

Les performances énergétiques des systèmes thermoélectriques, de l'échelle élémentaire au bâtiment

G. Fraisse¹, J. Ramousse¹, L. Luo¹
M. Cosnier¹, D. Sgorlon¹, YW. Kim¹, B. David¹
A. Agbossou¹, Q. Zhang¹
C. Goupil², M. Lazard³

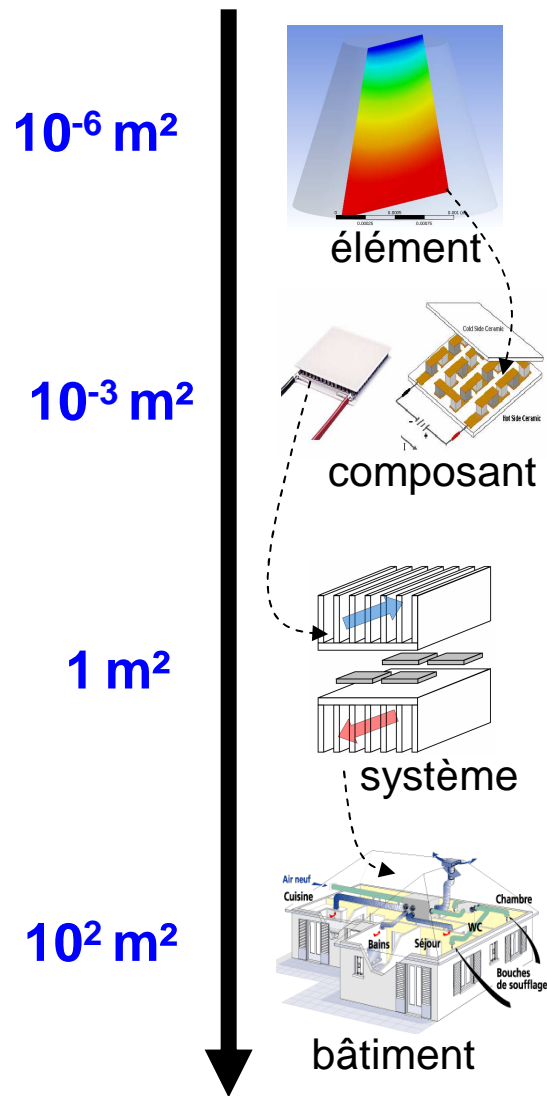
1 : LOCIE 2 : CRISMAT 3 : InSIC

Réunion du GDR Thermoélectricité, 6-7 juillet 2010, Grenoble

Sommaire

- 1 Les différentes échelles**
- 2 Modélisation des effets thermoélectriques**
- 3 Du module au système thermoélectrique**
- 4 Intégration des systèmes TE au bâtiment**
- 5 Conclusion**

Les différentes échelles



Multi-Échelles

$$Q_H = \alpha I T_H - K \Delta T + \frac{RI^2}{2}$$

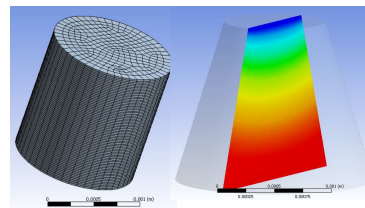
Simplifiée

$$T(x) = T(0) + \left(T(L) - T(0) - \frac{c}{b} L \right) \frac{\exp(-bx) - 1}{\exp(-bL) - 1} + \frac{c}{b} x$$

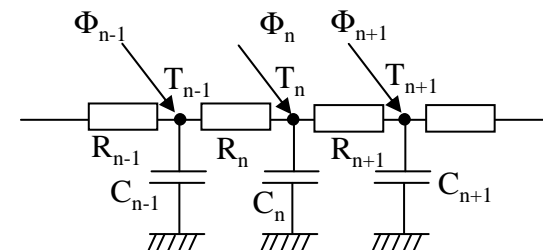
Analytique

Modélisation TE

Eléments finis



Analogie



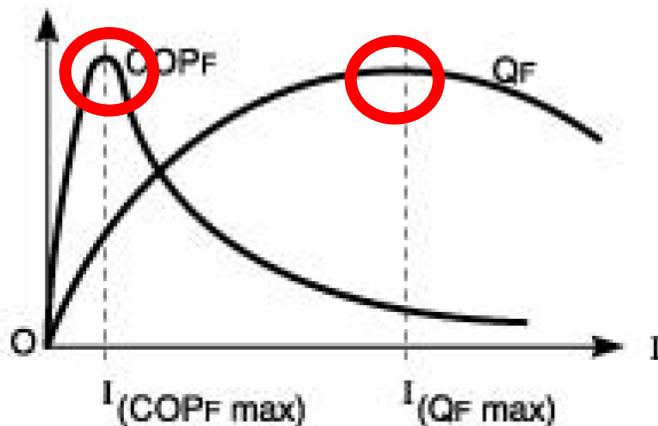
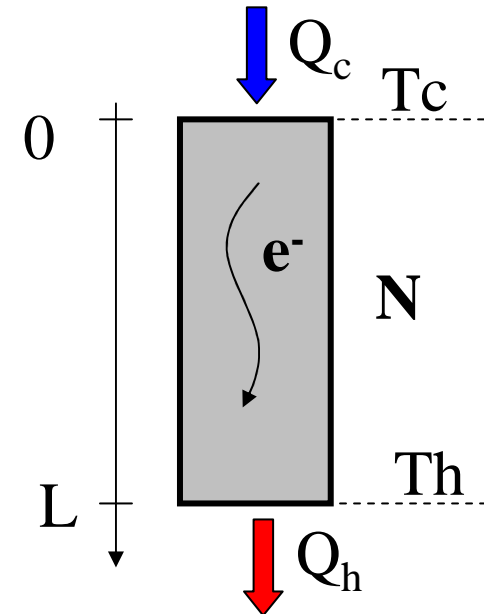
Modélisation des effets thermoélectriques

➤ Approche simplifiée

$$Q_c = \alpha \cdot I \cdot T_c - \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2 - K \cdot \Delta T$$

$$Q_h = \alpha \cdot I \cdot T_h + \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2 - K \cdot \Delta T$$

$$\alpha, \rho, \lambda, \tau \quad \text{pour} \quad \bar{T} = \frac{T_c + T_h}{2}$$



Quelle performance ?

RT2005 - 2012

➡ COP > 2.58

Amélioration des modèles simplifiés

$$Q_H = \alpha \cdot I \cdot T_H - K \cdot \Delta T + \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2 - \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot I \cdot \Delta T$$

$$\alpha, \rho, \lambda, \tau$$

$$Q_C = \alpha \cdot I \cdot T_C - K \cdot \Delta T - \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2 + \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot I \cdot \Delta T$$

$$\bar{T} = \frac{T_C + T_H}{2}$$

Amélioration n°1 :

Contribution de l'effet Thomson

$$Q_H = \alpha_H \cdot I \cdot T_H - K \cdot \Delta T + \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2 - \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot I \cdot \Delta T$$

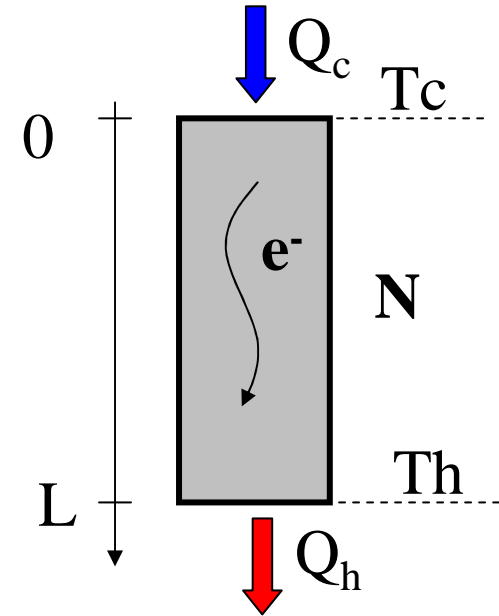
$$Q_C = \alpha_C \cdot I \cdot T_C - K \cdot \Delta T - \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2 + \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot I \cdot \Delta T$$

$$\alpha_C, \alpha_H$$

$$\bar{T} = \frac{T_C + T_H}{2}$$

Amélioration n°2 :

Effet en surface et « volumique »



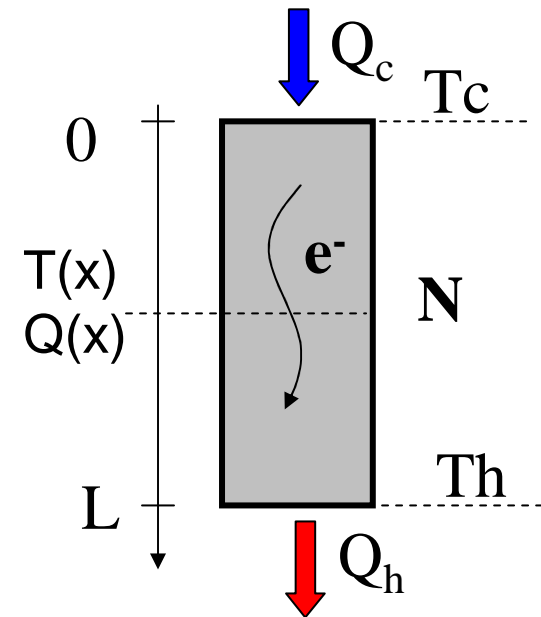
➤ Solution analytique

$$Q(x) = \alpha \cdot I \cdot T(x) - \frac{k \cdot \rho_e \cdot I}{\tau} + \frac{\left(-Q_F + \frac{k \cdot \rho_e \cdot I}{\tau}\right) \cdot \frac{Q_T}{Q_F}}{\exp\left[\frac{Q_T}{Q_F} \left(1 - \frac{x}{L}\right)\right] - \exp\left[-\frac{Q_T}{Q_F} \frac{x}{L}\right]}$$

$$T(x) = T(0) + \left(T(L) - T(0) - \frac{c}{b} L\right) \cdot \frac{\exp(-b \cdot x) - 1}{\exp(-b \cdot L) - 1} + \frac{c}{b} x$$

$$Q_F = k \cdot A \cdot \frac{T(L) - T(0)}{L} \quad b = -\frac{\tau j}{k} \quad c = -\frac{\rho_e j^2}{k}$$

$$Q_T = \tau \cdot I \cdot (T(L) - T(0))$$

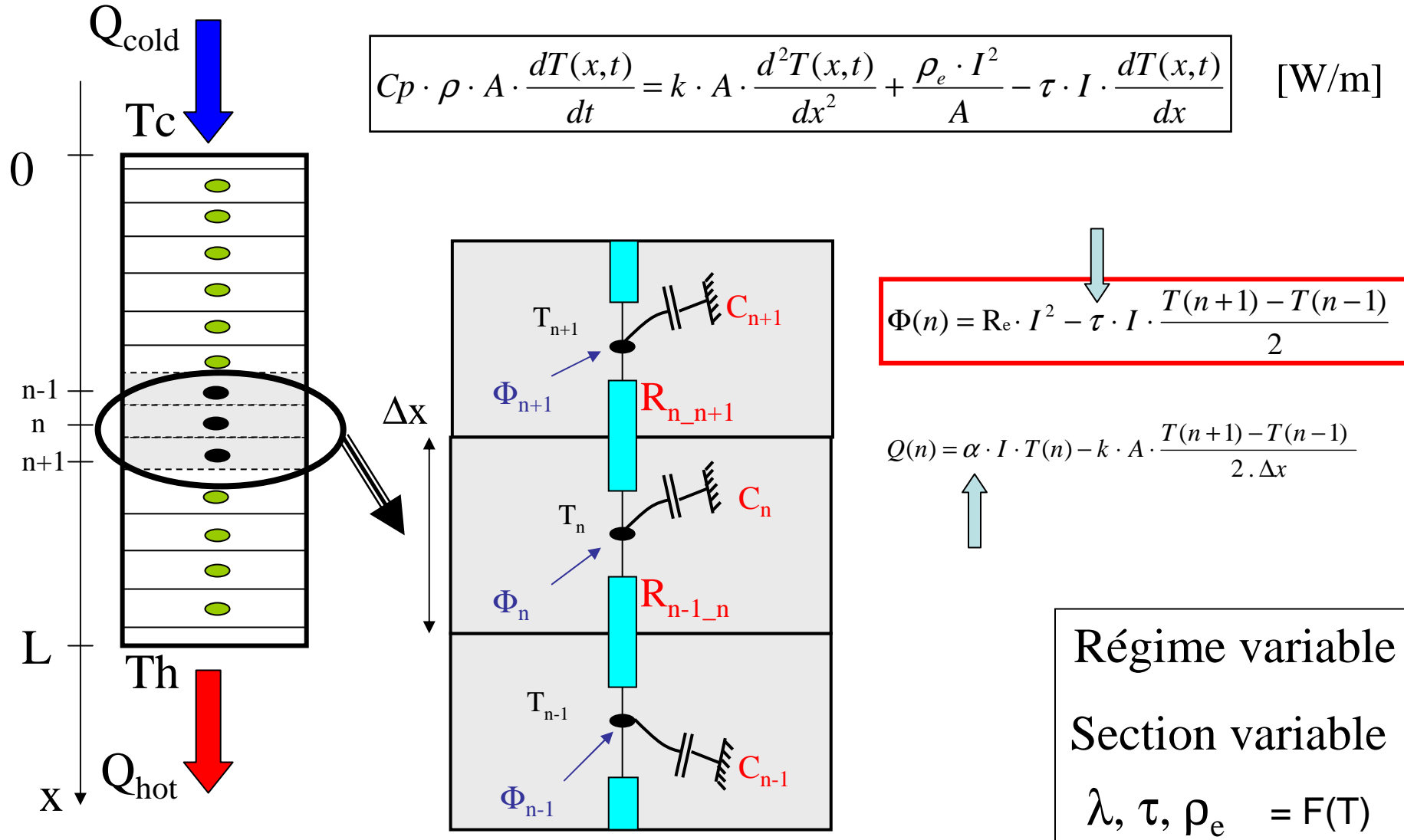


Paramètres constants + régime permanent



📖 A. Chakraborty, K.C. Ng. Thermodynamic formulation of temperature–entropy diagram for the transient operation of a pulsed thermoelectric cooler. International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 49, Issues 11-12, June 2006, Pages 1845-1850.

➤ Nouveau modèle : analogie électrique



➤ Éléments finis

Logiciel ANSYS-CFX

The screenshot shows the ANSYS Workbench interface. The 'Analysis Systems' toolbox on the left lists various simulation types. The 'Project Schematic' on the right shows a 'Thermal-Electric (ANSYS)' system with a sequence of steps: 1. Thermal-Electric (ANSYS), 2. Engineering Data, 3. Geometry, 4. Model, 5. Setup, 6. Solution, and 7. Results. Arrows point from these steps to descriptive labels: 'Thermoélectrique' (from step 1), 'matériaux géométrie' (from steps 2 and 3), and 'maillage hypothèses résolution post' (from steps 4, 5, 6, and 7). A red warning triangle is placed next to the 'CFD' label, which is also pointed to by an arrow from the 'Fluid Flow (CFX)' option in the toolbox. Another red warning triangle is placed next to the 'Calculs longs' label, which is pointed to by an arrow from the 'Direct Optimization (Beta)' option in the toolbox. The '3D' label is positioned near a 3D visualization of a meshed cylindrical part.

CFD



optimisation

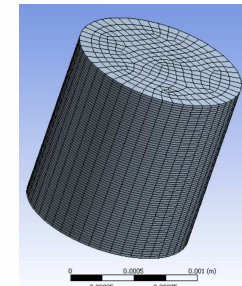
Calculs longs



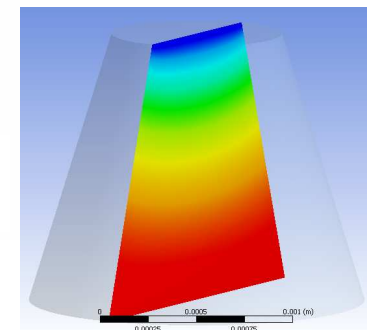
Thermoélectrique

matériaux
géométrie

maillage
hypothèses
résolution
post



3D



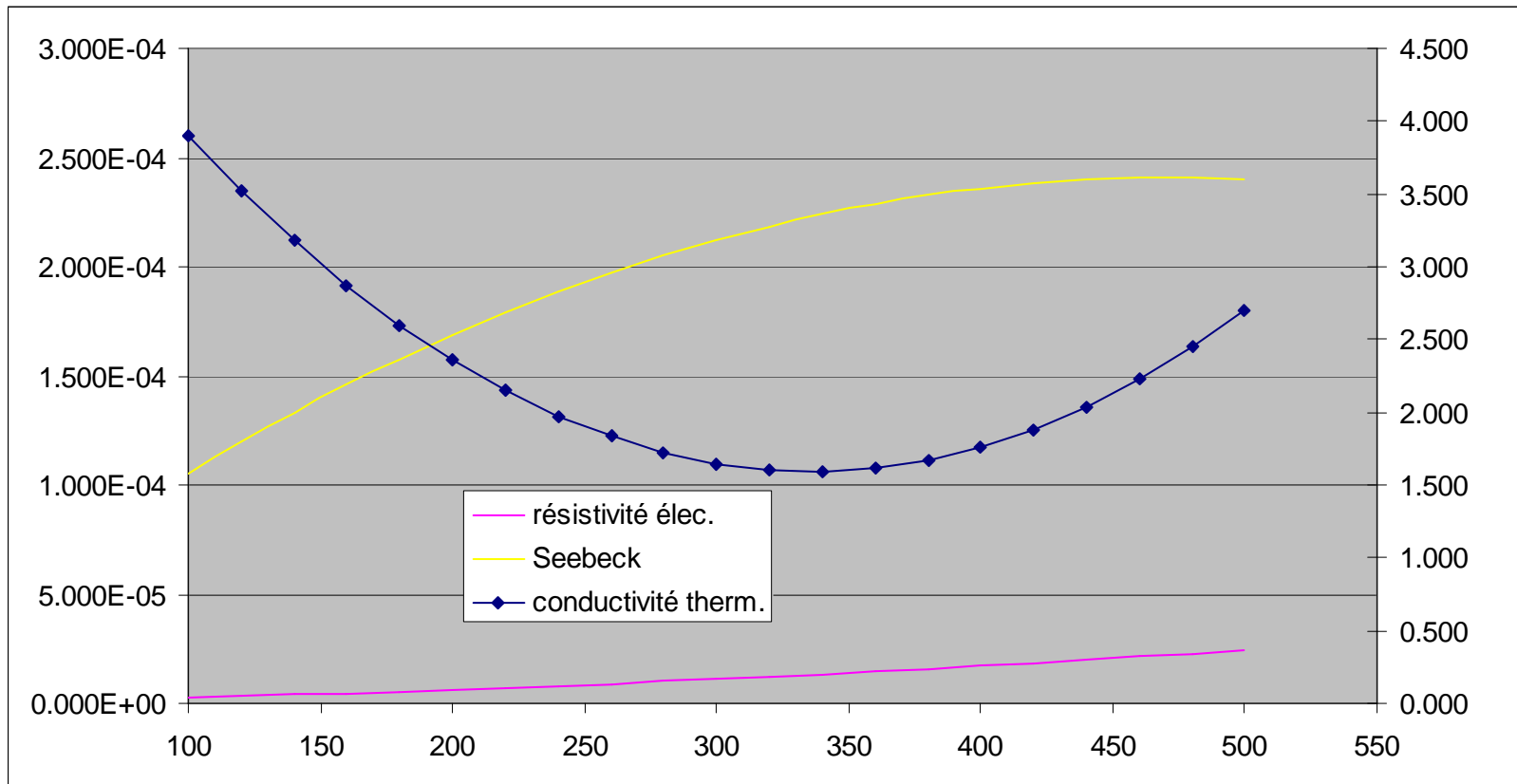
➤ Comparaison des modèles

Bi₂Te₃ $\Delta T = 300\text{K} - 270\text{K}$ $L = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ $A = 1.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ (constant)

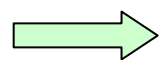
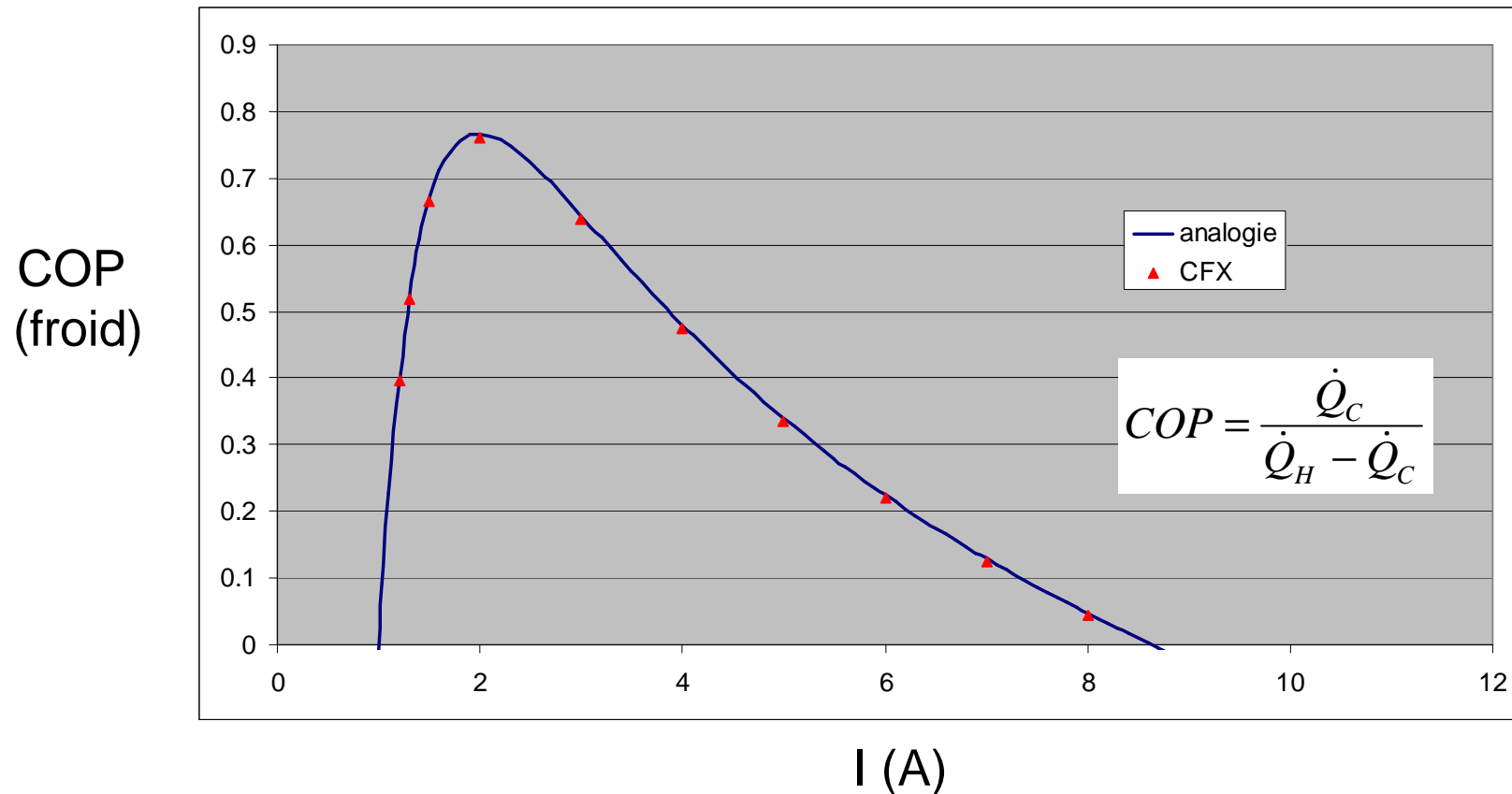
Analogie 100 nœuds (couches)

CFX : 19130 éléments

} Paramètres : f(T)



Comparaison analogie / CFX (EF)



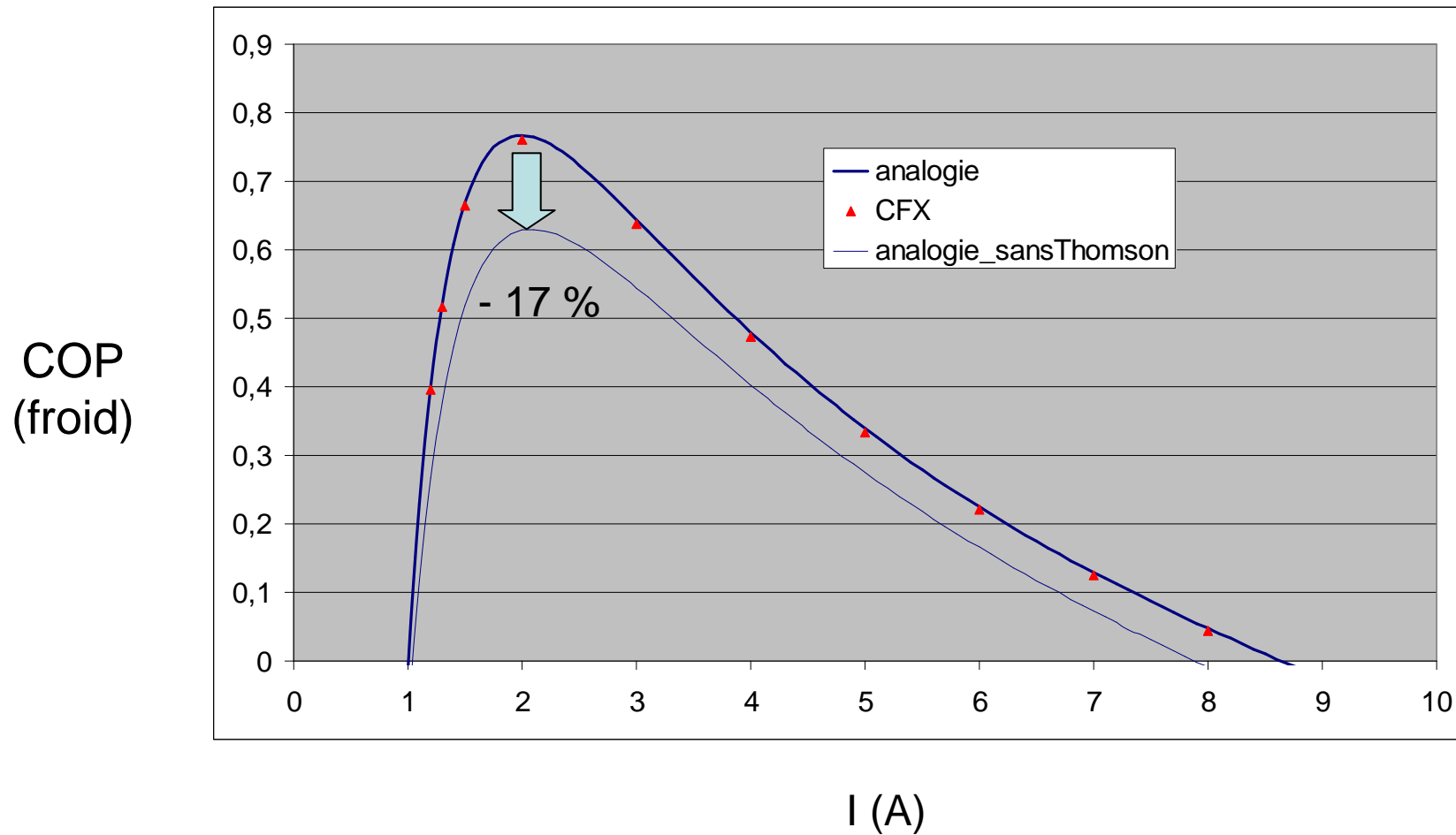
Résultats très proches

$\lambda, \tau, \rho_e \dots$ fonction de T

Discretisation « fine »

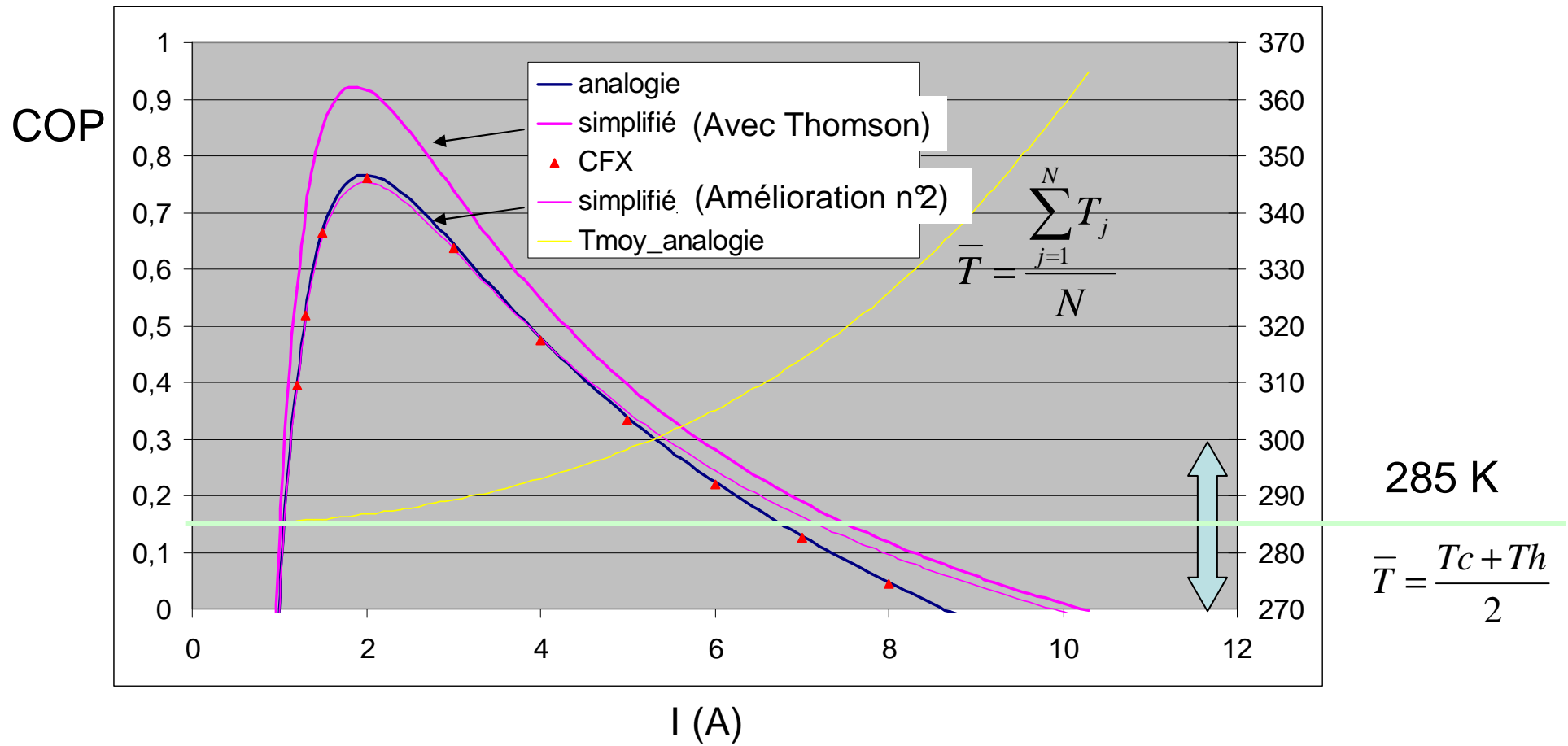
Modèle analogique : performance / t_{calcul}

Contribution de l'effet Thomson



L'effet Thomson améliore sensiblement le COP

Limites de la modélisation simplifiée




 $\bar{T} \approx \frac{T_c + T_h}{2}$
 si l'effet joule est limité

Du module au système thermoélectrique

➤ Un problème thermique complexe

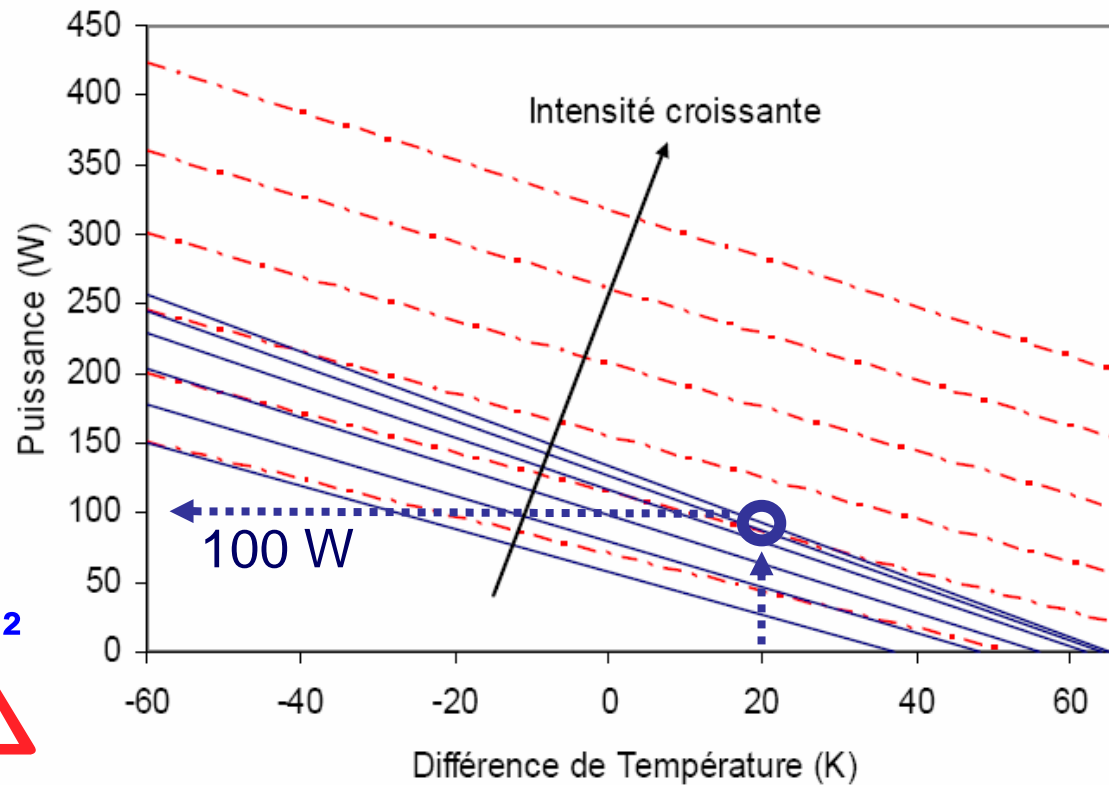
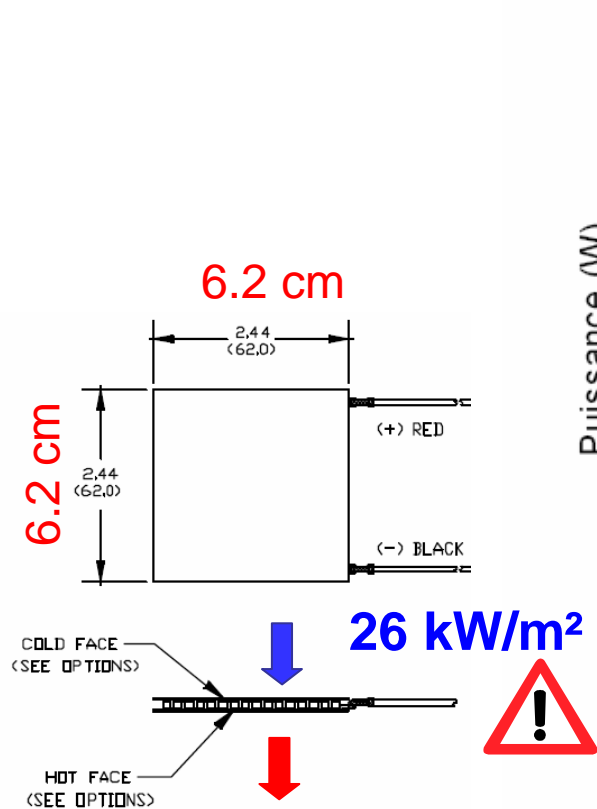
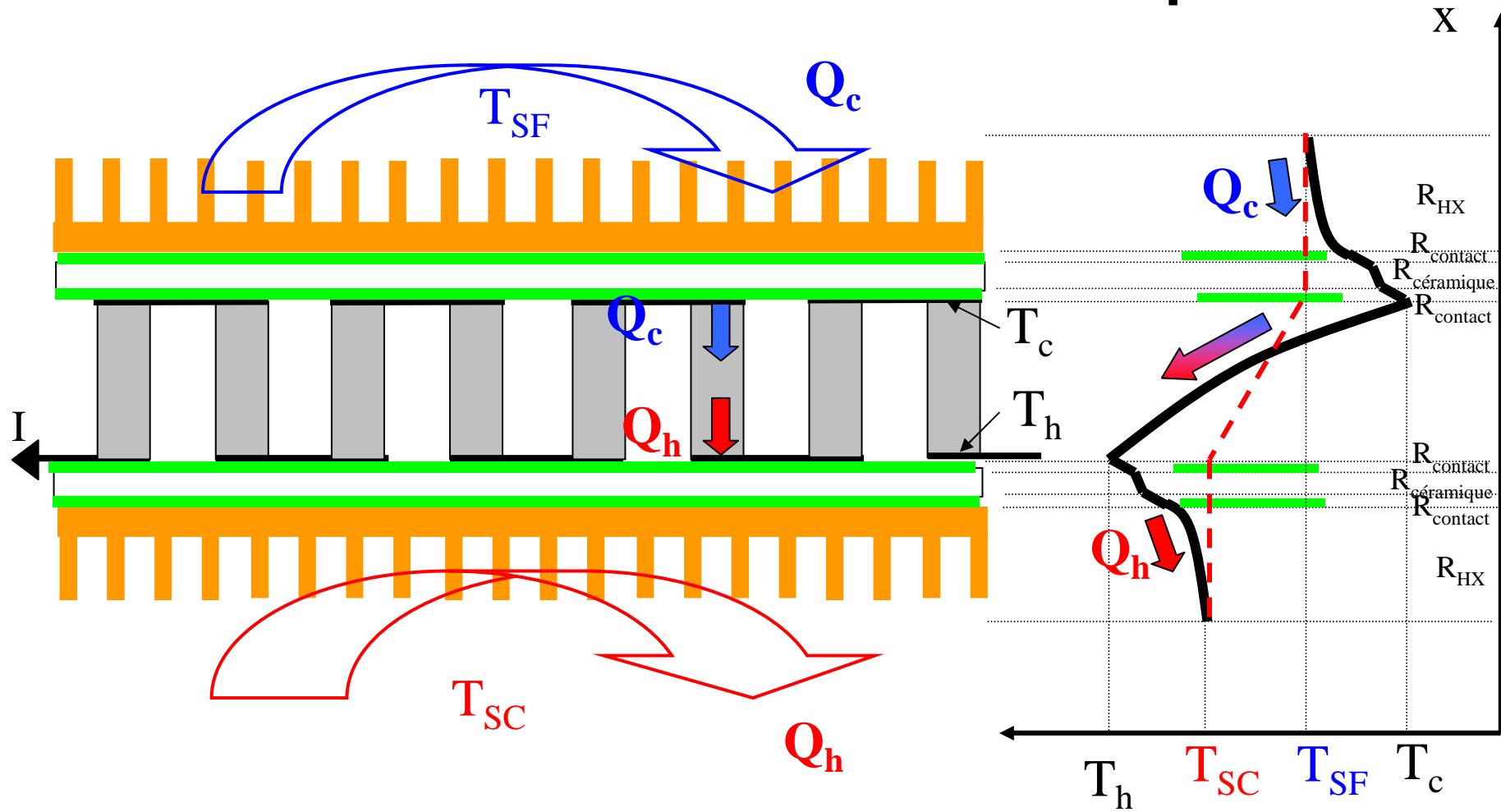
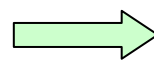


figure I-22 : Puissance froide (traits pleins) et chaude (pointillés) en fonction de la différence de température entre les faces d'un modules Melcor CP-127-06L, I=2, 4, 6, 8, 10, 12A

➤ Ennemi n°1 : les résistances thermiques



Contact + céramique + HX



Augmente $T_h - T_c$

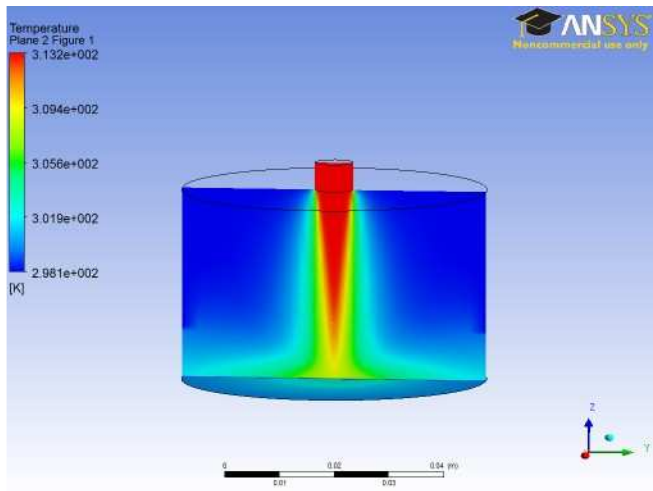
Diminue le COP



➤ Quelques pistes (LOCIE)

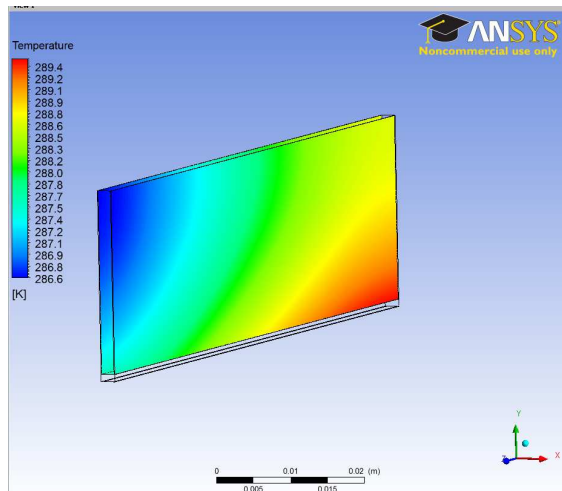
$$\Phi = \eta \cdot h \cdot S \cdot \Delta T = \frac{\Delta T}{R}$$

Augmenter h

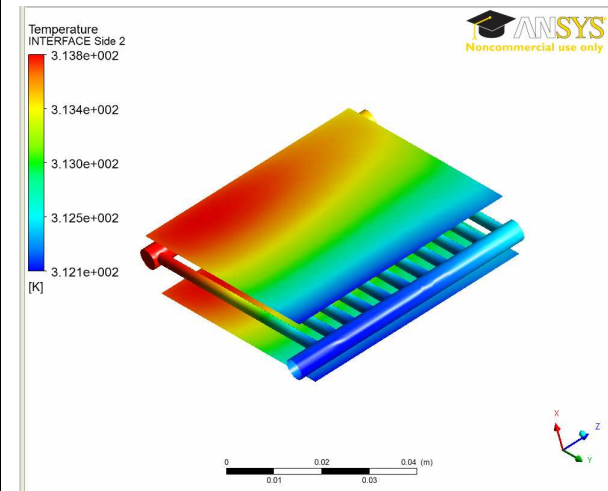


Jet impactant

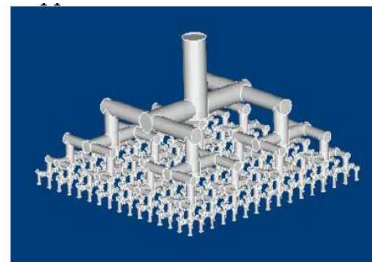
Augmenter S



Ailettes



Micro-canaux



Approche
constructale

Petite échelle → Module Peltier

... et grande échelle → Aéronautique / Bâtiment

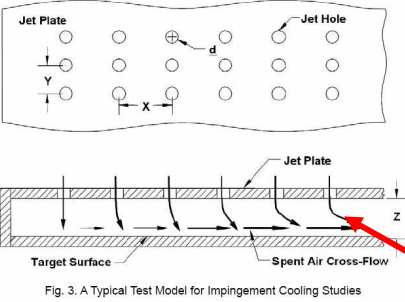
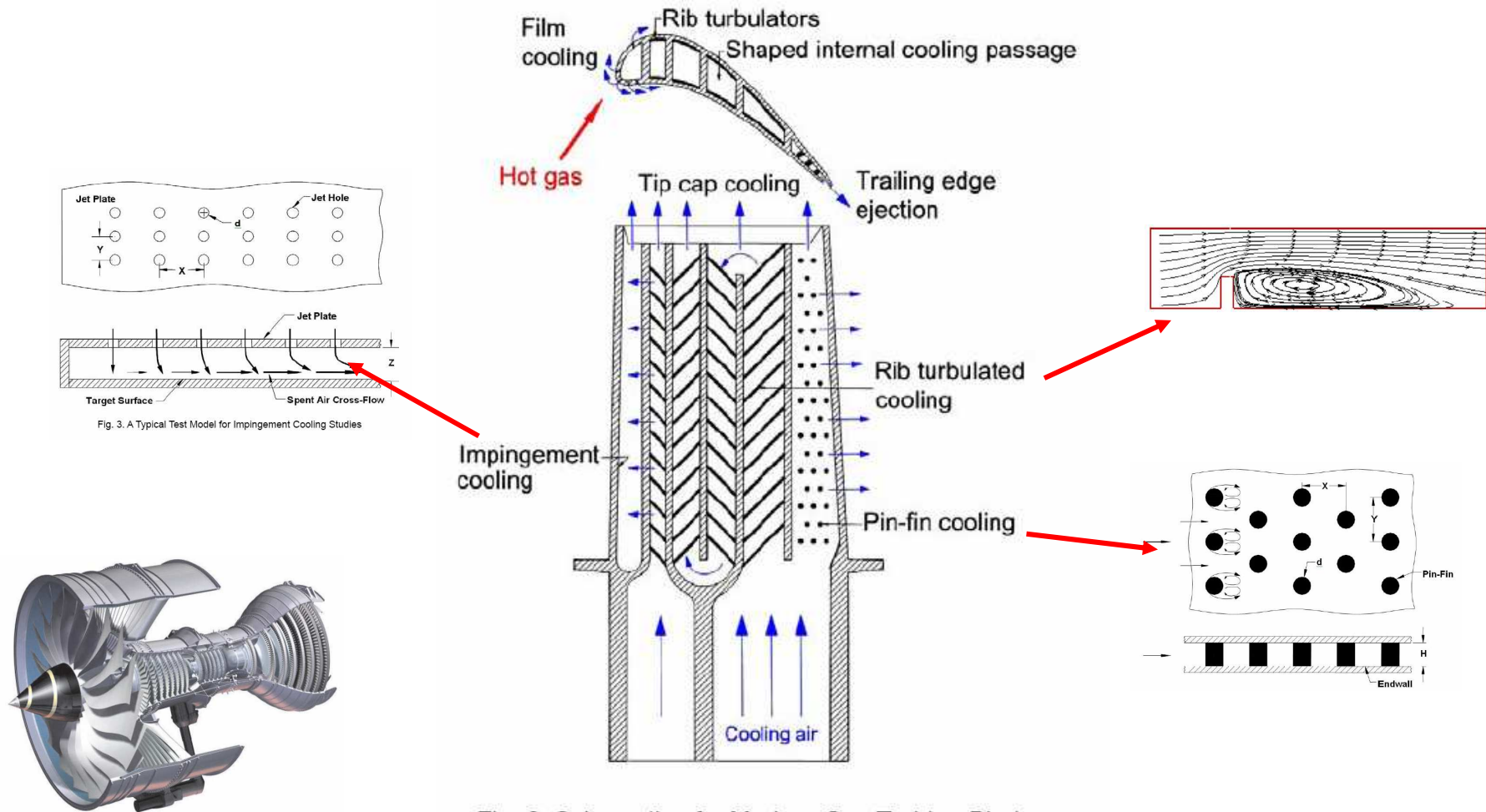
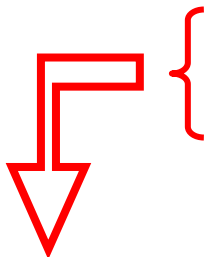


Fig. 6. Schematic of a Modern Gas Turbine Blade with Common Cooling Techniques

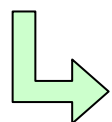
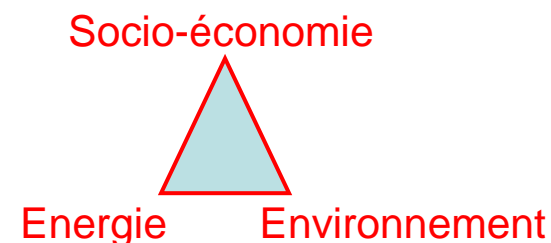
Intégration des systèmes TE au bâtiment

Un mode de conception basique : « *démarche Négawatt* »

- Trois étapes
1. Réduire les besoins
 2. Efficacité des systèmes
 3. Energies renouvelables



La meilleure efficacité globale ?



Intégration énergétique

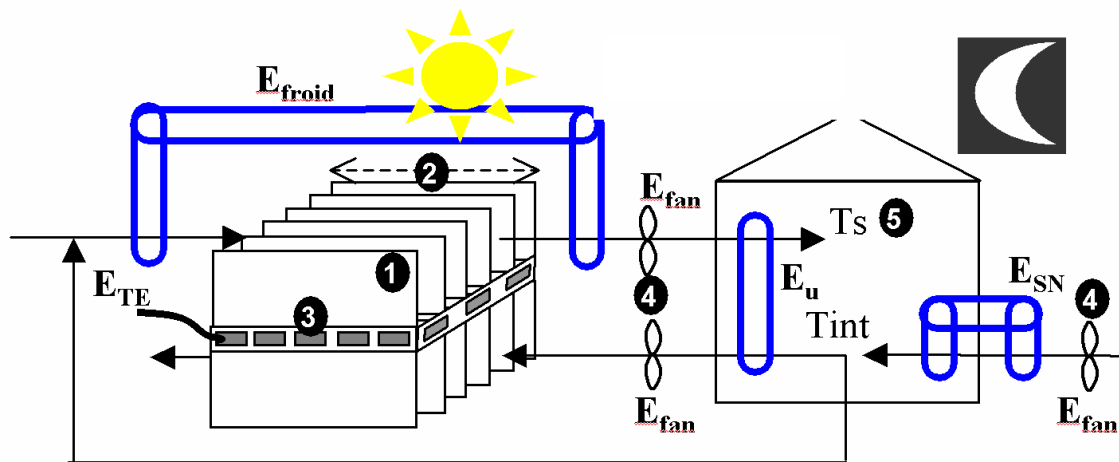
=

Optimisation dynamique multi-critère

➤ Exemple d'un double système de refroidissement

Etude numérique

- Double flux thermoélectrique avec recyclage
- Sur-ventilation nocturne



BBC

Double flux TE

Thermoélectricité : COP_{max} $\xrightarrow{\text{Efficacité}}$ ΔT_{min} \longrightarrow

Habitation : sur-ventilation limitée la nuit



Dimensionnement

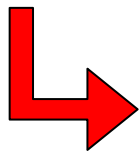
Contrôle-Commande

(paramètres optimisés : ① ② ③ ④ ⑤)

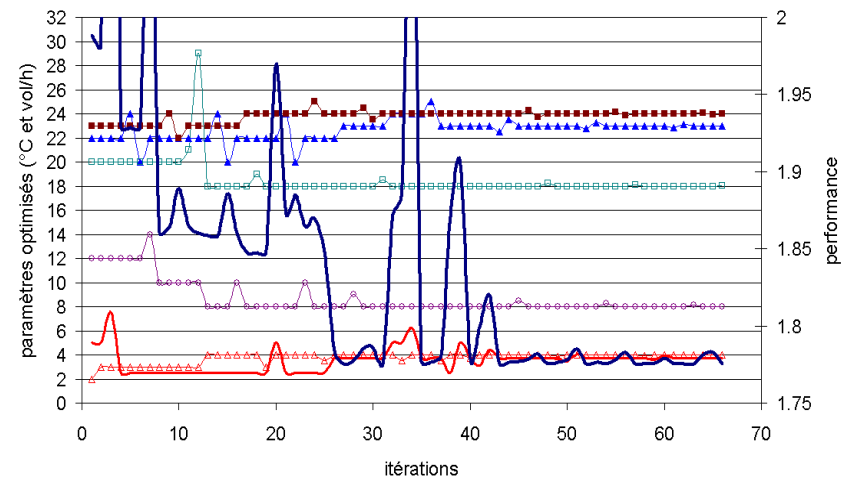
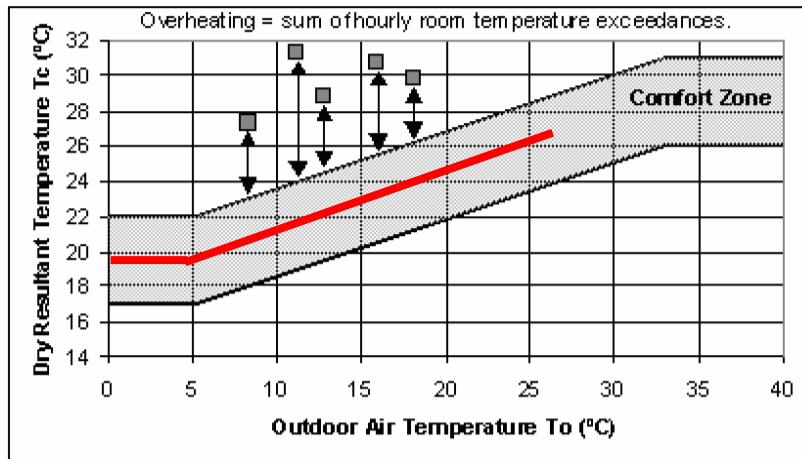


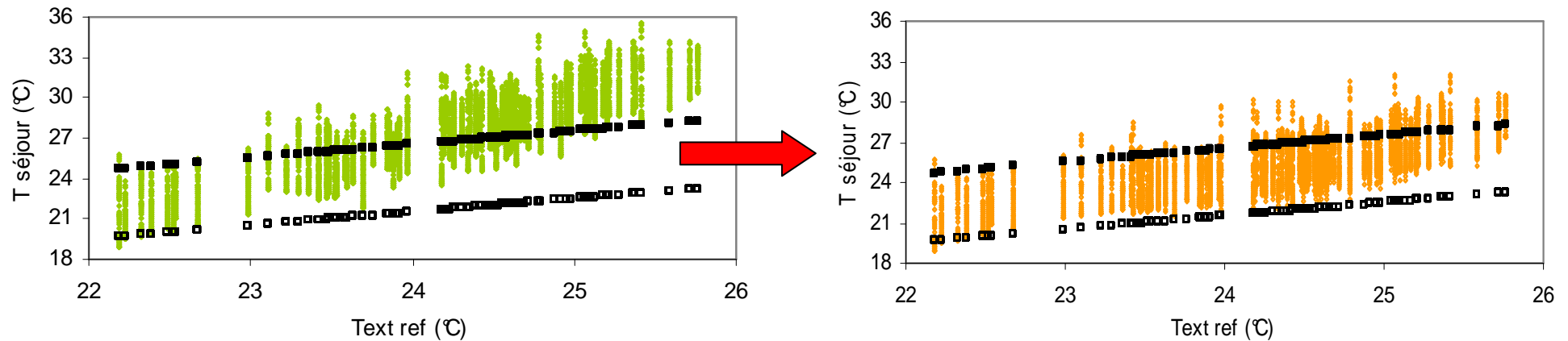
GenOpt
Generic Optimization Program

Hook-Jeeves



$$Perf = 1.2 \frac{(IDH)^2}{(IDH_{ref})^2} + 1.2 \frac{(E)^2}{(E_{ref})^2} + 0.6 \frac{(N)^2}{(N_{ref})^2}$$





- refroidissement diurne thermoélectrique (**1.4 vol/h**) et sur-ventilation nocturne (**1.8 vol/h**)

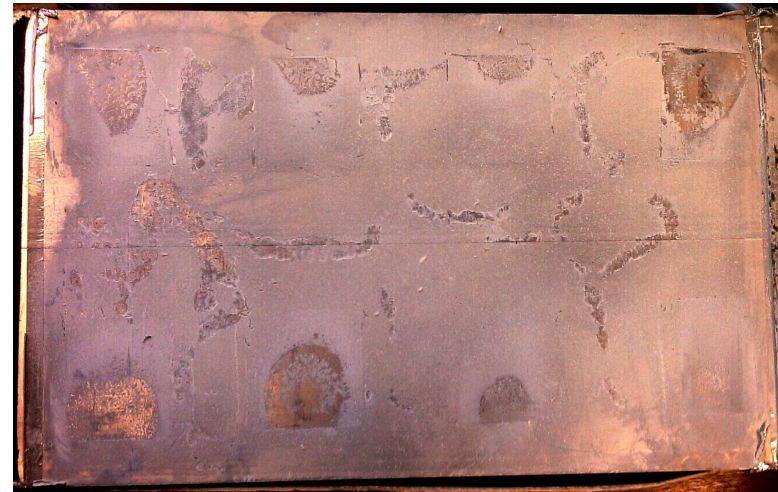
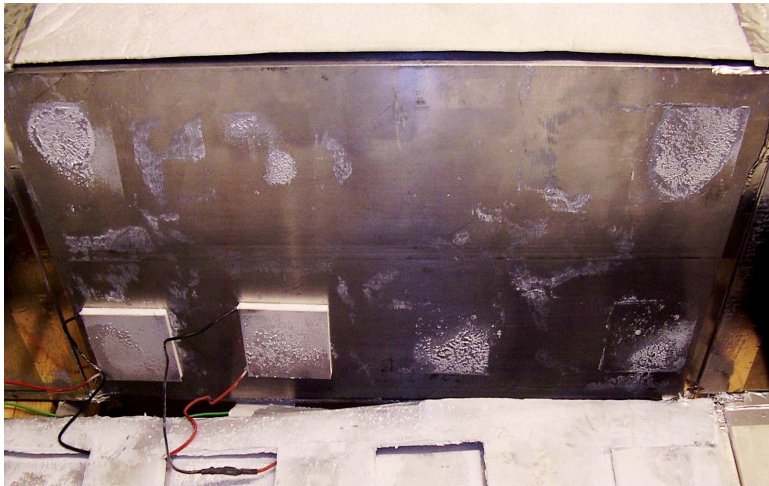
- COP des modules thermoélectriques sur la période est de **2.5 en mode refroidissement**

- **importance de l'approche globale d'optimisation**

📖 Matthieu Cosnier : « Conception et optimisation d'un système de production de chaud et de froid avec des modules thermoélectriques intégrés au système de ventilation d'un bâtiment ». Thèse de doctorat, septembre 2008 (co-directeurs : G. Fraisse et L. Luo)

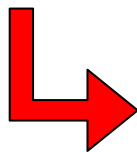
Etude expérimentale

Graisse thermique + Planéité de échangeur



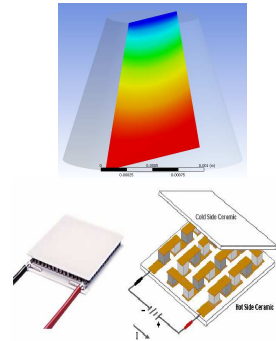
- Epaisseurs variables entre modules ($\Delta e = 0,2$ mm)
- Mauvaise planéité des faces des modules (+0,16 mm; -0,08 mm)

$$\text{COP}_{\text{froid}} = 0.5 / 1.3$$



Améliorer la qualité des modules

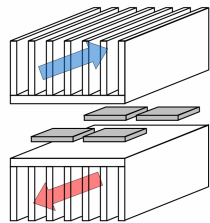
Conclusions



Limites des modèles à coefficients constants

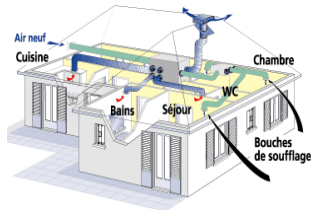
→ analogie électrique

Rôle de l'effet Thomson



Approche multi-physique : condensation, CFD

Résistances thermiques , contrôle-commande



Applications TEC à faible ΔT (COP)

Intégration énergétique = efficacité globale

➤ Projets en cours

TEC-TEH

SYSPACTE : Panneau ACtif ThermoElectrique pour le Bâtiment

FUI-6 (ACOME, CRISMAT, ICG, CSTB, ANJOS)

2 PAC thermoélectrique : chauffage des bâtiments

Partenariat EDF + ACOME (2 thèses + financement)

INPACT : INTensification des transferts dans les Pompes A Chaleur

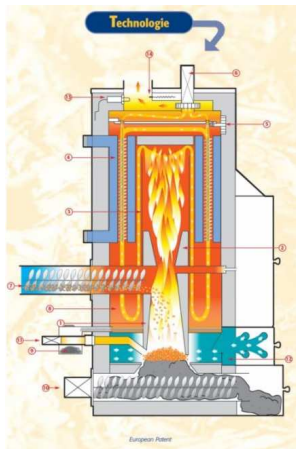
PE-CNRS (CRISMAT)

TEG

OTOGEHT : Optimisation Technologique d'Oxydes pour la Génération Electrique Haute Température

PR-CNRS (CRISMAT, ICMCB)

Thèse co-tutelle USTC-Chine : Micro-Génération électrique



Flamme : 1200°C

Gaz : 200-300°C
(sans condensation)

Gaz : 45-70 °C



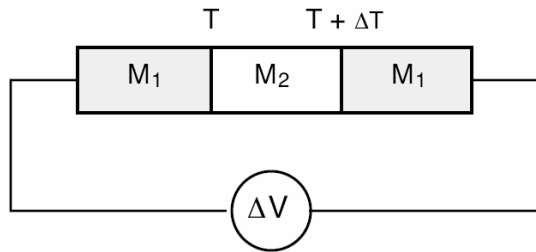
250 à 400°C

250 à 1000°C

Merci de votre attention



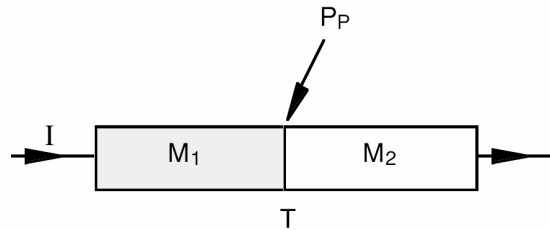
Effet Seebeck (1821)



2 métaux différents
2 jonctions à T° différentes

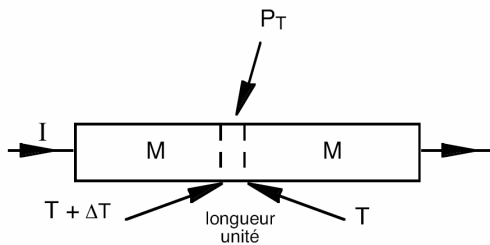
} apparition d.d.p. dans le circuit

Effet Peltier (1834)



Dégagement ou absorption de chaleur lors du passage d'un courant à la jonction entre 2 métaux ou semi-conducteurs différents

Effet Thomson (1854)



Dégagement ou absorption de chaleur lors du passage d'un courant dans un conducteur en présence d'un gradient de température

□ Effet Seebeck

$$dV_{1-2} = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T = \alpha \cdot \Delta T$$

α : coefficient Seebeck (V.K⁻¹)

thermocouple

TEG : production électrique

□ Effet Peltier

$$Q = \pm (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot I \cdot T = \pm \alpha \cdot I \cdot T$$

π : coefficient Peltier (V)

TEH-TEC : production chaud/froid

$$\alpha = \frac{\Pi}{T} \quad \tau = \frac{d\Pi}{dT} - \alpha = \frac{d\Pi}{dT} - \frac{\Pi}{T}$$

□ Effet Thomson

$$Q = \tau \cdot I \cdot \Delta T$$

τ : coefficient Thomson (V K⁻¹)

Rôle favorable en TEC