

# Fonctionnement optimal d'une pompe à chaleur thermoélectrique (PACTE) couplée à un bâtiment

YW. Kim<sup>\*</sup>, J. Ramousse<sup>1</sup>, G. Fraisse<sup>1</sup>, D. Sgorlon<sup>1</sup>, P. Dalicieux<sup>2</sup>, P. Baranek<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LOCIE-CNRS FRE3220, Université de Savoie, Polytech'Annecy-Chambéry, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget-du-Lac

<sup>2</sup>EDF - R&D ECLEER (European Centre and Laboratories for Energy Efficiency Research)

<sup>3</sup>EDF – R&D MMC (Département Matériaux et Mécanique des Composants)

<sup>\*</sup>(auteur correspondant : Yeweon.Kim@etu.univ-savoie.fr)

**Résumé** - Cette étude traite de la détermination des conditions optimales de fonctionnement d'une PACTE air-air couplée au bâtiment. On cherche ici à obtenir le nombre de modules optimal et l'intensité correspondant au COP maximal du système. Du fait du couplage de la PACTE au bâtiment, la puissance de chauffage est imposée par la température extérieure, via une loi de chauffe linéaire. Lorsqu'on couple la PACTE à un bâtiment, on peut distinguer deux cas : (1) la température d'entrée de l'air de la PACTE du côté source froide correspond à la température extérieure (variable) ; (2) la température d'entrée de l'air est constante (puits géothermique par exemple). Dans le premier cas, on montre qu'il existe un nombre de modules pour lequel le système fonctionne à COP quasi maximal, quelles que soient les conditions extérieures. En revanche, dans le cas où la température d'entrée est constante, il est nécessaire de faire varier le nombre de modules pour chaque point de fonctionnement, afin de conserver un COP maximal.

## Nomenclature

*COP* coefficient de performance  
 $c_p$  capacité calorifique massique,  $J.Kg^{-1}.K^{-1}$   
 $I$  intensité,  $A$   
 $K$  conductance thermique,  $W.K^{-1}$   
 $\dot{m}$  débit massique,  $kg.s^{-1}$   
 $P$  puissance électrique,  $W$   
 $Q$  flux de chaleur,  $W$   
 $R_{th}$  résistance électrique,  $\Omega$   
 $T$  température,  $K$   
 $Z$  facteur de mérite,  $K^{-1}$   
 $\Delta T$  ... écart de température ( $T_c - T_h$ ),  $K$

### *Symboles grecs*

$\alpha$  coefficient de Seebeck,  $V.K^{-1}$   
 $\lambda$  conductivité thermique,  $W.m^{-1}.K^{-1}$   
 $\rho$  résistivité électrique,  $\Omega.m$   
 $\tau$  coefficient de Thomson,  $V.K^{-1}$

### *Indices et exposants*

$f, c$  côtés froid et chaud de la CEP  
 $max$  maximal  
 $OPT$  optimal  
 $sf, sc$  source froide et source chaude

## 1. Introduction

Les pompes à chaleur thermoélectriques (PACTE) pourraient être utilisées dans l'habitat pour la production de chaleur ou le rafraîchissement. Elles présentent différents avantages par rapport aux pompes à chaleur thermodynamiques (à compression mécanique de vapeur) : faibles nuisances sonores, maintenance réduite du fait de l'absence de pièces mobiles, encombrement réduit et potentiellement faible coût. Récemment, ces systèmes ont montré un réel intérêt pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments [1-6]. Leur développement devrait s'accroître encore avec la généralisation des Bâtiments Basse Consommation (BBC) dans la future réglementation thermique RT2012.

Les performances des PACTE ne sont pas encore comparables à celles des pompes traditionnelles. Cependant, des progrès importants sont possibles en améliorant les transferts thermiques et les propriétés des matériaux thermoélectriques (augmentation du coefficient ZT). Des travaux portant sur ces deux aspects sont actuellement menés et la technologie des PACTE pourrait bien devenir une solution pertinente. Pour obtenir un coefficient de performance (COP) élevé, les modules thermoélectriques doivent fonctionner avec un écart de température le plus faible possible entre les deux faces. Dans ces conditions, les PACTE présentent un intérêt, particulièrement dans le cas du chauffage aéraulique des bâtiments (VMC Double Flux).

L'objectif de cette étude est de déterminer les conditions optimales de fonctionnement d'une PACTE air-air couplée au bâtiment. Le matériau thermoélectrique retenu est le  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  ( $ZT \approx 0,8$ ). Nous cherchons le nombre de modules optimal et l'intensité correspondante pour répondre aux besoins de chauffage dans le bâtiment en fonction de la température extérieure (régulation de type boucle ouverte définie par une loi de chauffe liant la température extérieure et la puissance thermique fournie au bâtiment).

## 2. Modélisation de la PACTE

### 2.1. Les éléments thermoélectriques

Le fonctionnement d'une cellule à effet Peltier (CEP), comportant  $n$  paires de jambes thermoélectriques, est décrit de manière simplifiée à partir des effets Joule, Peltier et Thomson. De plus, les flux absorbés et dissipés par une CEP tiennent compte de la conduction thermique, et s'écrivent selon les équations (1) et (2) [7]:

$$Q_f = 2n \cdot (\alpha_f \cdot T_f \cdot I - \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2 - K \cdot \Delta T_{cep} + \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot I \cdot \Delta T_{cep}) \quad (1)$$

$$Q_c = 2n \cdot (\alpha_c \cdot T_c \cdot I + \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2 - K \cdot \Delta T_{cep} - \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot I \cdot \Delta T_{cep}) \quad (2)$$

La puissance électrique nécessaire est la différence entre les deux flux de chaleurs, c'est-à-dire :

$$P_{elec} = Q_c - Q_f = (\alpha_c \cdot T_c - \alpha_f \cdot T_f) \cdot I + R \cdot I^2 - \tau \cdot I \cdot \Delta T_{cep} \quad (3)$$

On définit alors le COP, relatif à chacun des côtés de la CEP (chaud et froid), de la façon suivante :

$$COP_c = \frac{Q_c}{P_{elec}} = COP_f + 1 \quad (4)$$

### 2.2. Couplage de la PACTE au bâtiment

La figure 1 représente le couplage de la PACTE au bâtiment. La puissance utile de chauffage  $P_{utile}$  est définie par la loi de chauffe, fonction de  $T_{ext}$  :

$$P_{utile} = P_{utile\_max} \cdot \frac{(T_{int} - T_{ext})}{(T_{int} - T_{ext\_base})} \quad (5)$$

Cette puissance permet de définir la température de soufflage  $T_s$  à l'intérieur de l'habitat :

$$P_{utile} = \dot{m}_c \cdot Cp_c \cdot (T_s - T_{int}) \quad (6)$$

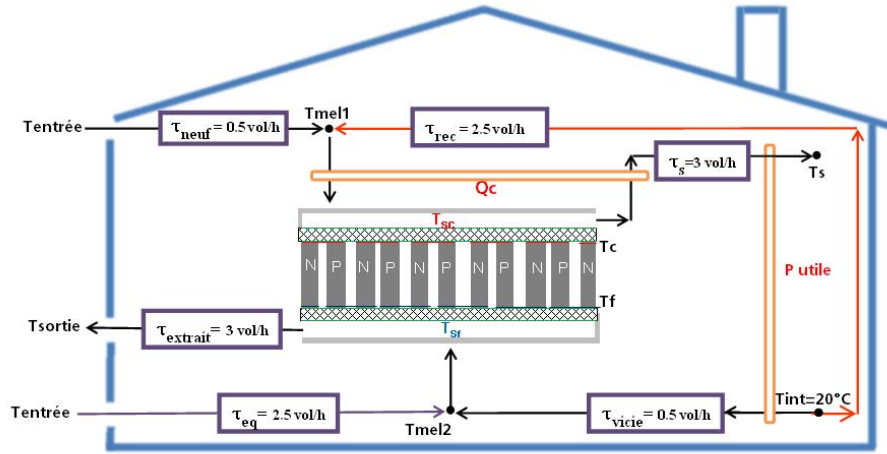


Figure 1 : Schéma du couplage entre une PACTE et un bâtiment

La récupération de l'énergie contenue dans l'air extrait permet de réduire les besoins de chauffage et améliorer ainsi le COP de la PACTE en réduisant l'écart de température entre sources (fig. 1). On définit alors la température de mélange  $T_{mel1}$  :

$$T_{mel1} = \frac{\tau_{neuf} \cdot T_{entree} + \tau_{rec} \cdot T_{int}}{\tau_s} \quad (7)$$

Où le taux de soufflage  $\tau_s$  (vol/h) est la somme de l'air neuf  $\tau_{neuf}$  et de l'air recyclé  $\tau_{rec}$  :

$$\tau_s = \tau_{neuf} + \tau_{rec} \quad (8)$$

On considère que la température de source chaude  $T_{sc}$  de la PACTE est la moyenne de la température  $T_{mel1}$  et de  $T_s$  :

$$T_{sc} = \frac{T_{mel1} + T_s}{2} \quad (9)$$

De la même façon, la température de la source froide  $T_{sf}$  est la moyenne entre  $T_{sortie}$  et la température de mélange  $T_{mel2}$  :

$$T_{sf} = \frac{T_{mel2} + T_{sortie}}{2} \quad (10)$$

$$T_{mel2} = \frac{\tau_{vicie} \cdot T_{int} + \tau_{eq} \cdot T_{entree}}{\tau_{extrait}} \quad (11)$$

Où le taux d'air extrait  $\tau_{extrait}$  est la somme de l'air vicié  $\tau_{vicie}$  et du taux d'équilibrage  $\tau_{eq}$  :

$$\tau_{extrait} = \tau_{vicie} + \tau_{eq} \quad (12)$$

La conservation des débits indique que :

$$\tau_{neuf} = \tau_{vicie} \quad (13)$$

La conservation des flux de chaleur côté chaud et côté froid de la PACTE permet d'écrire les relations (14) et (15).

$$Q_c = \frac{T_c - T_{sc}}{R_{TH\_c}} = \dot{m}_c \cdot Cp_c \cdot (T_s - T_{mel1}) \quad (14)$$

$$Q_f = \frac{T_{sf} - T_f}{R_{TH\_f}} = \dot{m}_f \cdot Cp_f \cdot (T_{sortie} - T_{mel2}) \quad (15)$$

Avec  $R_{TH_c}$  et  $R_{TH_f}$ , les résistances thermiques des échangeurs des faces chaude et froide.

A partir des équations (5), (6) et (14), on obtient l'expression du flux côté chaud de la PACTE en fonction de la température extérieure :

$$Q_{c\_besoin} = - \left[ \frac{P_{utile\_max}}{(T_{int} - T_{ext\_base})} + \dot{m}_c \cdot Cp_c \cdot \frac{\tau_{an}}{\tau_s} \right] \cdot T_{ext} + \left[ \frac{P_{utile\_max}}{(T_{int} - T_{ext\_base})} + \dot{m}_f \cdot Cp_f \cdot \left( 1 - \frac{\tau_{rec}}{\tau_s} \right) \right] \cdot T_{int} \quad (16)$$

### 3. Conditions de fonctionnement optimales

Le couplage de la PACTE au bâtiment est présenté sur la figure 1. Les conditions de fonctionnement dépendent notamment de:

- la température extérieure  $T_{ext}$
- la température intérieure  $T_{int}$  (recyclage à l'entrée de la PACTE du côté source chaude et valorisation d'énergie sur l'air vicié, du côté source froide)
- l'intensité électrique fournie ( $I$ )
- le nombre de modules thermoélectriques ( $N_{mod}$ )
- la puissance de chauffage qui dépend de la température extérieure (loi de chauffe).

Deux hypothèses distinctes ont été considérées :

- 1) La température en entrée de la source froide ( $T_{entrée}$ ) est la température extérieure.
- 2) La température  $T_{entrée}$  est constante (source géothermique par exemple).

Les propriétés des semi-conducteurs, les résistances thermiques équivalentes des échangeurs et les températures de fonctionnement sont données dans le tableau 1 pour une CEP (réf. 9501/242/160 B, société Ferrotec) [8]. Le bâtiment considéré est une maison individuelle de 120 m<sup>2</sup> dont la puissance maximale de chauffage est estimée à 30W/m<sup>2</sup> de plancher. Les débits d'air sont indiqués sur la figure 1 en vol/h.

Description	Dimension
Dimension de CEP	55x55x3.45 (mm <sup>3</sup> )
Nombre de paires de jambe	242 (-)
Resistance électrique	1.7352 (Ω)
Coefficient Seebeck	0.101 (V/K)
Résistance thermique de jambe	2.6637 (K.W <sup>-1</sup> )
Résistance thermique d'échangeur	0.001 (K/W)
$T_{int}$	20°C
$T_{ext\_base}$	-10°C

Tableau1. Les caractéristiques et les températures de fonctionnement

#### 3.1. La température d'entrée de la source froide varie

La première hypothèse (source froide = air extérieur + air vicié) est considérée. Le modèle global de la PACTE couplée au bâtiment est résolu sous EES (Engineering Equation Solution).

La courbe optimale ( $COP_{c\_opt}$ ) de la figure 2 correspond aux valeurs maximales du COP en fonction de l'intensité (courbe liée aux performances de la TEC). De la même façon, pour

un nombre de modules  $N_{mod}$  donné, on peut tracer les évolutions du  $COP_c$  en fonction de l'intensité (ligne continue), correspondant aux points de fonctionnement de la PACTE couplée au bâtiment et satisfaisant les besoins en chauffage selon la température extérieure. On remarque que suivant le nombre de modules (30-50-70), on s'approche de la courbe optimale de  $COP_{c\_opt}$  pour un nombre de modules donné ( $N_{mod} \approx 50$ ). Ces observations sont confirmées par les résultats de la figure 3 qui représente les évolutions de la puissance chaude optimale  $Q_{c\_opt}$  (calculée avec l'intensité optimale relative au COP maximum) de la PACTE en fonction de la température extérieure. On remarque que  $Q_{c\_opt}$  s'approche de  $Q_{c\_besoin}$  (calculé avec l'équation (16)) lorsque le nombre de modules est d'environ 50.

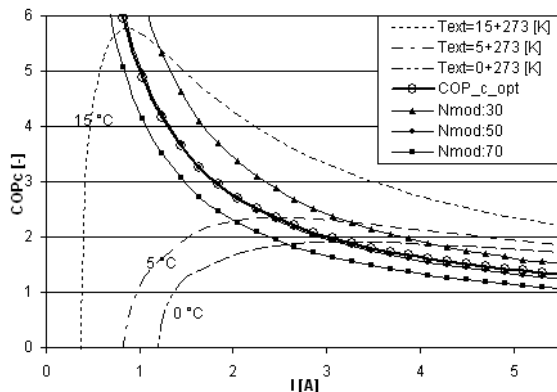


Figure 2 :  $COP_c$  en fonction de l'intensité en fonction du nombre de module ( $T_{entrée}=T_{ext}$ )

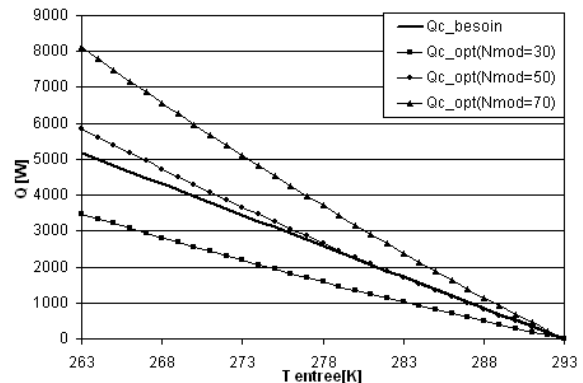


Figure 3 :  $Q_{c\_besoin}$  et  $Q_{c\_opt}$  en fonction de  $T_{ext}$  et du nombre de modules ( $T_{entrée}=T_{ext}$ )

La figure 4 montre que le nombre de module optimal vaut  $N_{mod} = 53$  avec l'hypothèse 1. Il permet d'obtenir un écart type moyen ( $Text$  compris entre  $-10$  et  $19^\circ C$ ) entre le  $COP_{c\_opt}$  et le  $COP_c$  quasiment nul (écart type  $\approx 0.01$ ). Aussi, dans le cas où la température d'entrée est égale à la température extérieure, il existe un nombre de modules pour lequel le système fonctionne de manière optimale vis à vis du COP, quelles que soient les conditions extérieures.

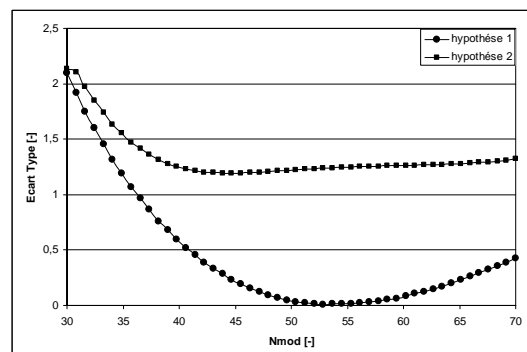


Figure 4 : écart type moyen entre le  $COP_{c\_opt}$  et le  $COP_c$  ( $T_{entrée}=T_{ext}$  et  $T_{entrée}=cst.$ )

### 3.2. La température de la source froide de la PACTE est constante

On s'intéresse dans cette partie à la deuxième hypothèse. On suppose que  $T_{entrée}$  de la PACTE est constante ( $10^\circ C$ ) sauf lorsque  $T_{ext}$  est supérieure à cette valeur (la température d'entrée correspond alors à  $T_{ext}$ ). La source froide est donc un mélange entre de l'air à température constante (ou l'air extérieur, si  $T_{ext}$  est supérieur) et l'air vicié. Cette configuration correspond par exemple au cas d'une source géothermale de type puits canadien. Contrairement à l'hypothèse 1, les figures 4, 5 et 6 montrent clairement qu'il n'existe pas un nombre de modules optimal. La figure 5 indique qu'il est nécessaire de faire varier le nombre de modules pour chaque point de fonctionnement de 1.5A environ (i.e. pour  $T_{ext} < 10^\circ C$ ) si l'on souhaite fonctionner à COP maximum.

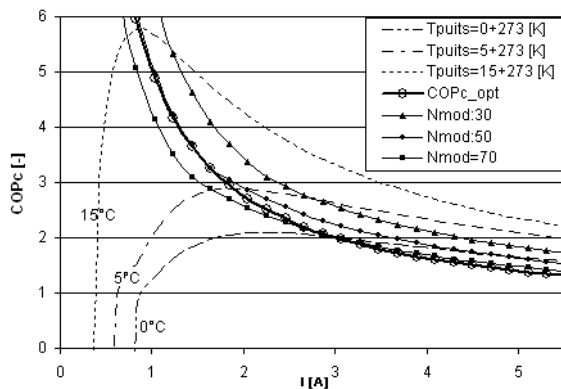


Figure 5 :  $COP_c$  en fonction d'intensité avec différent nombre de module ( $T_{entree}=cst.$ )

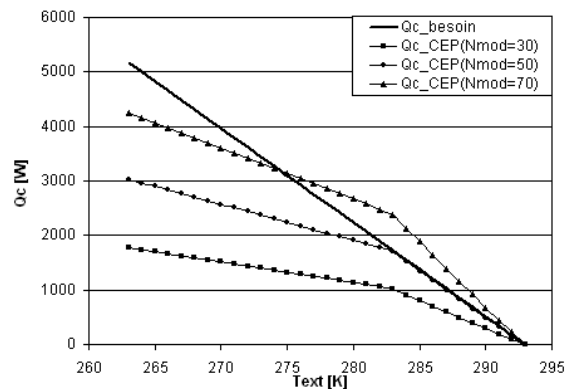


Figure 6 :  $Q_c$  en fonction de nombre module ( $T_{entree}=cst.$ )

## 4. Conclusion

Dans cet article, nous avons déterminé les conditions optimales de fonctionnement d'une PACTE couplée au bâtiment. Nous cherchons à déterminer le nombre de modules optimal et l'intensité optimale d'alimentation correspondante, pour les deux hypothèses de couplage retenues. Lorsque la température de la source froide varie en fonction de la température extérieure, on montre qu'il existe un nombre de modules optimal, qui permet d'approcher le COP maximal envisageable, quelles que soient les conditions de fonctionnement, en adaptant simplement le courant électrique. Lorsque la température de la source froide de la PACTE est constante (source géothermale par exemple), il est nécessaire de faire varier le nombre de modules pour chaque point de fonctionnement, afin d'atteindre le COP maximal envisageable. L'intensité d'alimentation optimale doit également être adaptée au besoin de chauffage.

## Remerciements

Les auteurs remercient EDF R&D ECLEER pour son soutien.

- [1] 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.
- [2] Luo, Q., Tang, G., Liu, Z., Wang, J., A novel water heater integrating thermoelectric heat pump with separating thermosiphon. *Applied Thermal Engineering*, 2005. 25(14-15): p. 2193-2203.
- [3] Xu, X., Van Dessel, S., Evaluation of an Active Building Envelope window-system. *Building and Environment*, 2008. 43(11): p. 1785-1791.
- [4] Vián, J.G., Astrain D., Development of a thermoelectric refrigerator with two-phase thermosyphons and capillary lift. *Applied Thermal Engineering*, 2009. 29(10): p. 1935-1940.
- [5] Khire, R.A., Messac, A., Van Dessel, S., 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.
- [6] Cosnier, M., G. Fraisse, et al. (2008). "An experimental and numerical study of a thermoelectric air-cooling and air-heating system." *International Journal of Refrigeration* 31(6): 1051-1062.
- [7] G. Fraisse, Les performances énergétiques des systèmes thermoélectriques, de l'échelle élémentaire au bâtiment, *Réunion du GDR Thermoélectricité*, (Grenoble, 6-7 juil. 2010).
- [8] Ferrotec values, <http://www.ferrotec.com/>