

Les détecteurs TES

principes et technologie

Damien Prêle - APC¹

7ème école thématique *Détection de Rayonnement à Très Basse Température*

21-25 Mai 2012

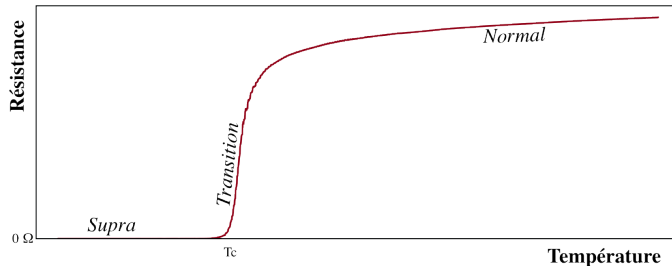
1. Ce cours s'inspire des travaux réalisés dans l'équipe de **Michel Piat** particulièrement durant la thèse de **Joseph Martino**. ◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶



Introduction

Les détecteurs TES utilisent la **transition Normal/Supraconducteur** comme moyen de transduction.

TES → Transition-Edge Sensors



On utilise la **très grande variation de résistance en fonction de la température** dans la transition pour détecter d'infimes variations de température.



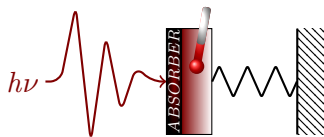
Introduction (2) : TES \equiv Bolomètre supraconducteur

Lorsque les **fluctuations de température** ont pour cause l'exposition à une **onde EM**, on parle alors de détection **bolométrique**.

Littéralement, bolomètre (grec : *bolè* = radiation et *metron* = mesure) désigne un détecteur de radiations.

Quand il s'agit de **détection de particules**, on parle plutôt de **calorimètre**.

Quoi qu'il en soit, seul la transduction radiation \rightarrow température change. **Les TES désignent "abusivement" un thermomètre supraconducteur découplé thermiquement, associé à un absorbeur de radiation.**



Introduction (3) : TES \rightarrow Matrices de bolomètres/normalsize

- Forte contre réaction électro-thermique :

Homogénéisation de la sensibilité entre différents pixels

- Lecture des TES à l'aide de SQUID :

Amplificateur cryogénie jusqu'à 0 K - multiplexage possible au plus près des matrices de TES



Plan

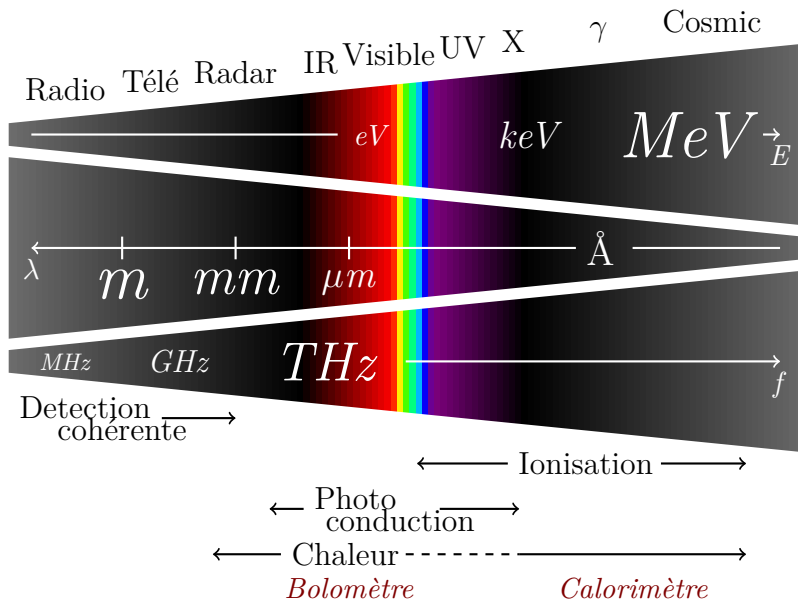
- 1 Principe de la bolométrie et thermomètre
 - Détection bolométrique
 - Thermomètres résistifs et polarisation
 - Schéma-bloc de la rétroaction électro-thermique
- 2 TES : bolomètre supraconducteur
 - Circuit de polarisation
 - Modèles et mesures
 - Procédé de fabrication
- 3 Electronique de lecture
 - SQUID
 - Multiplexage à SQUID



Plan : Principe de la bolométrie et thermomètre - Détection bolometrique

- 1 Principe de la bolométrie et thermomètre
 - Détection bolometrique
 - Thermomètres résistifs et polarisation
 - Schéma-block de la rétroaction électro-thermique
- 2 TES : bolomètre supraconducteur
 - Circuit de polarisation
 - Modèles et mesures
 - Procédé de fabrication
- 3 Electronique de lecture
 - SQUID
 - Multiplexage à SQUID





Couplage avec la radiation

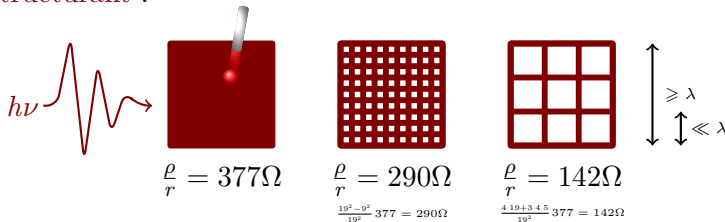
La transduction **radiation** → **température** peut se faire différemment en fonction, en particulier, des longueurs d'ondes :

- mm au IR : il est facile de **dissiper la radiation dans une résistance** (métal normal) :
 - Soit en exposant directement ce dissipateur à l'onde EM (adaptation à l'impédance du vide).
 - Soit en captant l'onde à l'aide d'une antenne et en dissipant le courant cohérent dans une résistance.
- X et particules haute énergie : utiliser un **matériaux "massif" avec lequel les photons ou les particules de haute énergie vont interagir**. Cette interaction créera une petite élévation de température.



Absorbeur/Dissipateur

- Adaptation d'impédance : Une onde électromagnétique (TEM) est correctement dissipée dans un matériaux s'il présente la même impédance caractéristique (quand il y a un back-short) que celle du vide ($Z_0 \approx 377\Omega$).
- La résistivité typique d'un métal est de l'ordre de $100\Omega nm$. Pour obtenir 377Ω , il faudrait réaliser des absorbeurs de qq nm seulement. En pratique on réalise des absorbeurs plus épais (épaisseur = r), et on adapte l'impédance en les structurant :

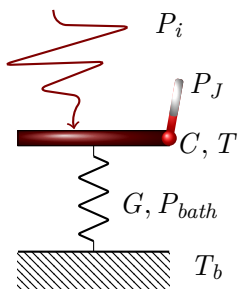


Antenne – Dissipateur

- Une antenne permet la conversion d'une onde EM en **courant** à la même fréquence que l'onde
- Le courant HF est ensuite **dissipé dans une simple résistance** (conversion en chaleur) pour la détection bolométrique.
 - Cette résistance n'a plus besoin d'avoir une dimension de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde.
 - Elle peut aussi être déportée du plan focale.



Modèle thermique de bolomètre



- P_i [W] → Puissance incidente
- P_J [W] → Puissance dissipée par effet Joule dans le thermomètre
- C [J/K] → Capacité calorifique du dissipateur couplé au thermomètre
- T [K] → Température du bolomètre
- G [W/K] → Conductance thermique
- P_{bath} [W] → Puissance de fuite
- T_b [K] → Référence de température

Conversion d'énergie E en température $\frac{E}{C} = \delta T$
Constante de temps naturel du bolomètre $\tau = \frac{C}{G}$



Réponse du bolomètre

La réponse d'un bolomètre peut être décrite par **deux équations différentielles** interdépendantes

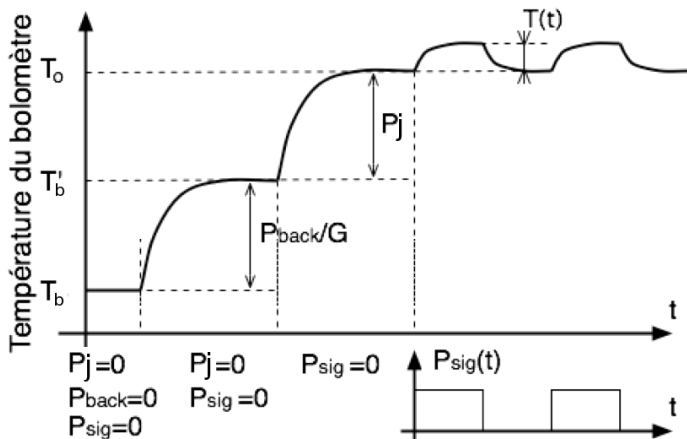
l'une **électrique** qui décrit les fluctuations de courant $\frac{\partial I}{\partial t}$ ou de tension $\frac{\partial V}{\partial t}$ dissipée dans le thermomètre. Elle dépend de la nature du thermomètre (Résistif : semi ou supra-conducteur) et du type de polarisation (courant ou tension).

l'autre **thermique** qui décrit les fluctuations de température $\frac{\partial T}{\partial t}$:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = P_i + P_J - P_{bath} = C \frac{\partial T}{\partial t}$$



Considération petit signal : $T(t) \ll T_0$



J.P. Torre



Réponse thermique du bolomètre

$$\text{Rappel : } P_i + P_J = C \frac{\partial T}{\partial t} + P_{bath}$$

Linéarisation autour d'un point de fonctionnement T_0

La fuite thermique

$$P_{bath} \Big|_{T_0} \approx P_{bath_0} + \frac{\partial P_{bath}}{\partial T} \Big|_{T_0} \delta T \approx \boxed{P_{bath_0} + G_d \delta T}$$

avec $G_d = \frac{\partial P_{bath}}{\partial T} \Big|_{T_0}$ la conductance thermique dynamique

et $\delta T = T - T_0$ le gradient de température entre le bolomètre et la référence

☞ P_J dépend du thermomètre et de ses conditions de polarisation.

Il donne la **réponse du thermomètre** aux fluctuations de température du bolomètre : **réaction électro-thermique**



Plan : Principe de la bolométrie et thermomètre - Thermomètres résistifs et polarisation

- 1 Principe de la bolométrie et thermomètre
 - Détection bolometrique
 - Thermomètres résistifs et polarisation
 - Schéma-block de la rétroaction électro-thermique
- 2 TES : bolomètre supraconducteur
 - Circuit de polarisation
 - Modèles et mesures
 - Procédé de fabrication
- 3 Electronique de lecture
 - SQUID
 - Multiplexage à SQUID



Thermomètre résistif

- Le bolomètre convertit la radiation en température
- Le thermomètre convertit la **température en une grandeur mesurable** en générale électrique (tension ou courant)

Thermométrie par mesure de la variation de résistance $R(T)$

- Thermistances

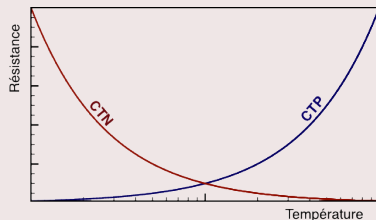
Coefficient de Température Négatif - CTN

Oxydes métalliques ou semi-conducteurs

- Thermo-résistances

Coefficient de Température Positif - CTP

Métaux normaux et transitions supra. (TES)

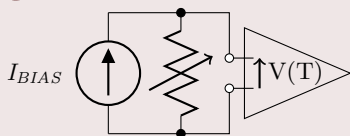


Polarisation d'un bolomètre résistif

On polarise le thermomètre résistif afin de bénéficier d'un **signal électrique** image de la variation de résistance et donc de la variation de température.

Il existe deux méthodes simples de polarisation

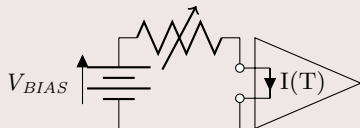
① Polarisation en courant



Lecture en tension

$$V(T) = R(T) \times I_{BIAS}$$

② Polarisation en tension

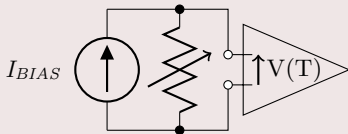


Lecture en courant

$$I(T) = V_{BIAS}/R(T)$$

Polarisation en courant

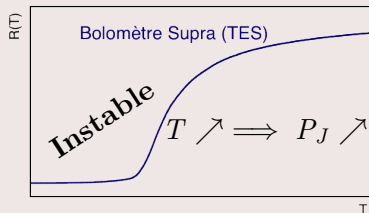
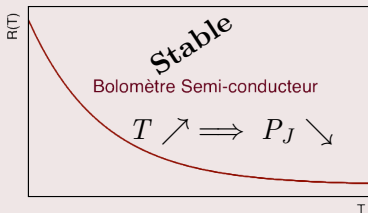
Polarisation en courant de bolomètre résistif



$$V(T) = R(T) \times I_{BIAS}$$

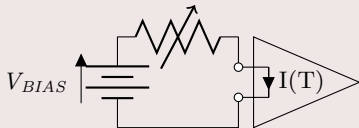
$$P_J(T) = R(T) \times I_{BIAS}^2$$

Contre-réaction électro-thermique



Polarisation en tension

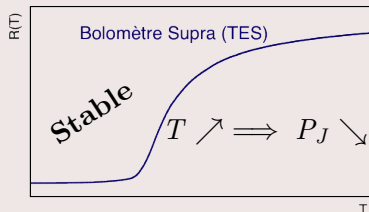
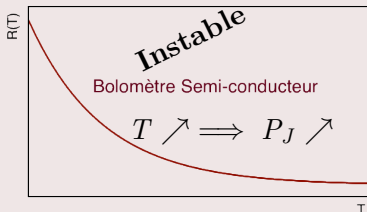
Polarisation en tension de bolomètre résistif



$$I(T) = V_{BIAS}/R(T)$$

$$P_J(T) = V_{BIAS}^2/R(T)$$

Contre-réaction électro-thermique



Choix d'une polarisation

Pour des raisons de stabilité, un bolomètre à thermomètre ...

- **Semi-conducteur** (CTN) \Rightarrow polarisation en **courant** /
Lecture en tension

Rq : En pratique la contre réaction électro-thermique n'est pas suffisamment forte dans un bolomètre à semi-conducteur pour entraîner une instabilité rédhibitoire. Il est cependant plus commun d'amplifier une tension

- **Supra-conducteur** (CTP) \Rightarrow polarisation en **tension** /
Lecture en courant

Rq : Pour la détection à "1 photon", **on peut exploiter l'instabilité forte des supra. polarisés en courant** pour "amplifier" des événements de très faibles amplitudes (*SNPD*). Il faut cependant "réinitialiser" l'alimentation à chaque détection



Impédance de source (polarisation) et de lecture (amplificateur)

① Polarisation (*BIAS*)

- Tension $\rightarrow Z_{BIAS} \ll Z_{Thermo.} - Z_{IN_{Amp.}}$
- Courant $\rightarrow Z_{BIAS} \gg Z_{Thermo.} // Z_{IN_{Amp.}}$

② Lecture (Impédance d'entrée de l'amplificateur)

- Tension $\rightarrow Z_{IN_{Amp.}} \gg Z_{BIAS} // Z_{Thermo.}$
- Courant $\rightarrow Z_{IN_{Amp.}} \ll Z_{BIAS} + Z_{Thermo.}$

☞ La contrainte est forte sur $Z_{IN_{Amp.}}$ et Z_{BIAS}

- Semi-conducteur polarisé en courant et lu en tension :

résistivité très élevée ($\lim_{T \rightarrow 0} Z_{Thermo.} = \infty$)

Z_{BIAS} et $Z_{IN_{Amp.}} \gg Z_{Thermo.} \approx \infty \rightarrow$ amplificateur JFET

- Supra-conducteur polarisé en tension et lu en courant :

résistivité très faible ($\lim_{T \rightarrow 0} Z_{Thermo.} = 0$)

Z_{BIAS} et $Z_{IN_{Amp.}} \ll Z_{Thermo.} \approx 0 \rightarrow$ amplificateur à SQUID

et résistance de shunt pour la polarisation



Sensibilité logarithmique du thermomètre

$R_{Thermo.}$ peut fluctuer sous deux effets (plus ou moins distinct) :

- 1 La température à courant constant
- 2 Le courant à température constante (formalisme TES)

$$R(T, I) \approx R_0 + \left. \frac{\partial R}{\partial T} \right|_{I_0} \delta T + \left. \frac{\partial R}{\partial I} \right|_{T_0} \delta I$$

$$\alpha = \left. \frac{\partial \log R}{\partial \log T} \right|_{I_0} = \frac{T_0}{R_0} \left. \frac{\partial R}{\partial T} \right|_{I_0}$$

$$\beta = \left. \frac{\partial \log R}{\partial \log I} \right|_{T_0} = \frac{I_0}{R_0} \left. \frac{\partial R}{\partial I} \right|_{T_0}$$

Résistance du bolomètre $\Rightarrow R(T, I) \approx R_0 + \alpha \frac{R_0}{T_0} \delta T + \beta \frac{R_0}{I_0} \delta I$

$\Leftrightarrow R_{Thermo.} = R = R_0 + \delta R$; $T = T_0 + \delta T$; $I_{BIAS} = I = I_0 + \delta I$; $V_{BIAS} = V = V_0 + \delta V \dots$



Résistance dynamique du thermomètre

Rappel : $R(T, I) \approx R_0 + \alpha \frac{R_0}{T_0} \delta T + \beta \frac{R_0}{I_0} \delta I$

$$\begin{aligned} \Rightarrow R_{dyn} &= \left. \frac{\partial V}{\partial I} \right|_{T_0} = \frac{\partial [R(T_0, I) I]}{\partial I} = \frac{\partial \left[\left(R_0 + \beta \frac{R_0}{I_0} \delta I \right) (I_0 + \delta I) \right]}{\partial I} \\ &= \frac{\partial \left(\underbrace{R_0 I_0}_{cst} + \beta R_0 \delta I + R_0 \delta I + \beta \frac{R_0}{I_0} \delta I^2 \right)}{\partial I} \simeq \beta R_0 + R_0 \end{aligned}$$

$$R_{dyn} = R_0(1 + \beta)$$

Réponse du thermomètre à une fluctuation de polarisation HF sans P_i à T_0

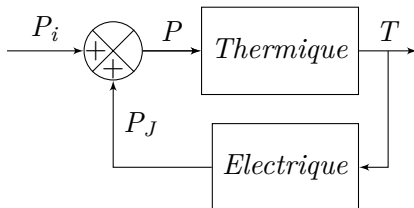


Plan : Principe de la bolométrie et thermomètre - Schéma-block de la rétroaction électro-thermique

- 1 Principe de la bolométrie et thermomètre
 - Détection bolométrique
 - Thermomètres résistifs et polarisation
 - Schéma-block de la rétroaction électro-thermique
- 2 TES : bolomètre supraconducteur
 - Circuit de polarisation
 - Modèles et mesures
 - Procédé de fabrication
- 3 Electronique de lecture
 - SQUID
 - Multiplexage à SQUID



Rétroaction Electrique/Thermique



Une **fluctuation de puissance apportée au bolomètre** entraîne une fluctuation de la résistance du thermomètre et donc une fluctuation de P_J , et donc une **fluctuation de puissance apporté au bolomètre**.

- Le **signe** dépend du signe de $\frac{\partial R}{\partial T}$ et de la polarisation
- La **force** dépend de la pente de $\frac{\partial R}{\partial T}$ et donc de α



La force est grande du côté des supra.



Signe de la rétroaction électro-thermique

Signe

- **Positive : Instable** ; Dans le cas d'un bolomètre, il s'agit d'un emballement thermique.
 - CTN polarisé en tension
 - CTP polarisé en courant
- **Négative : Contre-réaction** ; s'oppose aux fluctuations → **stabilise** un point de fonctionnement.
 - CTN polarisé en courant
 - CTP polarisé en tension → **cas général des TES**

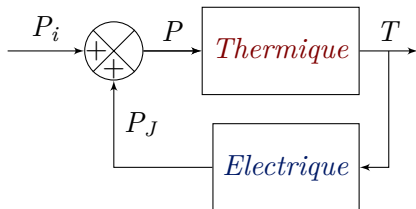
*L'utilisation d'un bolomètre en régime linéaire requiert un **signe négatif de la contre-réaction** sur toute la bande passante du système contre-réactionné ($\tau_{\text{eff}} = \frac{C}{G_{\text{eff}}}$) et même au-delà*

☞ *Attention aux capacités et inductances dans le circuit de polarisation qui font tourner la phase*



Force de la contre-réaction électro-thermique (*N*)ETF*

La force de la contre-réaction est donnée par le gain de boucle du schéma block :



$$\mathcal{L} = \frac{\partial T}{\partial P} \frac{\partial P_J}{\partial T} = \frac{\partial T}{\partial P} \frac{\partial P_J}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial T}$$

- $\frac{\partial T}{\partial P}$ - fonction de transfert Thermique du bolomètre $\frac{1}{G_d} \frac{1}{1+j\omega\tau}$
- $\frac{\partial P_J}{\partial T}$ - fonction de transfert Electrique du bolomètre :
 - $\frac{\partial P_J}{\partial R}$ dépend de la polarisation : $\frac{\partial(RI^2)}{\partial R} = I^2$ ou $\frac{\partial(\frac{V^2}{R})}{\partial R} = -\frac{V^2}{R^2}$
 - $\frac{\partial R}{\partial T}$ pente du thermomètre = $\alpha \frac{R_0}{T_0}$

* Negative Electro-Thermal Feedback - (*N*)ETF

Gain de boucle ouverte et fermé de l'*ETF*

Rappel : $\mathcal{L} = \frac{\partial T}{\partial P} \frac{\partial R}{\partial T} \frac{\partial P_I}{\partial R}$

Boucle ouverte : \mathcal{L}

- $\mathcal{L}_{semi.} = \frac{1/G_d}{1+j\omega\tau} \times \alpha \frac{R_0}{T_0} \times I^2 \Big|_{\omega=0} = -\frac{P_{j0}|\alpha|}{G_d T_0}$
- $\mathcal{L}_{supra.} = \frac{1/G_d}{1+j\omega\tau} \times \alpha \frac{R_0}{T_0} \times \frac{-V^2}{R^2} \Big|_{\omega=0} = -\frac{P_{j0}\alpha}{G_d T_0}$
- $\mathcal{L}_{I_{supra.}} = \frac{1/G_d}{1+j\omega\tau} \times \alpha \frac{R_0}{T_0} \times I^2 \Big|_{\omega=0} = \frac{P_{j0}\alpha}{G_d T_0}$ formalisme Irwin et al.

attention, α est négatif dans le cas d'un semi-conducteur

Boucle fermée : $\frac{\partial T}{\partial P_i} = \frac{\frac{\partial T}{\partial P}}{1 - \frac{\mathcal{L}}{1+j\omega\tau}}$

$$\frac{\partial T}{\partial P_i} = \frac{1}{1 - \frac{\mathcal{L}}{1+j\omega\tau}} \frac{1/G_d}{1+j\omega\tau} = \frac{1/G_{eff}}{1+j\omega\tau_{eff}}$$

avec $G_{eff} = G_d(1 - \mathcal{L})$ et $\tau_{eff} = \frac{\tau}{1 - \mathcal{L}}$



Paramètres effectifs du bolomètre en *ETF*

$$G_{eff} = G_d(1 + |\mathcal{L}|) \text{ et } \tau_{eff} = \frac{\tau}{1+|\mathcal{L}|}$$

↓

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial P_i} = \frac{1/G_{eff}}{1 + j\omega\tau_{eff}}} \text{ avec } \boxed{\tau_{eff} = \frac{C}{G_{eff}}}$$

L'*ETF* augmente la bande passante mais diminue le gain en [K/W]. A la limite ($\lim_{|\mathcal{L}| \rightarrow \infty}$), le gain en boucle fermé tend vers 0 et **la température du bolomètre reste constante.**

Paradox pour un thermomètre ?



Sensibilité du bolomètre en *ETF*

La grandeur mesurée est une tension ou un courant
image d'une puissance.

La température est un "signal d'erreur" intermédiaire.

$$\text{Rappel : } \frac{\partial T}{\partial P} = \frac{1/G_{eff}}{1+j\omega\tau_{eff}} \text{ et } \frac{\partial R}{\partial T} = \alpha \frac{R_0}{T_0} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial R}{\partial P} = \alpha \frac{R_0}{T_0} \frac{1/G_{eff}}{1+j\omega\tau_{eff}} [\Omega/W]}$$

- Lecture en tension : $\left. \frac{\partial V}{\partial R} \right|_{I=cst} = I$

$$\frac{\partial V}{\partial P} = S_V(\omega) = \alpha \frac{V}{T_0} \frac{1/G_{eff}}{1+j\omega\tau_{eff}} = \frac{\alpha V}{T_0 G_d} \frac{1}{1+|\mathcal{L}|} \frac{1}{1+j\omega\tau_{eff}} [V/W]$$

- Lecture en tension : $\left. \frac{\partial I}{\partial R} \right|_{V=cst} = -\frac{V}{R^2}$

$$\frac{\partial I}{\partial P} = S_I(\omega) = -\alpha \frac{I}{T_0} \frac{1/G_{eff}}{1+j\omega\tau_{eff}} = -\frac{\alpha I}{T_0 G_d} \frac{1}{1+|\mathcal{L}|} \frac{1}{1+j\omega\tau_{eff}} [A/W]$$



Sensibilité du bolomètre en ETF ⁽²⁾

$$\Rightarrow |\mathcal{L}| = \frac{P_{j0}|\alpha|}{G_d T_0} \Big|_{\omega=0}$$

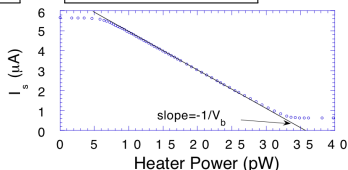
- Bolomètre semi-conducteur : $P_{j0} = RI^2 = VI$

$$S_V(\omega) = \frac{\alpha V}{T_0 G_d} \frac{1}{1+|\mathcal{L}|} \frac{1}{1+j\omega\tau_{eff}} = \frac{-1}{I} \frac{|\mathcal{L}|}{1+|\mathcal{L}|} \frac{1}{1+j\omega\tau_{eff}} [V/W]$$

- Bolomètre supra-conducteur : $P_{j0} = \frac{V^2}{R} = VI$

$$S_I(\omega) = -\frac{\alpha I}{T_0 G_d} \frac{1}{1+|\mathcal{L}|} \frac{1}{1+j\omega\tau_{eff}} = \frac{-1}{V} \frac{|\mathcal{L}|}{1+|\mathcal{L}|} \frac{1}{1+j\omega\tau_{eff}} [A/W]$$

$$\Rightarrow \boxed{\lim_{\alpha \rightarrow \infty} S_V = \frac{-1}{I}} \text{ et } \boxed{\lim_{\alpha \rightarrow \infty} S_I = \frac{-1}{V}}$$



V-bias supercon. bolo. for IR and mm astro. A. T. Lee et al



Bruit dans un bolomètre

Le bruit d'un bolomètre est exprimé en *Noise Equivalent Power*

→ tous les bruits sont ramenés en entrée (en Puissance)

- **Bruit de photon** : Bruit intrinsèque du signal observé
- **Bruit de phonon** : Bruit lié au "transfert de phonon" dans la fuite → $4k_B T^2 G$
- **Bruit Johnson** : Bruit des porteurs de charges dans la résistance du thermomètre, ainsi que dans celles du circuit de polarisation $\frac{4k_B T}{R}$
- **Bruit de l'amplificateur** : Bruit des étages amplificateurs qui suivent le bolo.

Le bruit électrique que l'on mesure est "ramené" en NEP par simple division par la sensibilité S du bolomètre.

☞ Le bruit **Johnson est une source large bande** de fluctuation de puissance dissipé par effet Joule. Elle entraîne dans la bande du bolomètre, une fluctuation de température à laquelle va s'opposer l'ETF ⇒ **réduction du bruit Johnson**.

Lorsque la contribution du bruit de photon domine, on dit que le bolomètre est *Background Limited (Perf.) - BLIP*.



Plan : TES : bolomètre supraconducteur

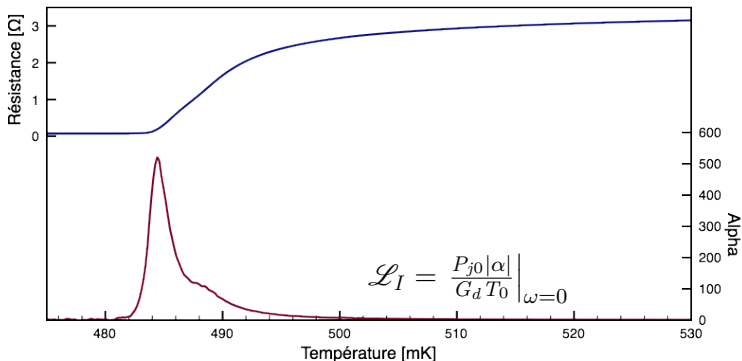
- 1 Principe de la bolométrie et thermomètre
 - Détection bolométrique
 - Thermomètres résistifs et polarisation
 - Schéma-bloc de la rétroaction électro-thermique
- 2 TES : bolomètre supraconducteur
 - Circuit de polarisation
 - Modèles et mesures
 - Procédé de fabrication
- 3 Electronique de lecture
 - SQUID
 - Multiplexage à SQUID



TES : Le bolomètre supraconducteur

Un point très important des TES est leur forte contre-réaction électro-thermique :

Strong Negative Electro-Thermal Feedback



100 < α < 1000 contre -5 à -10 pour les bolomètres à semi-conducteur.



Plan : TES : bolomètre supraconducteur - Circuit de polarisation

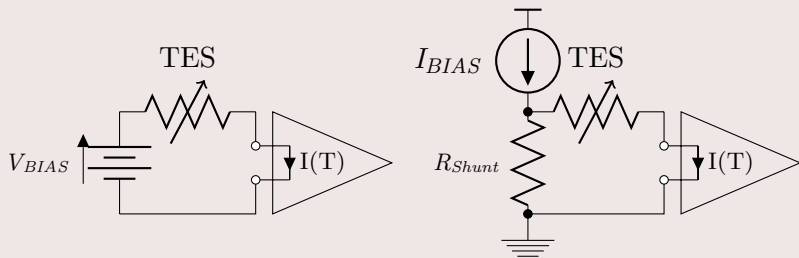
- 1 Principe de la bolométrie et thermomètre
 - Détection bolométrique
 - Thermomètres résistifs et polarisation
 - Schéma-block de la rétroaction électro-thermique
- 2 TES : bolomètre supraconducteur
 - Circuit de polarisation
 - Modèles et mesures
 - Procédé de fabrication
- 3 Electronique de lecture
 - SQUID
 - Multiplexage à SQUID



Polarisation en tension d'un TES

Pour qu'un grand α se traduise en forte contre réaction électro-thermique, il faut réussir à polariser en tension.

Utilisation d'une résistance de *Shunt* polarisée en courant comme source de tension basse impédance



$$R_{Shunt} \ll R_{TES} \lesssim 1\Omega! \quad \implies \quad R_{Shunt_{typ}} = 10m\Omega$$

$$V_{BIAS} \approx I_{BIAS} R_{Shunt}$$

Polarisation en tension d'un TES, résistances parasites

D*MM / MIL-C-24308 (Military)



FEATURES & BENEFITS

- Suitable for a variety of cable and printed circuit board options
- Solder cup version accommodates wire size 20 AWG maximum
- 7.5 A standard current rating
- Clinch Nut and Float Mount Options

Specifications

Performance Specifications

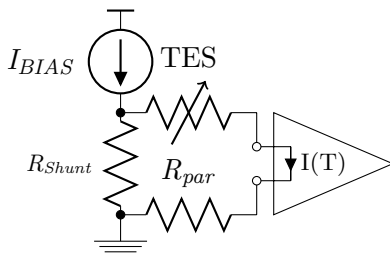
Contact Resistance	10 mΩ
--------------------	-------

Un fil d'Or de *wire-bonding* de qq mm
→ qq10mΩ

$$\rho \frac{l}{S} \approx 10^{-8} \left|_{300K} \frac{10^{-3}}{10^{-9}} = 10m\Omega \right.$$

$$\rho \frac{l}{S} \approx 10^{-10} \left|_{4K} \frac{10^{-3}}{10^{-9}} = .1m\Omega \right.$$

Les résistances parasites ne peuvent pas être négligées :

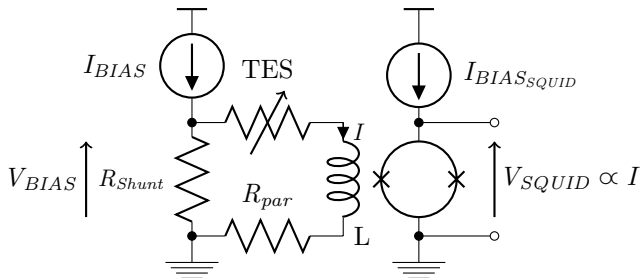


Lecture en courant d'un TES ⁽⁰⁾



Lecture en courant d'un TES

Le SQUID (*Superconducting QUantum Interference Device*) est un transducteur **flux magnétique / Tension**. Associé à une bobine d'entrée, il converti le **courant de l'inductance d'entrée en flux magnétique puis en tension** (V_{SQUID}).



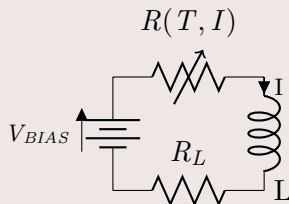
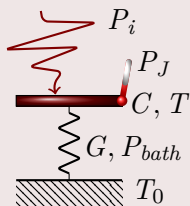
☞ La bobine d'entrée du SQUID est supraconductrice, elle ne rajoute donc pas de résistance, mais une réactance qui ajoute 1 pôle à la contre réaction électro-thermique ... 2 pôles : attention à la stabilité.

Plan : TES : bolomètre supraconducteur - Modèles et mesures

- 1 Principe de la bolométrie et thermomètre
 - Détection bolométrique
 - Thermomètres résistifs et polarisation
 - Schéma-block de la rétroaction électro-thermique
- 2 TES : bolomètre supraconducteur
 - Circuit de polarisation
 - Modèles et mesures
 - Procédé de fabrication
- 3 Electronique de lecture
 - SQUID
 - Multiplexage à SQUID



Equation thermique et électrique du TES



$$P_i + P_J = P_{bath} + C \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$V = IR_L + IR(T, I) + L \frac{\partial I}{\partial t}$$

$$R_L = P_{Shunt} + R_{par}$$



Equations thermique et électrique du TES autour d'un point de fonctionnement

Rappel :

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = -P_{bath} + P_i + P_J$$

$$L \frac{\partial I}{\partial t} = V - IR_L - IR(T, I)$$

$$I = I_0 + \delta I \text{ et } T = T_0 + \delta T$$

$$\frac{\partial \delta T}{\partial t} = \frac{I_0 R_0 (2 + \beta)}{C} \delta I - \frac{1 - \mathcal{L}_I}{\tau} \delta T + \frac{\delta P}{C}$$

$$\frac{\partial \delta I}{\partial t} = - \frac{R_L + R_0 (1 + \beta)}{L} \delta I - \frac{\mathcal{L}_I G_0}{I_0 L} \delta T + \frac{\delta V}{L}$$

$$\mathcal{L}_I = \frac{P_{J_0} \alpha}{G_0 T_0}, \tau_{el} = \frac{L}{R_L + R_0 (1 + \beta)} = \frac{L}{R_L + R_{dyn}}, \tau_I = \frac{\tau}{1 - \mathcal{L}_I}$$



Expression de la réponse du TES à partir des équations différentielles

Rappel :

$$\frac{\partial \delta T}{\partial t} = \frac{I_0 R_0 (2 + \beta)}{C} \delta I - \frac{1 - \mathcal{L}_I}{\tau} \delta T + \frac{\delta P}{C}$$

$$\frac{\partial \delta I}{\partial t} = - \frac{R_L + R_0 (1 + \beta)}{L} \delta I - \frac{\mathcal{L}_I G_0}{I_0 L} \delta T + \frac{\delta V}{L}$$

Réponse du TES : $\frac{\delta I}{\delta P}$

$$S_I(\omega) = \frac{-1}{V} \frac{1}{\frac{L}{\tau_{el} R_0 \mathcal{L}_I} + \left(1 - \frac{R_L}{R_0}\right) + j\omega \frac{L\tau}{R_0 \mathcal{L}_I} \left(\frac{1}{\tau_I} + \frac{1}{\tau_{el}}\right) - \frac{\omega^2 \tau}{\mathcal{L}_I} \frac{L}{R_0}}$$

$$\mathcal{L}_I = \frac{P_{J_0} \alpha}{G_0 T_0}, \tau_{el} = \frac{L}{R_L + R_0 (1 + \beta)} = \frac{L}{R_L + R_{dyn}}, \tau_I = \frac{\tau}{1 - \mathcal{L}_I}$$



NEP d'un TES

Le **courant de bruit** i_n qui circule dans le TES et qui est mesuré au travers du SQUID est ramené en entrée (P) du TES :

$$NEP = \frac{i_n}{|S_I|}$$

En cas de forte *ETF* $\rightarrow S_I = \frac{-1}{V} \Rightarrow NEP = V \times i_n$

$$NEP^2 [W^2/Hz]$$

$NEP^2 = \gamma 4k_B T^2 G$ } *phonon* ($\gamma \equiv$ temp. intermédiaire entre T et T_0)

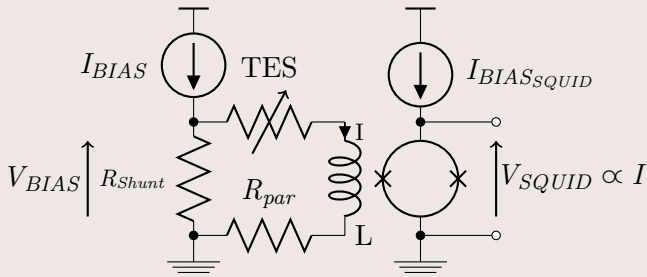
$$+ \frac{1}{S_I^2} \left[\underbrace{\frac{4k_B T (1 + \omega^2 \tau^2)}{R_{dyn} \mathcal{L}_I^2}}_{\text{Johnson TES}} + \underbrace{\frac{4k_B T_0 R_L (\mathcal{L}_I - 1)^2 (1 + \omega^2 \tau_I^2)}{R_{dyn}^2 \mathcal{L}_I^2}}_{\text{Johnson } R_{Shunt} \text{ et } R_{par}} + \underbrace{i_{n_{SQUID}}^2}_{\text{ampli.}} \right]$$

$$\mathcal{L}_I = \frac{P_{J_0} \alpha}{G_0 T_0}, \tau_{el} = \frac{L}{R_L + R_0(1+\beta)} = \frac{L}{R_L + R_{dyn}}, \tau_I = \frac{\tau}{1 - \mathcal{L}_I}$$



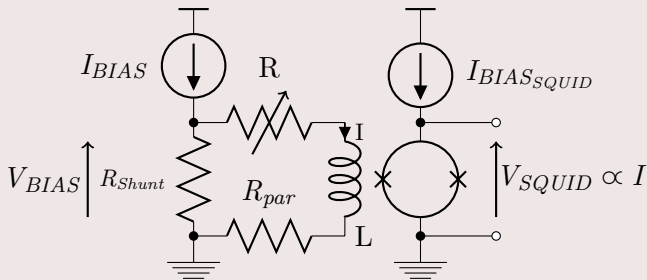
Mesures et caractérisations

TES polarisé en tension



- Température du bain - T_c , $R(T)$
- Corps-noir, sources radioactives - P_i , τ_{eff}
- Tension de polarisation - $I(V)$, $P(V)$, $R(V)$, $Z(\omega)$
- Mesures de bruit - τ_{eff} , NEP

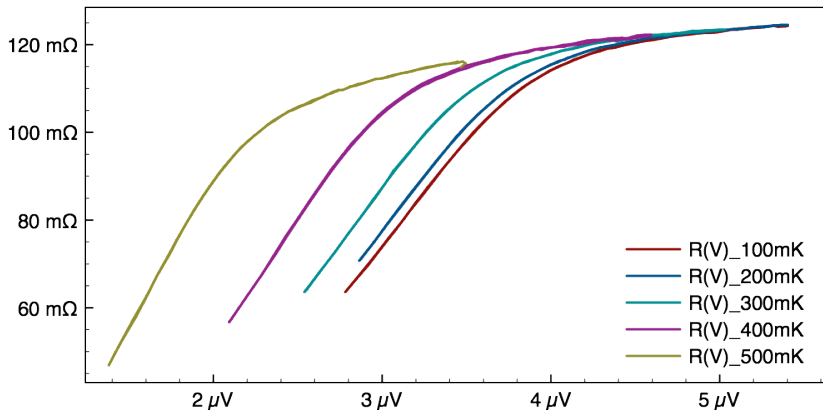
Mesures $R(V)$ (principe)



Mesure directe : $V_{SQUID} \propto I = I_{BIAS} \frac{R_{Shunt}}{R_{Shunt} + R + R_{par}}$

On en déduit $R(V_{BIAS}) \begin{cases} R = I_{BIAS} \frac{R_{Shunt}}{I} - R_{Shunt} + R_{par} \\ V_{BIAS} = R_{Shunt} I_{BIAS} \frac{R + R_{par}}{R_{Shunt} + R + R_{par}} \end{cases}$

Mesures $R(V)$

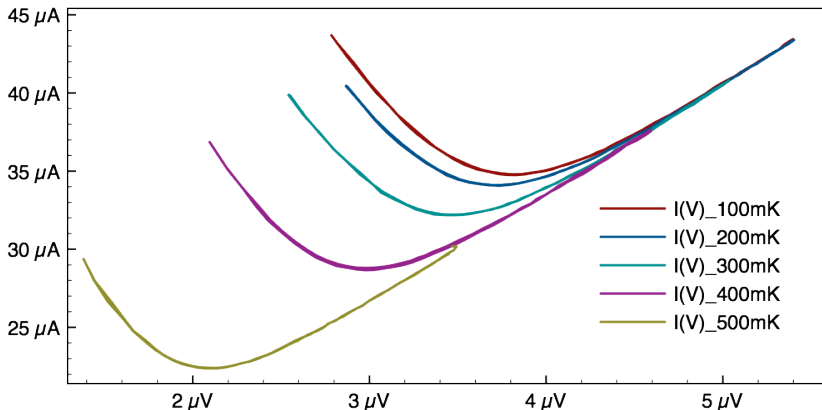


La mesure $R(V)$ donne la modulation de la température du TES par la polarisation pour une température de bain fixe

mais c'est surtout une étape pour la $I(V)$



Mesures I(V)

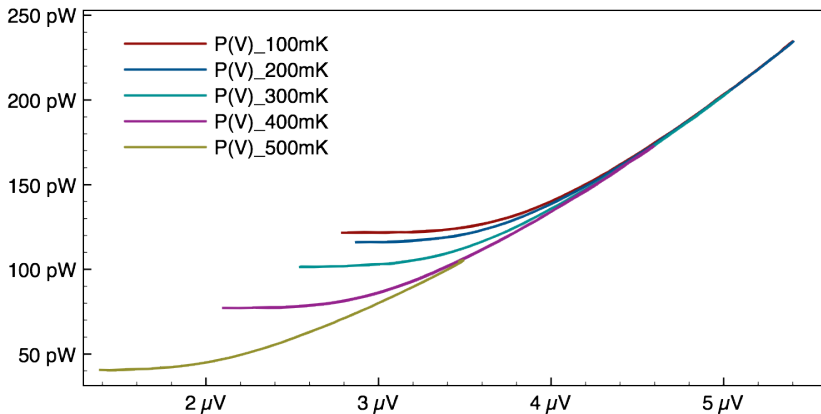


La mesure I(V) donne la tension de *turnover* quand on rentre dans la transition et donc en *ETF*

mais une meilleure manière de voir l'ETF est de regarder la P(V)



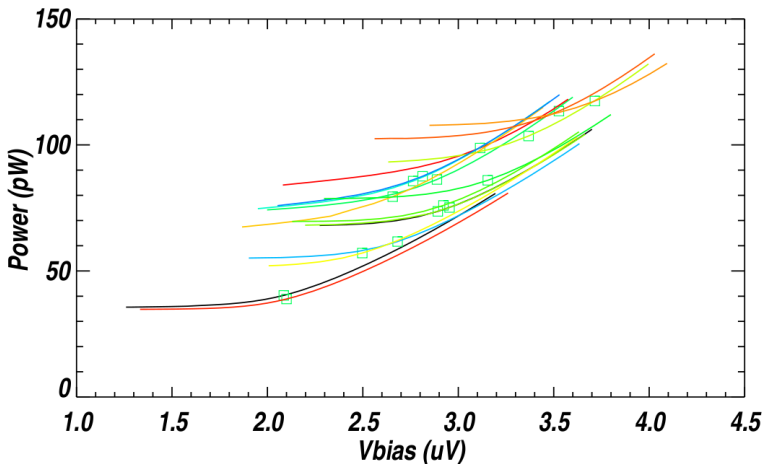
Mesures $P(V)$



La partie plate de la $P(V)$ donne l'effet de l'ETF qui maintient la température constante (ici il n'y a que $P_J = G_{moy}(T_c - T_0)$) malgré l'évolution de la polarisation.



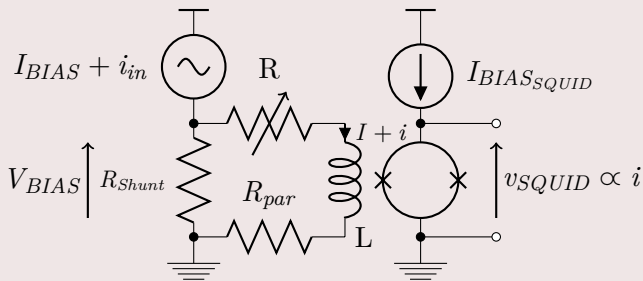
P(V) de pixels différents d'une même matrice à 300 mK



Il faut choisir une tension de polarisation commune où les P(V) sont toutes plates : tous les TES ont alors la même sensibilité malgré des caractéristiques différentes



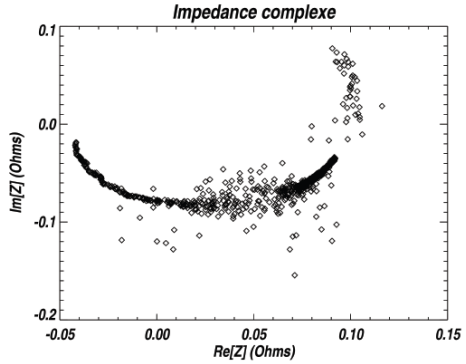
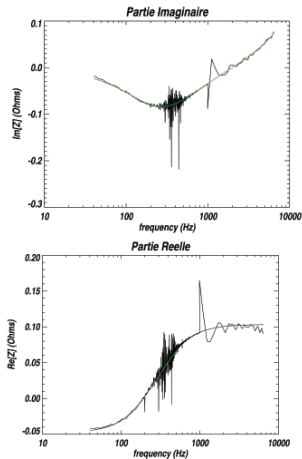
Mesure petit signal de l'impédance complexe (principe)



Mesure directe : $v_{SQUID} \propto i = i_{in} \frac{R_{Shunt}}{R_{Shunt} + Z_{TES} + R_{par} + jL\omega}$

$$Z = \frac{\delta V_{BIAS}}{\delta I} = R_0(1 + \beta) + \frac{R_0 \mathcal{L}_I}{1 - \mathcal{L}_I} \frac{2 + \beta}{1 + j\omega\tau_I}$$

Impédance complexe du TES : $Z(\omega)$



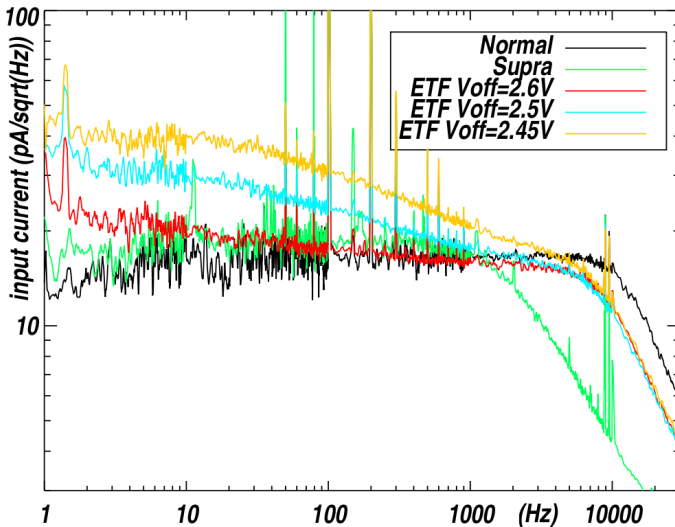
$$Z_{TES} = R_0(1 + \beta_I) + \frac{R_0 \mathcal{L}_I}{1 - \mathcal{L}_I} \frac{2 + \beta_I}{1 + i\omega\tau_I}$$

$R_0 = 70\text{mOhms}$
 $\text{Beta} = 0.00025$
 $\text{Li} = 7$
 $\text{Tau} = 0.55\text{ms}$

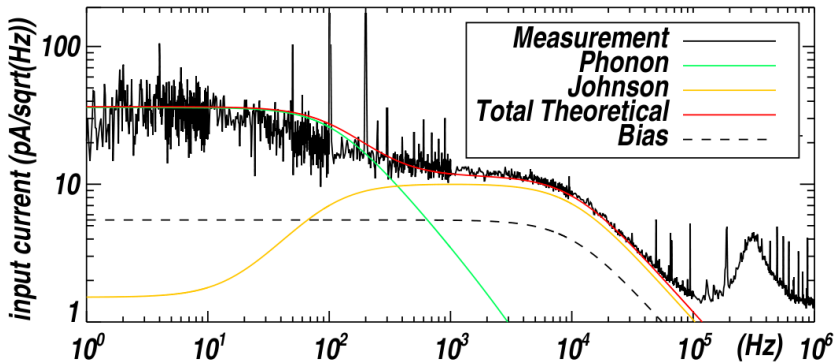


Fits "Impédance complexe" - Joseph Martino

Evolution du bruit de phonon en ETF



Interprétation des mesures de bruit dans la transition

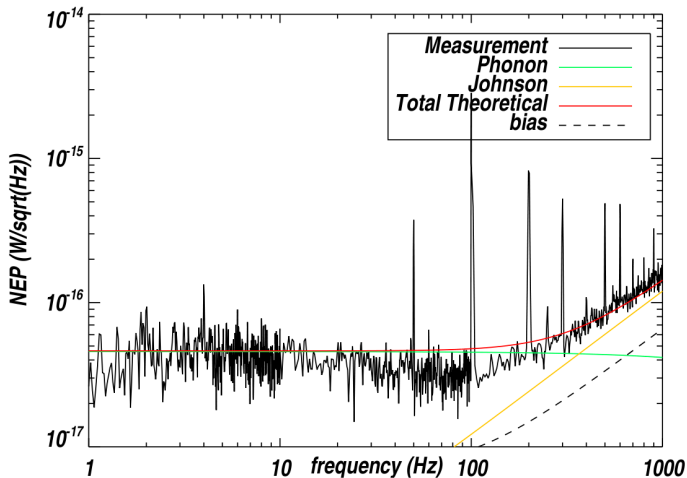


Mesures et modèle - Joseph Martino

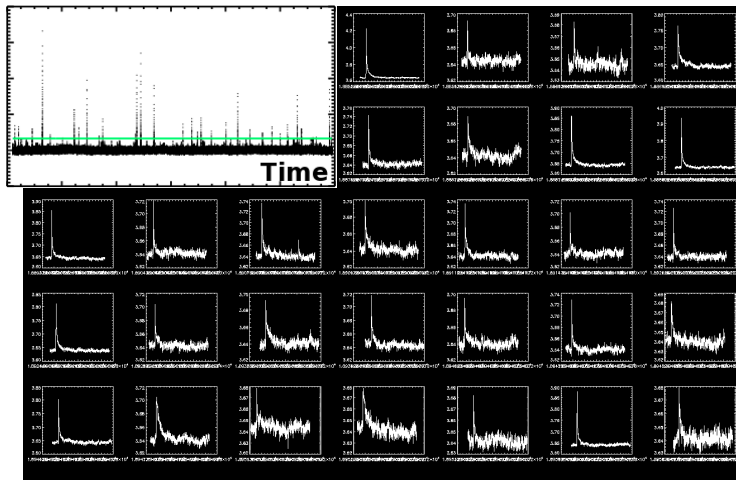
$$NEP^2 = \gamma 4k_B T^2 G + \frac{1}{S_I^2} \left[\frac{4k_B T}{R_{dyn}} \frac{(1+\omega^2\tau^2)}{\mathcal{L}_I^2} + \frac{4k_B T_0 R_L}{R_{dyn}^2} \frac{(\mathcal{L}_I - 1)^2 (1+\omega^2\tau_I^2)}{\mathcal{L}_I^2} \right]$$



$$NEP = \frac{i_n}{S_I} = i_n V \approx \sqrt{4k_B T^2 G_d} \text{ en ETF}$$



Acquisition temporelle ("glitches" - source radioactive)

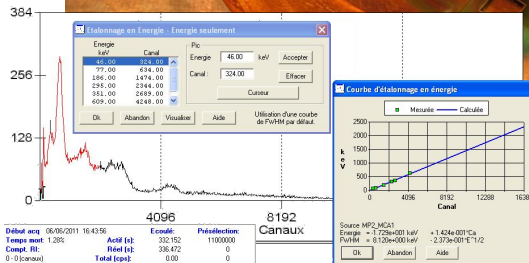
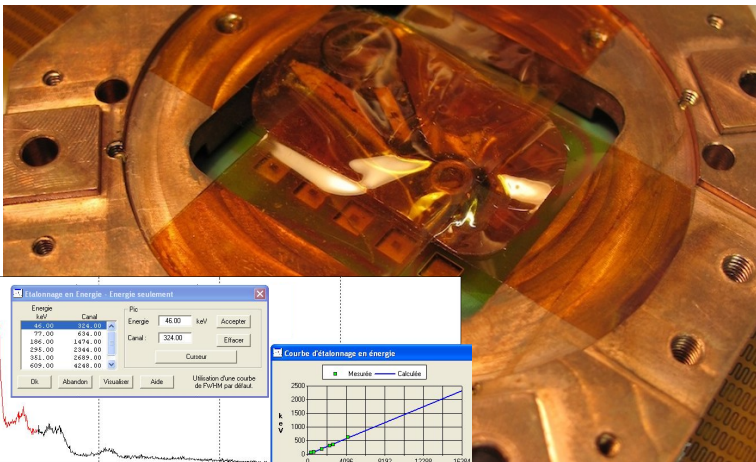


Observation du signal de sortie : constantes de temps des "glitches" $\Rightarrow \tau_{eff}$

Mesures et traitements - Joseph Martino



Source radioactive = aiguille de réveil JAZ au Radium



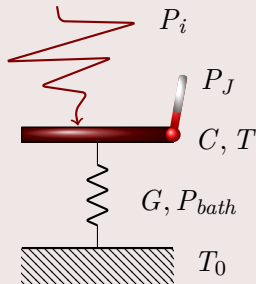
Plan : TES : bolomètre supraconducteur - Procédé de fabrication

- 1 Principe de la bolométrie et thermomètre
 - Détection bolométrique
 - Thermomètres résistifs et polarisation
 - Schéma-bloc de la rétroaction électro-thermique
- 2 TES : bolomètre supraconducteur
 - Circuit de polarisation
 - Modèles et mesures
 - Procédé de fabrication
- 3 Electronique de lecture
 - SQUID
 - Multiplexage à SQUID

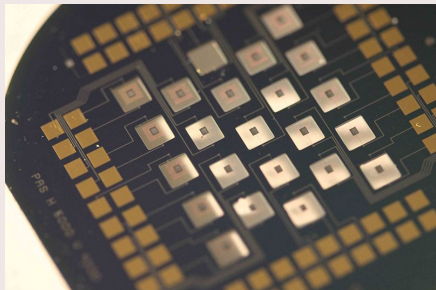


Technologie

Comment passer de ça



à ça



Techniques de fabrication planaires issues de la micro-électronique : photolithographie sur *wafer* de silicium, gravure, dépôt métallique et supraconducteur.



Technologie plantaire : tout est réalisé sur un même *Waffer*

Cross section



■ Si

Top view



Dépôt par PECVD d'un matériau "faible contraire - SiN" qui constituera la membrane

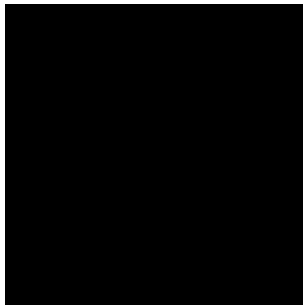
Cross section



■ Si

■ SiN

Top view



Dépôt du thermomètre par évaporation d'un matériau supra.

Cross section

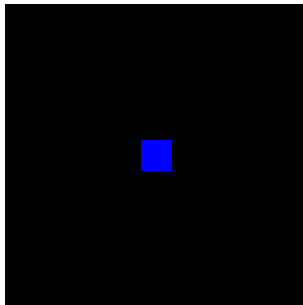


■ Si

■ SiN

■ Thermomètre

Top view

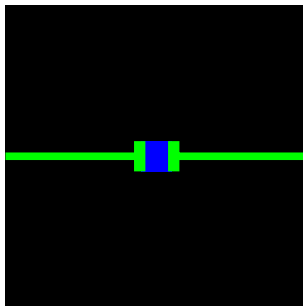


Dépôt des accès électrique - supra à plus bas T_c

Cross section



Top view



- Si
- SiN
- Thermomètre
- Accès

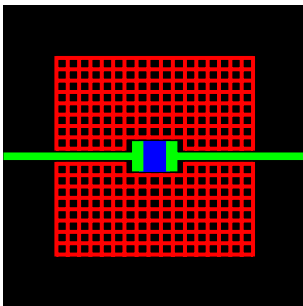
Dépôt de l'absorbeur - grille d'Or ou Palladium ou Bismut ...

Cross section



- Si
- SiN
- Thermomètre
- Accès
- Absorber

Top view

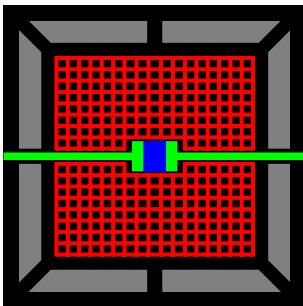


Structuration du SiN des membranes gravure RIE

Cross section

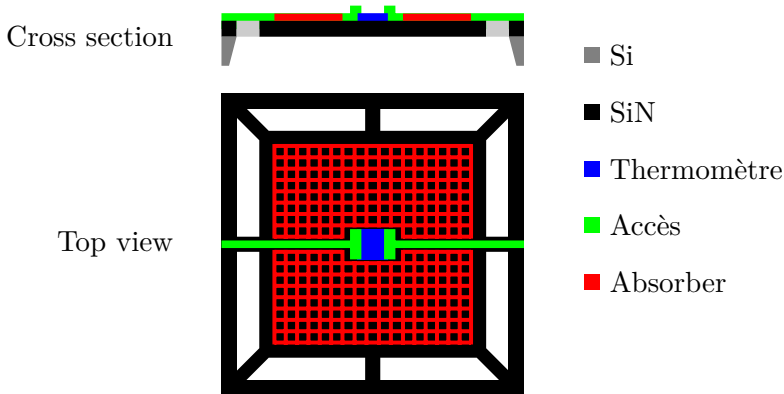


Top view

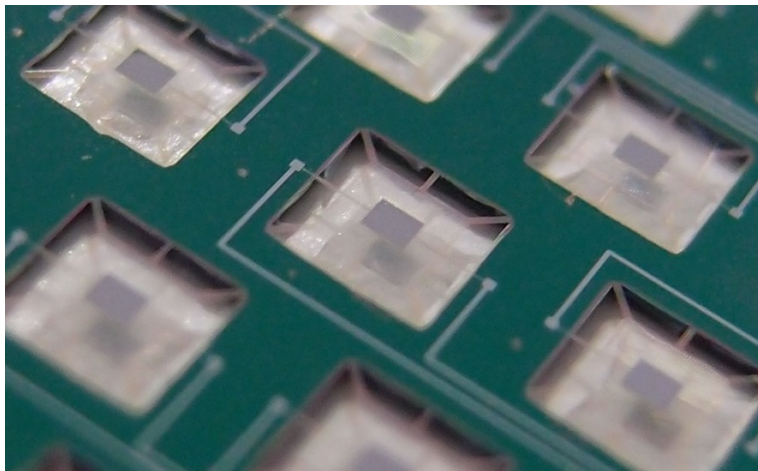


- Si
- SiN
- Thermomètre
- Accès
- Absorber

Libération des membranes gravure profonde du Si



Matrices de TES NbSi



Plan : Electronique de lecture - SQUID

- 1 Principe de la bolométrie et thermomètre
 - Détection bolométrique
 - Thermomètres résistifs et polarisation
 - Schéma-block de la rétroaction électro-thermique
- 2 TES : bolomètre supraconducteur
 - Circuit de polarisation
 - Modèles et mesures
 - Procédé de fabrication
- 3 Electronique de lecture
 - SQUID
 - Multiplexage à SQUID



TES et électronique de lecture : le rôle du SQUID

TES → développement de grandes matrices

- 1 **ETF** ⇒ Uniformisation des réponses et stabilisation des points de fonctionnement
- 2 **SQUID** ⇒ **Multiplexage**
 - Amplificateur de courant avec $R_{in} = 0\Omega$ polarisation en tension des TES → ETF
 - Amplificateur cryogénique jusqu'à $0K$!
 - Faible consommation $\approx 1nW$
 - Faible bruit (par rapport au TES) $< \frac{pA}{\sqrt{Hz}}$
 - Marge de bruit ($i_{nSQUID} < i_{nTES}$) et marge de bande passante multiplexage possible

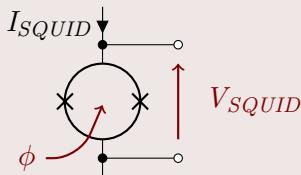
👉 *SQUIDs et méthodes de multiplexages* - DRTBT2009 - D. Prêle



Superconducting QUantum Interference Device

SQUID = Transducteur Flux Magnétique \Rightarrow Tension

Le "SQUID DC" est composé d'un anneau supraconducteur (*Washer*) interrompu par deux jonctions Josephson (x).



Son fonctionnement repose sur deux phénomènes :

- 1 La quantification du flux magnétique ($\phi_0 = \frac{h}{2e} \approx 2.10^{-15} \text{ Wb}$ ou $[\text{T.m}^2]$ ou $[\text{V.s}]$) dans une boucle supraconductrice
- 2 L'effet tunnel dans une jonction Josephson

Quantification du flux magnétique dans une boucle supraconductrice

Caractère quantique de la supraconductivité : $q = 2e$

Le comportement collectif des **paires de Cooper** est décrit par une **fonction d'onde macroscopique** ψ qui doit garder une "**cohérence de phase**" θ sur un **parcours fermé** (boucle) :



Un super-courant s'oppose à tout flux extérieur pour maintenir la cohérence de phase : $\oint_C \theta = 2\pi n \Rightarrow$

$$\phi = \frac{n\hbar}{2e} = n\phi_0$$

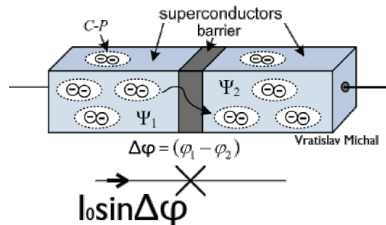
$\phi_0 = \frac{\hbar}{2e} \approx 2.10^{-15} \text{ Wb}$ ou $[T.m^2]$ ou $[V.s]$ le quantum de flux magnétique



Jonction Josephson

Une jonction Josephson est un supraconducteur interrompu par un matériau non-supraconducteur très mince ($\approx 10\text{nm}$)

Effet Josephson : Les paires de Cooper traverse la jonction par **effet tunnel** tout en conservant une cohérence de phase.

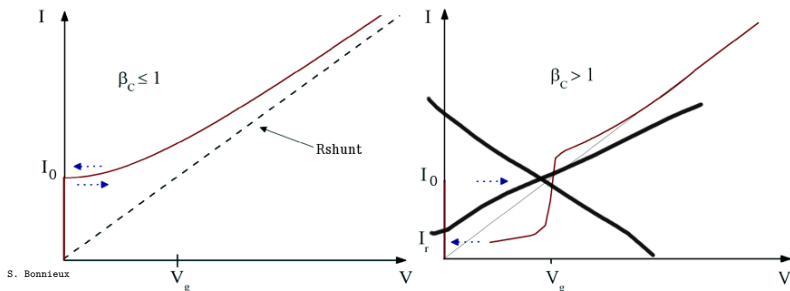


Un courant de polarisation $I = I_0 \sin \Delta\Phi$ entraîne une **modulation de la phase supra**

Courant caractéristique I_0 d'une jonction Josephson

Passé un courant caractéristique I_0 , une différence de potentiel apparaît aux bornes de la jonction.

La caractéristique $I(V)$ d'une jonction SIS (isolant) ou SNS (normal) peut avoir différentes formes :



Les jonctions Josephson des SQUID sont *shuntées* par une faible résistance ($qq\Omega$) pour éviter tout comportement hystérique.

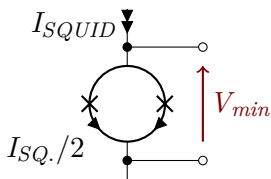


Jonctions Josephson et interférences

Au dessus du courant critique ($I > I_0$), La tension aux bornes de la jonction n'est plus nulle et la différence de phase se met à évoluer au cours du temps → **Oscillation Josephson** :

$$I \approx I_0 \sin \left(2\pi \frac{V}{\phi_0} t \right) \Rightarrow \frac{f}{V} = \frac{1}{\phi_0} \approx 500 \text{ MHz}/\mu\text{V}$$

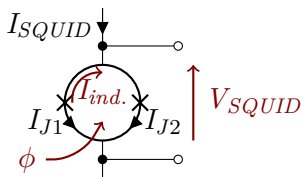
Le SQUID composé de deux jonctions Josephson fait **interférer les fréquences Josephson**.



En l'absence de flux magnétique extérieur le courant de polarisation I_{SQUID} se **répartie symétriquement** dans les deux jonctions qui oscillent donc en phase → interférence destructive en courant.

Flux et déphasage des jonctions

Un flux magnétique entraîne un déphasage supplémentaire $2\pi \frac{\phi}{\phi_0}$



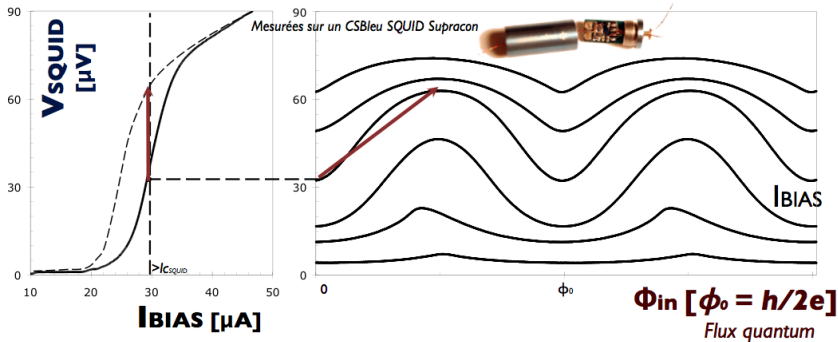
$$I_{J1} \approx I_0 \sin \left(2\pi \frac{V}{\phi_0} t - 2\pi \frac{\phi}{\phi_0} \right)$$

$$I_{J2} \approx I_0 \sin \left(2\pi \frac{V}{\phi_0} t + 2\pi \frac{\phi}{\phi_0} \right)$$

Les deux jonctions ne sont plus en phases pour $\phi \neq n\phi_0$
 (périodicité)

Caractéristique $V(\phi)$ du SQUID (Magnétomètre)

Le courant critique du SQUID est deux fois plus grand que celui de chacune des jonctions.



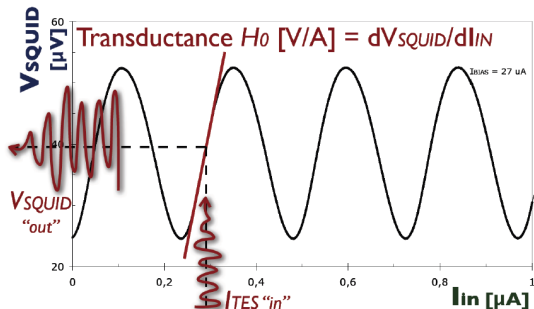
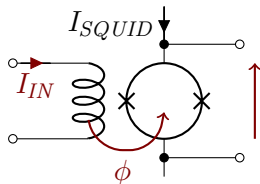
Le courant critique de la caractéristique $I(V)$ est modulé par le flux



Le SQUID comme amplificateur de courant

Une bobine convertir le courant I_{IN} en flux magnétique

$$\phi = \frac{I_{IN}}{M_{IN}} :$$

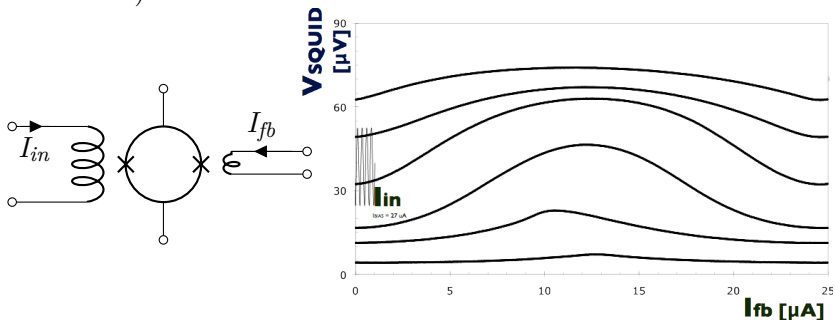


Le bruit en entrée est de qq $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$

et le "gain" H_0 est de l'ordre de qq 100 V/A mais "très non-linéaire"

Contre-réaction

Pour linéariser autour d'un point de fonctionnement la caractéristique du SQUID, on utilise une deuxième bobine (de contre-réaction)



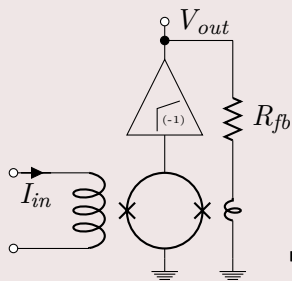
Pour des raisons de gain et de bande-passante (et d'encombrement), on utilise une mutuelle beaucoup plus faible pour la contre réaction



Boucle de contre-réaction en flux - *FLL*

Une résistance R_{fb} de conversion V-I permet de **réinjecter une "image" de la tension de sortie dans le flux** du SQUID par l'intermédiaire de la mutuelle de contre réaction M_{fb} . Un intégrateur garantit la stabilité de la contre réaction.

Flux Locked Loop

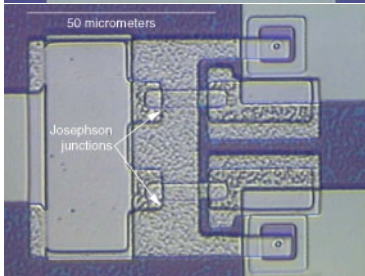
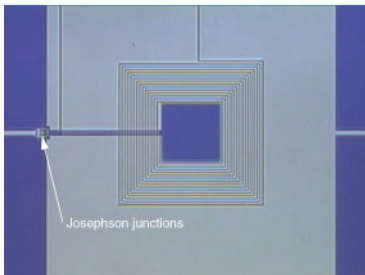


$$|H_{open}| = \left. \frac{V_{out}}{I_{in}} \right|_{open} = H_{0_{SQUID}} G_{Amp.}$$

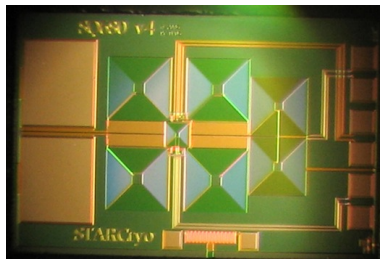
$$|H_{FLL}| = \left. \frac{V_{out}}{I_{in}} \right|_{close} = \boxed{\frac{M_{in}}{M_{fb}} R_{fb}}$$

☞ Pas de pb de signe, H_0 est périodique !

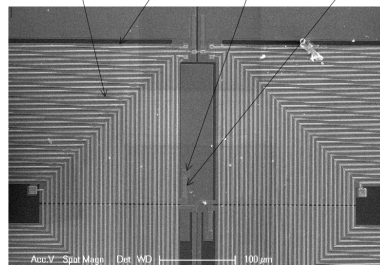
Technologie planaire des SQUIDs et gradiométrie



Lawrence Livermore National Laboratory



Self d'entrée Washer Jonction Josephson ? Résistance de shunt ?



MEB-1ef, SQUID StarCryo



Plan : Electronique de lecture - Multiplexage à SQUID

- 1 Principe de la bolométrie et thermomètre
 - Détection bolométrique
 - Thermomètres résistifs et polarisation
 - Schéma-block de la rétroaction électro-thermique
- 2 TES : bolomètre supraconducteur
 - Circuit de polarisation
 - Modèles et mesures
 - Procédé de fabrication
- 3 Electronique de lecture
 - SQUID
 - Multiplexage à SQUID



Multiplexage $N : 1$

Le multiplexage n'est envisageable, sans dégradation des performances des détecteurs, **que si on a une MARGE :**

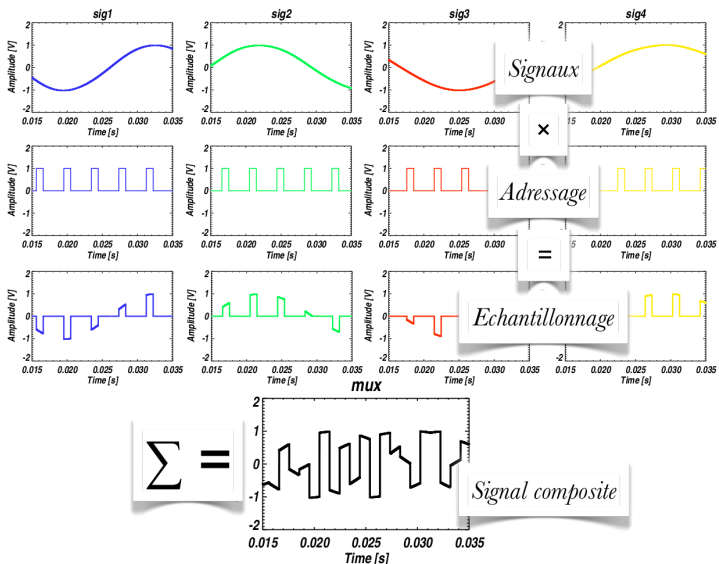
- 1 de BANDE PASSANTE $> 2N$ (Shannon)
- 2 de BRUIT $> \sqrt{N}$ (*aliasing* ou dynamique)

Le SQUID permet de bénéficier d'un bruit de moins d' $1pA/\sqrt{Hz}$ et d'une bande passante de plusieurs MHz.

S'offre à nous 2 techniques simples (?) **TEMPORELLE** et **FRÉQUENTIELLE**.

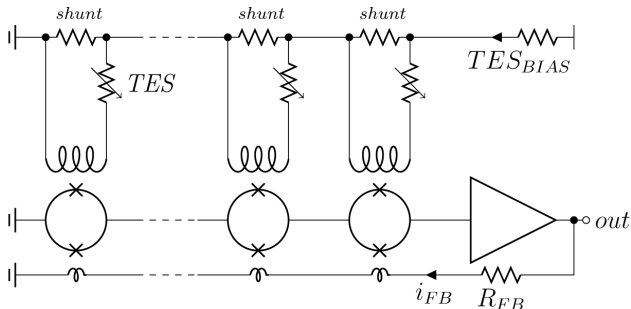


Multiplexage temporel - principe



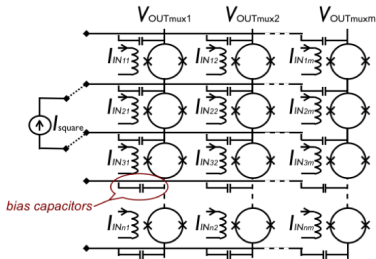
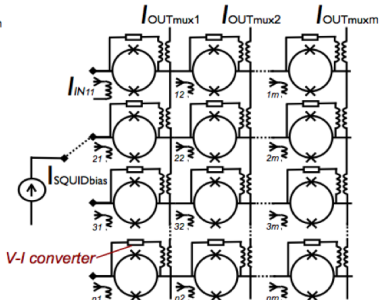
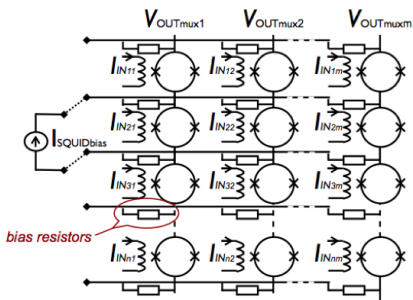
Multiplexage temporel à SQUID - 1D

Plusieurs SQUIDs sont connectés en série et polarisés 1 à 1.



Le signal de chacun des TES est lu successivement au rythme de la polarisation des SQUIDs

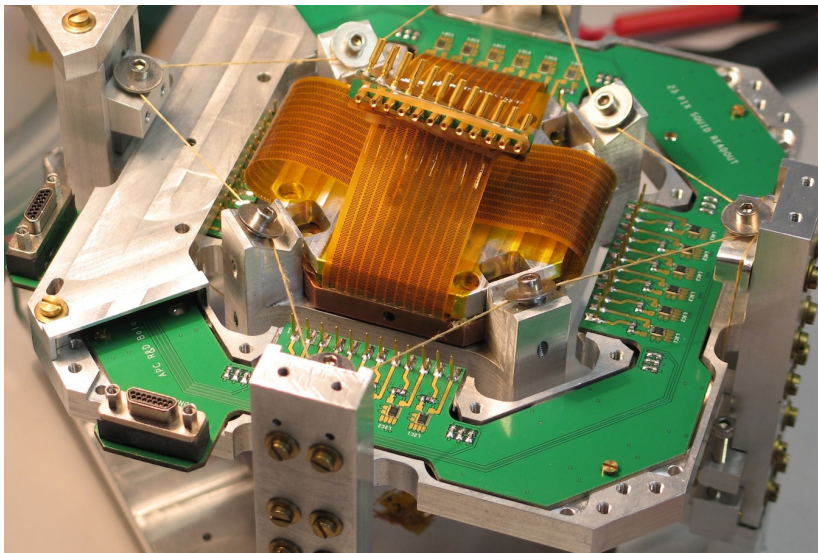
Multiplexage temporel à SQUID - 2D



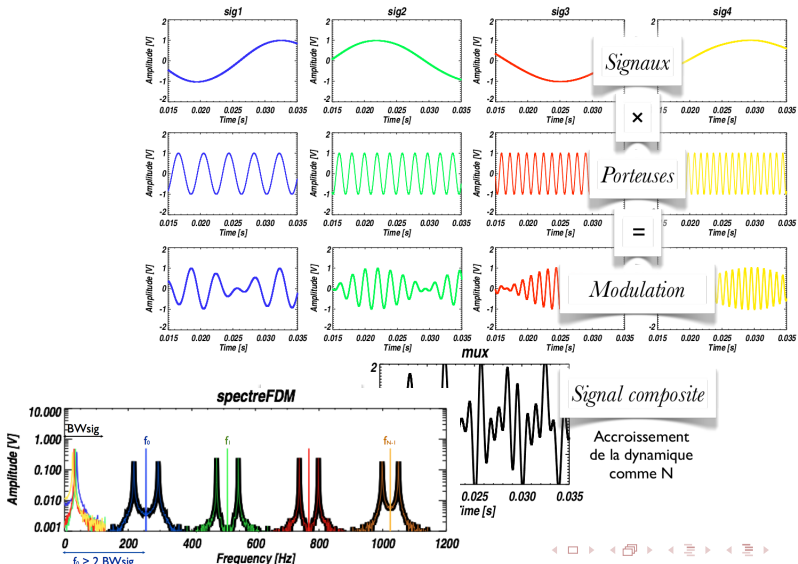
*Non-Dissipative Addressing for Time
 Division SQUID Multiplexing*
 - D. Prèle et al. - IEEE trans. Supra. 2011



Multiplexage temporel \Rightarrow N SQUIDs

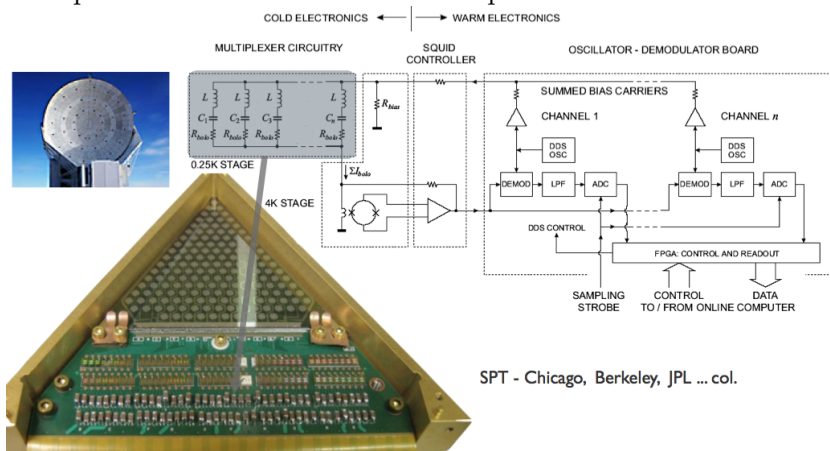


Multiplexage fréquentiel - principe



Multiplexage fréquentiel \Rightarrow N filtres différent

TES polarisés en AC à différentes fréquences



Sommation des N courants (I_{TES} transposé en fréquence) dans 1 seul SQUID
 N filtres LC qui séparent les fréquences de polarisation



Conclusion

- Le TES est un choix stratégique pour la réalisation de **grandes matrices** multiplexées.
- En forte contre réaction électro-thermique, **ce n'est plus un thermomètre**, mais 1 dispositif d'asservissement de la température du bolomètre \rightarrow on mesure directement $\frac{\partial R}{\partial P}$ tout en **maintenant la température presque fixe**.
- La forte contre réaction électro-thermique apporte de **nombreux avantages** (bande passante accélérée, uniformisation des réponses ...) mais **complexifie la prévision du comportement** des TESs.



Bibliographie

- *Principes des Bolomètres*, DRTBT 2002, P. Camus
- *Direct detection : Bolometers*, NTTI 2009, M. Piat
- *Characterization of Transition Edge Sensors for ACT*, Thesis 2010, Y. Zhao
- *Transition-Edge Sensors*, Cryogenic Particle Detection 2005, K. Irwin et G. Hilton
- *Bolometer noise : nonequilibrium theory*, Applied Optics 1982, J. Mather
- *Voltage-biased superconducting transition-edge bolometer with strong electrothermal feedback operated at 370 mK*, Applied Optics 1998, S. Lee et al.
- *Voltage-biased superconducting bolometers for infrared and mm-wave astronomy*, LTD7, A. T. Lee et al.

