

# Comment gérer les connexions de signaux à haute densité et la petite puissance des cryogénérateurs sub-K ?

**J.-L. Sauvageot<sup>1</sup>**, A. Olivier<sup>2</sup>, J. Charbonnier<sup>3</sup>, X. de la Broïse<sup>1</sup>,  
C.Thomas<sup>3</sup>, G. Gay<sup>2</sup>, S. David<sup>2</sup>, F. Gustavo<sup>4</sup>, T. Charvolin<sup>4</sup>

<sup>1</sup> DRF/IRFU/ CEA Saclay, France, [jean-luc.sauvageot@cea.fr](mailto:jean-luc.sauvageot@cea.fr)

<sup>2</sup> Univ. Grenoble Alpes, LTM, F-38000 Grenoble, France and CNRS, LTM, F-38054 Grenoble, France

<sup>3</sup> DRT-LETI-DCOS, CEA Grenoble, France

<sup>4</sup> Univ. Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France and CEA, IRIG-PHELIQS, F-38054, Grenoble, France

- 1) Introduction & Besoins
- 2) Techno
- 3) Ce qu'on a
- 4) Ce qu'il reste à démontrer
- 5) Conclusion

# 1) Introduction: Plan focal Astronomique @ Sub-K

## Camera Sub-K en Astro:

- Nécessité de **très basses températures** pour augmenter le signal et réduire le bruit
- Utilisation des **technologies de la microélectronique du silicium** pour la production de structures de microcapteurs.
- Besoin d'une **cryo-électronique très proche** avec un micro-budget  **$\lesssim 1 \mu\text{W}$  @ 50mK**

## Le paradoxe:

La prochaine génération de caméras prétend **multiplier le nombre de pixels** de plusieurs ordres de grandeur **sans devoir/pouvoir augmenter le budget de puissance cryogénique du Sub-K.**

## “The” challenge:

Faire coexister des **dispositifs sensibles à basse température** avec de la **cryo-électronique dissipative**, et les interconnecter par un **schéma de routage très dense** tout en **minimisant les fuites thermiques et le transport de signaux délicats** de Sub-K (disons 50-100mK) à 4K.

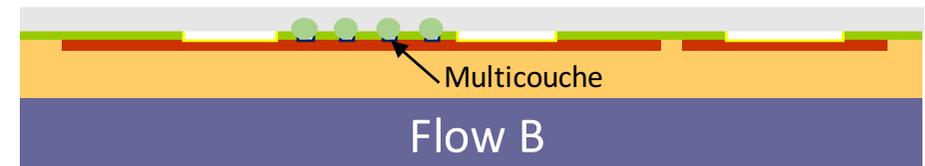
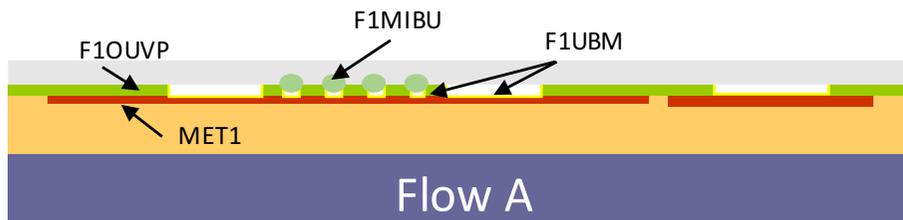
# Managing Heat flows in Quantum Electronics

## QuBits : Quantum Information

leti  
cea tech

LETI/DCOS

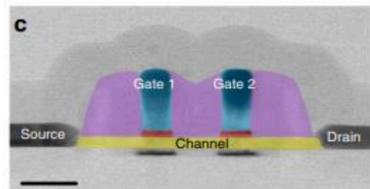
- Need for very low temperature to improve lifetime of quantum entangled states
- Make qubits compatible with standard silicon microelectronics technologies for bit multiplication and industrial competitiveness.
- Need for very close dissipative cryo-electronics and superconducting/super-insulating 3D interconnects.



**Cl: Les cryo-qubits en silicium ont le même genre de besoin que les caméras astro**

# 3D integration of Silicon Qubits

Jean Charbonnier  
CEA/LETI/DCOS/S3C/LTI3D

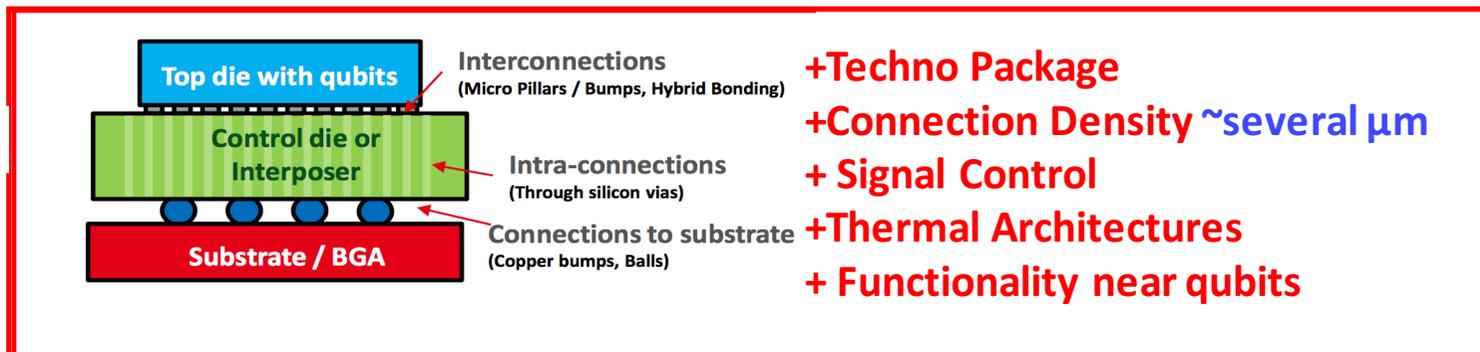
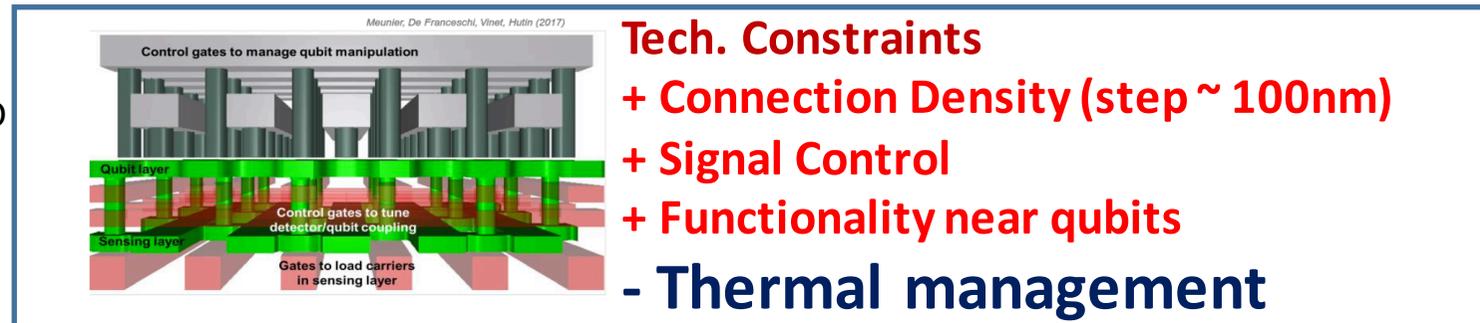


Si Cryo-QuBit

Scaling with  
Monolithic 3D



Sequential 3D



LETI/DCOS s'est positionné dans le routage haute densité pour le Quantique. ( $\Rightarrow$  gestion des flux électriques et thermiques). D'où son intérêt marqué pour cette technologie multicouche qu'il va pousser à de très hautes densités liées à ses besoins et compétences.

# Le principe

**Principe physique :** le transport de la chaleur se fait par diffusion d'électrons et de phonons.

## For electrons :

Supraconductivité  $\Rightarrow$  Pas d'effet Joule

if  $T \ll T_c/10 \Rightarrow$  Tous les **électrons de conduction** sont condensés en **Paires de Cooper**  
Mais les paires de Cooper sont au niveau de Fermi.  $\Rightarrow$  **Pas de flux de chaleur par les électrons !**

## Pour les phonons :

Impossible à "tuer" (To Be Verified ...),

mais possible **de générer leur propagation** avec un "**phonon mirror**" (les mettre en conditions de réflexion maximale)

Dans l'analogie phonon/photon, l'indice est analogue à la vitesse du son.

$\Rightarrow$  Travailler en dessous de  $T_c/10$ .

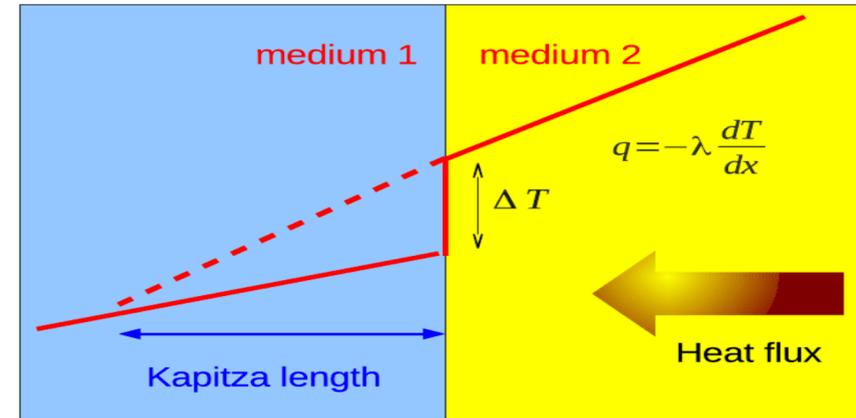
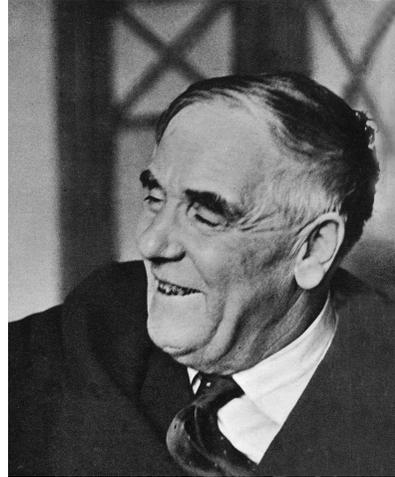
$\Rightarrow$  Créer **un empilement d'interfaces** avec des "indices" très différents

## Kapitza Thermal Resistance

Kapitza : study of the thermal link between metal (copper) and liquid helium (dilution cryostat) ⇒ Problem of conduction at materials interfaces.

### Thermal Boundary Resistance Kapitza resistance

1941 : Kapitza's measurements of the temperature drop near the boundary liquid helium/copper (Dilution Fridge)



$$R = \frac{1}{G} = \frac{(T_2 - T_1)}{q}$$

$$l_K = \lambda/G$$

**"Multiplier" les Rkapitza par une série de couches de deux matériaux en très fort désaccord acoustique**

i.e. avec deux vitesses de son très différentes (i.e. un matériau dur et de faible densité alternant avec un matériau dense et mou)

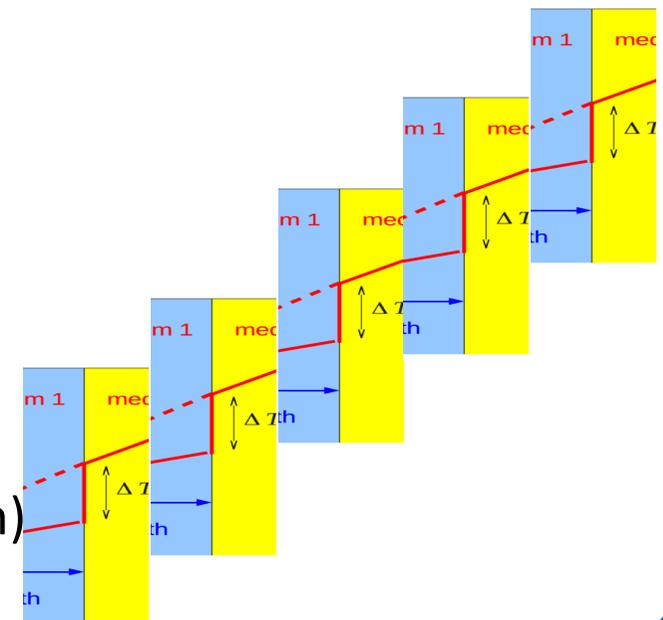
**Pas (ou très peu) d'électrons libres si  $T < T_c/10$**

(i.e. pas de flux de chaleur par les électrons)

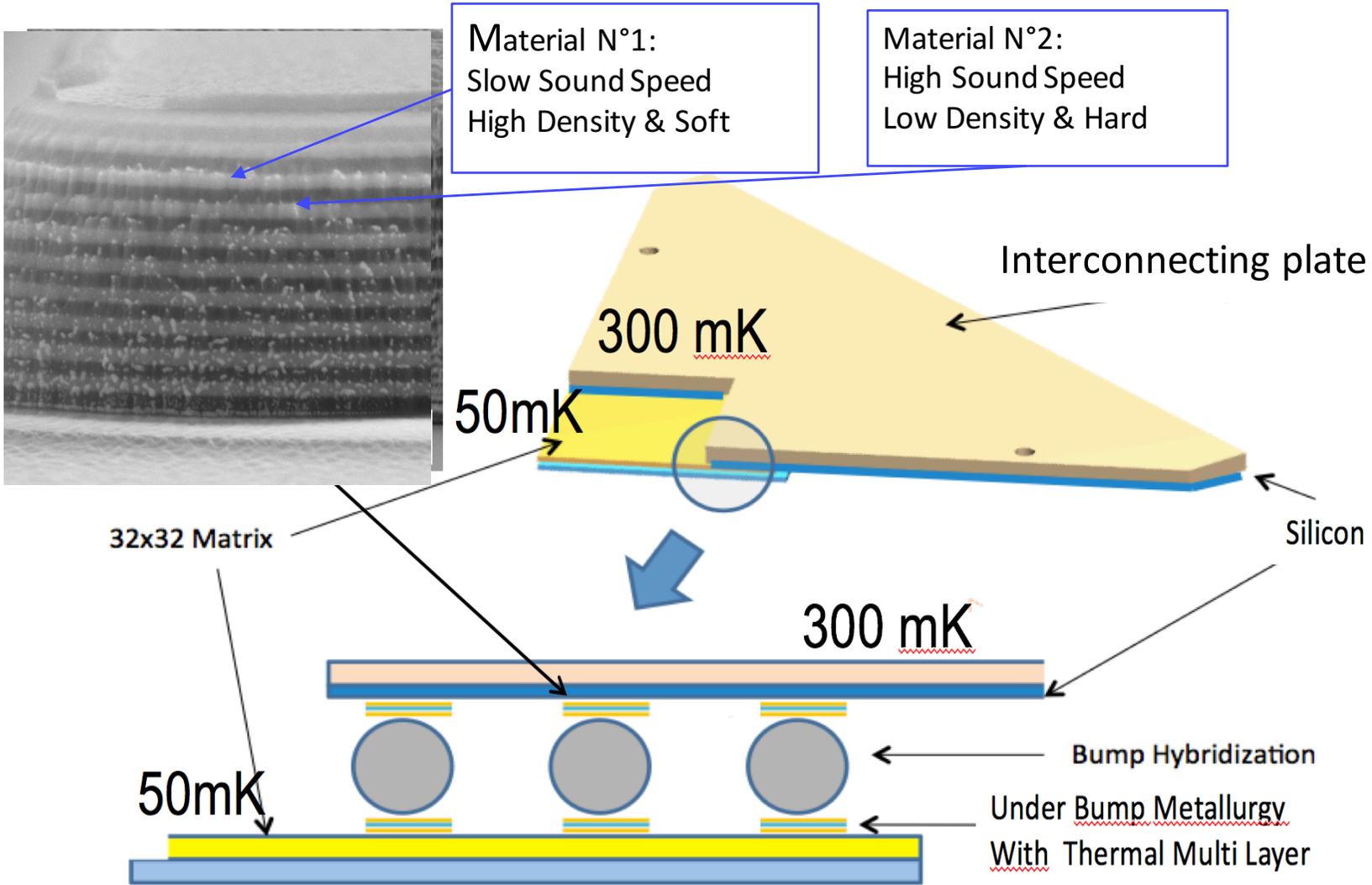
⇒ Les phonons sont TRES "obstrués" par les répétitions  $R_K$  !!!

⇒ **Très haute résistance thermique** dans un système qui peut être très compact (épaisseur du Multicouche  $\sim 1 \mu\text{m}$ )

## L'idée du Multi Couche



# Utilisation: Ancien projet $\mu$ Cal-X



# Contraintes à résoudre

Nécessité d'avoir **les réflexions les plus spéculaires possibles**

⇒ Des **interfaces ultra-propres** entre les deux matériaux différents

- ✓ **Optimising the choice of materials**

  - Maximum acoustic mismatch

- ✓ **Optimising deposit conditions**

  - Interface quality

  - Roughness, Cleanliness

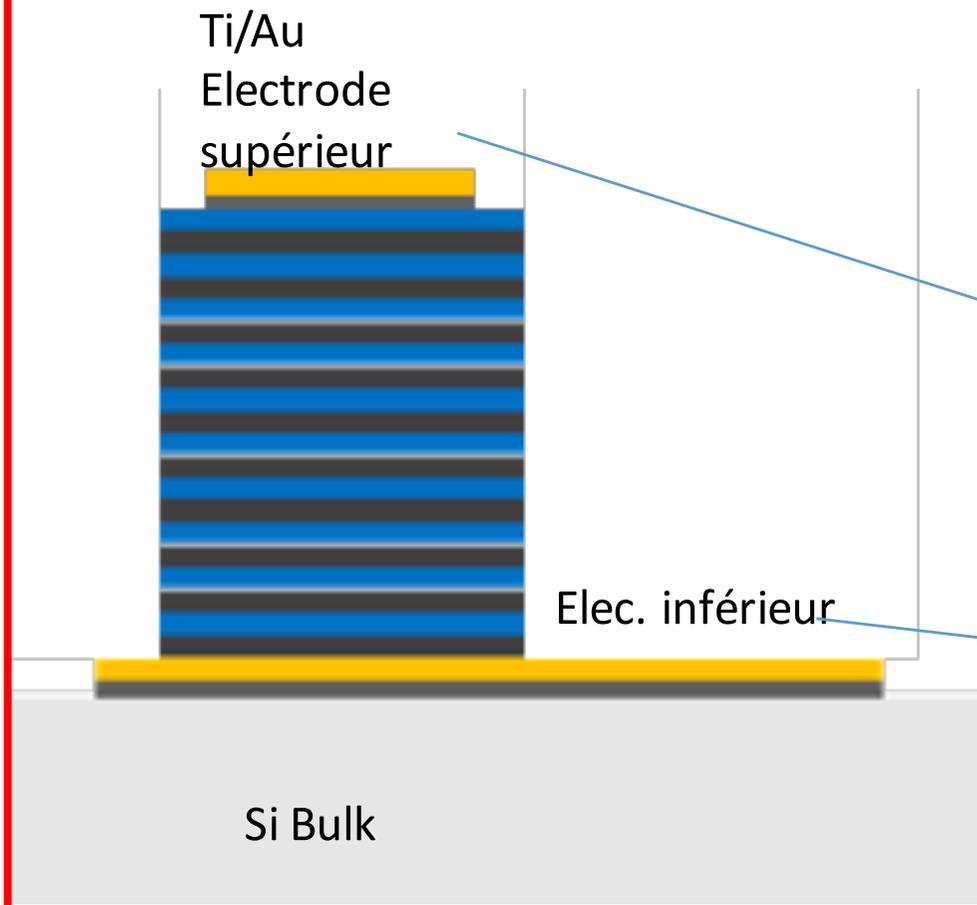
  - Reproducibility

- ✓ **To develop a recipe for etching (making dots)**

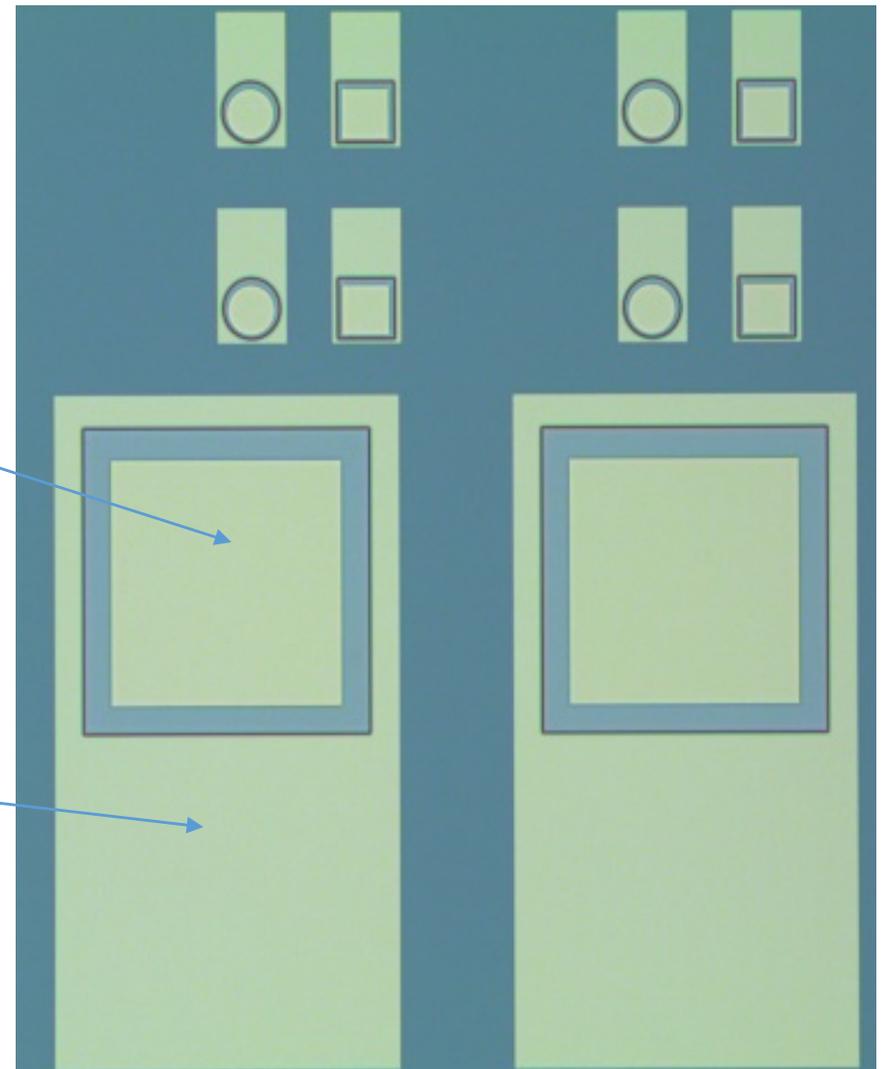
  - Similar for both materials used

  - (without return to the atmosphere)

### Ce qu'on veut construire



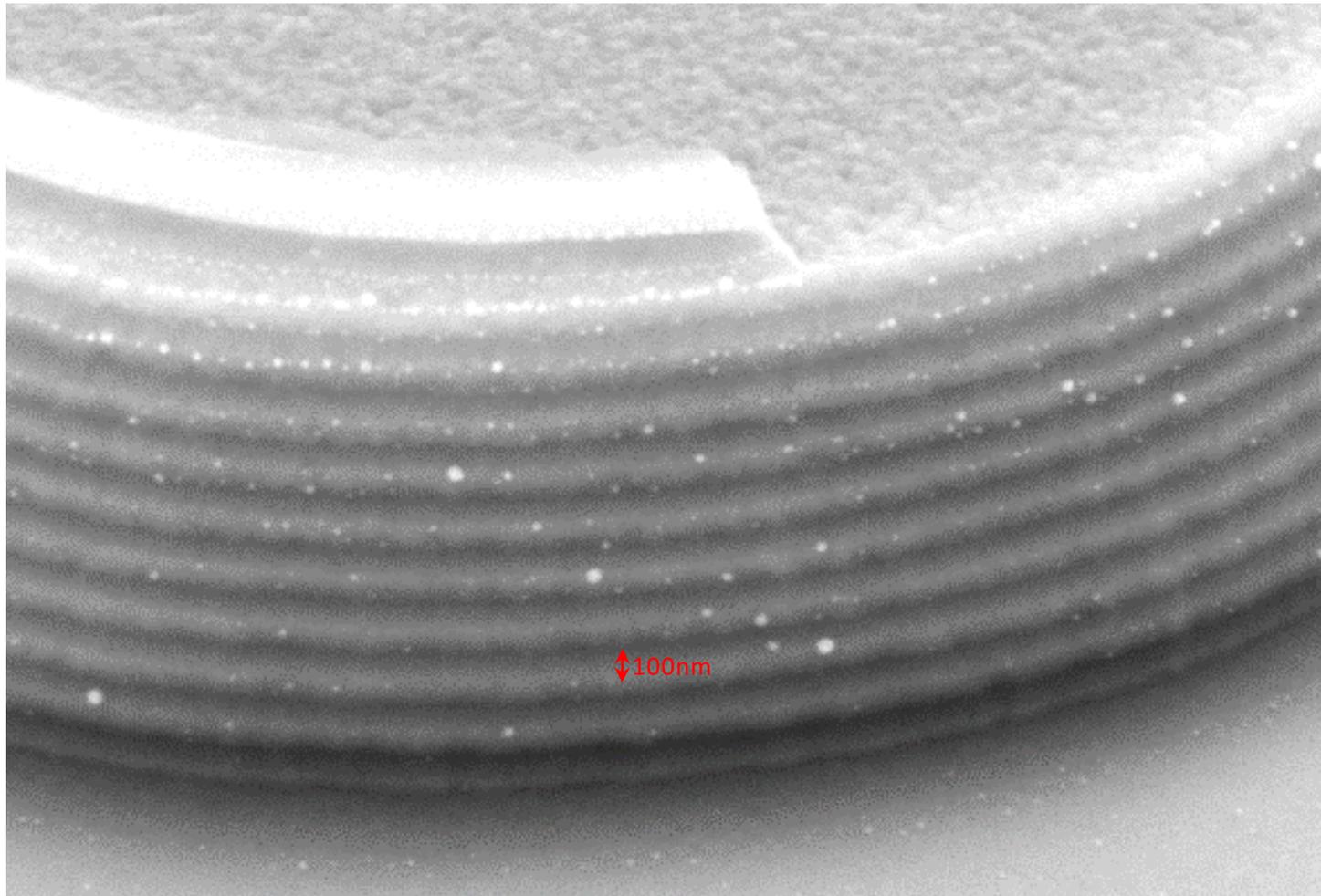
### Ce qu'on a construit



3) What we have today

# Interfaces Très Propres

TiN / Nb

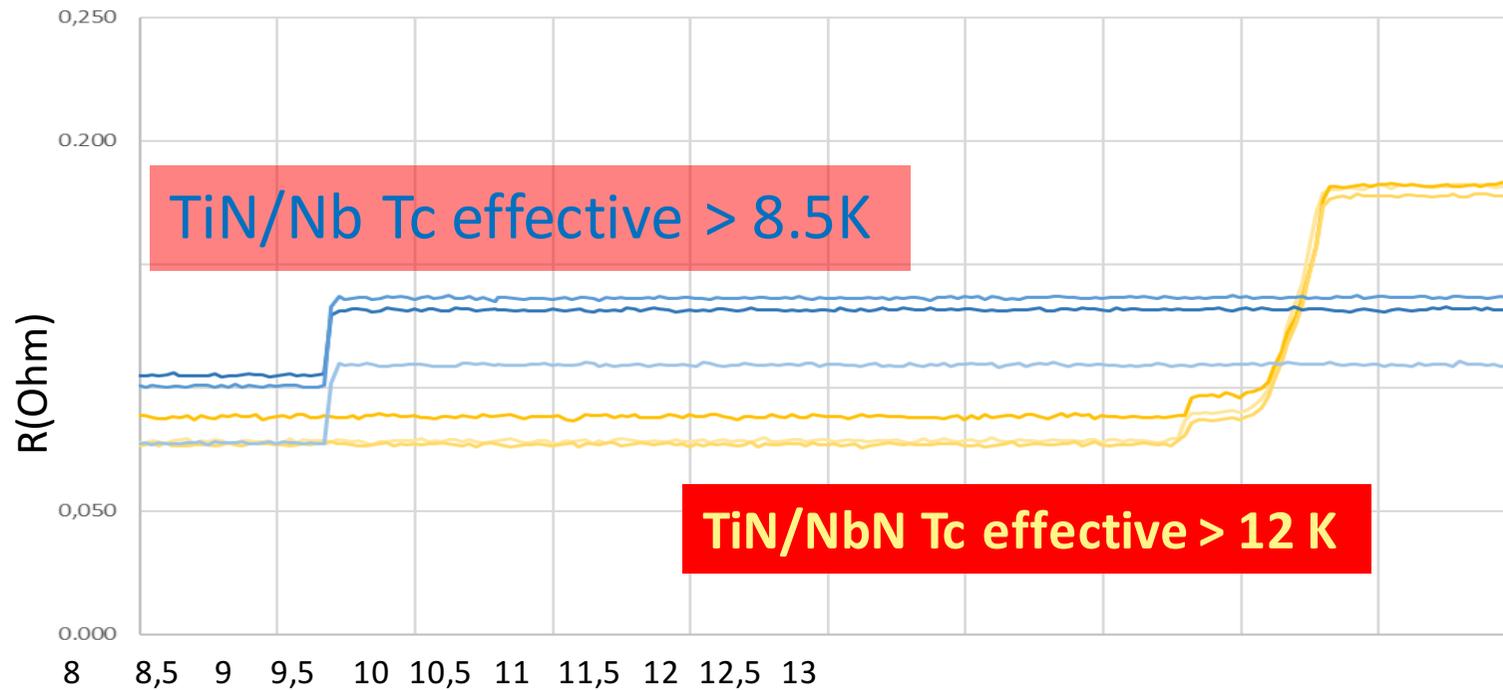


La gravure qui définit les pads ne dégrade pas du tout le MC sur le pourtour des pads

**Recette de gravure parfaite ... démontrée de 10x10 mm jusqu'à 100 $\mu$ m**

3) What we have today

## Effet de proximité excellent

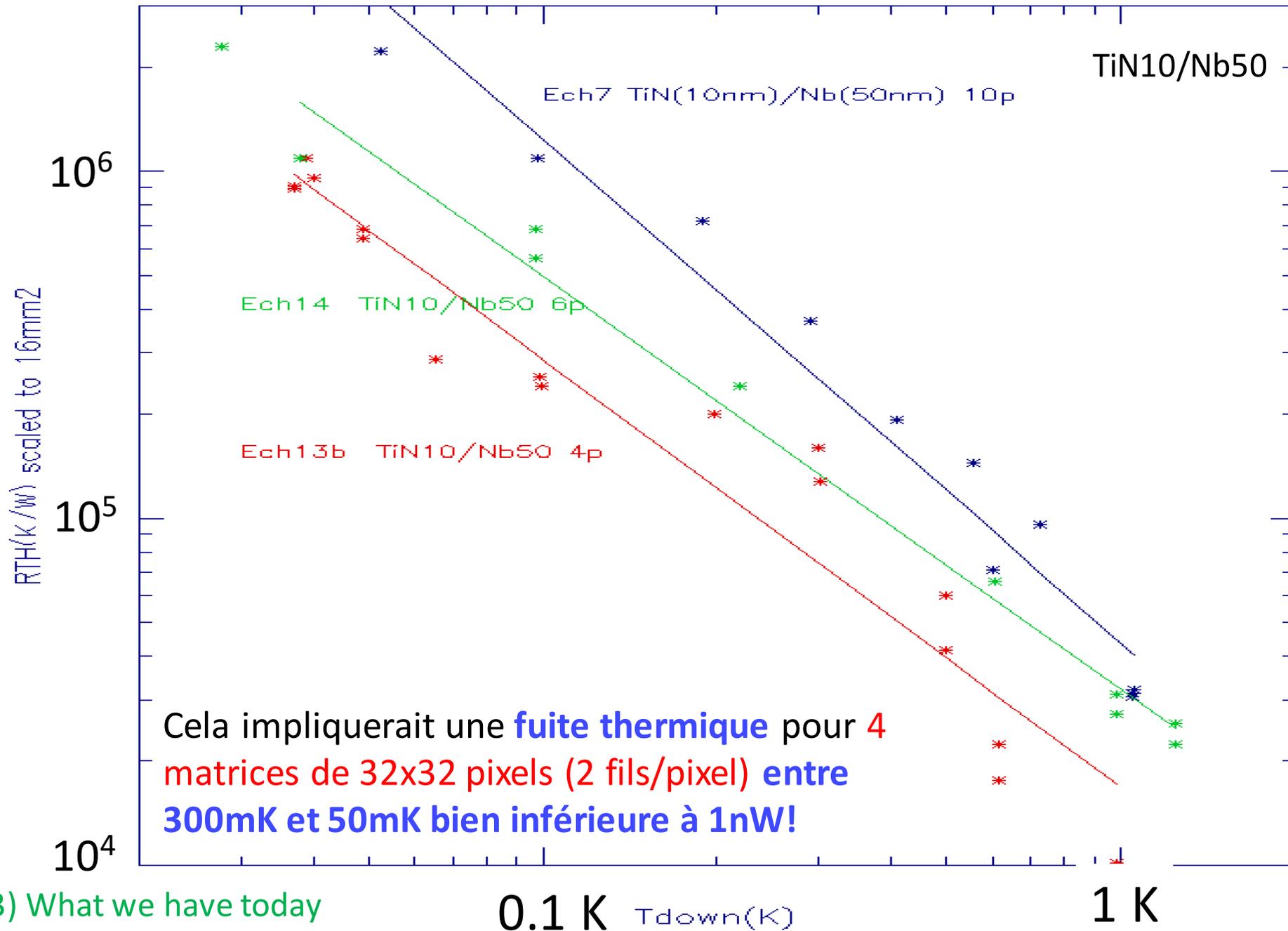


$T_c(\text{TiN})=4.1\text{K}$ ,  $T_c(\text{Nb})=9.3\text{K}$ ,  $T_c(\text{NbN})=14\text{K}$

Measured effective  $T_c$  :

MC (TiN50nm/Nb50nm) = **8,5K !**    MC (TiN50nm/NbN50nm) = **12.5K !**

# Résistances thermiques impressionnantes !



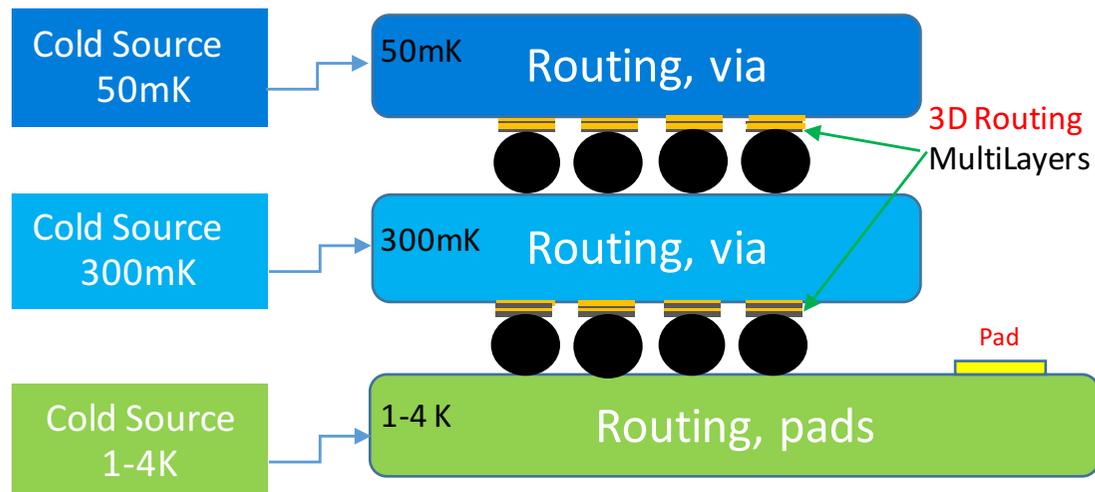
# STYMUL

Cette technique MC est-elle encore efficace pour les petits à très petits pads ?

- Une réalisation à 3 empilement verticaux à 3 températures (50mK, 300mK, 1-4K) en 3 étapes (2 niveaux puis 3, puis estimation des puissances dispo à chaque T)
- Interconnectés avec des liens denses (billes) avec MC.

Uniquement l'électronique passive (comme les résistances)

Évaluer l'efficacité pratique de ces nouvelles techniques avec de petits pad.  
Perte de chaleur et routage haute densité

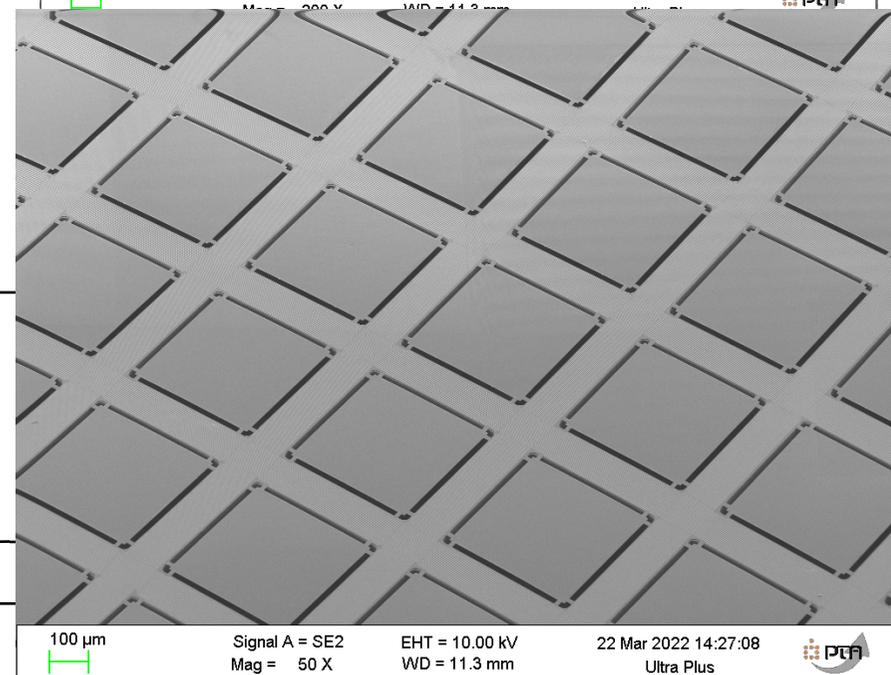
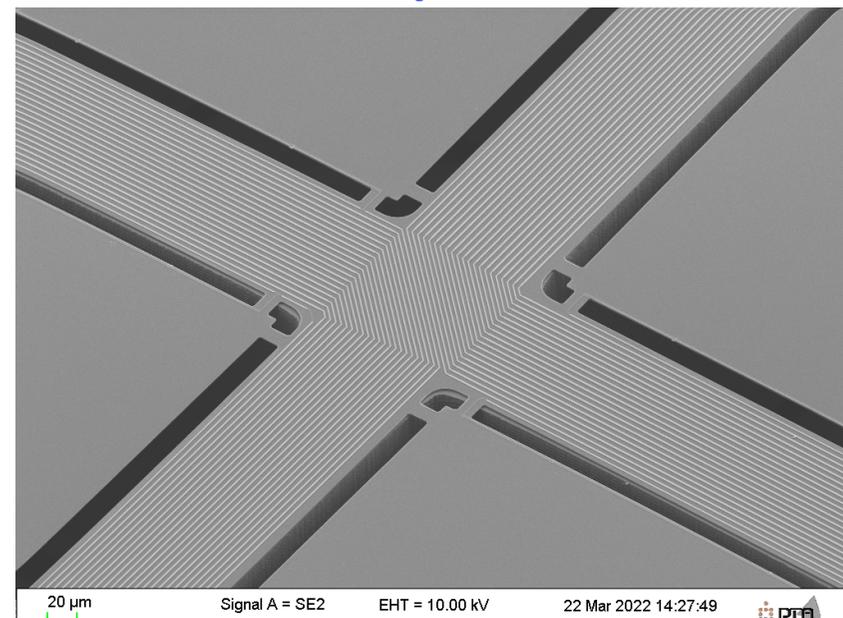
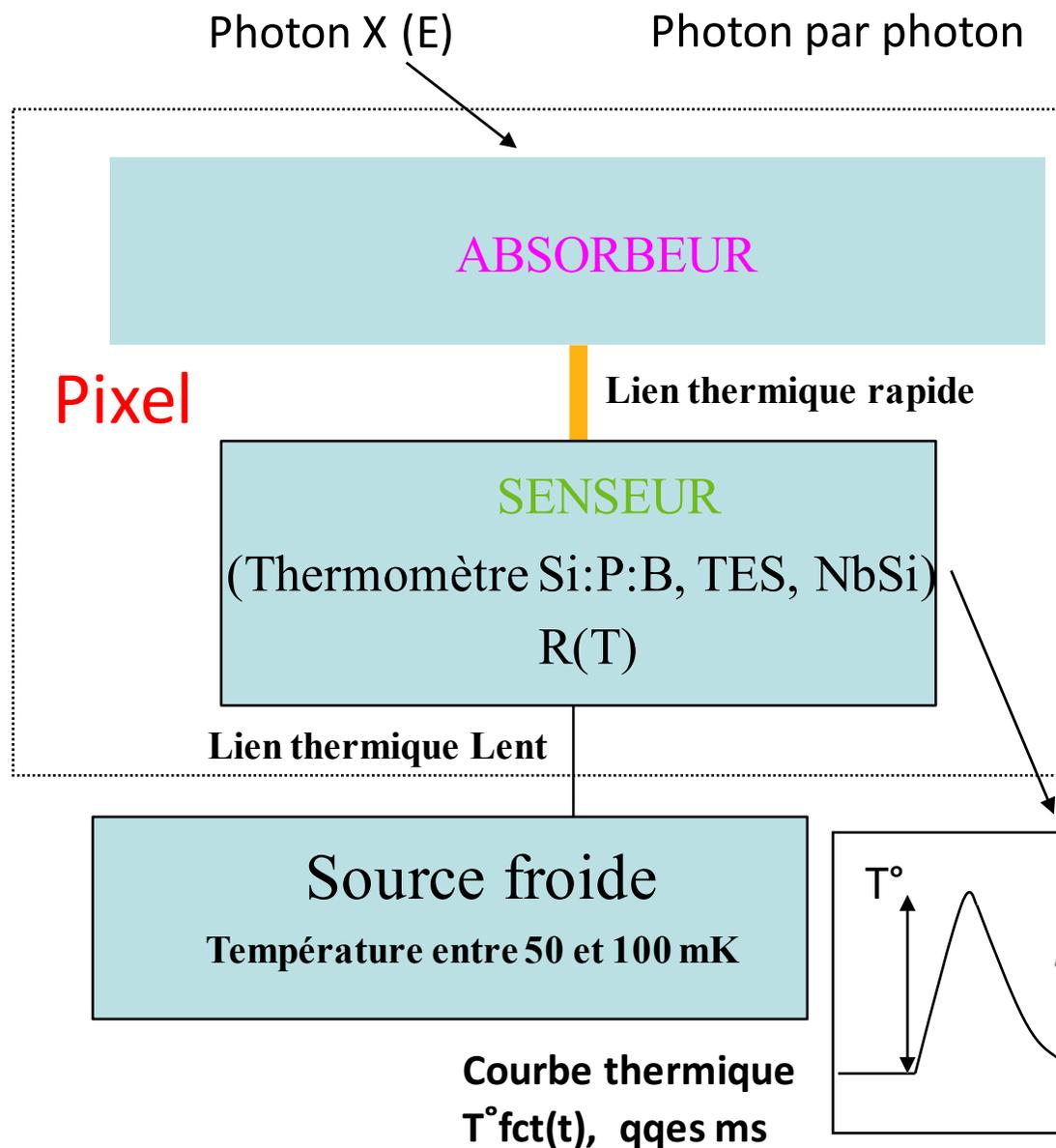


4) What we should demonstrate

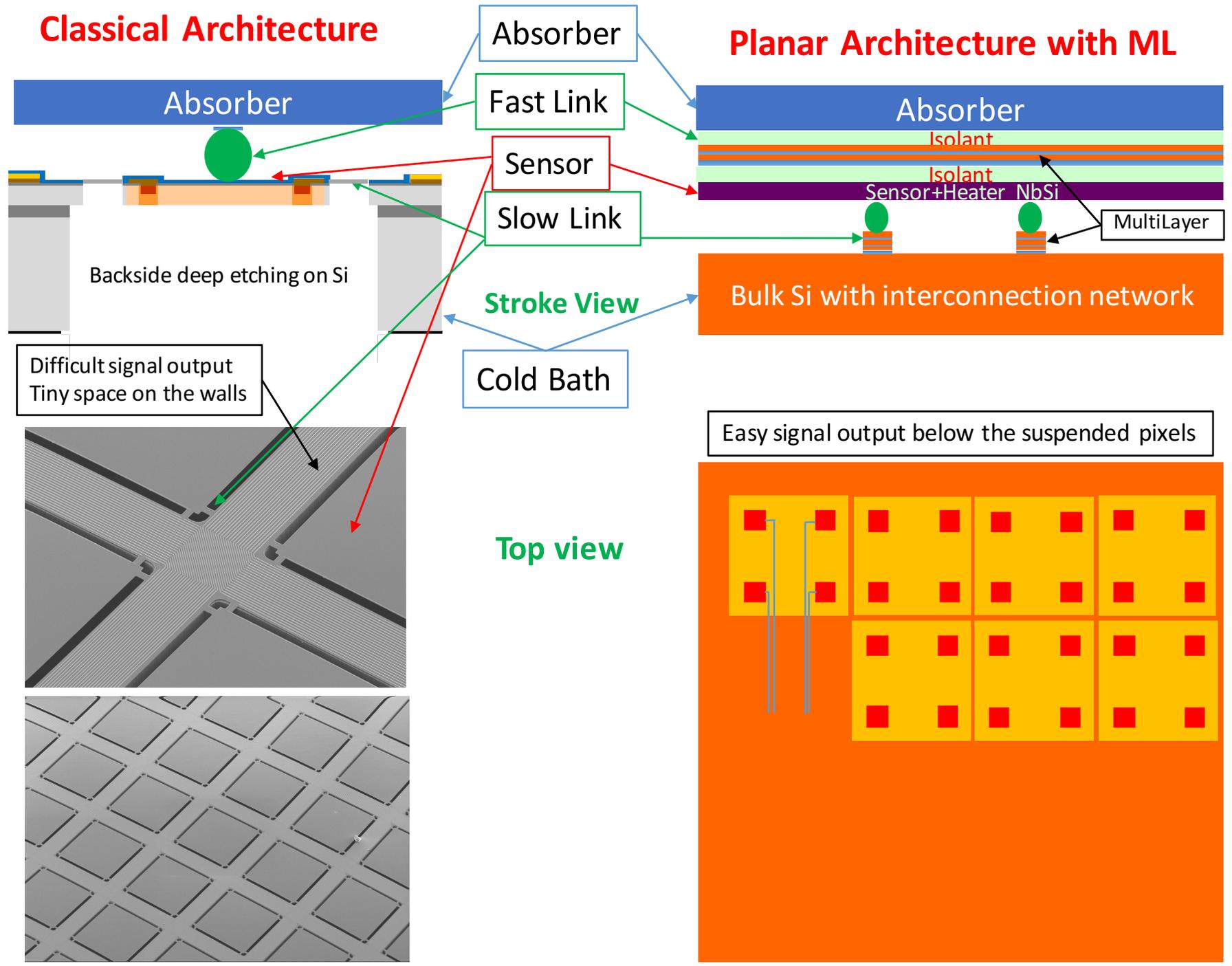
Nouvelle thèse sur cette Démo en Oct 22

# Un tout premier projet d'astrophysique basé sur les ML

Une toute **nouvelle architecture** pour une très grande matrice de rayons X micro-calorimétrique.



4) What we should demonstrate



Oct22 2 years Post-Doc on this project ...

4) What we should demonstrate

# Conclusion & Perspectives

- Les mesures de résistances thermiques des multicouches sont très bonnes en “Full sheet” (i.e.  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ )
- STYMUL: Établir l'efficacité MC jusqu'à  $100 \mu\text{m}$  (même beaucoup moins pour les QBits) (Nouvelle thèse en Oct 22)
- **Très grande matrice micro-calorimétrique en X avec Archi. ML**
- Cette technique ML devrait devenir un outil discret mais essentiel pour presque toutes les expériences Sub-K qui nécessitent une densité de connexion très élevée et une électronique froide très proche..

Job Offer : 2 years Post-Doc (Oct22 ) on ML  $\mu\text{Cal-X}$  project ...