

ANF "Techniques de Base des Détecteurs" 2024

Détecteurs IR lointain: bolomètres

Michel Piat

piat@apc.in2p3.fr

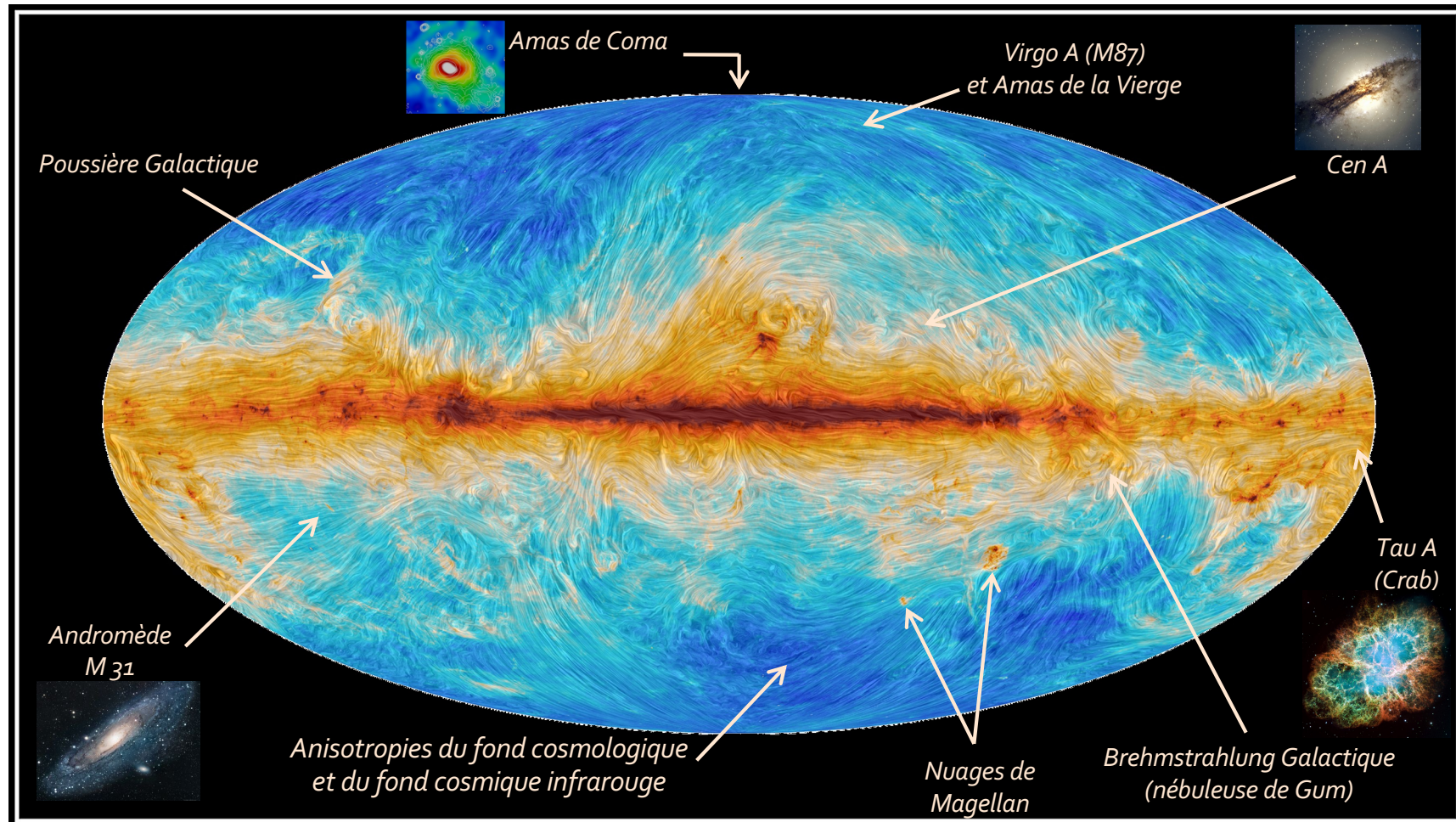


Le ciel en IR lointain

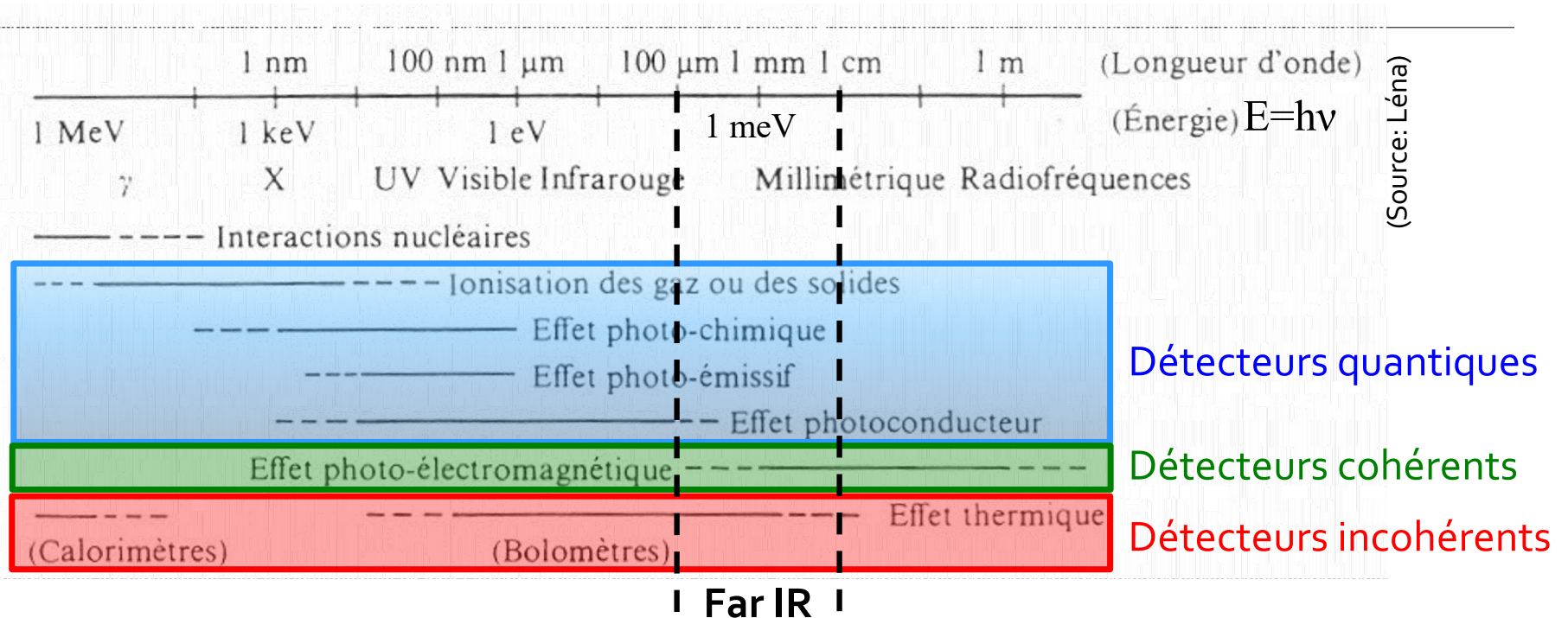


planck

IR lointain: λ entre $100\mu\text{m}$ et 10mm , l'Univers froid mais pas que, CMB: $\sim 10^{10}$ photons/s



Détecteurs mm



- Détecteurs cohérents: sensible au champ EM (amplitude et phase)
 - Heisenberg \Rightarrow limite intrinsèque en sensibilité
- Détecteurs incohérents: sensible à la puissance moyenne du champ EM
 - **Bolomètres**, détecteurs à inductance cinétique (KIDs) $P \propto \langle |E|^2 \rangle$

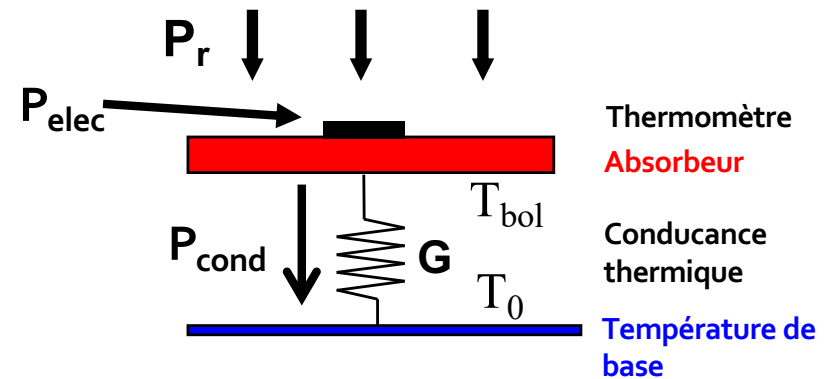
Plan de l'exposé

1. Description du bolomètre
2. Réponse à un signal
3. Bruits
 - sensibilité, optimisation du bolomètre
4. Exemples

1. Bolomètres

- **Détecteur thermique**

- Mesure de l'échauffement résultant de l'absorption du rayonnement (ou d'une particule)
- Système macroscopique
- Thermomètre = élément résistif $R(T)$
- Lecture: $R=U/I$

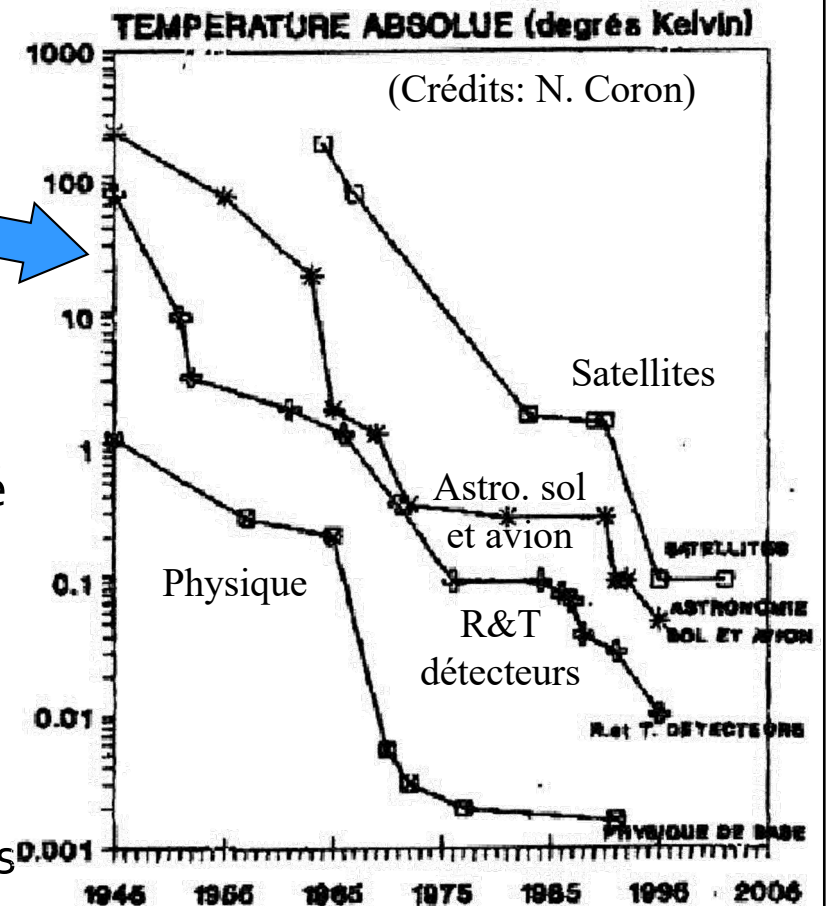


- **Meilleur détecteur large bande dans la gamme de λ entre $100\mu\text{m}$ et $\sim 10\text{mm}$**



- Refroidi aux basses température $T < 0.3\text{K}$
- Sensibilité limitée par le bruit de photon du rayonnement incident

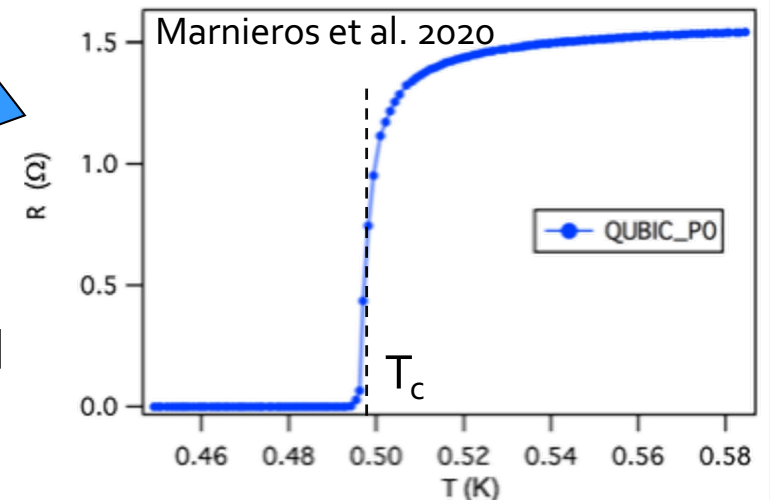
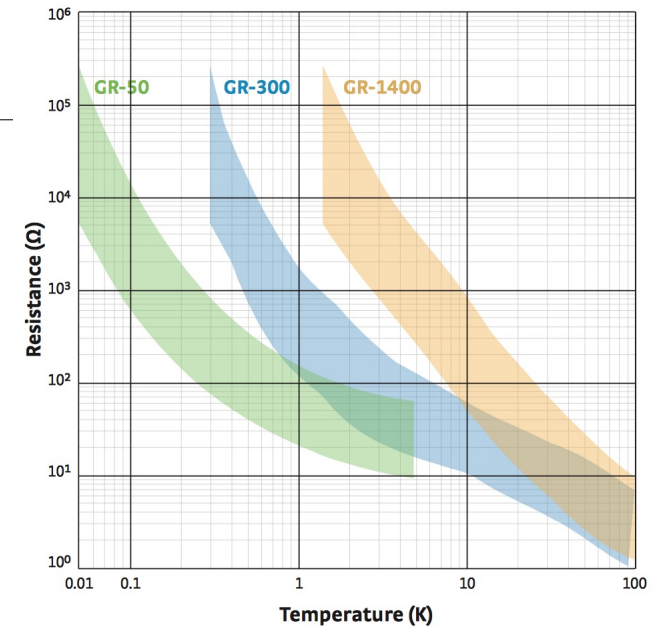
Historique rapide du bolomètre

- 1881 Langley: invention du bolomètre (à T ambiante)
- Depuis 1950: Essor lié à la cryogénie
 - Cours Jean-Pierre Thermeau
- 1942 Andrews et al. : Bolomètre composite supraconducteur au tantale ($T_c=4.5K$)
- 1961 F. Low: Première utilisation du Ge dopé
- 1998 Lee & Richards: forte contre réaction électro-thermique du bolomètre supraconducteur, **Transition Edge Sensor (TES)**
- 2003 Day et al.: Kinetic Inductance Detectors (KIDs)



Thermomètre

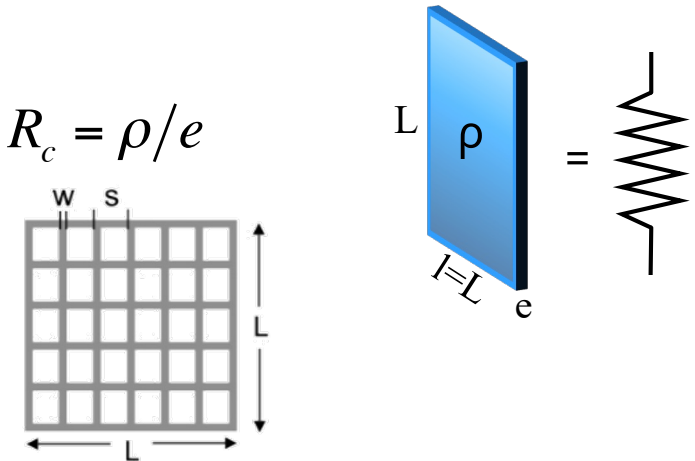
- Caractérisation: $\alpha = \frac{T}{R} \frac{dR}{dT}$
- **Semi-conducteur**: $\alpha \# -5 \rightarrow -10$ 
 - Si implanté (CEA)
 - Ge NTD (Haller-Beeman)
 - Couches minces Nb/Si (IJCLab)
- **Supraconducteur**: $\alpha \# 100 \rightarrow 1000$
(Transition Edge Sensor TES) 
 - Ti: température critique $T_c \approx 400\text{mK}$
 - Mo/Cu, Mo/Au: Variation de T_c par effet de proximité
 - Couches minces NbSi (IJCLab): T_c dépend de la concentration en Nb (>12%)



Absorbeur pour IR lointain

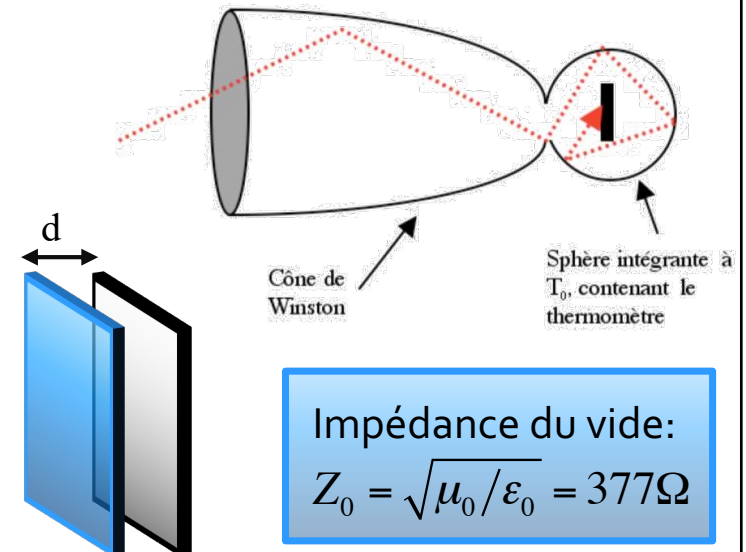
- **Absorbeur = couche métallique**

- Résistance carrée d'une couche uniforme: $R_c = \rho/e$
- Grille métallique: $R_c = \rho/e \times s/w$
 - ✓ Apparaît comme une couche uniforme si $\lambda \gg s$ et w
 - ✓ Pas le cas pour les rayons cosmiques



- Dans le vide:

- Absorption max = 50% pour $R_c = Z_0/2$
 - ✓ Sphère intégrante pour augmenter l'absorption
- Absorption max = 100% pour $R_c = Z_0$ avec couche réfléchissante parfaite distante de $d = \lambda/4$ (modulo $\lambda/2$)



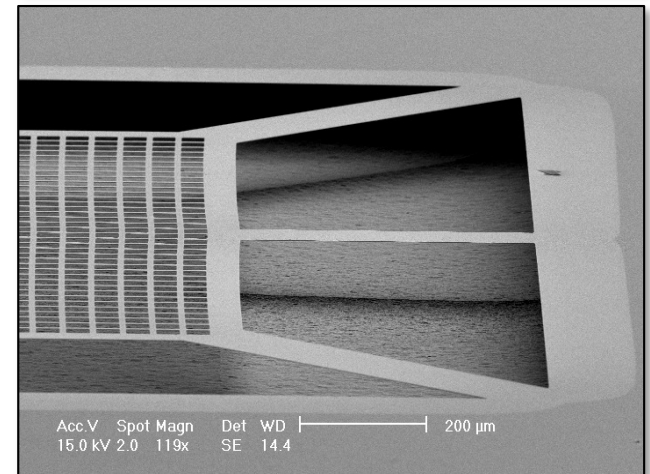
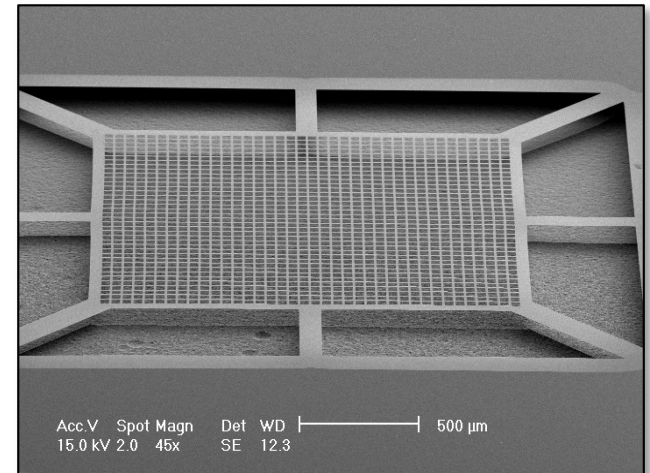
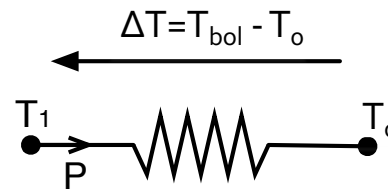
Conductance thermique

- Utilisation des micro-technologies
 - Membranes en nitrure de silicium (SiN) ou en silicium (Si)
- Conduction thermique dans le Si ou SiN
 - Transport des phonons: diffusif à T ambiante
 - Aux très basses température: transport balistique et diffusion sur les surfaces
 - ✓ Libre parcours moyen > taille du dispo.
 - ✓ Transport radiatif

- Modélisation classique: (diffusif)

$$P = K(T_{bol}^{\beta+1} - T_0^{\beta+1})$$

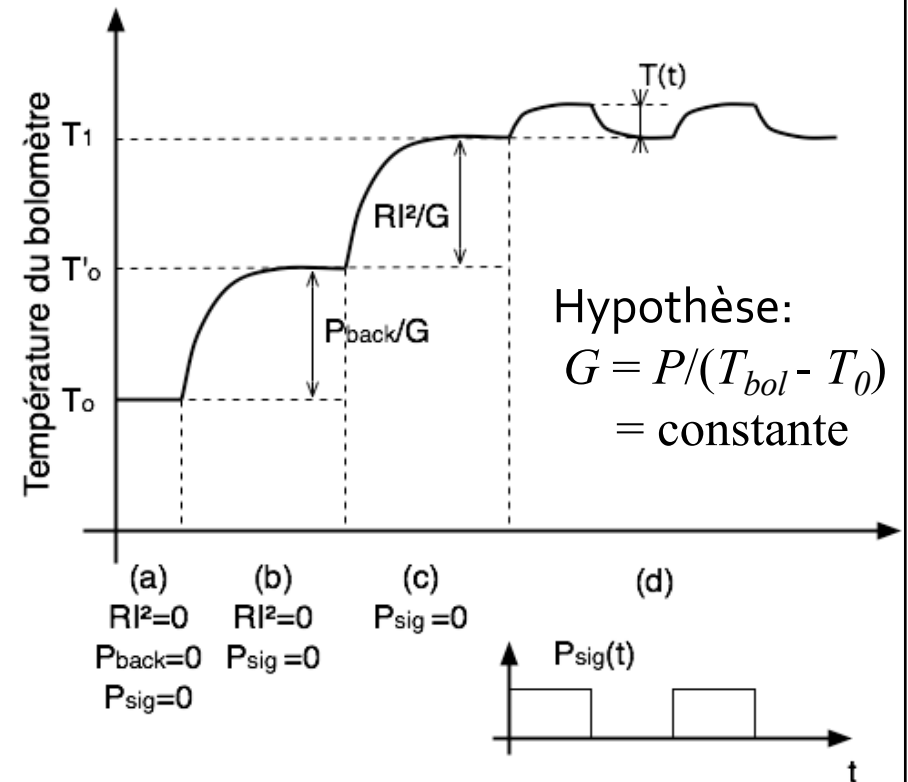
$$G_d = \left(\frac{dP}{dT_{bol}} \right)_{T_0=cst} = (\beta + 1)KT_{bol}^{\beta}$$



Membranes suspendues en SiN 3x3 mm
épaisseur 500 nm (C2N)

2. Réponse du bolomètre : linéarisation en petits signaux

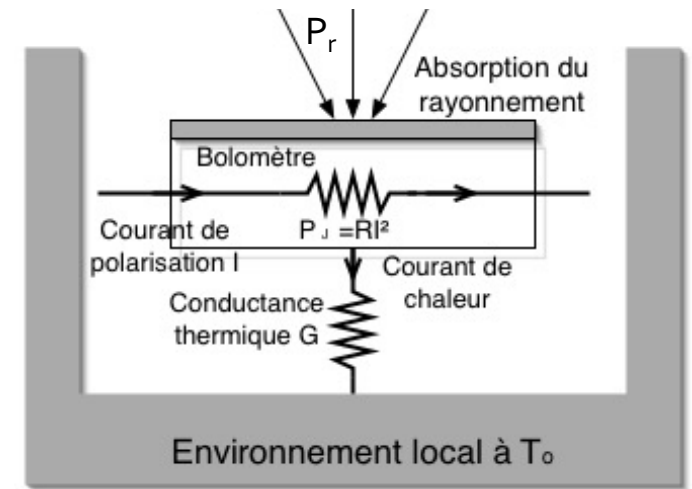
- $P_r = P_{back} + P_{sig}(t)$ avec
 $P_{sig} \ll P_{back}$
 - P_{back} : puissance radiative moyenne, *background* = puissance de fond
 - $P_{sig}(t)$: puissance radiative du signal que l'on cherche à mesurer
- $T_{bol} = T_1 + T(t)$ avec $T \ll T_1$
 - T_1 : Température du bolomètre en l'absence de signal
 - T : fluctuations de la température du bolomètre dues à P_{sig}



Réponse du bolomètre en fréquence

- En température et en Fourier:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\tilde{T}}{\tilde{P}_{sig}} = \frac{1}{G_{eff} (1 + j\omega\tau_{eff})} \\ \tau_{eff} = \frac{C}{G_{eff}} \end{array} \right.$$

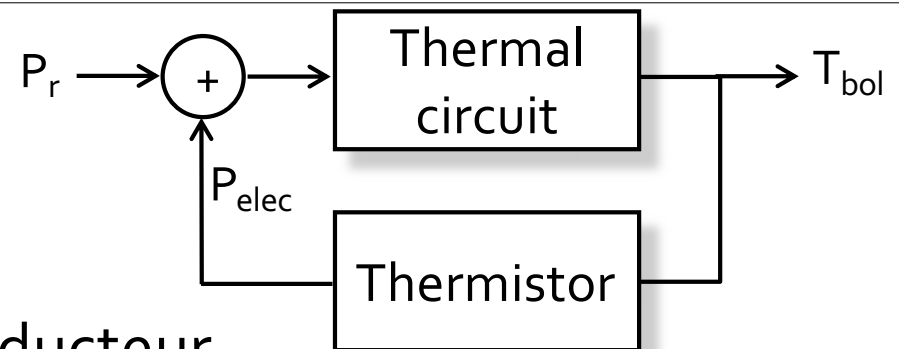


C : capacité calorifique du bolo [J/K]
 G_{eff} : conductance thermique effective du bolo [W/K]

- ➔ 1. Compromis entre constante de temps et réponse
2. Faible C requit \Rightarrow basses températures

Contre réaction électro-thermique ou Electro Thermal Feedback (ETF)

- Système en contre réaction:



- Cas $\alpha < 0$: bolomètre semi-conducteur

➤ Polarisation en courant: $T \uparrow \Rightarrow R \downarrow \Rightarrow P_{elec} = RI_{bias}^2 \downarrow \Rightarrow T \downarrow$

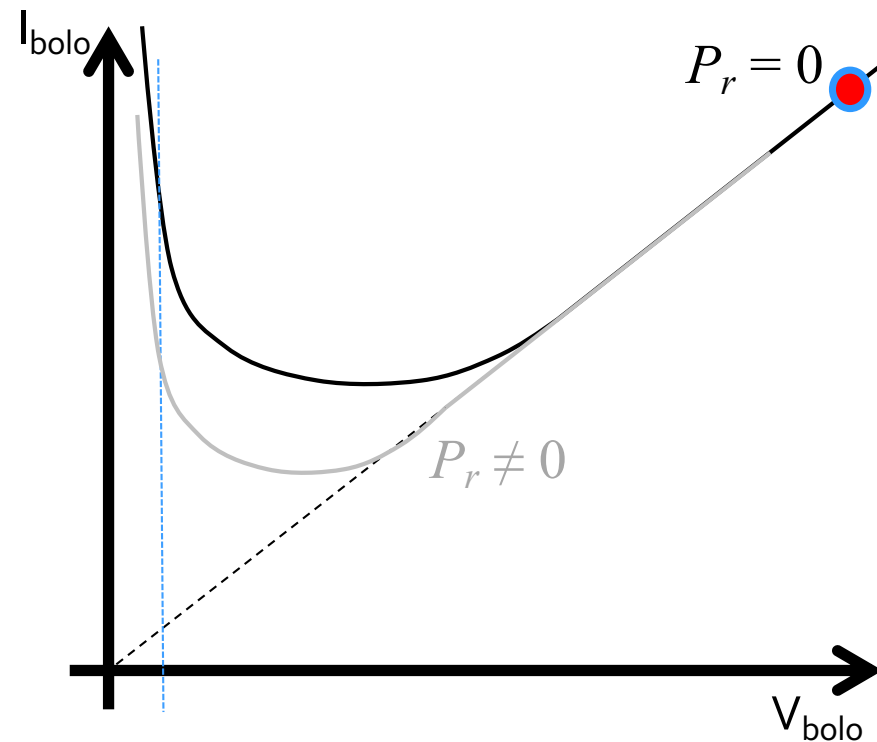
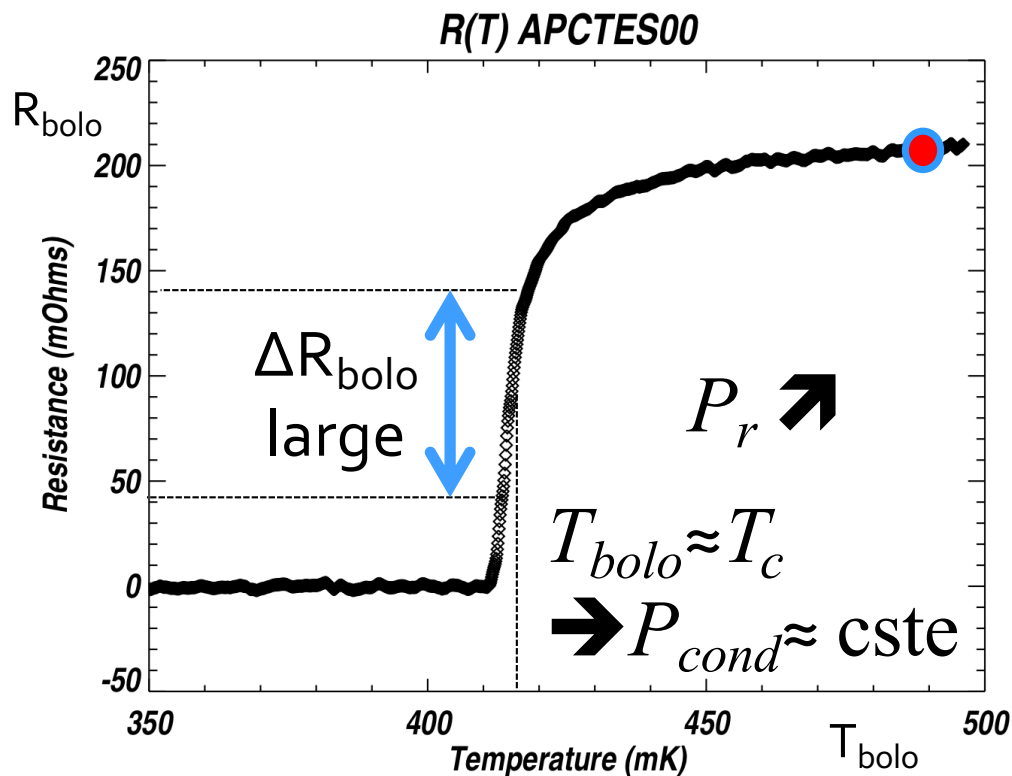
- Cas $\alpha > 0$: bolomètre supraconducteur

➤ Polarisation en tension: $T \uparrow \Rightarrow R \uparrow \Rightarrow P_{elec} = V_{bias}^2/R \downarrow \Rightarrow T \downarrow$

- Effet efficace si $|\alpha|$ est grand: cas des **bolomètres supraconducteurs**

Forte contre réaction électro-thermique dans le TES

- En quasi-statique: $P_r + P_{elec} = P_{cond}$



Fluctuations de P_r compensées par P_{elec}

Effet de l'ETF sur le TES

- Système en contre-réaction:

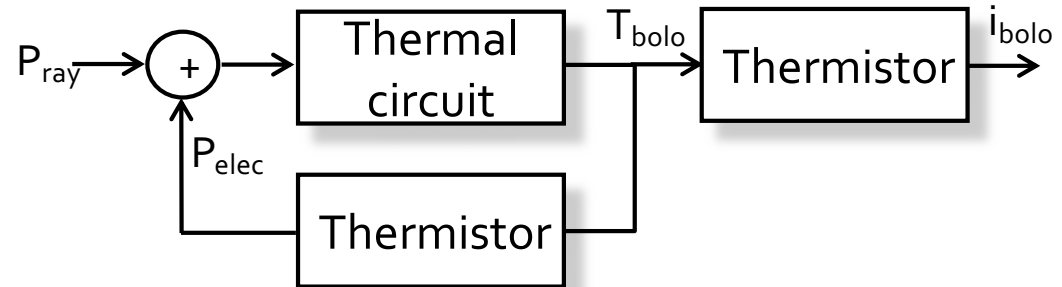
- Circuit thermique du 1^{er} ordre: $\tau=C/G$

- Réponse du TES en courant:

$$S_I(\omega) = -\frac{1}{V} \cdot \frac{L}{1+L} \cdot \frac{1}{1+i \cdot \omega \tau_{eff}}$$

- Constante de temps: $\tau_{eff} = \frac{\tau}{1+L}$

- Gain en boucle ouverte: $L = \frac{|\alpha| \cdot P_{elec}}{T_1 G_d}$ avec $\alpha = \frac{T}{R} \frac{dR}{dT}$



- Si $L \gg 1$: (*strong ETF*)

- $\tau_{eff} \ll \tau$

- Réponse en quasi-statique: $\Re=1/V$

- Linéarisation

- Se place naturellement dans la transition

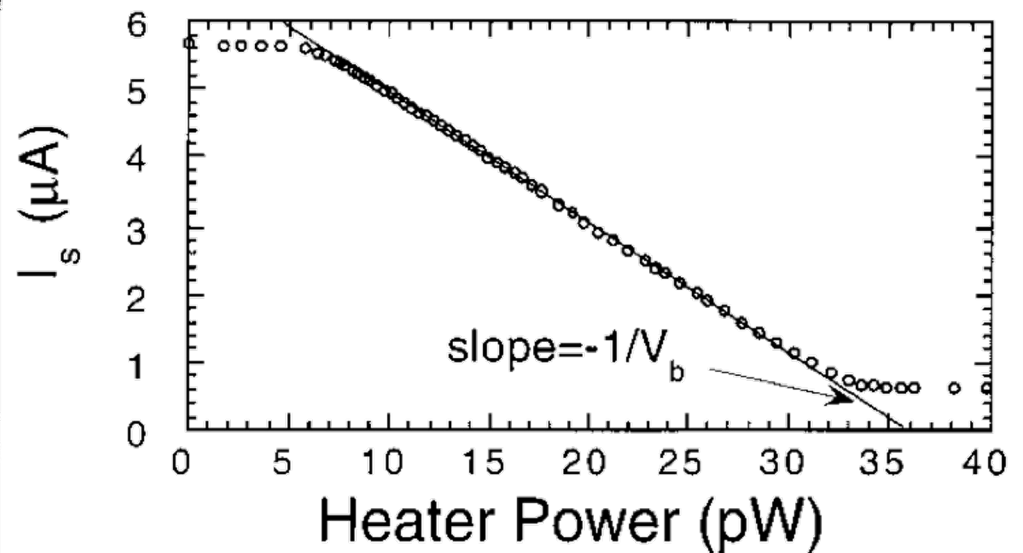
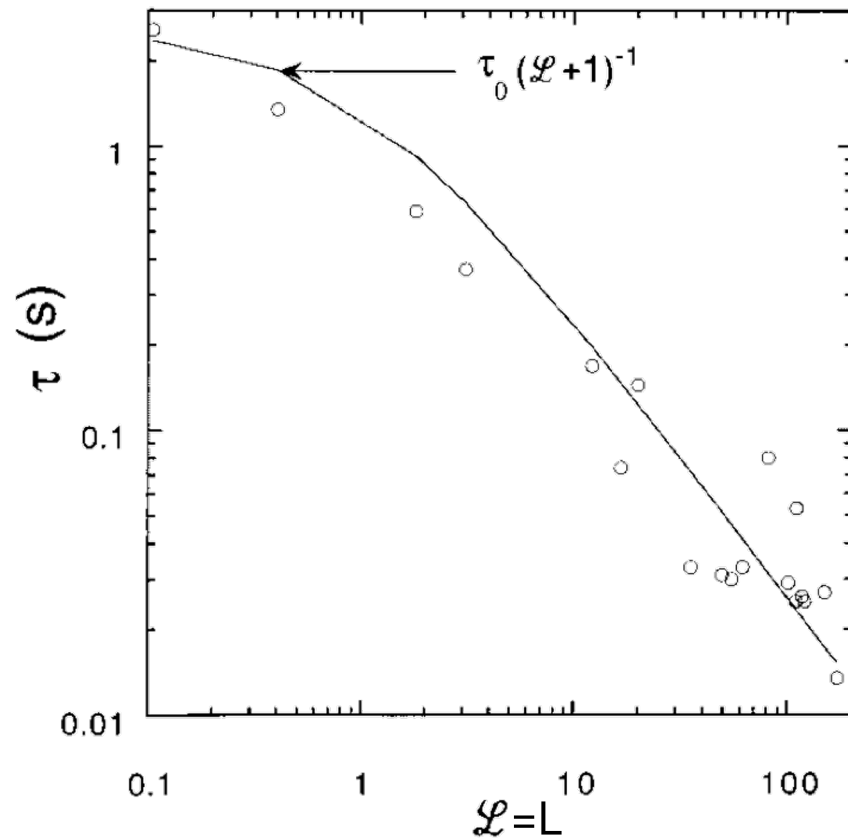
Bolomètres supraconducteurs

$\alpha=100-1000$

$L=10-100$

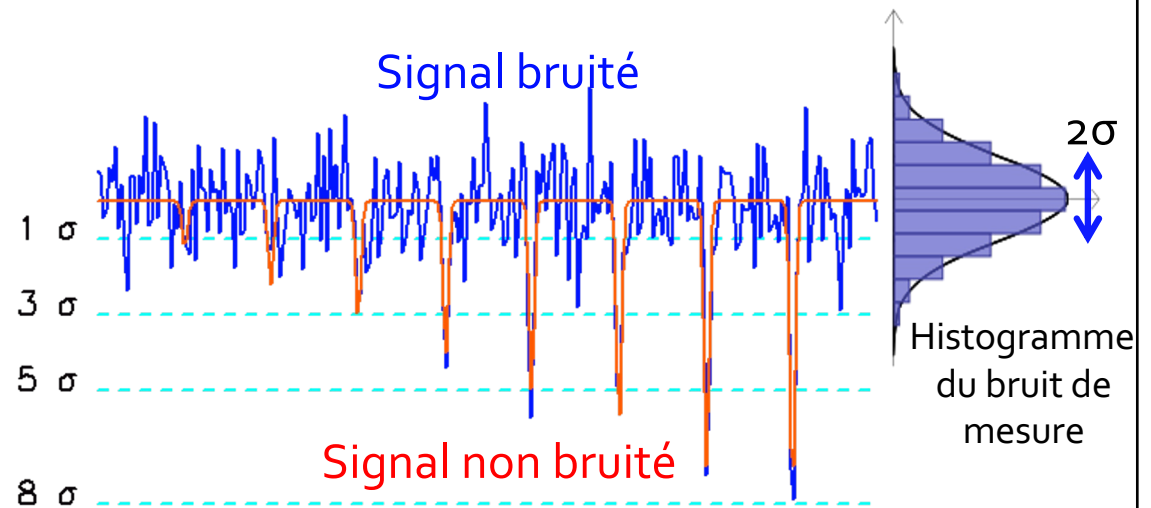
Effet de l'ETF sur le TES

- A. Lee, P. Richards et al. 1998



3. Bruits d'une chaîne de détection

- Agitation thermique \Rightarrow bruits
- Bruit gaussien
 - Histogramme gaussien
 - Déviation standard σ
 - **Détection d'un signal dès qu'il atteint 3σ**
 - $\sigma =$ sensibilité
- Bruit blanc: toutes les fréquences présentes
 - σ dépend de la bande passante B : $\sigma^2 \sim B$
 - Pas toujours le cas (bruit en $1/f$ par exemple)

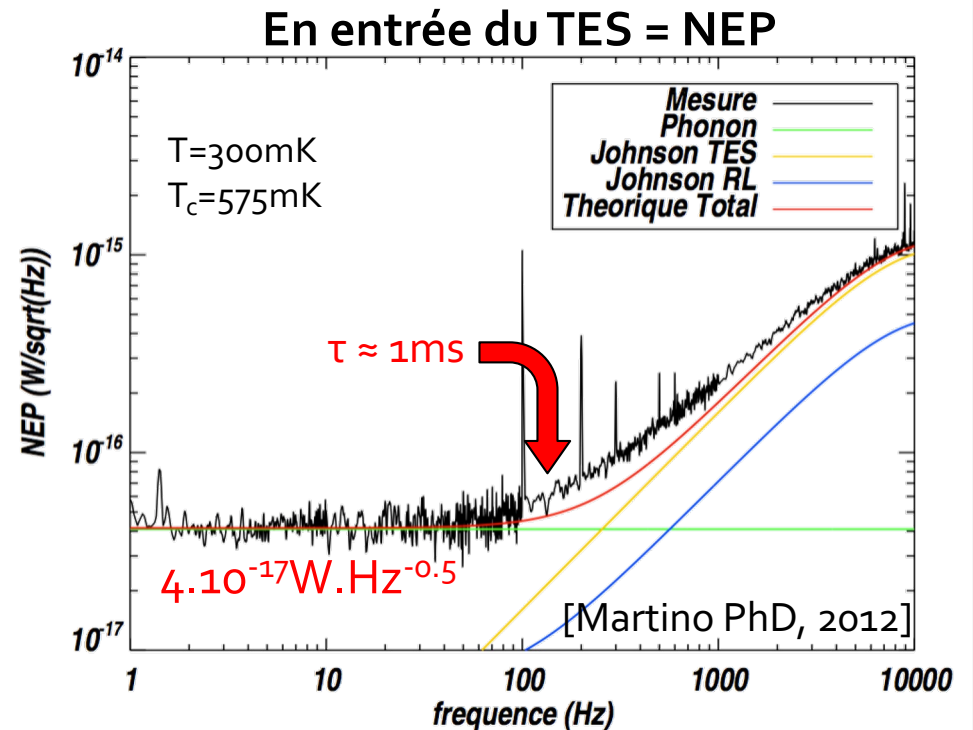
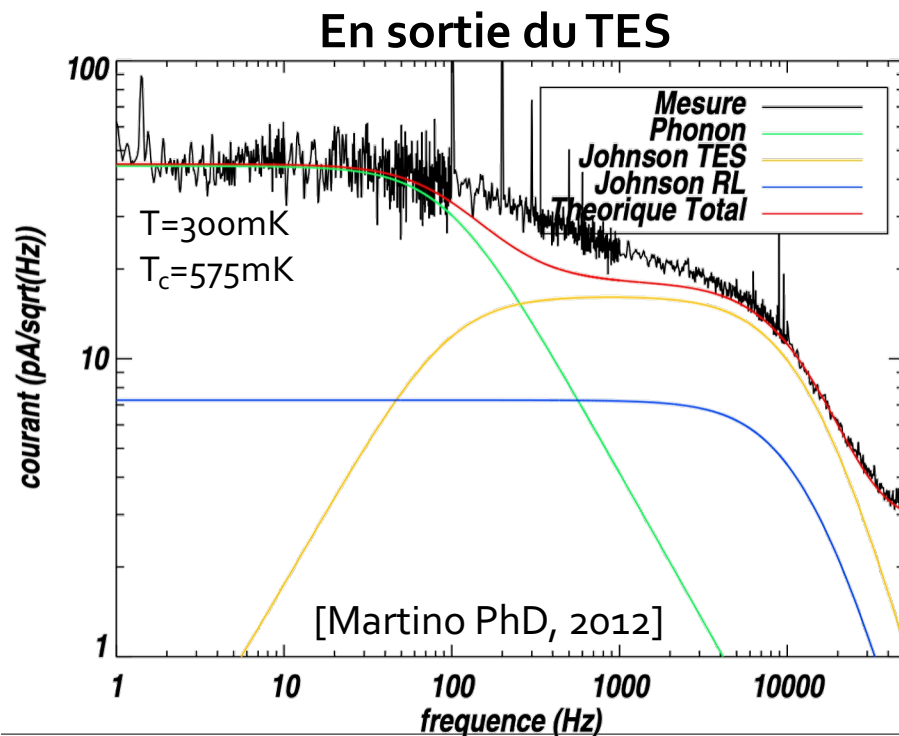


Bruits d'un bolomètre: NEP

- Bolomètre = système
 - Entrée: flux de photon = puissance moyenne de l'onde EM (W)
 - Sortie: signal électrique (A ou V)
- **NEP = déviation standard σ du bruit exprimée en W, pour $B=1\text{Hz}$ de bande passante (ou $\frac{1}{2}$ seconde de temps d'intégration)**
 - $$NEP = \sigma(t_{\text{int}} = 0.5s) \Leftrightarrow \sigma = \frac{NEP}{\sqrt{2 \times t_{\text{int}}}}$$
 - Unité de la NEP : $[\text{W.Hz}^{-0.5}]$
 - Caractérise la sensibilité d'un détecteur
- Définition mathématique de la NEP:
 - $NEP = \text{sqrt}(\text{Densité Spectrale de Puissance du bruit en W})$

Bruits d'un bolomètre: exemple TES QUBIC

- Sources de bruits:
 - Bruit Johnson: agitation thermique des électrons dans une résistance
 - Bruit de phonon: agitation thermique dans une résistance thermique
- TES: Bruit de phonon dominant



Optimisation du TES

- NEP pour un TES optimisé en fort ETF:

$$NEP_{bol}^2 \approx [3 - 20] \times 4kT_0 P_{back}$$

- NEP du bruit de photon: $NEP_{hv}^2 \approx 2h\nu P_{back}$
- Si l'on veut être « Background limited performances » (BLIP):

- $NEP_{bol}^2 \leq NEP_{hv}^2$

- Ainsi:

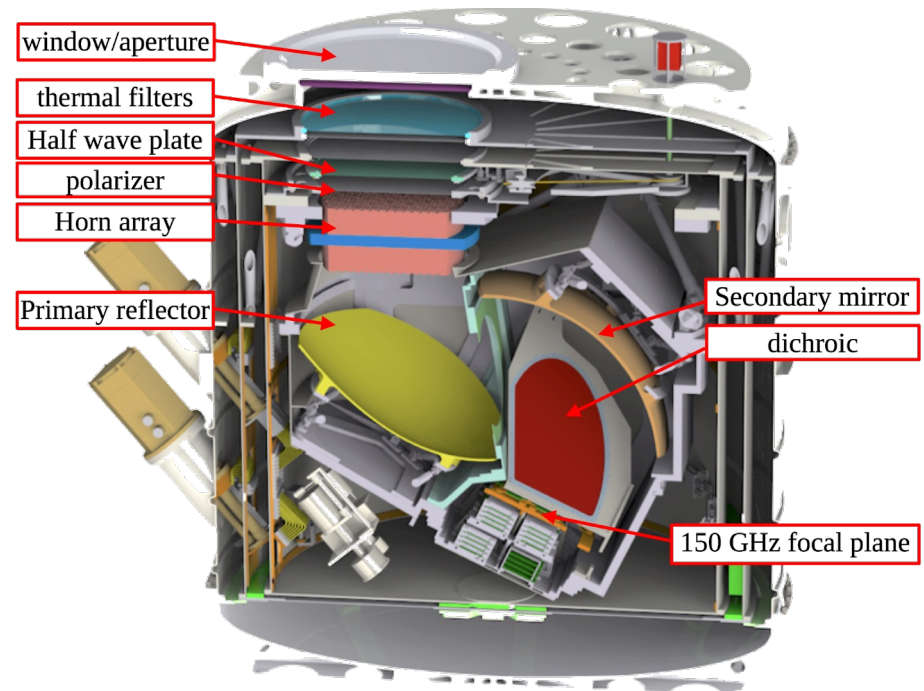
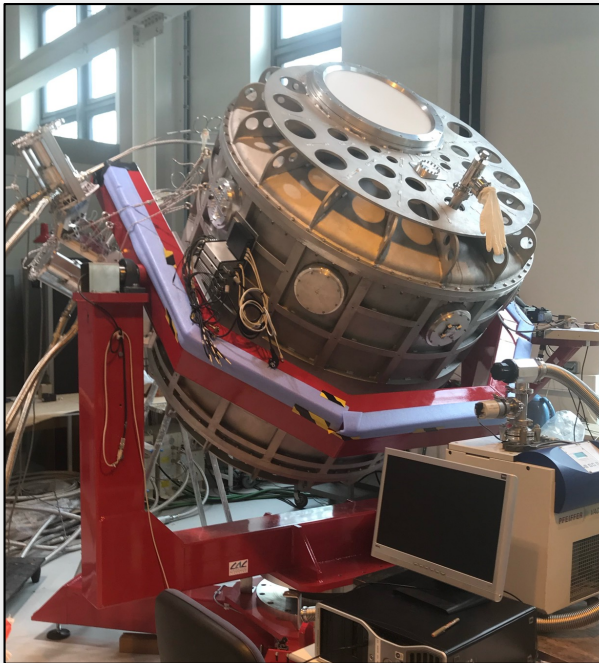
$$T_0 \leq 350mK \times \frac{1mm}{\lambda}$$

Basses températures requises



4. Exemple: TES pour l'expérience QUBIC

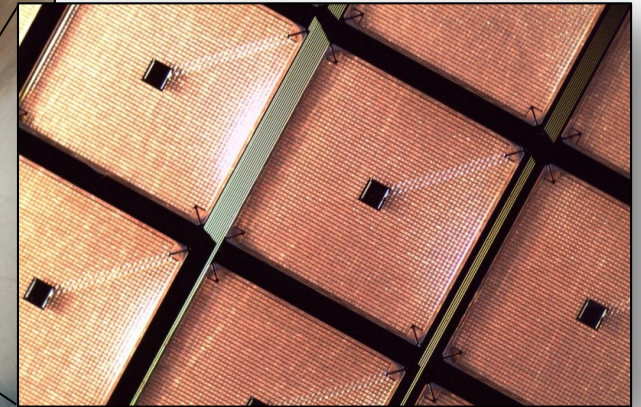
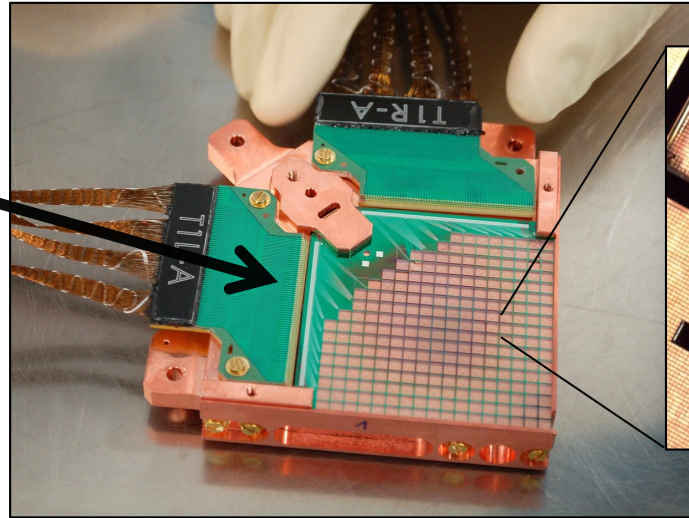
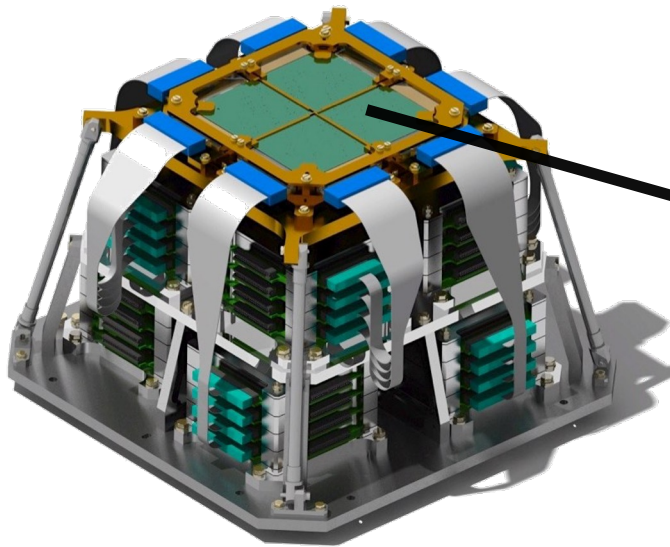
- *Q & U Bolometric Interferometer for Cosmology*
- Observation de la polarisation du rayonnement fossile à $\lambda=2\text{mm}$ depuis l'Argentine





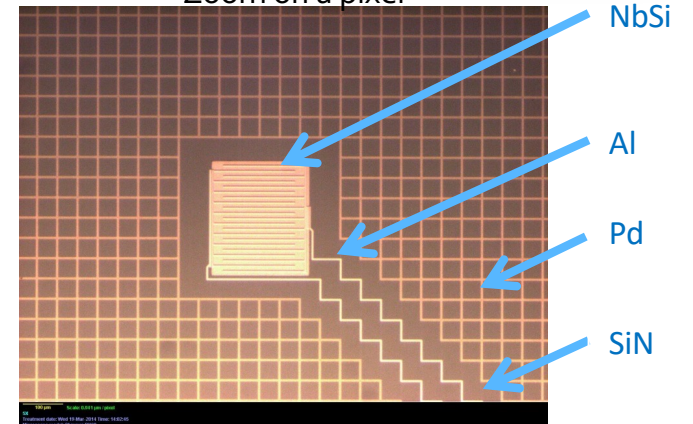
Exemple: TES QUBIC Plan focal

- 1 plan focal = 4 wafers de 256 TESs @ 350mK (IJCLab, C2N, APC)



[Salatino et al. SPIE 2018]
[Marnieros et al. 2020]

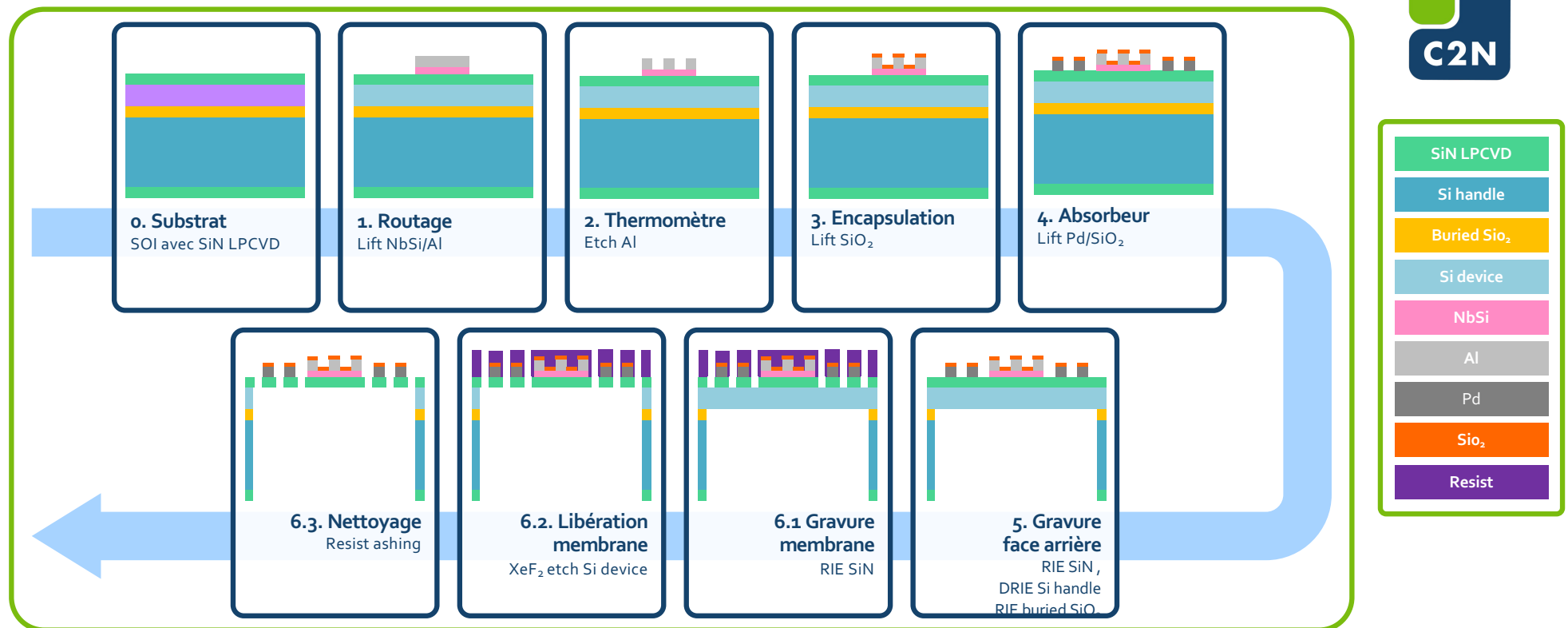
Zoom on a pixel



Exemple: TES QUBIC

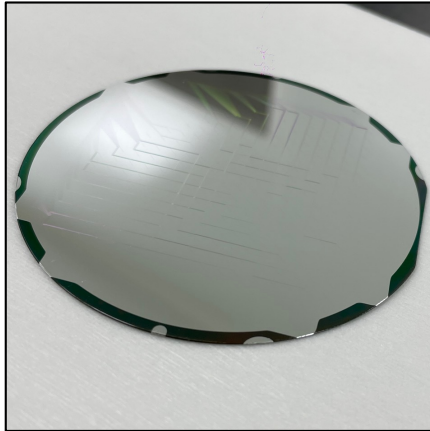
Procédés de fabrication

- Réalisation en centrale de micro-technologie (C2N)
- Exemple de procédé pour QUBIC (Davide Cammilleri C2N):

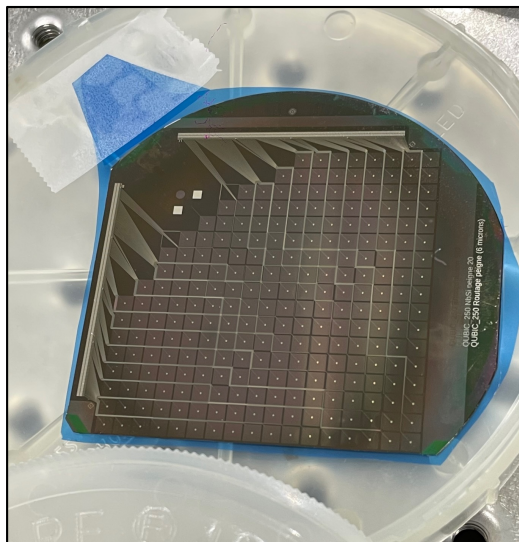
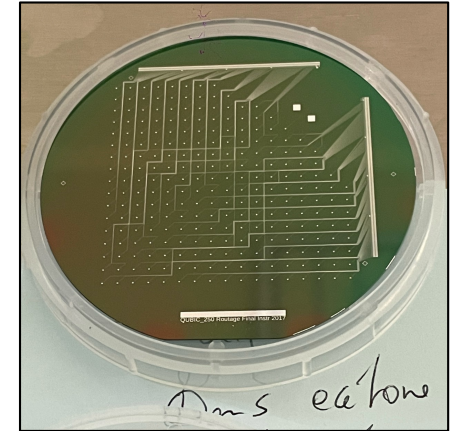
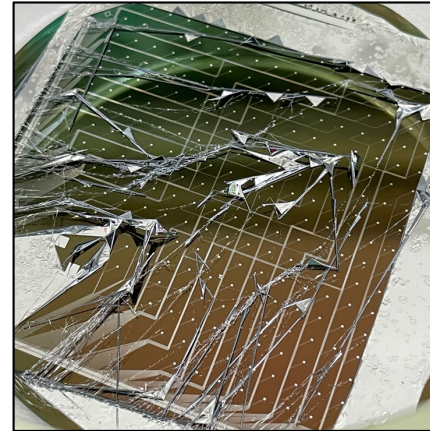
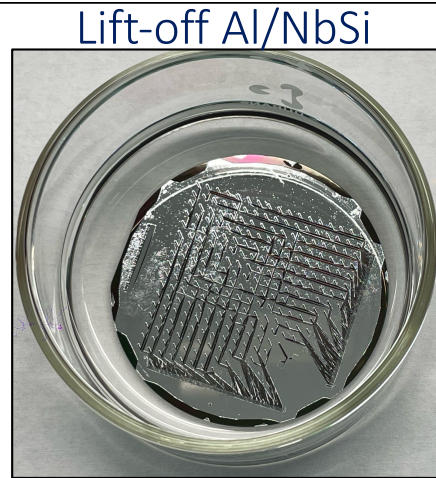


Exemple: TES QUBIC

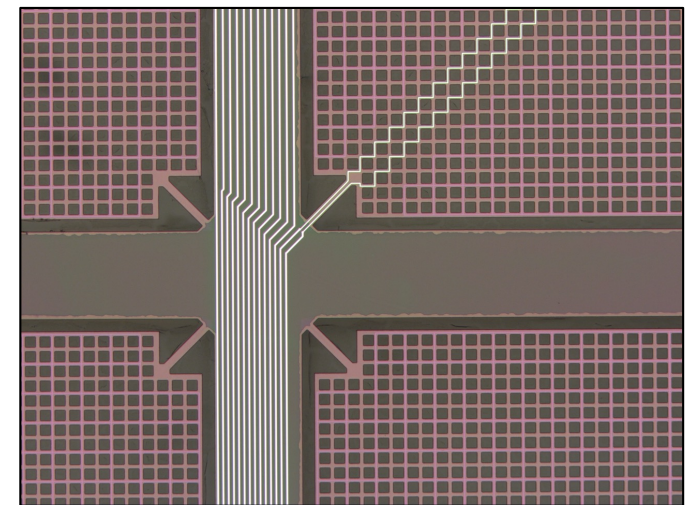
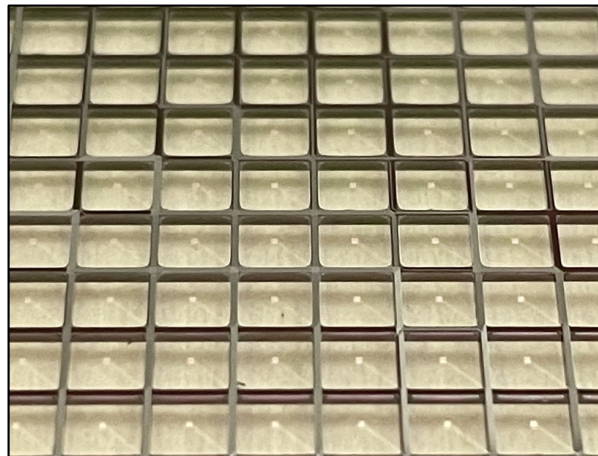
Procédés de fabrication



RIE SiN



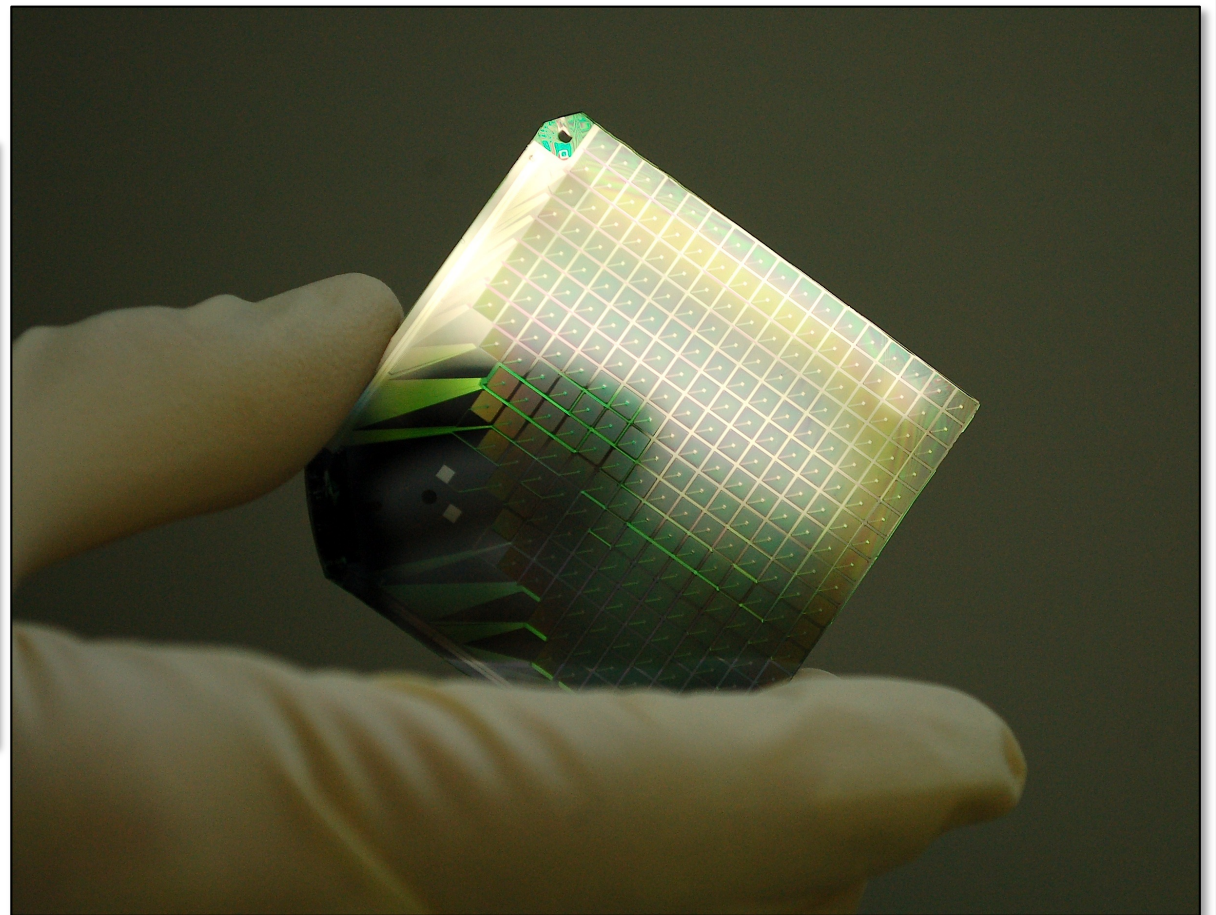
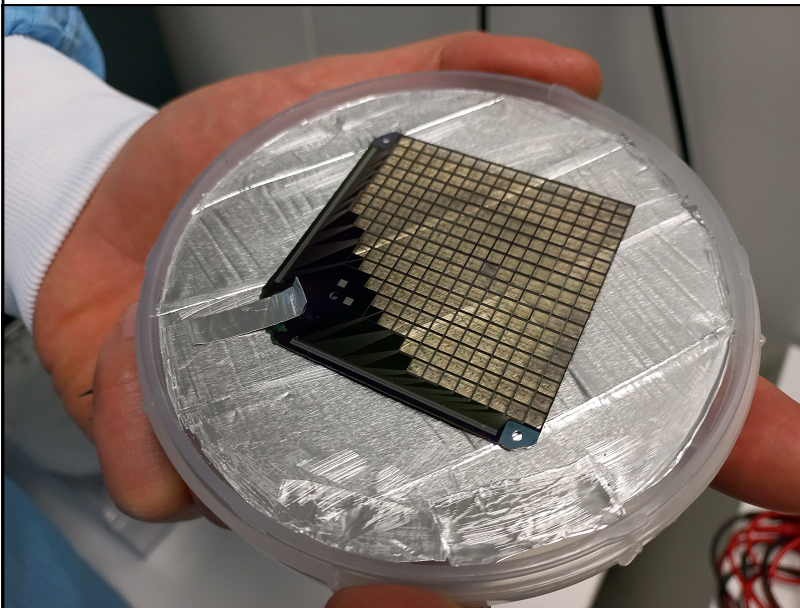
Libération XeF₂



Exemple: TES QUBIC

Procédés de fabrication

Matrice finalisée

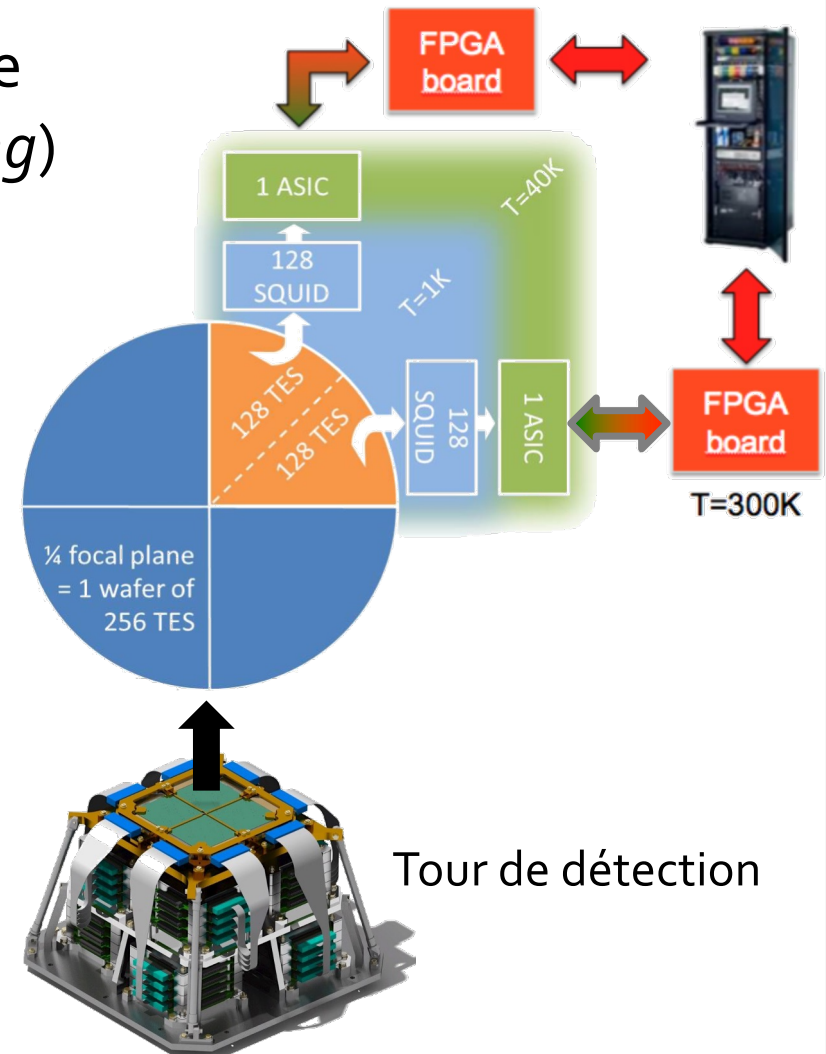




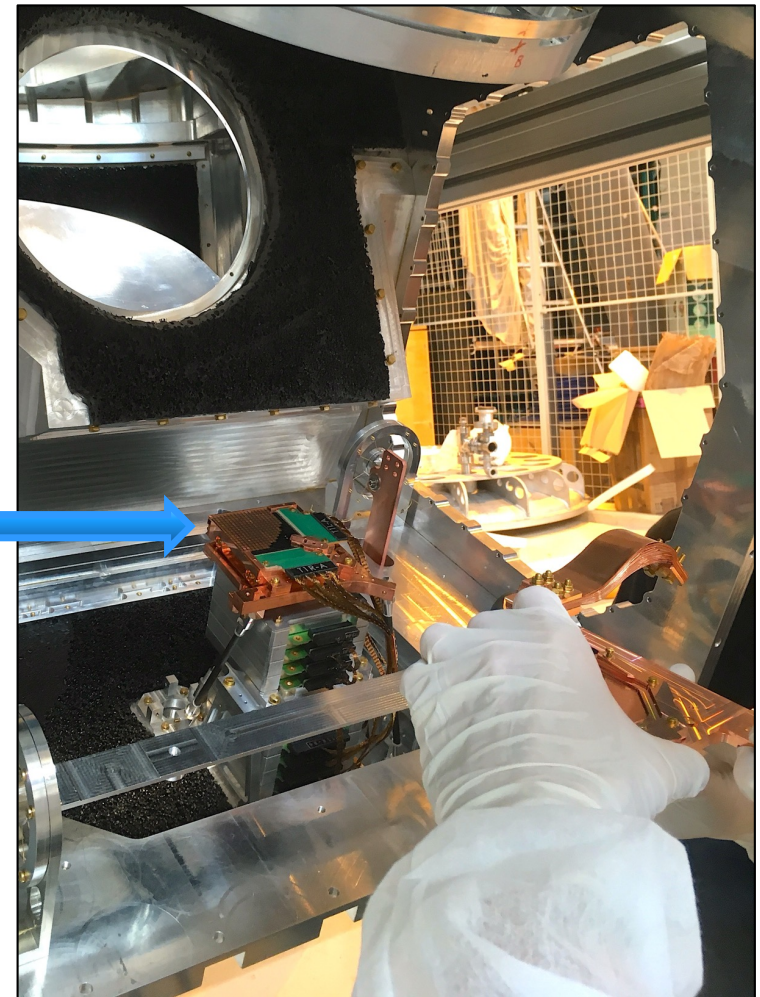
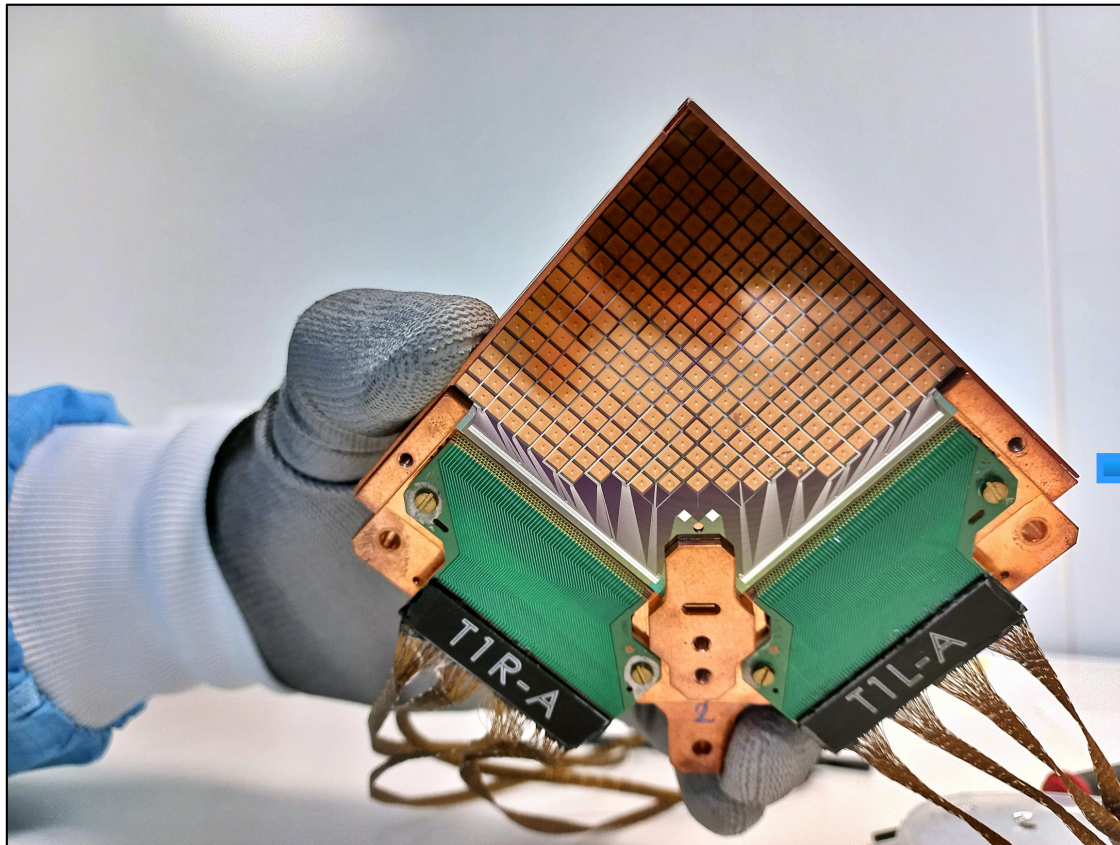
Exemple: TES QUBIC

Electronique de lecture

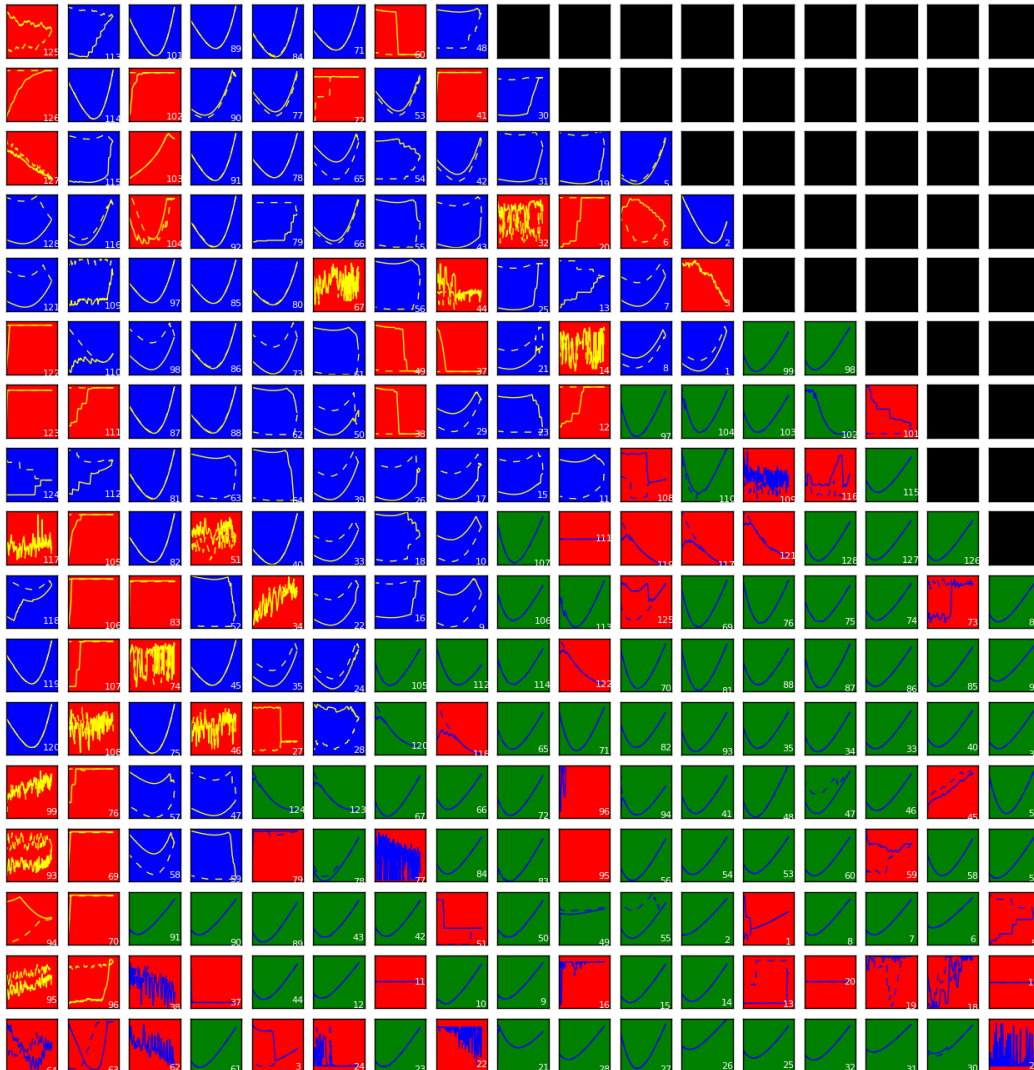
- Electronique de lecture multiplexée en temps (*Time Domain Multiplexing*) 128:1
 - 128 SQUIDs @ 1K
(*Superconducting Quantum Interference Devices*)
 - 1 ASIC @ 40 K
(*Application Specific Integrated Circuit*)
- Electronique chaude: carte FPGA



Exemple: TES QUBIC Intégration

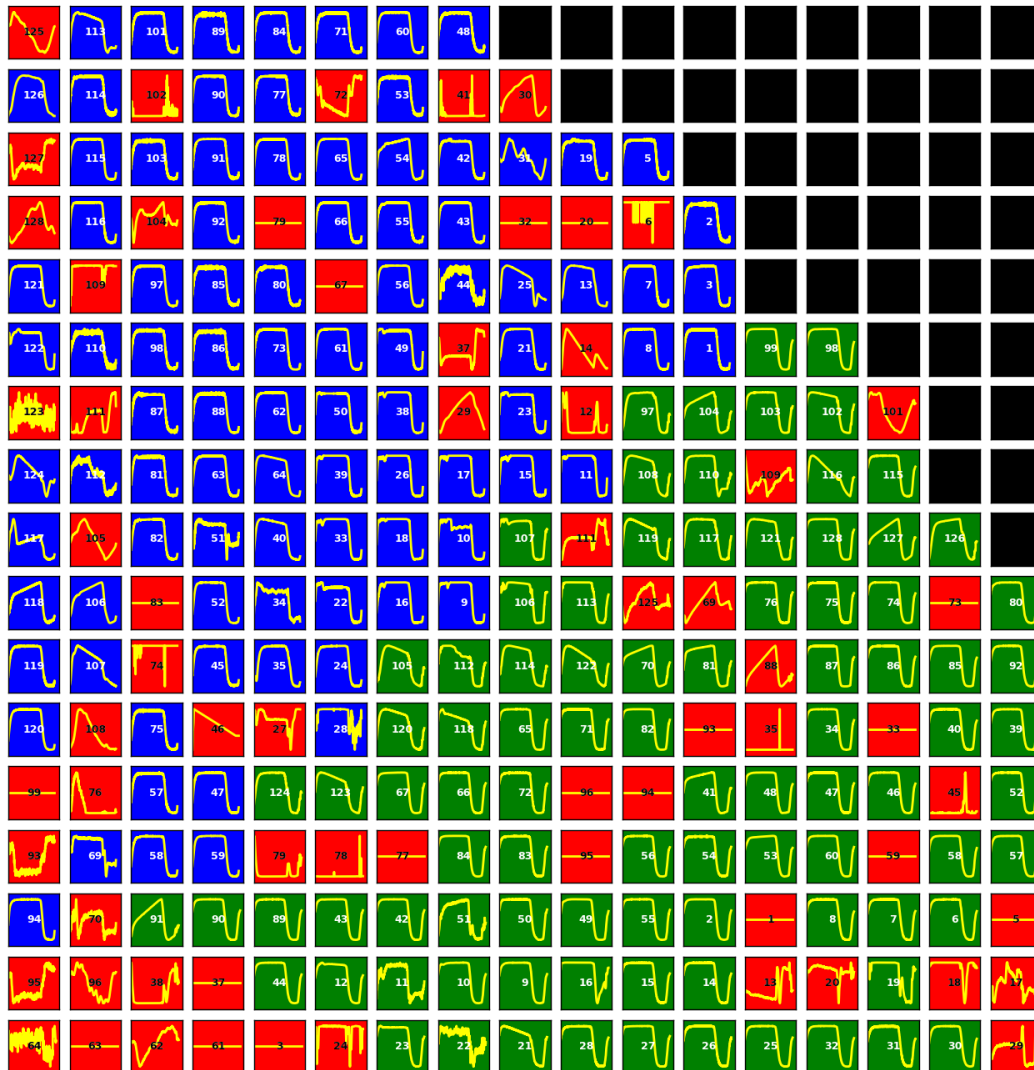


TES QUBIC: mesures I-V



- Mesures I-V à 300mK
 - ASIC 1
 - ASIC 2
- Rendement: ~70% (array ref P73)
 - ~20% fabrication
 - ~10% électronique de lecture

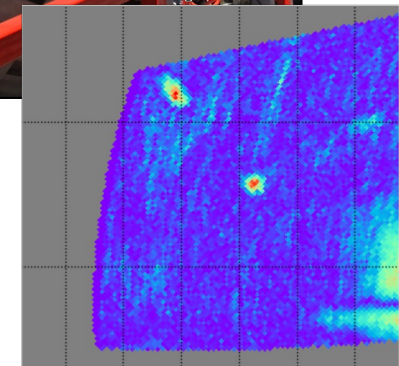
TES QUBIC: mesures d'un signal optique



- Source thermique:
 - fibre de C sur l'étage 1K (IJCLab)
 - Chauffée par effet Joule
- Pulses sur les détecteurs
 - ASIC 1
 - ASIC 2
- Autres mesures possibles: sources radioactives

TES QUBIC

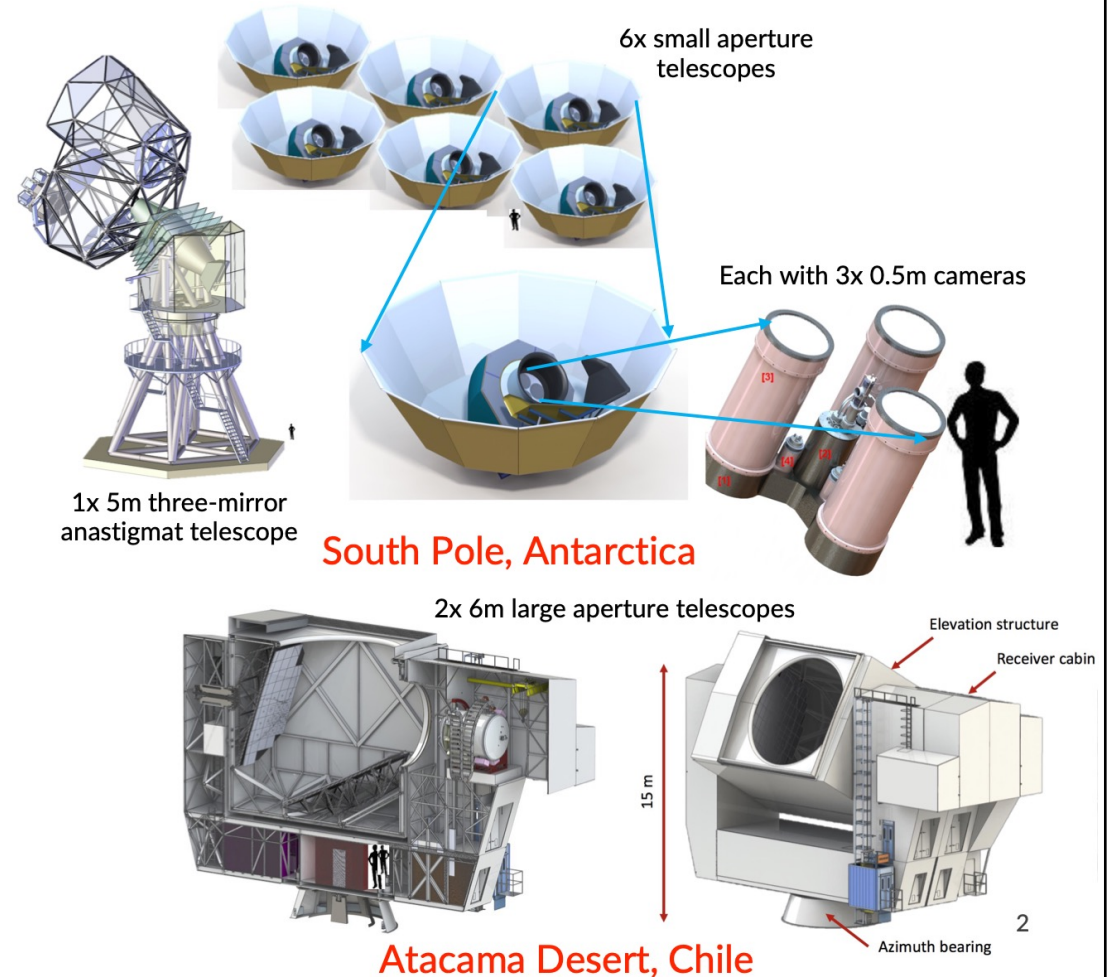
- Démarrage 2^e campagne de tests



Evolution des TES: Exemple de CMB-S4



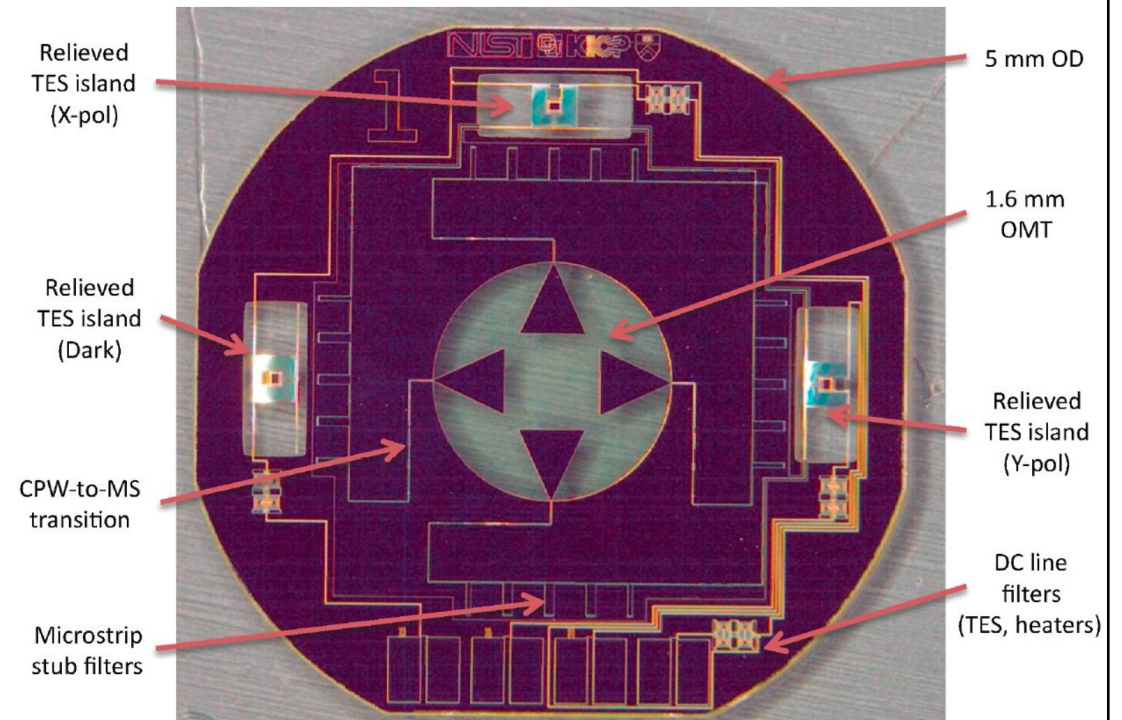
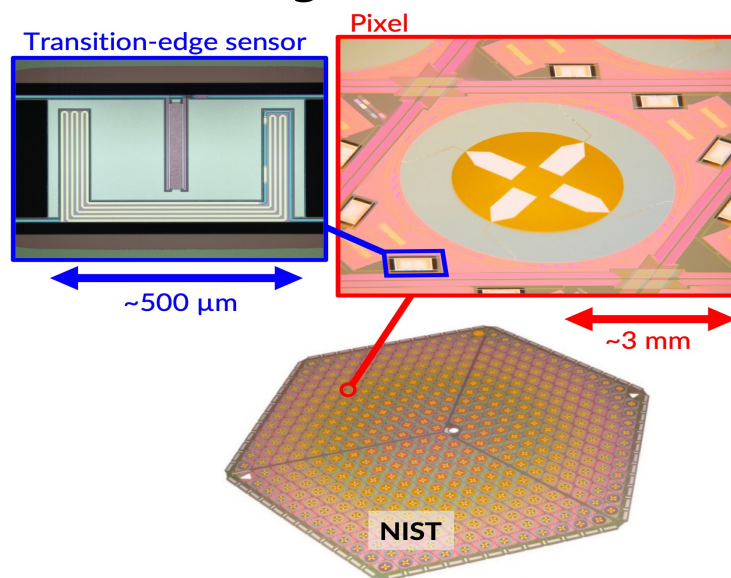
- Prochaine génération d'instrument sol pour observer la polarisation du ciel mm (2030)
- 500 000 TES à 100mK entre 20GHz et 280GHz
 - Small Aperture and Large Aperture Telescopes (SAT, LAT)



Evolution des TES: Exemple de CMB-S4



- Utilisation d'antennes
 - Lignes de transmission supraconductrices (Nb)
 - TES de taille réduite
 - Filtrage



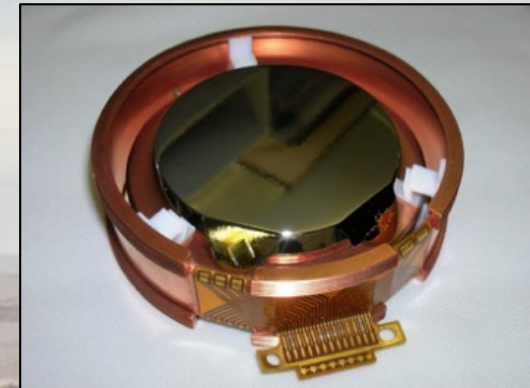
[D.R. Barron et al \(2022\) Proc. SPIE 12190](#)

3

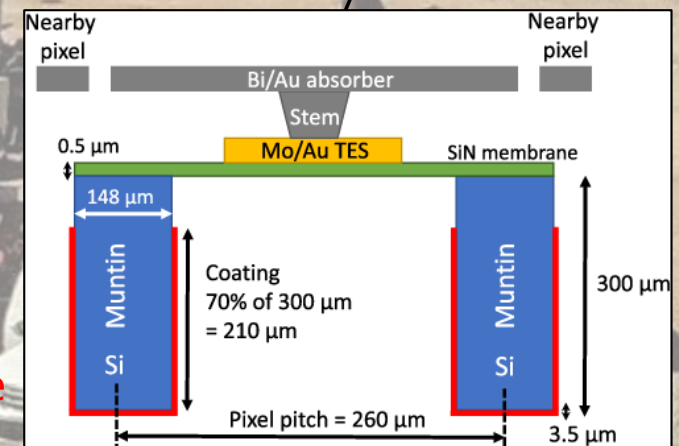
Conclusions

- Bolomètre = détecteur thermique
- Détection photons IR lointain mais aussi particules, rayons X
- TES: Forte contre réaction électro-thermique
 - Accélération du détecteur
 - Linéarisation de la réponse
- Avantages:
 - Sensibilité
 - Maturité technologique (US)
- Difficultés:
 - Réalisation complexe
 - Complexité de l'électronique de lecture multiplexée

Bolomètre Edelweiss



TES rayons X



Kinetic Inductance Detectors (KIDs)

- P. Day et al., Nature 2003
- Variation de l'inductance cinétique d'un supraconducteur (Al) suite à l'absorption de photons
- Circuit résonant
- Développements très rapides:
 - Plus faciles à réaliser (litho Al)
 - Multiplexage en fréquence
 - Réponse rapide
- France: Institut Néel, LPSC (Grenoble)

