

Montpellier, Le Corum, 28-30 Mars 2011



# Intensification des transferts dans les Pompes A Chaleur Thermoélectriques

---

**PIE - Programme Interdisciplinaire Energie  
INPACT PE09-3.1.1-4**



**Julien RAMOUSSE, Gilles FRAISSE, Lingai LUO**  
LOCIE – CNRS FRE 3220  
Campus scientifique - Savoie Technolac  
73376 Le Bourget du Lac – CEDEX

**Christophe GOUPIL**  
CRISMAT – CNRS UMR 6508  
6 boulevard Maréchal Juin  
14050 Caen CEDEX 4

# Contexte & Objectifs

## *Effet Seebeck*

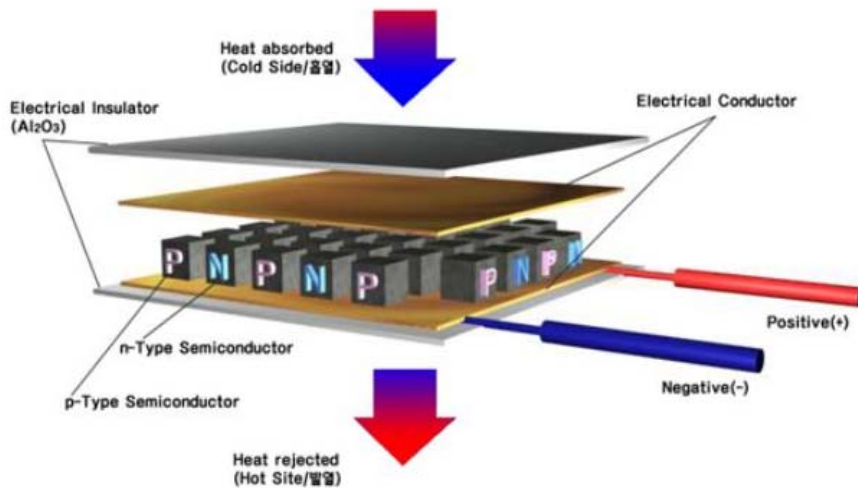
=> Générateur électrique

## *Effet Peltier*

=> Pompe à Chaleur

## *Avantages*

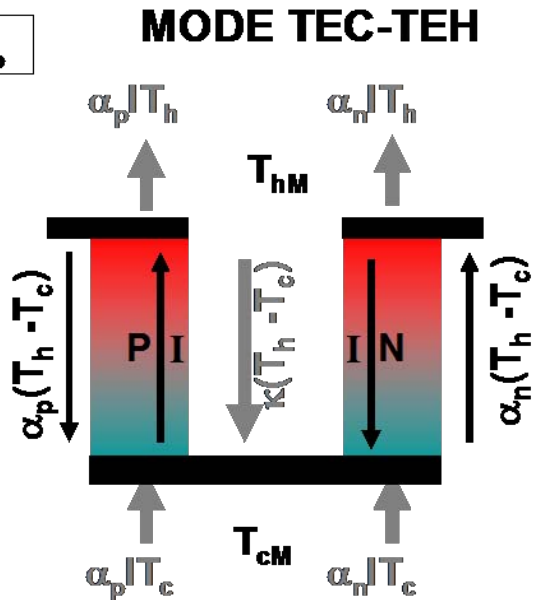
- Pas de fluide frigorigène
- Pas de bruit
- Maintenance réduite
- « Bon rendement » à faible écart de température



***Objectif : Maximiser le COP***

# Mise en équations

$$\alpha_n = -\alpha_p$$



$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{RK}$$

$$Q_c = N \left[ \underbrace{\alpha I T_c}_{\text{Effet Peltier}} - \underbrace{\frac{1}{2} R I^2}_{\text{Effet Joule}} + \underbrace{K(T_h - T_c)}_{\text{Conduction}} + \underbrace{\frac{1}{2} \tau(T_h - T_c)}_{\text{Effet Thomson}} \right]$$

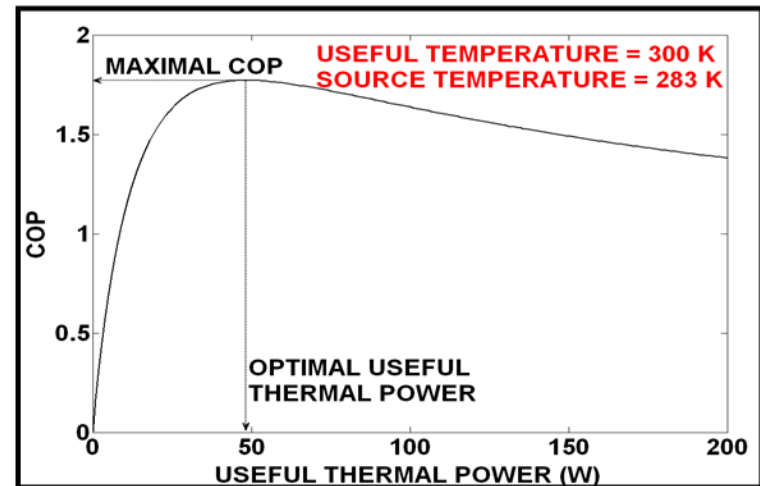
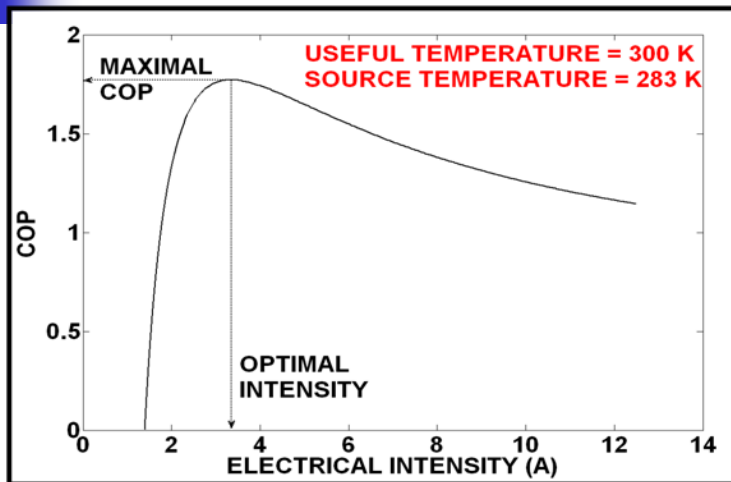
$$Q_h = N \left[ \alpha I T_h + \frac{1}{2} R I^2 - K(T_h - T_c) - \frac{1}{2} \tau(T_h - T_c) \right]$$

$$P_e = Q_h - Q_c = R I^2 + I \alpha (T_h - T_c)$$

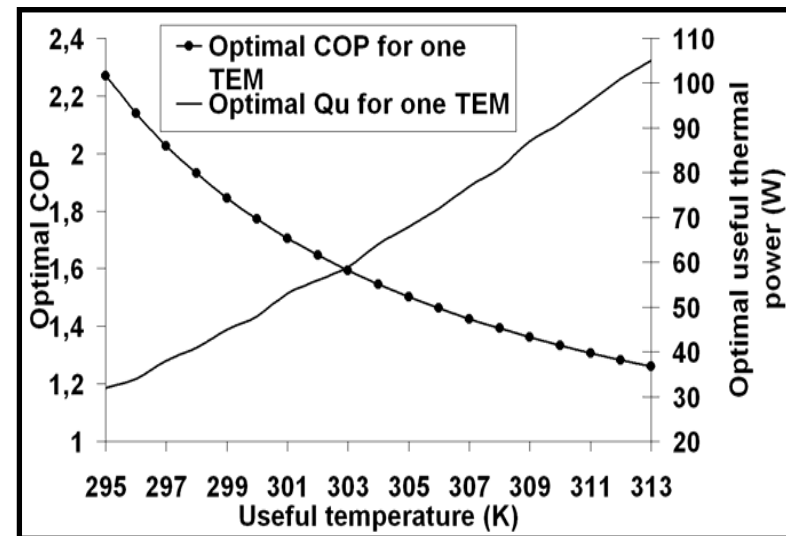
$$COP_h = \frac{Q_h}{P_e} = \frac{P_e + Q_c}{P_e} = COP_c + 1$$

$$COP_{sys} = \frac{Q_h}{P_e + P_{méca}}$$

# Résultats préliminaires



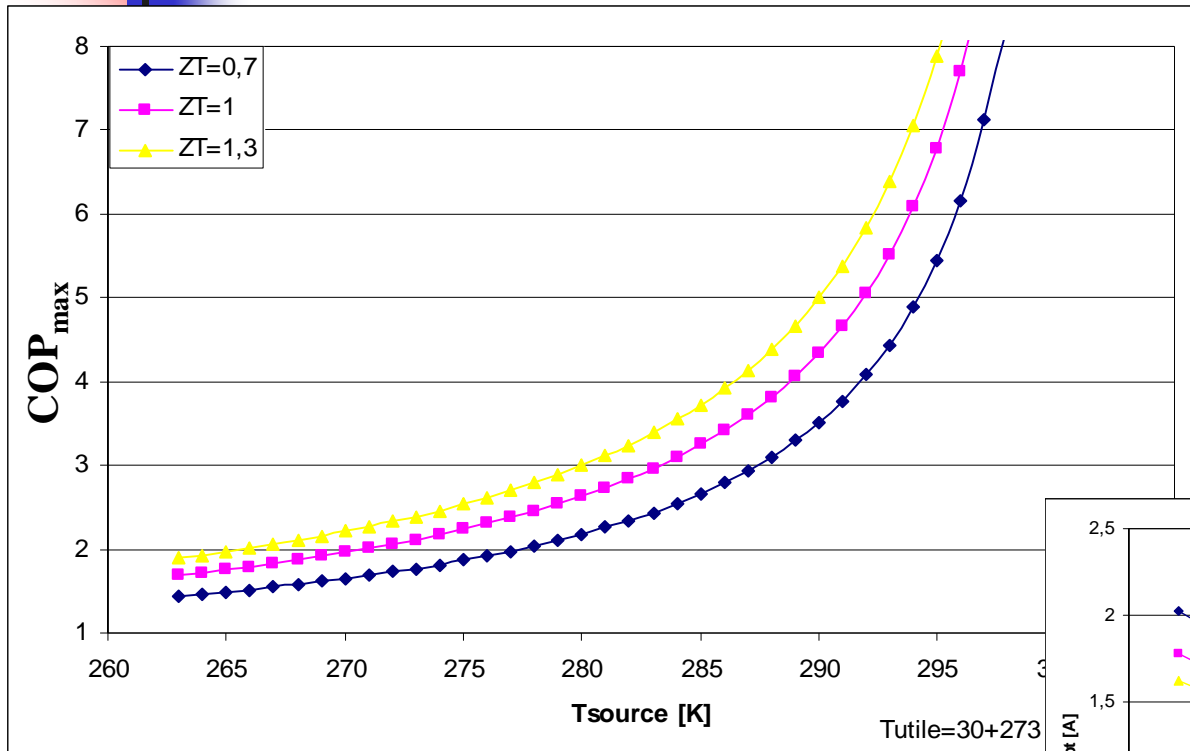
Il existe une intensité optimale (et des flux chaud et froid optimaux) donnant le COP maximal, pour toutes températures de fonctionnement (côtés chaud et froid)



# Expressions analytiques

Modèle	STANDARD	THOMSON	THOMSON – SEEBECK
Facteur de mérite	$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \lambda}$	$Z' = \frac{\alpha(\alpha - \tau)}{\rho \cdot \lambda}$	$Z'' = \frac{\left(\frac{\alpha_H \cdot T_H - \alpha_C \cdot T_C - \tau}{\Delta T}\right)^2}{\rho \cdot \lambda}$
Facteur M	$M = \sqrt{1 + Z \cdot T_m}$	$M' = \sqrt{1 + Z' \cdot T_m}$	$M'' = \sqrt{1 + Z'' \cdot T_m}$
Facteur A	$A = \alpha$	$A' = \alpha - \tau$	$A'' = \frac{\alpha_H \cdot T_H - \alpha_C \cdot T_C - \tau}{\Delta T}$
Intensité	$I_{opt} = \frac{K \cdot \Delta T}{\alpha \cdot T_m} (1 + M)$	$I'_{opt} = \frac{K \cdot \Delta T}{\alpha \cdot T_m} (1 + M')$	$I''_{opt} = \frac{K \cdot \Delta T}{\alpha \cdot T_m} (1 + M'')$
Tension optimale	$V_{opt} = A \cdot \Delta T \frac{M}{(M-1)}$	$V'_{opt} = A' \cdot \Delta T \frac{M'}{(M'-1)}$	$V''_{opt} = A'' \cdot \Delta T \cdot \left(1 + \frac{A''}{\alpha \cdot (M''-1)}\right)$
Puissance froide optimale	$Q_{C\_opt} = \frac{K \cdot \Delta T}{T_m} \left[ (M'+1) \cdot \left( T_C - \frac{\Delta T}{2} \left( \frac{A}{\alpha \cdot (M'-1)} \right) \right) - T_m \right]$	$Q'_{C\_opt} = \frac{K \cdot \Delta T}{T_m} \left[ (M'+1) \cdot \left( T_C - \frac{\Delta T}{2} \left( \frac{A'}{\alpha \cdot (M'-1)} \right) \right) - T_m \right]$	$Q''_{C\_opt} = \frac{K \cdot \Delta T}{T_m} \left[ (M''+1) \left( T_C - \frac{\Delta T}{2} \frac{A''}{\alpha \cdot (M''-1)} \right) - T_m \right]$
Puissance chaude optimale	$Q_{H\_opt} = \frac{K \cdot \Delta T}{T_m} \left[ (M'+1) \cdot \left( T_H - \frac{\Delta T}{2} \left( \frac{A}{\alpha \cdot (M'-1)} \right) \right) - T_m \right]$	$Q'_{H\_opt} = \frac{K \cdot \Delta T}{T_m} \left[ (M'+1) \cdot \left( T_H + \frac{\Delta T}{2} \left( \frac{A'}{\alpha \cdot (M'-1)} \right) \right) - T_m \right]$	$Q''_{H\_opt} = \frac{K \cdot \Delta T}{T_m} \left[ (M''+1) \left( T_H + \frac{\Delta T}{2} \frac{A''}{\alpha \cdot (M''-1)} \right) - T_m \right]$
COP froid maximal	$COP_{C\_opt} = \left( \frac{\alpha}{A} \right) \frac{T_m}{\Delta T} \left( \frac{M-1}{M+1} \right) - \frac{1}{2}$	$COP'_{C\_opt} = \left( \frac{\alpha}{A'} \right) \frac{T_m}{\Delta T} \left( \frac{M'-1}{M'+1} \right) - \frac{1}{2}$	$COP''_{C\_opt} = \left( \frac{\alpha}{A''} \right) \frac{T_m}{\Delta T} \left( \frac{M''-1}{M''+1} \right) - \frac{1}{2}$
COP chaud maximal	$COP_{H\_opt} = \left( \frac{\alpha}{A} \right) \frac{T_m}{\Delta T} \left( \frac{M-1}{M+1} \right) + \frac{1}{2}$	$COP'_{H\_opt} = \left( \frac{\alpha}{A'} \right) \frac{T_m}{\Delta T} \left( \frac{M'-1}{M'+1} \right) + \frac{1}{2}$	$COP''_{H\_opt} = \left( \frac{\alpha}{A''} \right) \frac{T_m}{\Delta T} \left( \frac{M''-1}{M''+1} \right) + \frac{1}{2}$

# Performances des matériaux

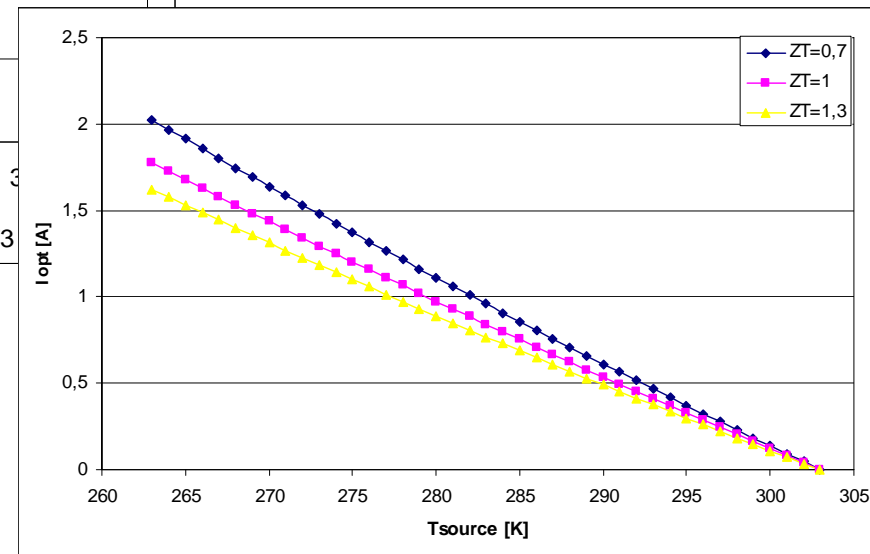


$T_{utile} = 303$  K

Quand  $ZT$  augmente

$\Rightarrow COP_{max}$  augmente

$\Rightarrow I_{opt}$  diminue

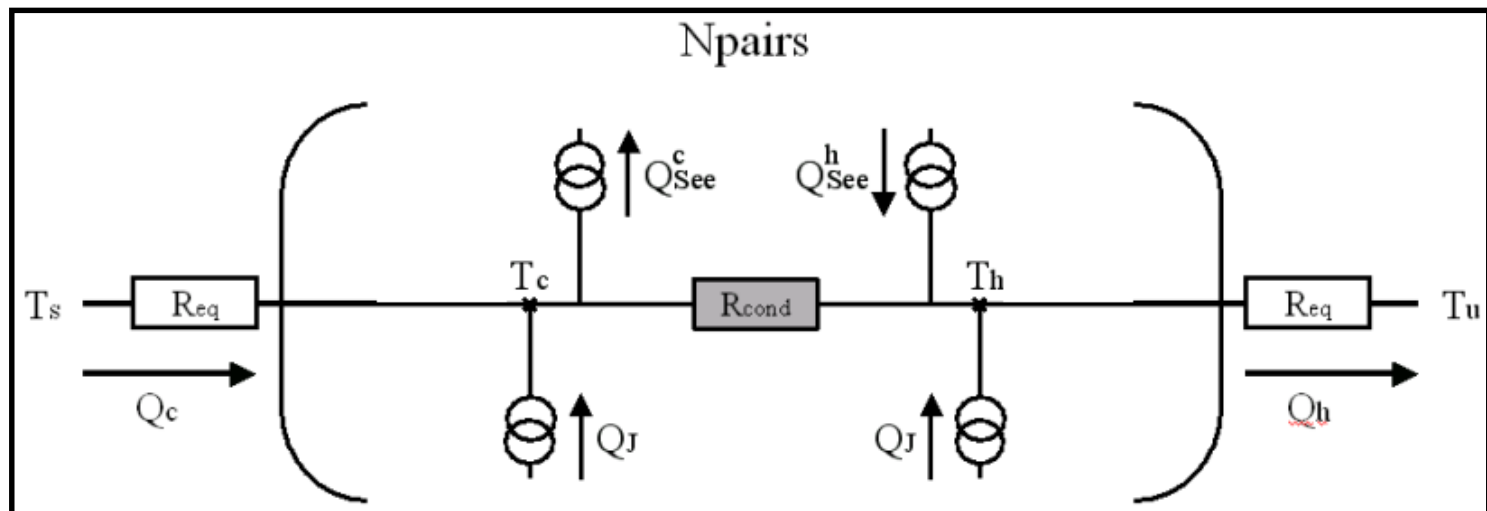


# Couplage aux échangeurs de chaleur – Analogie électrique

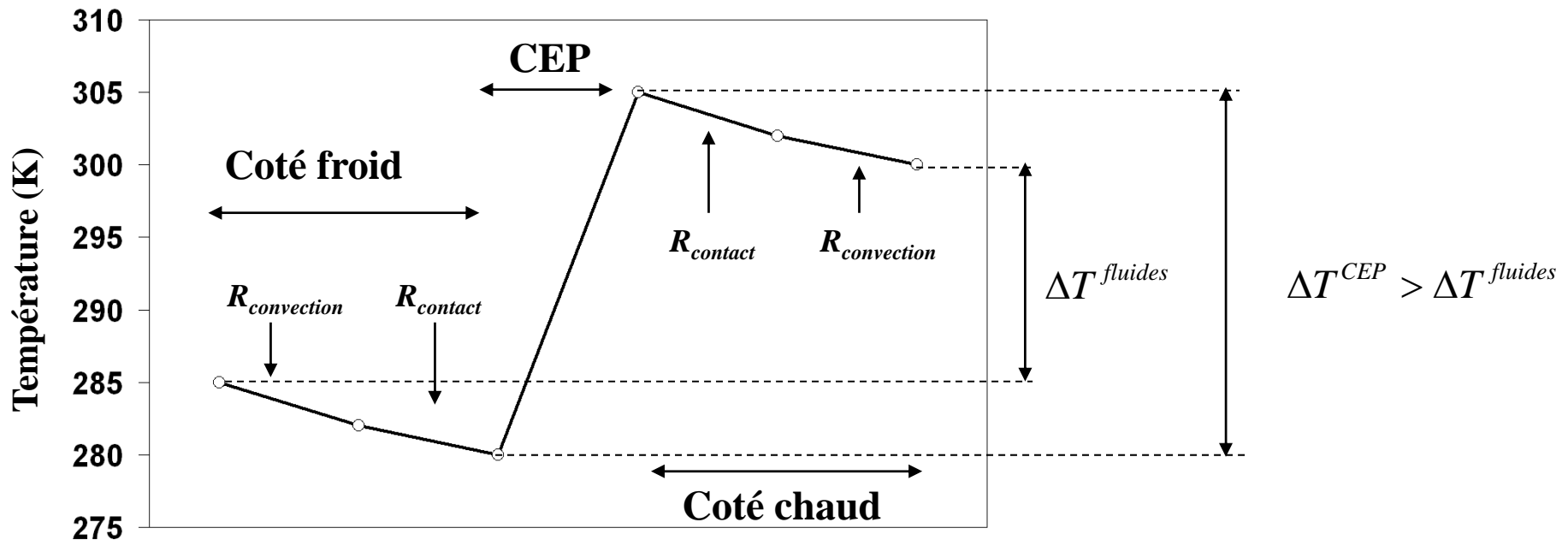
Les températures de jonction sont des inconnues!

Les températures des fluides caloporteurs sont connues...

=>  $R_{eq}^{th}$  des échangeurs



# Influence de la résistance thermique des échangeurs



Quand  $R_{th}$  diminue  $\Rightarrow \Delta T^{CEP}$  diminue

$\Rightarrow COP$  augmente





# Pistes d'intensification

---

## *Objectif : Maximiser le COP*

- Améliorer les performances des matériaux
  - Augmenter les coefficients Seebeck, la conductivité électrique, réduire la conductivité thermique
    - => *Augmenter le facteur de mérite*
- Réduire l'écart de température entre les 2 faces du module
  - Améliorer le couplage entre les fluides caloporteurs et les modules thermoélectriques
    - => *Optimisation des échangeurs*
- Répondre à des besoins de puissance variable
  - => *Stratégie de gestion électrique et hydraulique*

# Optimisation des échangeurs

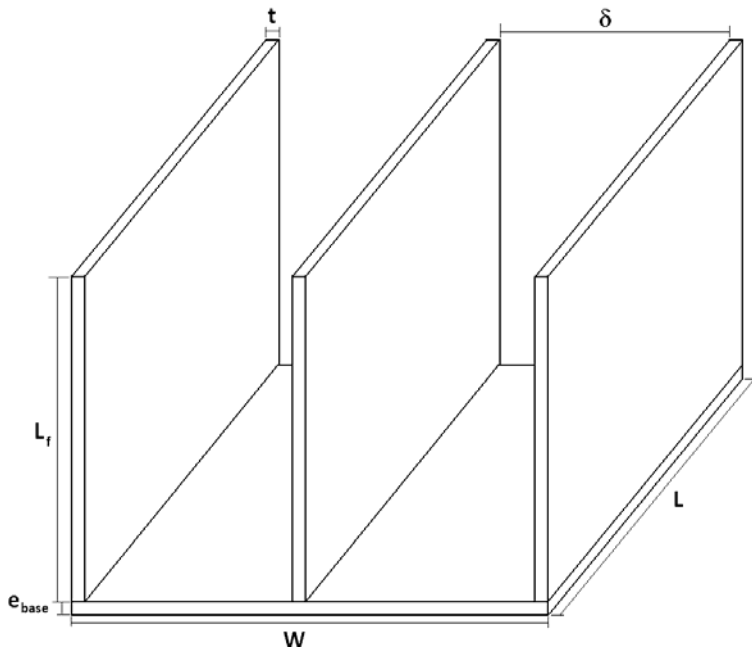
## Échangeur à air (Ailettes)

$$\max_{X \in \mathbb{R}^4} COP_{sys}(X) \in \mathbb{R}$$

$$X = (\text{géométrie...})$$

$$R_{th} \sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ K.m}^2/\text{W}$$

$$P_{méca}/S_{base} \sim 5 \text{ W/m}^2$$



### Norme EN 14511

$$T_{in}^{chd} = 20^\circ\text{C}$$

$$T_{out}^{chd} = 35^\circ\text{C}$$

$$T_{in}^{fd} = 7^\circ\text{C}$$

$$Q^{chd} = 2\text{kW/m}^2$$

$$COP^{opt} \sim 1.8$$

# Optimisation des échangeurs

Échangeur à air

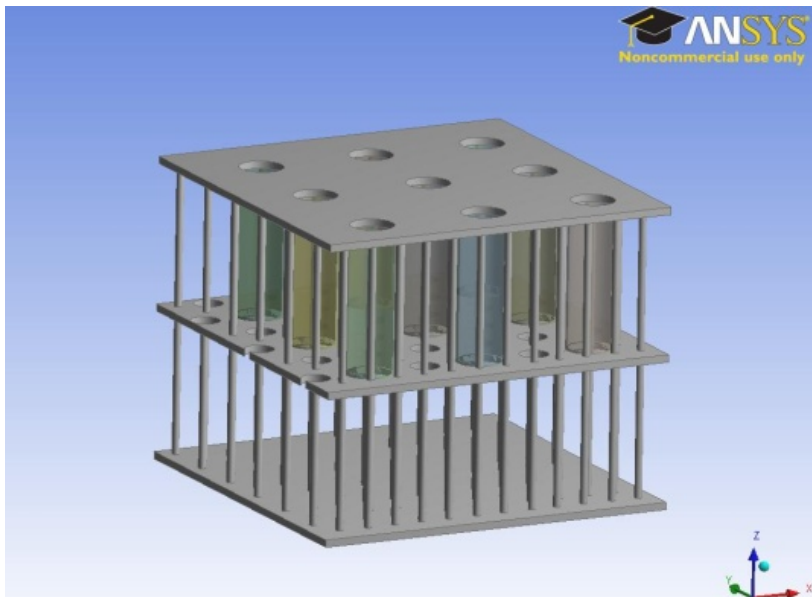
(Jets impactants + Ailettes)

$$\max_{X \in \mathfrak{R}^4} COP_{sys} (X) \in \mathfrak{R}$$

$$X = (\text{géométrie...})$$

$$R_{th} \sim 5 \cdot 10^{-4} \text{ K.m}^2/\text{W}$$

$$P_{méca}/S_{base} \sim 10 \text{ W/m}^2$$



Norme EN 14511

$$T_{in}^{chd} = 20^\circ\text{C}$$

$$T_{out}^{chd} = 35^\circ\text{C}$$

$$T_{in}^{fd} = 7^\circ\text{C}$$

$$Q^{chd} = 2\text{kW/m}^2$$

$$COP^{opt} \sim 2$$

# Optimisation des échangeurs

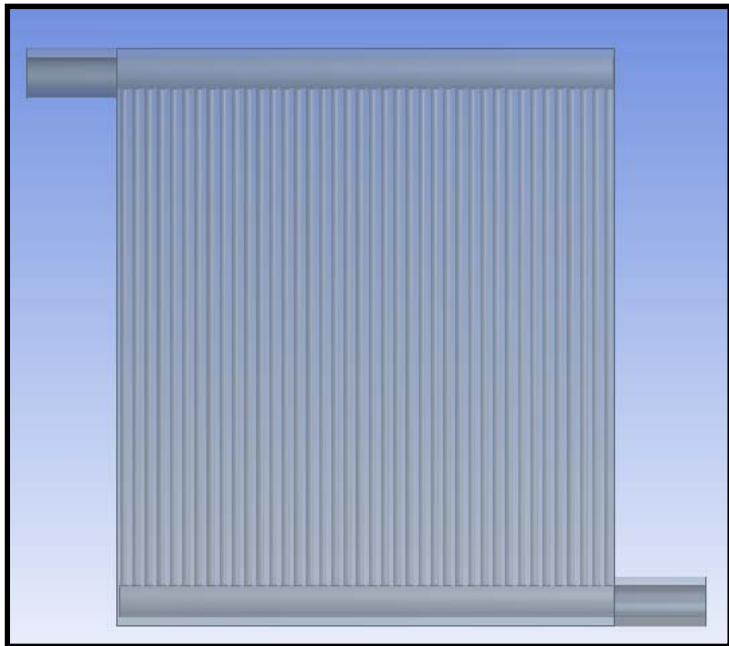
Echangeur à eau  
(mini-canaux parallèles)

$$\max_{X \in \mathcal{R}^4} COP_{sys}(X) \in \mathcal{R} \approx \min_{X \in \mathcal{R}^4} S_{gen}(X) \in \mathcal{R}$$

$$X = (\text{géométrie...})$$

$$R_{th} \sim 1 \cdot 10^{-4} \text{ K.m}^2/\text{W}$$

$$P_{méca}/S_{base} \sim 50 \text{ W/m}^2$$



Norme EN 14511

$$T_{in}^{chd} = 20^\circ\text{C}$$

$$T_{out}^{chd} = 35^\circ\text{C}$$

$$T_{in}^{fd} = 7^\circ\text{C}$$

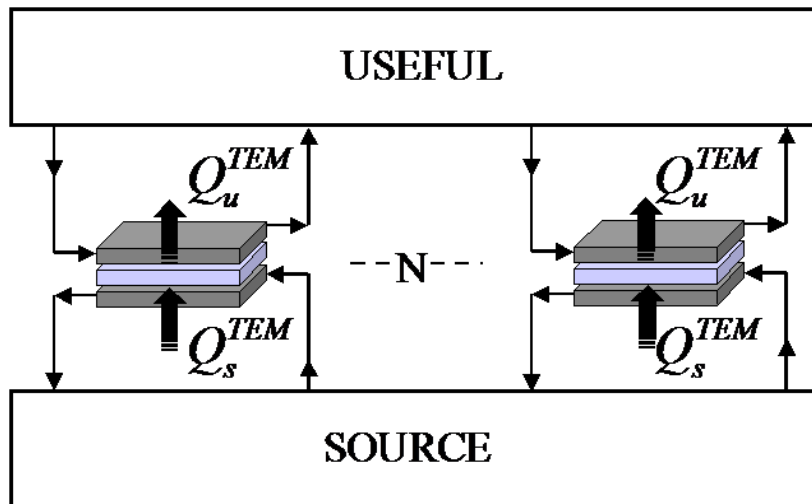
$$Q^{chd} = 2\text{kW/m}^2$$

$$COP^{opt} \sim 2$$

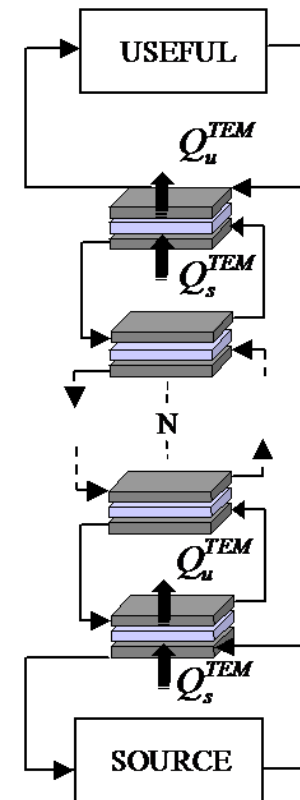
# Gestion du système

Les systèmes nécessitent plusieurs TEM  
Comment les associer?

## Association parallèle



## Association cascade

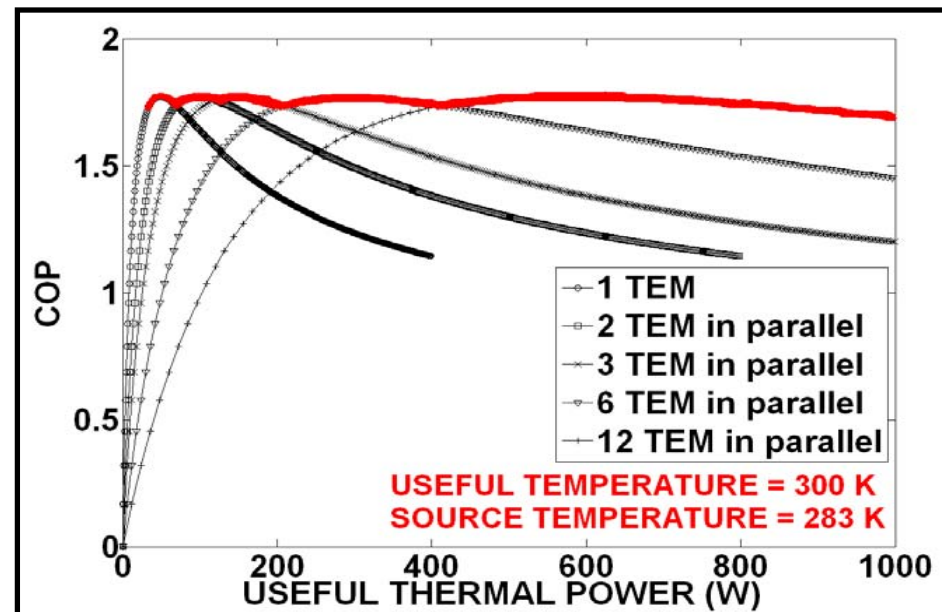
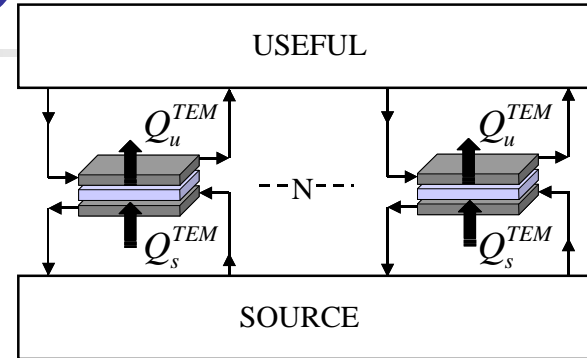


# Association parallèle

$$\Delta T_{faces}^{tot} = \Delta T_{faces}^{TEM}$$

$$Q_u^{tot} = N^{parallel} \cdot Q_u^{TEM}$$

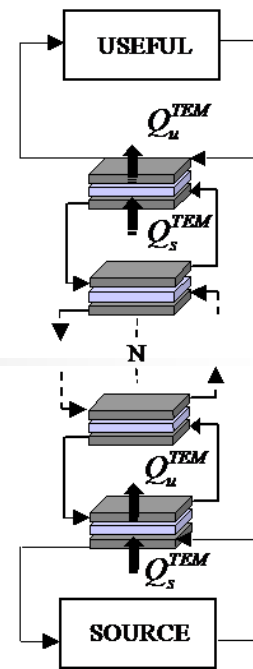
$$COP^{tot} = \frac{Q_u^{tot}}{P_e^{tot}} = \frac{N^{parallel} \times Q_u^{TEM}}{N^{parallel} \times P_e^{TEM}} = COP^{TEM}$$



Associations en parallèle

=>  $Q_c$  augmente à COP constant

# Association cascade



$$I_N^{TEC} = I_{N+1}^{TEC} = I^{opt}$$

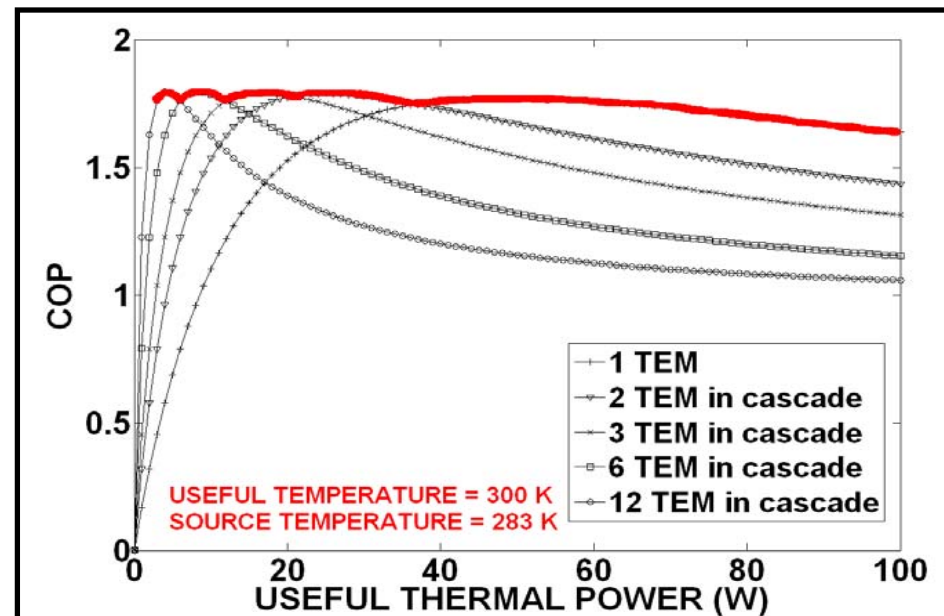
$$Q_u^{tot} \approx \frac{Q_u^{oneTEM^*}}{N^{cascade}}$$

$$COP^{tot} \approx COP^{oneTEM^*}$$

\* Système fait d'une unité avec les mêmes conditions de températures

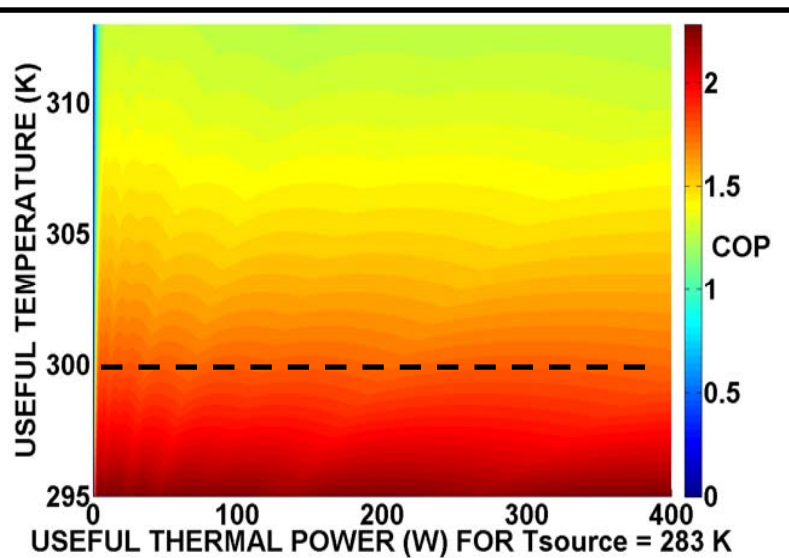
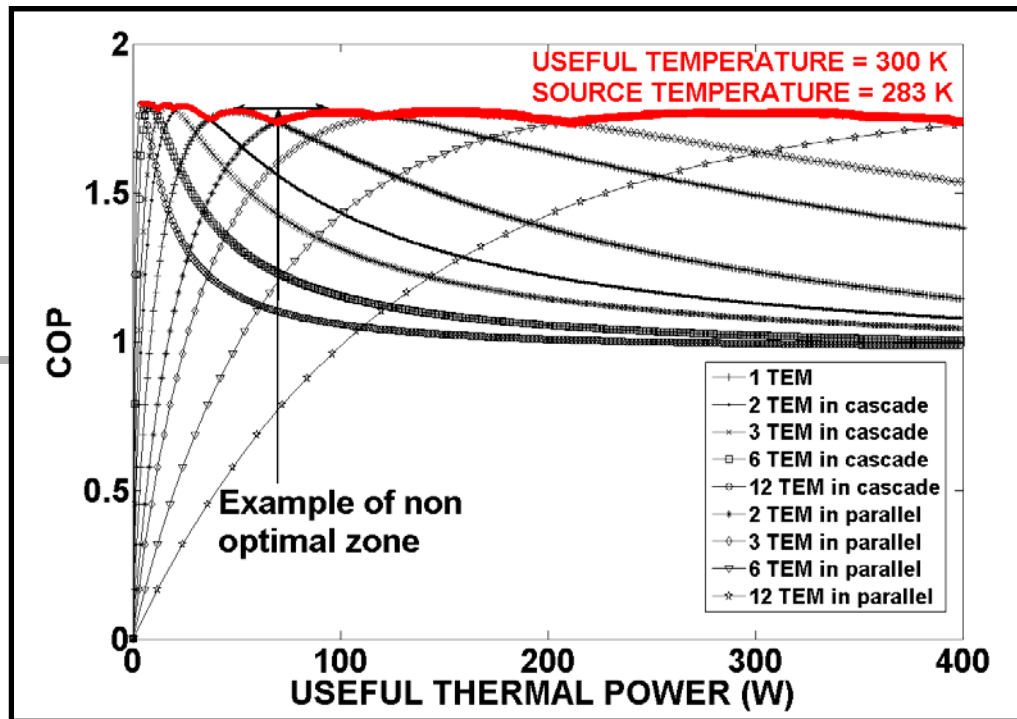
Associations en cascade

=>  $Q_c$  diminue à COP constant

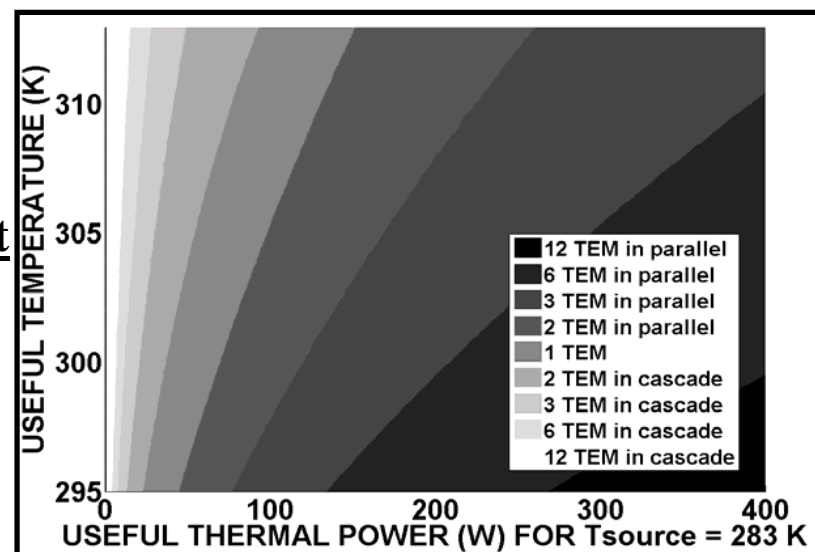


# Gestion

*Brevet N° FR 10 53420*



Management

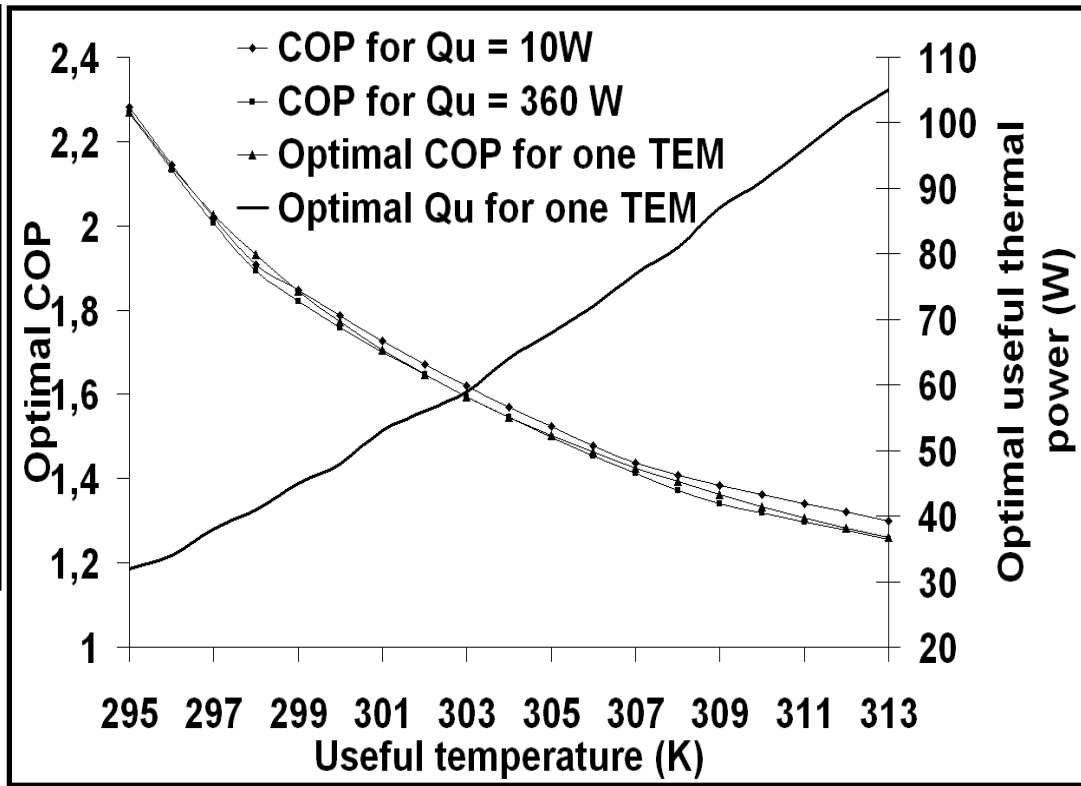
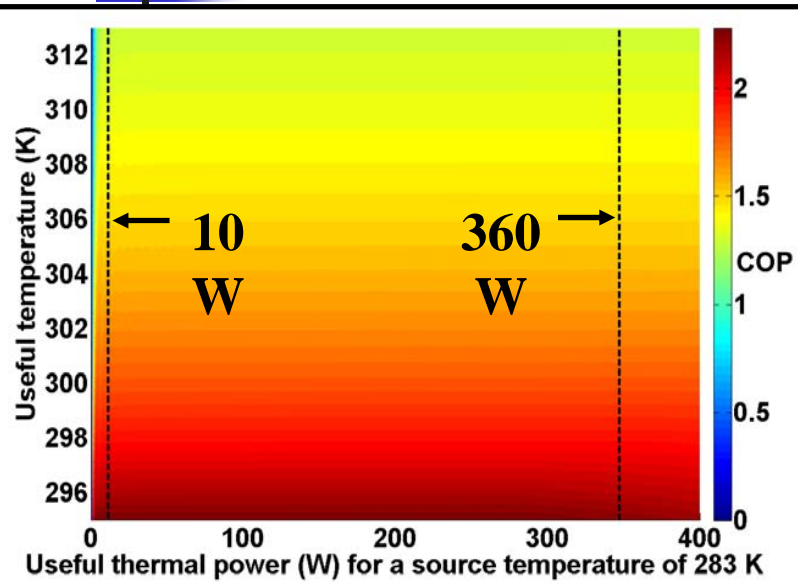


Couplage d'association en cascade et en parallèle

« Cartographie » correspondante



# Gestion

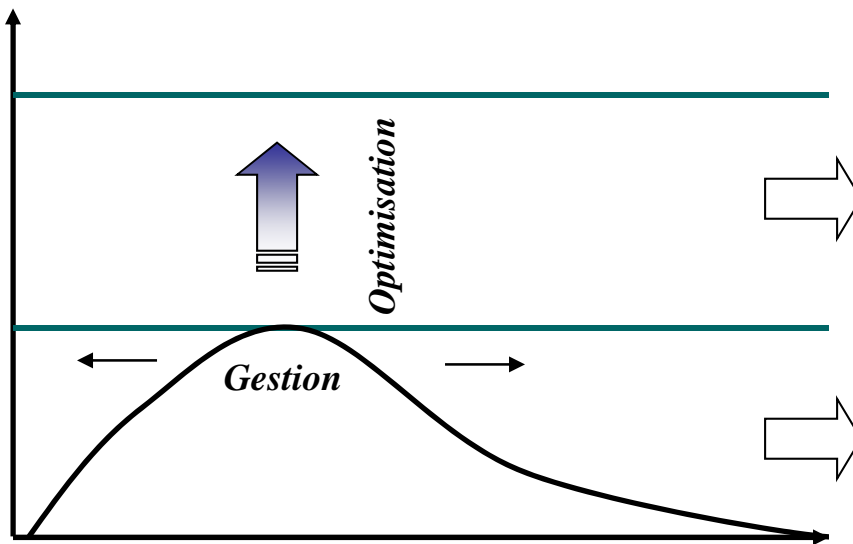


Le COP optimal peut être conservé pour toute demande de puissance

# Conclusion & Perspectives

$$COP = f \left( T_{\text{fluides}}, R_{\text{th}}^{\text{échangeur}}, ZT \right) \neq f \left( Q_c \right)$$

*COP optimal*



- Sources de température
- Matériaux
- Échangeurs

- Gestion du système

*À  $\Delta T$  fluides fixé !!! Puissance utile*



# Partenaires et Projets

Intitulé	Responsable scientifique	Type de financement	Taux d'implication	Partenaires	Date de début	Date de fin
Thèse de B. David	L. Luo	Privé	50%	ACOME	01-11-2008	31-10-2011
Thèse de K. Ye Weon	G. Fraisse	Privé	25%	EDF R&D	01-10-2009	31-09-2012
SYSPACTE	M. Aït Ameur	FUI	10%	ACOME / ANJOS / CSTB / CRISMAT / ICG	01-06-2009	31-05-2012
OTOGHET	Ch. Goupil	PIE CNRS	5%	CRISMAT / ICMCB	01-04-2009	31-03-2012

## *Thèses en cours*

**Benjamin David**, Thèse CIFRE avec *ACOME*, « Amélioration de l'efficacité énergétique d'une solution de chauffage et de rafraîchissement basse température innovante », débutée le 01/10/2008

**YeWeon Kim**, Thèse CIFRE avec *EDF R&D*, « Etude Numérique et Expérimentale d'une Pompe à Chaleur Thermoélectrique Innovante basée sur une Conception Intégrée et la Technique du Jet Impactant », débutée le 01/10/2008



# Communications

---

## *Publications parues*

C. Goupil, Thermodynamics of the thermoelectric potential, *Journal of Applied Physics*, Vol. 106 (2009)

## *Publications à paraître*

B. David, J. Ramousse, L. Luo, M. Ait-Ameur, Optimized management of thermoelectric heat pumps, *Energy Conversion and management*

G. Fraisse, J. Ramousse, D. Sgorlon, Y.W. Kim, New analytical model including Thomson effect

## *Conférences internationales*

C. Goupil, Thermodynamics of the thermoelectric potential, *28rd International Conference on Thermoelectricity, ICT 2009*, Freiburg, July 2009.

B. David, J. Ramousse, L. Luo, Management of a thermoelectric heat pump, *Clima2010, 10th REHVA World Congress*, Antalya – Turkey, 9-12 Mai 2010 (Oral)

## *Conférences nationales*

B. David, J. Ramousse, L. Luo, G. Fraisse, Gestion optimisée du fonctionnement d'une pompe à chaleur thermoélectrique, *Congrès Français de Thermique, SFT 2010*, Le Touquet, 25-28 mai 2010, (Poster)

G. Fraisse, J. Ramousse, B. David, D. Sgorlon, Y-W Kim, Les performances énergétiques des systèmes thermoélectriques, de l'échelle élémentaire au bâtiment, *GDR Thermoélectricité*, 6-7 juillet 2010, Grenoble (Oral).

B. David, J. Ramousse, L. Luo, M. Ait-Ameur, Amélioration de l'efficacité énergétique d'une solution de chauffage et de rafraîchissement par effet Peltier, *GDR Thermoélectricité*, 7-8 juillet 2009, Nancy

## *Brevet*

B. David, J. Ramousse, M. Ait Ameur, L. Luo, "Optimisation gestion PACTE cascade-parallèle", BFF100088, N° : FR 10 53420

*Merci de votre  
attention!!!*