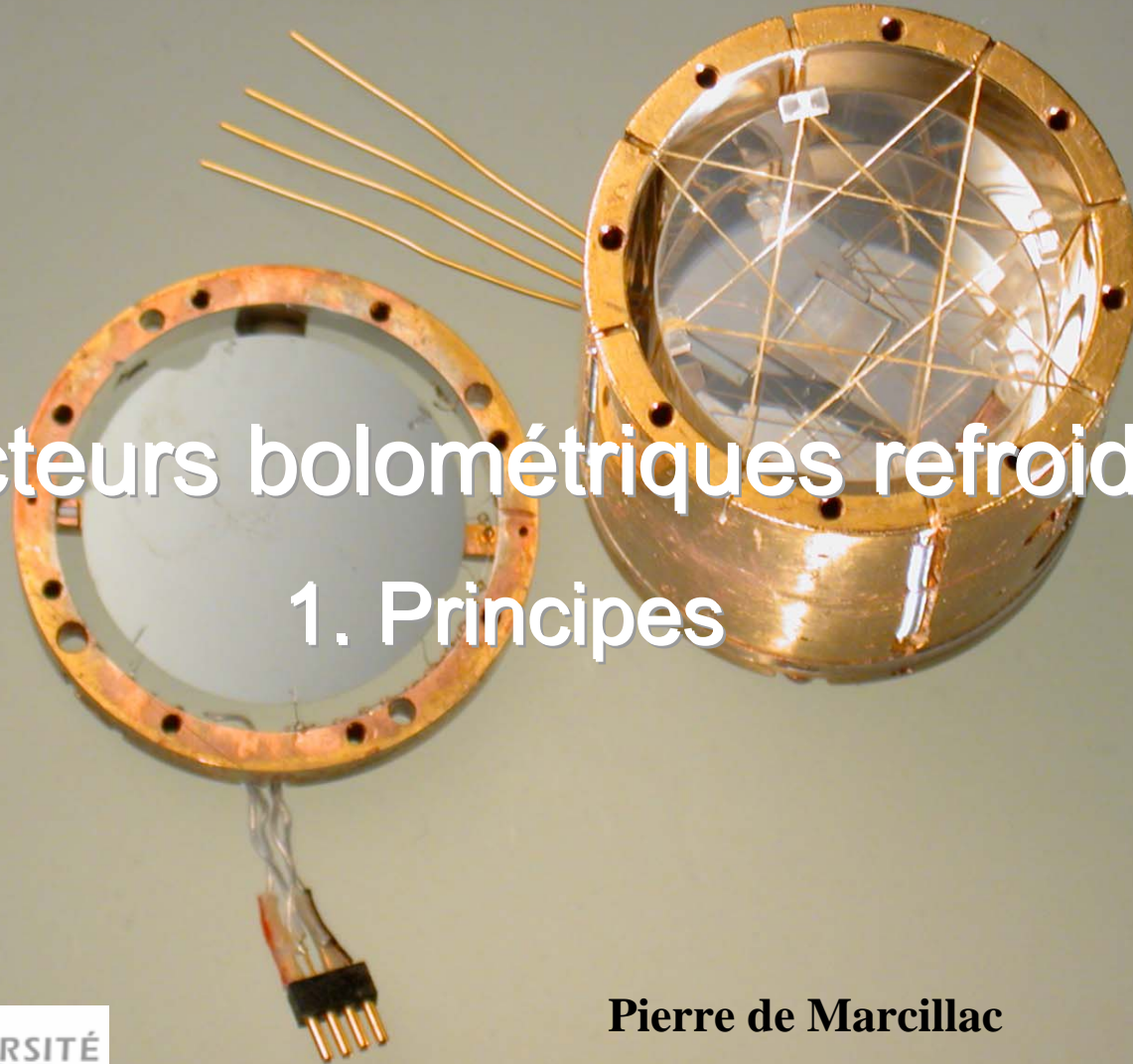


Roscoff; 13-21 juin 2007

Détecteurs bolométriques refroidis: 1. Principes



Le bolomètre : une personnalité difficile à cibler !

- **Masse ?** mg → kg: **une même technologie sur 6 ordres de grandeurs en masse !**
- **Constitution cible ?** métaux, isolants, semi-conducteurs, supraconducteurs...
- **Mesure ?** **de l'eV à 100 GeV; de 10^{-18} W au μ W à mieux que 1%**
- **Religion ?** éclectique ! particules ionisantes, non-ionisantes, photons submm→gamma...
- **Hobby ?** tous sports d'hiver: aime particulièrement le froid !
- **Sensibilité ?** extrême à froid (ne craint pas les engelures)
Si sensible qu'on peut envisager 600 applications...
- **Âge ?** 125 ans (IR) ou 20 ans (particules)
- **Habitât ?** colonise tunnels, labos, montagnes, satellites...
- **Distinctions ?** capable de
pouvoirs de résolutions > 1000 en spectroscopie X, alpha
mesurer des μ K (corps noir cosmologique) et demain des fractions de μ K...
mesurer des durée de vie rarissimes de radioisotopes de 10^{19} à 10^{26} ans

En couverture: bolomètre scintillant de 46g en germanate de bismuth (BGO) avec son détecteur optique, lequel fonctionne également en bolomètre (disque Ge de 20mm de diamètre et de 100 μ m d'épaisseur; cliché IAS; 2002)

Deux références utiles...

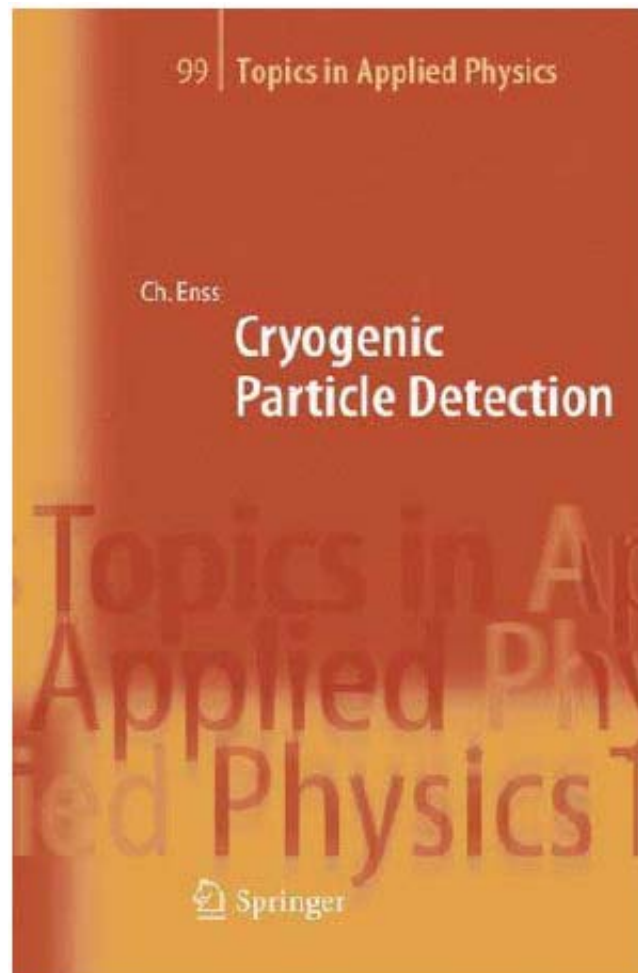
Un cours (1994)

Les bolomètres
pour la
détection de particules

par **Denis L'Hôte**

École Internationale
Joliot-Curie
de Physique Nucléaire
Maubuisson, 1994

La première monographie (2005 !)



- ❑ Historique
- ❑ Principes fondamentaux de la détection
 - pourquoi refroidir ?
- ❑ Techniques cryogéniques courantes en bolométrie
- ❑ Sélection des matériaux du bolomètre
 - par leurs propriétés à très basse température
- ❑ Suivi thermométrique du bolomètre
 - Techniques, principes de lecture
- ❑ Bolomètre polarisé
 - Bruits
 - Caractéristiques
- ❑ Environnement du bolomètre en laboratoire

- ❑ Remerciements
- ❑ Références
- ❑ Annexes



Liste des cours
Écoles d'automne thématiques:
« Détection de rayonnements à très basse température »
formation permanente CNRS /CEA
1991→2002

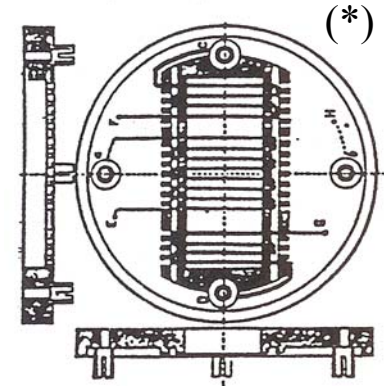
□ Historique



- Le premier bolomètre: Samuel Langley (1881)

– Étymologie:

- bolè=radiation, trait, trajectoire
cf. discobole, bolide, parabole, balistique
- Metron=mesure



« *J'ai essayé d'inventer quelque chose de plus sensible que la thermopile, qui soit en même temps aussi précis, et qui soit essentiellement un « mètre » et non un simple indicateur de la présence d'une faible radiation. Cette distinction est importante.* »

- Vise le proche infrarouge & le spectre solaire à ses débuts
- Autres appellations (prêtant à confusion !):
balance actinique (très désuet), radiomètre, (vrai)calorimètre
- « Magnitude bolométrique » → absence de sélectivité spectrale

Le bolomètre réalise la **conversion d'énergie incidente en agitation thermique** et la **mesure électrique de l'élévation de température** associée.

(*) Absorbéur: Ruban de Pt (4 μ m), noirci; Lecture: R(T) dans un pont de Wheatstone

- 1881: 1^{er} bolomètre (S. Langley)
- 1903: Radioactivité & chaleur (P. Curie et André Laborde)
 - P limite mesurable $\approx 10^{-4}$ W
- 1908: Liquéfaction de l' hélium (K. Omnes)
- 1912: Théorie de la chaleur spécifique (Debye, complétant Einstein)
- 1935: sensibilité \uparrow quand $T \downarrow$ (F. Simon)
- 1947: théorie du bolomètre (R. C. Jones)
- 1951: réfrigérateur à dilution (Fritz London)
- 1961: 1^{er} bolomètre Ge à 1.2K (F. Low)
 - essor de l' astronomie IR
- 1974: saut de T à 15mK sur cosmiques (T. Niinikosky)
- 1984: premier spectre X à 1.2K (D. McCammon et al.)
- 1985: premier spectre alpha à 1.2K (N. Coron et al.)

Radioactivité & calorimétrie: une association centenaire

Pierre Curie et André Laborde
CR Acad. Sciences, mars 1903

SUR LA
CHALEUR DÉGAGÉE SPONTANÉMENT

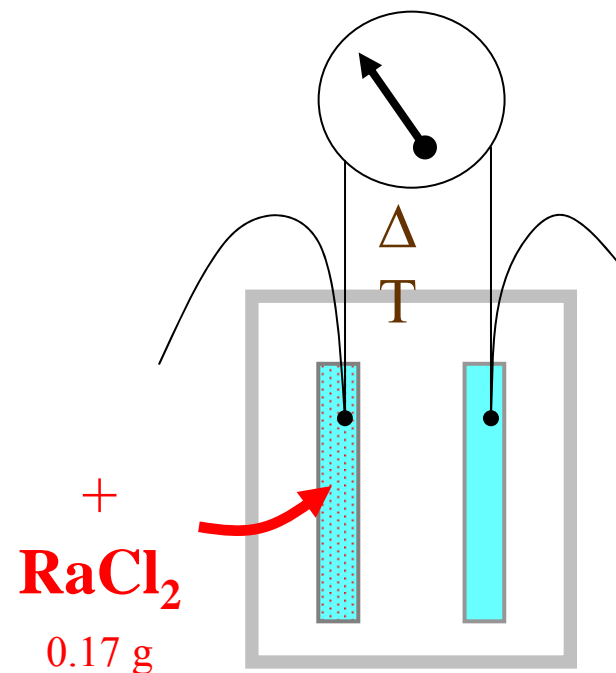
PAR LES SELS DE RADIUM.

En commun avec A. LABORDE.

Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. CXXXVI, p. 673,
séance du 16 mars 1903.

Nous avons constaté que les sels de radium dégagent de la chaleur d'une manière continue.

Un couple thermo-électrique, fer-constantan, dont une des soudures est entourée de chlorure de baryum radifère, et dont l'autre est entourée de chlorure de baryum pur, accuse en effet une différence de température entre les deux corps.



Sensibilités :

- ✓ en 1903: 10^{-4} W (100 μ W)
- ✓ en 2003: 10^{-18} W (en 1 s)

Bolomètres → gain de 14 ordres de grandeur en 100 ans !

Application of Low Temperature Calorimetry to Radioactive Measurements

It is often of importance to determine in absolute measure energy changes connected with radioactive transformations, but only in a few cases has it been possible to employ calorimetric methods for this purpose, since in general the amounts of energy liberated in unit time are too small. The sensitivity of calorimetric measurement can be increased, however, by many orders of magnitude by working at very low temperatures, and it may be worth while to point this out, as low temperature technique is now within the reach of non-specialised laboratories.

With such increased sensitivity, various problems can be attacked, and experiments in this direction are in progress at the Clarendon Laboratory.

F. SIMON.

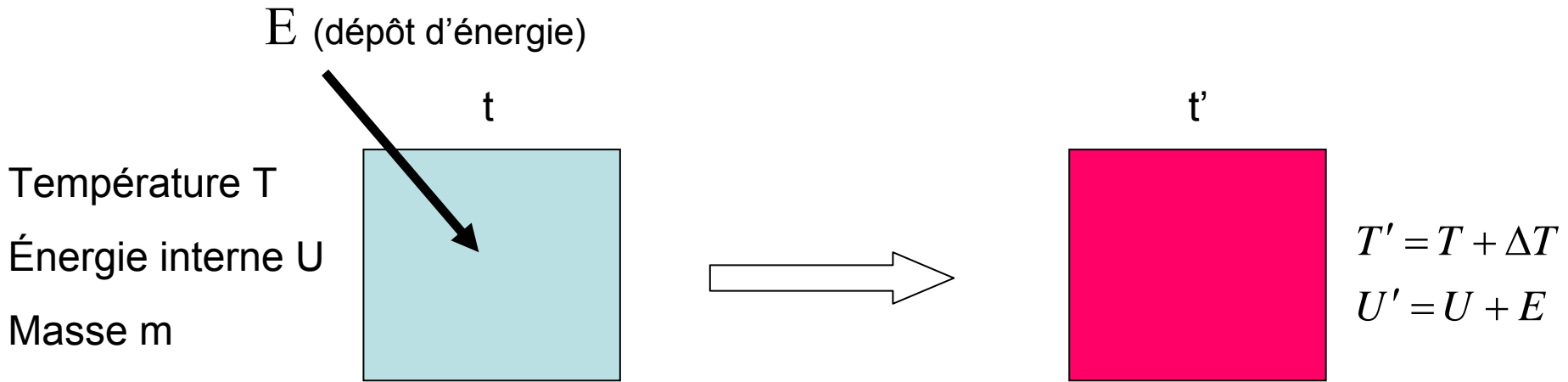
Clarendon Laboratory,
Oxford.
March 28.

□ Principes fondamentaux de la détection

- pourquoi refroidir ?



Principe de la détection



$$\Delta T = \frac{E}{C_{(T)}} = \frac{E}{m \times c_{(T)}}$$

Thermométrie :

- proportionnalité directe ΔT & E ($\ll U$)
- intérêt à refroidir:
 - sensibilité
 - compense l'utilisation de cibles massives (recherches d'événements très rares)

Thermodynamique

$$E = \Delta U = C_{(T)} \Delta T$$

Capacité calorifique (J.K^{-1})

Chaleur spécifique

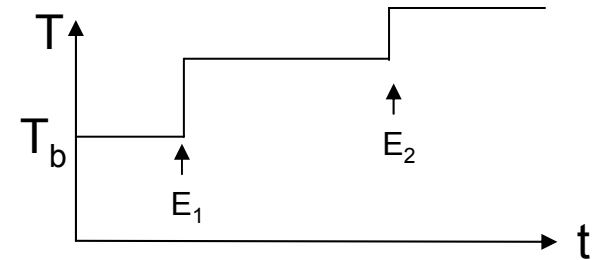
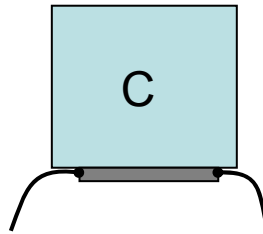
$$C_{(T)} = m \times c_{(T)}$$

$$\lim_{T \rightarrow 0} c_{(T)} = 0$$

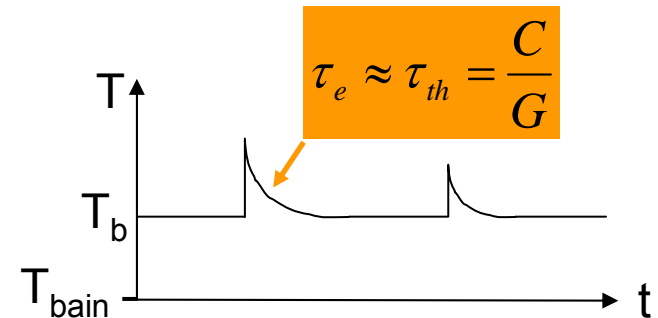
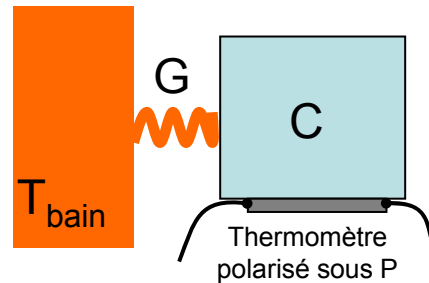
Principe de la détection

Détecteur isolé

(ce qui n'arrive jamais !)



Détecteur couplé



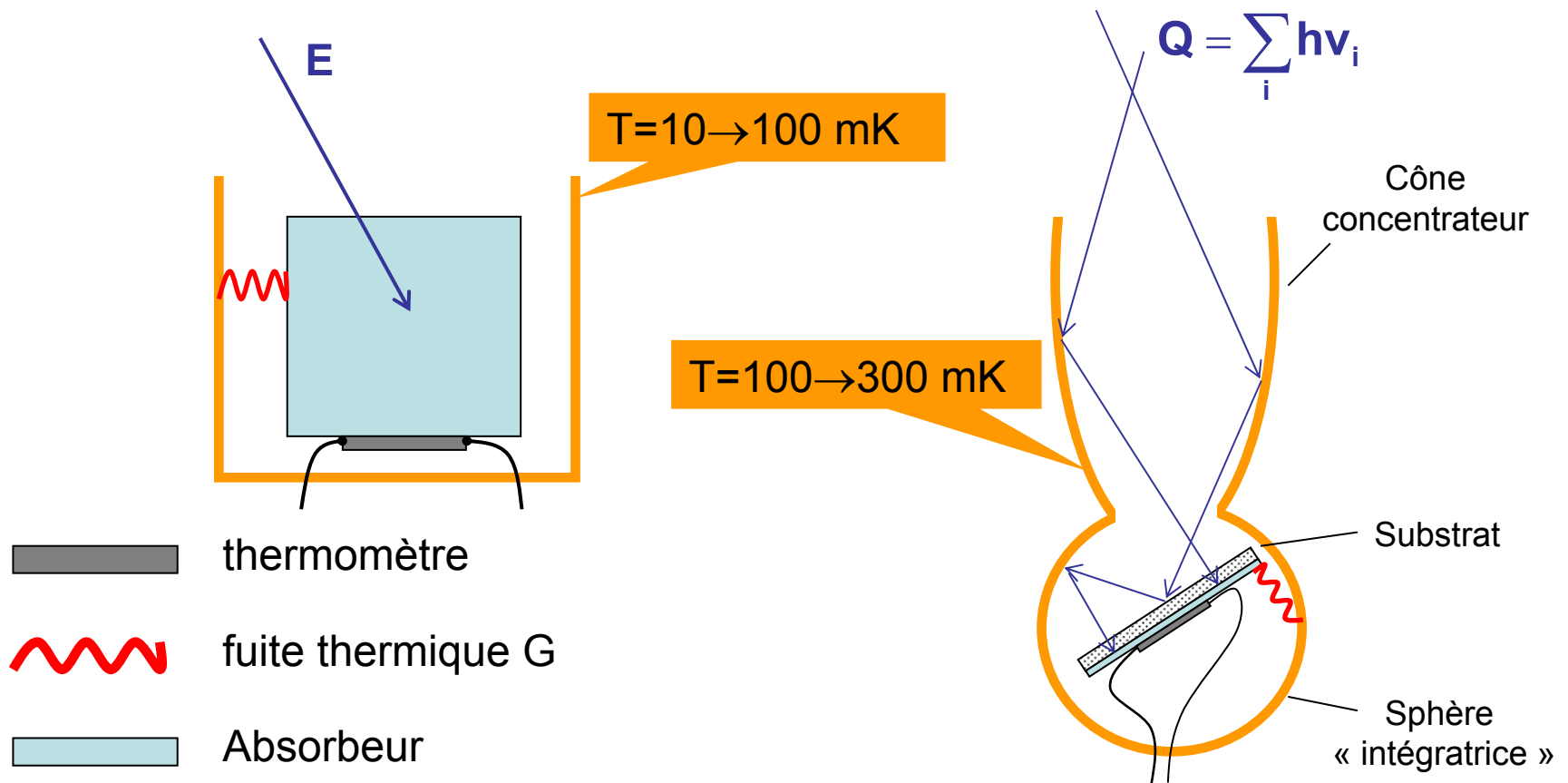
- ❑ G = conductance thermique (« fuite » thermique)
- ❑ « encaisse » le gradient thermique $T_b - T_{\text{bain}}$ lié à la puissance de polarisation P

$$P = G \times (T_b - T_{\text{bain}})$$

→ couplage du détecteur à la référence T_{bain} (platine réfrigérateur)

- ❑ évacue le surplus d'énergie (reset thermique) avec la constante de temps $\approx \tau_{\text{th}}$

Détection de particules ou de photons: un \approx même détecteur !



- détection de photons \rightarrow film résistif sur un substrat
- détection de particules: \approx tout est permis !

+ système de suspension (non représenté)

Palette de bolomètres (IAS)

Détection de photons
sub-mm

Détection de particules



R&D labo

Pronoas

Diabolo

Cible en saphir de 25g, 50g, 200g & 1.2 kg

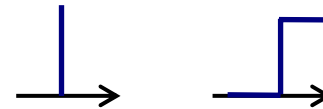
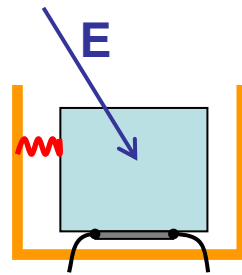
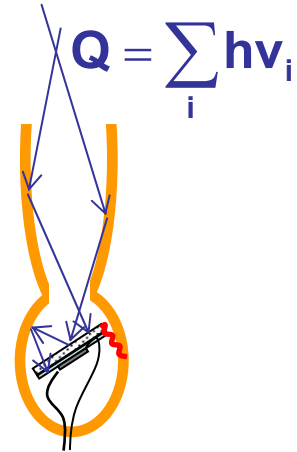
Le bolomètre « idéal »

Bilan énergétique du bolomètre (simplifié)

Hyp. : polarisation P constante

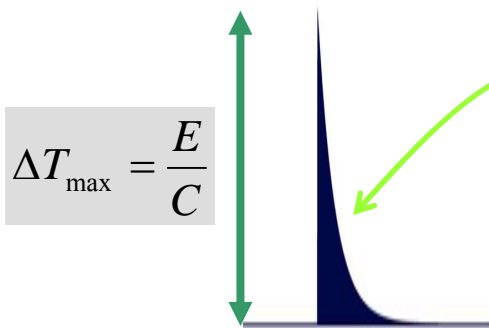
La solution stationnaire de l'équilibre thermique a été soustraite !

$$C \frac{d\Delta T}{dt} + G\Delta T = E\delta(t) + QH(t)$$

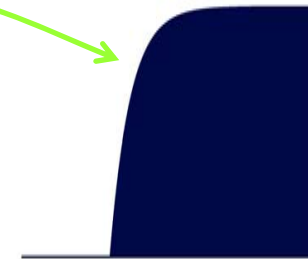


$$\Delta T = \Delta T_{\max} \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_{th}}\right)$$

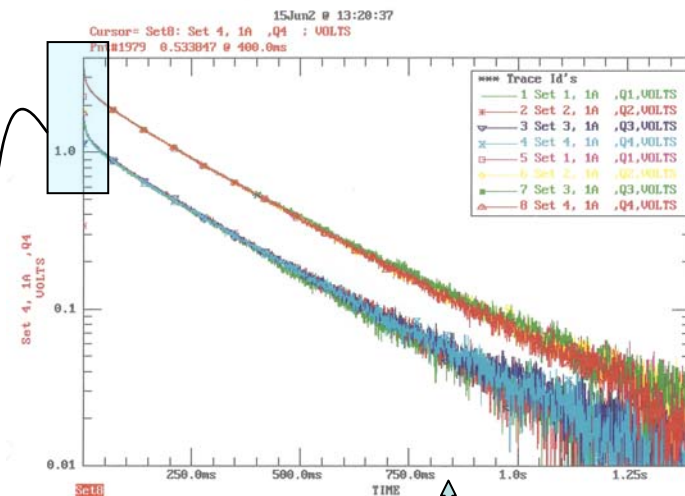
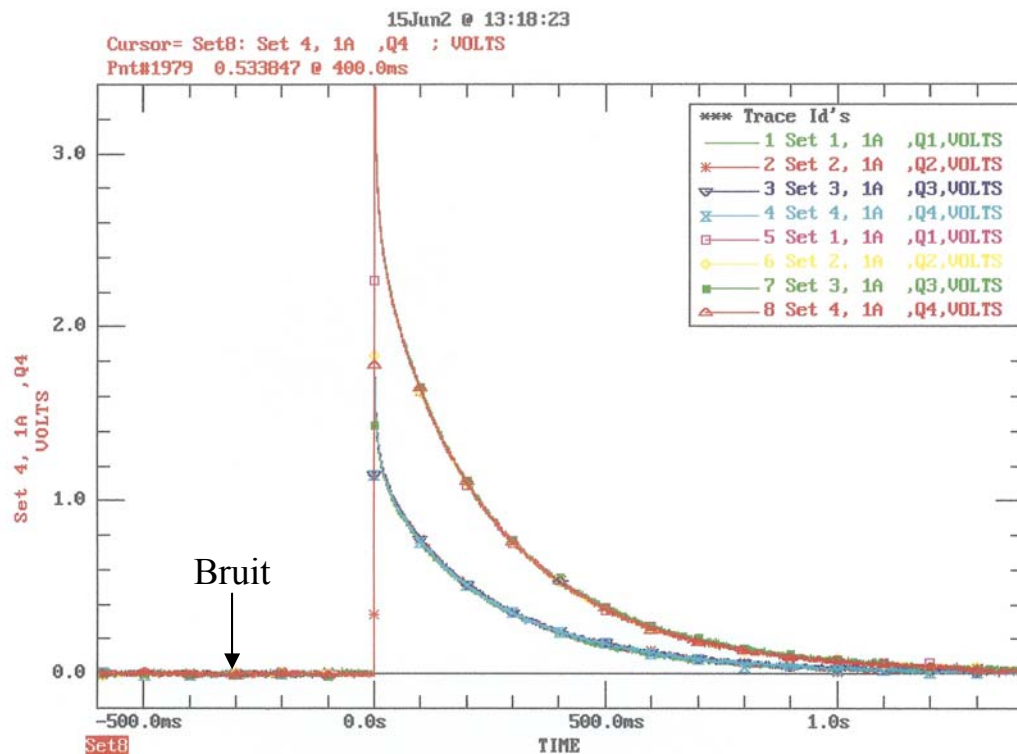
$$\Delta T = \Delta T_{\max} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{th}}\right)\right]$$



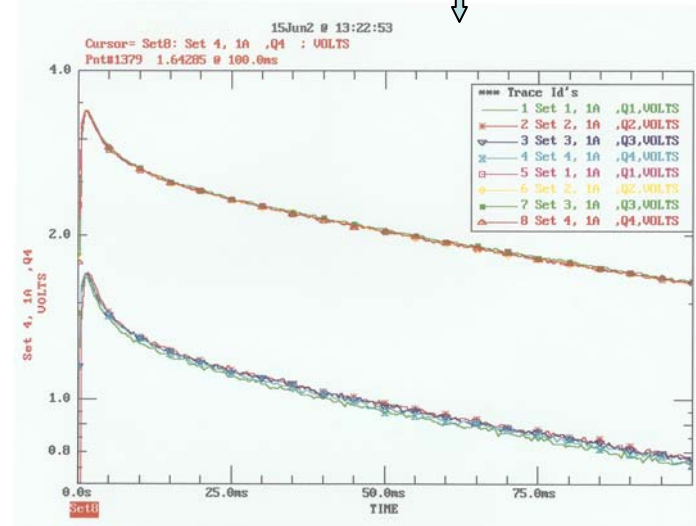
$$\tau_{th} = \frac{C}{G}$$



Quand la réalité n'est pas très loin du modèle...



Les mêmes impulsions en semi-log

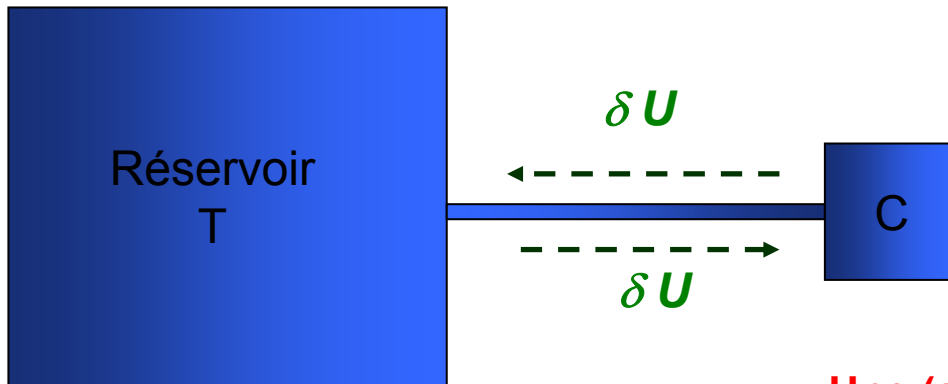


Bolomètre IAS C_{diamant} à dépôt Bismuth excité par

- des α (^{241}Am)
 - effet Joule (chauffage d'une résistance collée de $20\text{k}\Omega$)
- (on a représenté 4 événements de chaque type, superposés)

Résolution ultime en énergie

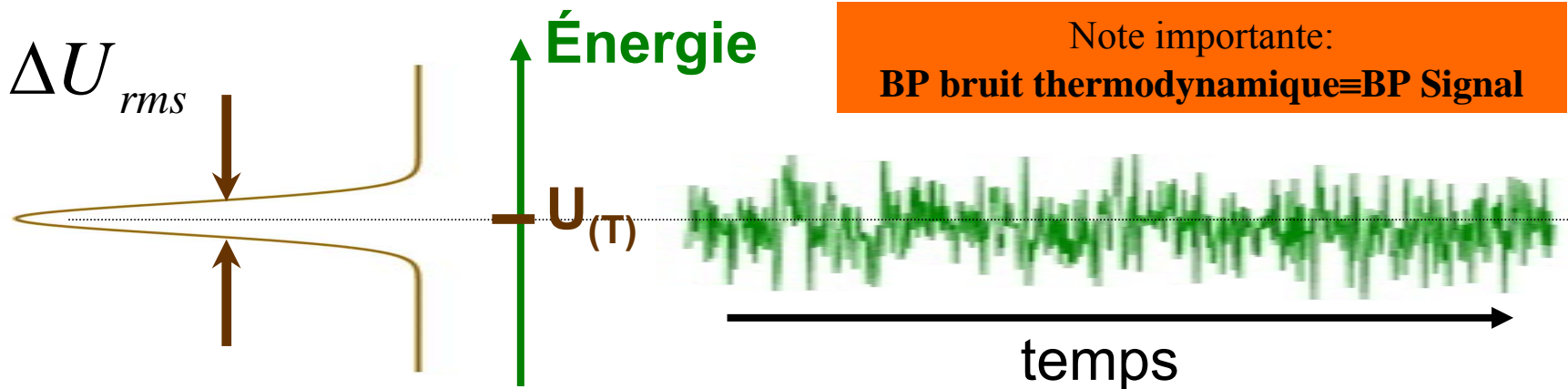
Le bolomètre, même isotherme à T , échange de l'énergie en permanence avec le réservoir, via la fuite thermique... → son énergie interne U fluctue !



Thermodynamique statistique

$$\Delta U_{rms} = \sqrt{k_B T^2 C}$$

Une (autre) très bonne raison pour abaisser T ...



- 1) Absence de fenêtre → pas de « straggling »
- 2) Choix de la cible
- 3) Récupération de la majeure partie de l'énergie
- 4) Résolution en énergie
- 5) Sensibilité
- 6) Linéarité
- 7) Pas (ou très peu) de sélectivité de la réponse
 - sur particules
 - Particules non ionisantes (reculs, ions lourds, molécules) !
 - spectrale (détection de photons)
- 8) Calorimétrie absolue possible sur faisceau
 - Intégration
- 9) Peu sensibles aux dommages sous irradiations

1) Lenteur

$$\tau \approx \text{qq. } 10\mu\text{s} \rightarrow \text{qq. } 100\text{ms}$$

c'est intrinsèque !

Taux de comptage max \approx qq. 10kHz au grand maximum*

* au détriment de la résolution

Raison:

la chaleur ne peut pas se propager plus vite que la vitesse du son dans le milieu (qq. Km/sec) \propto

\propto les bolomètres métalliques (encore émergents en 2005) seront sans doute les plus rapides (vitesse des porteurs \gg vitesse du son)

2) Cryogénie indispensable

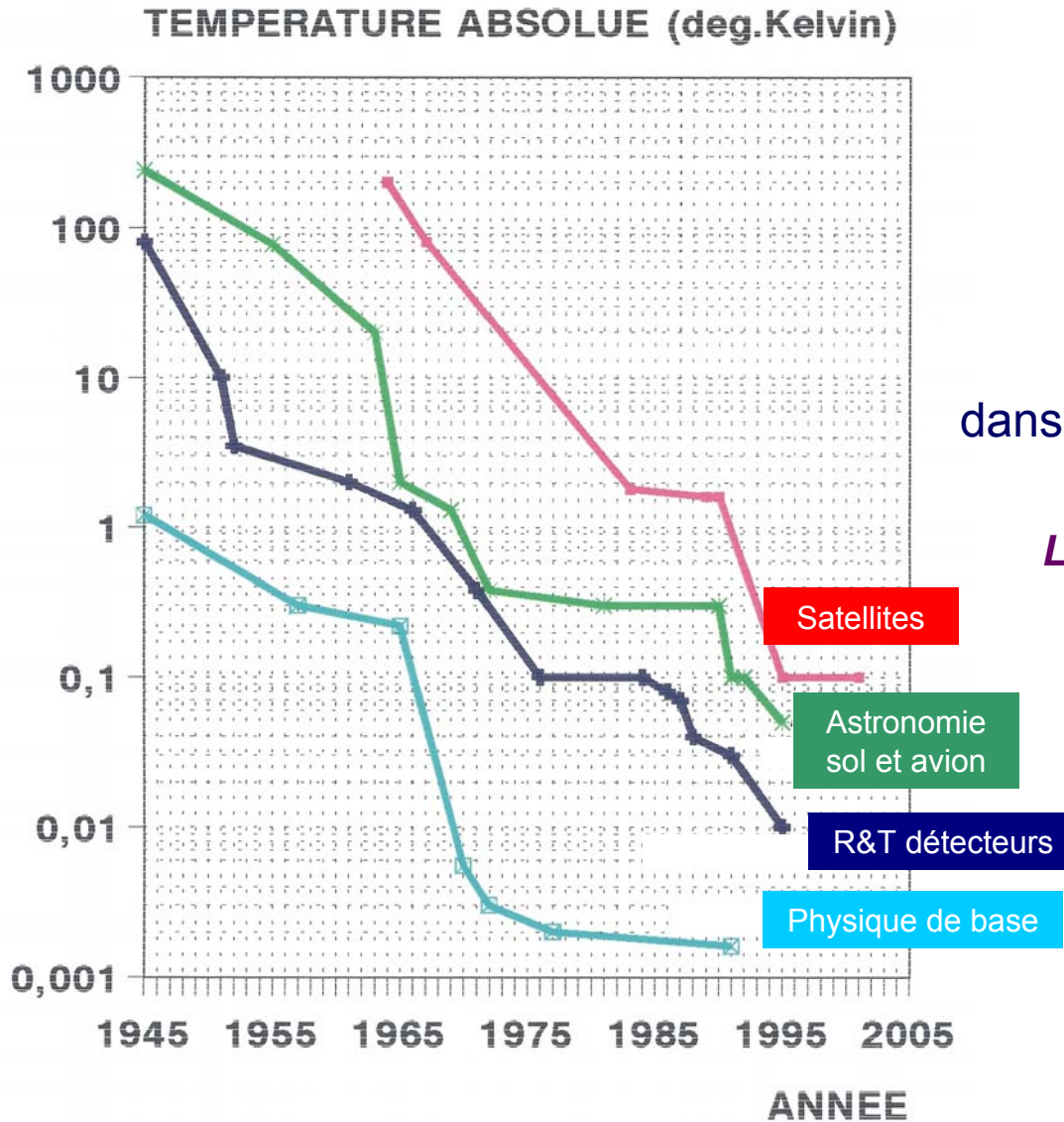
→ Maîtrise des techniques de réfrigération

→ Des solutions «pousse bouton » arrivent sur le marché !

□ Techniques cryogéniques courantes en bolométrie



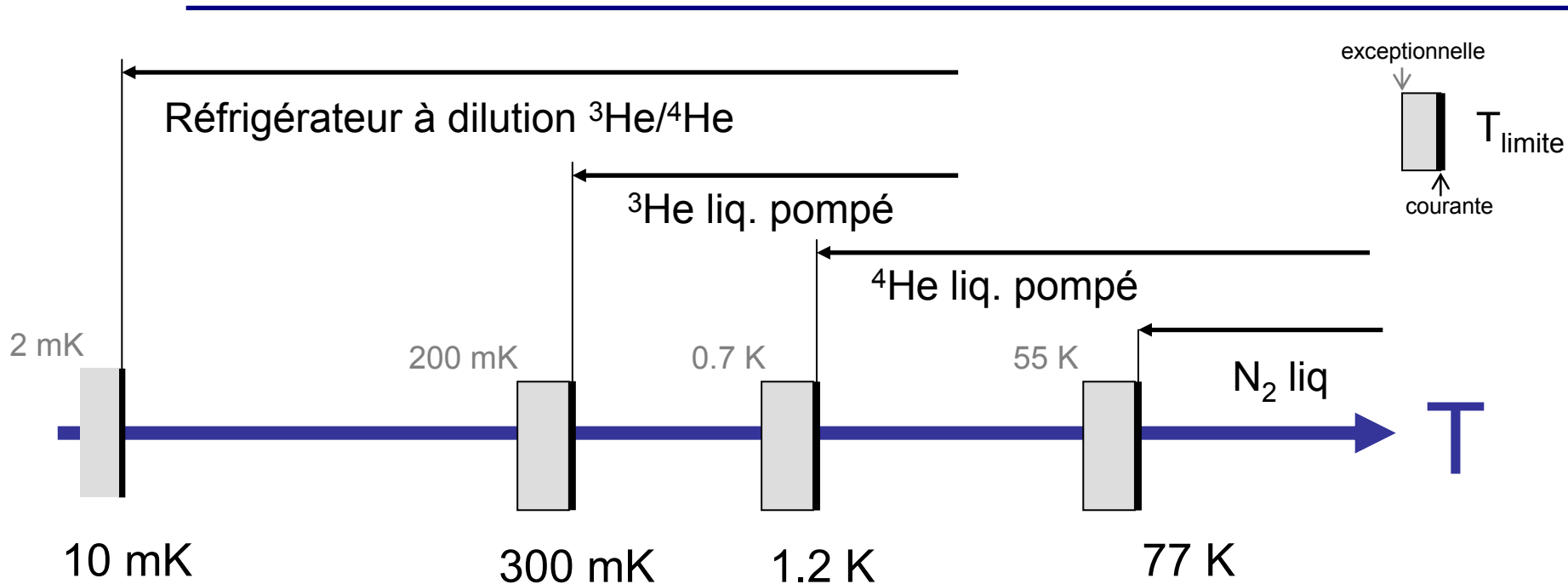
La course aux basses températures...



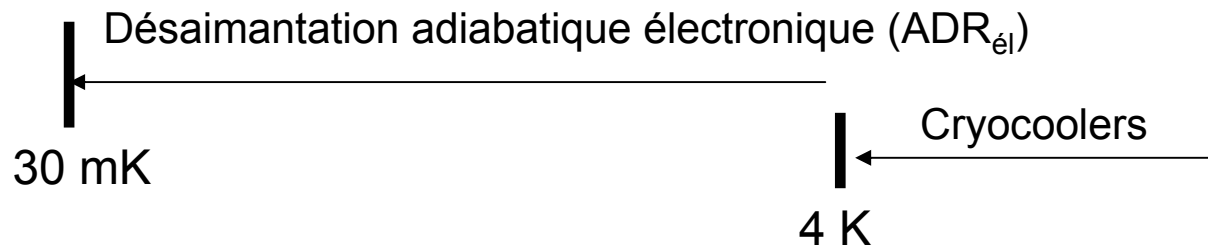
Températures minimum
obtenues en continu
dans différents secteurs de recherche

*Noël Coron & PM (1991)
Lettre d'Ultimatech (CNRS) n°3*

Techniques de réfrigération en continu

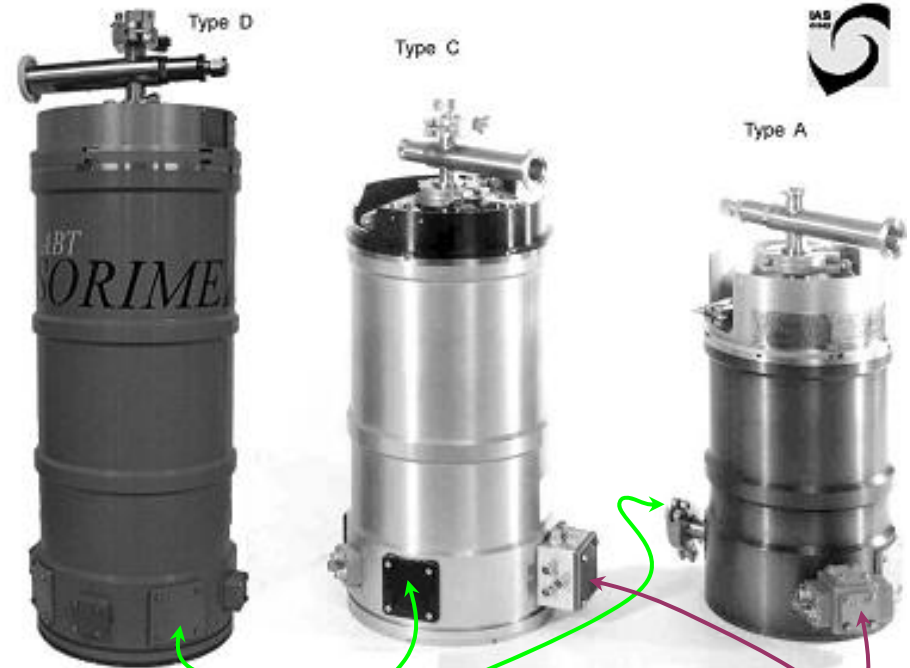
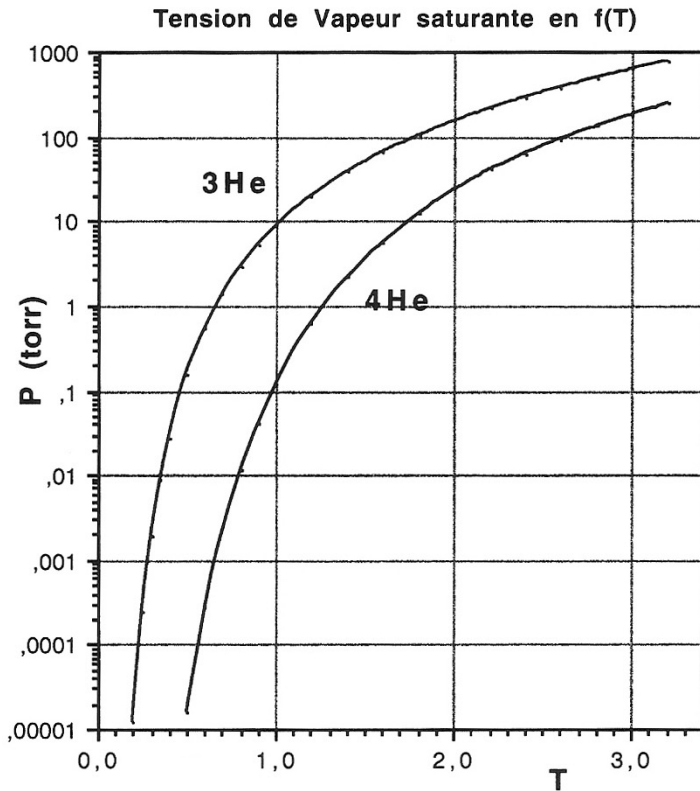


□ des solutions « tout électrique » commencent à exister (adaptées pour tous bolomètres ?)



Pompage Hélium-4 ($T \rightarrow 1.2\text{K}$)

Cryostat « CDL » conçus à l'IAS



Entrées: optiques

électriques

Autonomie : 48 heures à 4,2 K.

Dimensions de la chambre optique refroidie: $D = 140\text{ mm}$; $h = 52\text{ mm}$; Poids : 11 Kg

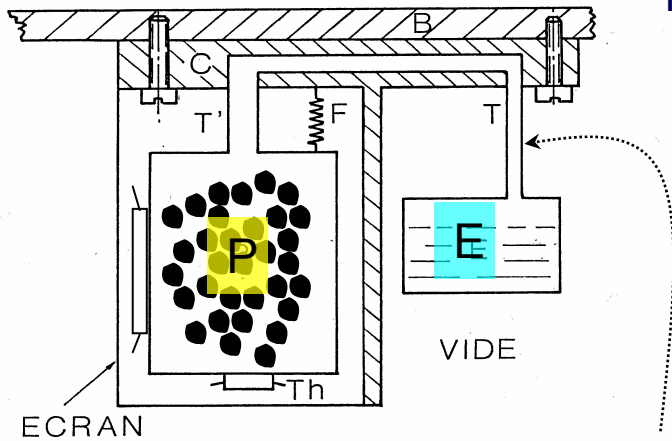
Précision d'alignement : la chambre optique se déplace de moins de 110 microns pour une inclinaison de 90°

Licence ABTSorime (www.abtsorime.fr)

Pompage Hélium-3 ($T \rightarrow 300\text{mK}$)

L'hélium-3 est très cher [résidu atomique de $n+{}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} (+{}^4\text{He}) \rightarrow {}^3\text{He}$] : on ne le perd pas !

${}^4\text{He}$ liquide [et $T < 3.3\text{K}$ au démarrage]



Capillaire inox fine paroi assez fragile !

Mini-réfrigérateur (conception **J.P. Torre & G. Chanin**) :

- ${}^3\text{He}$ sous 100 bar à 300K
- cryopompe (P) à charbon actif
- platine détecteur sur évaporateur (E)
- cycle

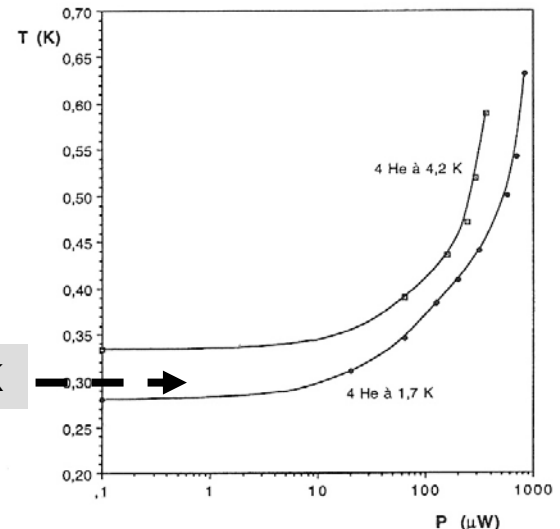
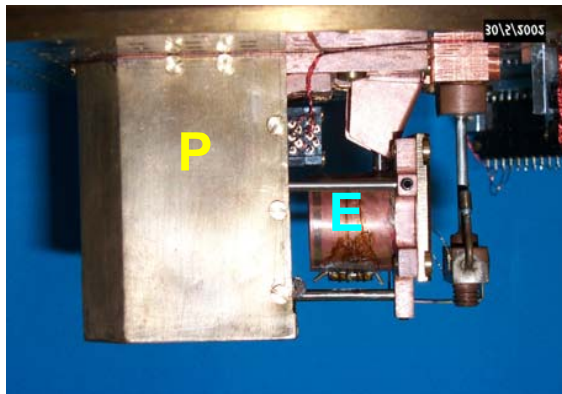
- 1) chauffage pompe $\rightarrow 25\text{K}$; liquéfaction par gravité dans E
- 2) évaporation

Ballons: OK
Satellites: NON

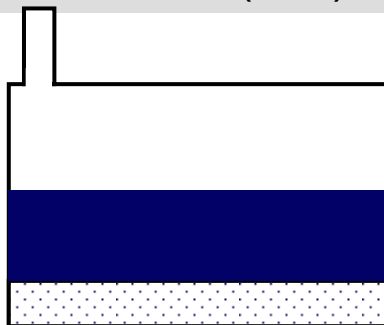
Avantages:

- Autonomie > 24h
- simplicité de mise en œuvre !
- pas de vibrations

$P_{\text{réfrigération}} \approx 10\mu\text{W}$ à 300 mK



- ✓ principe F. London 1951
- ✓ séparation de phase d'un mélange ^3He - ^4He à $T < 0.86$ K en 2 phases:
 - phase concentrée (riche en ^3He) moins dense (\rightarrow surnage)
 - phase diluée (pauvre en ^3He) avec une concentration minimale non nulle en ^3He : $X=6.4\%$
- ✓ un phénomène quantique:
 - ^3He ($J=1/2$) est un fermion
 - ^4He ($J=0$) est un boson



concentré
dilué

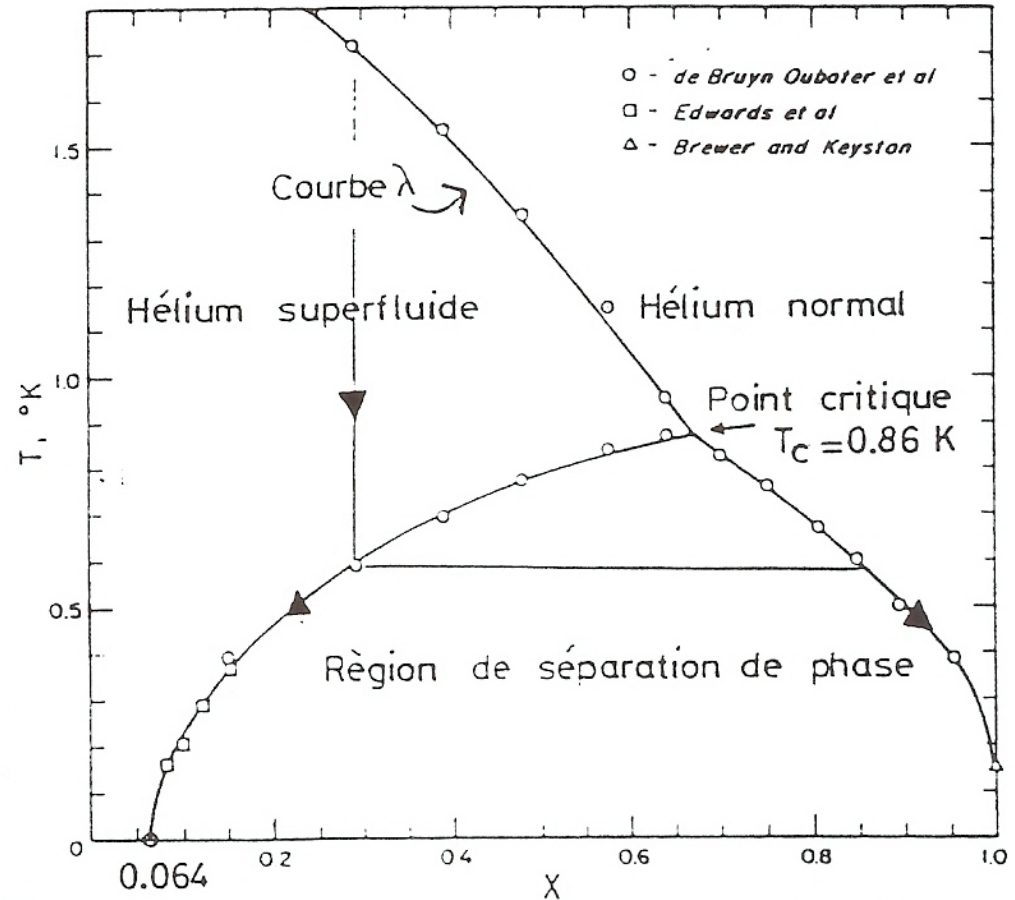


Diagramme de phase des mélanges ^3He - ^4He

$$X = \frac{n_3}{n_3 + n_4} : \text{concentration en } ^3\text{He}$$

Principe:

✓ on force des atomes ^3He à changer de phase: concentré → dilué

✓ le phénomène est endothermique → production de froid à l'interface
(cf. évaporation de l'alcool)

$$\dot{Q} \approx 84 \dot{n} T_{bm}^2 \quad (\text{W})$$

$$10 \mu\text{W} \rightarrow 100 \mu\text{W} \text{ @ } 100 \text{ mK}$$

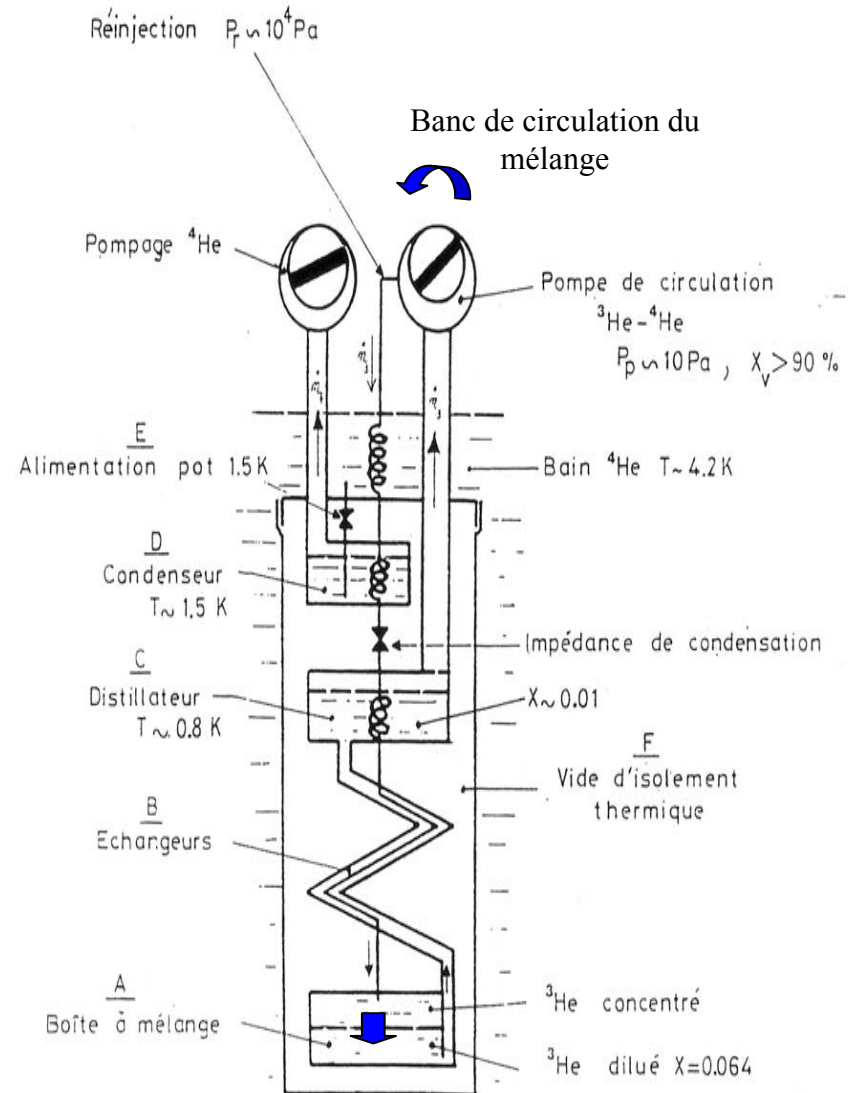
Température boîte à mélange (K)

Débit ^3He (moles/sec)

✓ réglage et conception délicats !

✓ mais **excellente expertise en France !**

CEA / SPEC à Saclay, CRTBT à Grenoble





Exemple:

Sans « pot 1.5K »

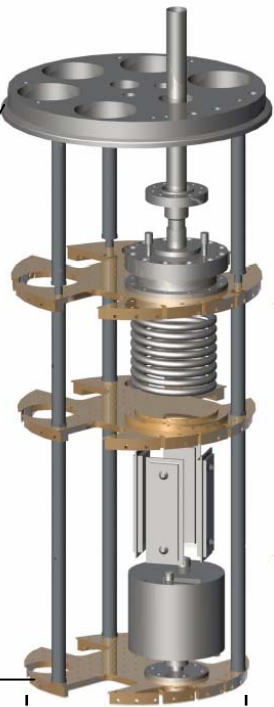
$\geq 200 \mu\text{W} @ 100\text{mK}$

- réfrigérateur DR-JT-S-200-10
- fabricant Cryoconcept
(partenariat CEA / SPEC)

$T_{\text{bm}} \leq 10\text{mK}$

Prix 2005?

$\approx 250 \text{ k€}$,
Dewar ^4He
non compris



bride 4K

distillateur
échangeur continu

échangeurs discrets

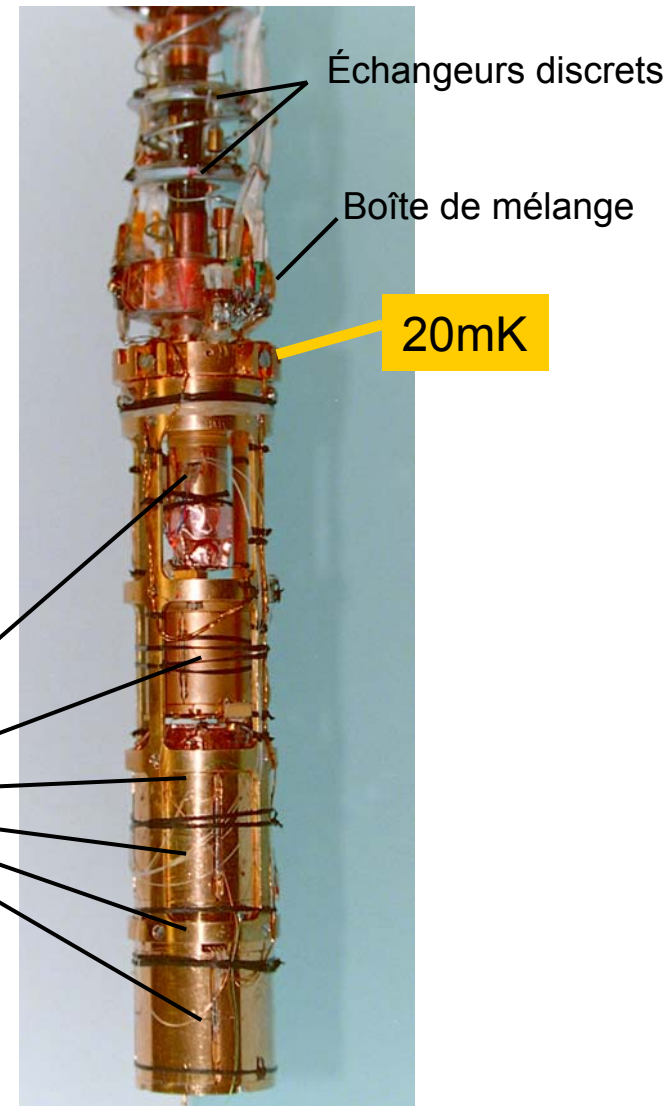
boîte à mélange

espace détecteurs $\approx 6.2 \text{ l}$

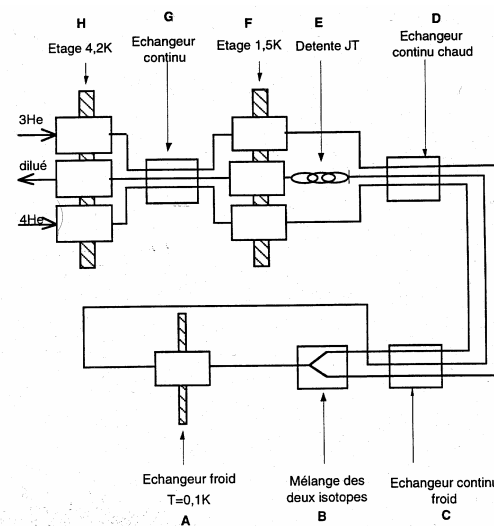
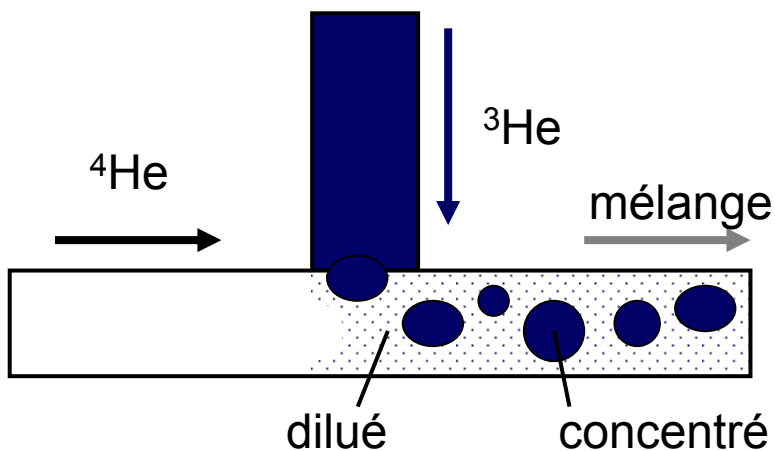


- ✓ conception P. Pari (CEA/SPEC)
- ✓ transportable (→ ROSEBUD; Espagne)
- ✓ sans pot 1.5K
- ✓ $P_{\text{injection}} = 0.6 \text{ bar}$; $P_{\text{aspiration}} = 0.6 \text{ torr}$
- ✓ $20 \mu\text{W} @ 100 \text{mK}$
- ✓ $T_{\text{limite}} = 20 \text{ mK}$ obtenue en $\frac{1}{2}$ journée depuis 1.2K

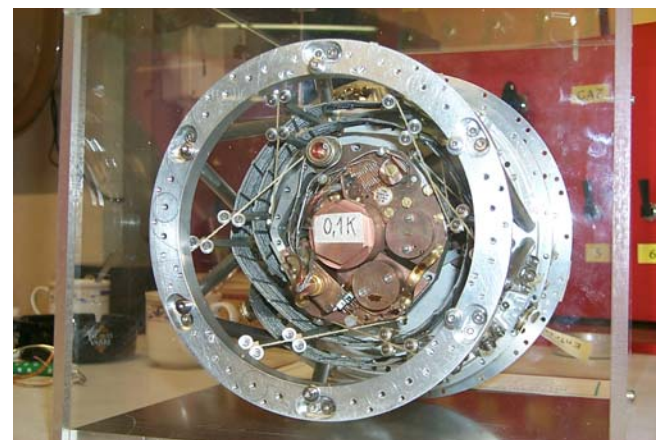
6 bolomètres

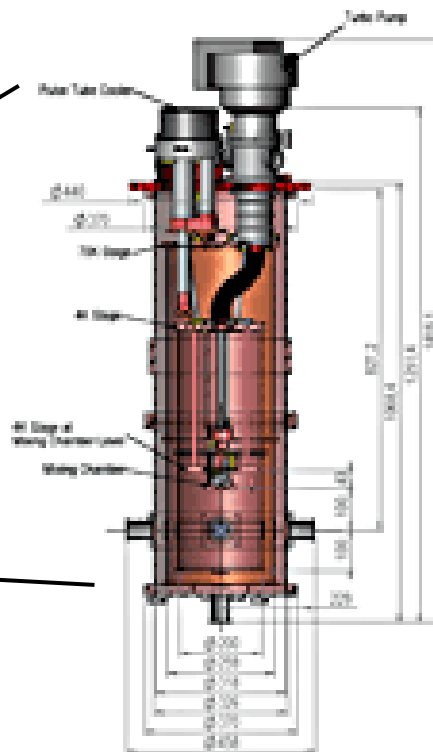


- ✓ dilution à cycle ouvert (gaz non récupéré)
- ✓ conception CRTBT (Grenoble)
- ✓ ^3He et ^4He sont injectés à partir de réserves HP dans un capillaire ($\varnothing 300\mu\text{m}$): des bulles de concentré maintenues par la tension superficielle se forment dans la phase diluée. Production de froid à l'interface: $T_{\text{limite}} = 100\text{mK}$
- ✓ validé sur ARCHEOPS (22 bolomètres submm; manip CMB sur ballon stratosphérique)
- ✓ solution retenue pour refroidir l'instrument HFI sur le satellite Planck (ESA)



Circuit
démonstrateur 0.1K à l'IAS





- ✓ Solution sans fluide cryogénique
- ✓ Réfrigération $200\mu\text{W}@100\text{mK}$
- ✓ **$T_{\text{base}} \leq 20\text{mK}$** (en 24h)
- ✓ chambre expérimentale
 - ✓ H: 20 cm x \varnothing 20 cm
- ✓ pré-refroidissement:
 - ✓ tube-pulsé (0.35W @ 4.2K)
 - ✓ Consommation 6kW
- ✓ « extremely low vibrations »
- ✓ un seul vide interne
 - ✓ joint conventionnel O-ring
 - ✓ fermeture en 10mn



www.vericold.com

ADR: solutions commerciales pour $50\text{mK} < T < 100\text{mK}$

VeriCold
Technologies

Microcalorimètre X POLARIS®



Bolomètre
X à 100mK
15 eV @ 5 keV

JANIS
Research Company



ADR: $T \approx 50\text{-}100\text{mK}$
Consommation: 6kW
35 kg; H:1.2m x \varnothing 24 cm;
Automatisé et stabilisé
"Se refroidit pendant la nuit, prêt le matin !"
Prix ADR seul ≈ 250 k€

$T \approx 50$ mK-100mK pendant 2 jours
ADR à 2 étages
Cryocooler: tube pulsé 4K
www.janis.com

□ Sélection des matériaux du bolomètre

- par leurs propriétés à très basse température



Chaleurs spécifiques $C(T)$ aux basses températures

□ Diélectriques (isolants) et semi-conducteurs intrinsèques

$$C(T) = C_{\text{réseau cristallin}} = aT^3$$

□ Métaux

$$C(T) = C_{\text{réseau cristallin}} + C_{\text{électrons}} = aT^3 + \gamma T$$

□ Supraconducteurs

$$T > T_c$$

$$T < T_c \quad C(T) = aT^3 + 8.5 \gamma T_c \exp\left(-1.44 \frac{T_c}{T}\right)$$

□ Colles, plastiques, verres, alliages...

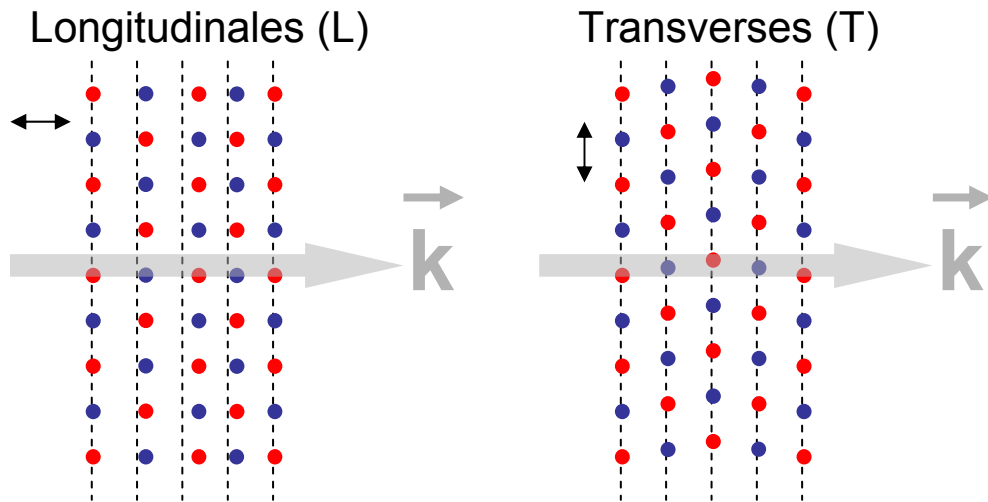
$$C(T) = c_1 T + c_3 T^3$$

- seules excitations thermiques accessibles à TBT:
ondes élastiques collectives du réseau cristallin,
décomposables selon ses modes propres de vibration.
Propagation à la vitesse du son ($V_{\text{son}} \approx 10\text{km/sec} = 1\text{cm}/\mu\text{s}$ dans saphir)
- l'énergie de chaque mode est quantifiée: $E=(n+1) \hbar\omega$
- phonon = onde élastique de quantum élémentaire énergétique $\hbar\omega$
- énergie des phonons dominants: $2.82 k_B T$, soit \approx

5 μeV (20mK)
 \updownarrow
 25 μeV (100mK)



Ondes acoustiques



- ✓ Courbes de dispersion $\omega(k)$
- ✓ à $T \leq 100\text{mK}$, la fréquence des phonons dominants est $\nu \leq 5.9\text{ GHz}$

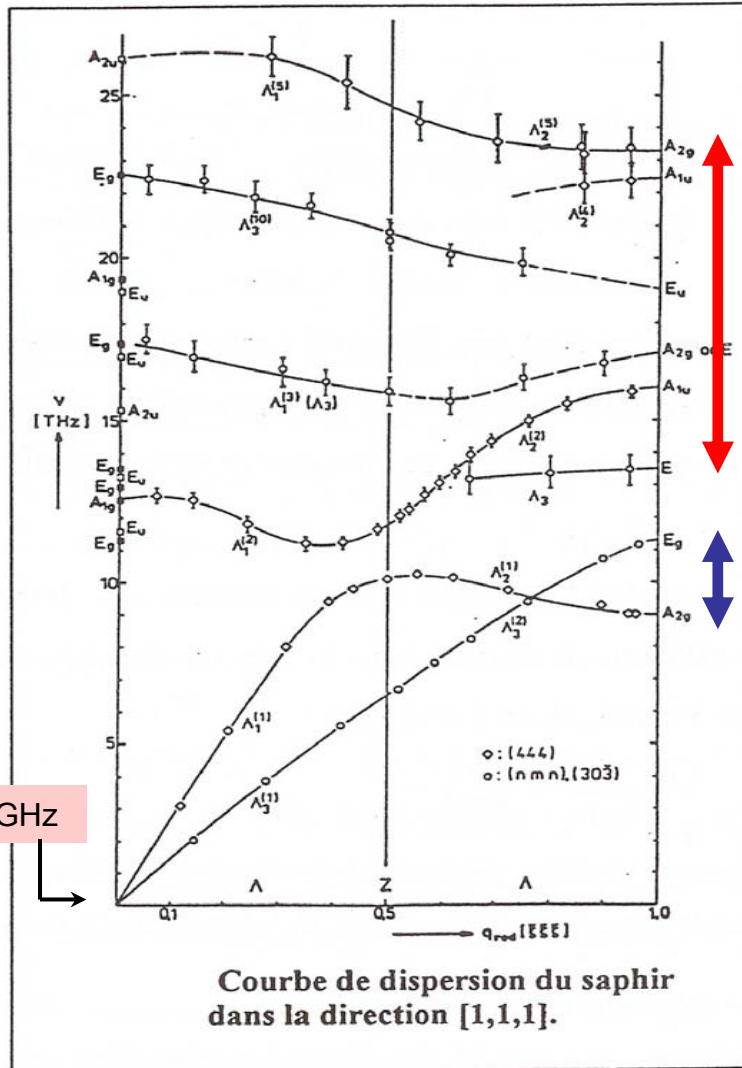


Seules les branches acoustiques sont excitées, dans leur partie linéaire ($\omega \propto k$; hypothèse de Debye)

Nombre d'atomes dans le cristal ($\propto m$)

$$C(T) = \frac{12\pi^4}{5} Np k_B \left(\frac{T}{\Theta_{Debye}} \right)^3$$

Caractéristique du matériau



$\nu = \omega/2\pi$ (en THz)

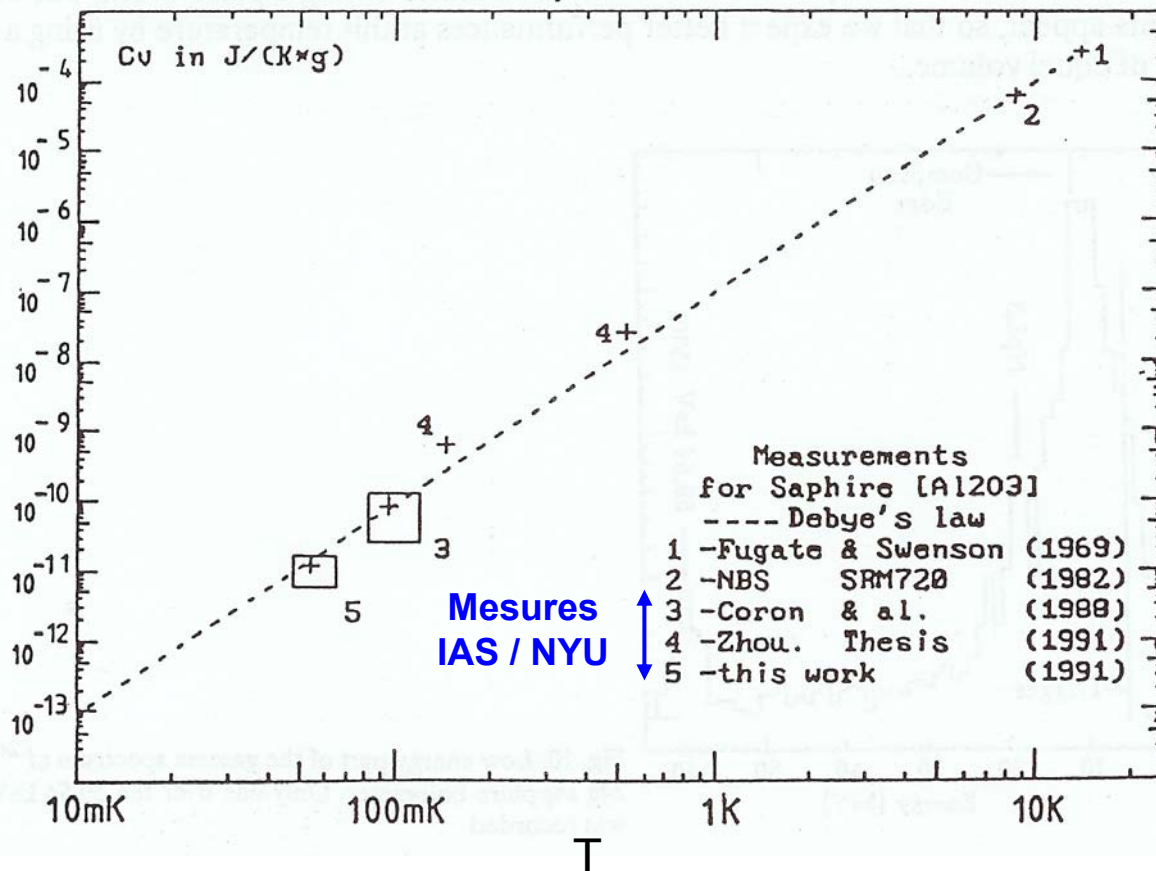
5.9 GHz

Branches optiques

Branches acoustiques



C(T) des isolants 3. le calcul de Debye marche !



| Matériau | Θ_{Debye} |
|--|-------------------------|
| C _{diamant} | 2230 K |
| Saphir (Al ₂ O ₃) | 1035 K |
| Si | 645 K |
| Ge | 374 K |
| Cu | 343 K |

saphir →

$$C_{\text{saphir}} \approx 8.6 \cdot 10^{-8} \times T^3 \text{ J. K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$$

P. Debye
1884-1966



C(T) des métaux: terme électronique

✓ $C(T) = C_{\text{électrons}} + C_{\text{réseau}} = \gamma T + aT^3$

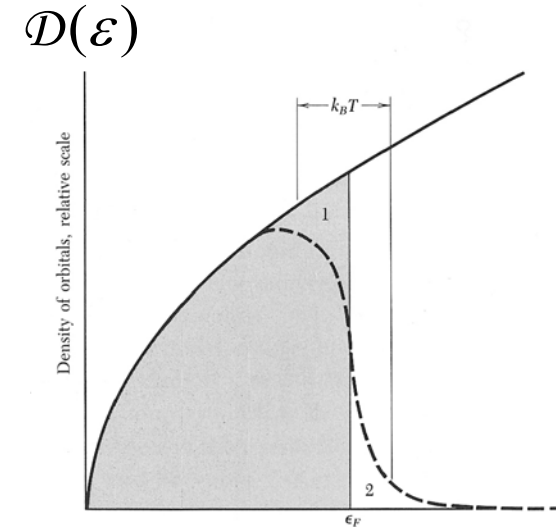
✓ tous les électrons ne participent pas: seuls les électrons du niveau de Fermi peuvent gagner de l'énergie par agitation thermique

Nombre d'électrons ($\propto m$!)

d'après Kittel

$$C_{\text{électrons}} = \frac{\pi^2}{3} \mathcal{D}(\varepsilon_F) k_B^2 T \quad \text{avec} \quad \mathcal{D}(\varepsilon_F) = \frac{3N}{2\varepsilon_F}$$

densité d'états
au niveau de Fermi



Applications Numériques:

1. Densité d'états pour 1 mole Cu=63.5g ?

$\varepsilon_F = 7 \text{ eV} ; \gamma = 0.695 \text{ mJ.K}^{-2}$

$\rightarrow \mathcal{D}(\varepsilon_F) = 1.8 \cdot 10^{23} \text{ états / eV, soit } \approx 6 \cdot 10^{-24} \text{ eV par état..}$

2. Température pour observer $\gamma T > aT^3$?

$\Theta_{\text{Debye}} = 343 \text{ K} \rightarrow T < 3.8 \text{ K}$

**continuum d'états
accessibles**

**le terme électronique
domine à TBT**

Le succès des bolomètres, une histoire de quanta

| Détecteur | Produits de l'interaction | Dépense énergétique par quantum d'information (QE). |
|-------------------------------------|---|--|
| Scintillateur | Photons visibles | 100 eV → 1 keV |
| Compteur proportionnel | Ions | 10 eV → 30 eV |
| Semi-conducteur | Paires électrons-trous | 3 eV - 4 eV |
| STJ : Jonction tunnel supra | Quasi-particules (« paires de Cooper » brisées) | 10^{-3} eV |
| Bolomètre à cible isolante | Phonons | 10^{-5} eV à 10^{-4} eV |
| Bolomètre à cible métallique | Excitation d'électrons de conduction | $\ll 10^{-5}$ eV |

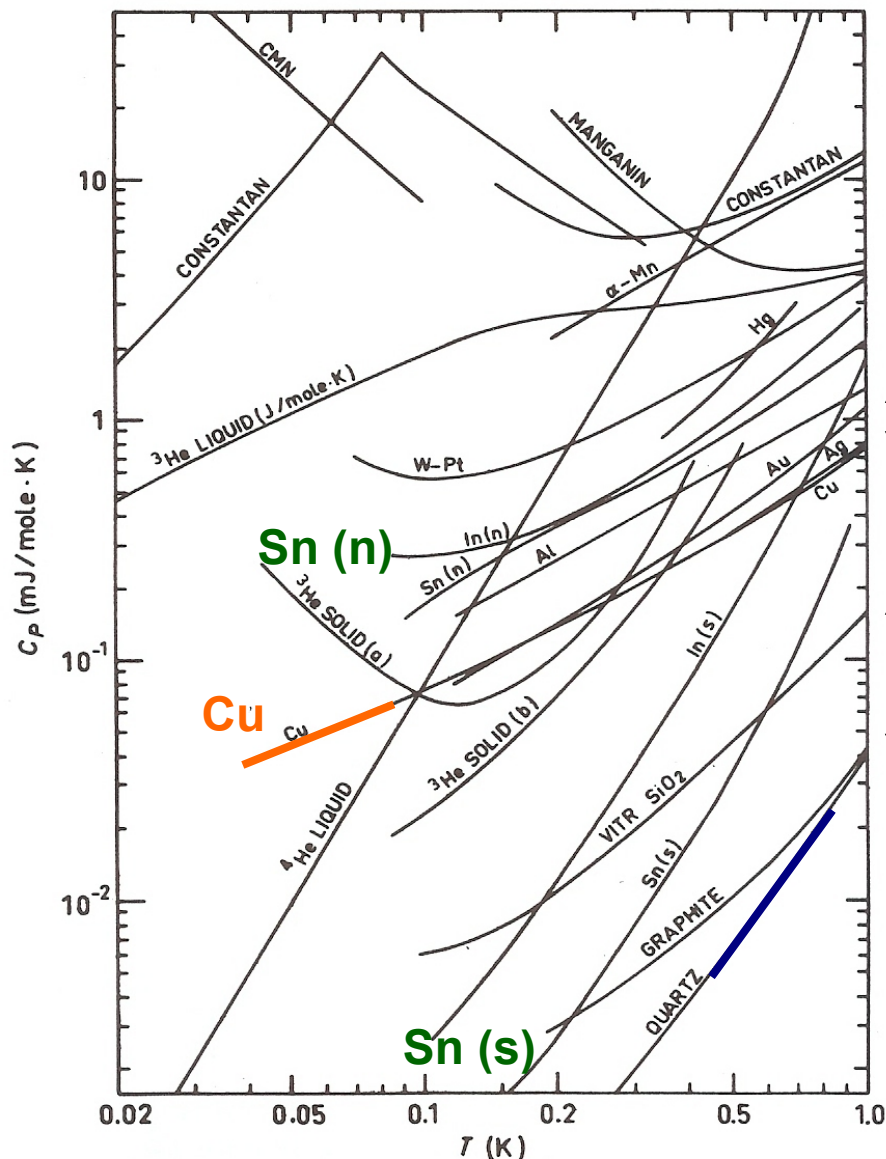
 Détecteurs refroidis

Rappel: contribution statistique au pouvoir ultime de résolution :

$$E/\Delta E \approx \sqrt{n} \quad \text{avec} \quad n = E/QE$$

Elvire Leblanc (2003)

Chaleur spécifique des matériaux de 20mK à 1K



Alliages

métaux: Cu, Ag, Au, Sn & In (normal)

Note: $C_{\text{supra}} \ll C_{\text{normal}}$!

Différence état vitreux (silice)/cristallin (quartz)

métaux

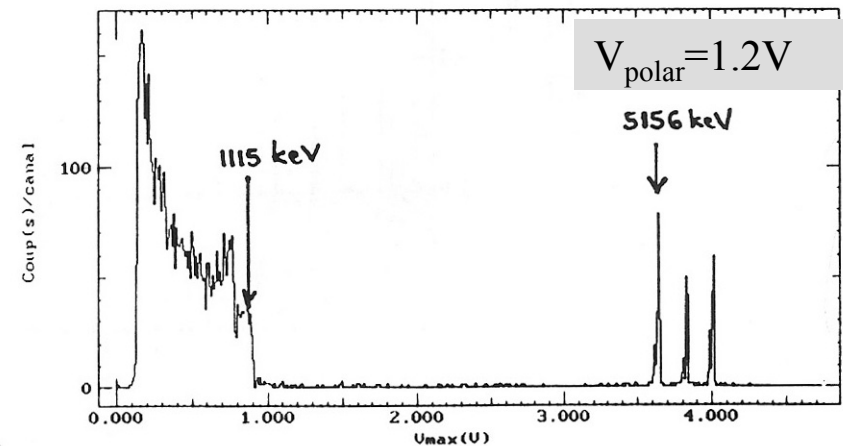
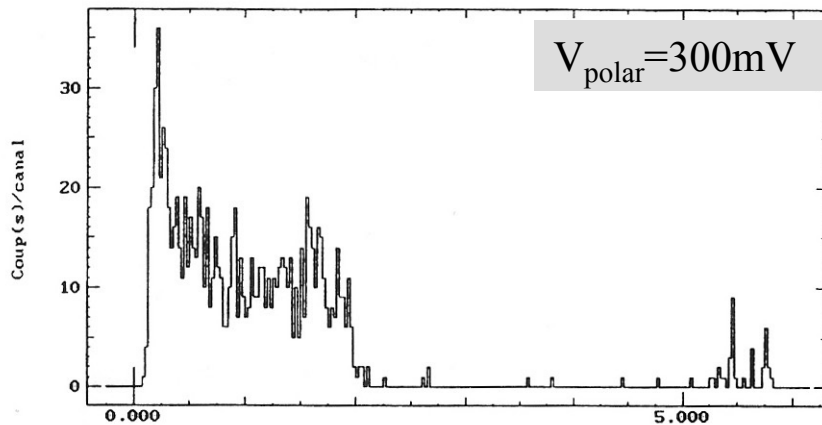
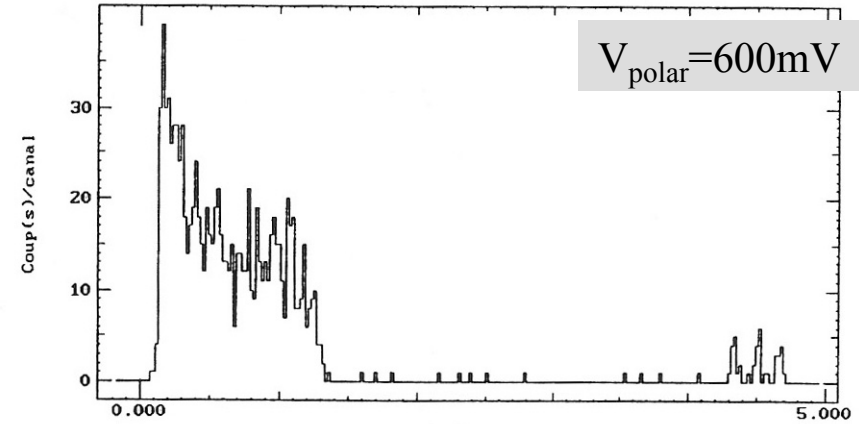
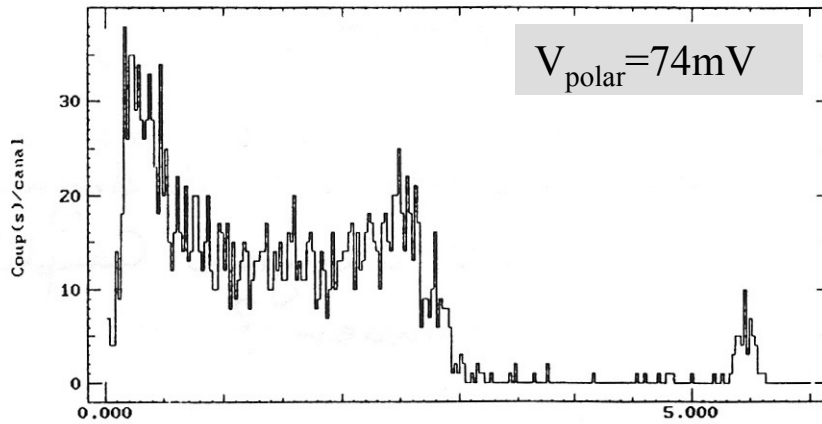
isolants

Lähtenmäki (1973)

Une comparaison instructive: cibles saphir & cuivre

| | Capacité calorifique $J \cdot K^{-1}$ | Résolution ultime thermodynamique | Énergie interne U $\int_0^T C dT$ | Linéarité $\frac{\Delta T}{T}$ | & signal ! |
|---|--|---------------------------------------|--|--|------------|
| 1.2 kg saphir (monocristal Al_2O_3); $A \approx 10^{-4} J \cdot K^{-4}$ | | | | | |
| T | $C(T) = AT^3$ | $\Delta U_{rms}^{th} = \sqrt{kT^2 C}$ | $U = AT^4/4$ | $\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta E}{4U}$ pour $\Delta E = 10 \text{ keV}$ | |
| 10 mK | 10^{-10} | 2.4 eV | 1.5 MeV | 0.3 % | |
| 100 mK | 10^{-7} | 740 eV | 15 GeV | $3 \cdot 10^{-7}$ | |
| 300 mK | $3 \cdot 10^{-6}$ | 12 keV | 1.2 TeV | $2.1 \cdot 10^{-9}$ | |
| 1 K | 10^{-4} | 240 keV | 15 TeV | $3 \cdot 10^{-11}$ | |
| 1mg Cu (pastille $\varnothing = 2.2 \text{ mm}$; $e = 30 \mu\text{m}$); $\gamma \approx 10^{-8} J \cdot K^{-2}$ | | | | | |
| T | $C(T) = \gamma T$ | $\Delta U_{rms}^{th} = \sqrt{kT^2 C}$ | $U = \gamma \frac{T^2}{2}$ | $\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta E}{2U}$ pour $\Delta E = 5 \text{ MeV}$ | |
| 10 mK | 10^{-10} | 2.3 eV | 3.13 MeV | 80 % | |
| 100 mK | 10^{-9} | 73.4 eV | 313 MeV | 0.8 % | |
| 300 mK | $3 \cdot 10^{-9}$ | 382 eV | 2.8 GeV | $9 \cdot 10^{-4}$ | |
| 1 K | 10^{-8} | 2.32 keV | 31.3 GeV | $8 \cdot 10^{-5}$ | |

Linéarité (par l'exemple)



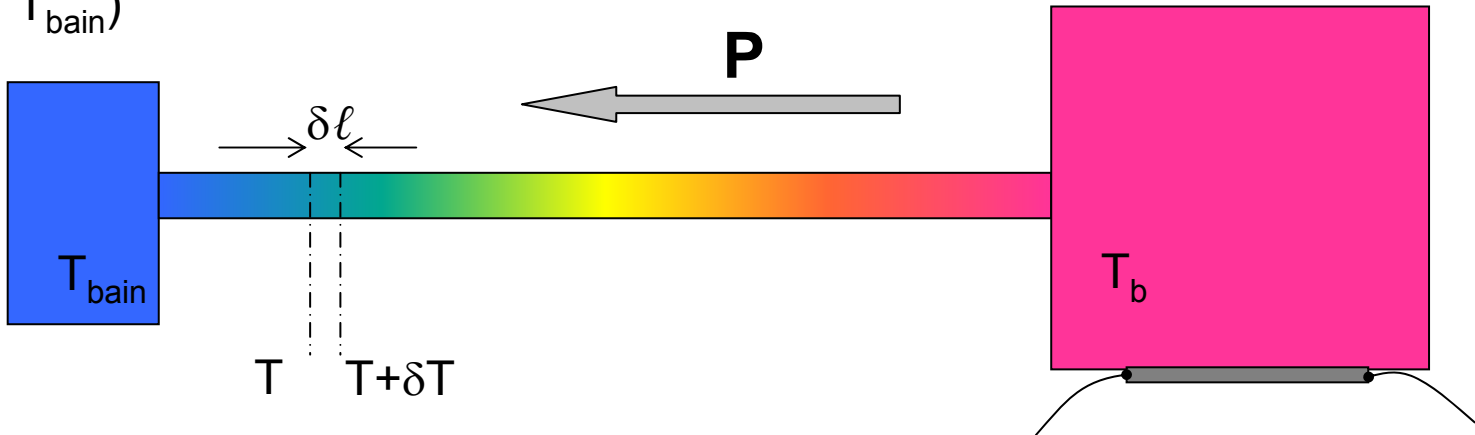
Bolomètre 2g LiF/Ge-NTD à 30mK sous irradiation ^{60}Co et source triple α (mesures IAS)

en augmentant la tension de polarisation (donc le courant, donc sa température) le bolomètre récupère en linéarité. Dans les configurations « non-linéaires », on observe une forte distortion des constantes de temps (l'aire est alors le bon estimateur de l'énergie: c'est une propriété de l'équation du bilan énergétique)

Conductance thermique G: plus précisément...

La relation $P = G \times (T_b - T_{\text{bain}})$

définit G (en W. K⁻¹) comme une fonction de T_b et T_{bain} : en toute rigueur
G (T_b, T_{bain})

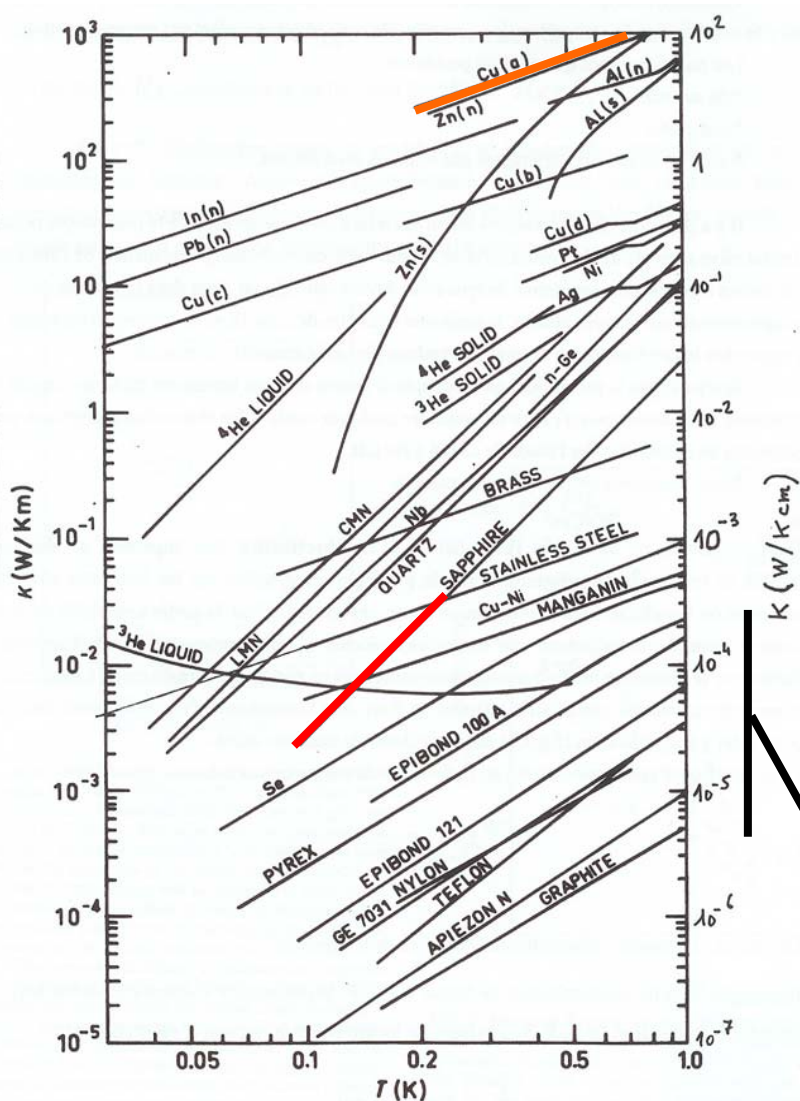


$$\delta T = \frac{P}{A\kappa(T)} \delta l$$

- segment δl de fuite (section A constante, longueur totale L)
- $\kappa(T)$ conductivité thermique (en W. K⁻¹. m⁻¹)
- cas (très fréquent): $k(T) = k_0 T^\beta$

$$P = G \times (T_b - T_{\text{bain}}) = g_0 (T_b^{\beta+1} - T_{\text{bain}}^{\beta+1}) \quad \text{avec} \quad g_0 = \frac{A\kappa_0}{L} \times \frac{1}{\beta+1}$$

Conductivité thermique des matériaux de 30mK à 1K



Lien avec chaleur spécifique (volumique) :

$$\kappa(T) = \frac{1}{3} C_v v_{\text{porteurs}} \ell \cdot p.m.$$

A très basse T,

- Isolants:
 - $\ell \cdot p.m. \approx$ taille échantillon
 - $V_{\text{porteurs}} = V_{\text{son}}$
- Métaux
 - $\ell \cdot p.m. \approx$ cste (impuretés)
 - $\kappa \propto \sigma$ (loi de Wiedemann-Franz)
 - $V_{\text{porteurs}} = V_{\text{Fermi}} \gg V_{\text{son}}$

→ $\kappa \propto C$

Plastiques, colles
alliages, verres

Lähteenmäki (1973)



Autres grandeurs thermodynamiques importantes...

- Diffusivité thermique \mathcal{D} (en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)

- Intervient dans l'équation de diffusion de la chaleur
- Faible dépendance en T
- Temps de thermalisation d'un échantillon homogène de taille L

$$\mathcal{D} = \frac{\mathcal{K}}{C_v}$$

$$\tau \approx \frac{L^2}{\mathcal{D}}$$

- Résistance de Kapitza R_K (en K.W^{-1})

- Gradient de T aux interfaces (surface Σ)
 - liquide-solide
 - solide-solide
- Description complexe
 - Théorie (dés)adaptation acoustique,...

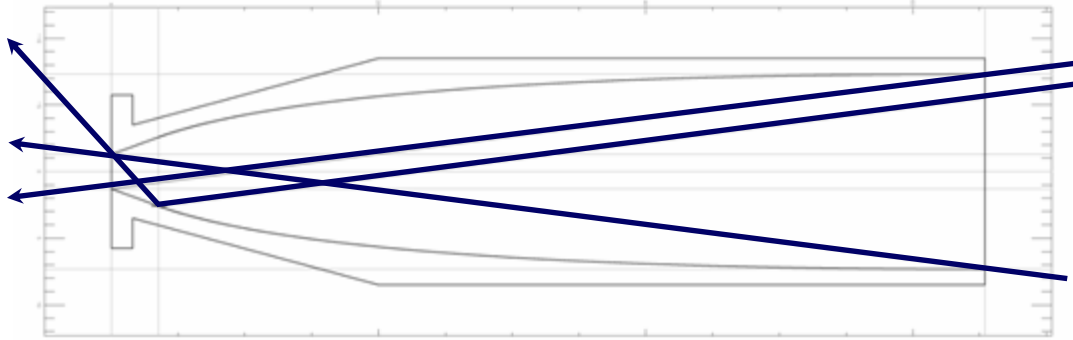
$$R_K = \frac{\Delta T}{P} \propto \frac{1}{\Sigma T^3}$$

- Coefficients de dilatations thermiques $\Delta L/L$

- Quelques % ; peut dépendre de l'orientation cristalline
- Contraintes différentielles → casse !
 - Éviter absolument les chocs thermiques → **$\pm 1 \text{ K / mn}$ préconisé**

- ❑ Historique
- ❑ Principes fondamentaux de la détection
 - pourquoi refroidir ?
- ❑ Techniques cryogéniques courantes en bolométrie
- ❑ Sélection des matériaux du bolomètre
 - par leurs propriétés à très basse température
- ❑ Suivi thermométrique du bolomètre
 - Techniques, principes de lecture
- ❑ Bolomètre polarisé
 - Bruits
 - Caractéristiques
- ❑ Environnement du bolomètre en laboratoire

Collecteur IAS ($S\Omega=9\text{mm}^2.\text{sr}$; acceptance $\Theta=15^\circ$)

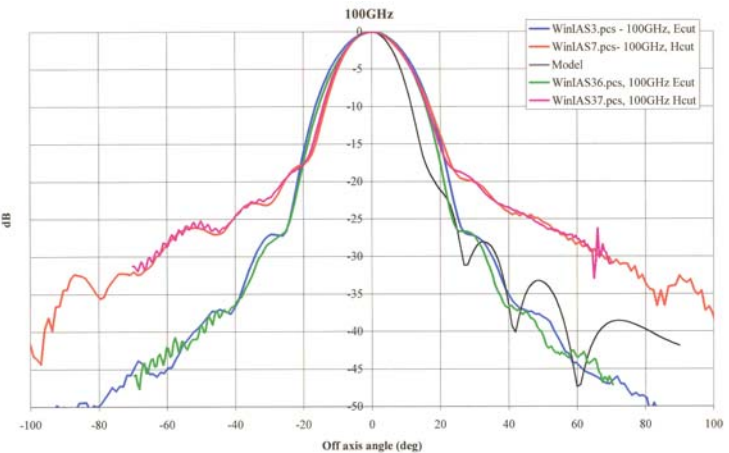


Réalisations bolomètres IAS/collecteurs IR-Lab
(calibration Planck-HFI)



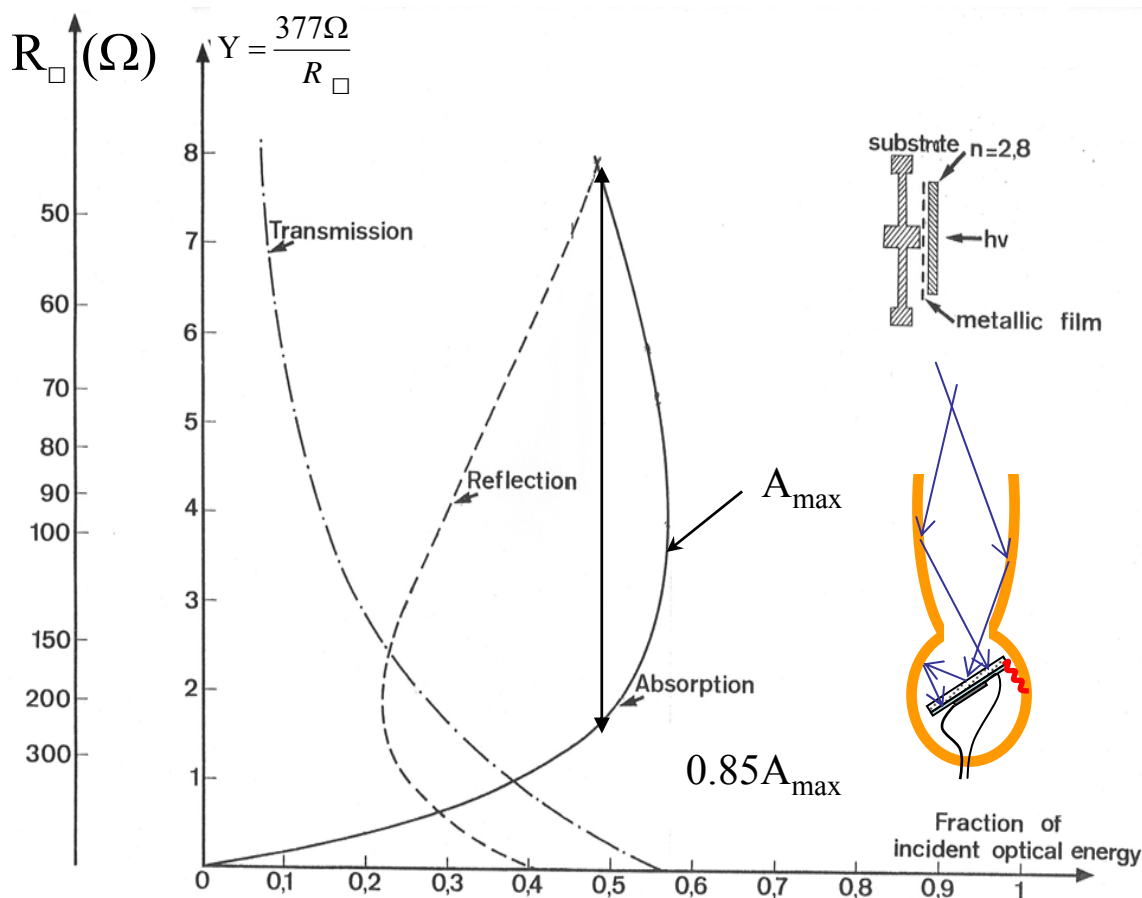
- optique « non-imageante »
- concentrateurs paraboliques (Winston), cône-paraboliques, « flared »...
- maximise l'étendue de faisceau $S\Omega$ / taille du bolomètre (tenir $C\downarrow$)

Mesures à Cardiff à 100GHz ($\lambda=3\text{mm}$)



Profil de deux cones IAS/IR_lab (B. Mafféi)
(avec simulation)

- couche résistive en Bismuth (semi-métal → C réduite pour une même résistivité)
- adaptation de l'épaisseur de la couche résistive à l'impédance du vide (377Ω), en fonction de l'indice n du substrat
- Pb: trouver le meilleur compromis entre absorption et chaleur spécifique...



Exemple de compromis:

en tolérant une absorption A de 85% par rapport à A_{max} (≈ 0.58), on peut déposer deux fois moins de métal:

→ $C_{\text{couche bismuth}} / 2$

→ inclinaison en compensation grâce à la sphère intégratrice

Absorption:

50% → 75% → 88% → 94% → ...
après réflexions successives

Figures relatives au cas d'un dépôt sur saphir
(communication: N. Coron)

□ Suivi thermométrique du bolomètre

- Techniques, principes de lecture

Thermométrie

- Résistive (thermistors)
 - Haute impédance ($100\text{k}\Omega \rightarrow 10\text{M}\Omega$)
 - Ge-NTD (Neutron Transmuted Dopped)
 - Si implanté
 - $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$
 - Basse impédance ($10\text{m}\Omega \rightarrow 100\text{m}\Omega$)
 - TES (Transition Edge Sensor)
- Magnétique
 - Ions magnétiques dans matrice métallique (système Au:Er)

La technologie associée au thermomètre est souvent le point le plus difficile à maîtriser au cours de la conception d'une chaîne de détection bolométrique.

Par rapport à la description du bolomètre idéal (et non lu !), limité au bruit thermodynamique chaque thermomètre va:

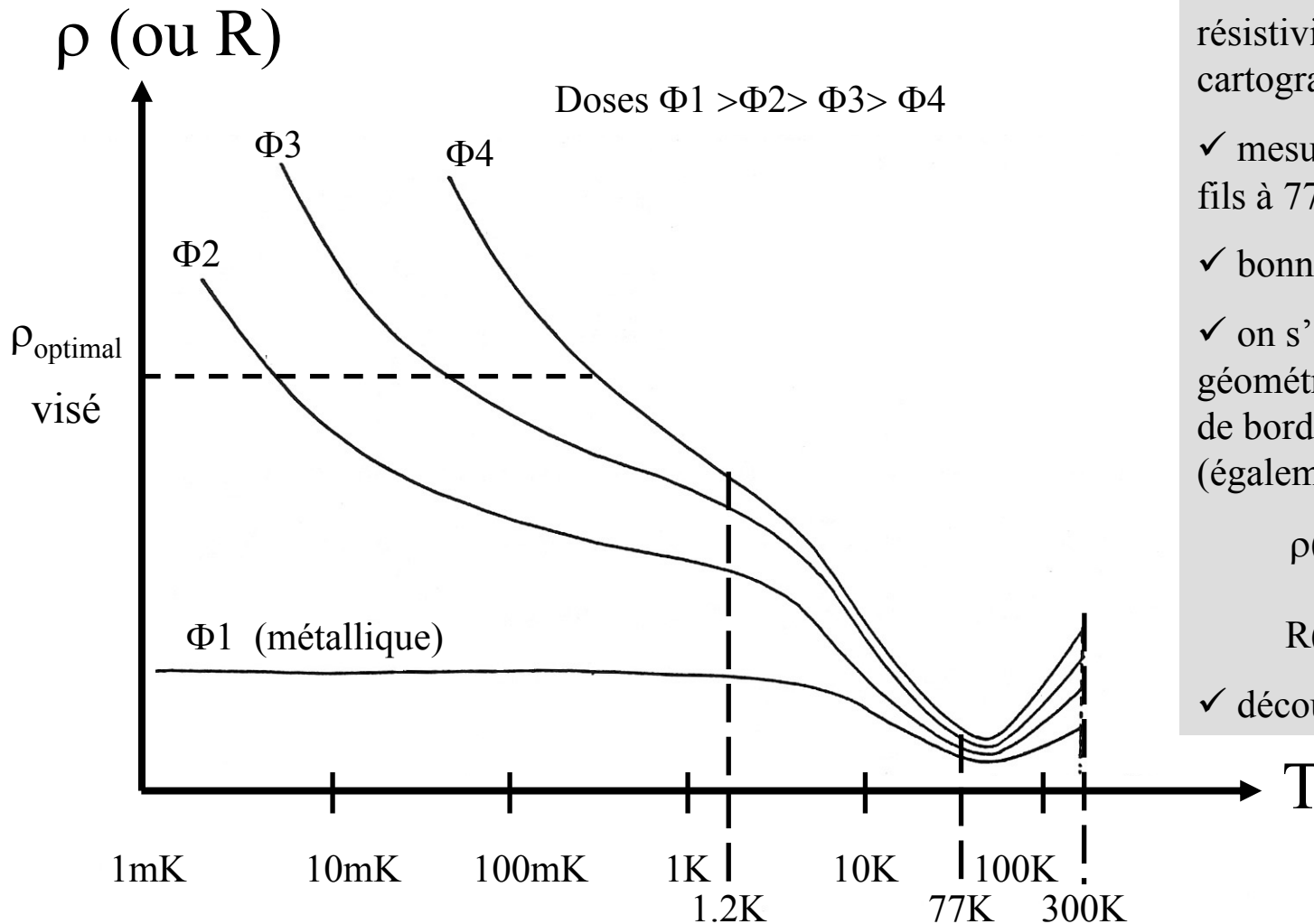
- ajouter sa propre capacité calorifique
- ajouter son propre bruit et celui de son électronique de lecture
- changer la constante de temps du détecteur (en plus rapide)

$$\Delta E_{rms} > \sqrt{k_B T^2 C_{cible\ seule}}$$

en général...

- ✓ irradiation dans réacteur ($n_{\text{thermiques}}$) de navettes de Germanium (longueur $\approx 7\text{cm}$)
- ✓ **excellente reproductibilité** après étalonnages; résistivité $\rho \propto$ dose reçue
- ✓ doses $\approx 1-5 \cdot 10^{18} \text{ n/cm}^2 \rightarrow$ dopage final légèrement inférieur au dopage critique
 - « transition » Métal-Isolant $\rightarrow \rho_{\text{critique}}(300\text{K}) \approx 45\text{m}\Omega.\text{cm}$
- ✓ **dopage homogène** (\gg dopage chimique)
- ✓ en pratique on observe un gradient de résistivité ($\approx 15\%$) reflétant le gradient de flux du réacteur
- ✓ compensation Ge-NTD: $K = N_D / N_A \approx 30\%-40\%$
- ✓ **technologie développée aux US** (« Haller & Beeman », principal fournisseur) **et en France** (IAS)

| Abondance naturelle de l'isotope Ge | Réaction | $\tau_{1/2}$ | Type impureté dopante |
|-------------------------------------|---|--------------|-----------------------|
| 20.5 % | $^{70}\text{Ge}(n,\gamma)^{71}\text{Ge} \rightarrow ^{71}\text{Ga} + \text{EC}$ | 11 j | P |
| 36.5 % | $^{74}\text{Ge}(n,\gamma)^{75}\text{Ge} \rightarrow ^{75}\text{As} + e^-$ | 82 mn | N |
| 7.8 % | $^{76}\text{Ge}(n,\gamma)^{77}\text{Ge} \rightarrow ^{77}\text{As} + e^-$ | 11h | N |
| | \downarrow $^{77}\text{Se} + e^-$ | 39h | |



- ✓ mesure 4-pointes de résistivité à 300K; cartographies
- ✓ mesure des résistances de fils à 77K (minimum de ρ)
- ✓ bonne sélection à 1.2K
- ✓ on s'affranchit des effets géométriques (d'épaisseur et de bords) par la mesure (également sélective) de

$$\frac{\rho(1.2K)}{\rho(300K)} = \frac{R(1.2K)}{R(300K)}$$
- ✓ découpe à la scie à fil

Régime de conduction des
Ge-NTD à TBT:
« Variable Range Hopping »

[sauts de longueur variable,
entre impuretés, assistés par
phonons]

$$R(T) = R_0 \exp\left(\sqrt{\frac{T_0}{T}}\right)$$

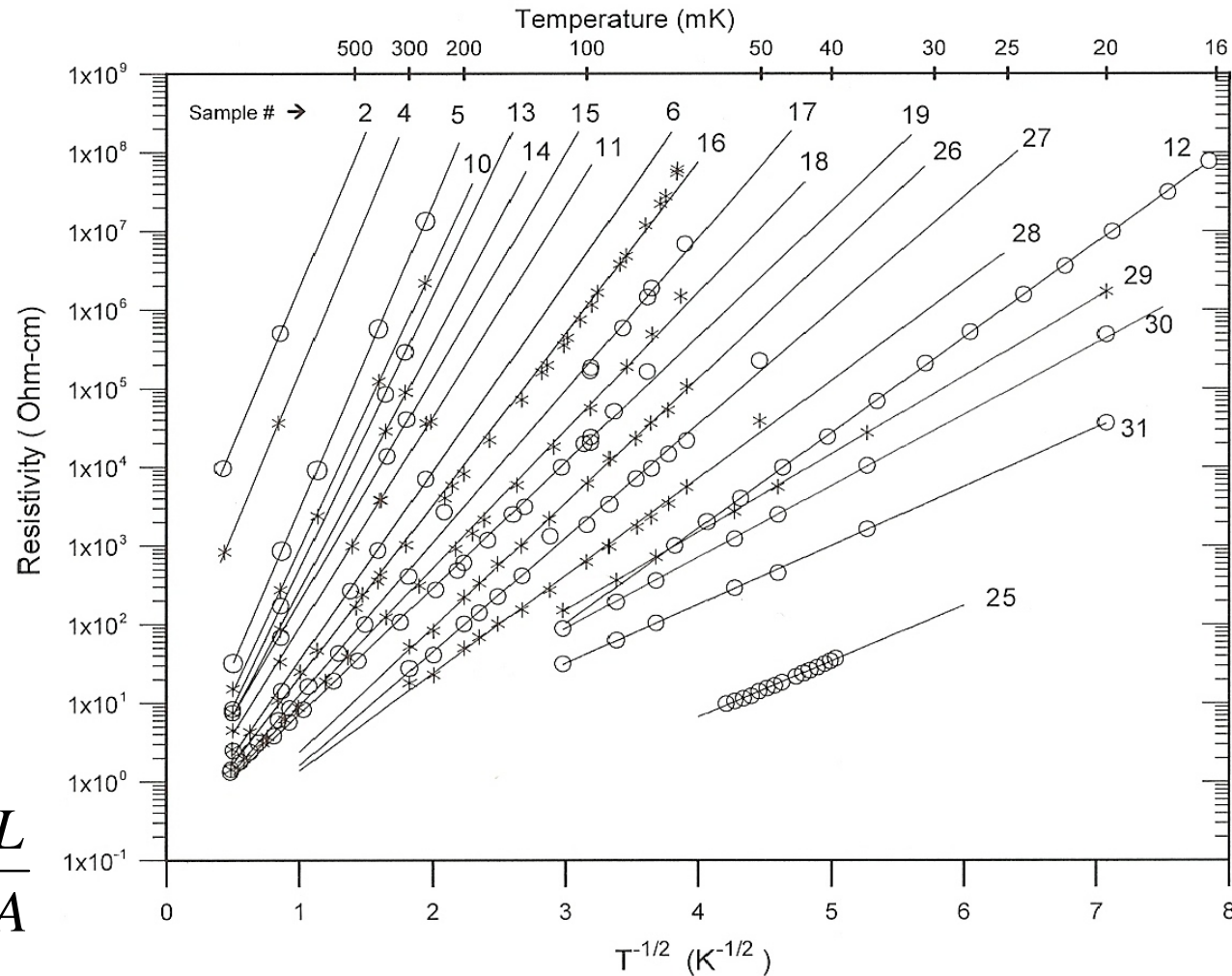
R_0 (en fait ρ_0)* et T_0
sont fonctions de la dose reçue.

* thermistor

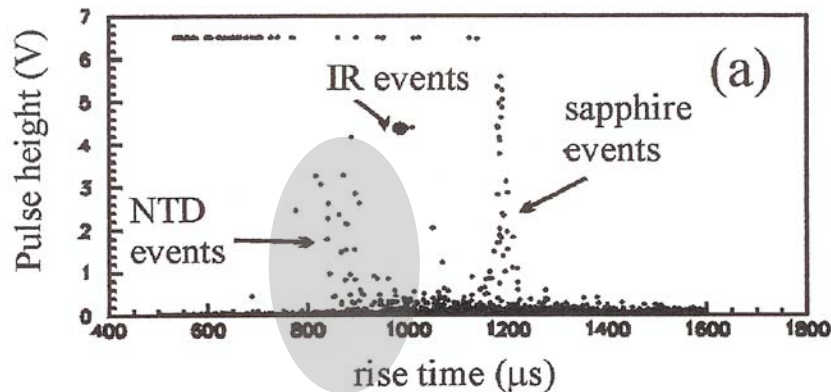
-longueur L
-section A

$$\longrightarrow R = \rho \times \frac{L}{A}$$

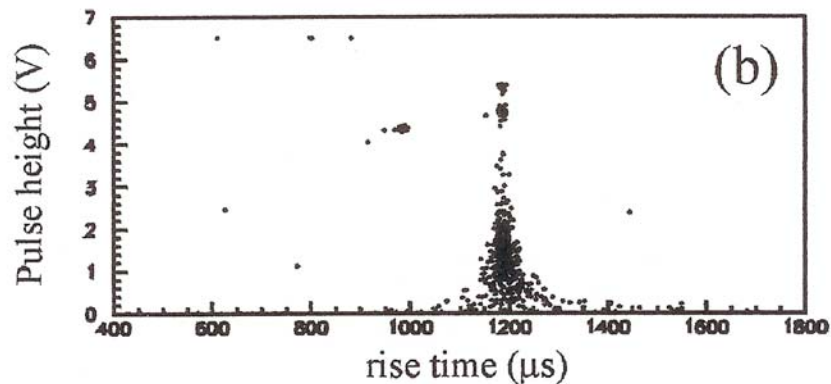
Échantillons Ge-NTD « Haller & Beeman »; in Ch. Enss (2004)



- ✓ risque d'**activation** d'éventuelles impuretés lors de l'irradiation !
- ✓ séparation possible par constantes de temps (les événements « senseur » sont toujours plus rapides)
 - problème potentiel de confusion avec des « bons événements » à basse énergie, alors que cette région intéresse particulièrement les expériences de détection de la matière noire !
- ✓ solution: utiliser le matériau le plus pur (et le plus cher): HPGe ?



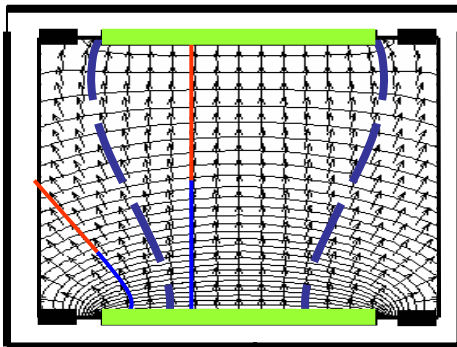
Run de fond dans un bolomètre de 50g en saphir (ROSEBUD; tunnel du Canfranc)



Run de calibration (^{57}Co) dans la foulée du run précédent

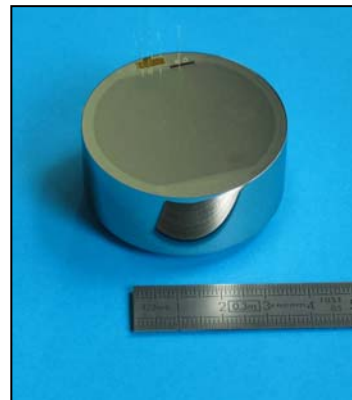
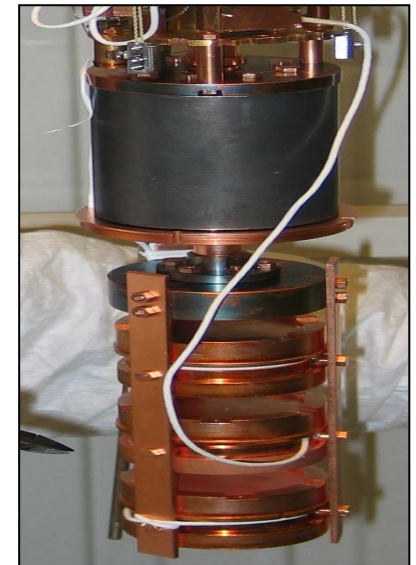
- fabrication de films minces (650Å) par masques et co-évaporation d'un composé métal & semi-conducteur (Nb & Si; $X \approx 8\%$) sous ultravide
- développement CSNSM (équipe de Louis Dumoulin)
 - localisation des événements de surface pour l'expérience Edelweiss (EDW-II)
 - senseurs **pixellisables** pour matrices de bolomètres
- description (comme Ge-NTD) dans le cadre de la TMI « transition » métal-isolant d'Anderson
- vu « du monde extérieur », comportement analogue aux Ge-NTD
 - même chaîne de lecture
- moins « polarisables » que les Ge-NTD

Thermomètre A



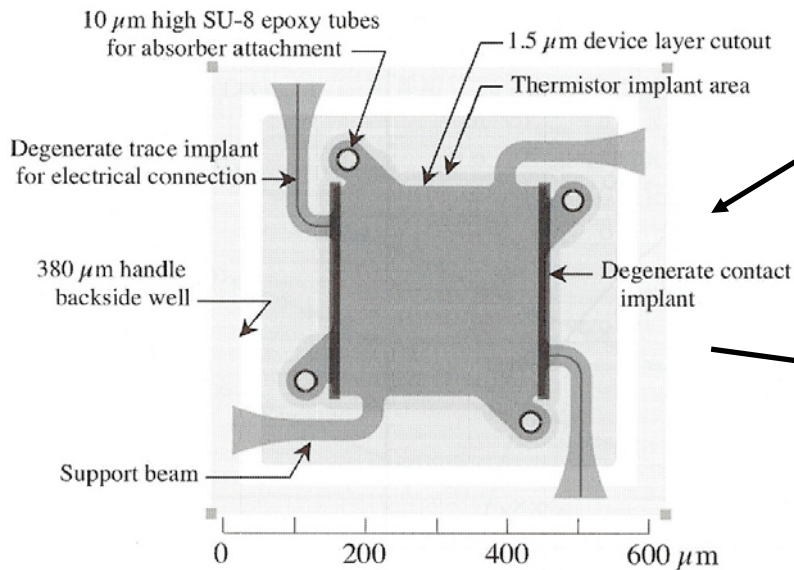
Thermomètre B

Ge 200g équipé NbSi

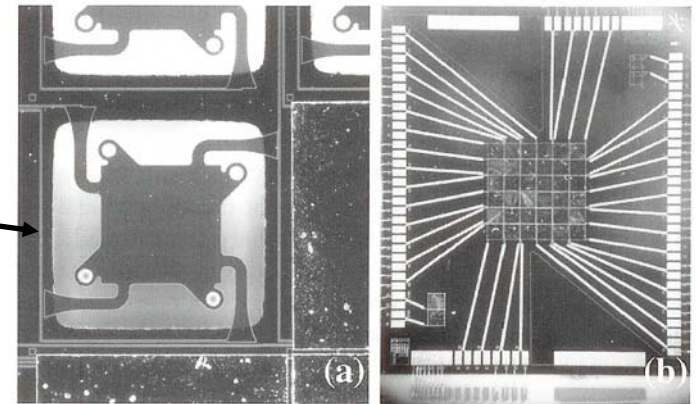
Test 2004 au LSM
(EDW-I)

d'après Alexandre Juillard (journées CAPPS; Orsay 2004)

- ✓ Si-NTD possibles , mais de fortes doses de neutrons sont nécessaires (coût↑; radioactivité induite↑)
- ✓ dopage par implantation ionique
- ✓ solutions pour uniformisation du profil de densité (valables pour des épaisseurs de quelques μm):
 - implantations à différentes énergies (keV→MeV) et \neq doses pour viser un profil \pm plat
 - diffusion à haute température des éléments implantés
- ✓ Intérêt : **les techniques industrielles de masquage et de photolithographie sont applicables**
 - Solutions de thermométrie intégrables sur support Si (seules les zones intéressantes sont dopées)

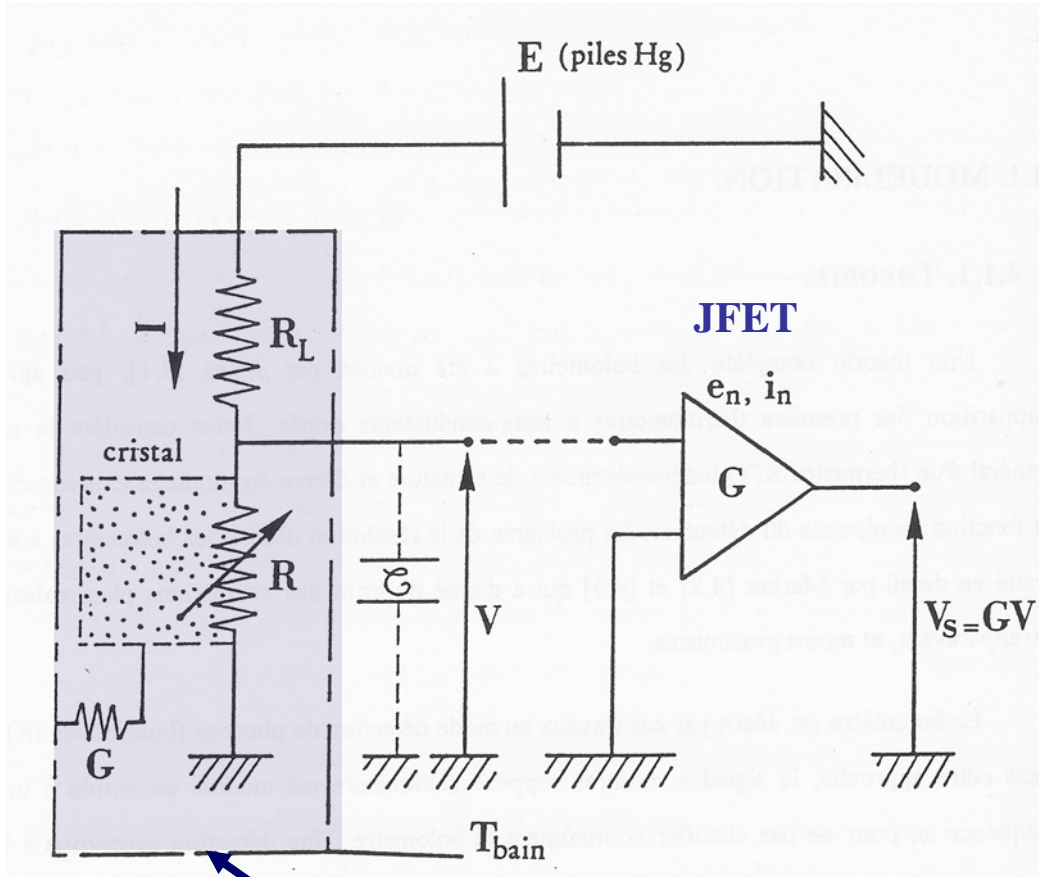


Pixel pour XRS (satellite Astro-E2)
Matrice XRS 6 x 6 avec absorbeurs



D. Mac Cammon in Ch. Enss, page 43

Circuit de polarisation (non différentiel, ici)



Partie froide ($T \leq 100\text{mK}$)

☺ simple !

☺ particulièrement adaptée à la détection de particules (BP des amplis quelques 100kHz)

☺ alim. du pré-ampli (JFET) et des amplis sur batterie → pas de secteur introduit par la lecture

☹ la résistance de charge (R_L) doit être refroidie pour ne pas voir son bruit... → aux forts courants, le réfrigérateur peut se réchauffer.

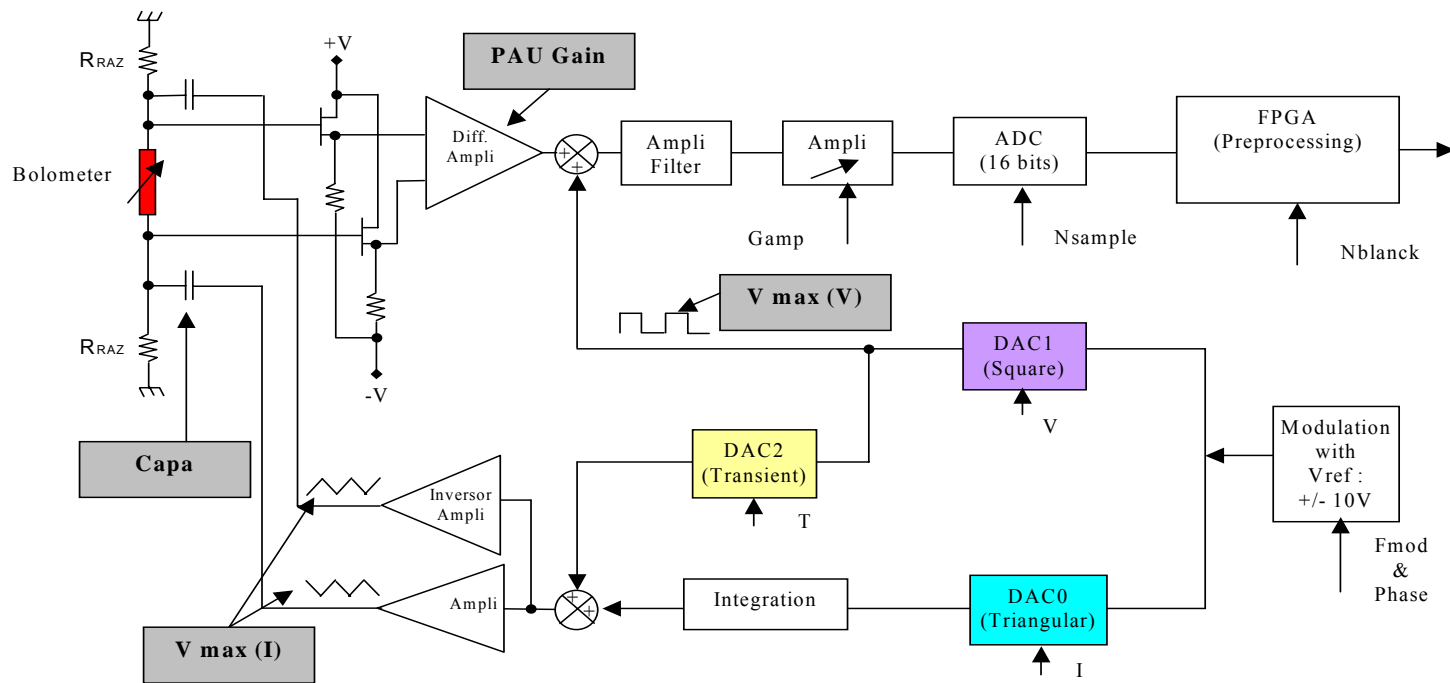
☹ bruit en $1/f$ des JFETs

→ 1er étage froid: le JFET est souvent refroidi à 120K (in ↓)

Capacité parasite: $C \leq 100\text{ pF}$ pour les câblages soignés

Lecture Ge-NTD 2. polarisation « triangle & carré »

Notice du soft EGSE (CESR, Toulouse)



**FUNCTIONING SCHEME OF A MEASUREMENT CHANNEL
(DIFFERENTIAL SYSTEM)**

☺ différenciation du triangle → polarisation carrée au niveau du bolomètre. Le point de fonctionnement du bolomètre (sa température) est constant (\neq modulation sinusoïdale);

☺ Détection synchrone → niveau de bruit BF \equiv niveau de bruit ampli à la fréquence de modulation (ici 80Hz) → très bas niveaux de bruit BF (adopté pour Planck-HFI, Edelweiss-II,...)

☹ ne sera probablement adapté pour la détection de particules que si le bolomètre est lent !

→ *extrait en grande partie du cours de Martin Loidl (Balaruc les Bains; 1999); aussi Ch. Enss (2004)*

- autre appellation: SPT(Superconducting Phase-Transition thermometer)

- film fin supraconducteur polarisé sur le front de la transition normal→supra

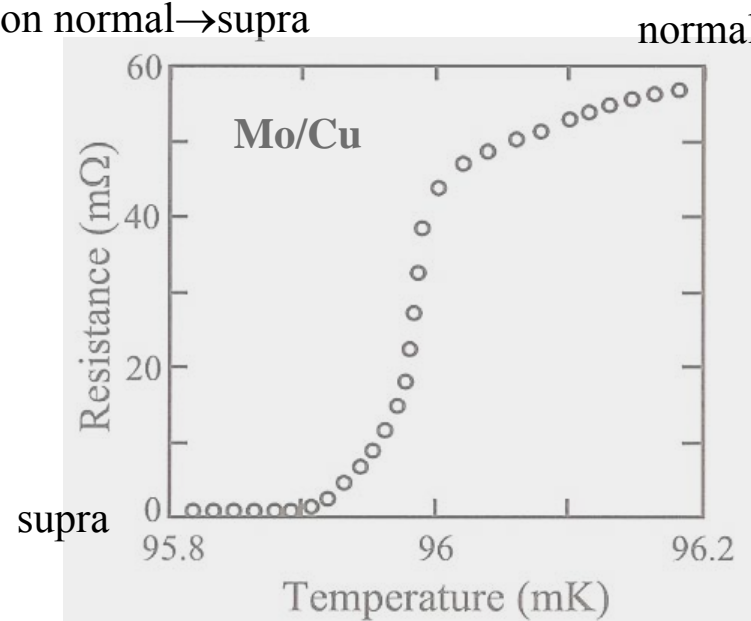
- $T_c \leq 100\text{mK}$
- $\Delta T_c: 0.1\text{mK} \rightarrow 10\text{mK}$
- $R_{\text{normal}}: 10\text{m}\Omega \rightarrow 100\text{m}\Omega$
- $I: 1 \mu\text{A} \rightarrow 100\mu\text{A}$
- qq. $1000 \text{ \AA} \times \text{qq. mm}^2$

Films supraconducteurs courants:

- **Ir** $T_c=112\text{mK}$
- **W** $T_c=15\text{mK}$

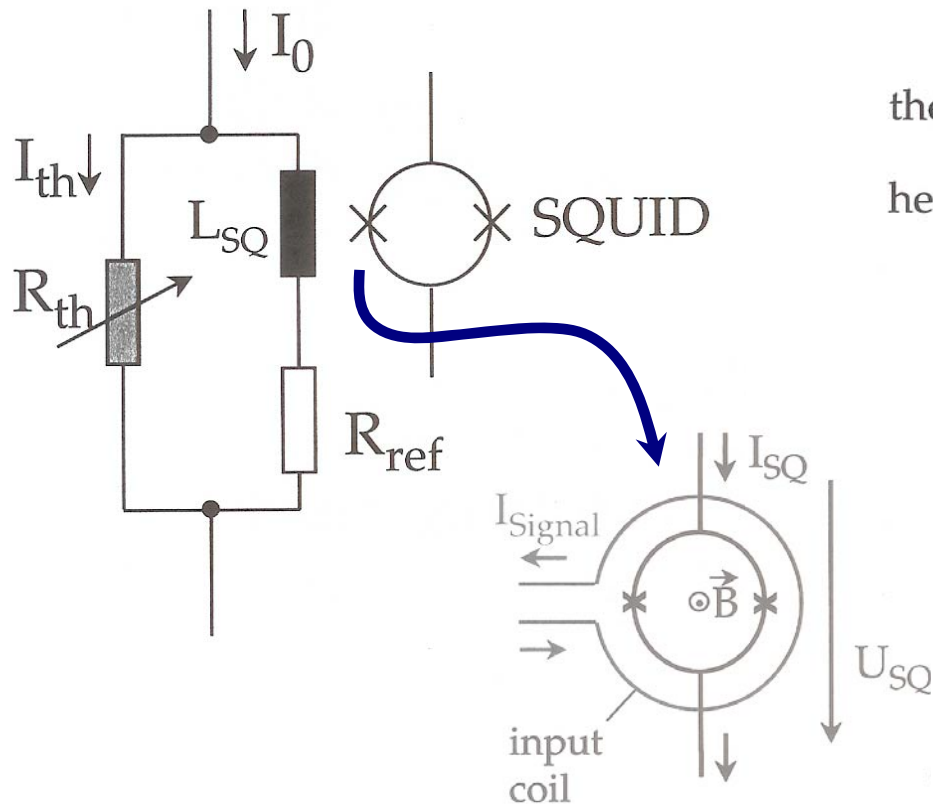
Films bi-couches Supraconducteur /Métal [effet de proximité→ $T_c(\text{bicouche}) < T_c(\text{supra})$]

- **Al/Ag** $T_c: 50\text{mK} \rightarrow 1\text{K}$; prédictible à 2mK près; $\Delta T_c < 0.1\text{mK}$
- **Mo/Au** $T_c: 100\text{mK} \rightarrow 915\text{mK}$; $\Delta T_c < 1\text{mK}$
- **Mo/Cu** $T_c: 40\text{mK} \rightarrow 100\text{mK}$
- **Ir/Au** $T_c: 25\text{mK} \rightarrow 100\text{mK}$; prédictible au mK près; très stable; $\Delta T_c < 1\text{mK}$

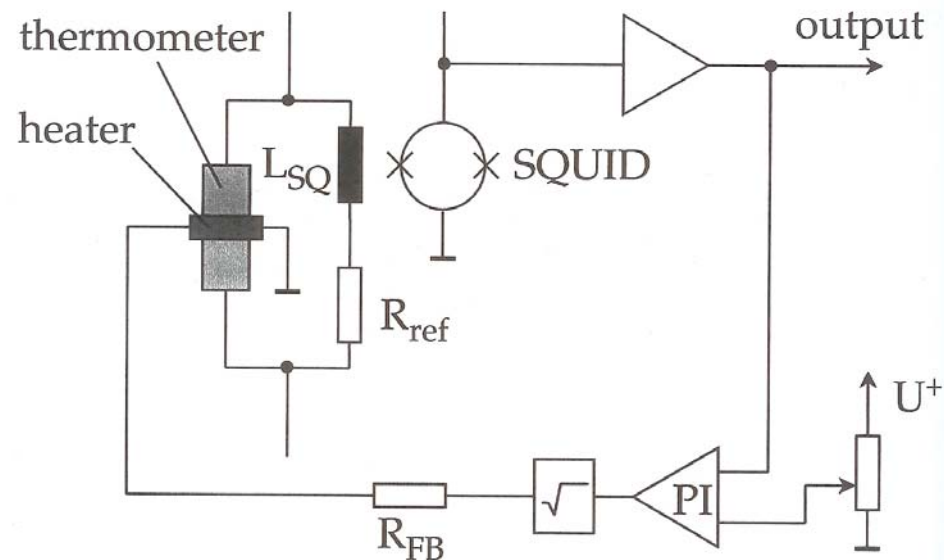


TES (Transition Edge Sensors) 2. lecture

Polarisation courante des TES



Polarisation à T constante des TES (Active Thermal Feedback)

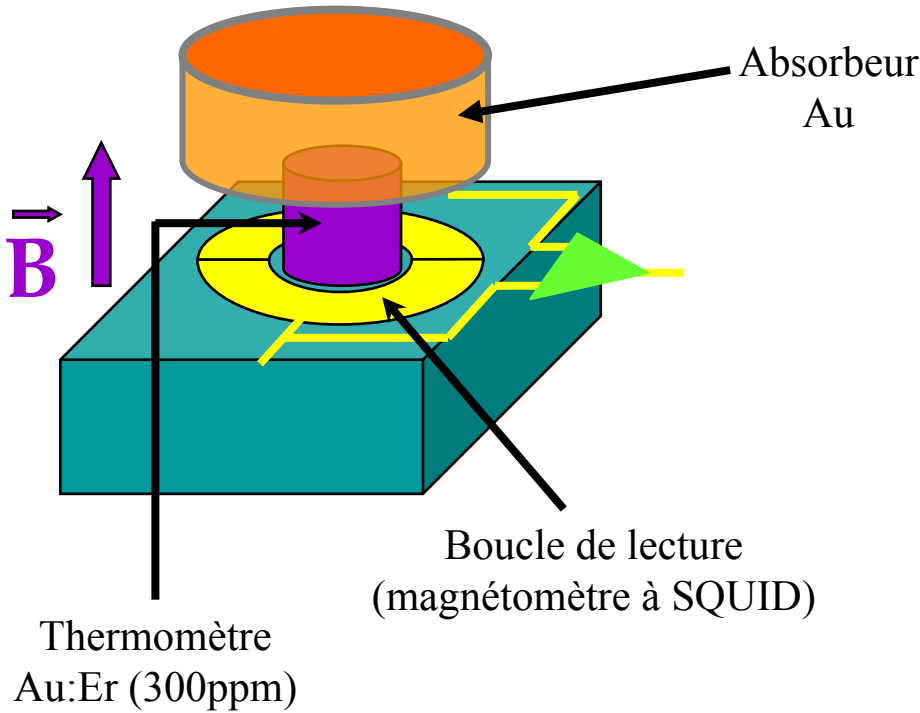


SQUID: Superconducting Quantum Interference Device
(demi-anneaux supraconducteurs séparés par des jonctions Josephson)

Avantages comparés Ge-NTD & TES

| | Ge-NTD | TES |
|-----------------------|--------|-------|
| Sensibilité | - | + |
| Dynamique | + | - |
| Radioactivité | - | + |
| Simplicité du montage | + | - |
| Assemblage en matrice | - | + |
| Choix de cibles | + | |
| Thermalisation | - | + |
| Rapidité | | + |
| Stress thermique | - | + |
| Robustesse | + | - |
| Phonons athermiques | | + |
| Lecture | JFET | SQUID |

Thermomètres magnétiques



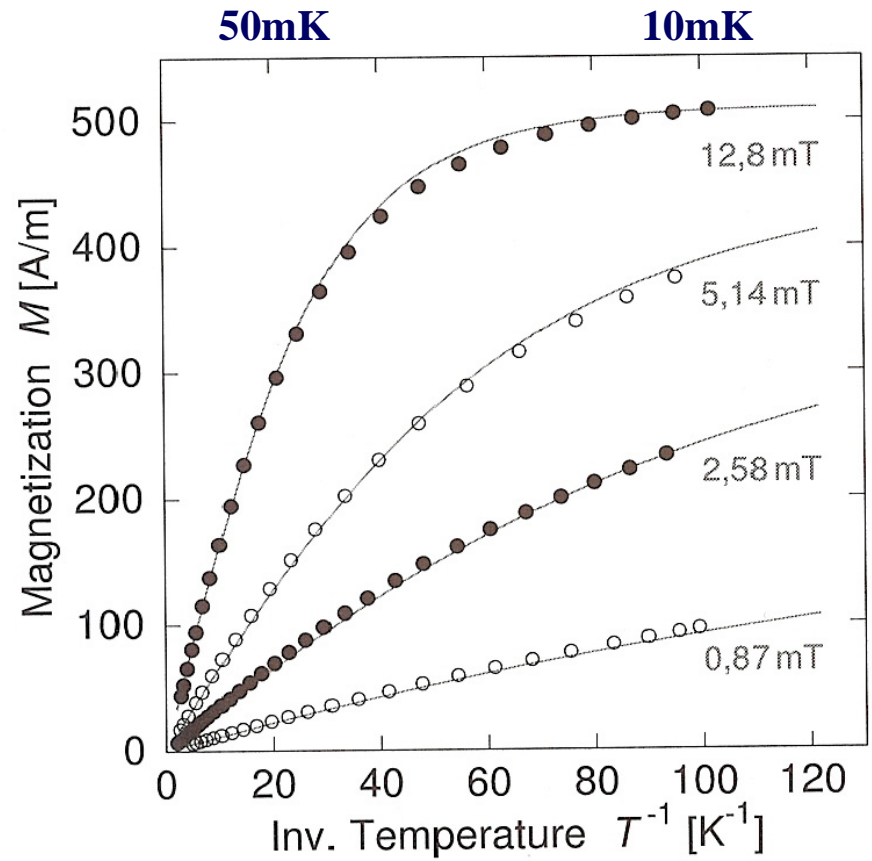
d'après E. Leblanc (2003)

✓ cf A. Fleischmann et al., in Ch. Enss (2004).

✓ Ions paramagnétiques 4f dans matrice métallique [les matrices isolantes sont pénalisées par des constantes de temps de couplage spin-phonons trop longues; \approx sec]

→ capacité calorifique additive importante

Moment magnétique d'un thermomètre Au:¹⁶⁶Er (300 ppm) en fonction de T (mesures et fit des modèles)



□ Bolomètre polarisé

- Bruits



Bolomètre polarisé à I constant (cas des Ge-NTD)

Après soustraction de la solution stationnaire, le bilan énergétique s'écrit

$$C \frac{d\Delta T}{dt} + G\Delta T = \Delta R \times I^2 + E\partial(t) + QH(t)$$

On tient compte de P_{Joule} à présent

En introduisant la réponse logarithmique du thermomètre

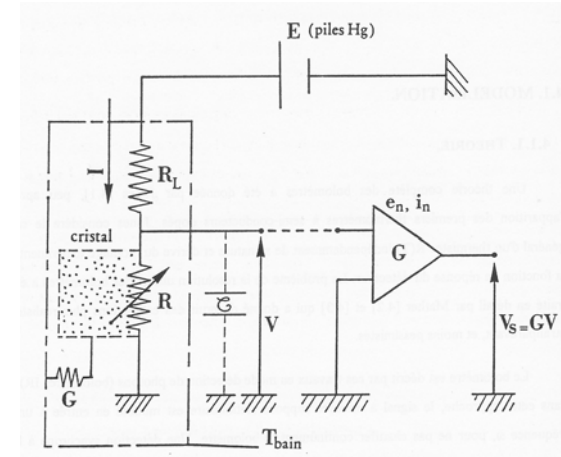
$$\alpha = -\frac{\partial \ln R}{\partial \ln T} \approx -\frac{\Delta R}{R} \times \frac{T}{\Delta T}$$

Le bilan énergétique se réécrit

$$C \frac{d\Delta T}{dt} + \left(G + \frac{\alpha P}{T}\right) \Delta T = E\partial(t) + QH(t)$$

La constante de temps effective du bolomètre polarisé apparaît:

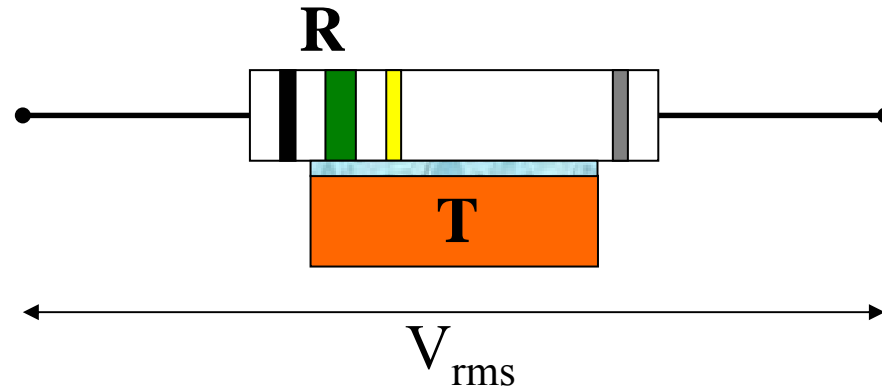
Il y a contre-réaction « électrothermique »:
l'effet de la polarisation est d'accélérer le
détecteur



- Pour un thermistor suivant le régime « Variable Range Hopping »:
 $\alpha = 0.5 \sqrt{\frac{T_0}{T}}$ et $\alpha \approx 3 \rightarrow 30$ [Ge-NTD types]
- Note: pour un TES, $\alpha \approx -100 \rightarrow -1000$!

$$\tau_{eff} = \frac{C}{G + \alpha \frac{P}{T}} \leq \frac{C}{G} = \tau_{th}$$

Une autre limitation intrinsèque: le bruit Johnson



✓ source: mouvement brownien des électrons dans la résistance

✓ → générateur équivalent de bruit en tension avec la densité spectrale

$$S_v = \sqrt{4k_B T R} \quad (nV / \sqrt{Hz})$$

AN: 5 MΩ à 20mK → 2.3 nV/√Hz

✓ **bruit blanc**

$$V_{\text{rms}} = S_v \times \sqrt{\Delta f}$$

✓ → refroidissement nécessaire des résistances de polarisation (élevées, par fonction)

[Note: le bruit Johnson peut servir de référence absolue pour la thermométrie à BT]

Recherche du point de polarisation optimum 1.

On a donc deux bruits irréductibles pour un bolomètre résistif:

- le bruit thermodynamique (en keV)
- le bruit Johnson (en V) , qui se traduit en keV par l'intermédiaire de la réponse du bolomètre (\mathcal{R} en V/keV)

On peut montrer que ces deux contributions peuvent se simplifier pour l'expression réduite:

$$\Delta E_{rms} = \xi \sqrt{k_B T_0^2 C_0}$$

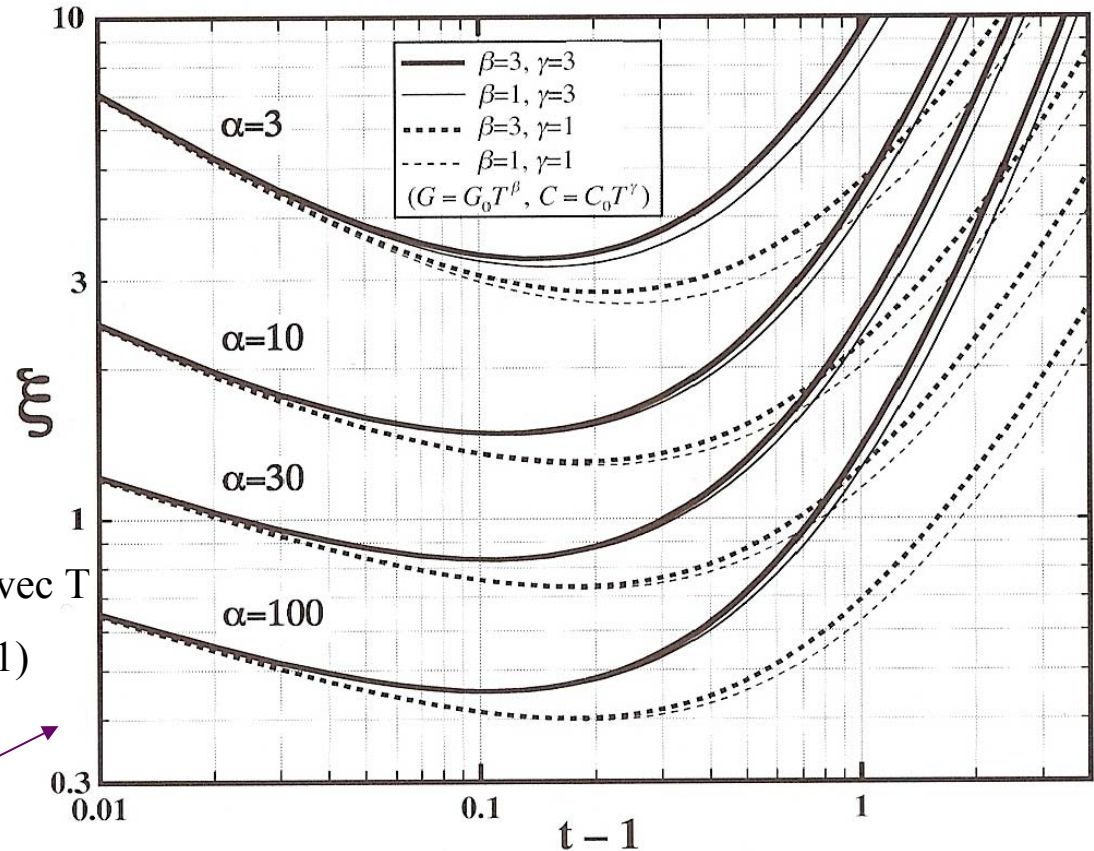
T_{bain}

C du bolo à
T_{bain}

ξ dépend:

- de la pente α
- des coefficients dominants de C et de G avec T
- du point de polarisation T ($t=T/T_{bain} > 1$)

McCammon in Ch.Enss (2004)



Recherche du point de polarisation optimum 2.

D'après la figure précédente $\xi=f(t-1)$, où t est la température réduite ($t=T/T_{\text{bain}}$), on peut dans certaines conditions être proche du bruit thermodynamique initial, pourvu que

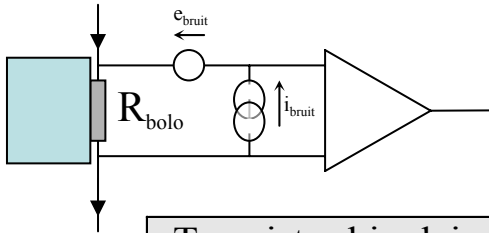
1. La sensibilité α du thermomètre soit suffisante (≥ 20)
2. Le bolomètre soit polarisé convenablement
 - en pratique, le minimum est proche de $t-1=0.1$ à 0.2 , quelles que soient les courbes décrivant la composition du bolomètre (i.e. C, G) et la sensibilité du thermomètre.

Pour être à leur maximum de sensibilité les bolomètres doivent généralement être polarisés **entre 10% et 20% au dessus du bain**

par ex. $T_{\text{bain}}=20\text{mK} \rightarrow T_{\text{bolo}}=22\text{mK}$ à 24mK

3. Avec un bolomètre à Ge-NTD de sensibilité moyenne ($\alpha=5$ à 10), **on est à un facteur 3 seulement du bruit thermodynamique** \rightarrow c'est souvent plus que suffisant pour l'application visée.....
à condition **(a) que les amplis soient bons**
(b) qu'il n'y ait pas de partition de l'énergie !

Bruit des amplis: valeurs caractéristiques



| | Densités spectrales de bruit | | T_{bruit} K | R_{bruit} Ω | Remarques |
|---------------------------------|---|---|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | e_{bruit} V/ $\sqrt{\text{Hz}}$ | i_{bruit} A/ $\sqrt{\text{Hz}}$ | | | |
| Transistor bipolaire | 0.3 nV | 1 pA | 2 K | 100 Ω | |
| JFET Silicium à 300K | 1 nV | 1 fA | 20 mK | 1 M Ω | Bruit 1/f à $f < 10\text{Hz}$ |
| JFET Silicium à 120K | 1 nV | 0.1 fA | 2 mK | 10 M Ω | |
| MosFET à $T \leq 4.2\text{K}$ | 1 μV | $< 10^{-16}$ A | 200 mK | > 100 G Ω | $R_{\text{bruit}} \approx \infty$ |
| FET AsGa à $T \leq 4.2\text{K}$ | 1 nV | 1 fA | 20 mK | 1 M Ω | Bruit 1/f à $f < 10\text{kHz}$ |
| SQUID ($T \leq 4.2\text{K}$) | | 1 pA | $1.5 \cdot 10^{-9} \times f$ | $6 \cdot 10^{-6} \Omega \times f$ | |
| SET ($T \leq 100\text{mK}$)* | 100 nV | | $1.5 \cdot 10^{-7} \times f$ | $1.6 \cdot 10^{15} \Omega / f$ | |

d'après Alain Benoît (Ecole d'automne de Balaruc les Bains; nov. 1999)

Définitions:

- $R_{\text{bruit}} = e_{\text{bruit}} / i_{\text{bruit}}$
- $4 \times k_B T_{\text{bruit}} = e_{\text{bruit}} \times i_{\text{bruit}}$
 \approx énergie mini mesurable

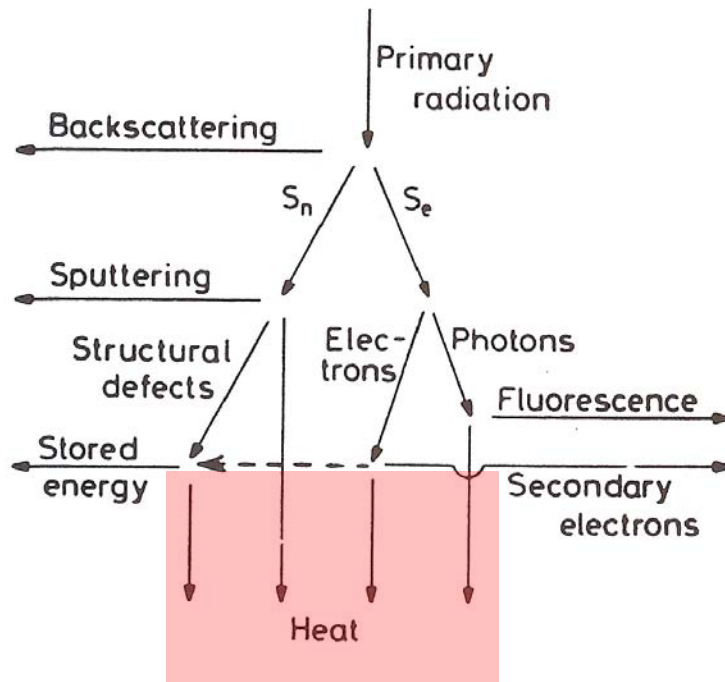
Adaptation d'impédance:

- ✓ $R_{\text{bolo}} = R_{\text{bruit}}$: on ne voit pas l'ampli si $T_{\text{bruit}} < T_{\text{bolo}}$
- ✓ $R_{\text{bolo}} \neq R_{\text{bruit}}$: on ne voit pas l'ampli, à condition que

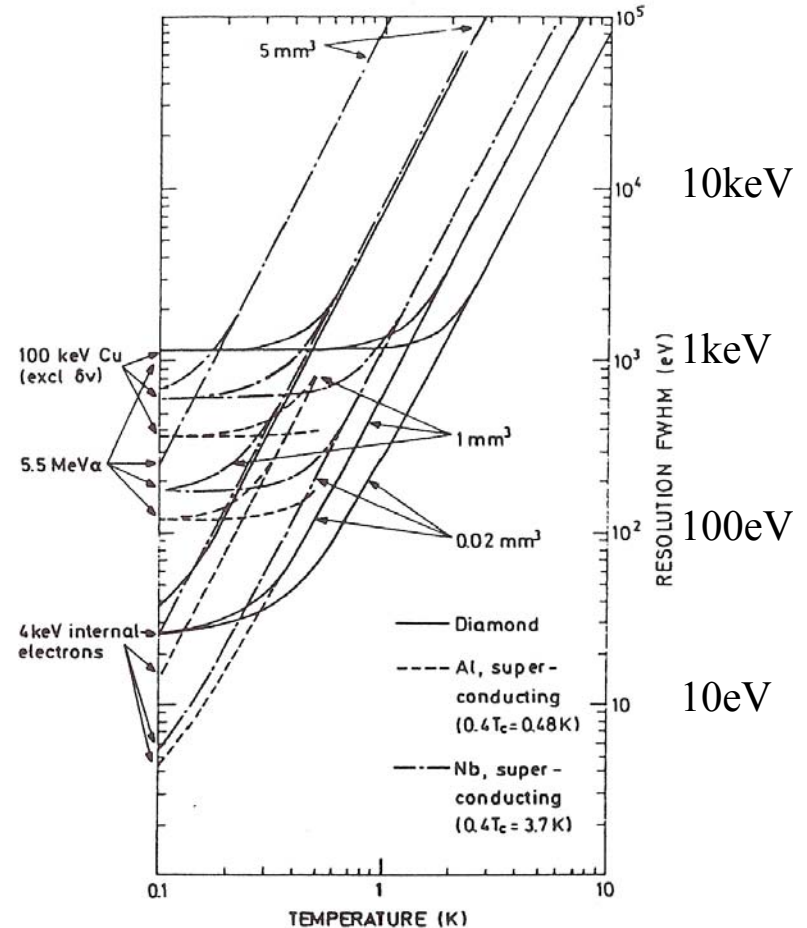
$$R_{\text{bruit}} \times (T_{\text{bruit}} / T_{\text{bolo}}) < R_{\text{bolo}} < R_{\text{bruit}} \times (T_{\text{bolo}} / T_{\text{bruit}})$$

* SET = Single Electron Transistor

L'agitation thermique récupère la plus grande partie de l'énergie incidente



Résolution ultime anticipée
sur \neq particules, \neq cibles, \neq tailles



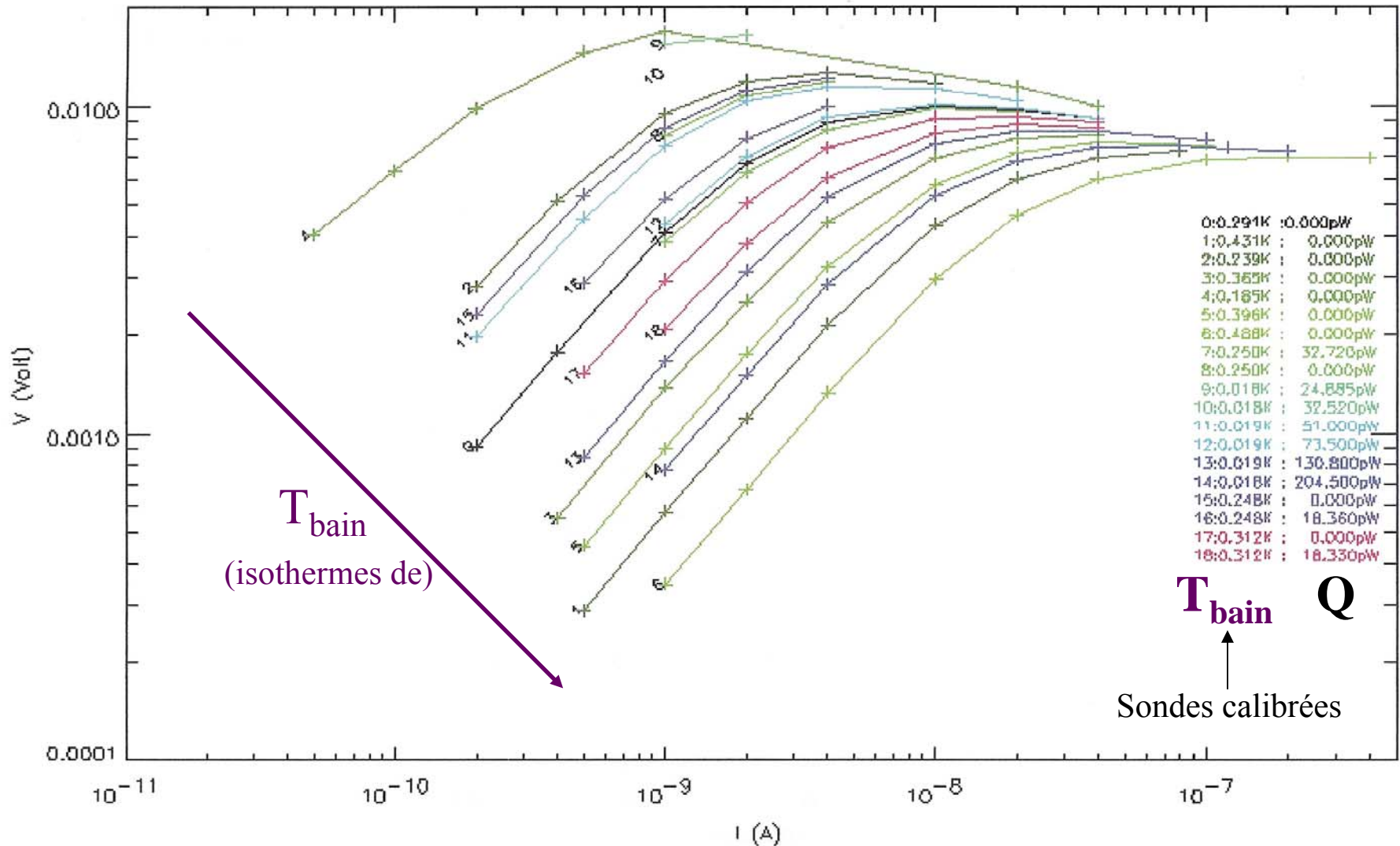
in H.H. Andersen (1986), cité par D. L'Hôte

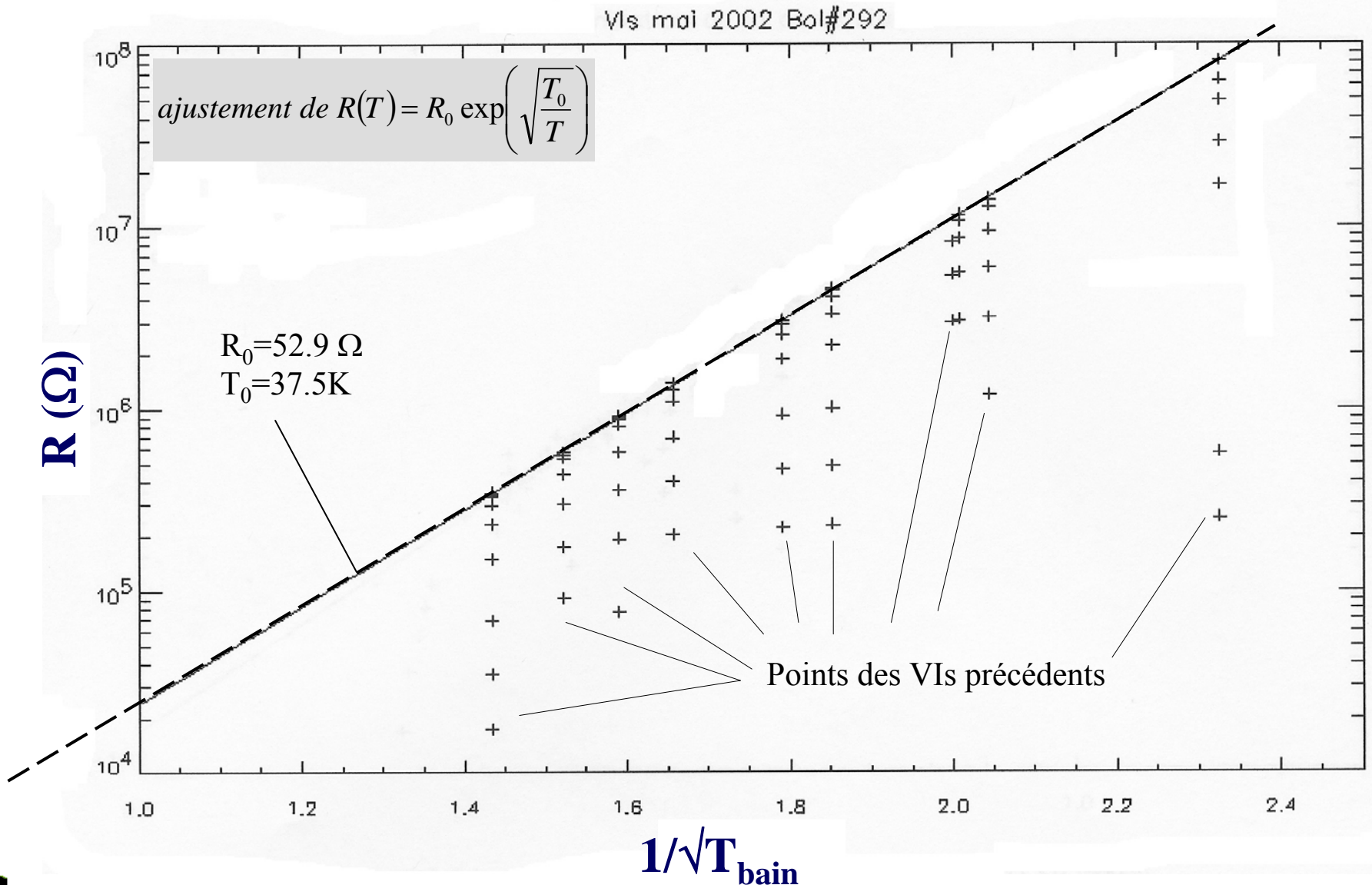
- très peu d'études systématiques à ce jour du partitionnement, ni de mesures fines
 - **les détecteurs sont calibrés avec le type de particules étudiées**
[ex: l'équipe STAP/IAS a observé une réponse thermique supérieure α / γ dans CaWO_4 et BGO (de l'ordre de 7%)]
- même s'il n'y a pas de recombinaison des paires électrons-trous, on attend une **meilleure résolution dans les bolomètres à cibles semi-conductrices /détecteurs Si & Ge conventionnels** (avec une répartition de l'énergie pour $\approx 2/3$ en chaleur, $1/3$ en création de paires, la résolution limite calculable est **au moins 0.55 meilleure**)
- les cibles métalliques ou semi-métalliques (ex. Bi) ont à priori moins de branchements → à privilégier pour la haute résolution
- nouveau champ d'études, abordable probablement par **calorimétrie absolue** (effet Joule)
 - intérêt pour les physiciens des solides (combien d'énergie stockée dans les défauts sous implantation ?)

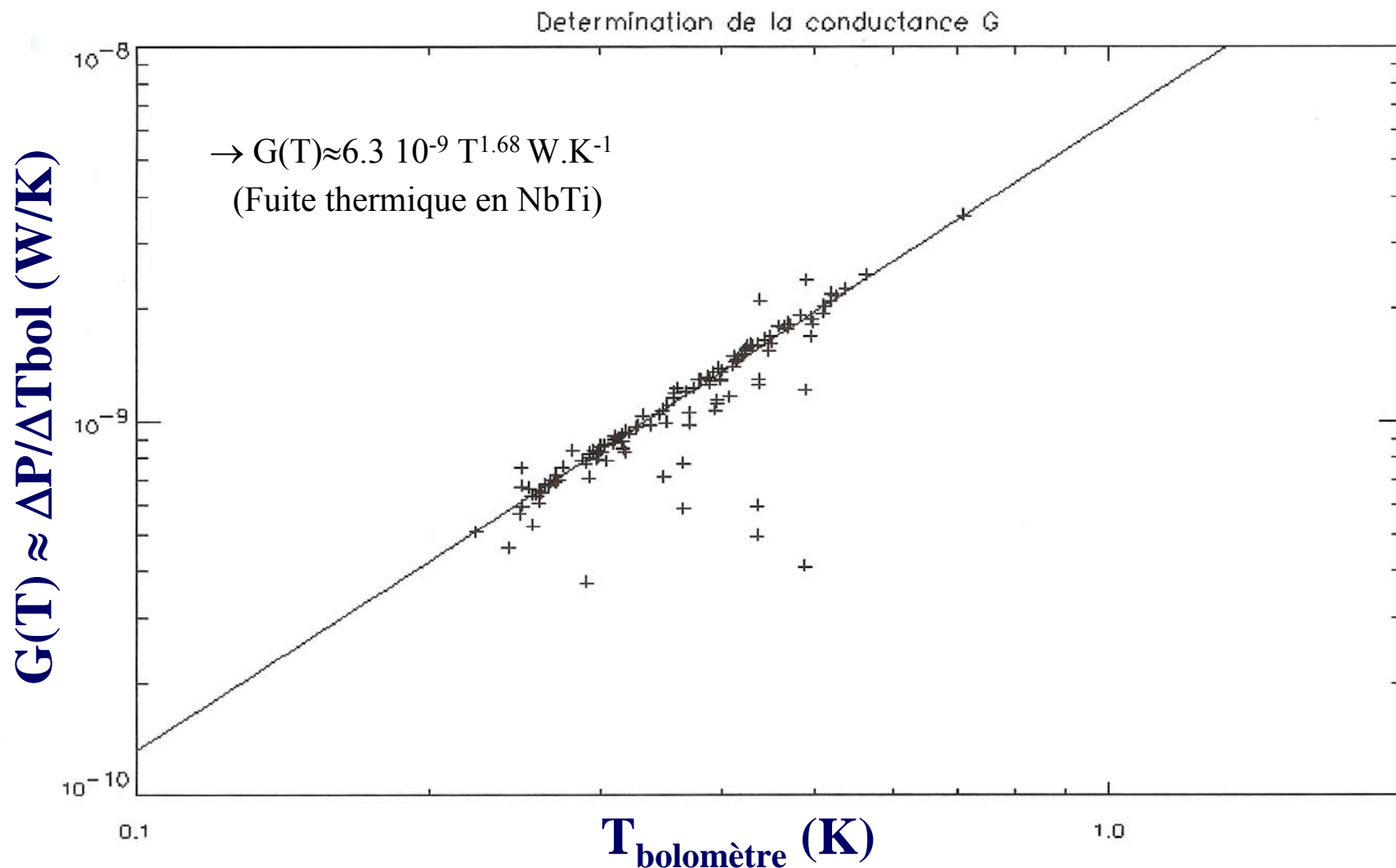
□ Bolomètre polarisé

- Caractéristiques

Vls bolomètre 292 mai 2002 (Bolomètre submm IAS)

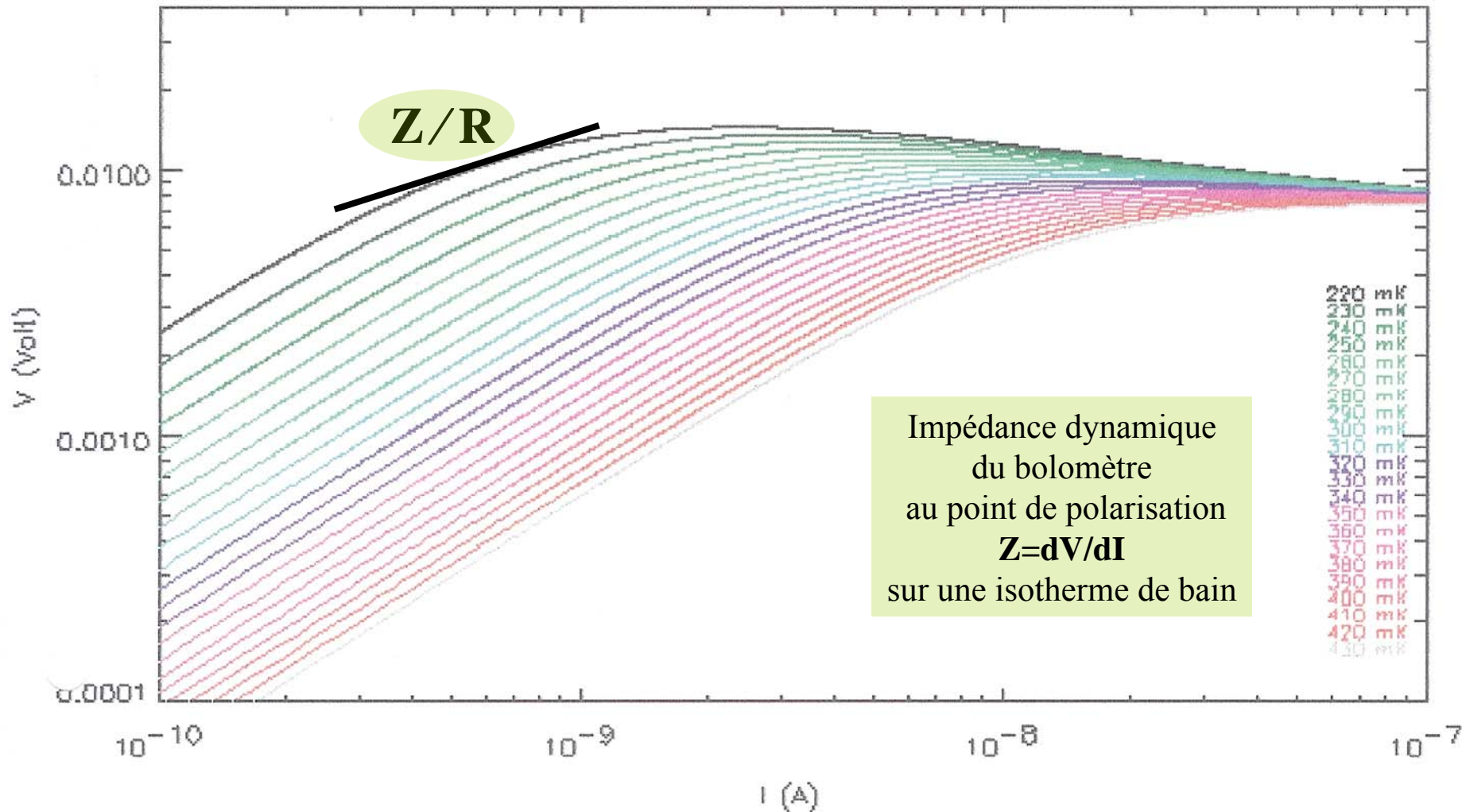


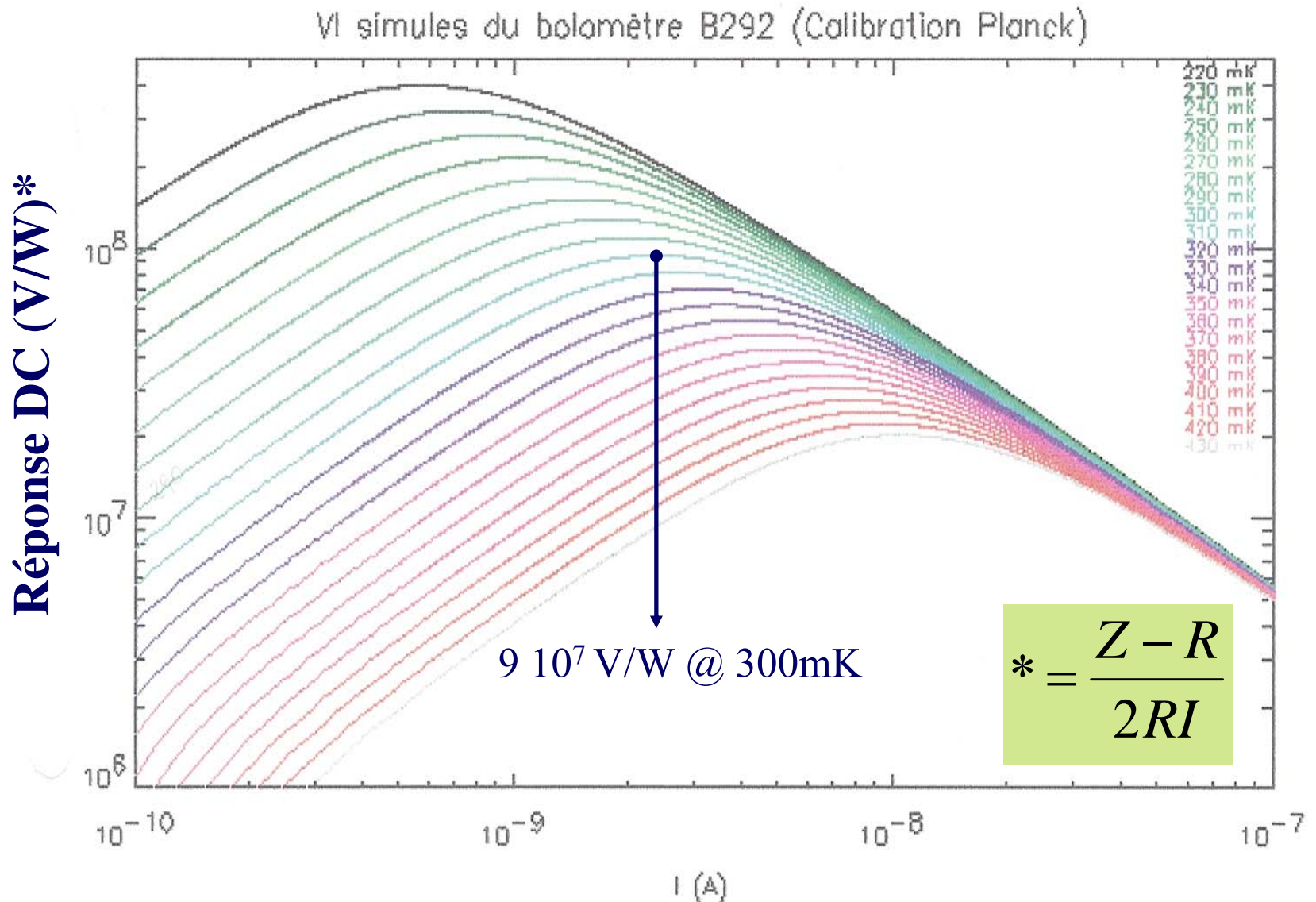




Vis 2002 Calcul d'après données restreintes à $0.00100000 < dT/T < 0.150000$

VI simules du bolomètre B292 (Calibration Planck)

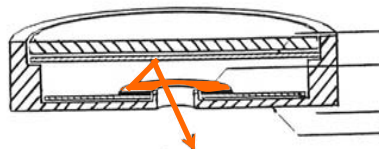
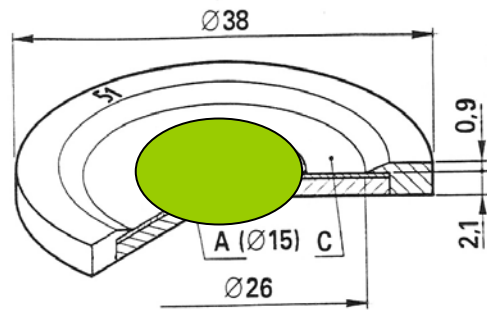




□ Environnement du bolomètre en laboratoire



Source alpha type (sur inox ou Ag)

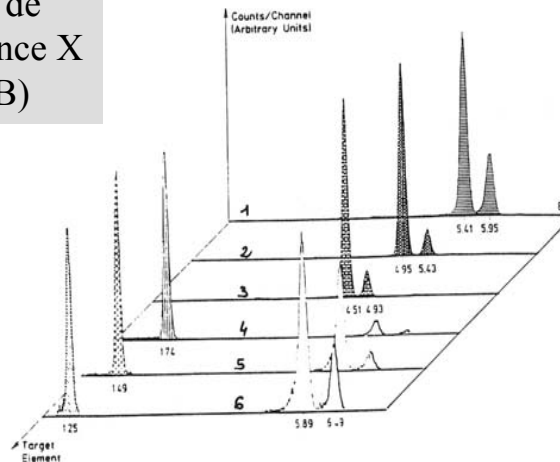


Cible
Dépôt de ^{55}Fe
Anneau en inox
Cage en laiton

Source de
Fluorescence X
(LNHB)

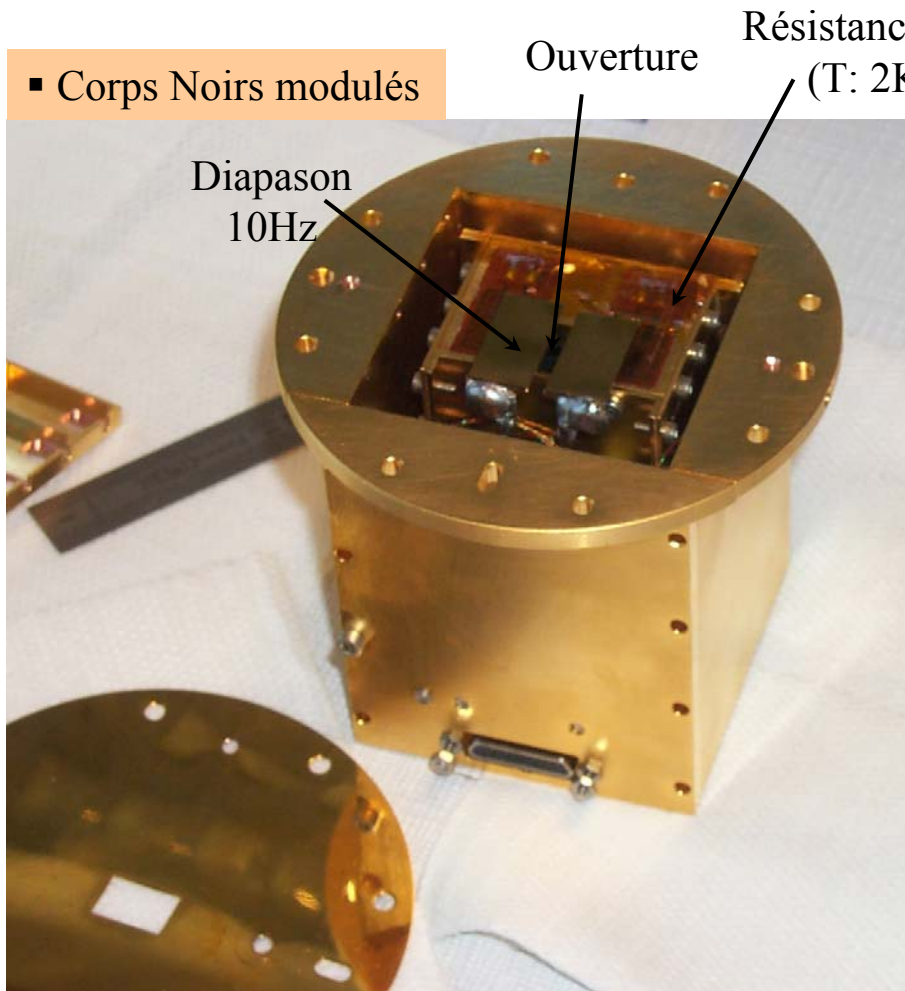
≠Cibles

1. Cr
2. V
3. Ti
4. Si
5. Al
6. Mg



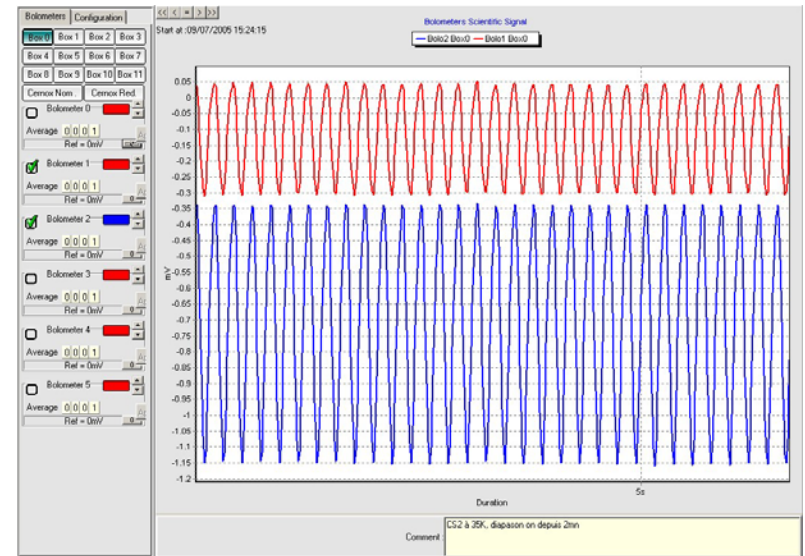
- les sources sont de faible activité (« lenteur » des bolomètres)
- en raison des nombreux écrans cryogéniques et de l'inaccessibilité du détecteur, **les sources alphas, bêta et X (qq. μCi) doivent être refroidies**, tandis que les sources plus pénétrantes (gammas, neutrons) sont externes.
- des montages avec ou sans fenêtre ont aussi été réalisés pour une détection sous faisceau

Corps Noirs modulés



Source froide « CS2 » de l'installation de calibration Planck-HFI à l'IAS

CS2 vue par deux bolomètres IAS de calibration...



Autres moyens de calibration et d'excitation:

- **particules, pulse NIR (LED), effet Joule**
R&D équipe STAP/IAS
- **fibre C: constantes de temps, diaphonie**
R&D LAL

Environnement du bolomètre (ex. de l'IAS)

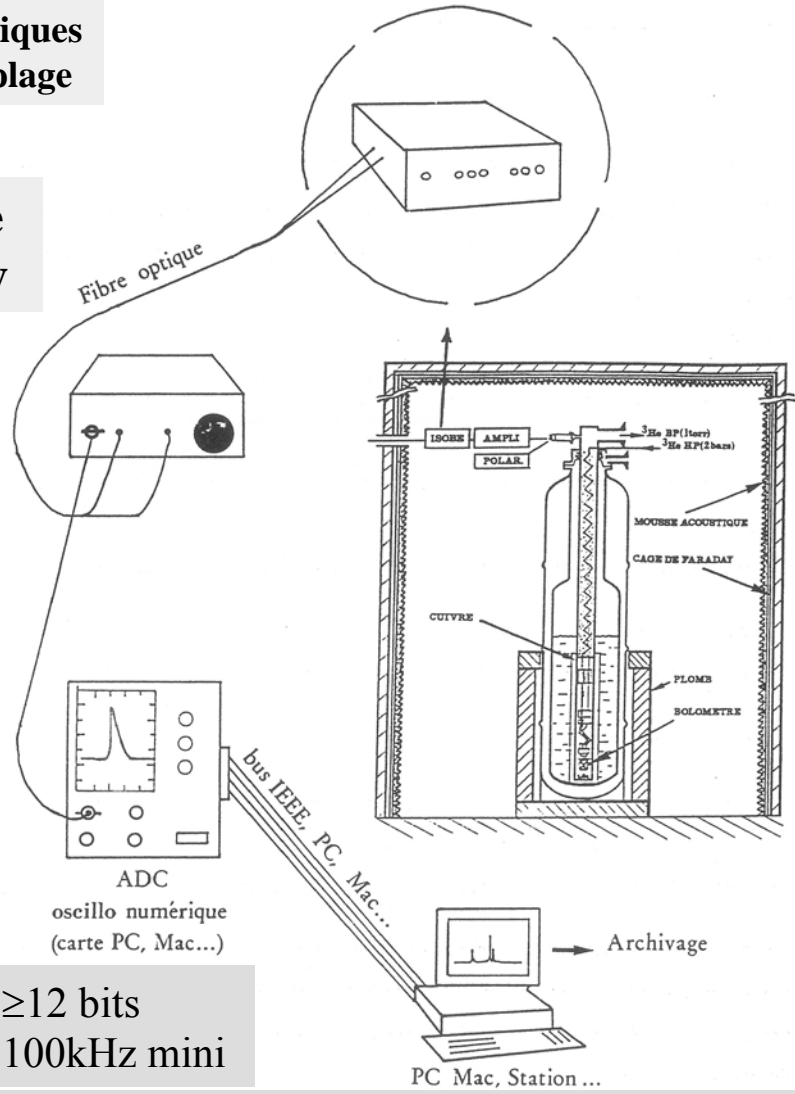


Revêtement anti-microphonique

Plomb

Fibres optiques de découplage

Cage de Faraday



≥ 12 bits
100kHz mini

+ traitement numérique (filtrages, coupures, etc...) !



- ✓ **nature statistique (lié aux fluctuations du nombre de photons incidents par unité de temps)**
 - ✓ se mesure en NEP (Noise Equivalent Power; unités: W/\sqrt{Hz})
 - ✓ pour les détecteurs de rayonnement les plus sensibles, le **bruit de photons** (de la source mesurée elle-même, des surfaces émissives des télescopes), par nature irréductible, est le bruit à battre:
 - **le bolomètre est construit idéalement pour être limité par ce bruit** (conditions « BLIP »: Background Limited Infrared Photodetector): **les contributions ajoutées en quadrature des bruits thermodynamique, Johnson, des amplis devront être inférieures.**
- S'il y a de la marge (bruit de photon élevé), on peut surdimensionner le détecteur pour gagner en efficacité de détection.

$$NEP_{photons} = \left[2Q(h\bar{\nu} + \alpha e f k_B T_S) \right]^{1/2}$$

Cf. Mather (1984)

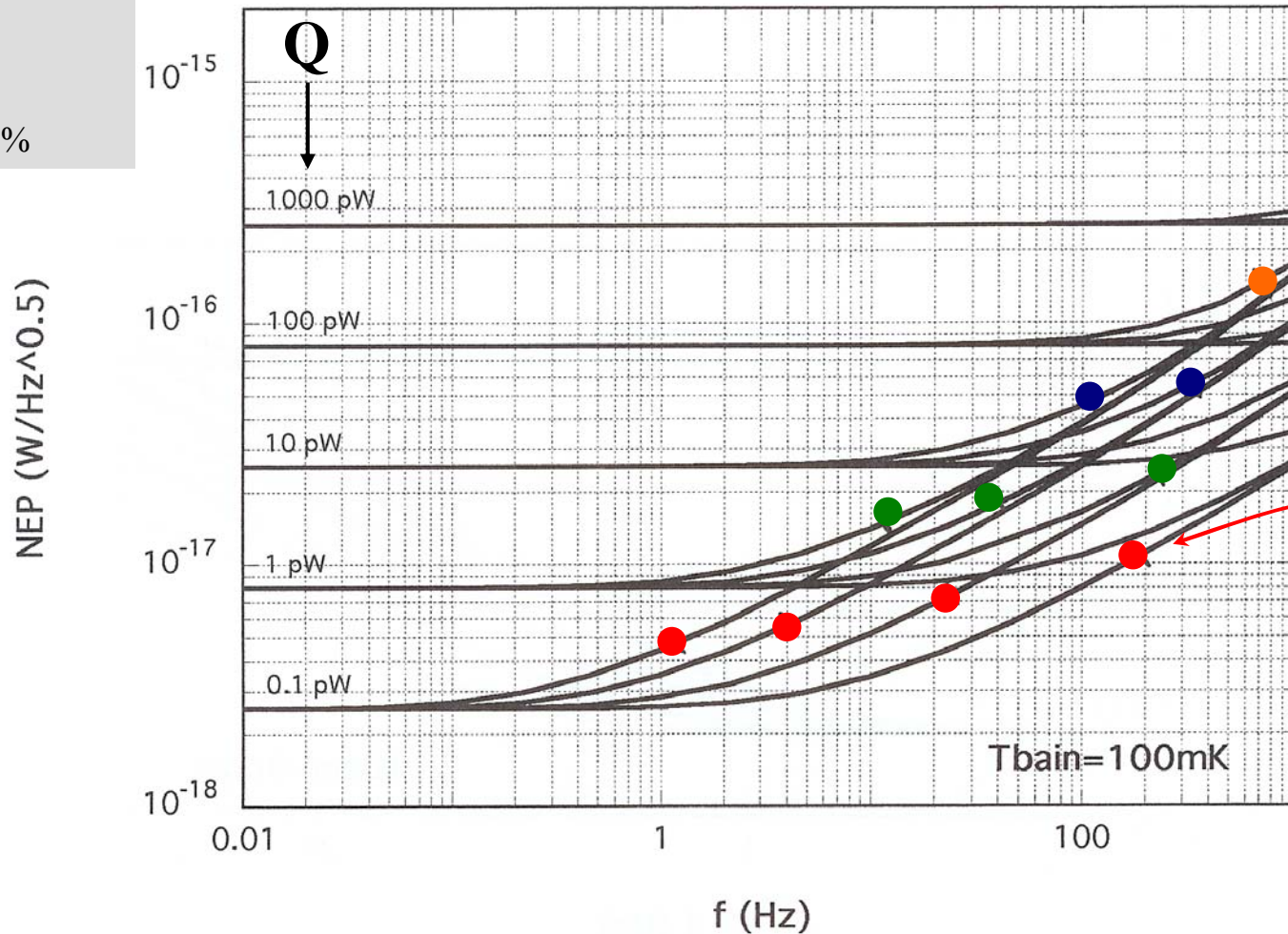
- Q : rayonnement de fond absorbé par le bolomètre
- $h\bar{\nu}$: énergie moyenne des photons
- α : efficacité d'absorption du détecteur
- f : facteur de transmission optique depuis la source
- e, T_S : émissivité et température de la surface responsable du rayonnement de fond

Paramètres fixés

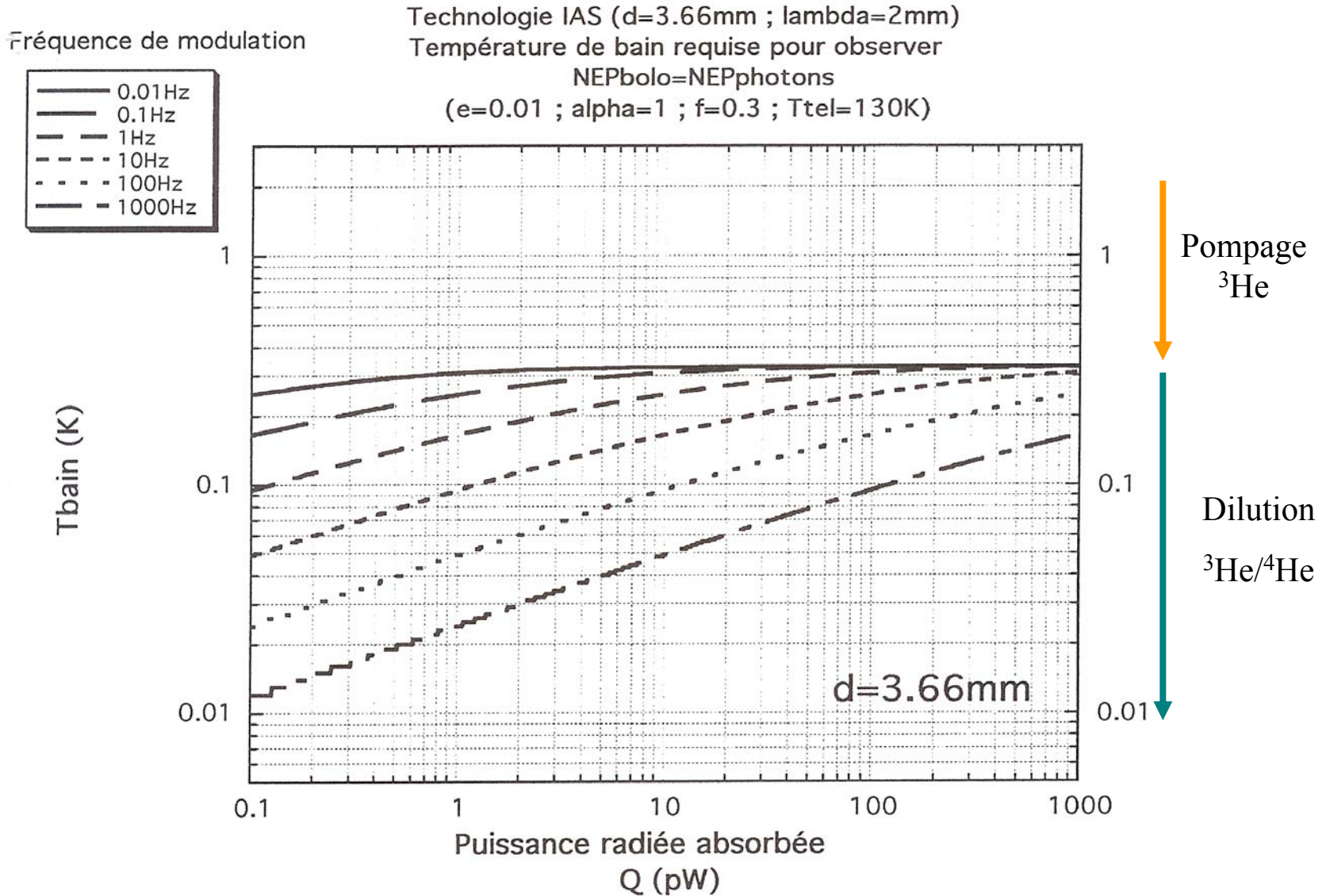
- $T_s=130K$
- $e=0.01$
- $f=0.3$
- $\alpha=100\%$

Technologie IAS ← Input: C et G des bolomètres IAS
 $T_{bain}=100mK$

($d=640\mu m, 1.37mm, 2.47mm, 3.66mm$) ≡ diamètres des absorbeurs



Au-delà de cette limite de modulation en fréquence, le bruit de photons dû au fond Q domine



Formules de passage NEP, bruit , résolution

✓ les formules suivantes permettent de passer d'un bruit en tension S_v ($V/\sqrt{\text{Hz}}$) mesuré aux bornes d'un bolomètre au NEP équivalent ($W/\sqrt{\text{Hz}}$) de ce bolomètre, et de calculer la réponse anticipée à une fréquence donnée (bolomètres submm) ou après absorption d'une énergie donnée à partir de la mesure DC de la réponse et d'une mesure de la constante de temps effective du bolomètre polarisé τ_{eff} ...

$$NEP(f)_{W/\sqrt{\text{Hz}}} = \frac{S_v(f)_{V/\sqrt{\text{Hz}}}}{\text{Réponse}(f)_{V/W}}$$

« rolloff »

$$\text{Réponse}(f)_{V/W} = \text{Réponse}(DC)_{V/W} \times \frac{1}{1 + j2\pi f \tau_{\text{eff}}}$$

$$\text{Réponse}_{V/keV} = \frac{\text{Réponse}(DC)_{V/W}}{\tau_{\text{eff}}}$$

$$\Delta E_{\text{rms}}_{keV} = \frac{S_v(f)_{V/\sqrt{\text{Hz}}} \times \sqrt{\Delta f}}{\text{Réponse}_{V/keV}} = \frac{S_v(f)_{V/\sqrt{\text{Hz}}} \times \sqrt{\tau_{\text{eff}}/4}}{\text{Réponse}(DC)_{V/W}}$$

τ_{eff} est mesuré sur le signal, mais se calcule aussi lors de la construction!

BP = $1/(4 \times \tau_{\text{eff}})$ est la bande passante équivalente du bolomètre

La réponse DC se mesure facilement lors de l'établissement des **caractéristiques VI** du bolomètre (c'est la mesure de $\Delta V/\Delta P$ lors du déplacement du point de polarisation)

Ce cours a grandement bénéficié des contributions de

- **Noël Coron (IAS)**
- **Elvire Leblanc (CEA/LNE-LNHB)**
- **Bernadette Leriche (IAS)**
- **François Pajot (IAS)**
- **Maurice Chapellier (CEA)**
- **Martin Loidl (CEA/LNE-LNHB)**
- **Denis L'Hôte (CEA)**

Merci à eux !

PM

- **Cryogenic Particle Detection**
Ch. Enss (Ed.), Topics in Applied Physics, Springer (2005)
- **Matter & Methods at Low Temperature**
F. Pobell, Springer Verlag (1992)
- **Experimental Principles and Methods Below 1K**
O. V. Lounasmaa, Academic, London (1974)
- **Detection of Light: from the UV to the Submm**
G.H. Rieke, Cambridge (2004)
- **Astrophysique: Méthodes physiques de l'observation**
P. Léna, InterÉditions / CNRS Éditions (1996)

Écoles d'automne thématiques:
« Détection de rayonnements à très basse température »
organisées
par
Maurice Chapellier,
avec l'aide d' Alain Benoit, Louis Dumoulin et Jean-Pierre
Torre

dans le cadre des programmes de formation permanente du
CNRS et du CEA

Liste des cours

| | |
|--|---------------------|
| 1991 : Aussois | |
| Les basses températures et leur application à la détection bolométrique | |
| Basses Températures: Généralités | |
| Conduction thermique | B. Salce |
| Résistance de Kapitza | H. Godfrin |
| Chaleurs spécifiques | P. Garoche |
| Production des basses températures | |
| Principes | M. Chapellier |
| Dilution géométries possibles | A. Benoit |
| Cryogénie spatiale | J.P. Torre |
| Liquides Quantiques : dilution He3 :He4 | L. Puech |
| Mesure des basses températures | |
| Thermomètres absolus Thermomètres secondaires Points fixes | J.P. Brison |
| Compléments Matériaux | |
| Transition Métal Isolant | L. Dumoulin |
| Supraconducteur basse température | B. Pannetier |
| Défauts d'irradiation dans les Solides | D. Lesueur |
| Problèmes techniques associés aux mesures à basse température | |
| Détecteurs semi conducteurs | B. Equer |
| Mesures bas bruit | J.L. Bret/Ayela |
| Basses radioactivité | P. Hubert |
| SQUID et électromètre | C. Urbina |
| Applications de la détection bolométrique | |
| Bolomètres : Résultats et espoirs | N. Coron |
| Rayons X, IR et micro-onde en Astrophysique | J.M. Lamarre |
| Neutrinos, matière noire, ions lourds | L. Gonzales Mestres |

| 1992 : La Londe Les Maures | |
|---|-------------------|
| Physique et techniques des détecteurs | |
| Les détecteurs refroidis pour quoi faire ? | |
| Recherche des évènements rares Astrophysique, rayons X et infrarouge | A. de Bellefon |
| Spectrométrie en physique nucléaire | A. Broniatowski |
| Les détecteurs refroidis | |
| Physique des bolomètres | Y. Giraud- Héraud |
| Les bolomètres pour la photométrie | J.P. Torre |
| Les bolomètres pour la détection de particules | P. de Marcillac |
| Détecteurs supraconducteurs | G. Waysand |
| Détecteurs a jonction supra | J.P. Maneval |
| Autres type de bolomètres | A. Benoit |
| Luminescence à basse température | B. Jacquier |
| Photoconducteurs, BIB photovoltaïque | J. Léotin |
| Ionisation à très basse température | M. Chapellier |
| Détection hétérodyne | G. Beaudin |
| Problèmes liés au signal | |
| Photométrie Bruit extérieur de mesure | J.M. Lamarre |
| Ligne , amplification et traitement du signal | G. Jegoudez |
| Mesure en impulsion | |
| Ligne et amplification | R. Bruère Dawson |
| Traitement du signal | M. Bosshard |
| Cryogénie | |
| Machine cryogénique | A. Ravex |
| Cryogénie à très basse température | P. Pari |
| Bruit et environnement | H. Godfrin |

| 1996 : Aussois | |
|---|-----------------------|
| Supraconducteurs, phonons hors-équilibre et acquisitions | |
| Mesure et traitement du signal | |
| Bruits fondamentaux | H. Bouchiat |
| Principales sources de bruits non fondamentaux | A. Richard |
| Traitement du signal (méthodes analogiques) | A. Benoit |
| Traitement du signal (méthodes numériques) | G. Chardin |
| Phonons | |
| Introduction aux phonons, interaction électron-phonon | J. Joffrin |
| Résistance de Kapitza | M. Chapellier |
| Processus de relaxation de l'énergie déposée dans un solide | A. Broniatowski |
| Supraconductivité | |
| Introduction à la supraconductivité, excitation dans les supraconducteurs | L. Dumoulin |
| Jonction tunnel, effet Josephson, détecteur à jonction | J.P. Maneval |
| Détection de particule : état métastable et « transition edge » | V. Jeudy |
| Electronique supraconductrice, amplificateur à SQUID | J.C. Villégier |
| Champs d'application des bolomètres | |
| Bolomètres ionisation / chaleur, | D. L'Hôte |
| Projets spatiaux futurs | J.M. Lamarre |
| PRONAOS | J.P. Torre |
| La problématique du neutrino | M. Cribier |
| Bolométrie pour la détection d'ions | A. Broniatowski |
| Culture scientifique générale | |
| Comptage de photons | Ph. Feautrier |
| Interaction particule matière | D. Lesueur |
| Atelier | |
| Limite ultime des bolomètres | A. Benoit |
| Discussions de montages concrets | D. Yvon |
| Thèses en cours | animé par X.F. Navick |

| 1999 : Balaruc les Bains | |
|---|----------------------------|
| Physique et techniques ultimes pour les détecteurs | |
| Cryogénie | |
| Introduction générale | M. Chapellier |
| Tube pulsé | Ravex |
| Dilution | P. Pari |
| Désaimantation adiabatique | Bossy |
| Physique des basses températures | |
| Chaleurs spécifiques/anormales | P. Garoche / M. Chapellier |
| Conductibilités thermiques/Interfaces | P. Garoche / M. Chapellier |
| Isolant d'Anderson | L. Dumoulin |
| Supraconducteurs | M. Aprilli |
| Physique mise en jeu dans les bolomètres | |
| Principe de base du bolomètre | P. Camus |
| Conversion d'énergie et ionisation | A. Broniatowski |
| Interaction électron – phonons | N. Perrin |
| Transition Edge Sensor | M. Loidl |
| Exemple de détecteurs cryogéniques | |
| Submillimétriques / spiderweb | J.P.Torre |
| Superconducting Tunnel Junction as photon detectors | R. den Hartog |
| Bolomètres massifs ionisation chaleur | X.F. Navick |
| Lecture et traitement de donnée | |
| Ampli à Squid | D. Mailly |
| Statistique élémentaire | J. Bouchez |
| Traitement du signal et analyse de données | G. Chardin |
| Electronique de mesure pour bolomètres | A. Benoit |

| 2002 : Oléron | |
|---|-------------------------------------|
| Physique et techniques | |
| Outils | |
| Cryostats Hélium 3 pompé | J.P. Torre |
| Cryostats à dilution: une approche expérimentale des différents types d'appareils, leur utilisation, leur maintenance | P. Pari / M. Chapellier / A. Benoit |
| Appareils à désaimantation : principe et domaine d'application en bolométrie | J. Hôhne |
| Refroidissement par évaporation tunnel d'électrons Pulse tube | J. Pekola |
| Thermométrie à très basse température : la thermométrie résistive et ses difficultés | |
| Régulation de température | M. Piat |
| Electronique a basse température | Y. Jin |
| Bolomètres | |
| Focalisation, filtrage, absorption | B. Maffei |
| principe du bolomètre avec senseur résistif matrices de bolomètres Multiplexage | P. Camus |
| Isolant d'Anderson | S. Marnieros |
| Supraconducteurs | M. Loidl |
| Mécanisme de la formation d'un signal | |
| Phonons de haute énergie Phonons balistiques et thermalisation finale | A. Juillard |
| Acquisition et traitement de données | |
| Réduction du bruit du a l'environnement | D. Yvon / M. Chapellier |
| Du préamplificateur froid au disque dur Bruit fondamentaux et acquisition tout numérique | A. Benoit |
| Filtrage numérique. Filtre optimum | G. Chardin |
| Culture scientifique | |
| Métrologie | E. Leblanc |
| Le Fond Cosmologique Micro-onde: Connaissances actuelles et futures expériences | J. Delabrouille |
| Autres applications astrophysiques des détecteurs cryogéniques (RX) | C. Pigot |

Les bolomètres
pour la
détection de particules

Cours de Denis L'Hôte

École Internationale Joliot-Curie
de Physique Nucléaire
Maubuisson, 1994



Copie
(accessible sur le site de l'école Joliot-Curie)