



Caractérisation Thermique de Nanofils de Silicium

*Etienne PUYOO, Stéphane GRAUBY, Jean-Michel RAMPNOUX,
Emmanuelle ROUVIERE et Stefan DILHAIRE*

- 1. Contexte Général*
- 2. Dispositif Expérimental*
- 3. Caractérisation Thermique*
- 4. Caractérisation Électrique*
- 5. Conclusion et Perspectives*

1. Contexte Général

Facteur de mérite :

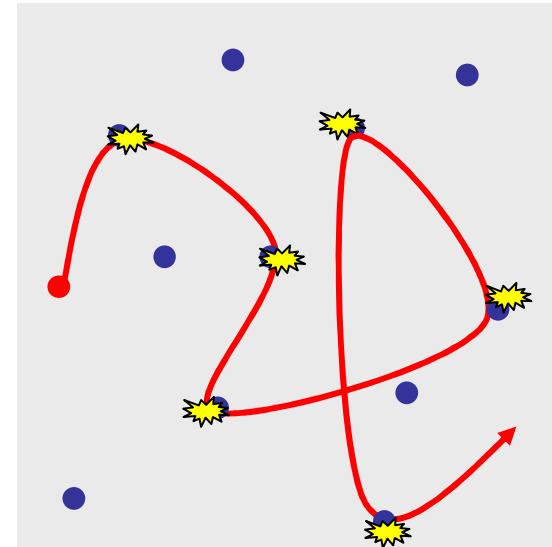
$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{\lambda} T$$

Réduction de la
conductivité thermique λ

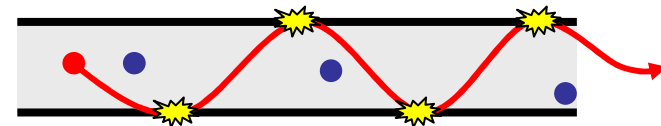
$d_{Si\ NWs} \sim \text{lpm phonons}$



*diffusion des phonons
sur les bords*

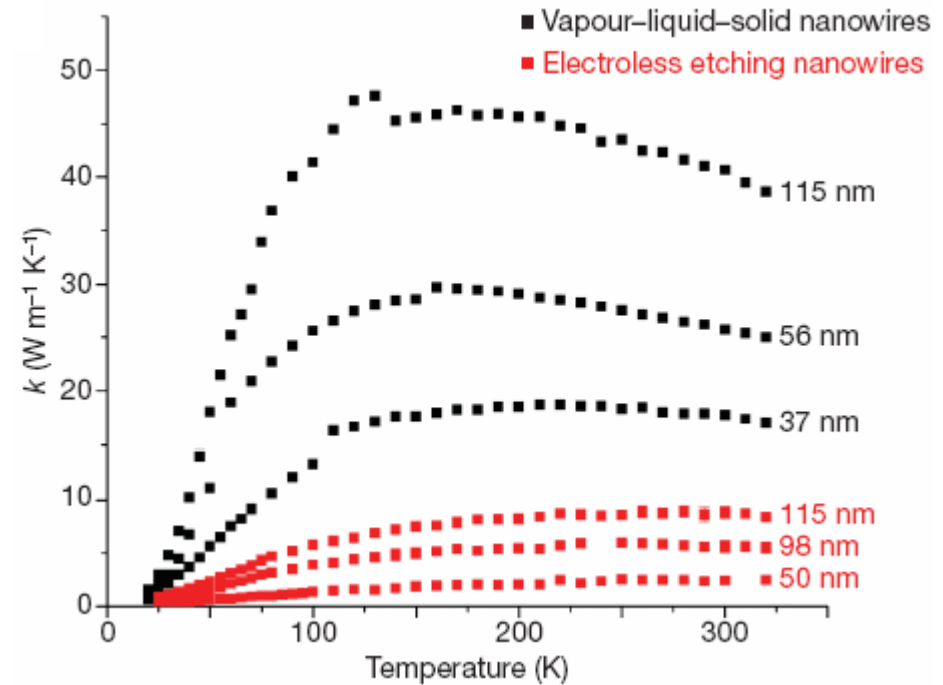
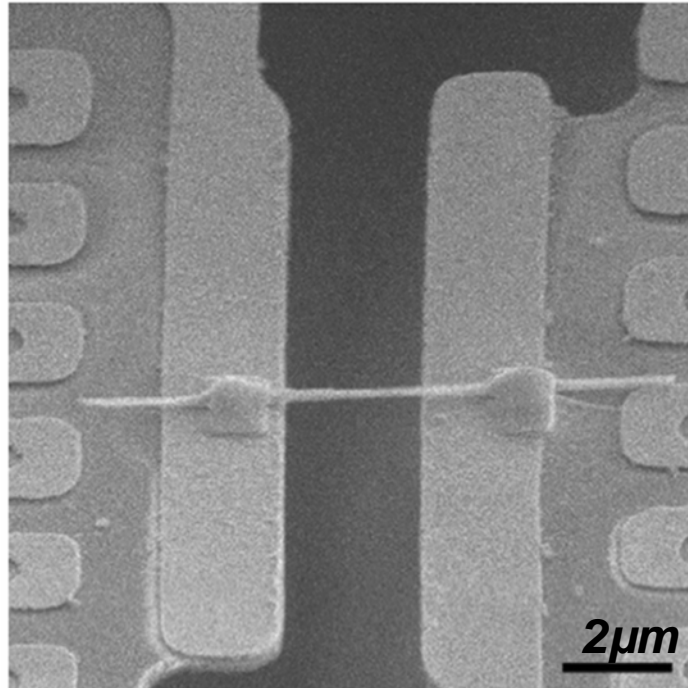


Matériau Massif



Nanofil

Etat de l'art



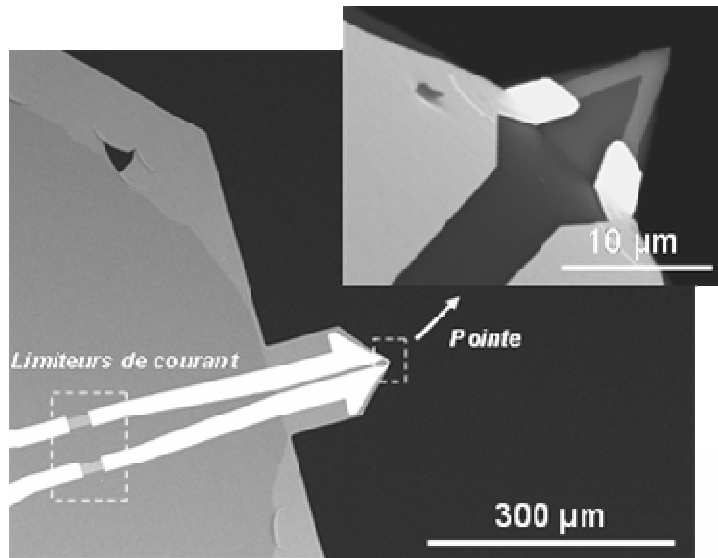
*A.I. Hochbaum et al., *Nature*, **451**, 163 (2008)

ZT=0,6 à 300K

➔ ***Développement d'un banc de mesure de conductivité thermique donnant accès à une mesure sur un grand nombre de nanofils au sein d'un même tapis***

2. Dispositif Expérimental

Microscopie thermique à balayage

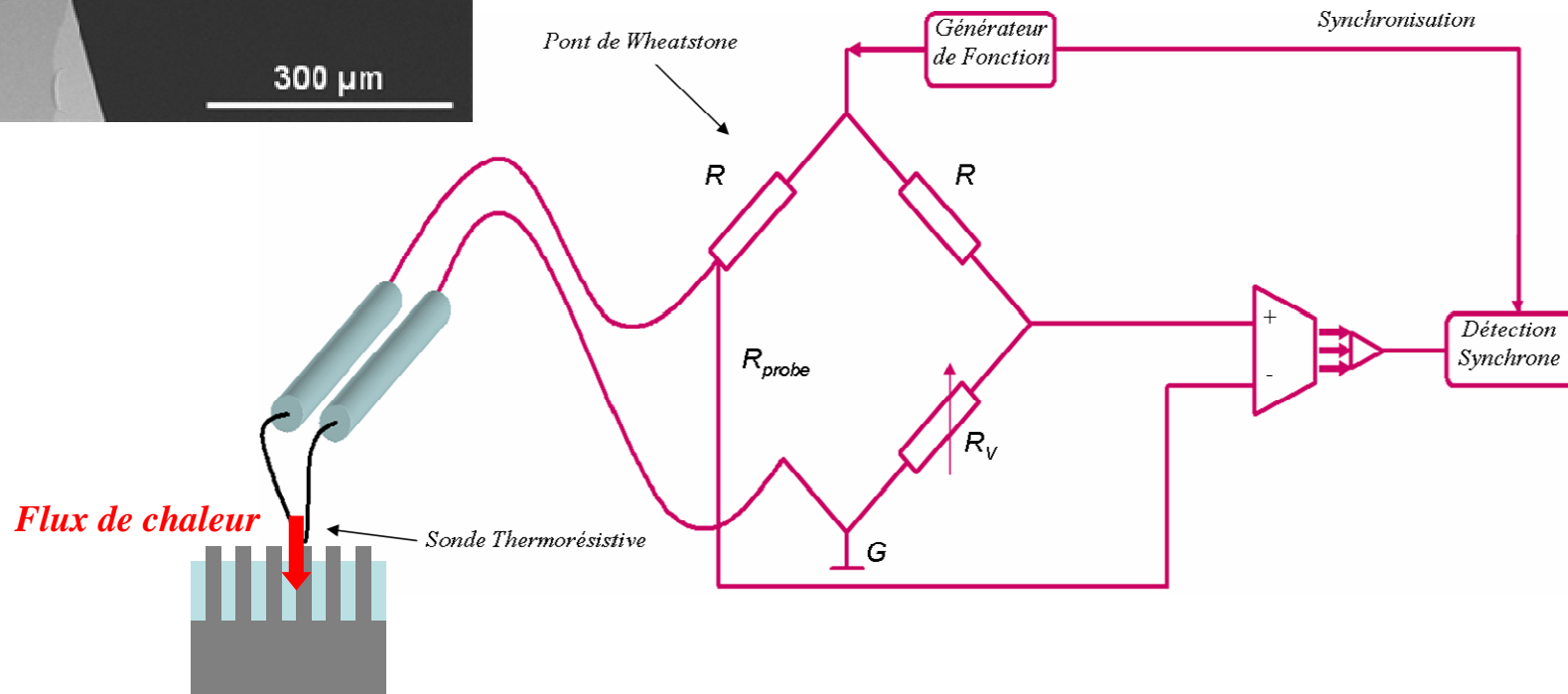


Développement de la Technique 3ω avec un AFM

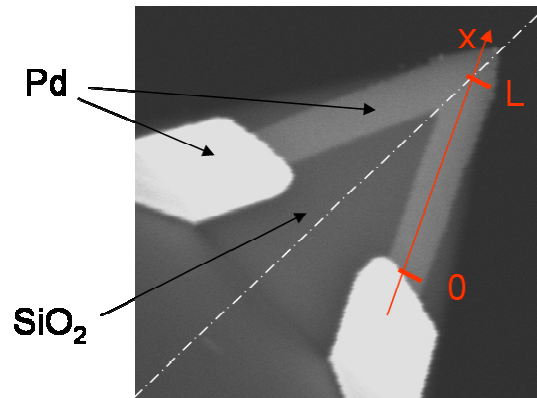
$$I \sim 1\omega \xrightarrow{\text{Effet Joule}} T \sim I^2 \sim 2\omega$$

Sonde
Thermorésistive

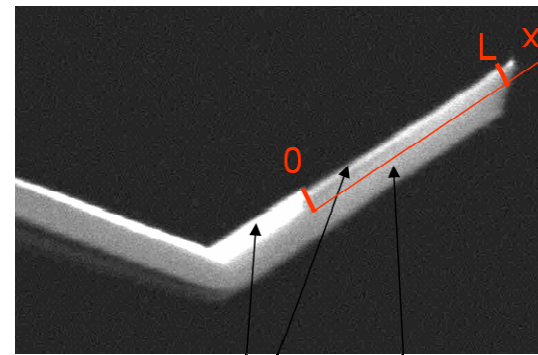
$$V \sim IR \sim 3\omega \xleftarrow{\text{Loi d'Ohm}} R \sim T \sim 2\omega$$



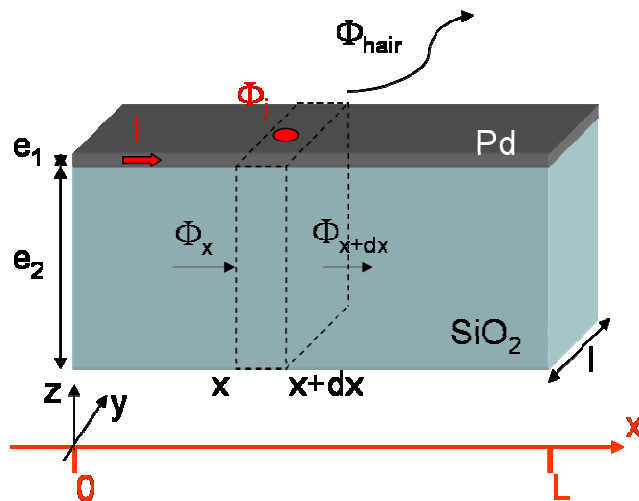
Modélisation de la Sonde



Vue de dessus



Vue en coupe



Equation de la chaleur en régime alternatif :

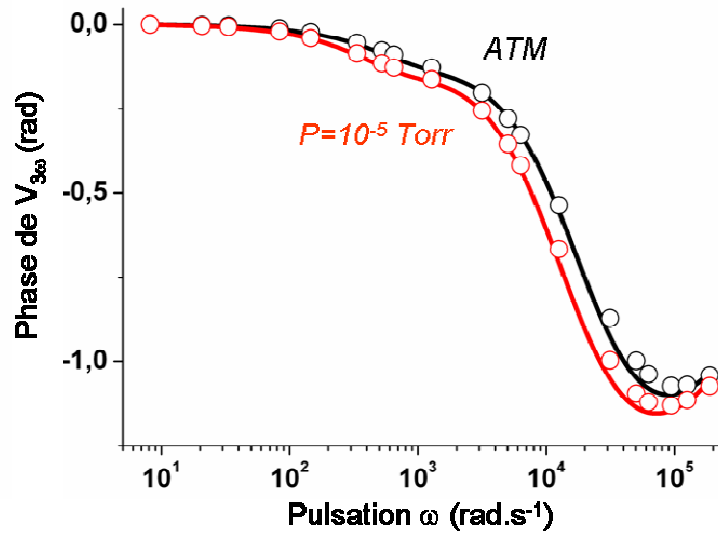
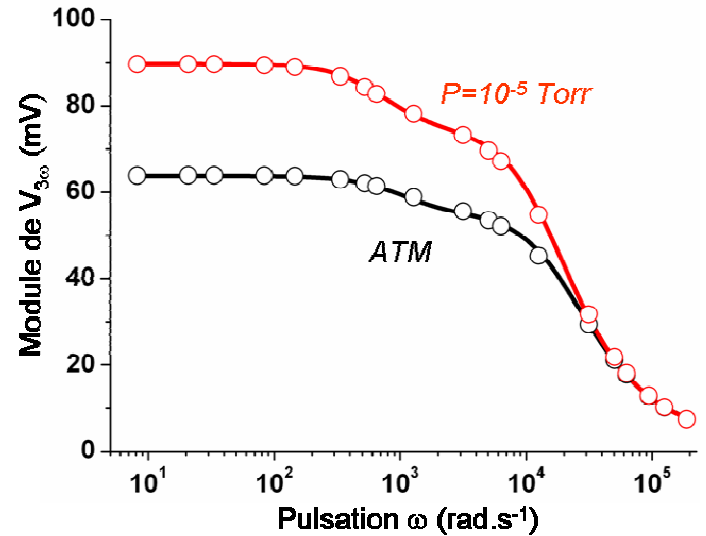
$$\frac{2i\omega}{a_2} T_{2\omega} = \frac{\rho_{elec1} I^2}{2\lambda_2 S_1 S_2} - \frac{hp_2}{\lambda_2 S_2} T_{2\omega} + \frac{d^2 T_{2\omega}}{dx^2}$$

Température moyennée sur L :

$$\langle T_{2\omega} \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L T_{2\omega}(x, \omega) dx$$

Modélisation de la Sonde

Etalonnage de la sonde Hors Contact:

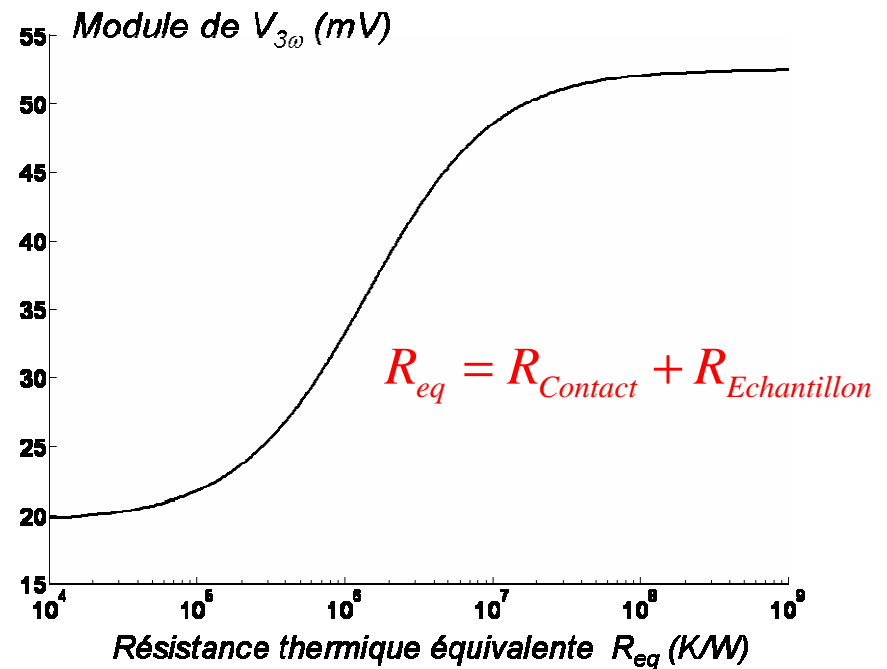


Identification :

Géométrie Sonde $\left\{ \begin{array}{l} L = 8,8 \mu\text{m} \\ l = 1,72 \mu\text{m} \end{array} \right.$

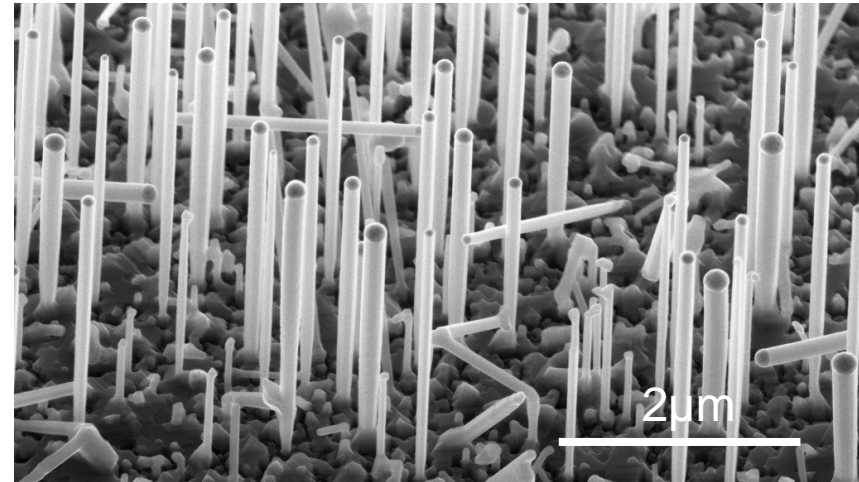
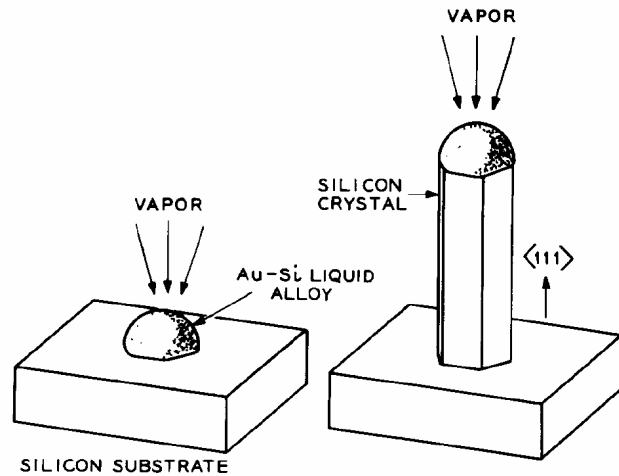
Pertes dans l'air $h = 6100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Modèle de la Sonde en Contact:

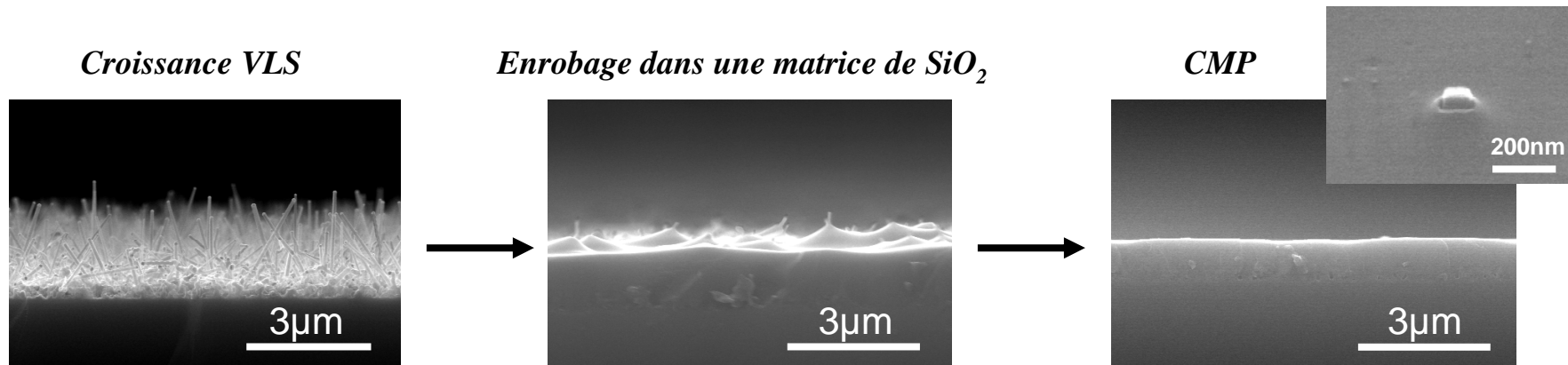


3. Caractérisation Thermique

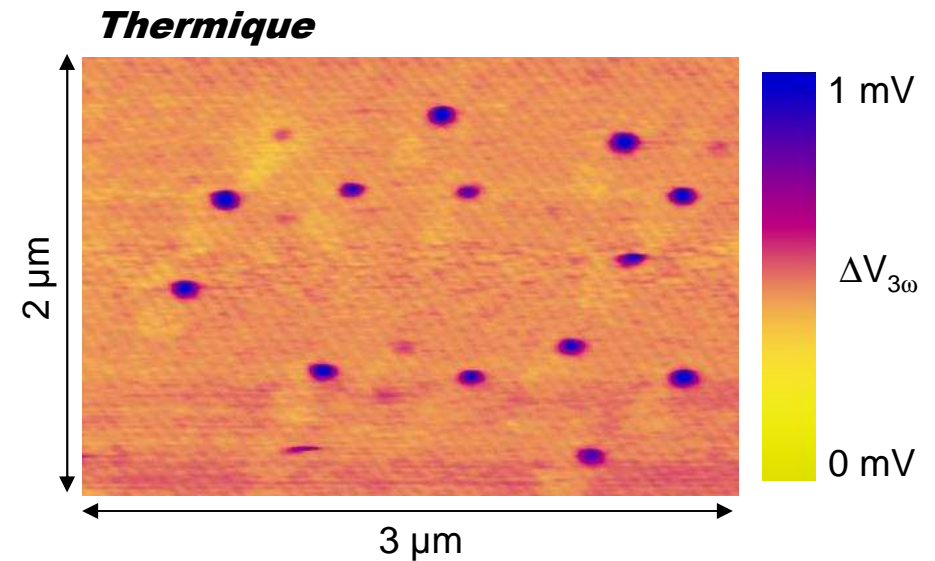
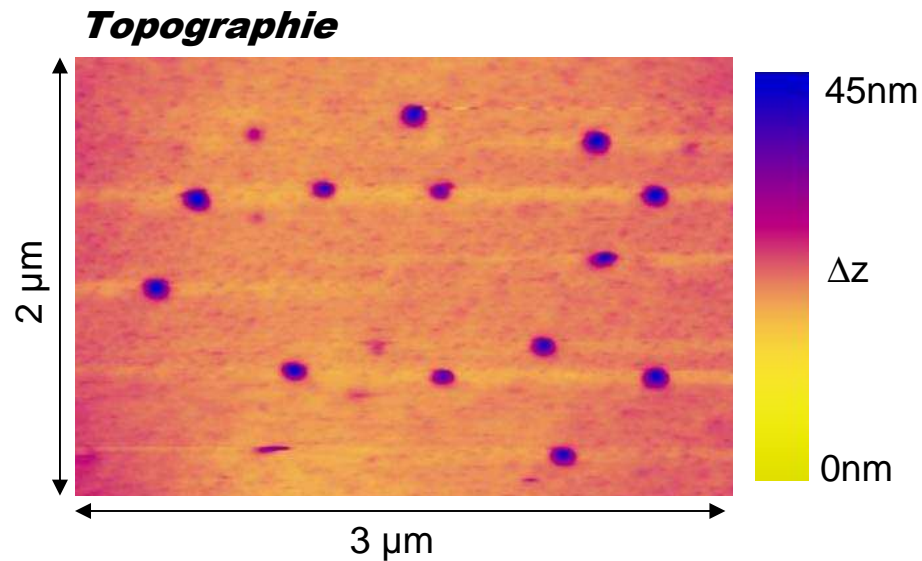
Approche Bottom-up: Croissance CVD de Nanofils



*R.S. Wagner et al., *Appl. Phys. Lett.*, 4, 89 (1964)



Imagerie Thermique de Nanofils individuels



- *Nanofils de Si non dopés:*

$$\langle R_{\text{eq}} \rangle = 3,427 \cdot 10^7 \text{ K/W}$$

avec: $L \sim 1,1 \mu\text{m}$ et $d \sim 50 \text{ nm}$

$$R_C \ll R_{\text{eq}}: \lambda = 16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$R_C \sim (R_{\text{eq}})_{\text{min}}: \lambda = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

- *Nanofils de Si dopés n ($P/\text{Si} = 2 \cdot 10^{-5}$):*

$$\langle R_{\text{eq}} \rangle = 3,842 \cdot 10^7 \text{ K/W}$$

avec: $L \sim 0,8 \mu\text{m}$ et $d \sim 50 \text{ nm}$

$$R_C \ll R_{\text{eq}}: \lambda = 11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$R_C \sim R_{\text{eqmin}}: \lambda = 33 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Approche Top-down: Gravure Humide du Silicium

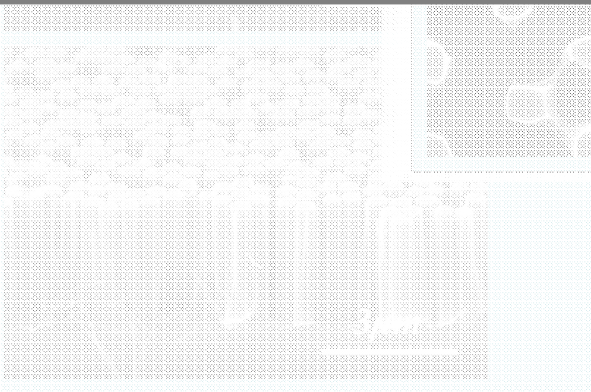
Gravure Humide du Si



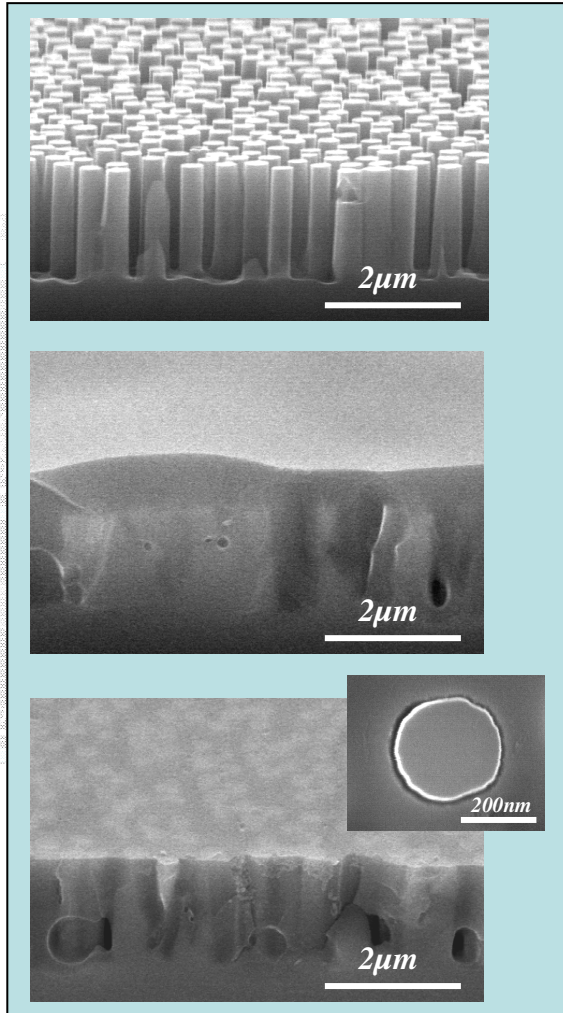
Réduction de la taille des motifs

-Contrôle de la longueur, du diamètre et de l'espacement des motifs

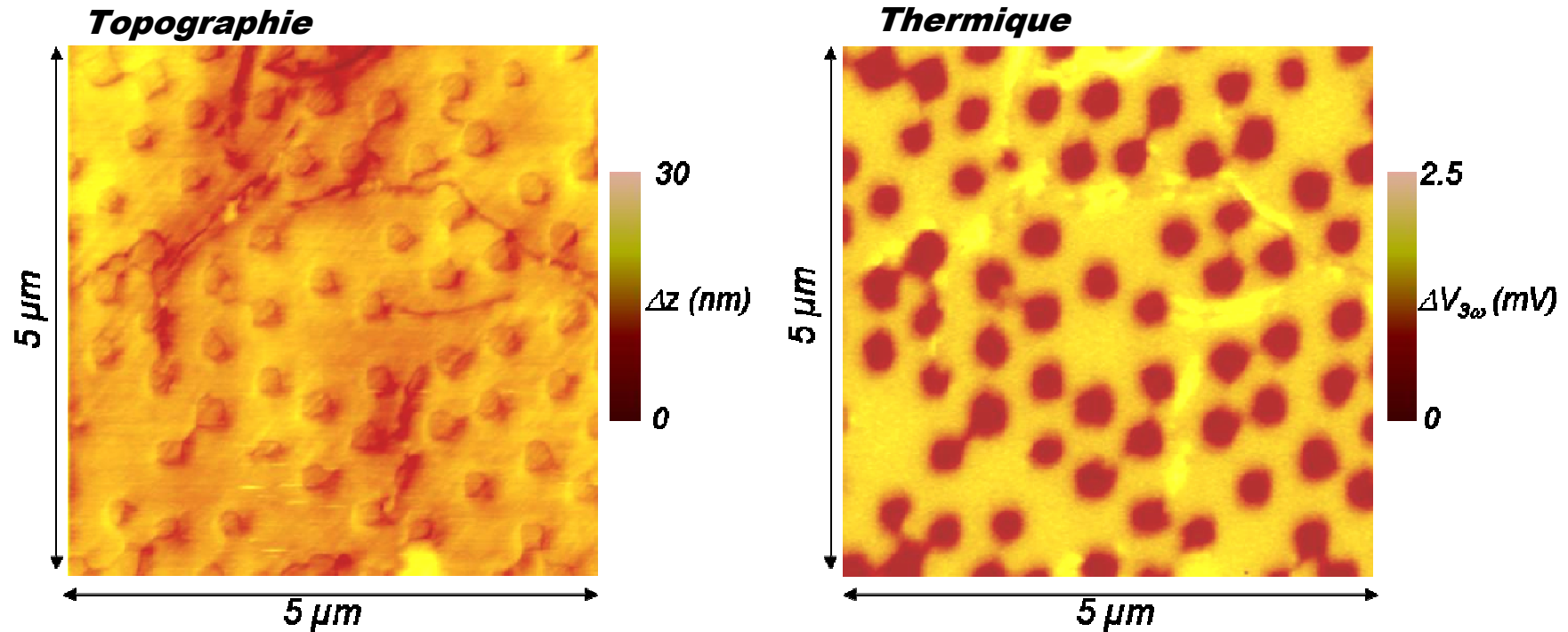
-Diamètre des Si NWs: 200nm – 400nm



Encapsulation



Imagerie Thermique de Nanofils individuels

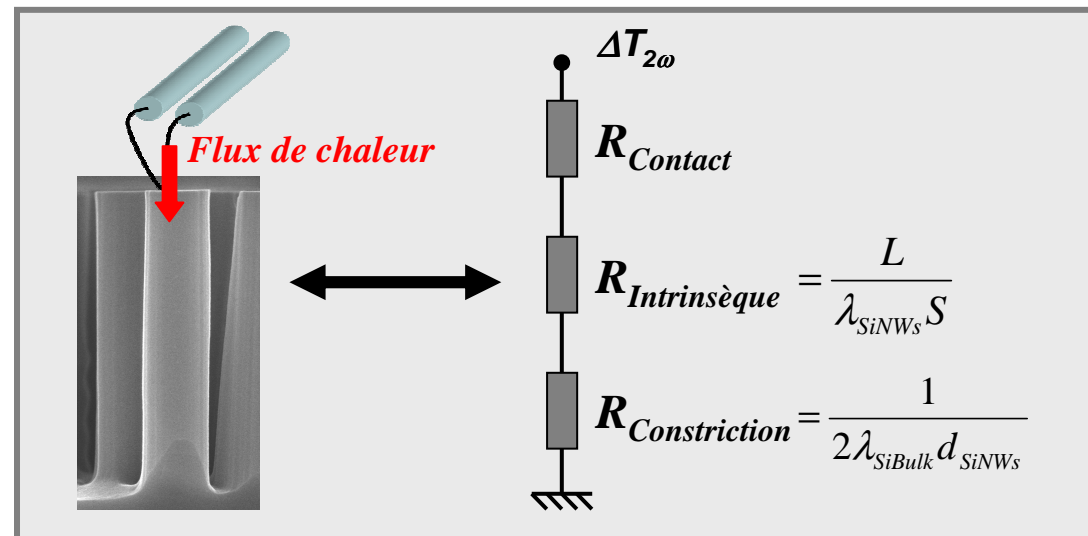


Résistance thermique moyenne:

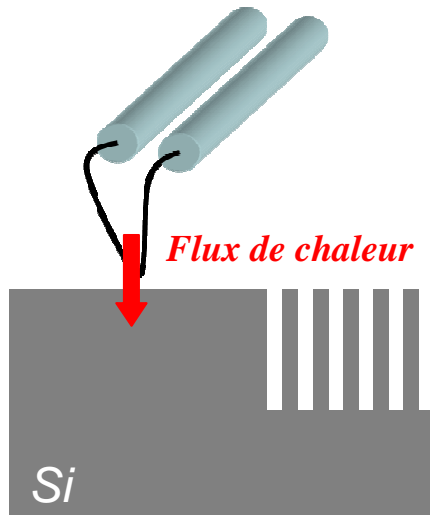
$$(R_{eq})_{SiNWs} = (4.304 \pm 0.001) \times 10^6 \text{ K/W}$$

$R_{Contact}$?

Etienne PUYOO
GDR Thermoélectricité 6-7 Juillet 2010



Détermination de la conductivité thermique

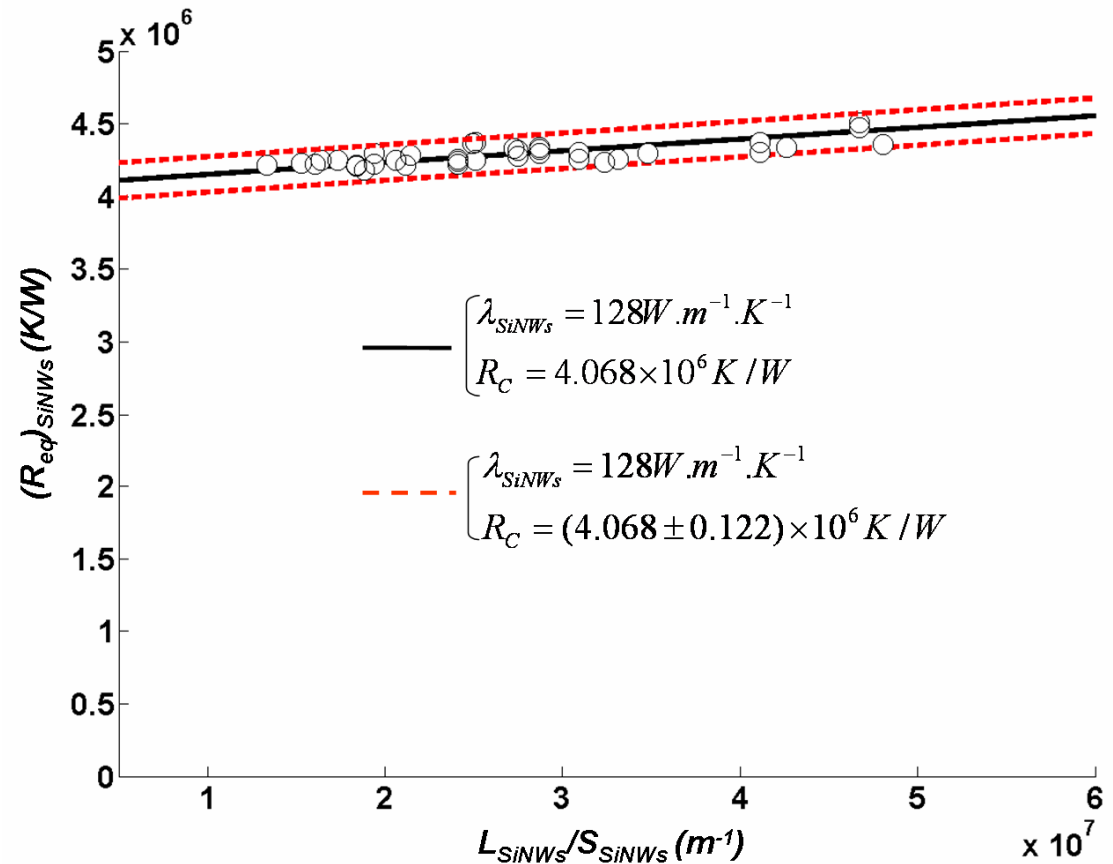


$$R_{eq} = R_{Contact} + \frac{1}{4\lambda r_{Th}}$$

avec: $\lambda \sim 130 W.m^{-1}.K^{-1}$ et $r_{Th} \sim 100 nm$

$$R_{Contact} = 4,090.10^6 K / W$$

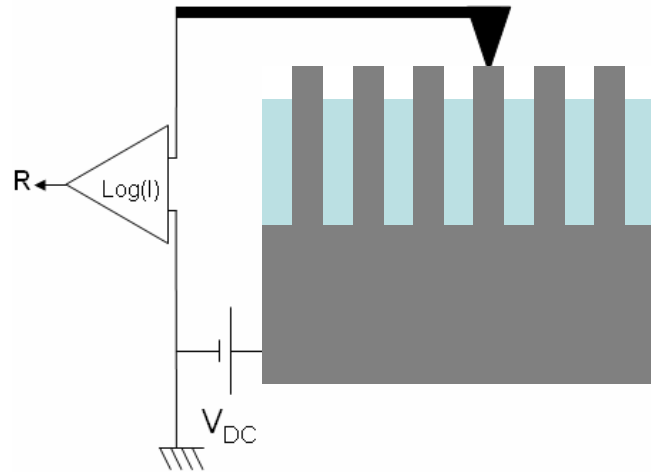
$$\lambda_{SiNWs} = (128 \pm 11) W.m^{-1}.K^{-1}$$



Pas de réduction significative de la conductivité Thermique par rapport au Si massif

4. Caractérisation Électrique

Imagerie Electrique de Nanofils individuels



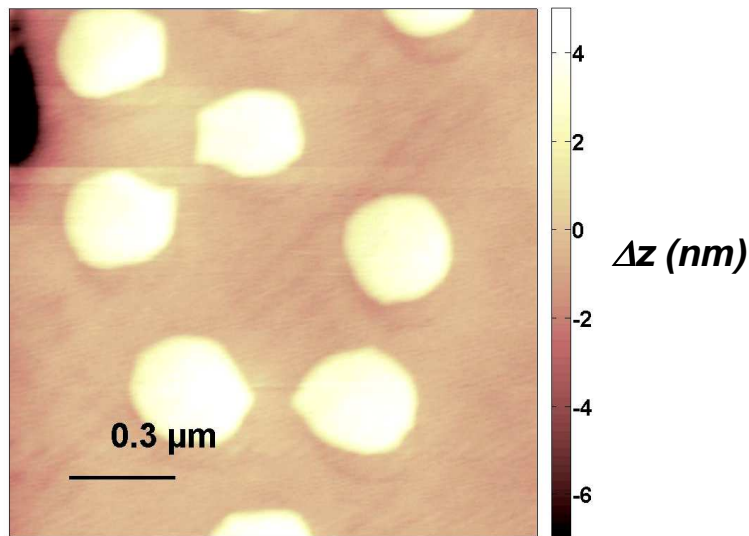
Collaboration avec N.Chevalier et D.Mariolle (CEA-LETI)

$$R_{Nikolic} = \frac{\rho}{4a} \frac{1+0.83 \frac{l}{a}}{1+1.33 \frac{l}{a}} + \frac{4\rho l}{3\pi a^2}$$

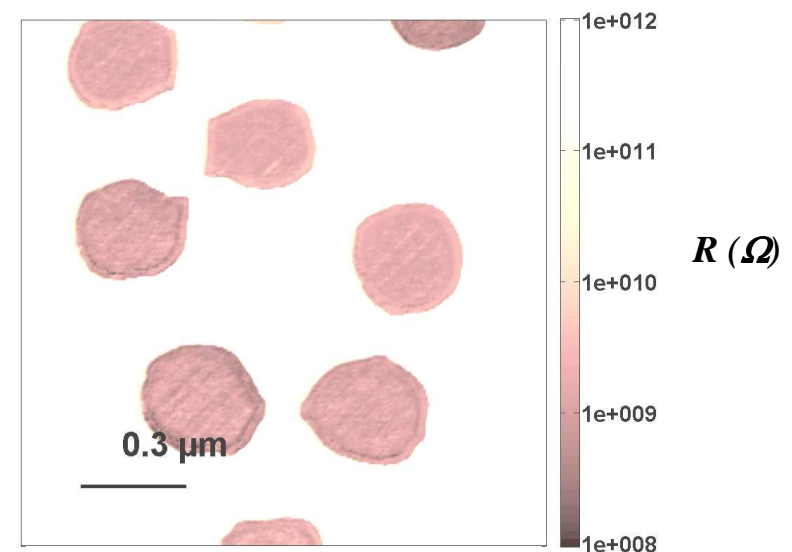
*B.Nikolic et al., Phys. Rev. B, **60** (1999)

$R_{SSRM} = 10^8 \Omega$ avec: $a \sim 5\text{nm}$ et $l \sim 25\text{nm}$
 $\rho \sim 20 \Omega \cdot \text{cm}$

Topographie



Electrique



5. Conclusion et Perspectives

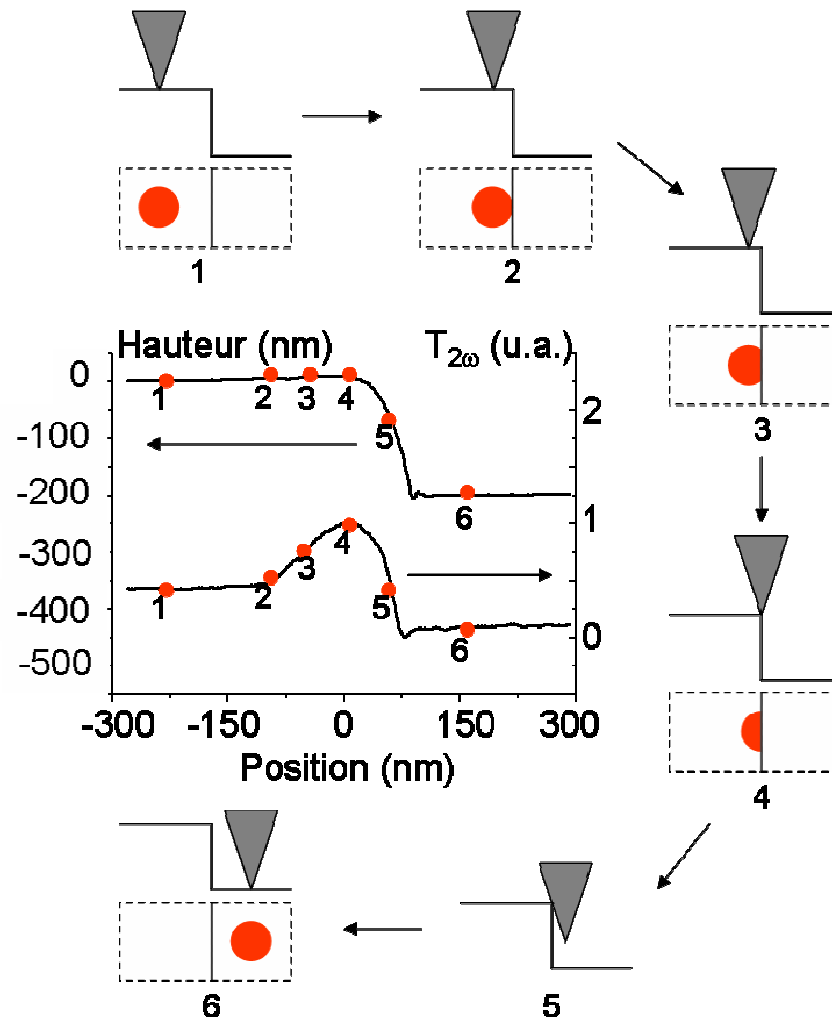
Bilan

- *Elaboration de dispositifs à base de Si NWs avec un contrôle de la longueur, du diamètre et de l'espacement des motifs*
- *Développement d'une technique d'étalonnage donnant accès à une analyse quantitative des mesures thermiques*
- *Possibilité d'une mesure de conductivité électrique de Si NWs individuels*

Perspectives

- *Effectuer des mesures sur des Nanofils de SiGe*
- *Développer la mesure du coefficient Seebeck par AFM*

Mesure du rayon d'échange thermique



- r_{Th} limite la résolution spatiale des images thermiques

- Valeur précise nécessaire pour une identification de la conductivité thermique

(Position 4 – Position 2)

$$r_{Th} = 100 \text{ nm}$$

→ $R_{contact}$ ne varie pas en fonction du diamètre des NWs

*E.Puyoo et al., Rev. Sci. Instrum., 81, 1 (2010)