

Gestion optimisée du fonctionnement d'une pompe à chaleur thermoélectrique

Benjamin David¹, Julien Ramousse¹, Lingai Luo¹, Mehdi Ait-Ameur²

¹LOCIE- CNRS FRE 3220 Université de Savoie - Polytech'Savoie - 73376 Le Bourget du Lac - France

²ACOME, 52 rue du Montparnasse - 75014 Paris - France

Résumé – Dans le contexte environnemental et énergétique actuel, nous travaillons au développement d'une méthode de dimensionnement et de gestion optimisée d'une pompe à chaleur thermoélectrique. A l'aide d'un modèle analytique, il nous est possible de déterminer précisément les conditions optimales de fonctionnement du système en fonction des contraintes de température et de puissance. Ces résultats permettent de déduire une stratégie de gestion des cellules thermoélectriques par une association thermique en parallèle ou en cascade en fonction du besoin de puissance et de la différence de température entre le coté source et le coté utile.

Nomenclature

P_e	puissance électrique, W	T_c	température de la face froide de la cellule Peltier, K
Q_u	puissance utile pour une CEP, W	T_h	température de la face chaude de la cellule Peltier, K
Q_s	puissance source pour une CEP, W	T_s	température du fluide source, K
Q_u^{tot}	puissance utile total, W	T_u	température du fluide utile, K
Q_h	puissance chaude, W	τ	coefficient Thomson, V.K ⁻¹
Q_c	puissance froide, W	K	conductivité, K.W ⁻¹
R	résistance électrique, Ω	m	débit du fluide sous le plancher, L.h ⁻¹
R_u	résistance thermique globale du système coté utile, K.W ⁻¹	COP_h	coefficient de performance en mode chauffage, -
R_s	résistance thermique globale du système coté source, K.W ⁻¹	COP_c	coefficient de performance en mode froid, -
I	intensité, A		
α	coefficient Seebeck, V.K ⁻¹		

1. Introduction

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique et de crise énergétique, de nombreux gouvernements, associations et organismes de recherche dans le monde s'emploient à réduire notre dépendance aux énergies fossiles. Dans cette perspective, les systèmes de conversion d'énergie jouent un rôle très important. Ce travail vise à développer un système de Pompe A Chaleur ThermoElectricque (PACTE) basé sur l'effet Peltier. Ce type de système présente de nombreux intérêts. Il est silencieux, sans pièce mécanique, n'utilise pas de fluide frigorigène, et est par conséquent relativement fiable. Ce type de système est généralement employé dans des milieux contraignants en termes d'espace, de nuisances sonores, de contraintes mécaniques etc. On le retrouve donc dans des domaines tels que l'électronique, l'aérospatial, la biotechnologie et plus récemment dans l'habitat [1-4]. L'objet de cette étude est de développer une méthode d'optimisation du dimensionnement et de la gestion d'une PACTE quelle que soit l'application. Néanmoins le but final est d'appliquer cette méthode au

chauffage et rafraîchissement des bâtiments à faible consommation énergétique. La PACTE présentée ici est composée d'une cellule à effet Peltier (CEP) prise en sandwich entre deux échangeurs parcourus respectivement par un fluide source et un fluide utile. Il est important de noter que les résultats présentés ici sont également valables pour une PACTE composée de plusieurs CEP entre deux échangeurs. Le fluide utile pompe ou relâche (en fonction du mode de fonctionnement) de la chaleur au fluide source via la CEP.

2. Théorie sur le fonctionnement de la PACTE

Une CEP soumise à un courant I génère 2 flux de chaleur : un flux coté froid Q_c et un flux coté chaud Q_h . La valeur de ces deux flux est obtenue au moyen des relations suivantes (dans le cas du mode chauffage) :

$$Q_h = \alpha IT_h + \frac{1}{2} RI^2 - K(T_h - T_c) - \frac{1}{2} \tau(T_h - T_c) \quad (1)$$

$$Q_c = \alpha IT_c - \frac{1}{2} RI^2 + K(T_h - T_c) + \frac{1}{2} \tau(T_h - T_c) \quad (2)$$

Le troisième terme correspondant à l'effet Thomson ne sera ici pas pris en compte du fait de sa très faible influence sur les performances globales du système en comparaison avec les autres termes.

La puissance électrique fournie à la CEP correspond à la différence entre les deux flux de chaleur $Q_h - Q_c$: $P_e = Q_h - Q_c = RI^2 + I\alpha(T_c - T_h)$ (3)

Finalement la performance d'une CEP est définie par le rapport entre le flux utile et la puissance électrique fournie : $COP_h = \frac{Q_h}{P_e} = \frac{P_e + Q_c}{P_e} = COP_c + 1$ (4)

On remarque que deux coefficients de performance sont définis en fonction du flux utile considéré (mode chauffage ou refroidissement).

3. Le modèle analytique

La méthode d'optimisation est basée sur un modèle analytique. Ce modèle a été développé dans le but de déterminer l'intensité électrique optimale à fournir à la CEP afin d'obtenir le meilleur COP atteignable quelles que soient les contraintes de fonctionnement. Afin de simplifier le modèle et pour s'affranchir de la configuration des échangeurs, nous considérerons une résistance thermique globale représentative des différents transferts ayant lieu depuis la face de la cellule jusqu'au fluide :

$$Q_u = R_u(T_h - T_u) \quad (5)$$

$$Q_s = R_s(T_c - T_s) \quad (6)$$

Les paramètres d'entrée du modèle correspondent aux propriétés physiques des semi-conducteurs pour une cellule commerciale [5] et aux deux résistances thermiques globales précédemment définies. Ces valeurs sont résumées dans le tableau suivant :

Paramètres d'entrées	Valeur
Coefficient Seebeck	0.101 (V/K)
Résistance électrique	1.7352 (Ω)
Résistance thermique des semi-conducteurs	2.6637 (K/W)
Résistance thermique globale coté utile	0.1 (K/W)
Résistance thermique globale coté source	0.1 (K/W)

Tableau 1 : Valeur des différents paramètres d'entrée du modèle

4. Résultats théoriques

4.1 Optimisation

Considérons pour l'exemple le cas où les températures du fluide utile et du fluide source sont les suivantes : $T_u = 300$ K ; $T_s = 285$ K

Le raisonnement suivant est bien évidemment applicable à n'importe quelles températures de fluide. Le but du travail d'optimisation est de déterminer quelle intensité électrique doit être fournie à la CEP afin d'obtenir le meilleur COP possible. En faisant varier l'intensité fournie à la CEP nous pouvons analyser son influence sur le COP, celui-ci étant directement lié au courant électrique appliqué. Comme l'illustre la figure 1 l'évolution du COP en fonction de l'intensité passe par un maximum. Cette valeur maximum du COP détermine donc l'intensité optimale à fournir à la CEP pour les conditions de fonctionnement considérées. Par la suite, on déduit de cette intensité la valeur du flux thermique utile correspondant au flux thermique optimal. La figure 2 illustre l'évolution du COP en fonction de ce flux. L'allure de la courbe est logiquement identique à celle de la figure 1. On constate que ce flux thermique utile est relativement faible (aux alentours de 40W). Par conséquent, une stratégie doit être élaborée afin d'optimiser les performances du système pour de fortes demandes de puissances.

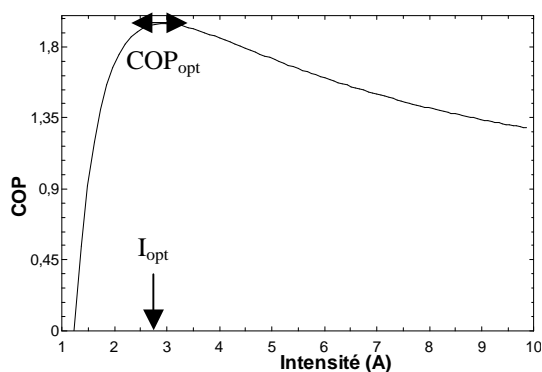


Figure 1 : Evolution du COP en fonction de l'intensité pour $T_u = 300$ K et $T_s = 285$ K.

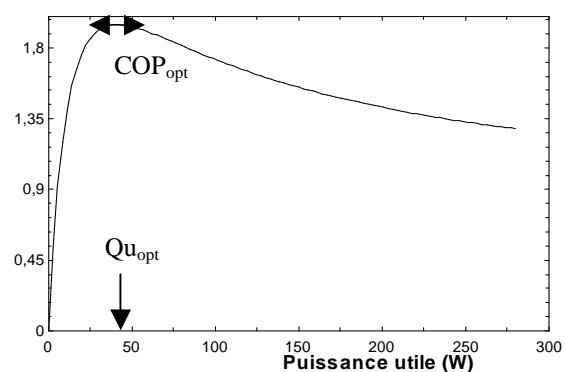


Figure 2 : Evolution du COP en fonction de la puissance utile pour $T_u = 300$ K et $T_s = 285$ K.

La figure 3 illustre de manière généralisée les performances d'une CEP en fonction de la puissance thermique utile et de la température du fluide utile pour une température de source fixée.

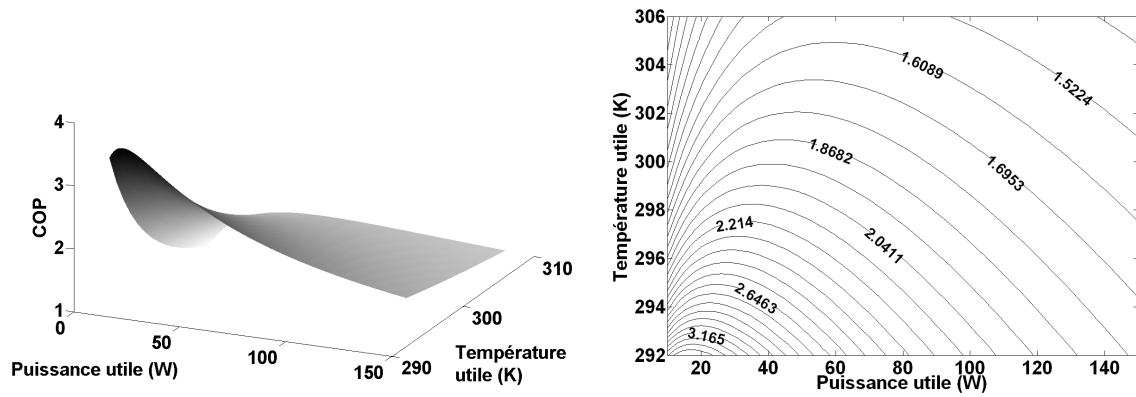


Figure 3 : COP d'une CEP en fonction de la température utile et de la puissance utile pour $T_s=285$ K

4.2 Gestion

Suite à cette première étape d'optimisation, nous pouvons déterminer pour une CEP l'intensité électrique optimale à fournir, et ce pour une température de fluide source et utile donnée. En fonction du système, un flux thermique utile important peut être nécessaire. Pour cette raison, l'emploi de plusieurs CEP devient indispensable. Plusieurs solutions s'offrent à nous pour associer les CEP.

4.2.1. Association hydraulique en parallèle des CEP

Par une association hydraulique en parallèle, il est possible de produire des puissances thermiques utiles supérieures à la puissance optimale fournie par une CEP tout en conservant le COP optimal pour un couple (T_u / T_s) donné. En effet, avec cette configuration, chacune des CEP constituant le système global est soumise aux mêmes différences de températures entre les faces chaude et froide. Or c'est cette différence de température qui régit le COP de la CEP. Finalement, toutes les CEP fonctionnent alors à la même intensité (correspondant à l'intensité optimale) et fournissent le même flux thermique utile. Le nombre optimal de CEP à associer correspond alors au ratio entre le flux thermique utile désiré et le flux thermique optimal généré par une unique CEP pour les conditions de fonctionnement données.

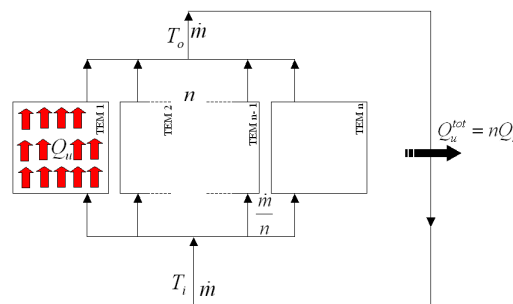


Figure 4 : Schéma d'association en parallèle des CEP

Les résultats du modèle montrent qu'il est nécessaire d'associer un grand nombre de CEP fonctionnant à faible puissance pour conserver un COP optimal. Par conséquent, le cas le plus contraignant du système (cas où la puissance nécessaire est la plus élevée) nous permet de déterminer le nombre précis de CEP que devra comporter le système. Lorsque le besoin en puissance baisse, il suffit alors de déconnecter électriquement le nombre nécessaire de CEP pour conserver le COP optimal. Finalement une gestion rigoureuse doit être menée afin de couvrir toute la gamme de puissance thermique utile nécessaire par connexions-déconnexions des CEP.

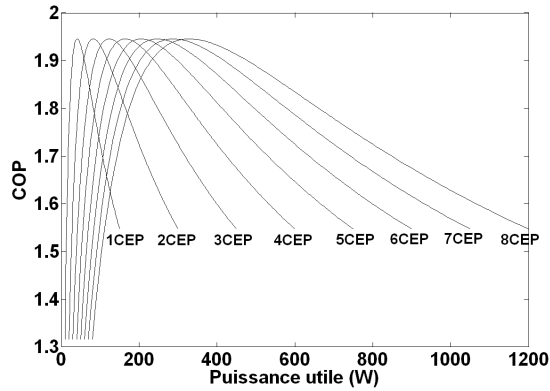


Figure 5 : Evolution du COP en fonction de la puissance utile désirée pour différents nombres de CEP associées en parallèle pour $T_u=300$ K et $T_s=285$ K.

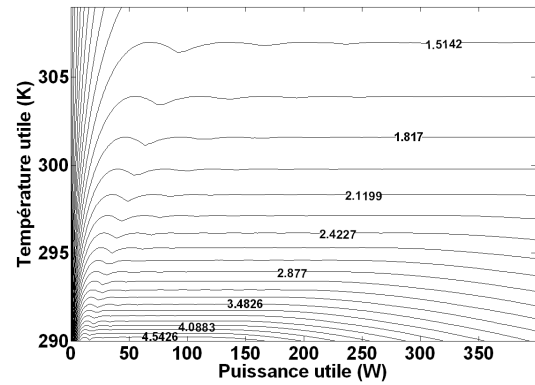


Figure 6 : Evolution du COP en fonction de la température du fluide utile et de la puissance utile pour différents nombres de CEP associées en parallèle et pour $T_s = 285$

4.2.2 Association hydraulique en cascade des CEP

L'association hydraulique en cascade consiste en une superposition de CEP (figure 7) :

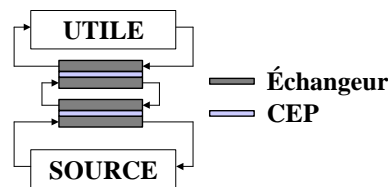


Figure 7 : Schéma d'association en cascade des CEP

Avec ce type de configuration, le flux utile de la CEP aval devient le flux source de la CEP suivante. Le modèle calcule pour chacune des CEP composant la cascade, l'intensité optimale à fournir afin d'obtenir le meilleur COP global en fonction du couple températures source et utile. Il serait possible de superposer les CEP sans l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur [6] et diminuer ainsi les résistances thermiques, néanmoins pour une question de modularité du système la présence d'échangeurs est indispensable. Comme l'illustre la figure 8, plus le nombre de CEP associées en cascade est grand, plus le flux thermique utile optimal devient faible. Ce type de configuration nous permet alors d'optimiser le système dans le cas où la puissance utile désirée serait inférieure à la puissance optimale générée par une seule CEP.

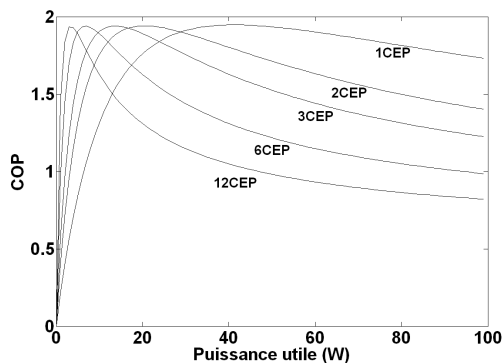


Figure 8 : Evolution du COP en fonction de la puissance utile désirée pour différents nombres de CEP associées en cascade pour $T_u = 300$ K et $T_s = 285$ K.

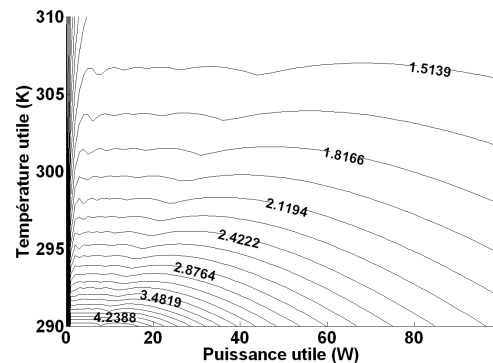


Figure 9 : Evolution du COP en fonction de la température du fluide utile et de la puissance utile pour différents nombres de CEP associées en cascade et pour $T_s = 285$.

4.2.3 Stratégie de gestion optimisée

Finalement on constate qu'en associant de manière adéquate les CEP d'une part et en fournissant une intensité adaptée d'autre part, on peut améliorer de manière notable les performances du système pour toute une gamme de puissance et de température utile. Le COP optimal atteignable pour un couple de températures source et utile donné reste inchangé quel que soit le mode d'association. Ainsi, en fonction de la demande en puissance et de la température utile désirée, on peut en jouant sur la configuration (cascade ou parallèle), ainsi qu'en connectant électriquement le nombre de cellules adéquat, maintenir un COP optimal quel que soit le point de fonctionnement désiré.

5. Conclusion

Cette étude a permis de montrer qu'à l'aide d'un modèle analytique, il est possible de déterminer avec précision l'intensité optimale à fournir à une cellule thermoélectrique pour n'importe quelle condition de fonctionnement. En fonction de la puissance utile nécessaire au système il devient indispensable de mettre en place une configuration optimisée afin de maintenir le COP optimal. Pour cela, il faudra dans le cas d'une demande en puissance plus faible que la puissance optimale générée par une unique CEP, associer les cellules en cascade. A l'inverse dans le cas de forts besoins en puissance une association en parallèle des CEP permettra de conserver le COP optimal. Afin de poursuivre le processus d'optimisation, une étude hydraulique devra être menée afin de déterminer l'impact en terme de pertes de charge d'un système modulaire tel que celui décrit dans ce papier. Par ailleurs, il conviendra de faire une étude économique afin de comparer les gains de performances en terme de COP par rapport au surcoût de l'emploi de nombreuses cellules fonctionnant à basse intensité.

Références

1. Riffat, S.B. and X. Ma, *Thermoelectrics: a review of present and potential applications*. Applied Thermal Engineering, 2003. 23(8): p. 913-935.
2. Xu, X., S.V. Dessel, and A. Messac, *Study of the performance of thermoelectric modules for use in active building envelopes*. Building and Environment, 2007. 42(3): p. 1489-1502.
3. Khire, R.A., A. Messac, and S. Van Dessel, *Design of thermoelectric heat pump unit for active building envelope systems*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005. 48(19-20): p. 4028-4040.
4. Luo, Q., Tang, G., Liu, Zhiqiang., Wang, Jingwei., *A novel water heater integrating thermoelectric heat pump with separating thermosiphon*. Applied Thermal Engineering, 2005. 25(14-15): p. 2193-2203.
5. Ferrotec
6. Yu, J. and B. Wang, *Enhancing the maximum coefficient of performance of thermoelectric cooling modules using internally cascaded thermoelectric couples*. International Journal of Refrigeration, 2009. 32(1): p. 32-39.

Remerciements

Ces travaux ont été effectués dans le cadre d'une thèse CIFRE financée par la société ACOME, à qui vont tous nos remerciements.