig. 8 : Représentation du GTE sous le formalisme REM

4. SIMULATION DU GENERATEUR THERMOELECTRIQUE

4.1. Comparaison des résultats

La représentation du module a été implantée dans le logiciel Matlab Simulink (Fig. 9) à l'aide de la librairie REM développée [18].

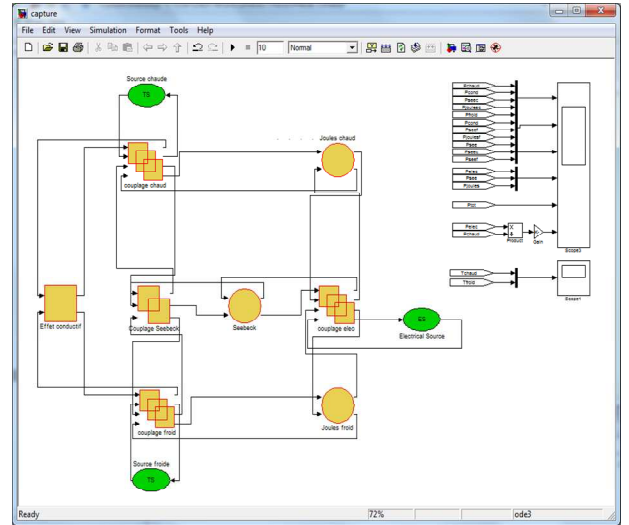


Fig. 9 : Implémentation dans le logiciel Matlab-Simulink

La simulation a été effectuée pour un module composé de plusieurs jonctions de matériaux de type BiTe (bismuth pour la jambe P et tellure pour la jambe N).

Les paramètres α_{pn} , R_{pn} et λ_{pn} ont été déterminés à partir de documents issus du fabricant en fonction de la température T_c et T_f (Fig. 10 Fig. 11) [19]. Parce que le paramètre λ_{pn} , varie peu en fonction de la température, il est supposé constant sur cette plage de température.

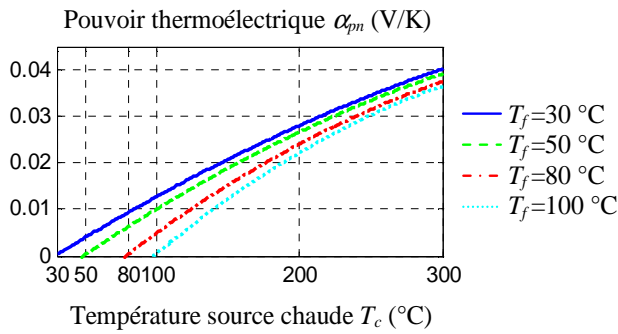


Fig. 10 : Courbes fabricant : Pouvoir thermoélectrique (fcn T_c , T_f)

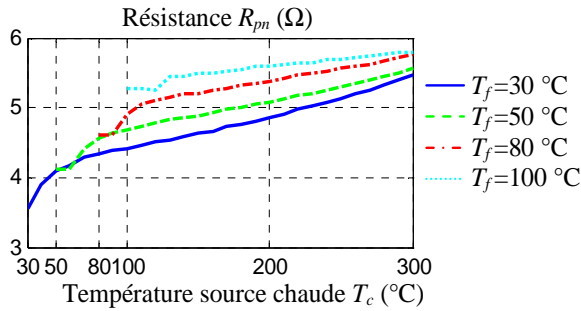


Fig. 11 : Courbes fabricant : Résistance du module (fcn T_c , T_f)

La simulation a été effectuée pour différentes valeurs de courant ($0 \text{ A} < I_m < 2 \text{ A}$) et pour une température de source chaude T_c de 300 °C et de source froide T_f de 30 °C . La tension disponible à la sortie du module U_m ainsi que la puissance électrique utile (en fonction du courant I_m appliqué au module) ont été tracées sur la Fig. 12 et Fig. 13. Ces résultats de simulation (courbes pointillées bleues) ont été comparés aux courbes fournies par le fabricant du module (courbes continues rouges) pour un essai dans les mêmes conditions.

Nous remarquons que les résultats de simulation coïncident avec les données issues du fabricant. Cela permet de valider la modélisation utilisée dans cet article. Nous pouvons aussi constater que la puissance électrique est dépendante du courant qui traverse le module et donc de la façon dont sera commandé ce module. La comparaison (fabricant – simulation) des performances du module pour le point de puissance maximum figure dans le Tableau 1. Ces données nous permettent de conforter la validité du modèle utilisé.

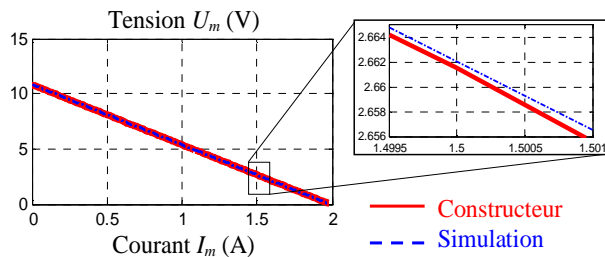


Fig. 12 : Comparaison de la tension disponible U_m fabricant-simulation pour 1 module ($\Delta T=270\text{°C}$)

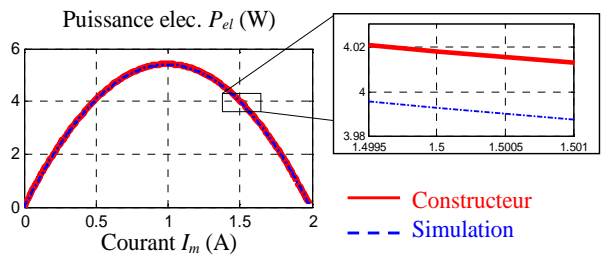


Fig. 13 : Comparaison de la puissance électrique utile P_{el} fabricant-simulation pour 1 module ($\Delta T=270\text{°C}$)

Tableau 1 : Comparaison simulation - données fabricant pour P_{el_max}

	Fabricant	Simulation
Puissance électrique max	5,4 W	5,39 W
Tension U_m (à P_{el_max})	5,4 V	5,42 V
Courant I_m (à P_{el_max})	1 A	0,994 A
Tension à vide ($U_m=U_\alpha$)	10,8 V	10,85 V
Rendement (à P_{el_max})	4,7 %	4,3 %

4.2. Simulations et intérêt d'une commande adaptative

Comme nous venons de le constater, les performances du module de valorisation de l'énergie thermique dépendent du courant appliqué au module. Ces performances dépendent également de la différence de température entre la source chaude et froide (Fig. 14) et également du niveau de température de chacune de ces sources.

Au vu du rendement assez faible des modules de génération thermoélectrique, le fonctionnement à la puissance maximale (ou au rendement maximal) est très important pour récupérer une quantité significative d'énergie. Compte tenu des nombreuses variables dont dépendent les performances du module (la température de la source chaude, de la source froide, le courant traversant le module), ainsi que la difficulté de prévoir les variations des différents paramètres (coefficient de Seebeck, résistance...) dans le temps, une commande qui s'adaptera à toutes ses variations est nécessaire. Ainsi, à l'image d'une cellule photovoltaïque, nous pouvons voir la nécessité de relier ce(s) module(s) à une source de stockage d'énergie via un convertisseur (de type hacheur) commandé à l'aide d'une stratégie de gestion d'énergie (de type MPPT maximum power point tracking) afin de toujours travailler au plus proche du meilleur point de fonctionnement. C'est au cours de cette étape de commande que la REM démontre son plus grand intérêt. En effet, le fait d'avoir organisé les modèles de façons causales permet de déduire une commande fiable basée sur l'inversion de modèle.

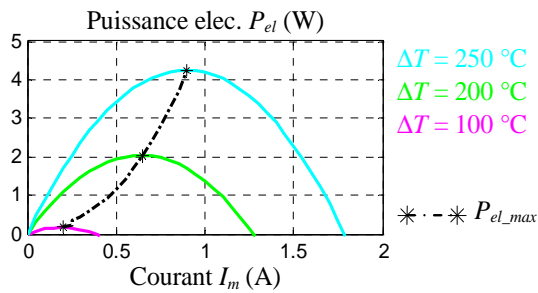


Fig. 14 : Puissance électrique utile d'un module

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 fabricants de générateurs thermoélectriques. La sensibilité des performances du module de conversion vis-à-vis du courant appliqué à celui-ci montre la nécessité de mettre en place des stratégies de gestion d'énergie de type MPPT (maximum power point tracking). Par la suite, cette représentation du générateur thermoélectrique 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. REFERENCES

- [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. Stockholm, « Thermoélectricité : le renouveau grâce aux nanotechnologies », Technique de l'ingénieur, Ref. 5100, Avril 2006
- [5] N. Phillip, O. Maganga, K. J. Burnham, J. Dunn, C. Rouaud, M. A. Ellis, S. Robinson, « Modelling and Simulation of a Thermoelectric Generator for Waste Heat Energy Recovery in Low Carbon Vehicles », Environment Friendly Energies and Applications (EFEA), Newcastle upon Tyne (United Kingdom), June 2012
- [6] 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
- [7] A. L. Allègre, « Méthodologies de modélisation et de gestion de l'énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides », Thèse de doctorat, Université Lille1 (France), Septembre 2010
- [8] 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 Lille1 (France), Mars 2013
- [9] L. Boulon, « Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d'énergie », Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté (France), Université Lille1 (France), Mars 2013
- [10] L. Horrein, A. Bouscayrol, M. El Fassi, « Thermal energetic model of an ICE vehicle using energetic macroscopic representation », EEVC'11, Brussels (Belgium), October 2011
- [11] L. Horrein, A. Bouscayrol, M. El Fassi, « Thermal energetic model of an Internal combustion engine for simulation of a thermal vehicle », VPPC'12, Seoul (Korea), October 2012
- [12] D. Pollock, « Thermoelectricity: Theory, Thermometry, Tool », Astm Intl, ISBN 080310409, Chap. 4, January 1985
- [13] D. Champiera, J. P. Bédécarratsb, T. Kouksoua, M. Rivalettoa, F. Strubc, P. Pignoilet, « Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove », Energy, vol. 36, no. 3, pp. 1518 – 1526, March 2011
- [14] L. A. Zadeh, C. A. Desoer, « Linear System Theory: The State Space Approach », Dover Publication, ISBN : 9780486466637, 2008
- [15] H. Paynter, « Analysis and design of engineering systems », MIT Press, 1961
- [16] B. Ould Bouamama, G. Dauphin-Tanguy, « Modélisation par bond graph. Eléments de base pour l'énergétique », Techniques de l'ingénieur, BE 8280, janvier 2006
- [17] Iwasaki, H. A. Simon, « Causality and model abstraction », *Artificial Intelligence, Elsevier*, vol. 67, pp. 143 – 194
- [18] Site internet de la REM : www.emrwebsite.org
- [19] Site internet du fabricant de modules TE étudiés : www.Thermonanic.com

Annexes

Tableau 2 : Pictogrammes de la REM

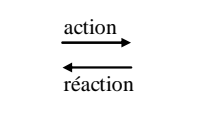
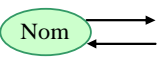
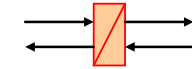
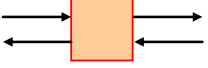
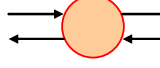
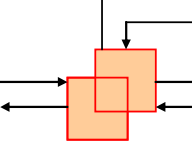
	Variables d'action et de réaction		Source d'énergie (ex. batterie)		Accumulateur d'énergie (ex. condensateur)
	Convertisseur monophasique (ex. hacheur)		Convertisseur multiphasique (ex. résistance thermique)		Distribution d'énergie (ex. couplage parallèle)

Tableau 3 : Variables d'action et de réaction utilisées en REM pour différents domaines physiques [16]

Domaine physique	Variable cinétique	Variable potentielle	Puissance [W]
Electrique	Courant : I [A]	Tension : U [V]	$U.I$
Mécanique (translation)	Vitesse lin. : V [m/s]	Force : F [N]	$F.V$
Mécanique (rotation)	Vitesse ang. : Ω [rad/s]	Couple : Γ [Nm]	$\Gamma.\Omega$
Fluidique / Hydraulique	Débit volumique : qv [m ³ /s]	Pression p [Pa]	$p.qv$
Chimique	Débit massique : qm [kg/s]	Enthalpie massique H [J/kg]	$H.qm$
Thermique	Flux entropique : qs [J/(K.s)]	Température T [K]	$T.qs$

Nomenclature des variables

P : Puissance [W]

U : Tension [V]

I : Courant [A]

T : Température [K]

qs : Flux entropique [W/K]

ΔT : Différence de température [K] ou [°C]

Nomenclature des paramètres

α : Pouvoir thermoélectrique [V/K]

R : Résistance électrique [Ω]

K : Conductivité thermique [W/K]

L : Longueur d'une jambe de la jonction [m]

S : Section d'une jambe de la jonction [m²]

ρ : Résistivité électrique [$\Omega.m/m^2$]

λ : Conductivité thermique [W.m/(K.m²)]

m : masse [kg]

Cp : Capacité calorifique [J/(kg.K)]

C : Capacité électrique [F] utilisée pour l'explication de la REM

Nomenclature des indices

c : relatif à la source chaude

f : relatif à la source froide

p : relatif à la jambe p de la jonction

n : relatif à la jambe n de la jonction

pn : relatif à l'ensemble des 2 jambes de la jonction

λ : relatif au transfert de chaleur par effet conductif

s : relatif au transfert de puissance par effet Seebeck

j : relatif au transfert de puissance par effet Joule

m : relatif à la tension et au courant à l'entrée du module

$cond$: relatif au condensateur utilisé pour l'explication de la REM