



HAL
open science

Les détecteurs TES principes et technologie

Damien Prêle -Apc

► **To cite this version:**

Damien Prêle -Apc. Les détecteurs TES principes et technologie. École thématique. France. 2012.
hal-03252683

HAL Id: hal-03252683

<https://cel.hal.science/hal-03252683>

Submitted on 7 Jun 2021

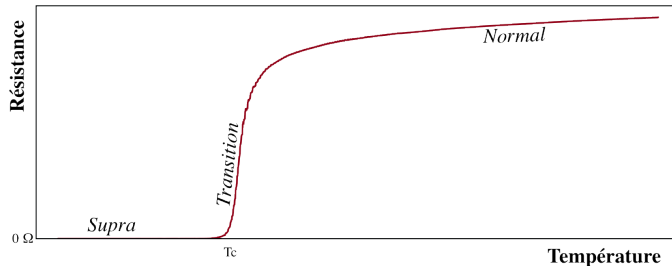
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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.

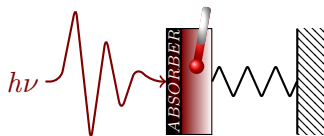
Introduction (2) : TES \equiv Bolomètre supraconducteur

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

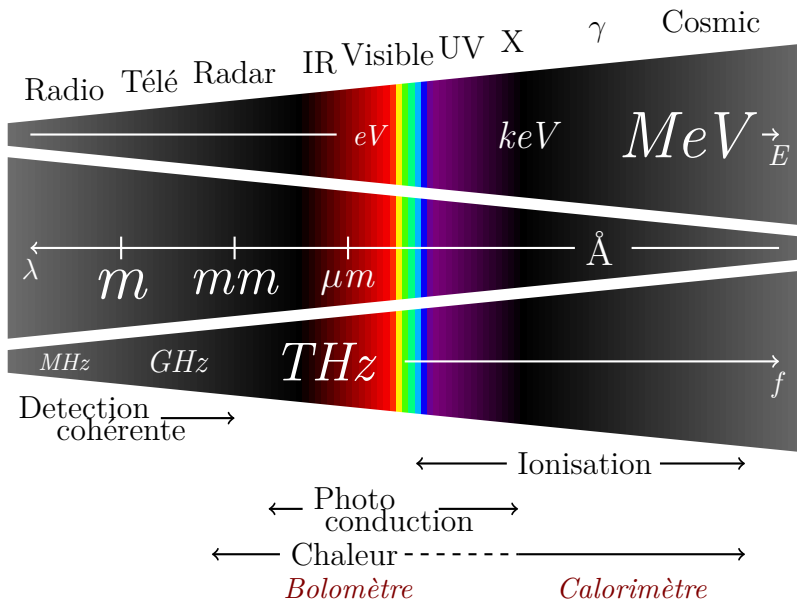
- 1 Principe de la bolométrie et thermomètre
 - Détection bolométrique
 - Thermomètres résistifs et polarisation
 - Schéma-bloc de la rétroaction électro-thermique
- 2 TES : bolomètre supraconducteur
 - Circuit de polarisation
 - Modèles et mesures
 - Procédé de fabrication
- 3 Electronique de lecture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





Couplage avec la radiation

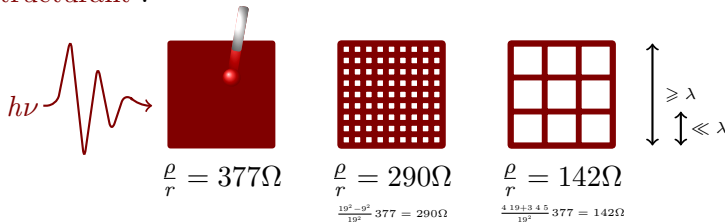
La transduction **radiation** → **température** peut se faire différemment en fonction, en particulier, des longueurs d'ondes :

- 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 :

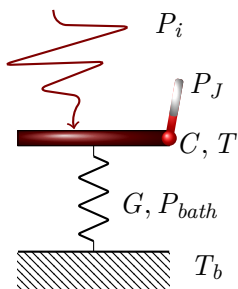


Antenne – Dissipateur

- 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

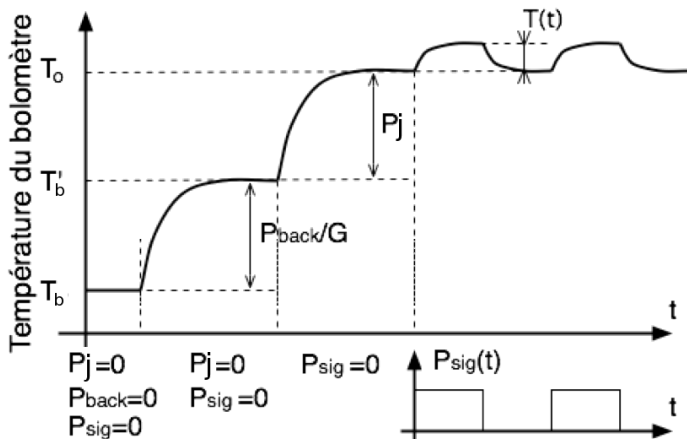
l'une **électrique** qui décrit les fluctuations de courant $\frac{\partial I}{\partial t}$ ou de tension $\frac{\partial V}{\partial t}$ dissipée dans le thermomètre. Elle dépend de la nature du thermomètre (Résistif : semi ou supra-conducteur) et du type de polarisation (courant ou tension).

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-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



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

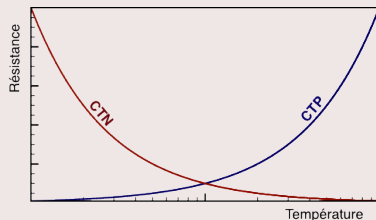
Coefficient de Température Négatif - CTN

Oxydes métalliques ou semi-conducteurs

- Thermo-résistances

Coefficient de Température Positif - CTP

Métaux normaux et transitions supra. (TES)

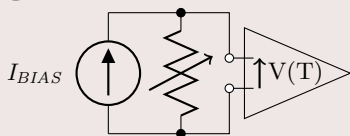


Polarisation d'un bolomètre résistif

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

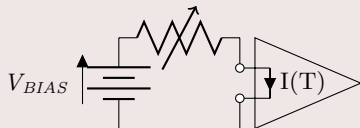
① Polarisation en courant



Lecture en tension

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

② Polarisation en tension

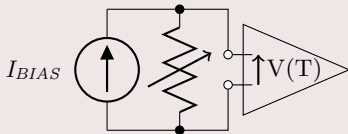


Lecture en courant

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

Polarisation en courant

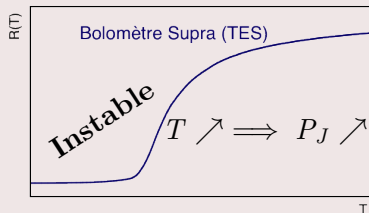
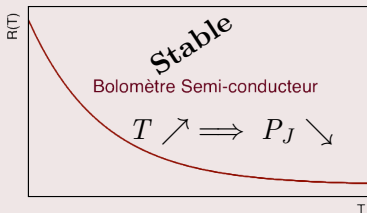
Polarisation en courant de bolomètre résistif



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

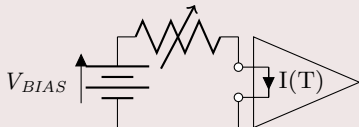
$$P_J(T) = R(T) \times I_{BIAS}^2$$

Contre-réaction électro-thermique



Polarisation en tension

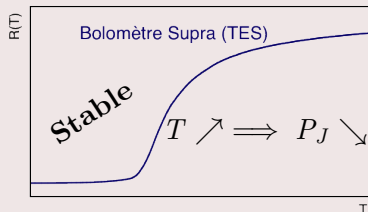
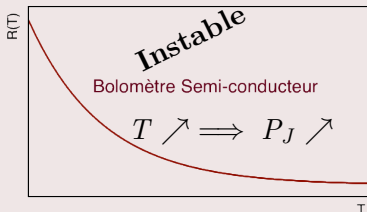
Polarisation en tension de bolomètre résistif



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

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

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

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

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

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

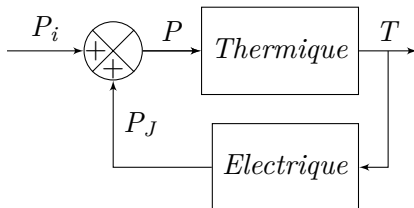


Plan : Principe de la bolométrie et thermomètre - Schéma-block de la rétroaction électro-thermique

- 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**

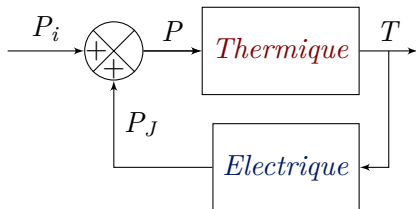
*L'utilisation d'un bolomètre en régime linéaire requiert un **signe négatif de la contre-réaction** sur toute la bande passante du système contre-réactionné ($\tau_{\text{eff}} = \frac{C}{G_{\text{eff}}}$) et même au-delà*

☞ *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 courant : $\left. \frac{\partial I}{\partial R} \right|_{V=cst} = -\frac{V}{R^2}$

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



Sensibilité du bolomètre en ETF ⁽²⁾

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

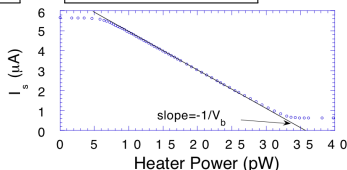
- Bolomètre semi-conducteur : $P_{j0} = RI^2 = VI$

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

- 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

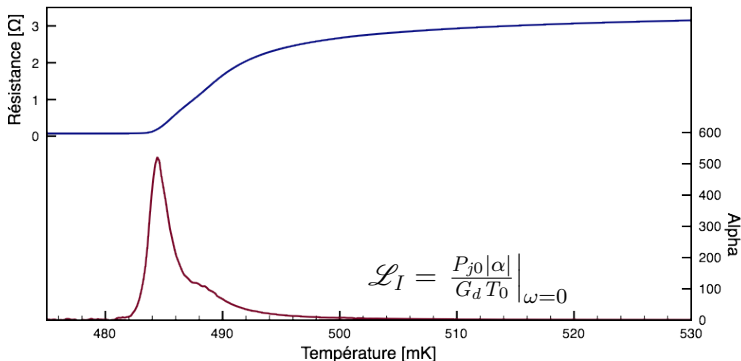
- 3 Electronique de lecture
 - SQUID
 - Multiplexage à SQUID



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

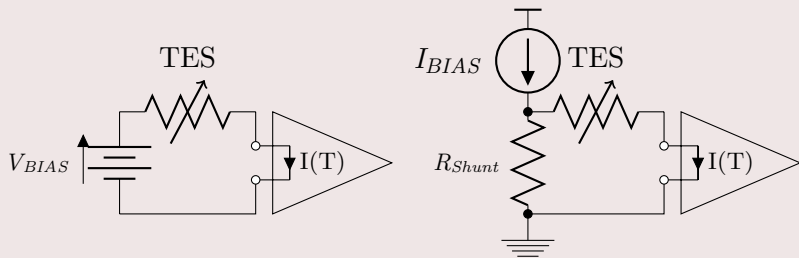
- 1 Principe de la bolométrie et thermomètre
 - Détection bolométrique
 - Thermomètres résistifs et polarisation
 - Schéma-block de la rétroaction électro-thermique
- 2 TES : bolomètre supraconducteur
 - Circuit de polarisation
 - Modèles et mesures
 - Procédé de fabrication
- 3 Electronique de lecture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

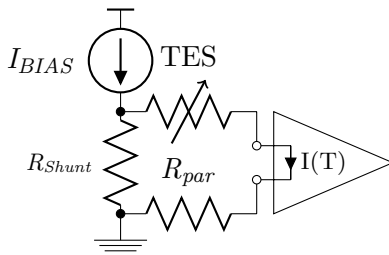
Contact Resistance	10 mΩ
--------------------	-------

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 :

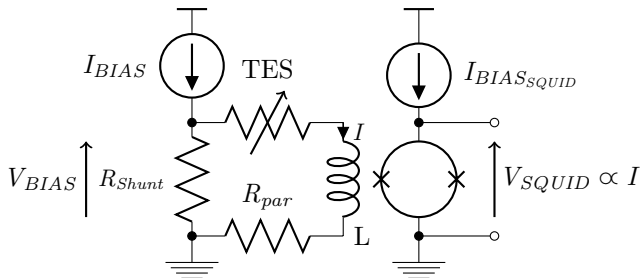


Lecture en courant d'un TES ⁽⁰⁾



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}).



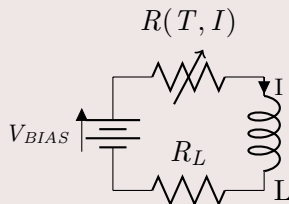
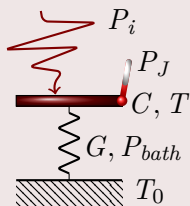
☞ La bobine d'entrée du SQUID est supraconductrice, elle ne rajoute donc pas de résistance, mais une réactance qui ajoute 1 pôle à la contre réaction électro-thermique ... 2 pôles : attention à la stabilité.

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)

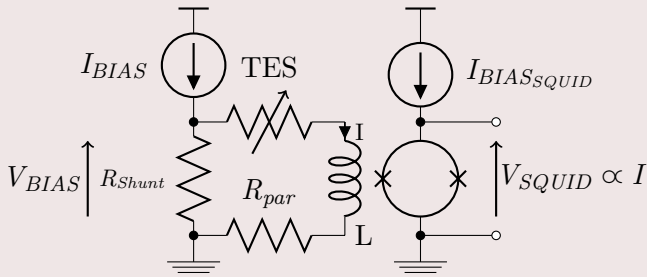
$$+ \frac{1}{S_I^2} \left[\underbrace{\frac{4k_B T (1 + \omega^2 \tau^2)}{R_{dyn} \mathcal{L}_I^2}}_{\text{Johnson TES}} + \underbrace{\frac{4k_B T_0 R_L (\mathcal{L}_I - 1)^2 (1 + \omega^2 \tau_I^2)}{R_{dyn}^2 \mathcal{L}_I^2}}_{\text{Johnson } R_{Shunt} \text{ et } R_{par}} + \underbrace{i_{n_{SQUID}}^2}_{\text{ampli.}}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

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



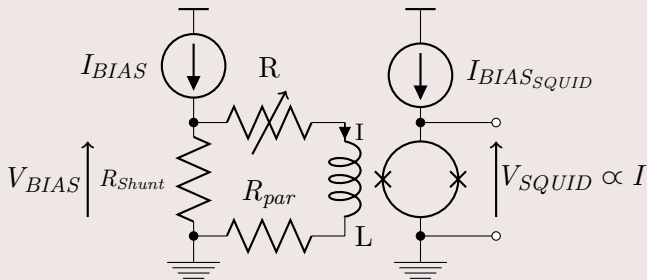
Mesures et caractérisations

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

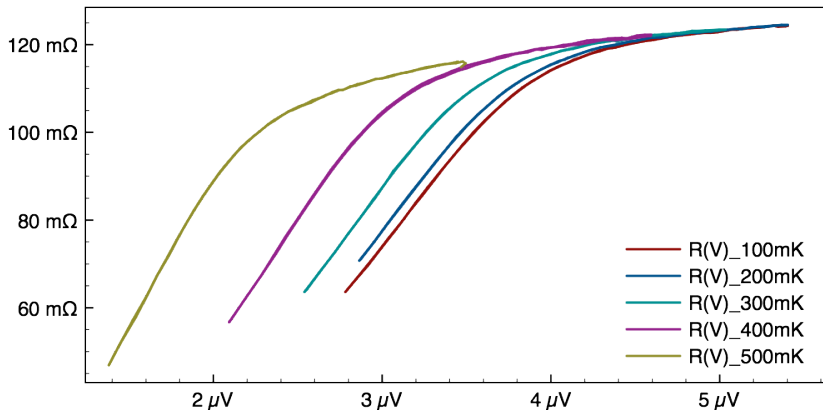
Mesures $R(V)$ (principe)



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

On en déduit $R(V_{BIAS}) \left\{ \begin{array}{l} R = I_{BIAS} \frac{R_{Shunt}}{I} - R_{Shunt} + R_{par} \\ V_{BIAS} = R_{Shunt} I_{BIAS} \frac{R + R_{par}}{R_{Shunt} + R + R_{par}} \end{array} \right.$

Mesures $R(V)$

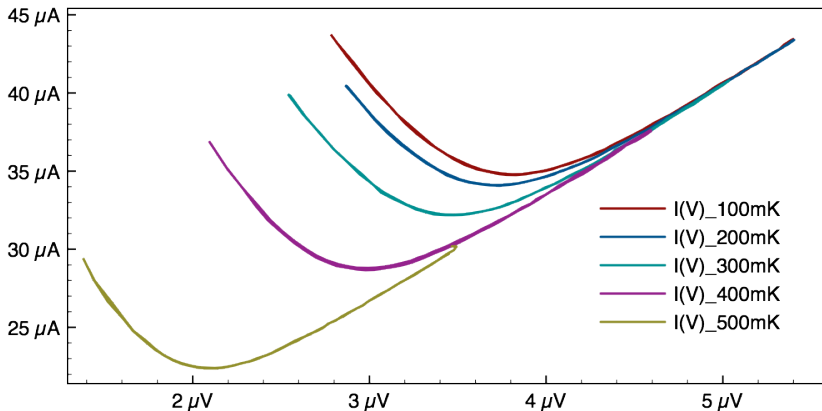


La mesure $R(V)$ donne la modulation de la température du TES par la polarisation pour une température de bain fixe

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



Mesures I(V)

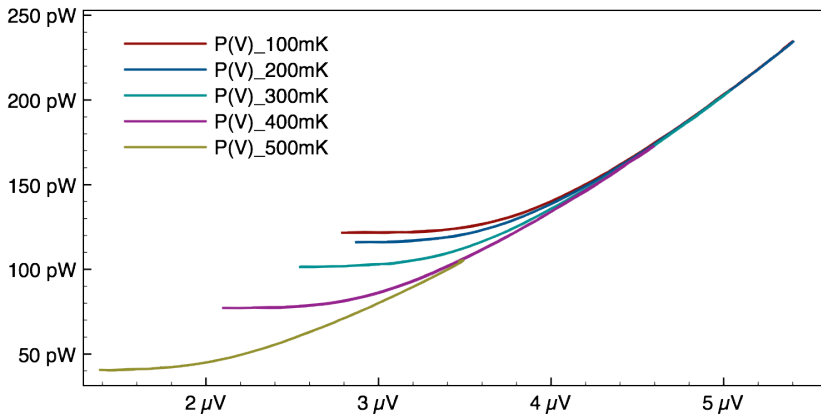


La mesure $I(V)$ donne la tension de *turnover* quand on rentre dans la transition et donc en *ETF*

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



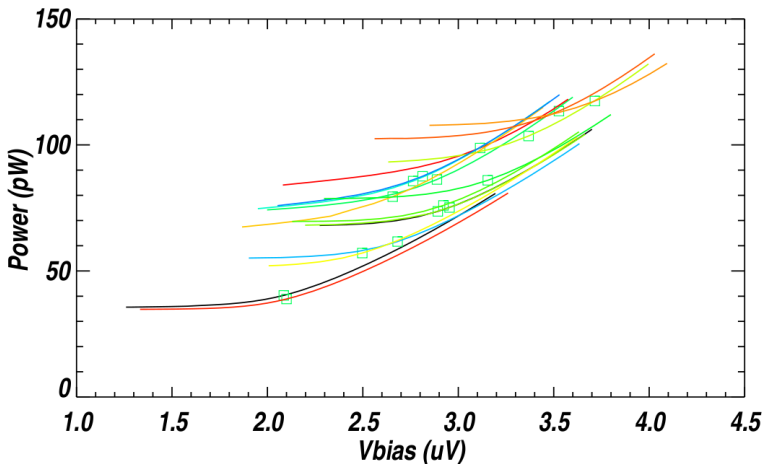
Mesures $P(V)$



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.



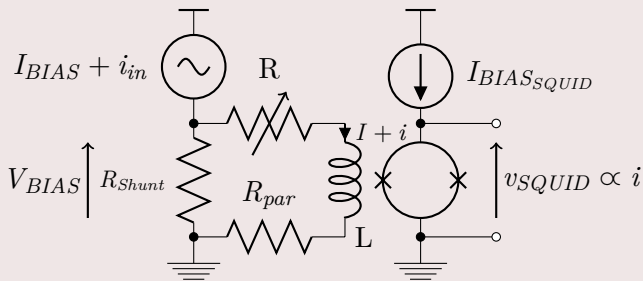
P(V) de pixels différents d'une même matrice à 300 mK



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



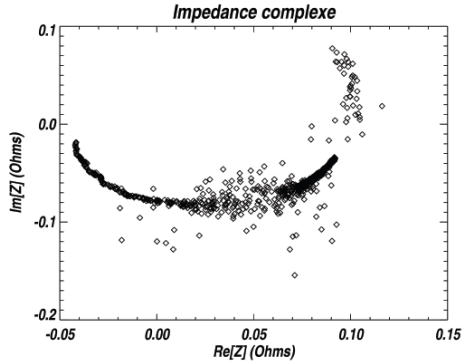
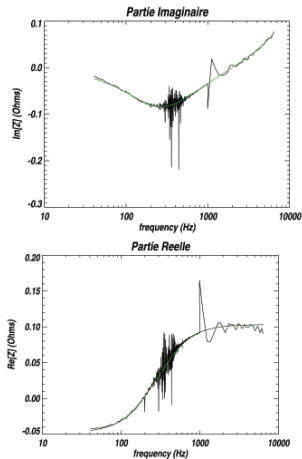
Mesure petit signal de l'impédance complexe (principe)



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 : $Z(\omega)$



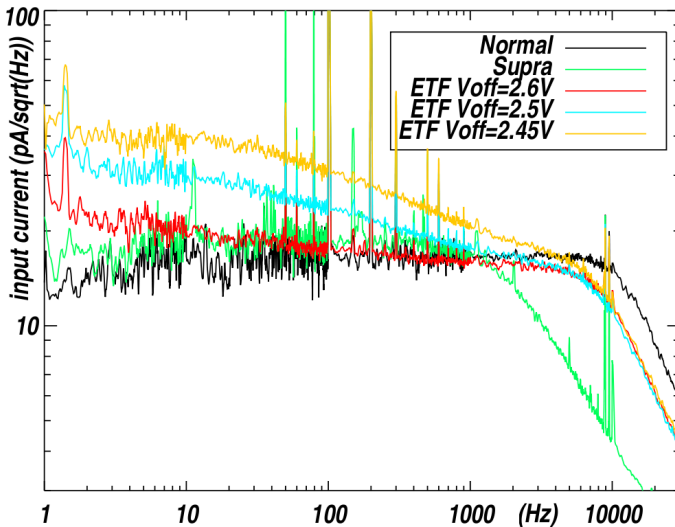
$$Z_{TES} = R_0(1 + \beta_I) + \frac{R_0 \mathcal{L}_I}{1 - \mathcal{L}_I} \frac{2 + \beta_I}{1 + i\omega\tau_I}$$

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

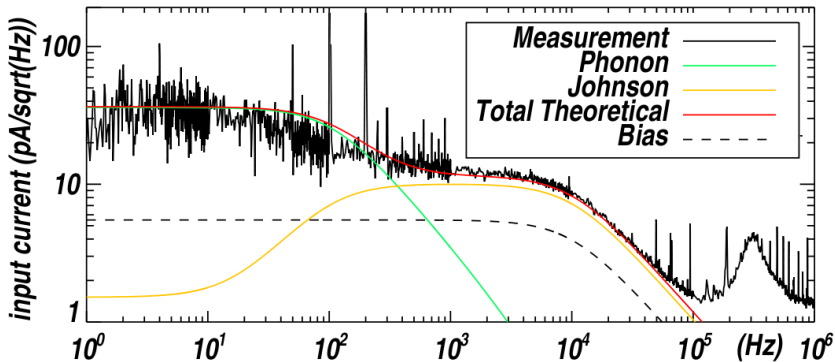


Fits "Impédance complexe" - Joseph Martino

Evolution du bruit de phonon en ETF



Interprétation des mesures de bruit dans la transition

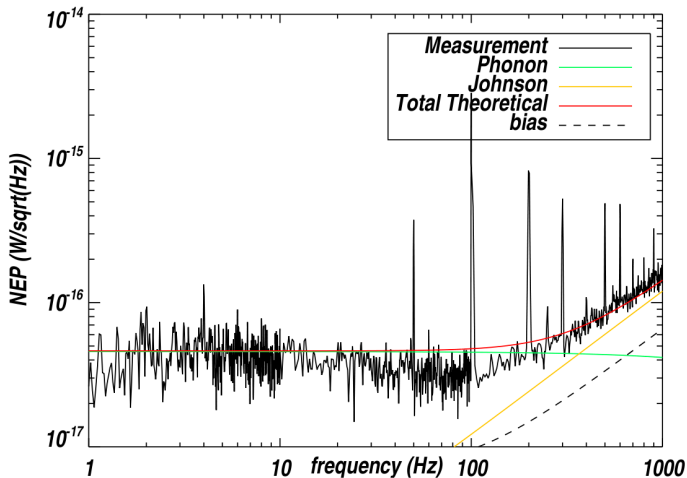


Mesures et modèle - Joseph Martino

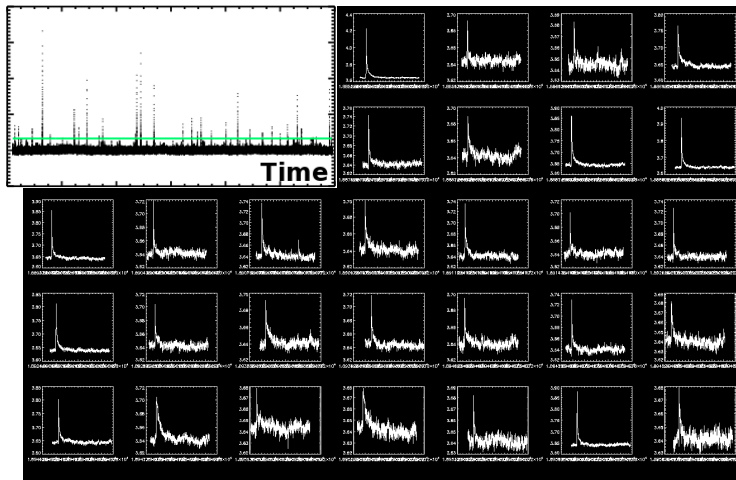
$$NEP^2 = \gamma 4k_B T^2 G + \frac{1}{S_I^2} \left[\frac{4k_B T}{R_{dyn}} \frac{(1+\omega^2\tau^2)}{\mathcal{L}_I^2} + \frac{4k_B T_0 R_L}{R_{dyn}^2} \frac{(\mathcal{L}_I - 1)^2 (1+\omega^2\tau_I^2)}{\mathcal{L}_I^2} \right]$$



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



Acquisition temporelle ("glitches" - source radioactive)

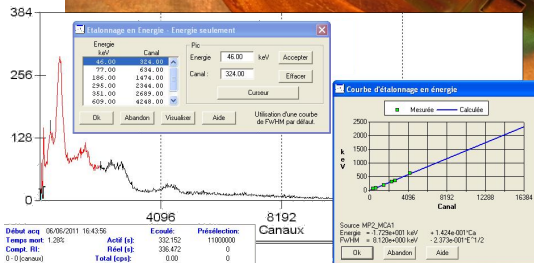
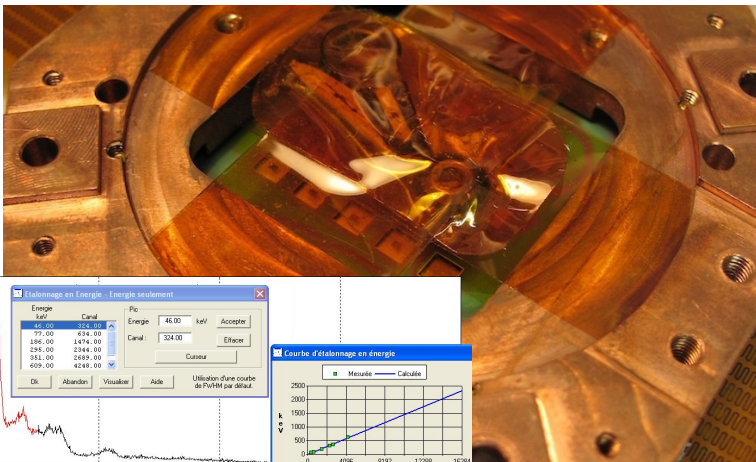


Observation du signal de sortie : constantes de temps des "glitches" $\Rightarrow \tau_{eff}$

Mesures et traitements - Joseph Martino



Source radioactive = aiguille de réveil JAZ au Radium



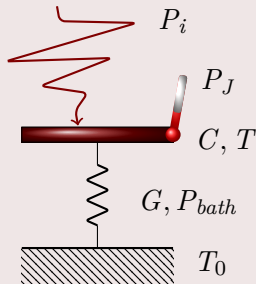
Plan : TES : bolomètre supraconducteur - Procédé de fabrication

- 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

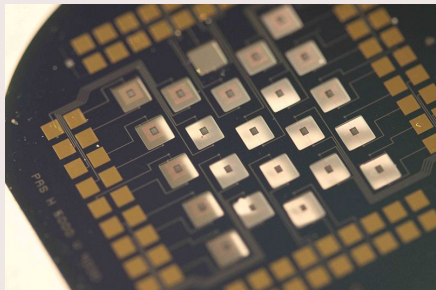


Technologie

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

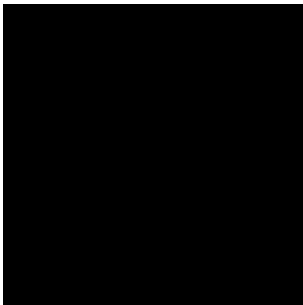
Cross section



■ Si

■ SiN

Top view



Dépôt du thermomètre par évaporation d'un matériau supra.

Cross section

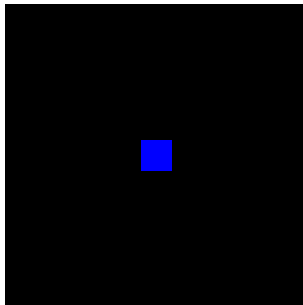


■ Si

■ SiN

■ Thermomètre

Top view

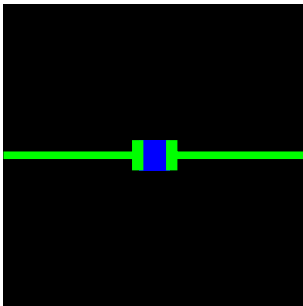


Dépôt des accès électrique - supra à plus bas T_c

Cross section



Top view



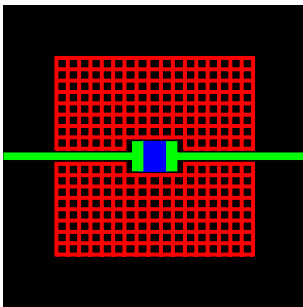
- Si
- SiN
- Thermomètre
- Accès

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

Cross section



Top view



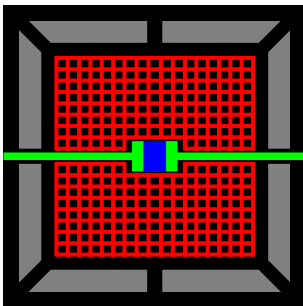
- Si
- SiN
- Thermomètre
- Accès
- Absorber

Structuration du SiN des membranes gravure RIE

Cross section

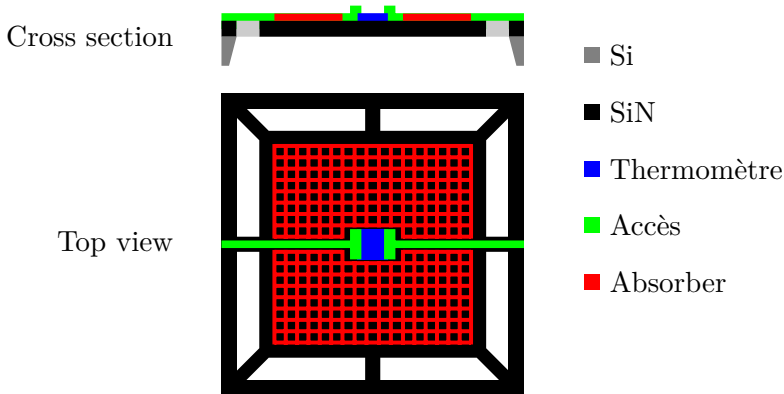


Top view

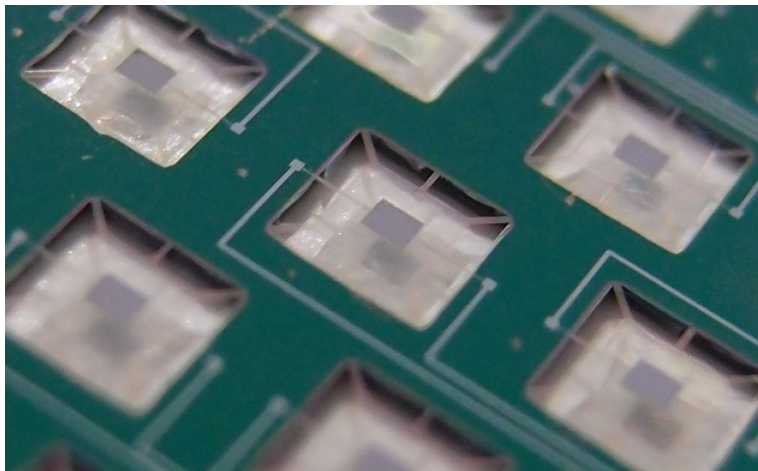


- Si
- SiN
- Thermomètre
- Accès
- Absorber

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

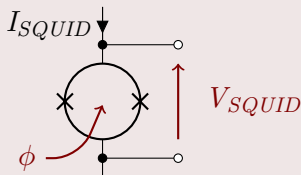
👉 *SQUIDs et méthodes de multiplexages* - DRTBT2009 - D. Prêle



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 $[T.m^2]$ ou $[V.s]$) 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 : $\oint_C \theta = 2\pi n \Rightarrow$

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

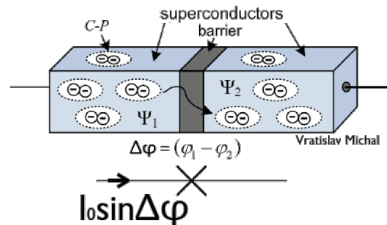
$\phi_0 = \frac{\hbar}{2e} \approx 2.10^{-15} \text{ Wb}$ ou $[T.m^2]$ ou $[V.s]$ le quantum de flux magnétique



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.



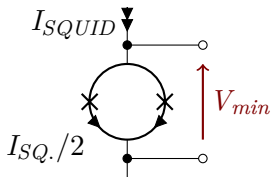
Un courant de polarisation $I = I_0 \sin \Delta\Phi$ entraine une **modulation de la phase supra**

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**.

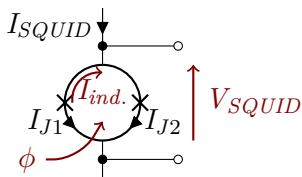


En l'absence de flux magnétique extérieur le courant de polarisation I_{SQUID} se **répartie symétriquement** dans les deux jonctions qui oscillent donc en phase → interférence destructive en courant.



Flux et déphasage des jonctions

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



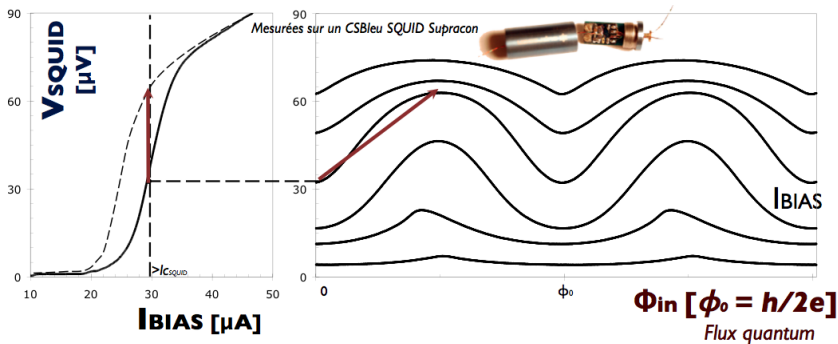
$$I_{J1} \approx I_0 \sin \left(2\pi \frac{V}{\phi_0} t - 2\pi \frac{\phi}{\phi_0} \right)$$

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

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.



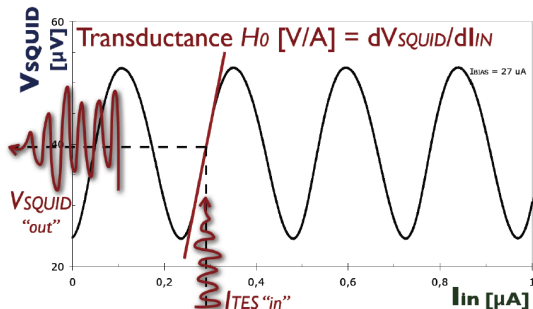
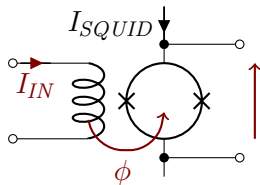
Le courant critique de la caractéristique $I(V)$ est modulé par le flux



Le SQUID comme amplificateur de courant

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

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

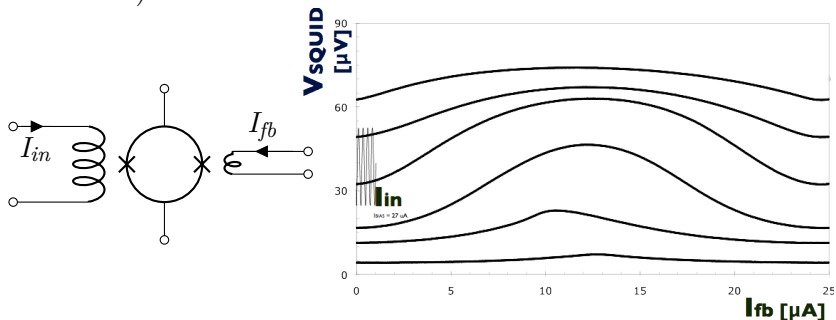


Le bruit en entrée est de qq $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$

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)

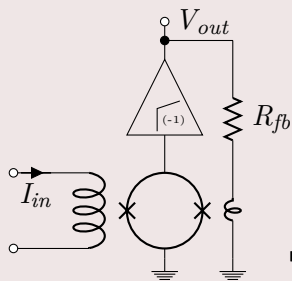


Pour des raisons de gain et de bande-passante (et d'encombrement), on utilise une mutuelle beaucoup plus faible pour la contre réaction

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

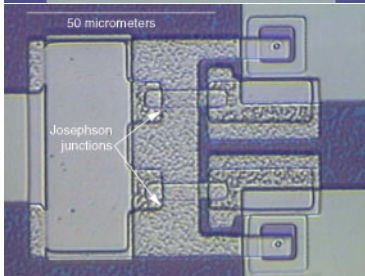
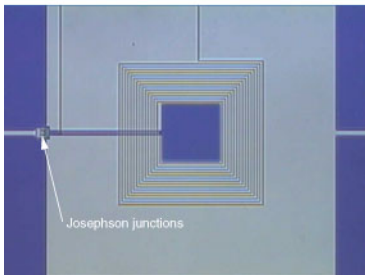


$$|H_{open}| = \left. \frac{V_{out}}{I_{in}} \right|_{open} = H_{0_{SQUID}} G_{Amp.}$$

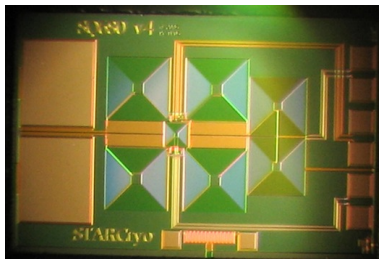
$$|H_{FLL}| = \left. \frac{V_{out}}{I_{in}} \right|_{close} = \boxed{\frac{M_{in}}{M_{fb}} R_{fb}}$$

☞ Pas de pb de signe, H_0 est périodique !

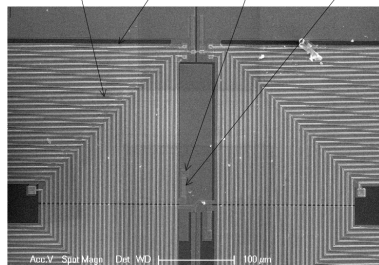
Technologie planaire des SQUIDs et gradiométrie



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 :**

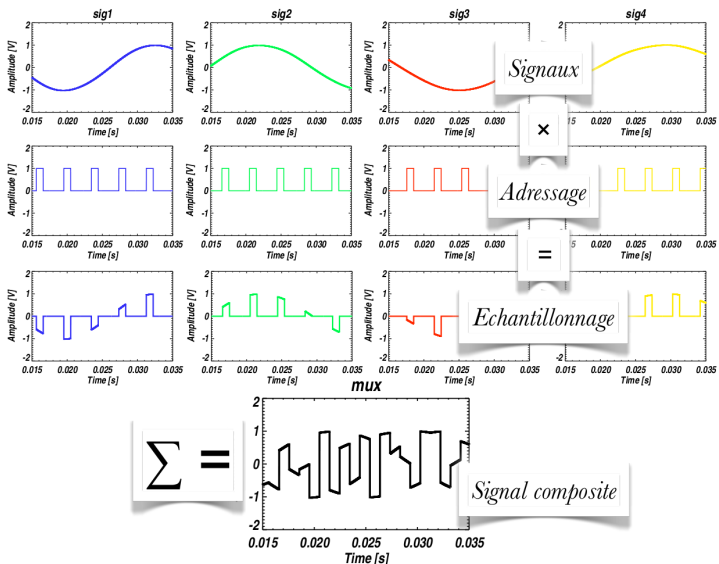
- 1 de BANDE PASSANTE $> 2N$ (Shannon)
- 2 de BRUIT $> \sqrt{N}$ (*aliasing* ou dynamique)

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**.

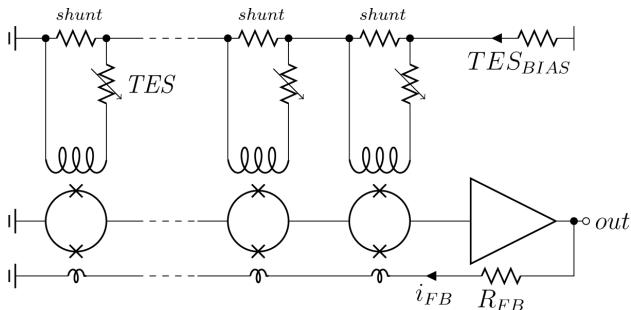


Multiplexage temporel - principe



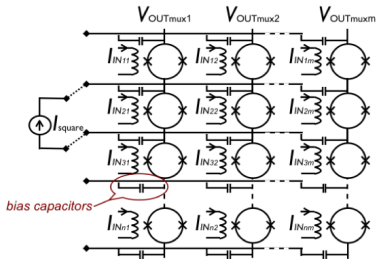
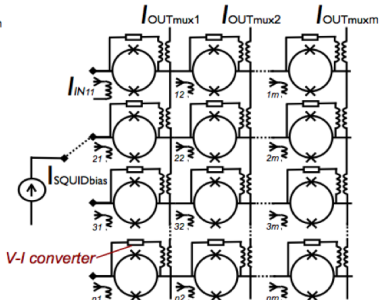
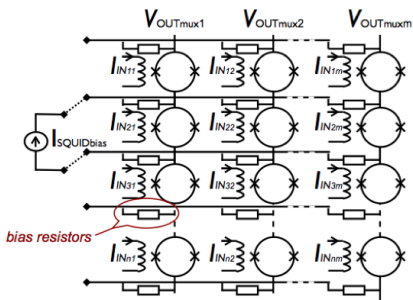
Multiplexage temporel à SQUID - 1D

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

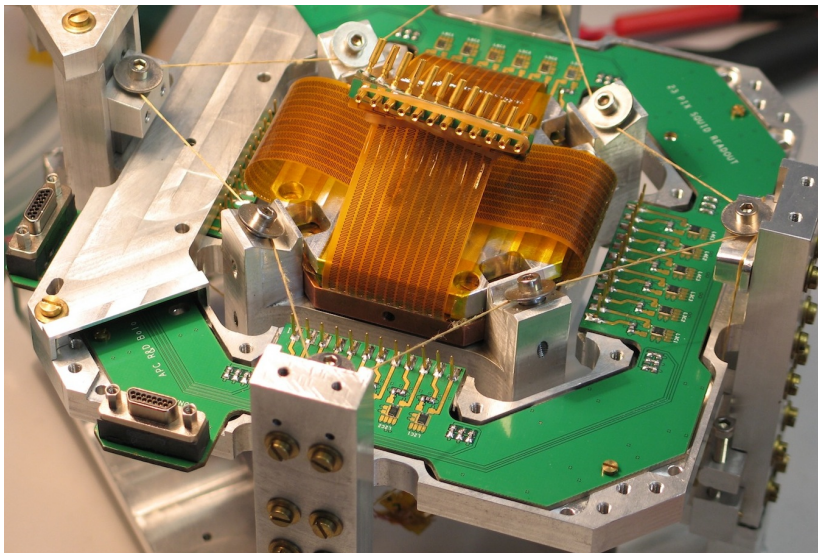
Multiplexage temporel à SQUID - 2D



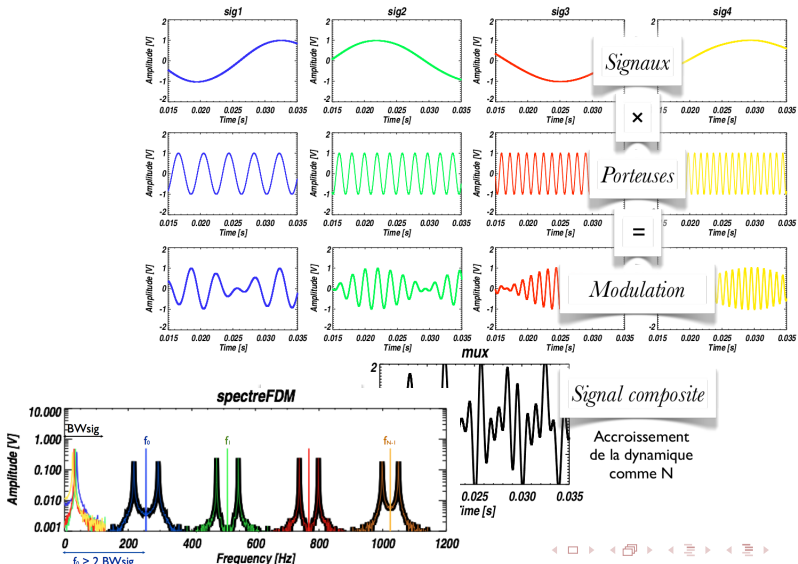
*Non-Dissipative Addressing for Time
 Division SQUID Multiplexing*
 - D. Prêle et al. - IEEE trans. Supra. 2011



Multiplexage temporel \Rightarrow N SQUIDs

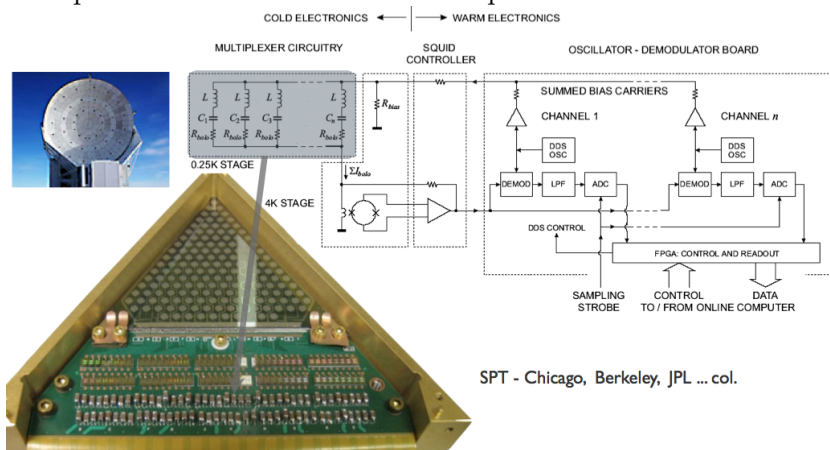


Multiplexage fréquentiel - principe



Multiplexage fréquentiel \Rightarrow N filtres différent

TES polarisés en AC à différentes fréquences



SPT - Chicago, Berkeley, JPL ... col.

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.

