

Etude sur le dimensionnement des convertisseurs thermoélectriques en couches minces

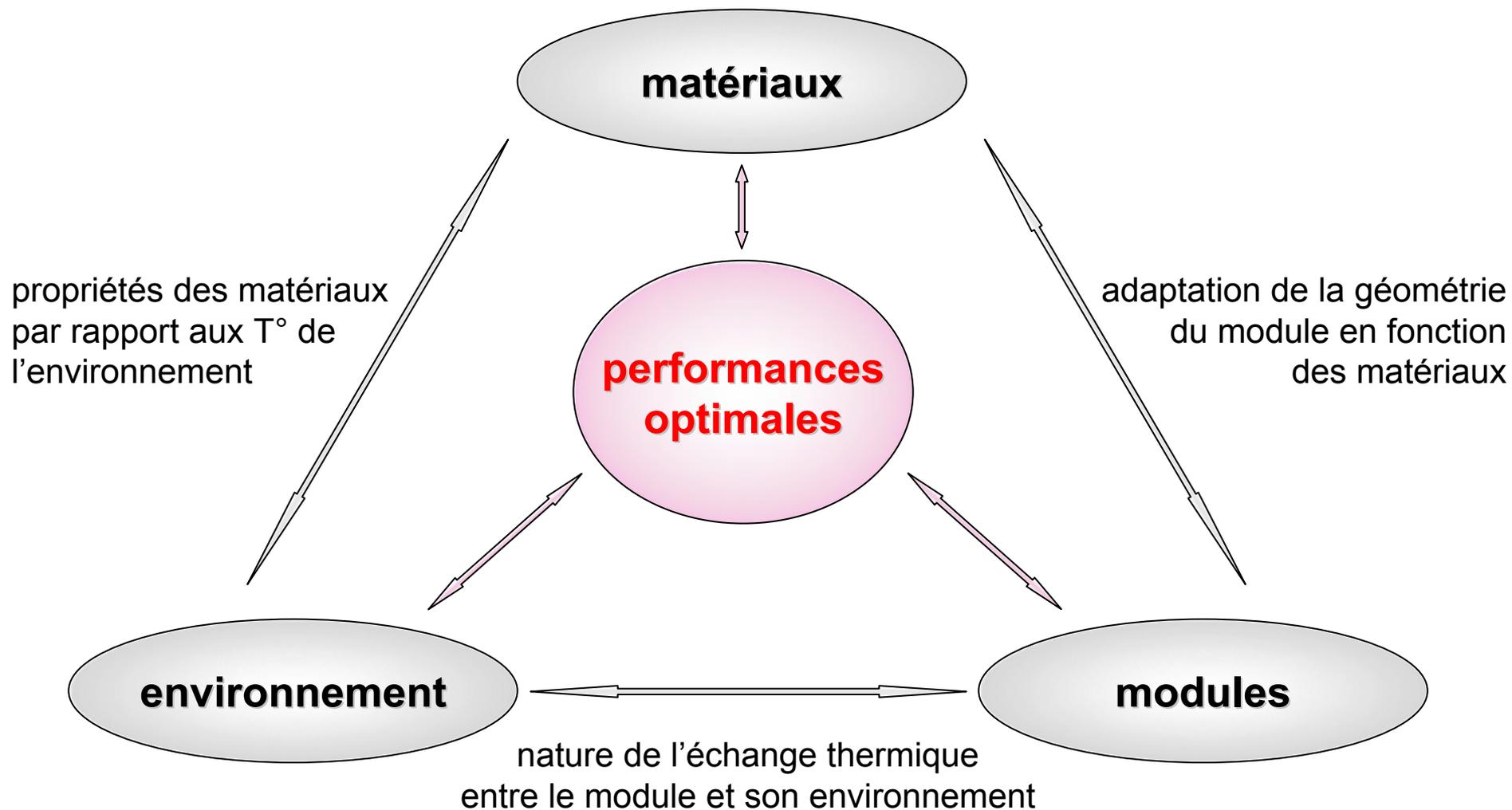
Guillaume Savelli, Marc Plissonnier

Sommaire

- 1 - Thermoélectricité : une problématique à 3 niveaux**
- 2 - Dimensionnement d'un système thermoélectrique**
- 3 - Optimisation des performances**
- 4 - Conclusions**

Sommaire

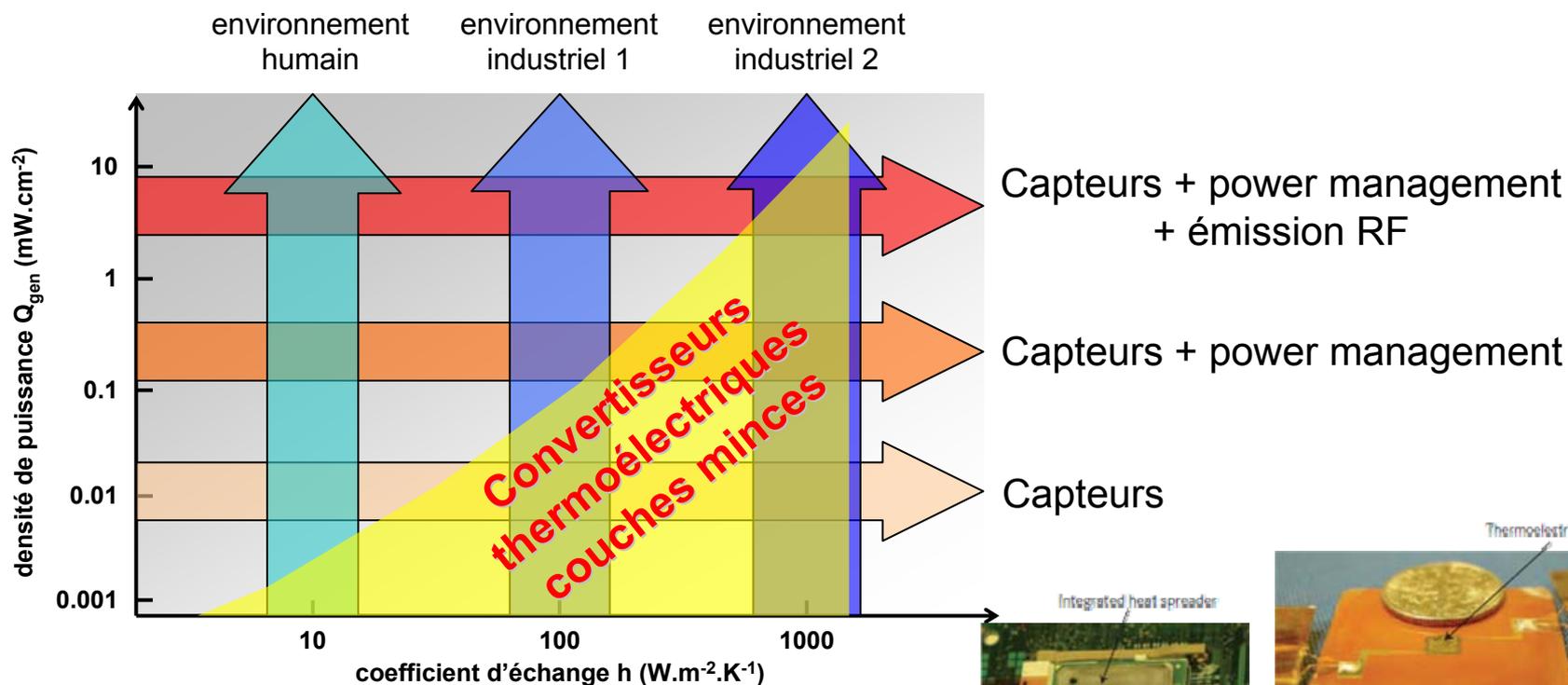
- 1 - Thermoélectricité : une problématique à 3 niveaux**
- 2 - Dimensionnement d'un système thermoélectrique
- 3 - Optimisation des performances
- 4 - Conclusions



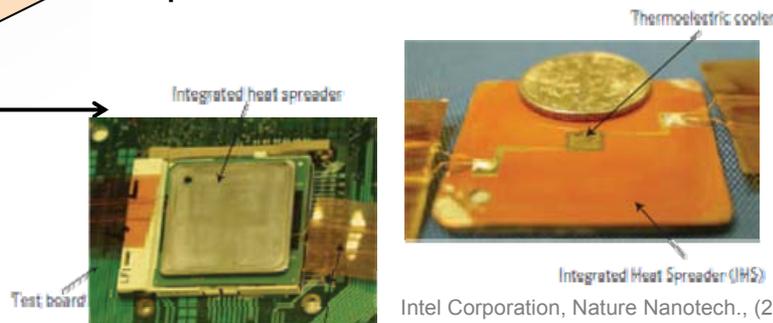
→ ces 3 domaines ne sont pas indépendants et sont à traiter simultanément !!

1 L'environnement... dicté par les applications...

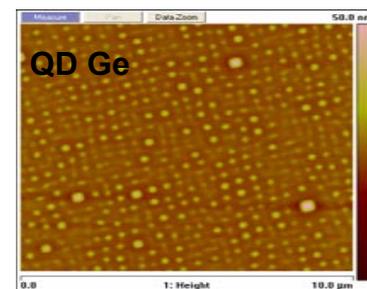
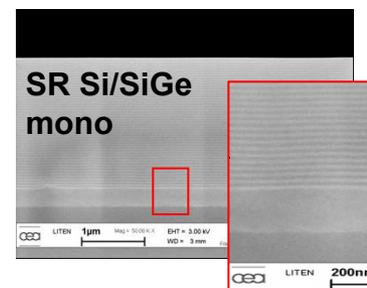
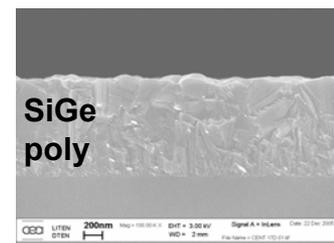
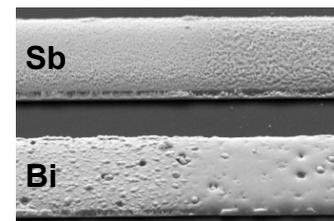
- Le milieu dans lequel sera introduit le module, et donc les matériaux, dépend des applications pour lesquelles il sera conçu !
- Les applications des modules TE couches minces :
 - applications majeures : **les capteurs** : grâce à une très bonne sensibilité en tension !!



→ refroidisseur TE localisé (par ex, pour puces électroniques...)



- 2005
- bismuth (n) / antimoine (p)
($e = qq \mu m$)
- 2006
- SiGe (n et p)
($e = qq \mu m$)
- 2007
- Superréseaux Si/SiGe (n et p)
($e_{monocouche} = 4 - 20 nm$)
- 2008
- Quantum dots Ge sur matrice Si
($e = 2 - 40 nm / \varnothing = 20 - 700 nm$)
- 2009
- Superréseaux de quantum dots Ge
 - Quantum dots siliciures sur matrice Si
- 2010
- Superréseaux de quantum dots de siliciures
($MoSi_2, TiSi_2, \dots$)

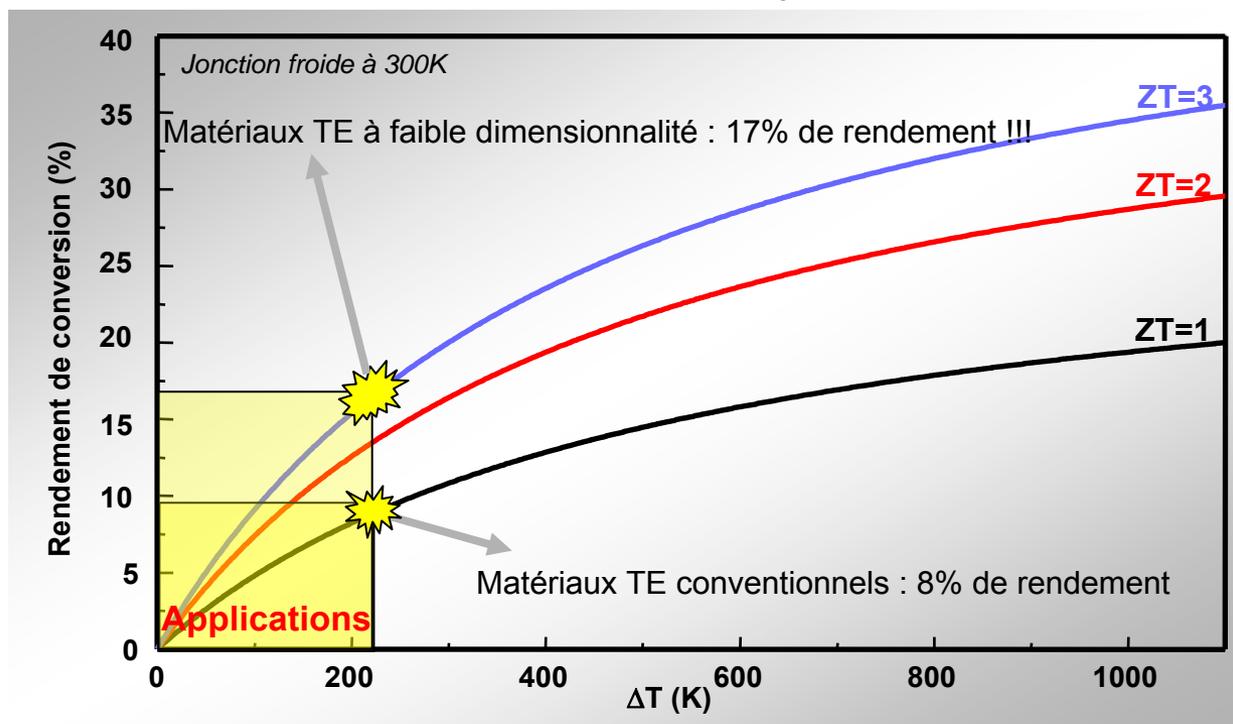


1 Les matériaux thermoélectriques : propriétés

- définition du maximum de rendement de conversion :

$$\Phi_m = \eta_c \times \eta_{th} = \frac{T_c - T_f}{T_c} \times \frac{\sqrt{(1 + ZT_m)} - 1}{\sqrt{(1 + ZT_m)} + \frac{T_f}{T_c}}$$

rendement de Carnot
rendement propre au système TE



1 Les matériaux TE : pourquoi les nanomatériaux ?

- Augmentation du ZT par les nanomatériaux

$$ZT_m = \frac{\sigma \times S^2}{\lambda} T_m$$

→ diminution de la conductivité thermique

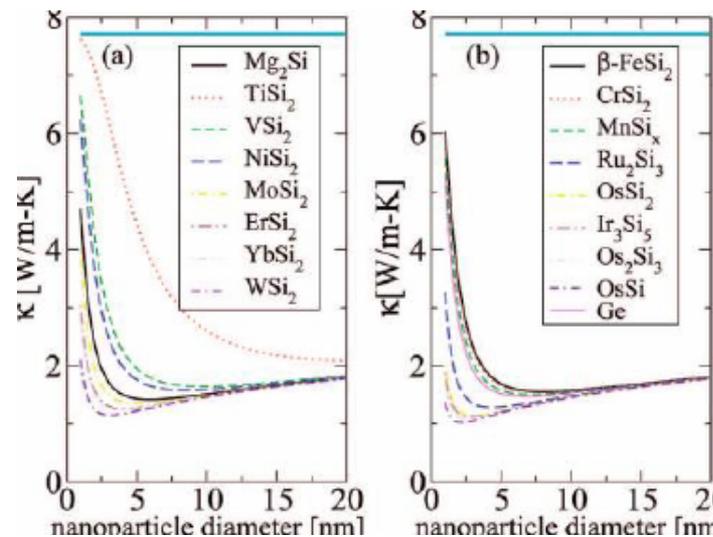
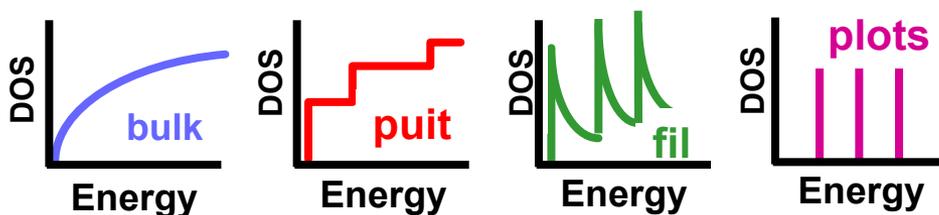
réduction de $\lambda = \lambda_{e^-} + \lambda_{ph}$

→ diffusion des phonons :

- avec impuretés
- aux joints de grains
- par effet de taille

→ augmentation du facteur de puissance

facteur de puissance σS^2 élevé par une augmentation de la densité d'états des électrons (amplification du confinement quantique des électrons) au niveau de Fermi

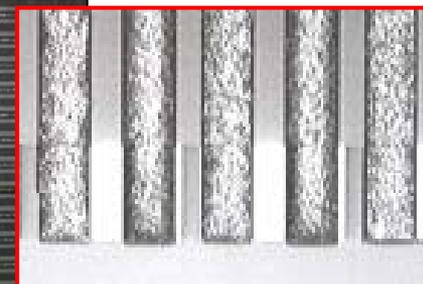
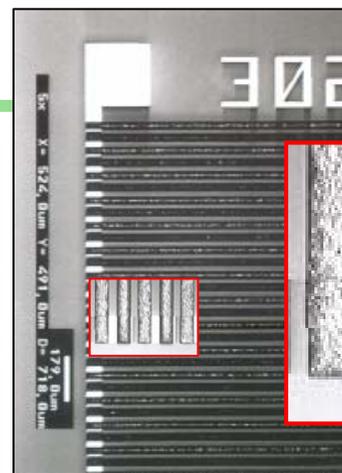
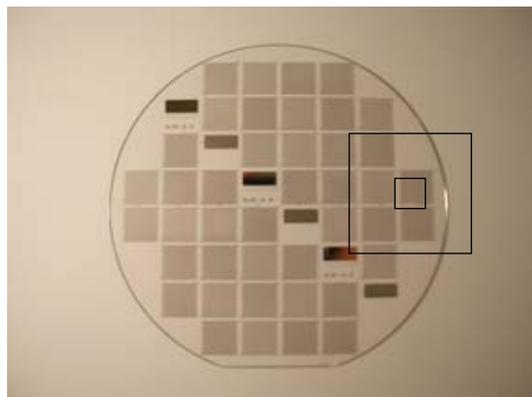


N. Mingo, NanoLetters, 2009

1 Les modules thermoélectriques

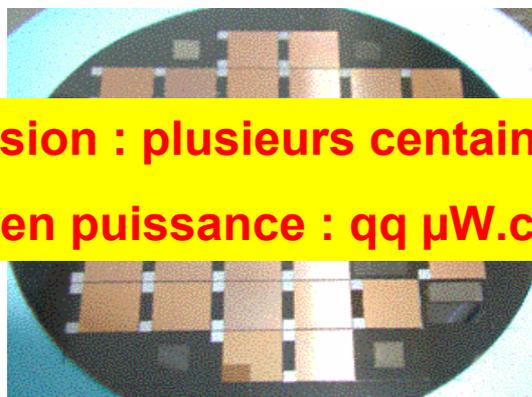
• modules 2D Bi / Sb

substrat verre 100mm
 motifs : lignes de \neq largeur
 $N = 100$ à 160 jonctions
 $A_{te} = 1 \text{ cm}^2$
G. Savelli et al., ICT 2006, Vienna, Austria



• modules 3D Bi / Sb

substrat verre 100mm
 motifs : lignes de \neq largeur
 $N = 100$ à 160 jonctions
 $A_{te} = 1 \text{ cm}^2$
G. Savelli et al., ICT 2007, Jeju Island, South Korea

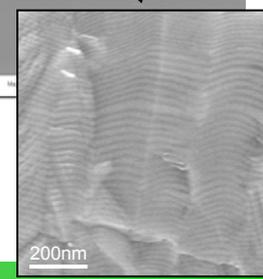
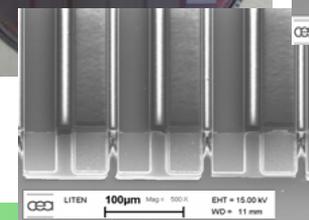
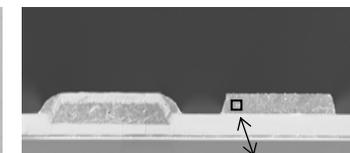
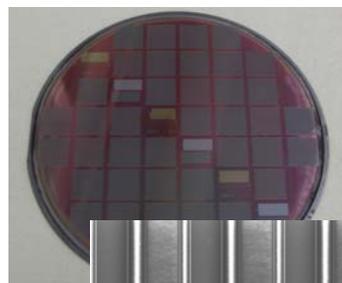
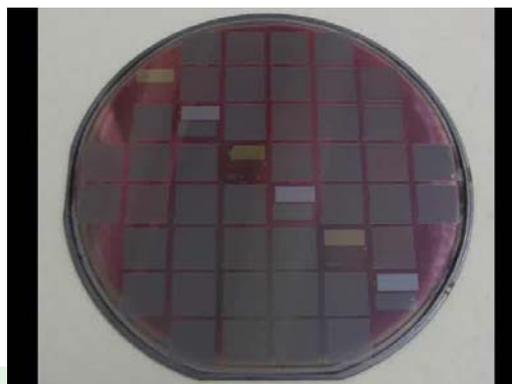


Performances en tension : plusieurs centaines de mV pour $\Delta T \approx 100\text{K}$

Performances en puissance : qq $\mu\text{W.cm}^{-2}$ pour $\Delta T \approx 100\text{K}$

• modules 2D SR Si/SiGe

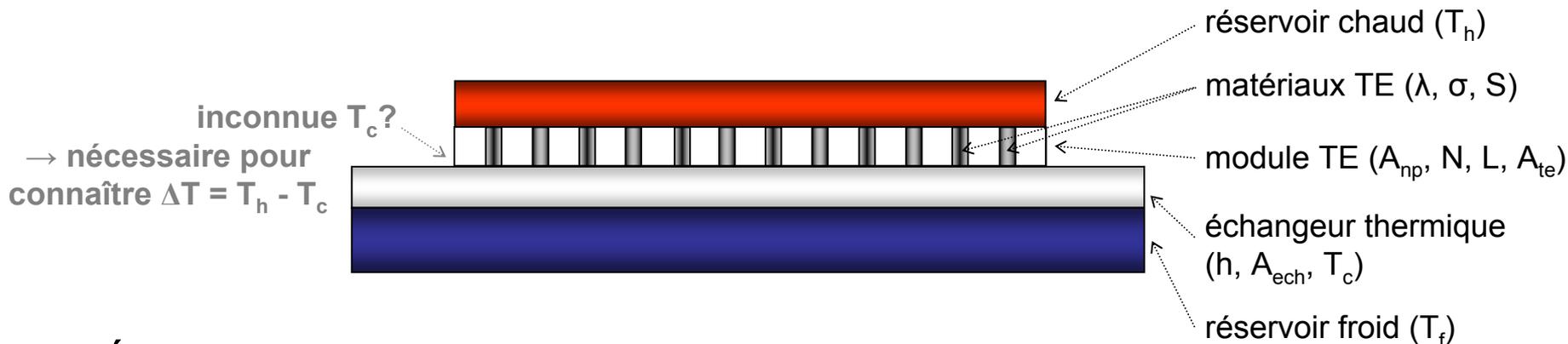
substrat SOI 100mm
 motifs : lignes de \neq largeur
 $N = 80$ à 120 jonctions
 $A_{te} = 1 \text{ cm}^2$
G. Savelli et al., J. Micromech. Microeng., 2008



Sommaire

- 1 - Thermoélectricité : une problématique à 3 niveaux
- 2 - Dimensionnement d'un système thermoélectrique
- 3 - Optimisation des performances
- 4 - Conclusions

- Développement d'un modèle intégrant à la fois les 3 problématiques :



- Équations de base : $P_{Seeb} + P_{cond} + P_{rad} + P_{Joul} = P_{ech}$

$$P_{Seeb} = N \times (S_p - S_n) \times (T_h - T_c) \times I = N \times S \times \Delta T \times I$$

$$P_{cond} = \frac{A_{te} (T_h - T_c(\tau))}{L} (\lambda \tau + \lambda_{air} (1 - \tau))$$

$$P_{rad} = \sigma_{SB} \times (T_h^4 - T_c(\tau)^4) \times \left(\frac{1}{\frac{A_{te} \times f}{S \times \Delta T} + 2A_{te}} \left(\frac{1}{\epsilon} - 1 \right) \right)^{-1}$$

$$P_{Joul} = \frac{1}{2} R_{int} \times I^2 = \frac{1}{2} R_{int} \times \left(\frac{S \times \Delta T}{2R_{tot}} \right)^2$$

$$P_{ech} = (T_c - T_f) \times h \times A_{ech}$$

$$N \times S \times T_c(\tau) \times I + \frac{A_{te}(T_h - T_c(\tau))}{L} (\lambda\tau + \lambda_{air}(1 - \tau)) + \frac{1}{2} \frac{FN^2}{\tau} \times I^2 = (T_c(\tau) - T_f) h A_{hs}$$

- Objectifs : obtenir une tension U ou une puissance Q_{gen} maximale

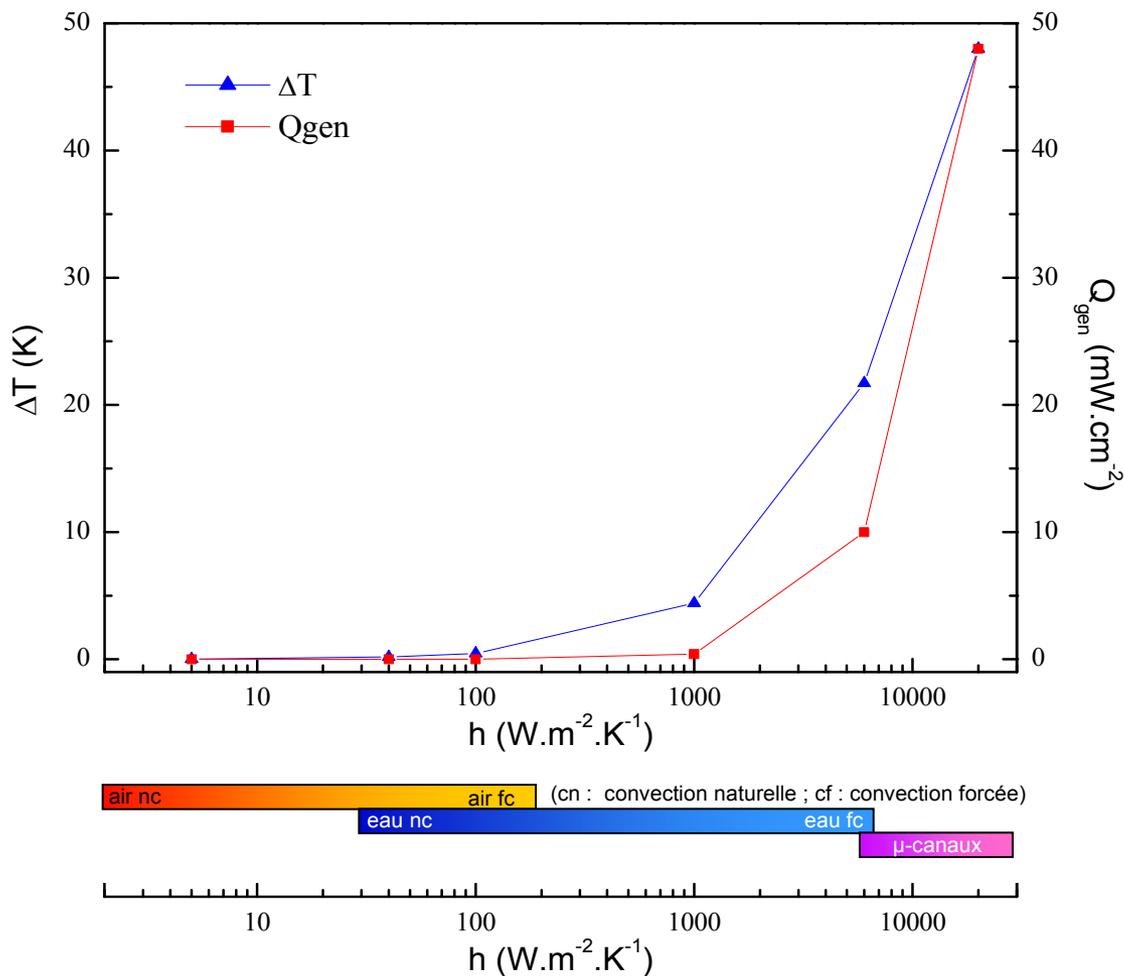
$$U = N \times S \times (T_h - T_c)$$

$$Q_{gen} = \frac{N^2 \times S^2 \times (T_h - T_c)^2 \times R_L}{R_{tot}^2 \times A_{ech}}$$

→ trouver le bon dimensionnement géométrique permettant d'obtenir un ΔT le plus élevé possible et donc les meilleures performances

- Exemple d'étude :

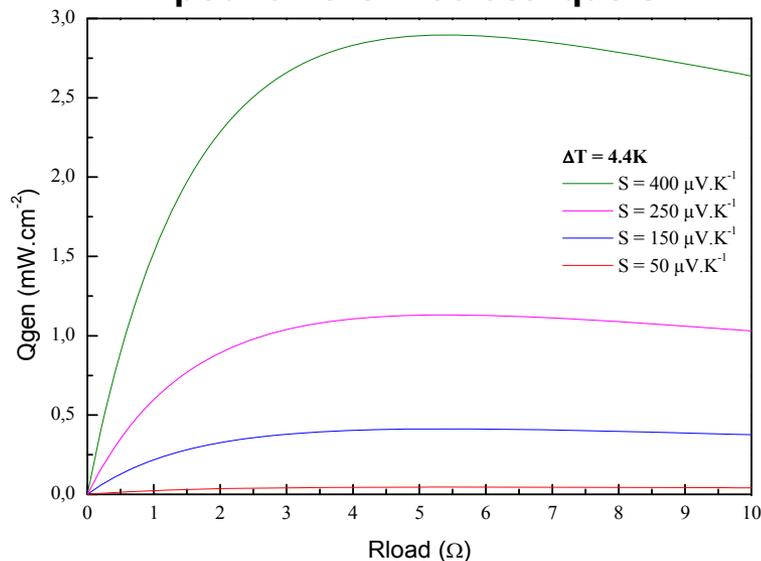
matériau TE	module TE	environnement
cas du SiGe polycristallin : $S_{SiGe}(n+p) = 151 \mu V.K^{-1}$ $\lambda_{SiGe} = 4.8 W.m^{-1}.K^{-1}$ $\rho_{SiGe} = 2,3.10^{-5} \Omega.m$	$A_{te} = 1 cm^2$ $L = 5 \mu m$ $A_{np} = 100 \times 100 \mu m^2$ $N = 400$ plots $(R_{int} = 5.4 \Omega)$	$T_h = 400K$ $T_f = 300K$ $A_{ech} = 2 cm^2$ $h = 1000 W.m^{-2}.K^{-1}$



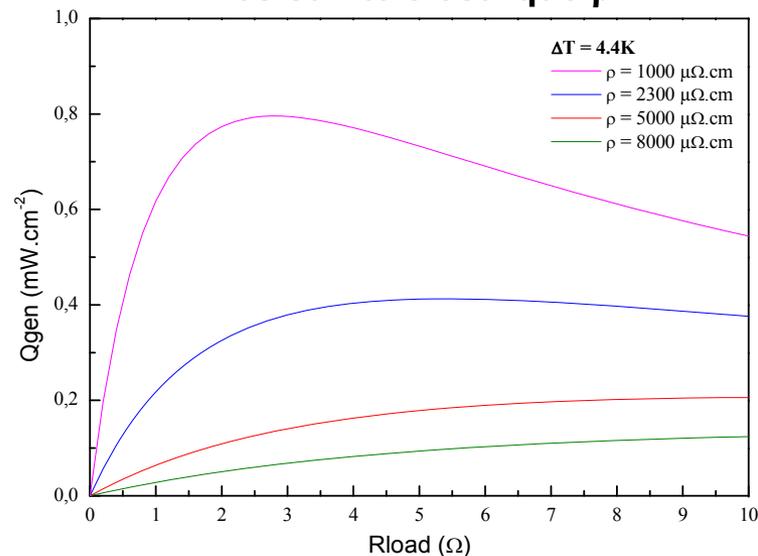
→ la nature de l'échange thermique entre le module et son environnement est un paramètre **majeur** !!

$$ZT = \frac{S^2}{\rho \times \lambda} T$$

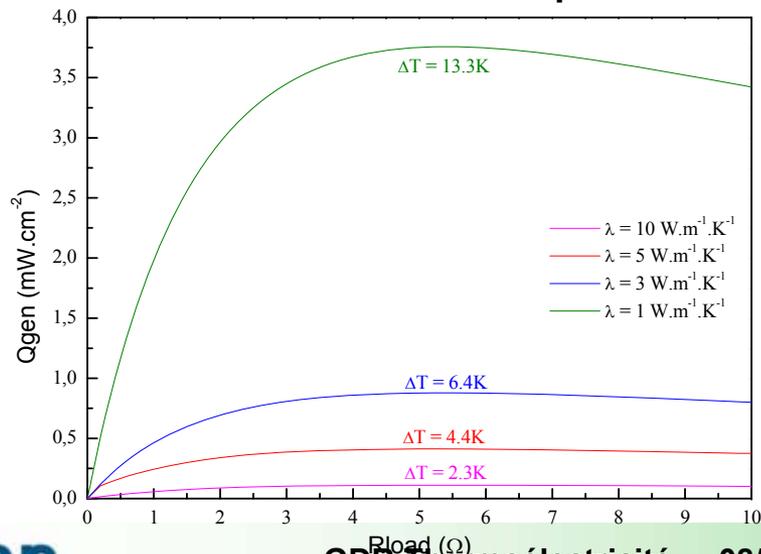
pouvoir thermoélectrique S



résistivité électrique ρ



conductivité thermique λ



- influence de chaque paramètre sur les performances du module
- cette influence est plus ou moins modérée selon la nature du paramètre
- seul λ influe simultanément et significativement sur ΔT et Q_{gen}

- Définition d'un nouveau paramètre : le taux de remplissage τ : TMR (Thermoelectric Materials Rate)

→ fonction du volume de matériaux TE par rapport au volume total possible

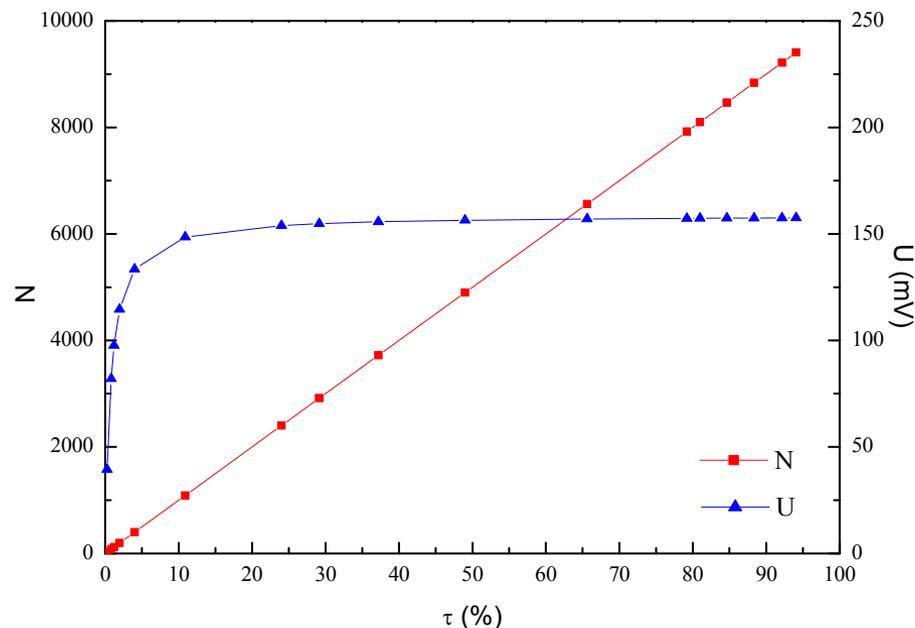
$$\tau = \frac{N \times A_{np}}{A_{te}} \times 100$$

→ influence de τ sur la tension de sortie U du module :

- étude du cas : A_{te} et A_{np} fixées et N variable

- rappel : $U = N \times S \times \Delta T$

- l'augmentation du nombre de plots N entraîne également la diminution de ΔT et donc de U



Sommaire

- 1 - Thermoélectricité : une problématique à 3 niveaux
- 2 - Dimensionnement d'un système thermoélectrique
- 3 - Optimisation des performances**
- 4 - Conclusions

→ Insertion du paramètre TMR dans le modèle :

$$Q_{\text{gen}} = \frac{S^2 \times (T_h - T_c)^2 \times \tau}{4 \times A_{\text{hs}} \times F} \quad \text{avec} \quad F = \frac{4}{A_{\text{te}}} \times (\rho \times L + 2R_c)$$

$$\left(\frac{\partial Q_{\text{gen}}}{\partial \tau} \right)_{\tau_{\text{opt}}} = \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{S^2 \times (T_h - T_c(\tau))^2 \times \tau}{4 \times A_{\text{hs}} \times F} \right)_{\tau_{\text{opt}}} = 0$$

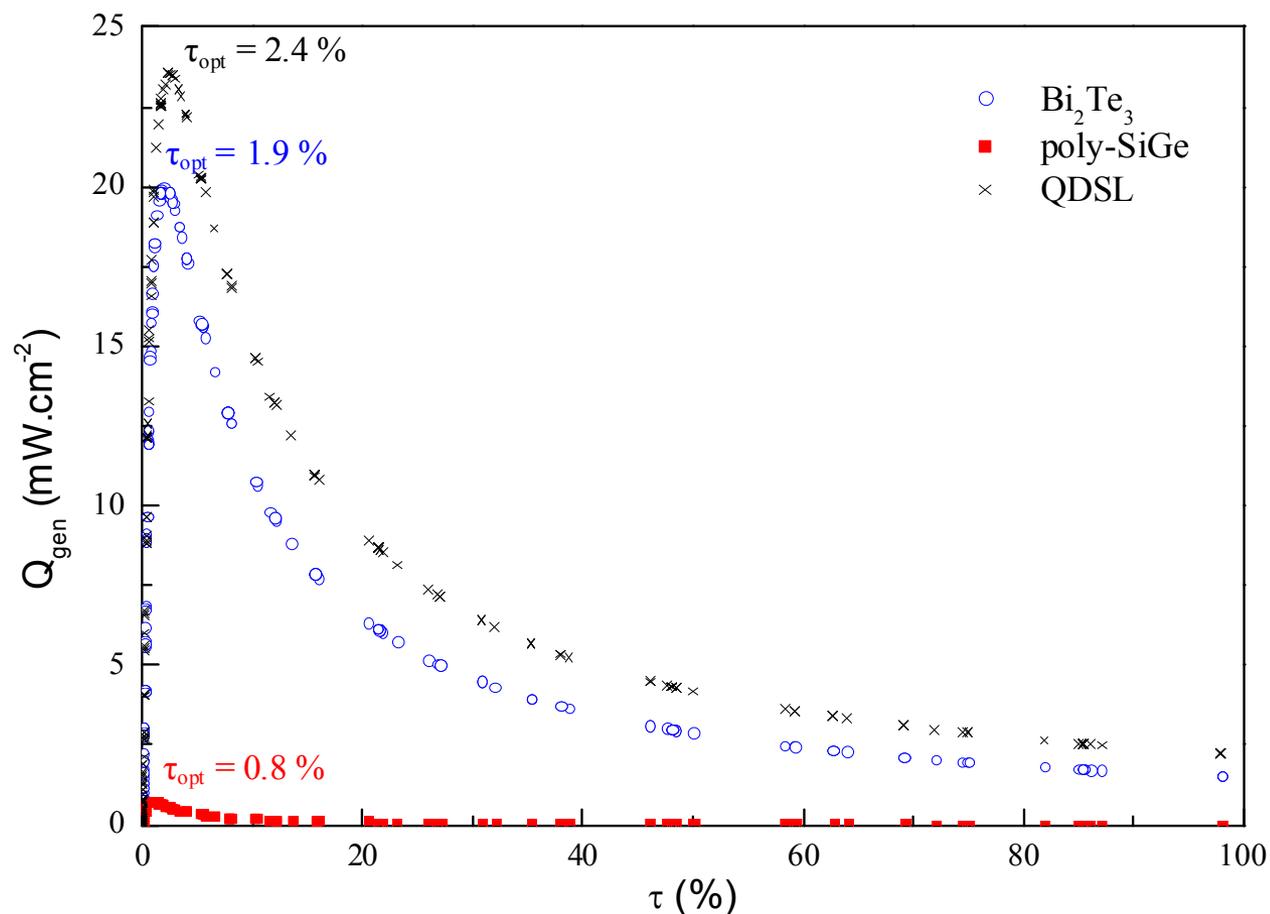
$$T_h - T_c(\tau_{\text{opt}}) - 2\tau_{\text{opt}} \times \left(\frac{\partial T_c(\tau)}{\partial \tau} \right)_{\tau_{\text{opt}}} = 0$$

→ Comparaison de l'optimisation en fonction de la nature du matériau TE :

- SiGe poly
- Bi₂Te₃
- QDSL

	S_{n+p} (μV.K⁻¹)	λ (W.m⁻¹.K⁻¹)	ρ (μΩ.cm)	ZT (300K)
SiGe poly [Van Gerwen 95]	151	4.8	2300	0.015
Bi₂Te₃ [Peranio 06]	402	1.87	1500	0.43
QDSL [Mingo 09]	400	1.5	1600	0.5

- Définition du taux de remplissage optimal τ_{opt}



→ pour chaque matériau, il y a un **taux de remplissage optimal maximisant les performances** du module

→ définition des design des modules en fonction des matériaux et de l'environnement :

h (W.m ⁻² .K ⁻¹)	matériaux	Q _{gen} (mW.cm ⁻²)	Géométrie	τ (%)
40	SiGe	0.0017	Anp = 64.10 ⁻⁶ mm ² (a = 8 μm) e = 100 μm - Nplots = 8281	0.53
	QDSL	0.051	Anp = 1.10 ⁻⁴ mm ² (a = 10 μm) e = 10 μm - Nplots = 19600	2
100	SiGe	0.01	Anp = 36.10 ⁻⁴ mm ² (a = 60 μm) e = 800 μm - Nplots = 144	0.52
	QDSL	0.31	Anp = 1.10 ⁻⁴ mm ² (a = 100 μm) e = 600 μm - Nplots = 196	1.9
1000	SiGe	0.77	Anp = 36.10 ⁻⁶ mm ² (a = 6 μm) e = 60 μm - Nplots = 22201	0.8
	QDSL	23.5	Anp = 64.10 ⁻⁶ mm ² (a = 8 μm) e = 40 μm - Nplots = 42025	2.4

→ pour chaque matériau, dans un environnement donné, il y a une **optimisation spécifique** du dimensionnement des modules !

- L'environnement, les matériaux et les modules sont les trois facteurs clés d'une problématique thermoélectrique et sont totalement dépendants.
- Chaque conception de module est une étude spécifique, fonction des matériaux intégrés et de l'application visée.
- Développement d'un modèle de dimensionnement prenant en compte ces trois facteurs, et permettant de répondre au mieux à un besoin spécifique.
- La seule optimisation géométrique d'un module permet de gagner plusieurs ordres de grandeur sur les performances.

MERCI
de votre attention...