



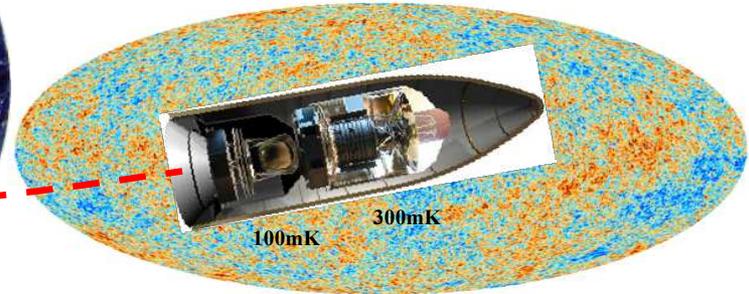
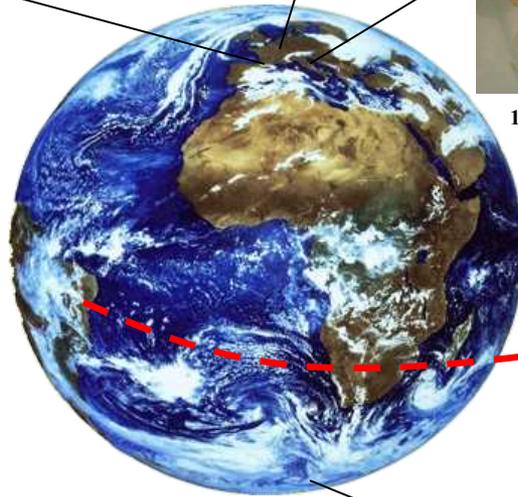
20mK



18mK



10mK



100mK

300mK

300mK



??



# Détecteurs bolométriques refroidis

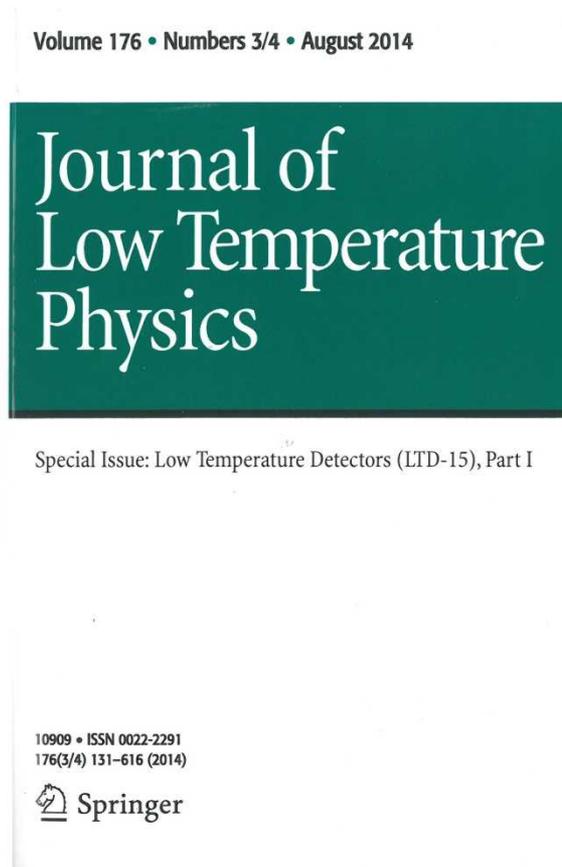
## 1. Principes

# Détecteurs Bolométriques refroidis à TBT: carte d'identité

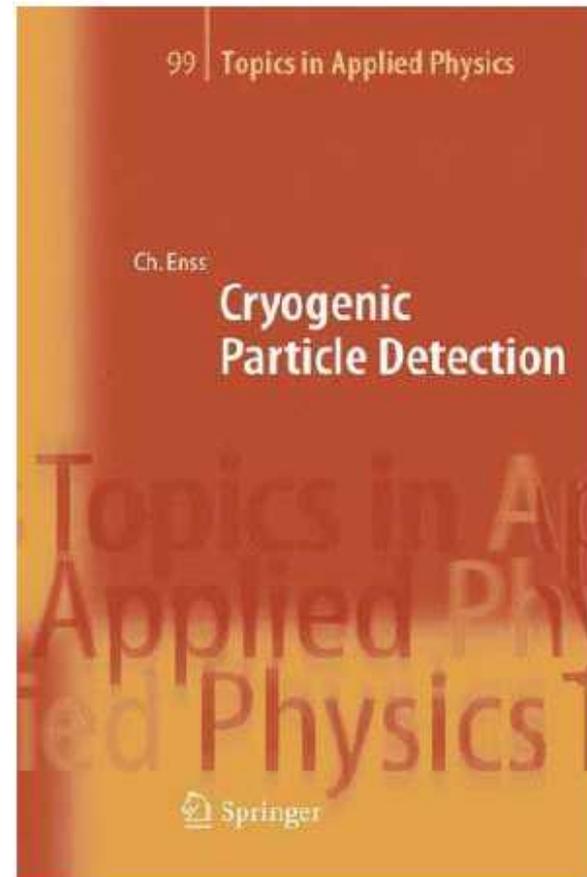
- **Masse ?**  $\mu\text{g} \rightarrow \text{kg}$ : **9 ordres de grandeur !**
- **Constitution cible ?** métaux, semi-métaux, isolants, semi-conducteurs, supraconducteurs...
- **Mesure ?** **de l'eV à 100 GeV;  $10^{-18}$  W en 1s !**
- **Rayonnement ?** particules ionisantes, non-ionisantes, photons submm  $\rightarrow$  gamma...
- **Âge ?**  $\sim 135$  ans (bolomètres IR), 30 ans (particules)
- **Habitât ?** colonise tunnel, labo, montagne, pôle, stratosphère, espace (satellites)...
- **Distinctions ?** capables de  
**pouvoirs de résolutions  $E/\Delta E > 1000$  en spectroscopie X,  $\gamma$ , alpha**  
**mesurer des  $\mu\text{K}$  absolus** (corps noir cosmologique)  
**mesurer des durée de vie rarissimes de radio-isotopes de  $10^{19}$  à  $10^{26}$  ans**  
...

Compte-rendus « LTD »

LTD 15  
(2013)



La première monographie (2005)



+ un cours: Les bolomètres pour la détection de particules

Denis L'Hôte, École Internationale Joliot-Curie de Physique Nucléaire, Maubuisson, 1994

<http://www.cenbg.in2p3.fr/joliot-curie/spip.php?rubrique6&lang=fr>

16th International Workshop on  
**Low Temperature Detectors**

20-24 July 2015

<http://ltd16.grenoble.cnrs.fr>

Abstract submission deadline : 15 May  
Early registration ends : 15 June

contact : [ltd16@neel.cnrs.fr](mailto:ltd16@neel.cnrs.fr)

Logos: CNRS, cea, iram, FOCUS

Site de la conférence:

<http://ltd16.grenoble.cnrs.fr/>

## Programme en cours de finalisation

Tutoriels sur la physique aux basses températures

Physique des capteurs

Techniques de détection et électroniques de lecture

Applications :

- ✓ Astronomie mm & submm
- ✓ Applications X, visible, NIR & Gamma
- ✓ Analyse de matériau et biologie
- ✓ Physique des particules, physique nucléaire
- ✓ Cryogénie

# Une école de formation dédiée

www-ecole-drtbt.grenoble.cnrs.fr

Détection de Rayonnement à Très Basse Température

Le CNRS | Le CEA

dispasser les frontières

Accueil du site >

**Objectifs**

L'objectif de cette école est de former les jeunes chercheurs et techniciens qui feront le succès des projets futurs. Le support écrit des cours dispensés dans cette série d'écoles a une valeur unanimement reconnue dans le domaine. Nous veillerons particulièrement à maintenir un haut niveau de qualité du support des cours et à les diffuser au travers du site internet de l'école et du système HAL du CNRS.

Le programme de l'école couvre les sujets suivants :

- un rappel de la physique des basses températures ;
- les techniques de mise en œuvre des basses températures ;
- l'instrumentation à très faible bruit ;
- la physique des détecteurs ;
- une présentation des principales expériences actuelles ou futures.

**Contexte scientifique**

Plusieurs projets scientifiques de haut niveau utilisent ou développent des détecteurs fonctionnant à très basse température (<1K). Ces techniques exigent des compétences qui ne sont pas enseignées dans les formations classiques de physicien ou d'ingénieur. Plusieurs écoles thématiques ont été organisées par le passé ( la première a eu lieu en 1992 à Aussois ) pour soutenir les expériences de recherche de matière noire par les méthodes cryogéniques ( expériences EDELWEISS et ROSEBUD ). Il existe également un domaine actif en astrophysique millimétrique ( ballons PRONAOS et ARCHEOPS, projet ARTEMIS du CEA, projet Planck de l'ESA ). Ces activités déboucheront sur une nouvelle génération d'expériences ( Satellites pour l'astrophysique des rayons X ou pour la mesure de la polarisation du CMB, projet EURECA pour la matière noire,... ) qui demandent de maintenir un savoir-faire et une communauté active dans ce domaine particulier.

## Ecole de formation sur les DéTECTEURS de Rayonnements à Très Basse Température

- nouveau cycle (2009→)
- un must:  
les archives des écoles  
précédentes
- dernière édition:  
**DRTBT 2012**  
à Lalonde-les-Maures



<http://www-ecole-drtbt.grenoble.cnrs.fr/>

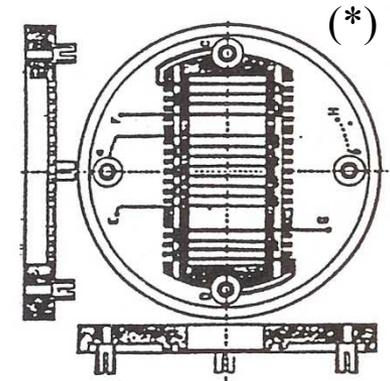
- Historique
  - Principes fondamentaux de la détection
    - pourquoi refroidir ?
  - Techniques cryogéniques courantes en bolométrie
  - Sélection des matériaux du bolomètre
    - par leurs propriétés à très basse température
  - Suivi thermométrique du bolomètre
    - Techniques, principes de lecture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

## □ 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. »*

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

(\*) Absorbéur: Ruban de Pt ( $4\mu\text{m}$ ), noirci; Lecture:  $R(T)$  dans un pont de Wheatstone

# Quelques repères chronologiques

---

- **1881:** 1<sup>er</sup> bolomètre (S. Langley)
- **1903:** Radioactivité & chaleur (P. Curie et A. Laborde)
  - P limite mesurable  $\approx 10^4$  W
- **1908:** Liquéfaction de l'hélium (K. Onnes)
- **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 (F. London)
- **1961:** 1<sup>er</sup> bolomètre Ge à 1.2K (F. Low)
  - essor de l'astronomie IR
- **1974:** saut de T à 15mK sur cosmiques (T. Niinikoski)
- **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

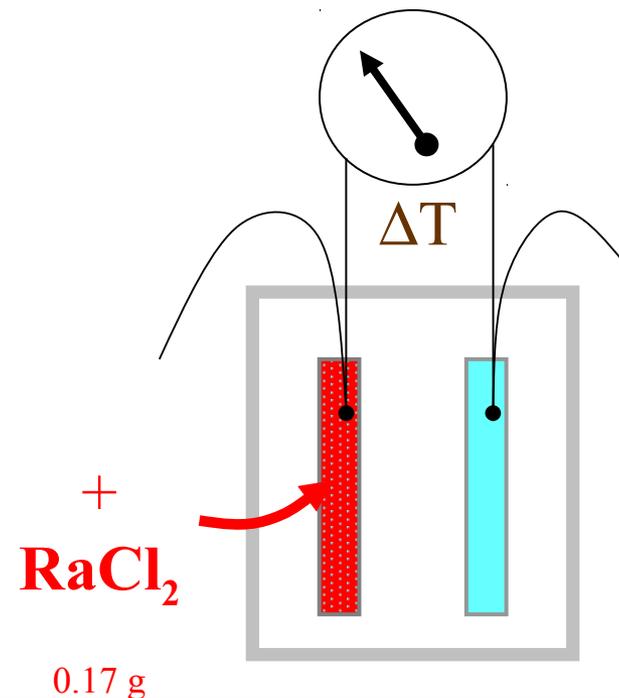
PAR LES SELS DE RADIUM.

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:  $10^{-4} \text{ W}$  ( $100 \mu\text{W}$ )
- ✓ en 2015:  $10^{-18} \text{ W}$  (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.

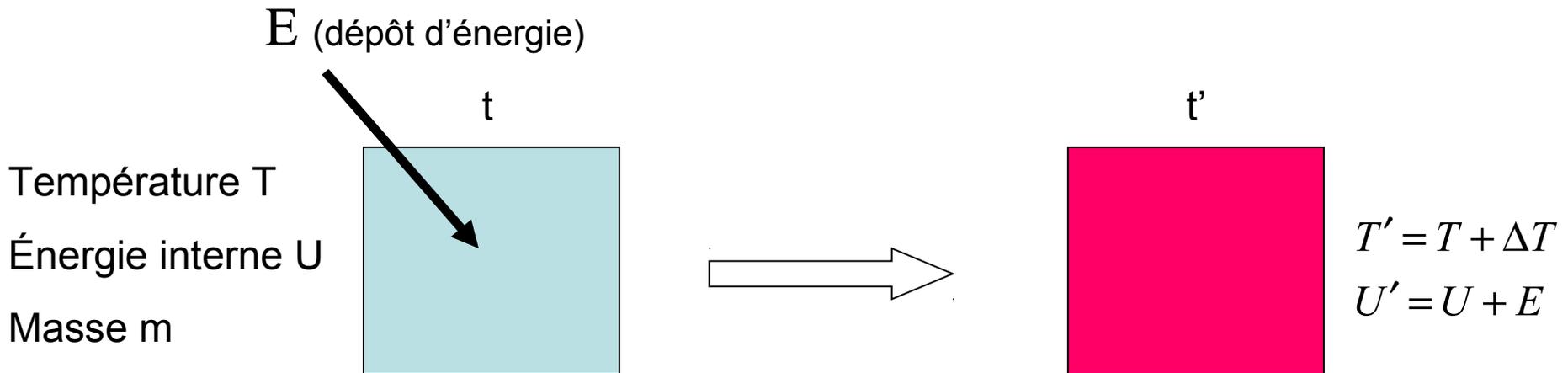
F. SIMON.

Clarendon Laboratory,  
Oxford.  
March 28.

# □ Principes fondamentaux de la détection

- pourquoi refroidir ?

# Principe de la détection



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

Thermométrie :

→ proportionnalité directe  $\Delta T$  &  $E$  ( $\ll U$ )

→ intérêt de  $T \downarrow$ :

- sensibilité  $\Delta T \uparrow$
- compense l'utilisation de cibles massives (recherches d'événements très rares)

Thermodynamique

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

Capacité calorifique ( $\text{J.K}^{-1}$ )

Chaleur spécifique

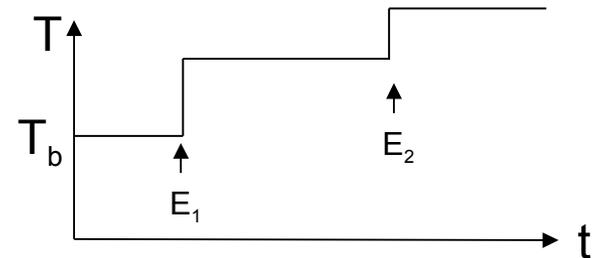
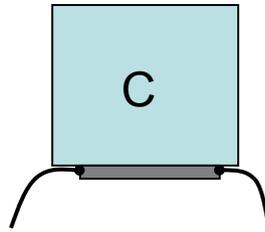
$$C_{(T)} = m \times c_{(T)}$$

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

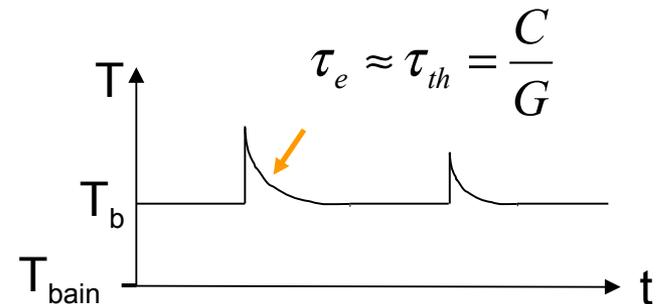
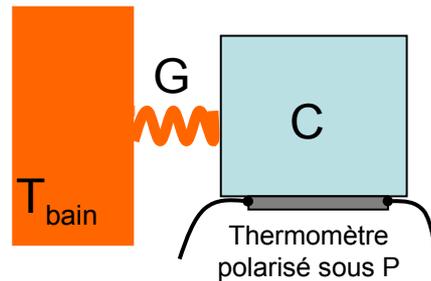
# Principe de la détection

## Détecteur isolé

(ce qui n'arrive jamais !)



## Détecteur couplé



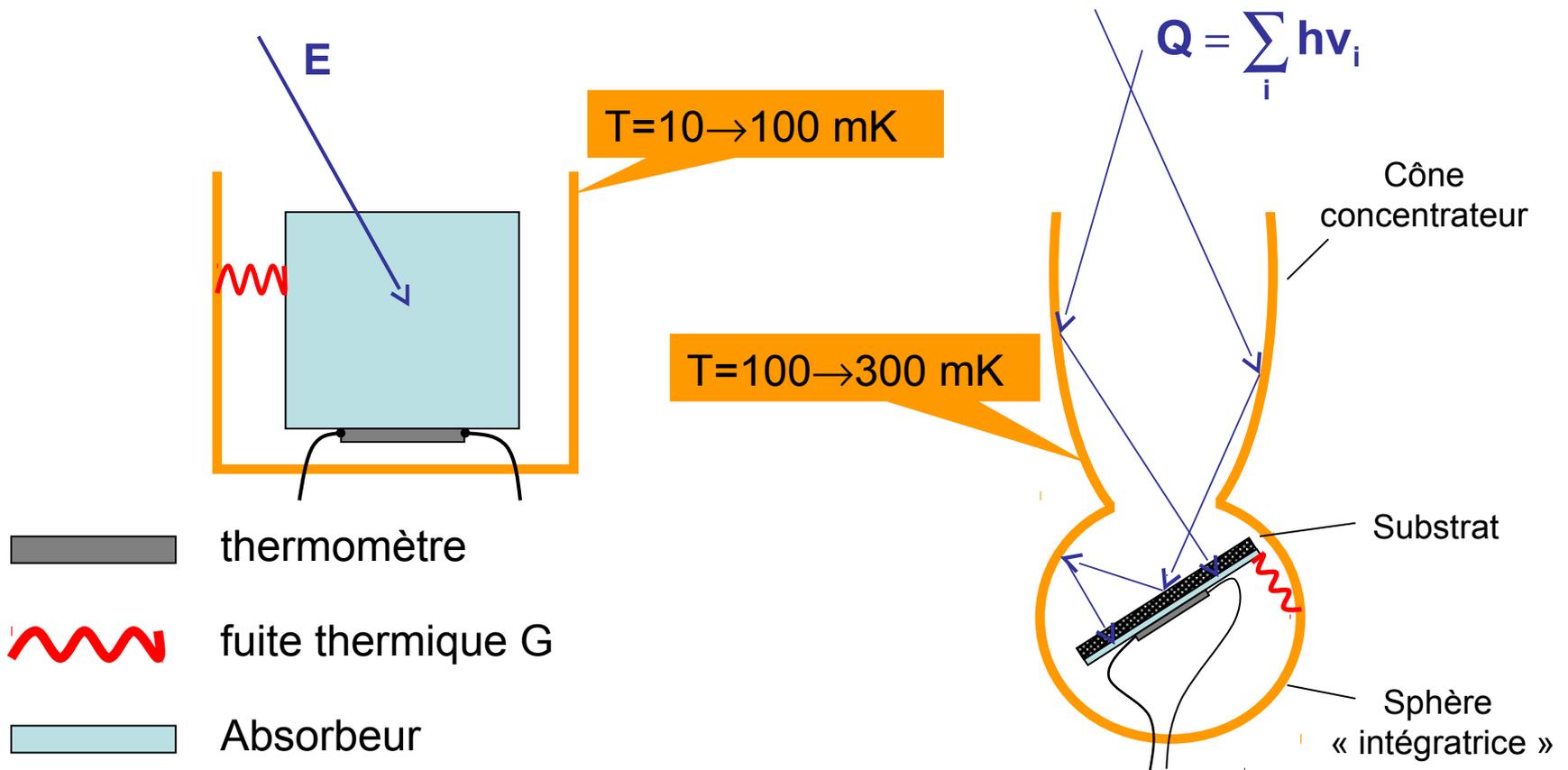
- ❑  $G$  = conductance thermique (« fuite » thermique)
- ❑ « encaisse » le gradient thermique  $T_b - T_{\text{bain}}$  lié à la puissance de polarisation  $P$

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

→ couplage du détecteur à la référence  $T_{\text{bain}}$  (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

Pronoaos

Diabolo

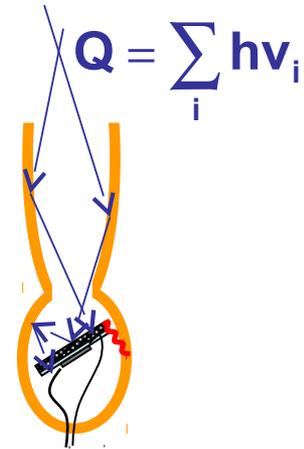
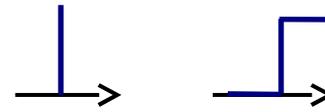
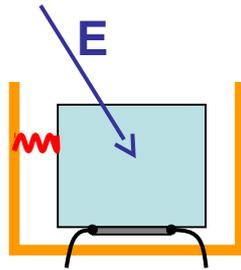
Cible en saphir de 25g, 50g, 200g & 1.2 kg

## Bilan énergétique du bolomètre (simplifié)

Hyp. : polarisation P constante

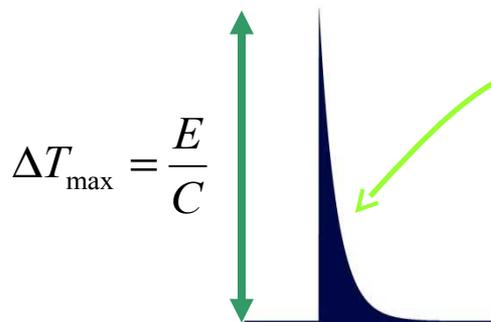
La solution stationnaire de l'équilibre thermique a été soustraite !

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

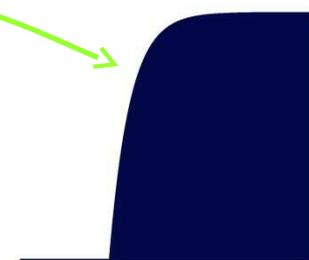


$$\Delta T = \Delta T_{\max} \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_{th}}\right)$$

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

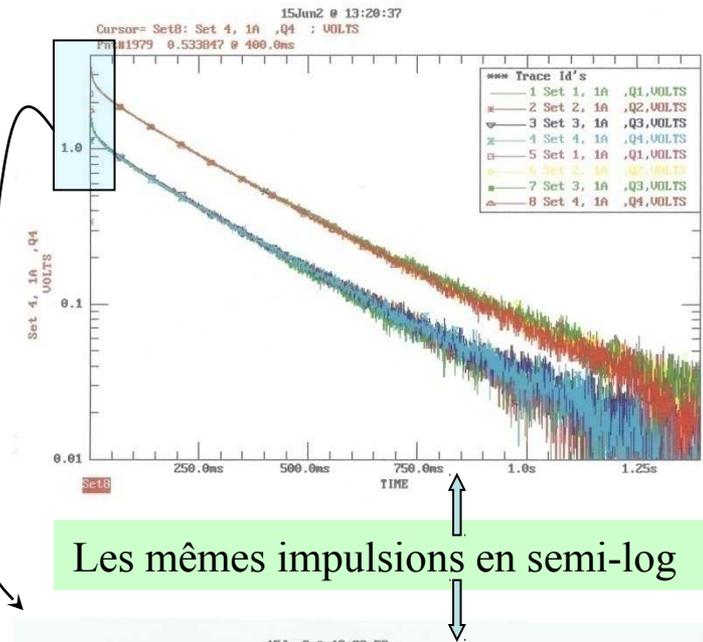
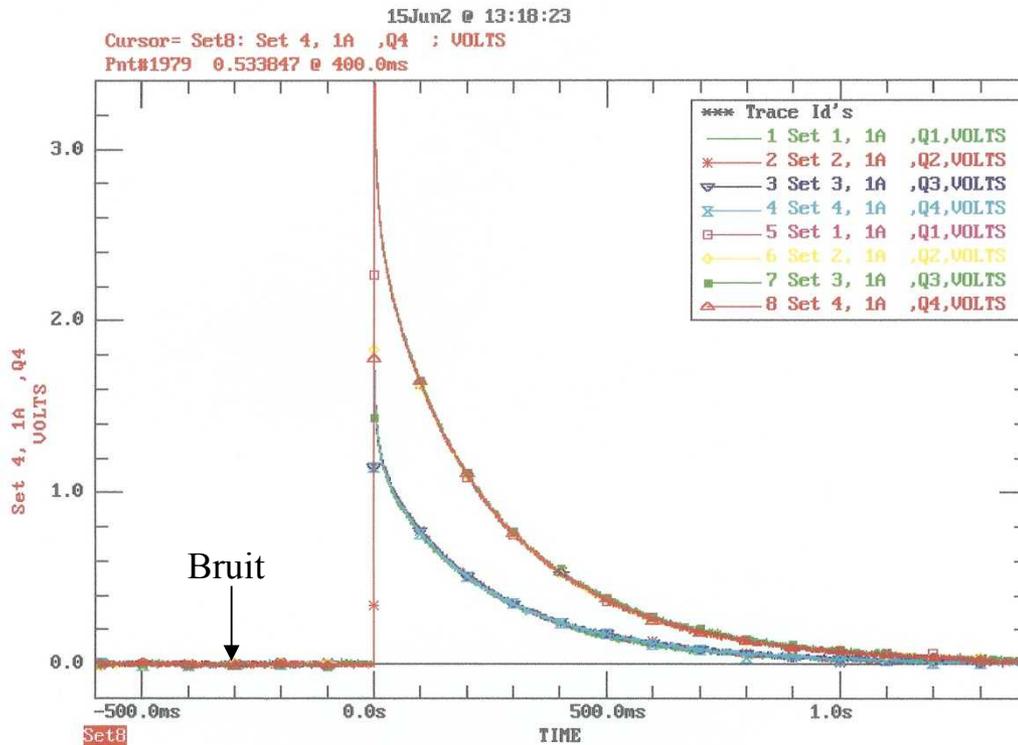


$$\tau_{th} = \frac{C}{G}$$



$$\Delta T_{\max} = \frac{Q}{G}$$

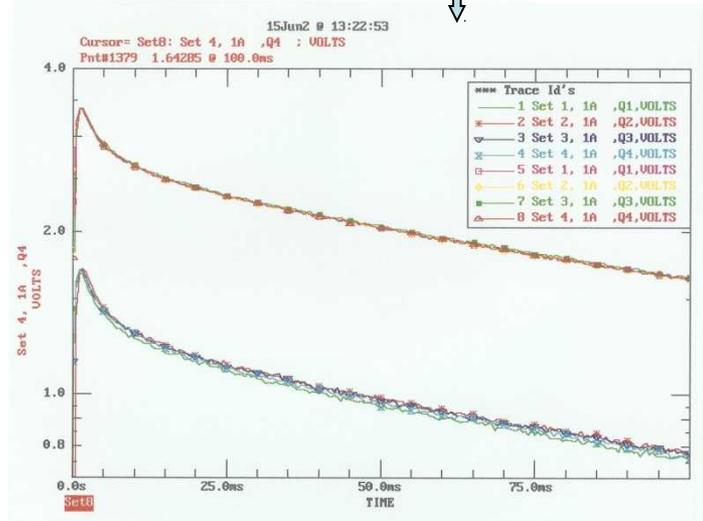
# Quand la réalité n'est pas très loin du modèle...



Bolomètre IAS en saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) & dépôt Bismuth excité par

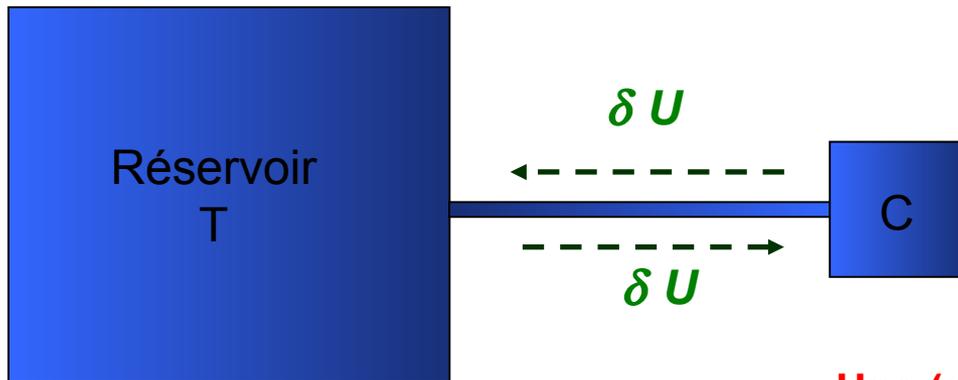
- des  $\alpha$  ( $^{241}\text{Am}$ )
- effet Joule (chauffage d'une résistance collée de  $20\text{k}\Omega$ )

(on a représenté 4 événements de chaque type, superposés)



# Résolution ultime en énergie

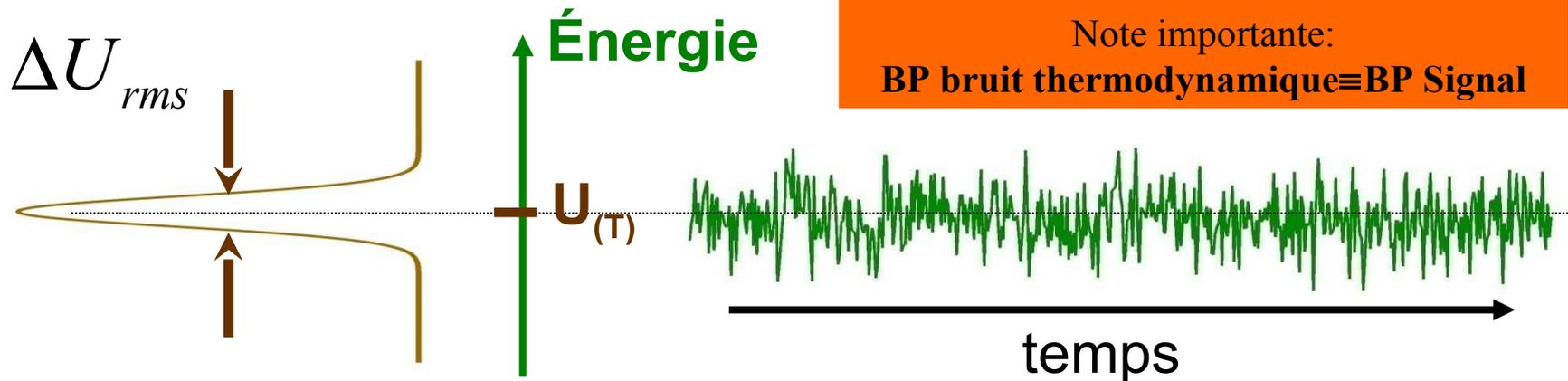
Le bolomètre, même isotherme à  $T$ , échange de l'énergie en permanence avec le réservoir, via la fuite thermique... → son énergie interne  $U$  fluctue !



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)
- 1) Calorimétrie absolue possible sur faisceau
  - Intégration
- 1) 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)**

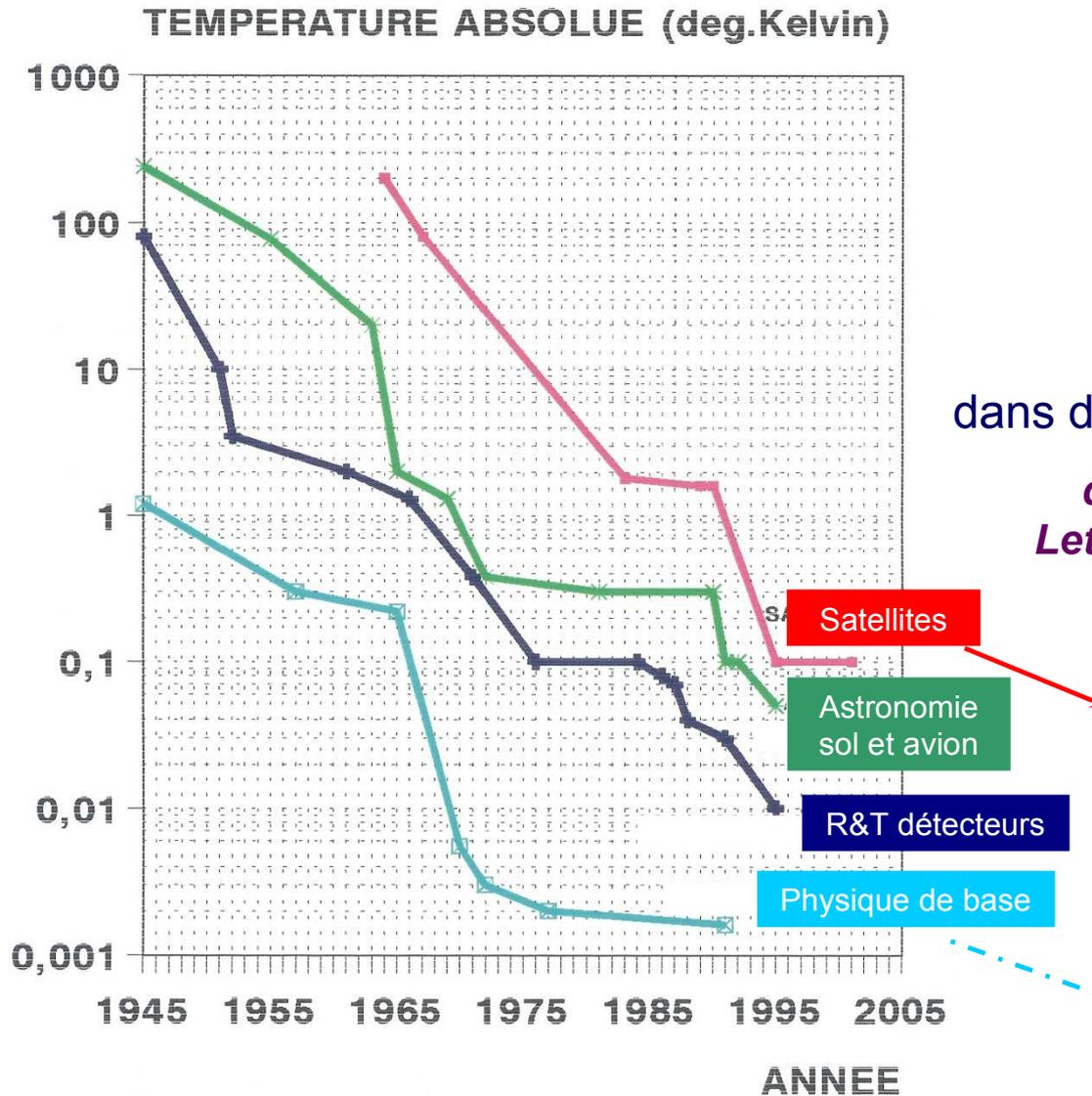
## 2) Cryogénie indispensable

→ 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

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

Satellites

SUZAKU (2005)  $T=58\text{mK}$

PLANCK-HFI (2009)  $T=100\text{mK}$

PHARAO (2017?)  $T\sim\mu\text{K}$   
horloge à fontaine atomique

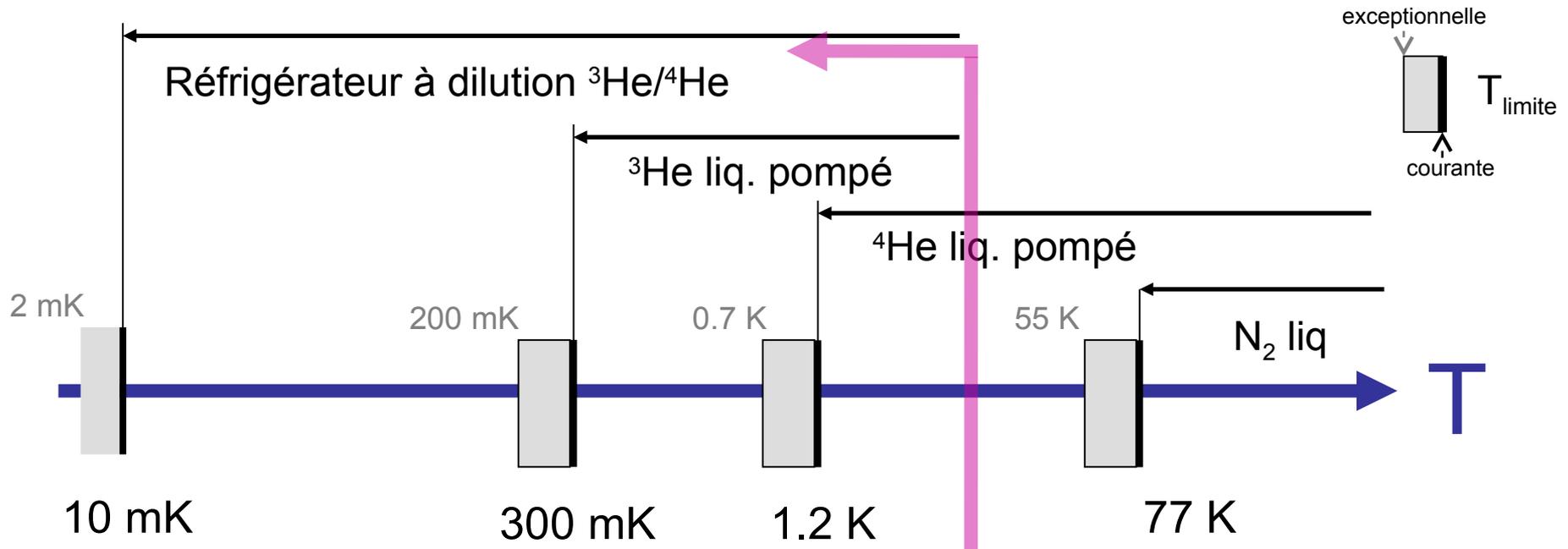
Astronomie  
sol et avion

R&T détecteurs

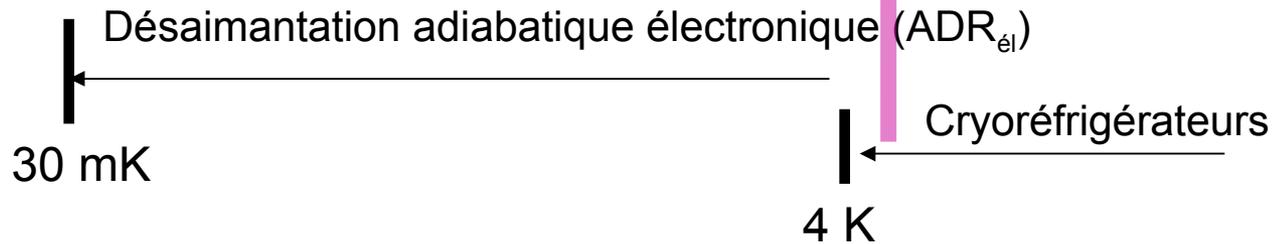
Physique de base

MIT (2003)  $T\sim 500\text{pK}$   
(condensat de Bose-Einstein)

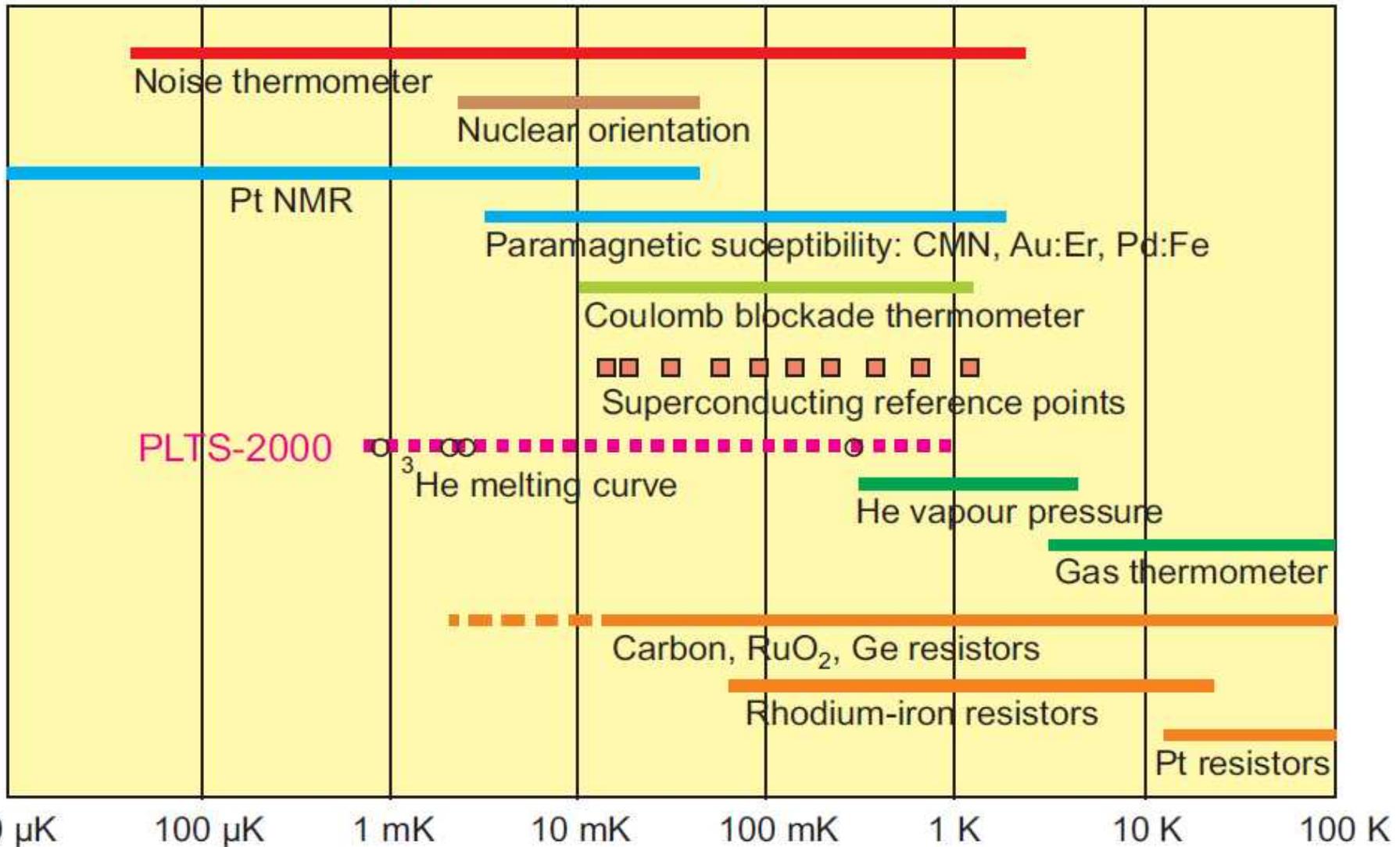
# Techniques de réfrigération en continu



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



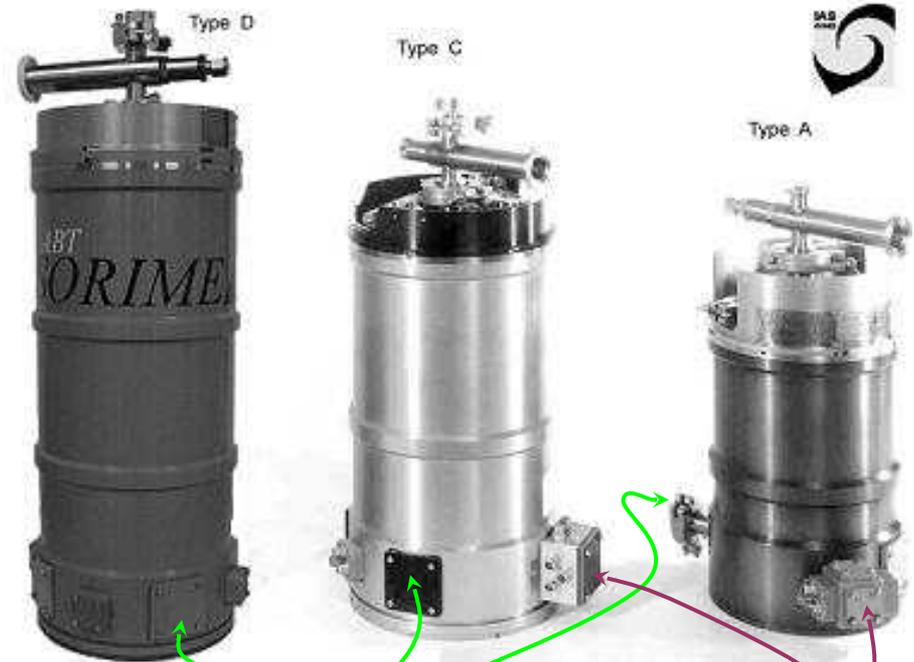
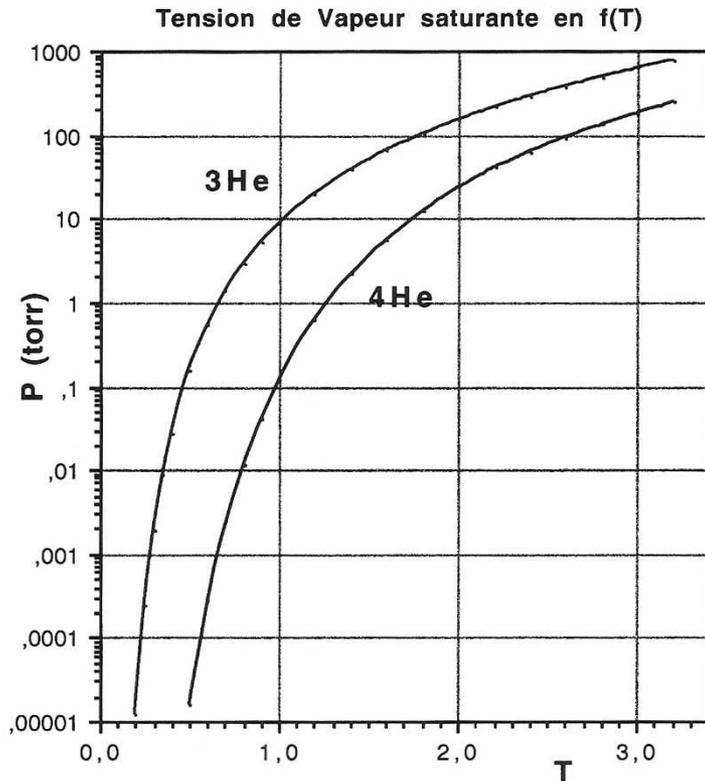
# Références Thermométriques à Basse Température



*d'après A.Kirste, Kryo 2014, Berlin*

# 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

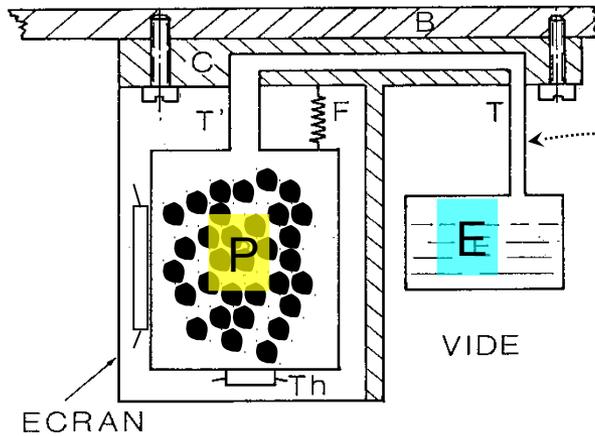
Précision d'alignement : la chambre optique se déplace de moins de 110 microns pour une inclinaison de  $90^\circ$

Licence ABTSorime ([www.abtsorime.fr](http://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

Ballons: OK  
Satellites: NON

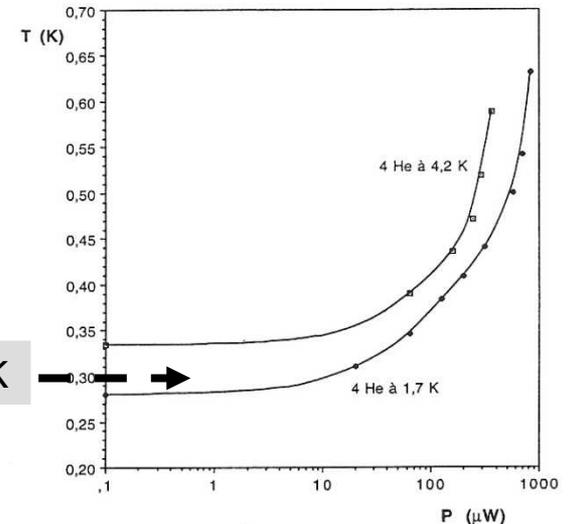
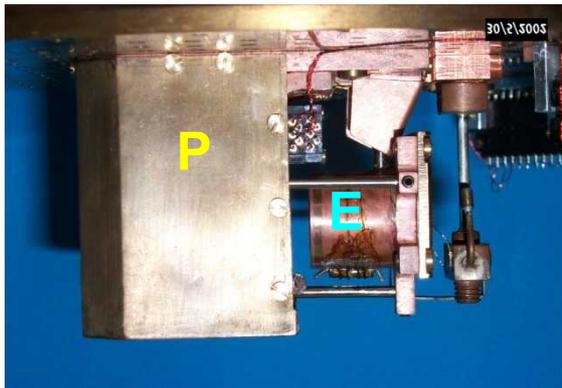
1) chauffage pompe  $\rightarrow 25\text{K}$ ; liquéfaction par gravité dans E

2) évaporation

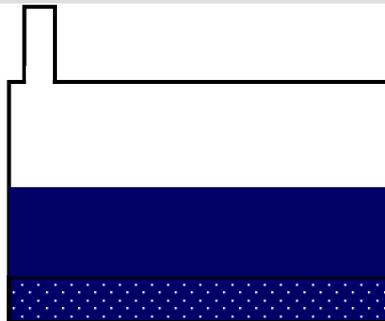
Avantages:

- 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  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  à  $T < 0.86$  K en 2 phases:
  - phase concentrée (riche en  $^3\text{He}$ ) moins dense ( $\rightarrow$  surnage)
  - phase diluée (pauvre en  $^3\text{He}$ ) avec une concentration minimale non nulle en  $^3\text{He}$ :  $X=6.4\%$
- ✓ un phénomène quantique:
  - $^3\text{He}$  ( $J=1/2$ ) est un fermion
  - $^4\text{He}$  ( $J=0$ ) est un boson



concentré  
dilué

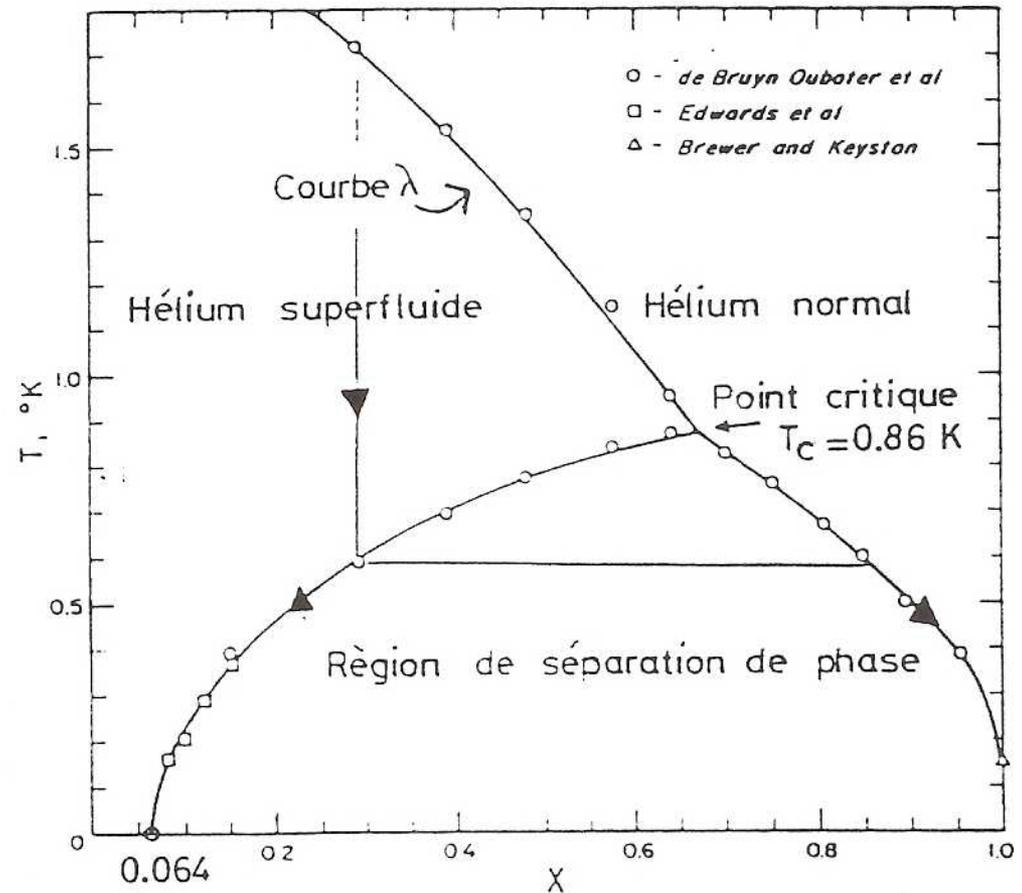


Diagramme de phase des mélanges  $^3\text{He}$  -  $^4\text{He}$

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

## Principe:

- ✓ on force des atomes  $^3\text{He}$  à changer de phase: concentré  $\rightarrow$  dilué
- ✓ le phénomène est endothermique  $\rightarrow$  production de froid à l'interface (cf. évaporation de l'alcool)

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

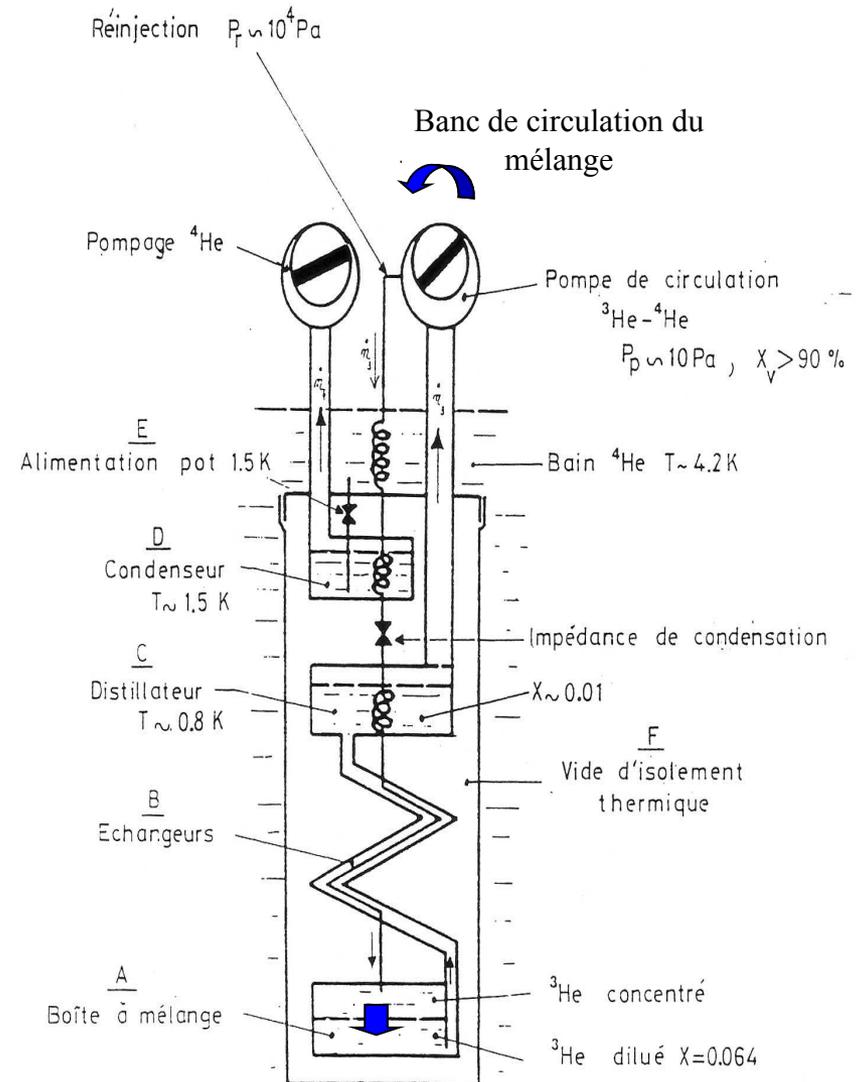
10  $\mu\text{W}$   $\rightarrow$  100  $\mu\text{W}$   
@ 100 mK

Température  
boîte à mélange (K)

Débit  $^3\text{He}$  (moles/sec)

- ✓ réglage et conception délicats !
- ✓ mais **excellente expertise en France !**

**CEA / SPEC à Saclay, Inst. Néel à Grenoble**





Exemple:

Sans « pot 1.5K »

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

- réfrigérateur DR-JT-S-200-10
- fabricant Cryoconcept

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

(partenariat CEA / SPEC)

Prix 2005

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



bride 4K

distillateur  
échangeur continu

échangeurs discrets

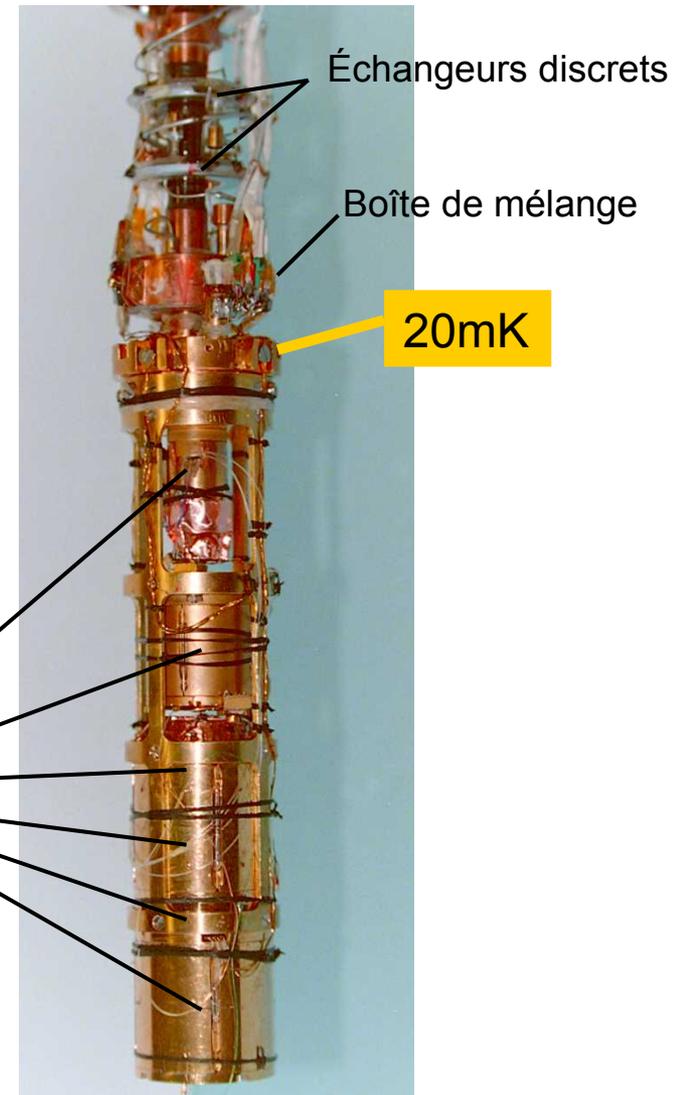
boîte à mélange

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

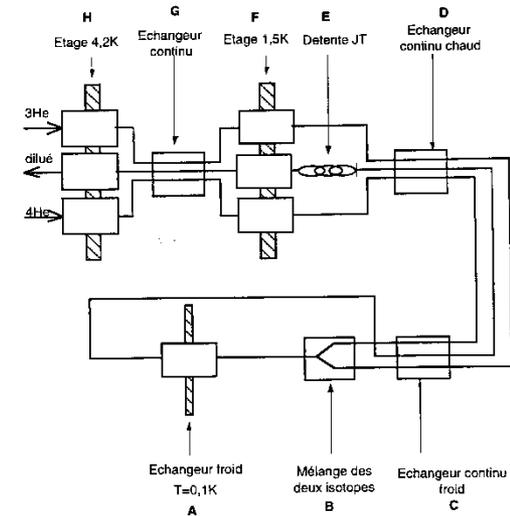


- ✓ conception P. Pari (CEA/SPEC)
- ✓ transportable (→ ROSEBUD; Espagne)
- ✓ sans pot 1.5K
- ✓  $P_{\text{injection}} = 0.6 \text{ bar}$ ;  $P_{\text{aspiration}} = 0.6 \text{ torr}$
- ✓  $20 \mu\text{W} @ 100 \text{mK}$
- ✓  $T_{\text{limite}} = 20 \text{ mK}$  obtenue en  $\frac{1}{2}$  journée depuis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

6 bolomètres

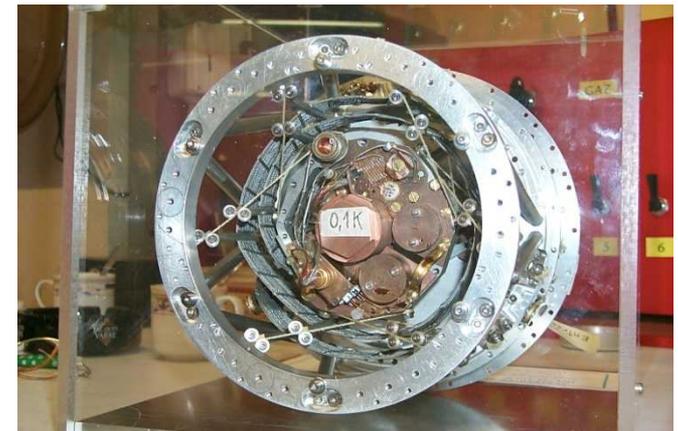
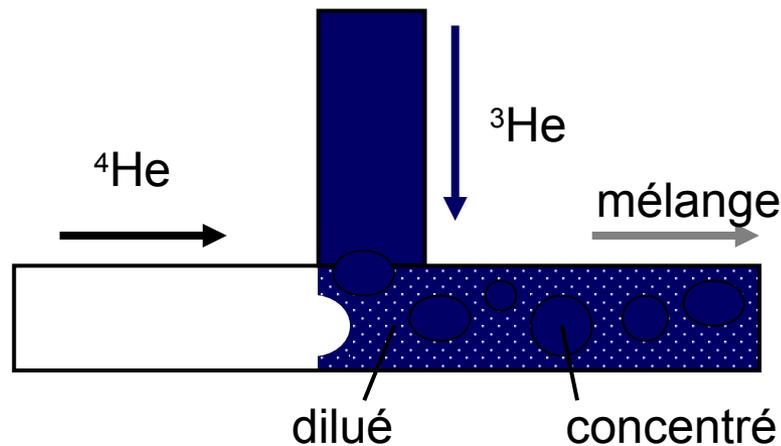


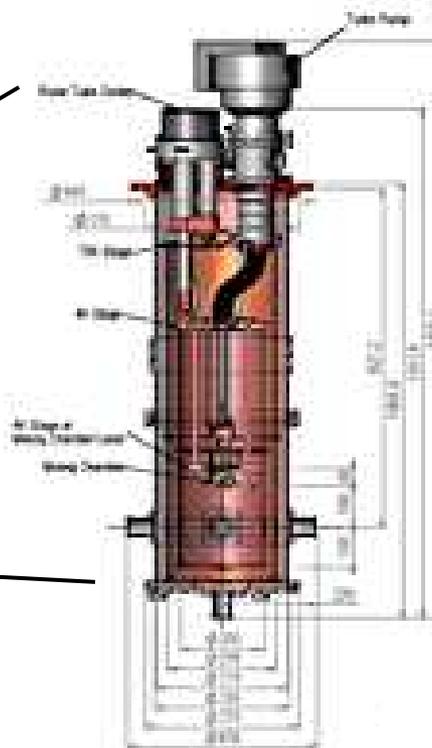
- ✓ dilution à cycle ouvert (gaz non récupéré)
- ✓ conception CRTBT (Grenoble)
- ✓  $^3\text{He}$  et  $^4\text{He}$  sont injectés à partir de réserves HP dans un capillaire ( $\varnothing 300\mu\text{m}$ ): des bulles de concentré maintenues par la tension superficielle se forment dans la phase diluée. 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

**VeriCold**  
Technologies

[www.vericold.com](http://www.vericold.com)

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

**VeriCold**  
Technologies

**JANIS**  
Research Company

Microcalorimètre X POLARIS®



Bolomètre  
X à 100mK

15 eV @ 5 keV



ADR:  $T \approx 50\text{-}100\text{mK}$   
Consommation: 6kW  
35 kg; H:1.2m x Ø 24 cm;  
Automatisé et stabilisé  
"Se refroidit pendant la nuit, prêt le matin !"  
Prix ADR seul  $\approx 250$  k€ en 2005

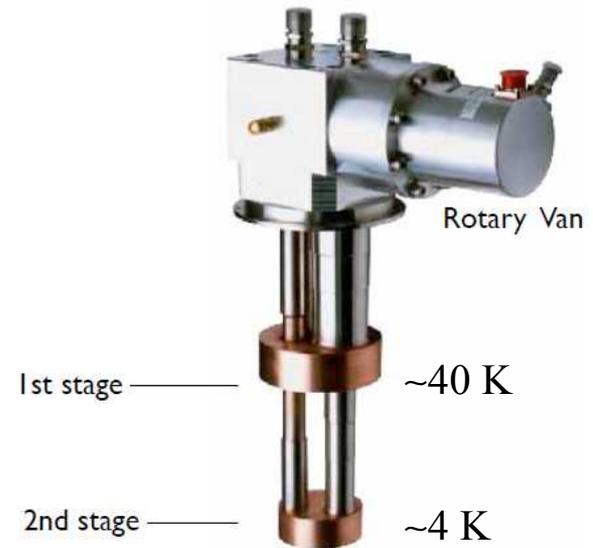
$T \approx 50$  mK-100mK pendant 2 jours  
ADR à 2 étages  
Cryocooler: tube pulsé 4K  
[www.janis.com](http://www.janis.com)

# Cryoréfrigérateurs

Ecole de formation sur les Cryoréfrigérateurs: AUTRANS 6-8 octobre 2010



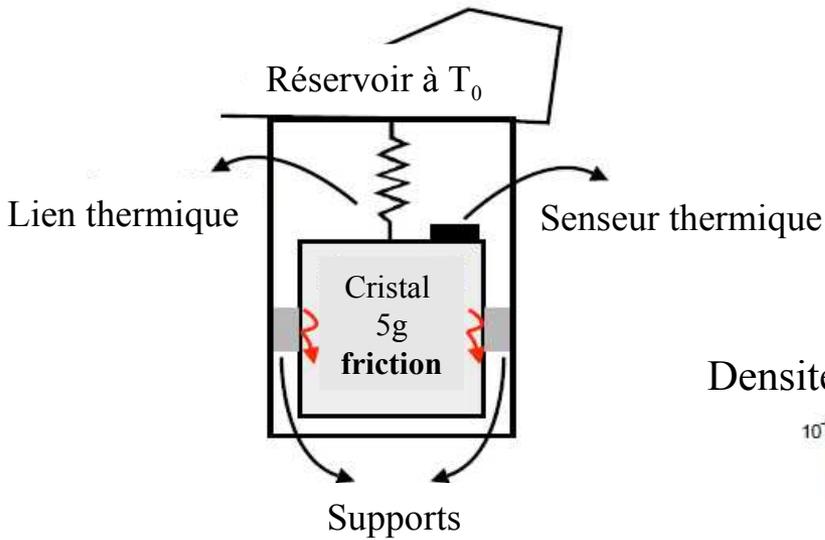
Sumitomo



CD disponible (40€) sur le site de l'Association Française du Froid  
Commission Cryogénie et Supraconductivité

<http://affccs.grenoble.cnrs.fr/>

# Une nécessité: réduire les vibrations des cryo-réfrigérateurs (Pulse Tubes)

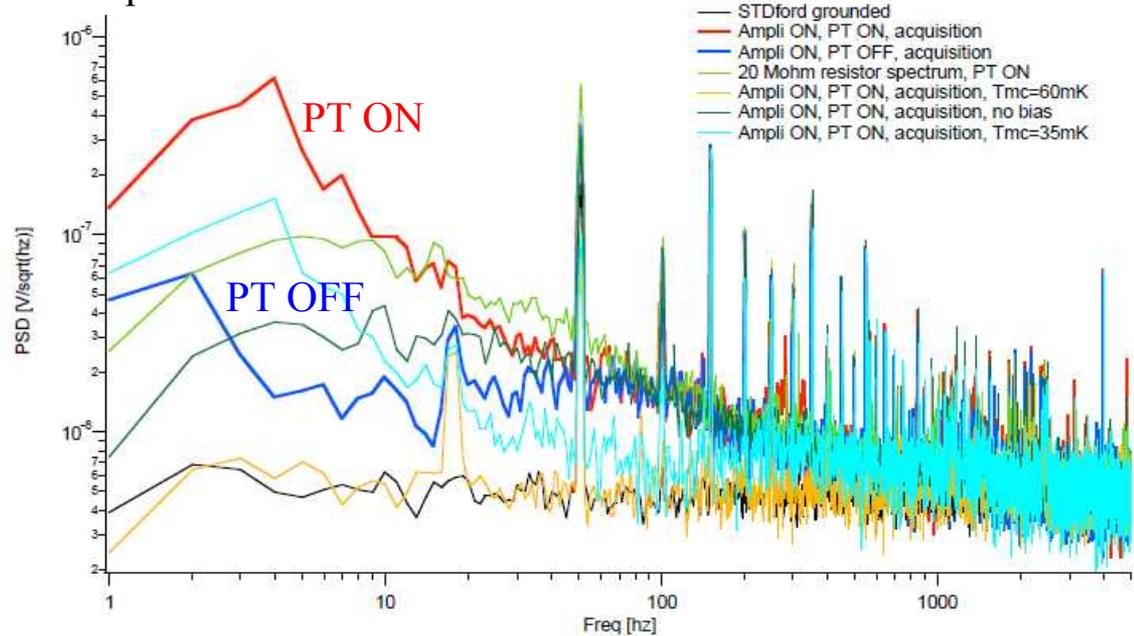


Injection de chaleur par friction

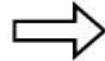


$$E = m g \Delta h \sim 5 \cdot 10^{-2} \text{N} \times 1 \text{Å} \rightarrow E_{\text{relâchée}} \approx 31 \text{ MeV} !$$

Densité spectrale de bruit du senseur



Bolomètre de 5g @ 20mK  
(mesures au sol)



*Extrait du cours  
d'Emiliano Olivieri  
(ED 107 IdF)*

## ❑ 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...

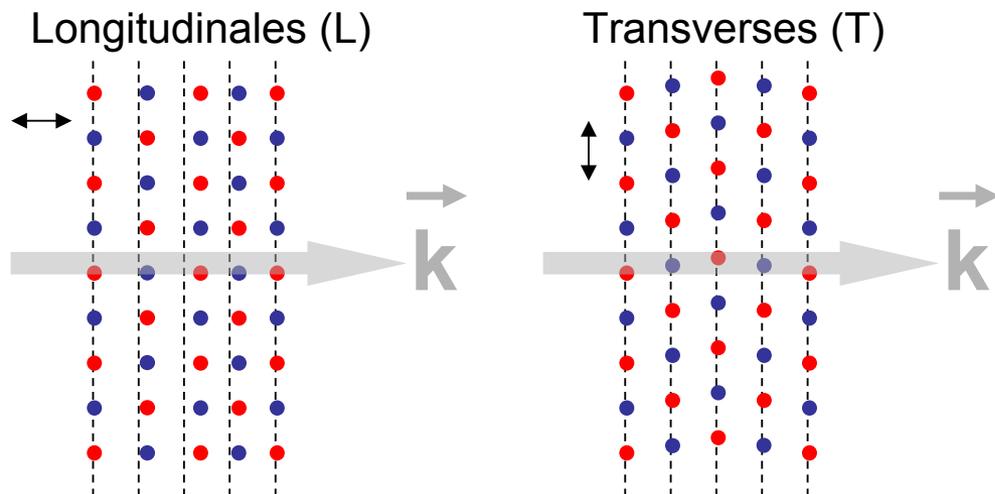
$$C(T) = c_1 T + c_3 T^3$$

- 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  $\mu\text{eV}$  (20mK)  
25  $\mu\text{eV}$  (100mK)



## Ondes acoustiques



Direction de propagation de l'onde

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

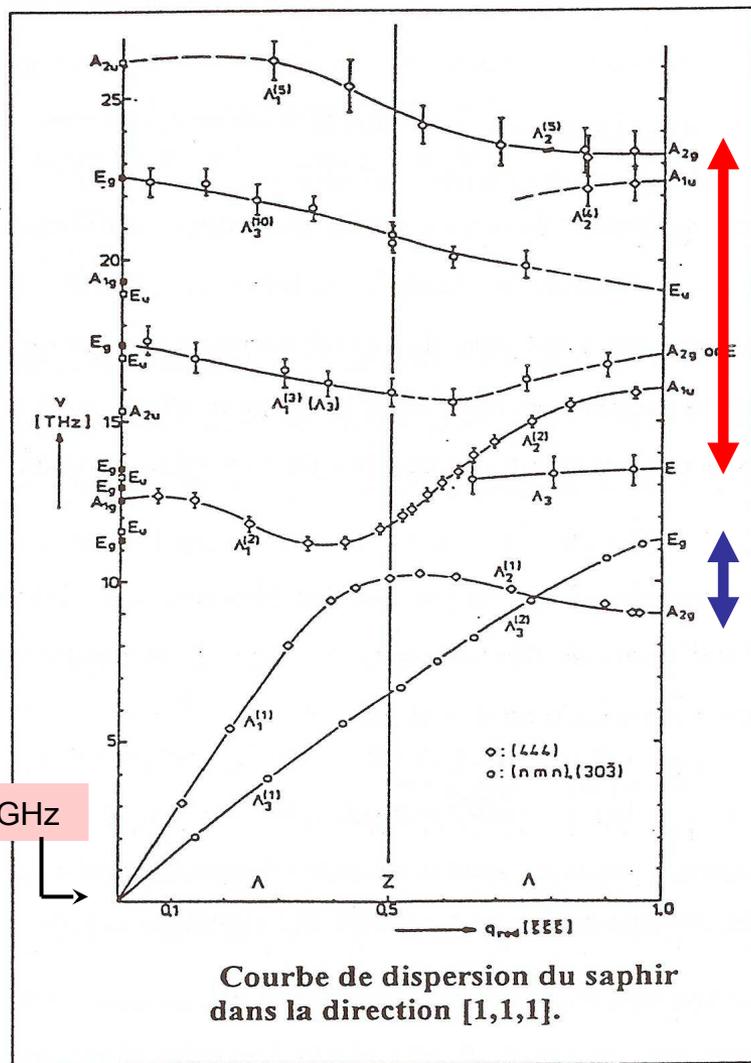


Seules les branches acoustiques sont excitées, dans leur partie linéaire ( $\omega \propto k$ ; hypothèse de Debye)

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



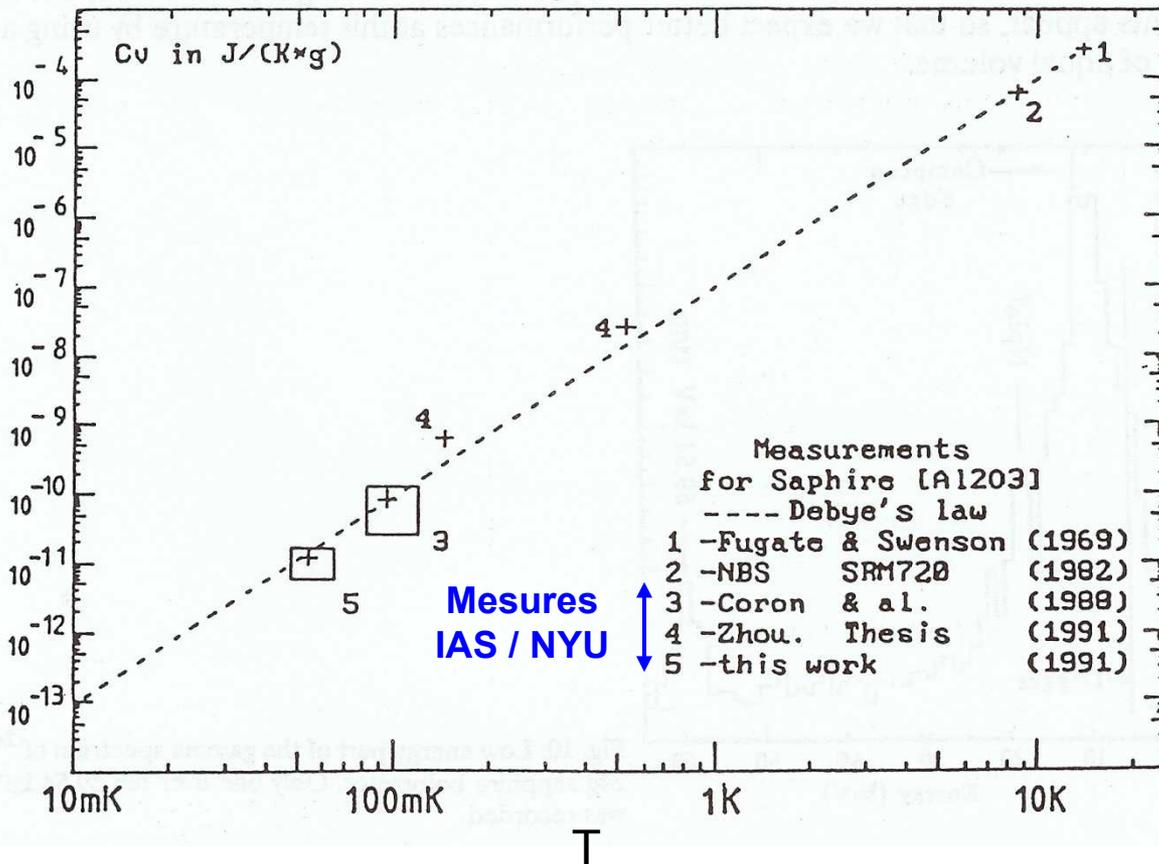
$\nu = \omega/2\pi$  (en THz)

5.9 GHz

Branches optiques

Branches acoustiques

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



Matériau	$\Theta_{\text{Debye}}$
C <sub>diamant</sub>	2230 K
Saphir (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1035 K
Si	645 K
Ge	374 K
Cu	343 K

P. Debye  
1884-1966



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

# C(T) des métaux: terme électronique

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

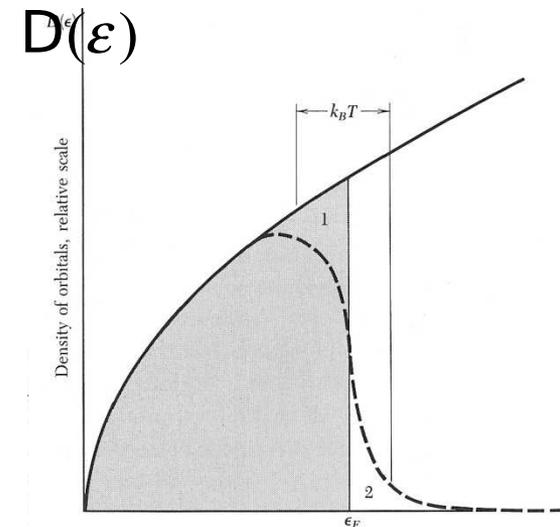
✓ tous les électrons ne participent pas: seuls les électrons du niveau de Fermi peuvent gagner de l'énergie par agitation thermique

Nombre d'électrons ( $\infty$  m !)

*d'après Kittel*

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

densité d'états  
au niveau de Fermi



## Applications Numériques:

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

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

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

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
<b>Bolomètre à cible isolante</b>	Phonons	$10^{-5}$ eV à $10^{-4}$ eV
<b>Bolomètre à cible métallique</b>	Excitation d'électrons de conduction	$\ll 10^{-5}$ eV

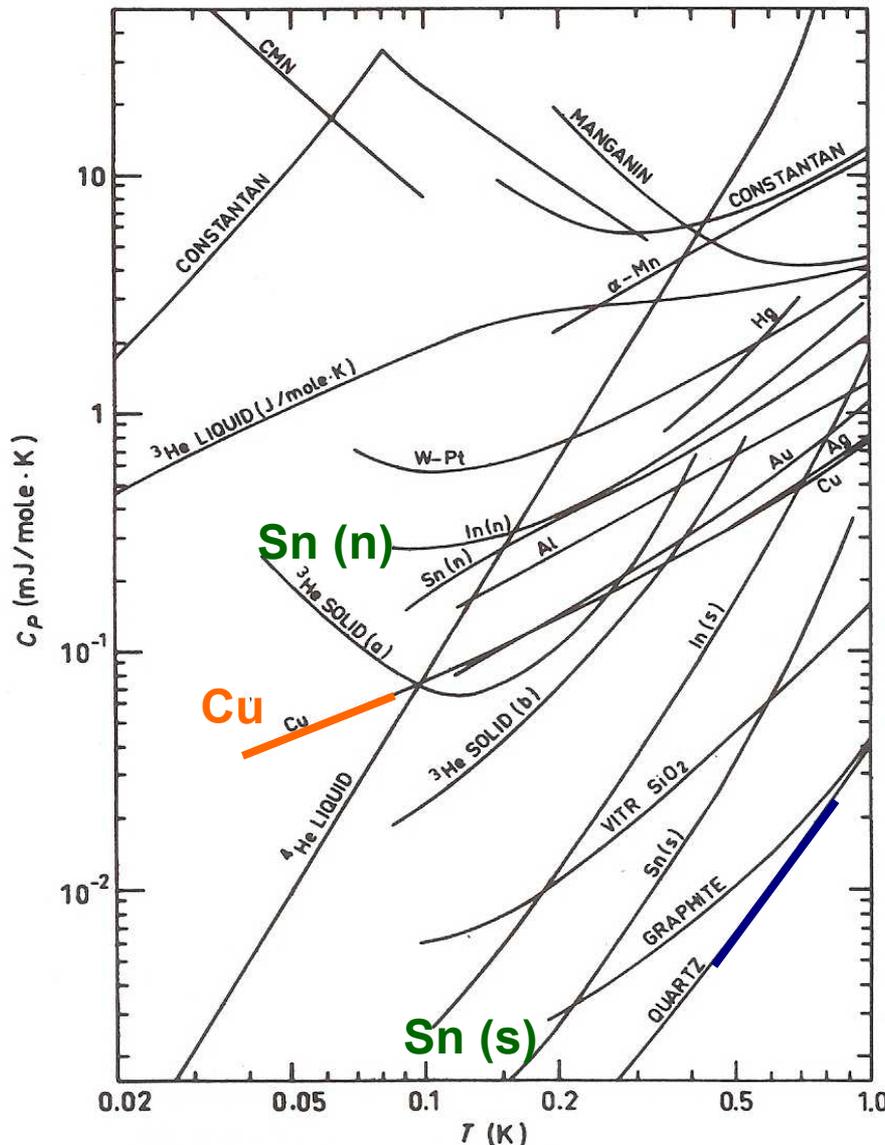
 Détecteurs refroidis

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

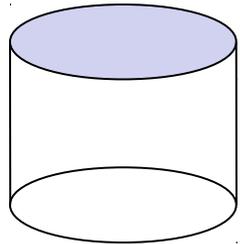
Différence état vitreux (silice)/cristallin (quartz)

**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
--	--------------------------------------	--------------------------------------	-----------

1.2 kg saphir (monocristal  $Al_2O_3$ );  $A \approx 10^{-4} J \cdot K^{-4}$

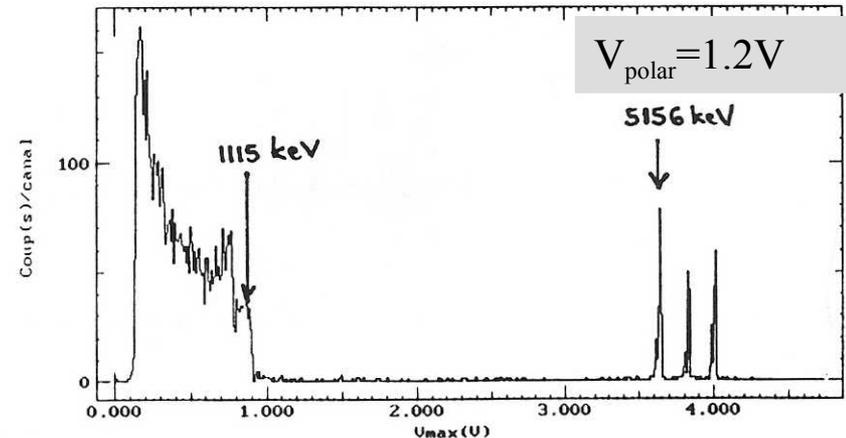
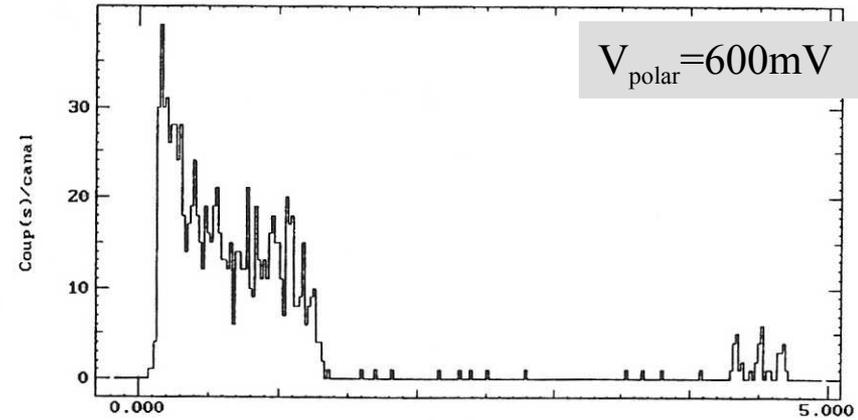
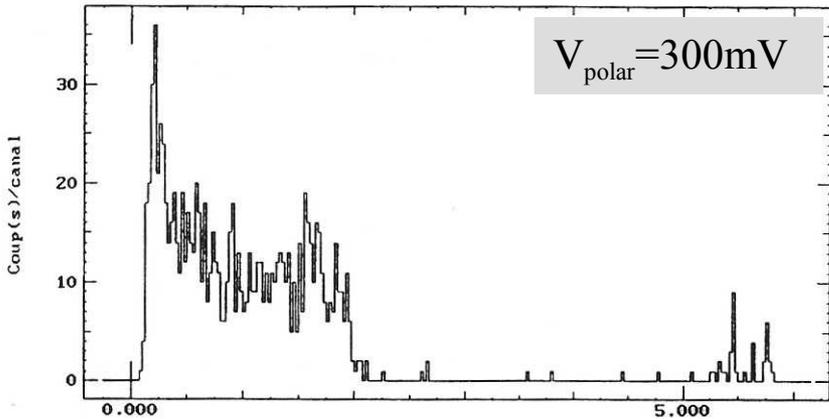
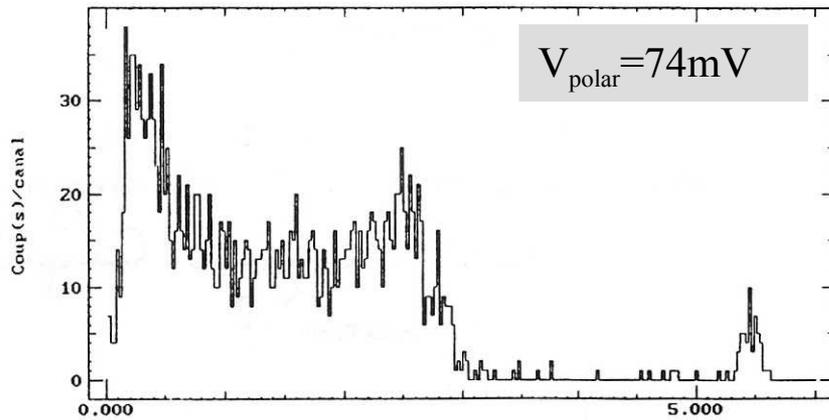
T				pour $\Delta E = 10 \text{ keV}$
10 mK	$10^{-10}$	2.4 eV	1.5 MeV	0.3 %
100 mK	$10^{-7}$	740 eV	15 GeV	$3 \cdot 10^{-7}$
300 mK	$3 \cdot 10^{-6}$	12 keV	1.2 TeV	$2.1 \cdot 10^{-9}$
1 K	$10^{-4}$	240 keV	15 TeV	$3 \cdot 10^{-11}$



1mg Cu (pastille  $\varnothing = 2.2 \text{ mm}$  ;  $e = 30 \mu\text{m}$ );  $\gamma \approx 10^{-8} J \cdot K^{-2}$

T				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 $^{60}\text{Co}$ et source triple $\alpha$ (mesures IAS)

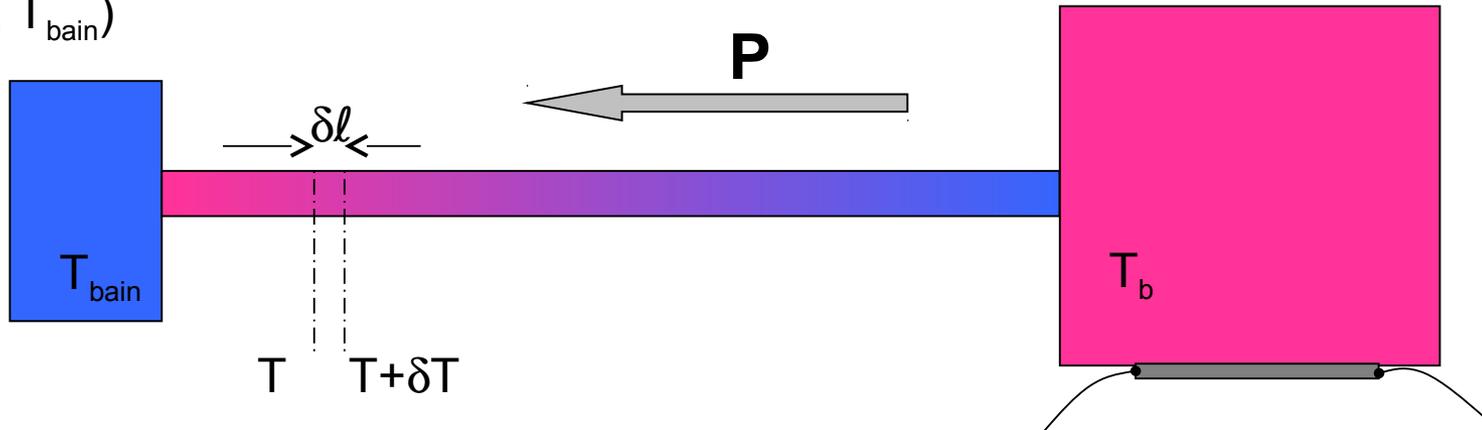
en augmentant la tension de polarisation (donc le courant, donc sa température) le bolomètre récupère en linéarité. Dans les configurations « non-linéaires », on observe une forte distortion des constantes de temps (l'aire est alors le bon estimateur de l'énergie: c'est une propriété de l'équation du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

# Conductance thermique G: plus précisément...

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

définit G (en  $\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$ ) comme une fonction de  $T_b$  et  $T_{\text{bain}}$  : en toute rigueur

$G(T_b, T_{\text{bain}})$

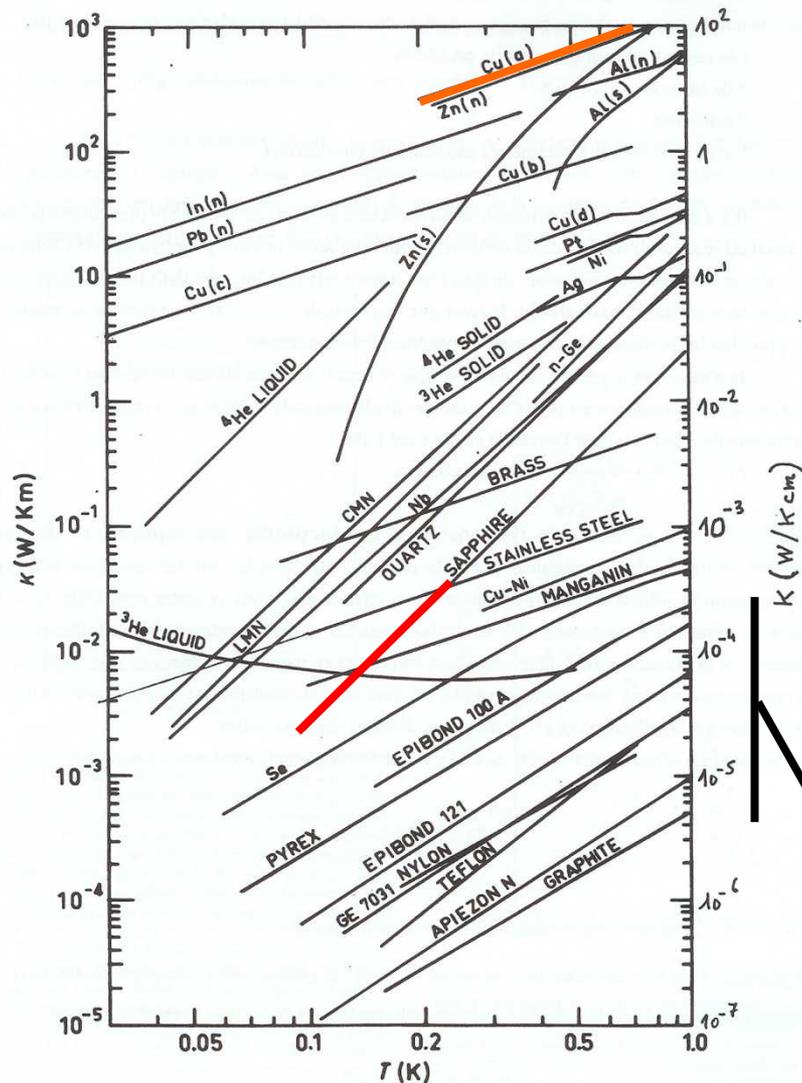


$$\delta T = \frac{P}{A\kappa(T)} \delta l$$

- segment  $\delta l$  de fuite (section A constante, longueur totale L)
- $\kappa(T)$  conductivité thermique (en  $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )
- 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) :

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

A très basse T,

▪ Isolants:

- l. p.m.  $\approx$  taille échantillon
- $V_{\text{porteurs}} = V_{\text{son}}$

→  **$K \propto C$**

▪ Métaux

- l. p.m.  $\approx$  cste (impuretés)
- $K \propto \sigma$  (loi de Wiedemann-Franz)
- $V_{\text{porteurs}} = V_{\text{Fermi}} \gg V_{\text{son}}$

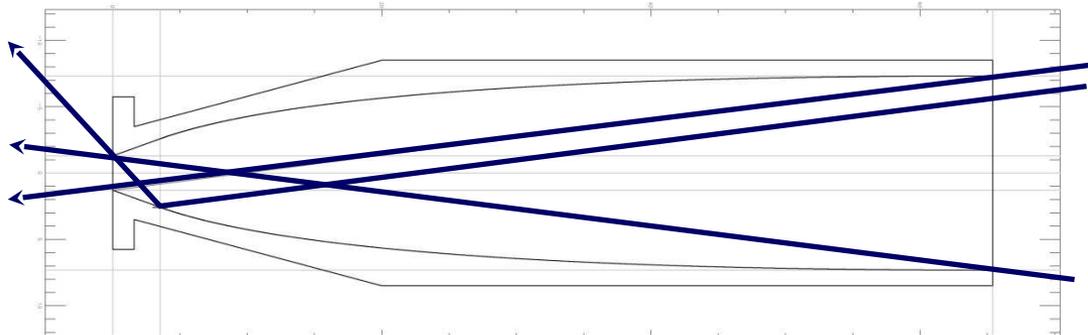
Plastiques, colles  
alliages, verres

Lähteenmäki (1973)

# Autres grandeurs thermodynamiques importantes...

- Diffusivité thermique  $D$  (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  $L$
$$D = \frac{K}{C_v}$$
$$\tau \approx \frac{L^2}{D}$$
- Résistance de Kapitza  $R_K$  (en  $\text{K.W}^{-1}$ )
  - Gradient de  $T$  aux interfaces (surface  $\Sigma$ )
    - 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  $\rightarrow$  casse !
    - Éviter absolument les chocs thermiques  $\rightarrow \pm 1 \text{ K / mn préconisé}$

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

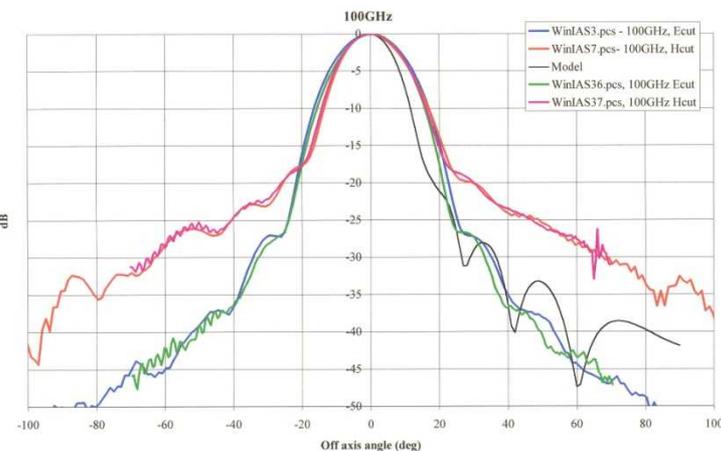


Réalisations bolomètres IAS/collecteurs IR-Lab  
(calibration Planck-HFI)



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

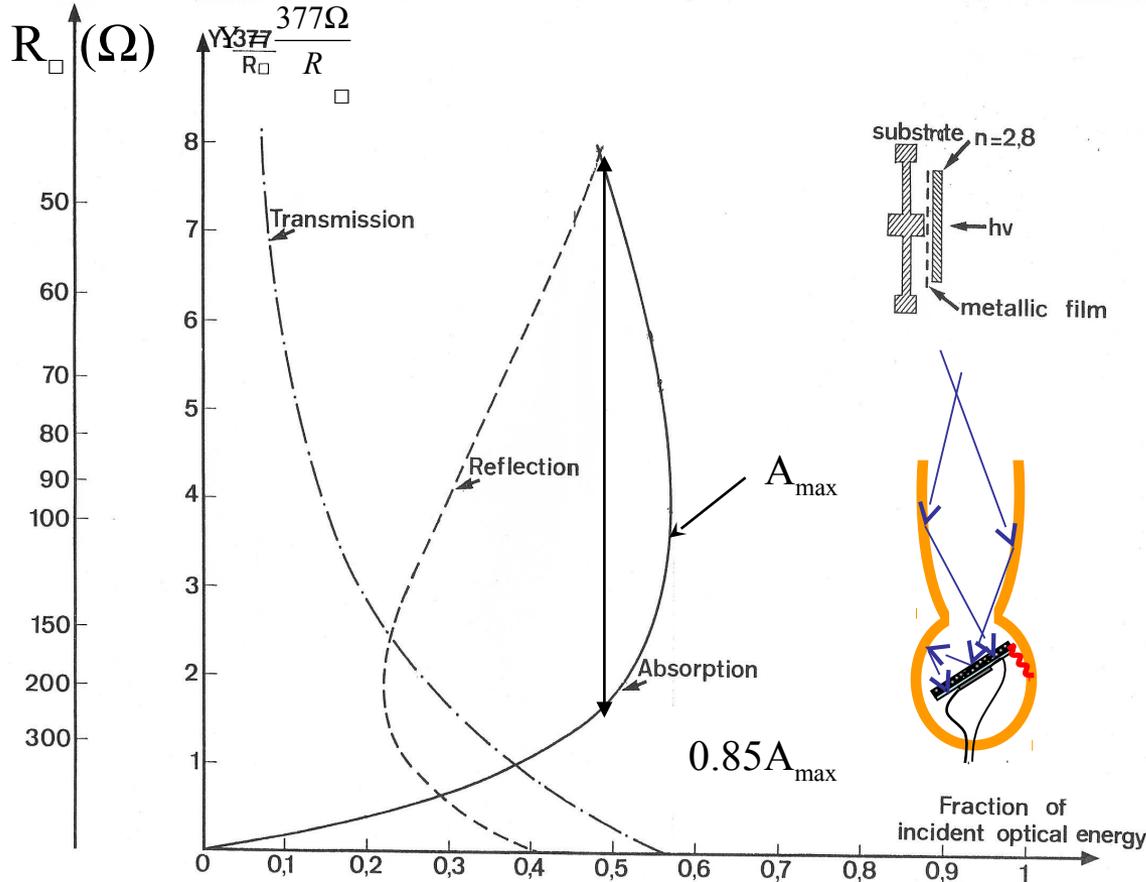
Mesures à Cardiff à 100GHz ( $\lambda=3\text{mm}$ )



Profil de deux cônes 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 ( $377\Omega$ ), en fonction de l'indice n du substrat

▪ Ph: trouver le meilleur compromis entre absorption et chaleur spécifique.



Exemple de compromis:

en tolérant une absorption  $A$  de 85% par rapport à  $A_{max}$  ( $\approx 0.58$ ), 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 (100k $\Omega$ →10M $\Omega$ )
    - Ge-NTD ( Neutron Transmuted Doped)
    - Si implanté
    - Nb<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>
  - Basse impédance (10m $\Omega$ →100m $\Omega$ )
    - TES (Transition Edge Sensor)
- Magnétique
  - Ions magnétiques dans matrice métallique (système Au:Er)
- Inductance Cinétique
  - détecteurs KIDs (technologie facilement multiplexable)

Chaque thermomètre:

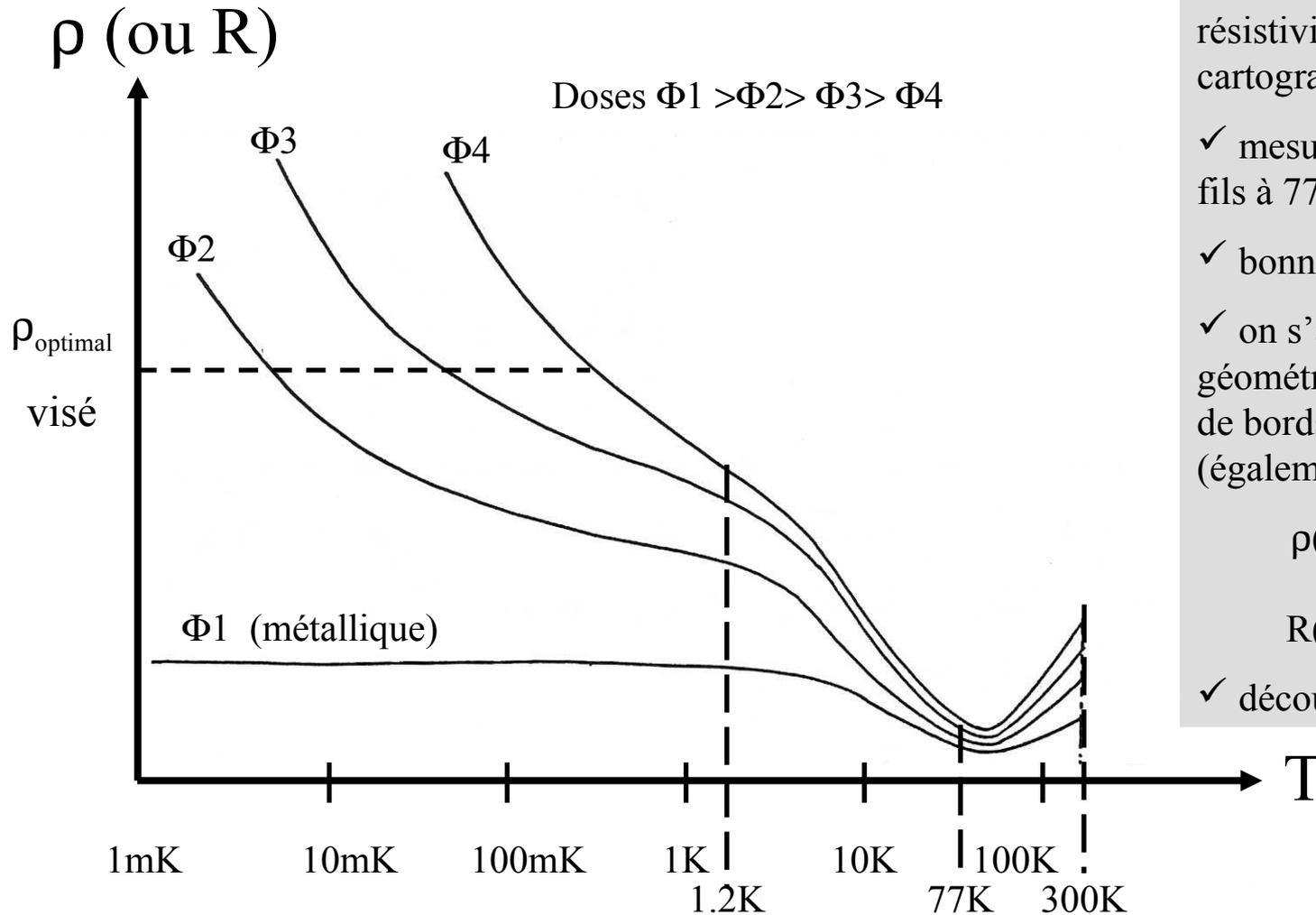
- ajoute sa propre capacité calorifique
- ajoute son propre bruit et celui de son électronique de lecture

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

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  $\rho$ )
- ✓ 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

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

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

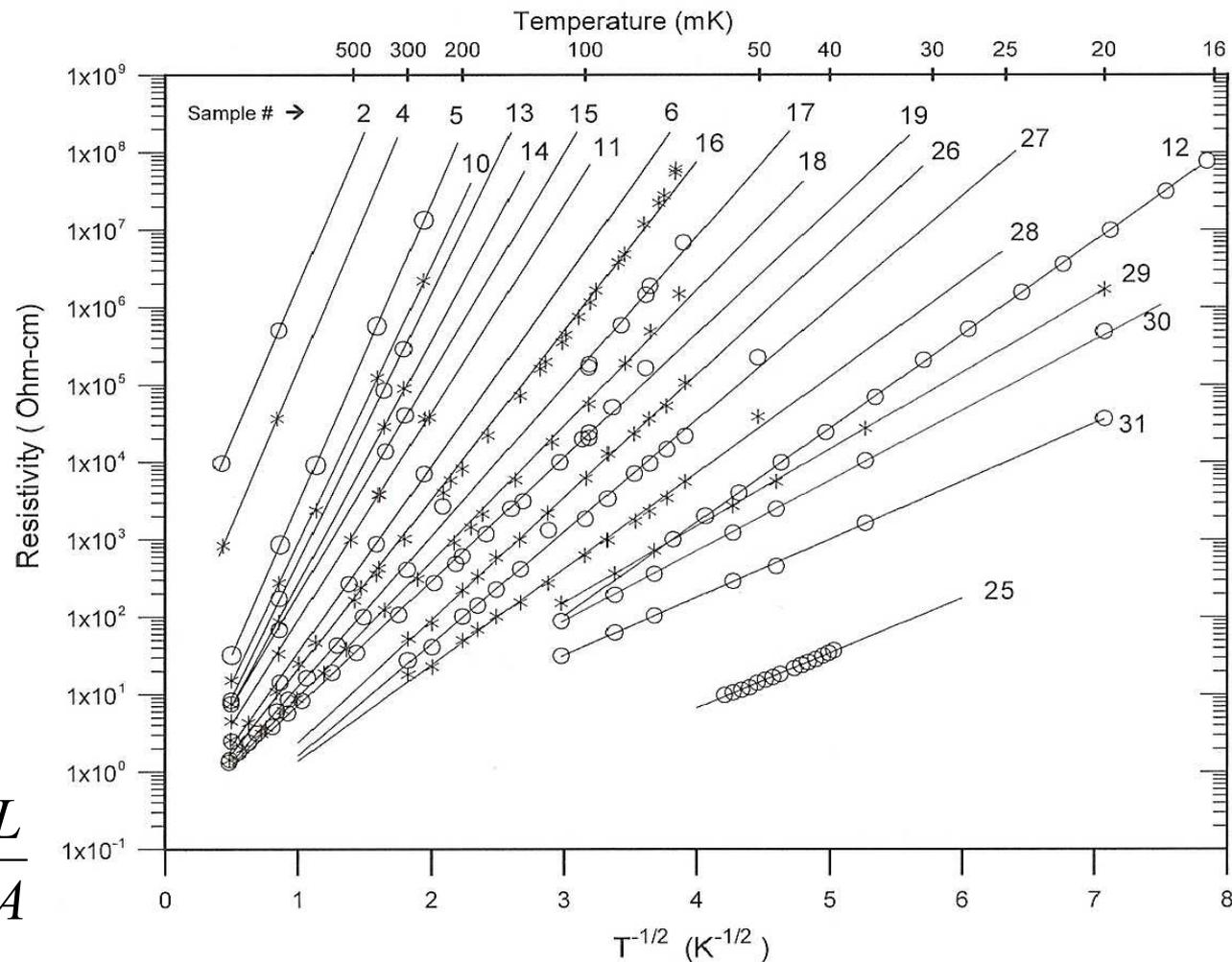
[sauts de longueur variable, entre impuretés, assistés par phonons]

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

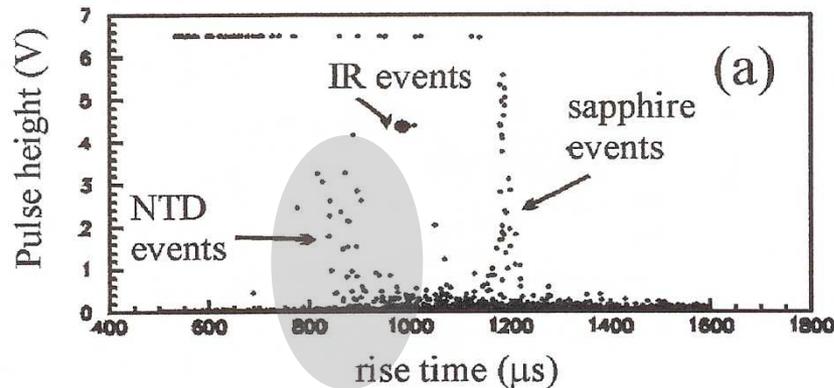
$R_0$  (en fait  $\rho_0$ )\* et  $T_0$  sont fonctions de la dose reçue.

\* thermistor

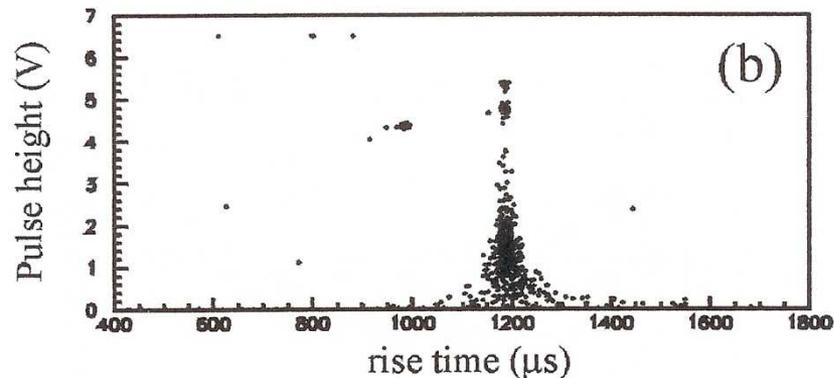
-longueur L  $\longrightarrow$   $R = \rho \times \frac{L}{A}$   
-section A



- ✓ 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 ?

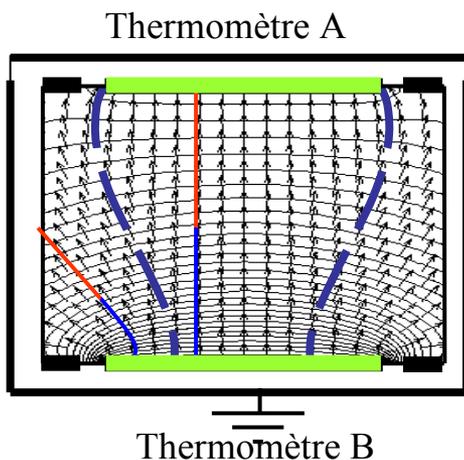


Run de fond dans un bolomètre de 50g en saphir (ROSEBUD; tunnel du Canfranc)

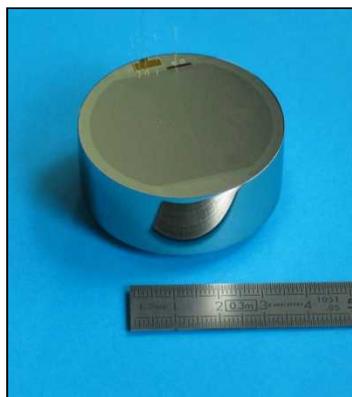
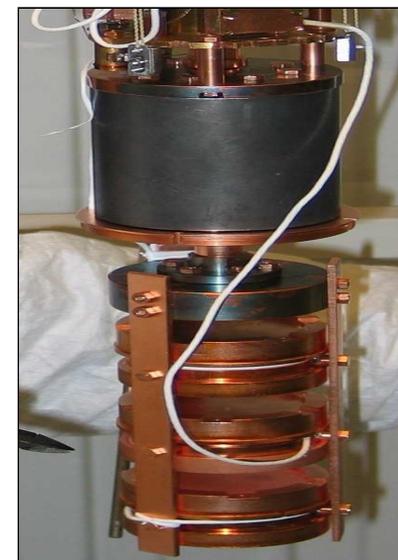


Run de calibration ( $^{57}\text{Co}$ ) dans la foulée du run précédent

- fabrication de films minces (650Å) par masques et co-évaporation d'un composé métal & semi-conducteur (Nb & Si; X≈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

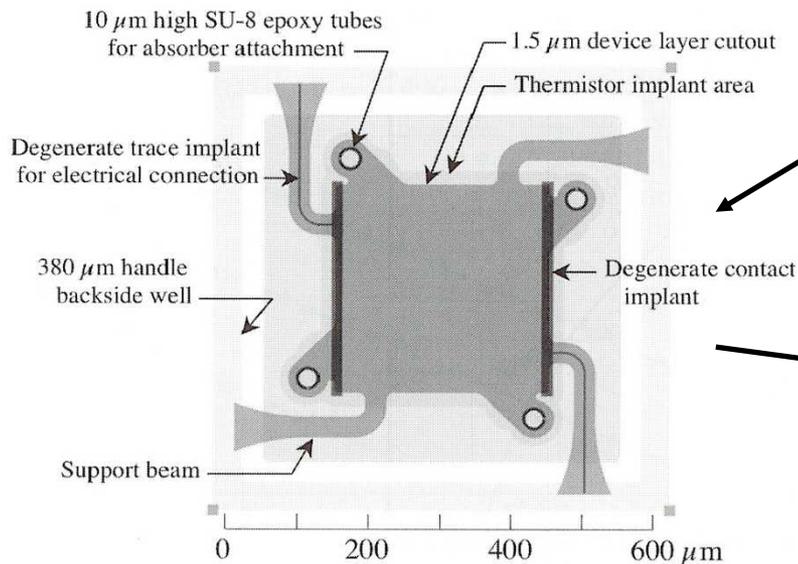


Ge 200g équipé NbSi

Test 2004 au LSM  
(EDW-I)

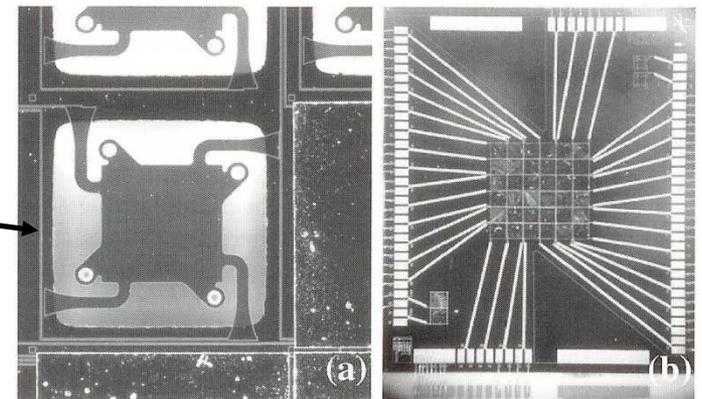
*d'après Alexandre Juillard (journées CAPPS; Orsay 2004)*

- ✓ 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  $\mu\text{m}$ ):
  - 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)



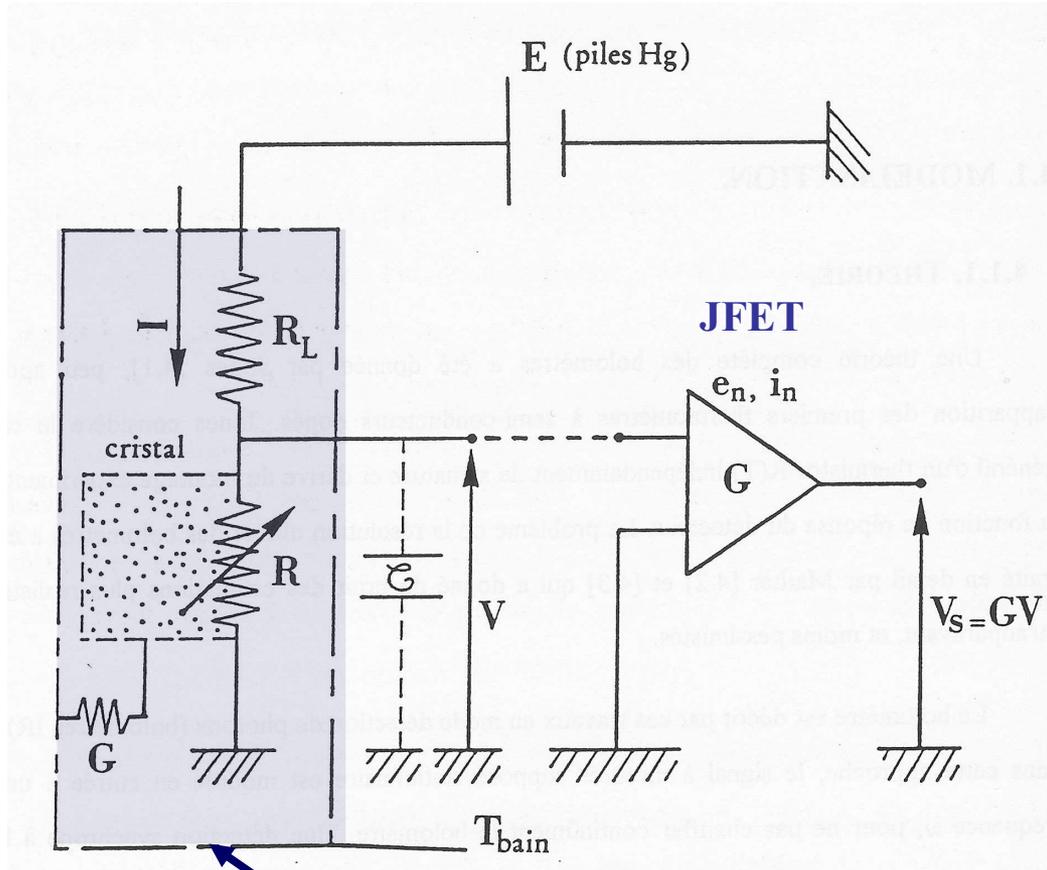
Pixel pour XRS (satellite Astro-E2)

Matrice XRS 6 x 6 avec absorbeurs



*D. Mac Cammon in Ch. Enss, page 43*

## Circuit de polarisation (non différentiel, ici)



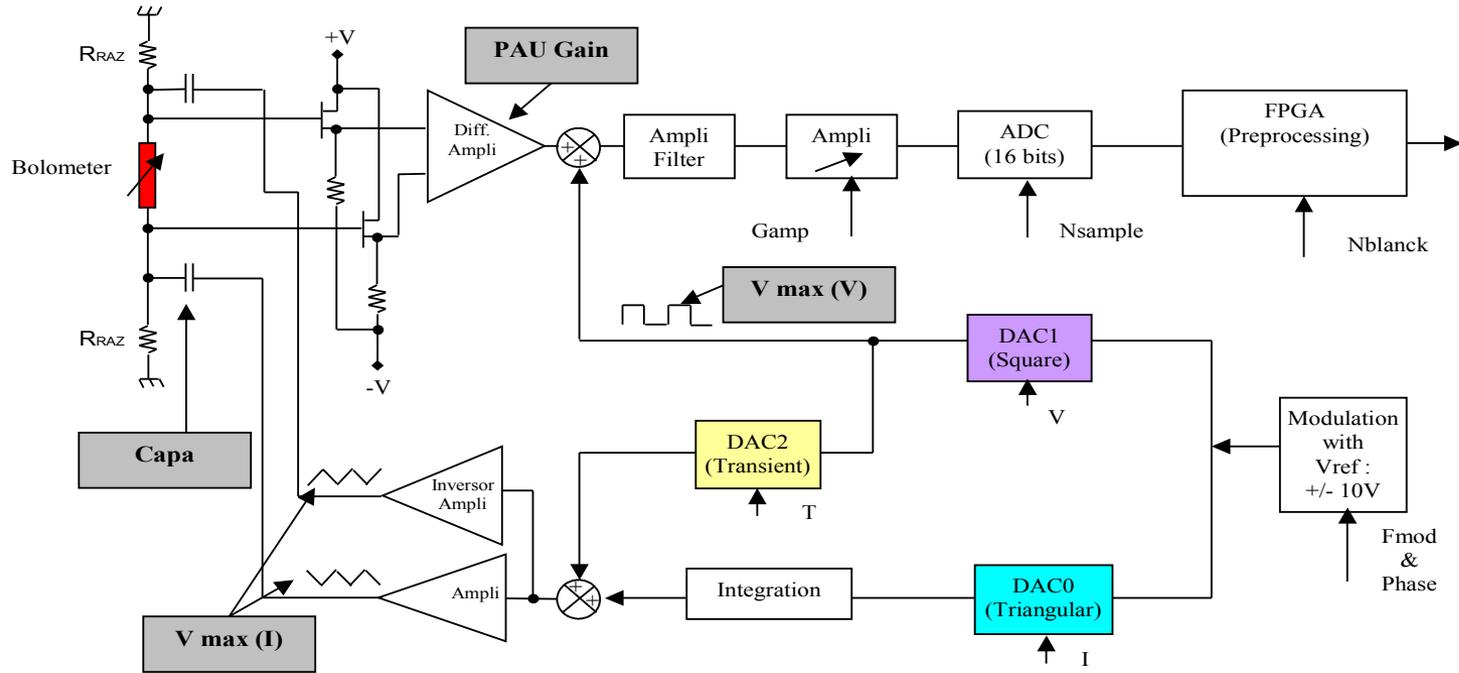
Partie froide ( $T \leq 100\text{mK}$ )

- ☺ 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 (≠ modulation sinusoïdale);

☺ Détection synchrone → niveau de bruit BF ≡ 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

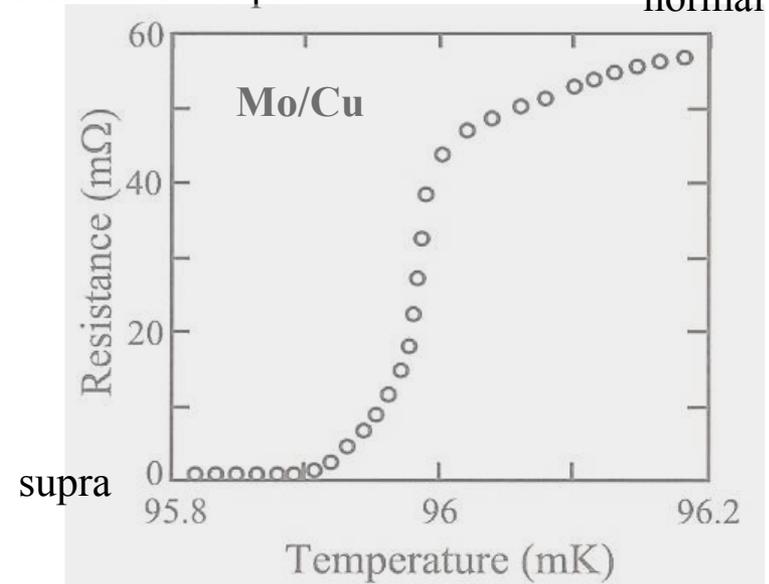
- $T_c \leq 100\text{mK}$
- $\Delta T_c: 0.1\text{mK} \rightarrow 10\text{mK}$
- $R_{\text{normal}}: 10\text{m}\Omega \rightarrow 100\text{m}\Omega$
- $I: 1 \mu\text{A} \rightarrow 100\mu\text{A}$
- qq.  $1000 \text{ \AA} \times \text{qq. mm}^2$

## Films supraconducteurs courants:

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

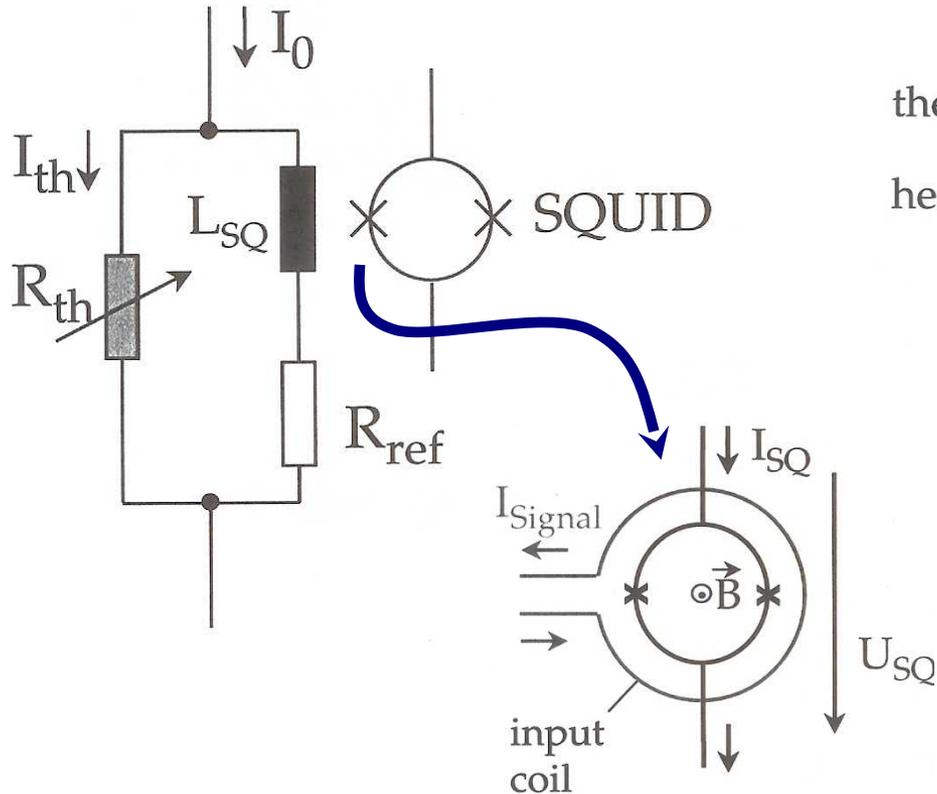
## Films bi-couches Supraconducteur /Métal [effet de proximité→ $T_c(\text{bicouche}) < T_c(\text{supra})$ ]

- **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;  $\Delta T_c < 1\text{mK}$

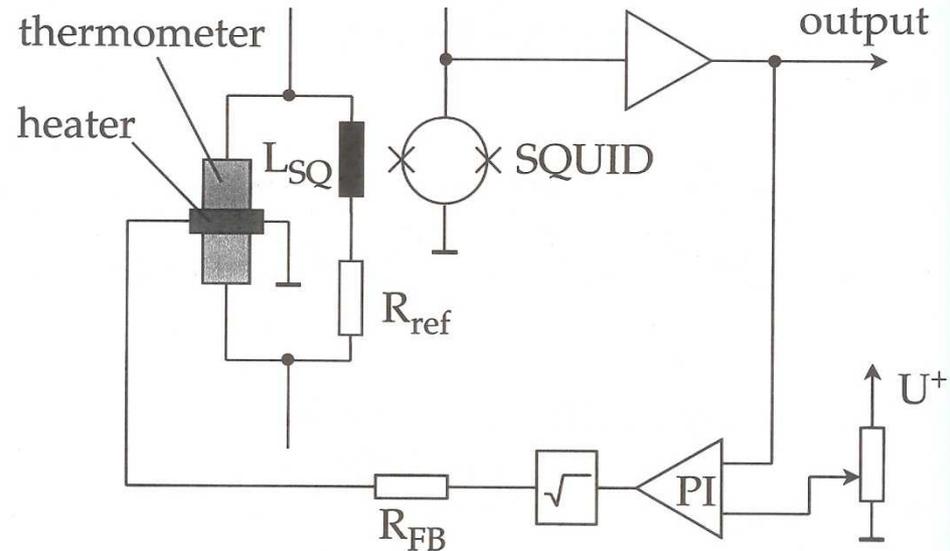


# TES (Transition Edge Sensors) 2. lecture

Polarisation courante des TES



Polarisation à T constante des TES (Active Thermal Feedback)

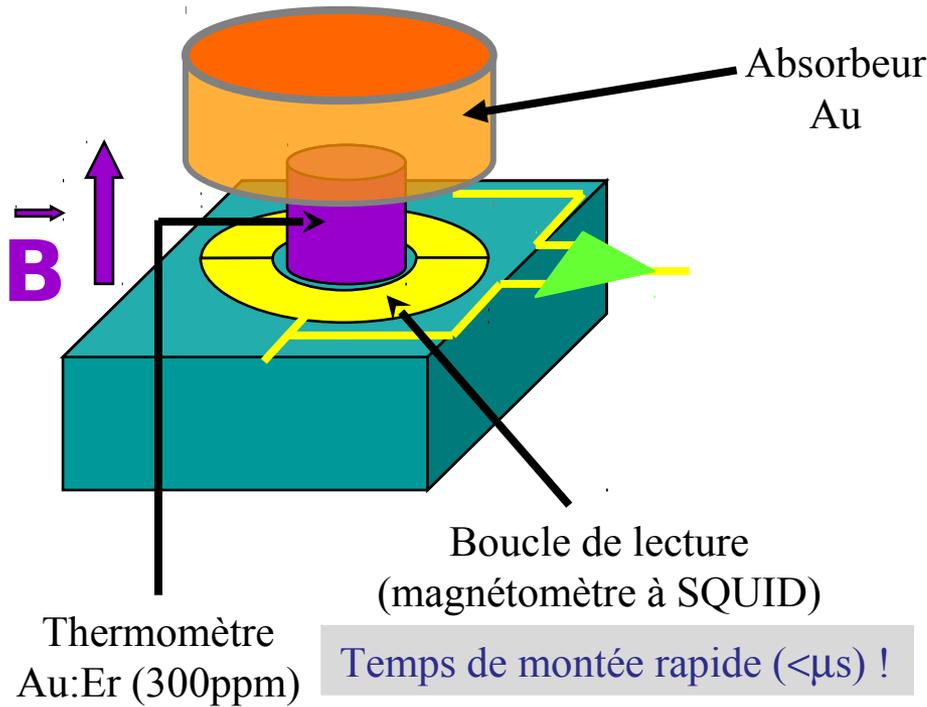


SQUID: Superconducting Quantum Interference Device  
(demi-anneaux supraconducteurs séparés par des jonctions Josephson)

# 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



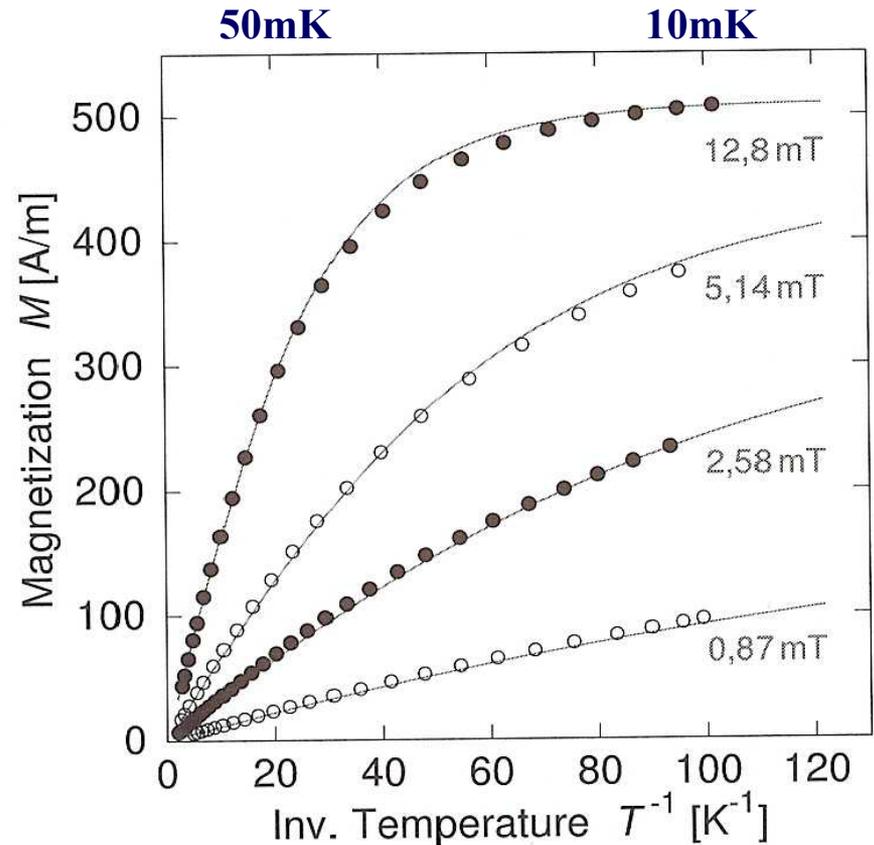
d'après E. Leblanc (2003)

✓ 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:<sup>166</sup>Er (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  $P_{\text{Joule}}$  à présent

En introduisant la réponse logarithmique du thermomètre

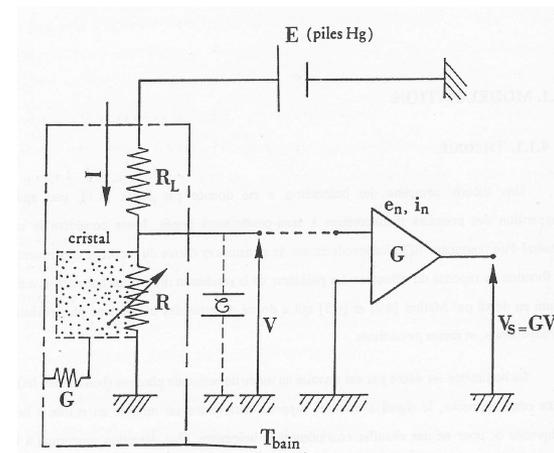
$$\alpha = -\frac{\partial \ln R}{\partial \ln T} \approx -\frac{\Delta R}{R} \times \frac{T}{\Delta T}$$

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



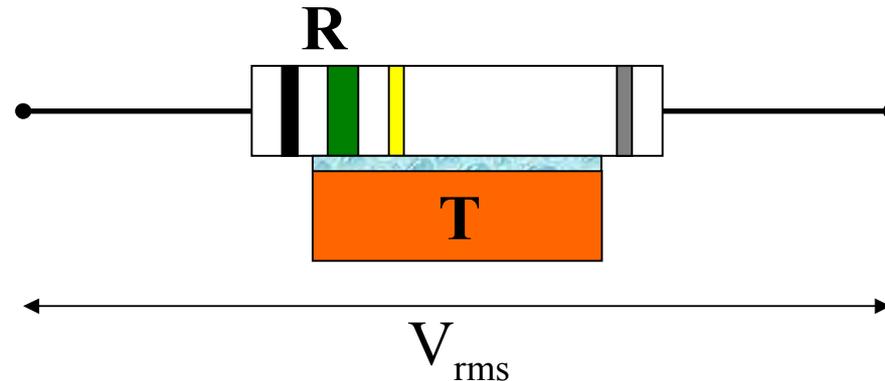
▪ Pour un thermistor suivant le régime « Variable Range Hoping »:

$$\alpha = 0.5 \sqrt{\frac{T_0}{T}} \quad \text{et } \alpha \approx 3 \rightarrow 30 \text{ [Ge-NTD types]}$$

▪ Note: pour un TES,  $\alpha \approx -100 \rightarrow -1000$  !

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

# 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 M $\Omega$  à 20mK → 2.3 nV/ $\sqrt{Hz}$

✓ **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 (R en V/keV)

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

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

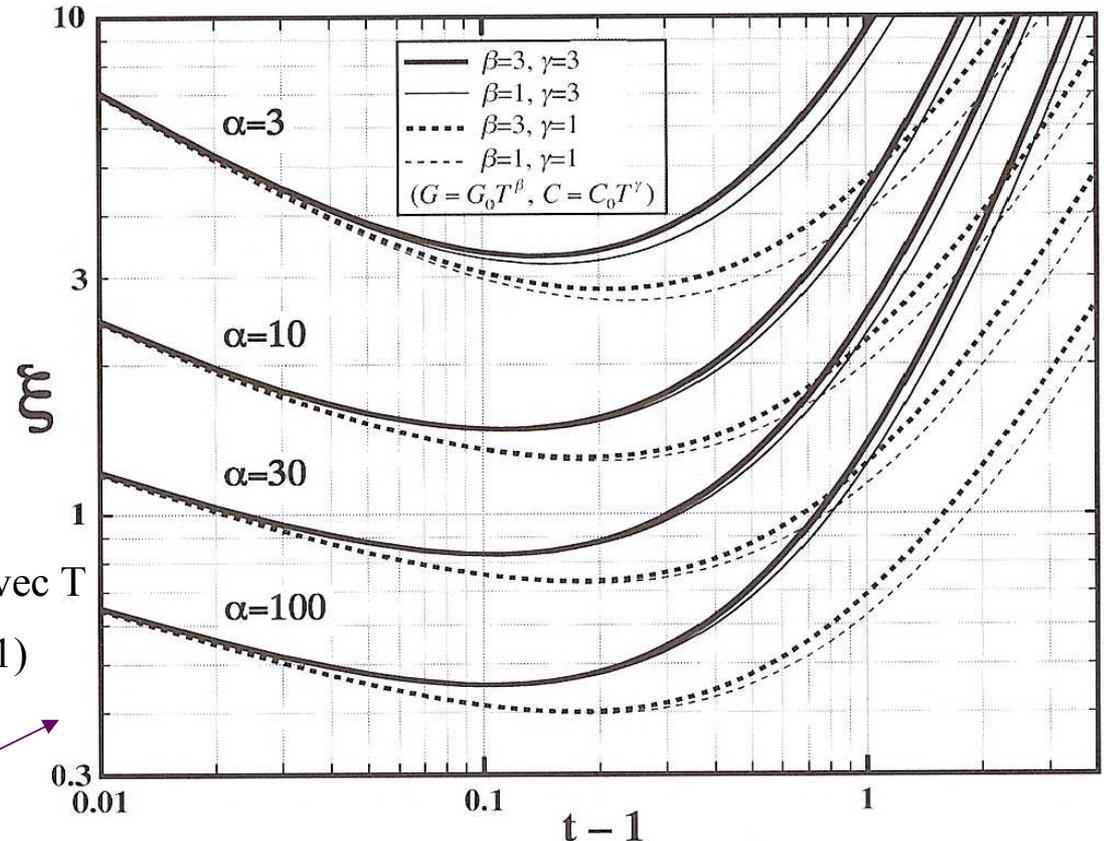
T<sub>bain</sub>

C du bolo à  
T<sub>bain</sub>

ξ dépend:

- de la pente α
- des coefficients dominants de C et de G avec T
- du point de polarisation T (t=T/T<sub>bain</sub> > 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

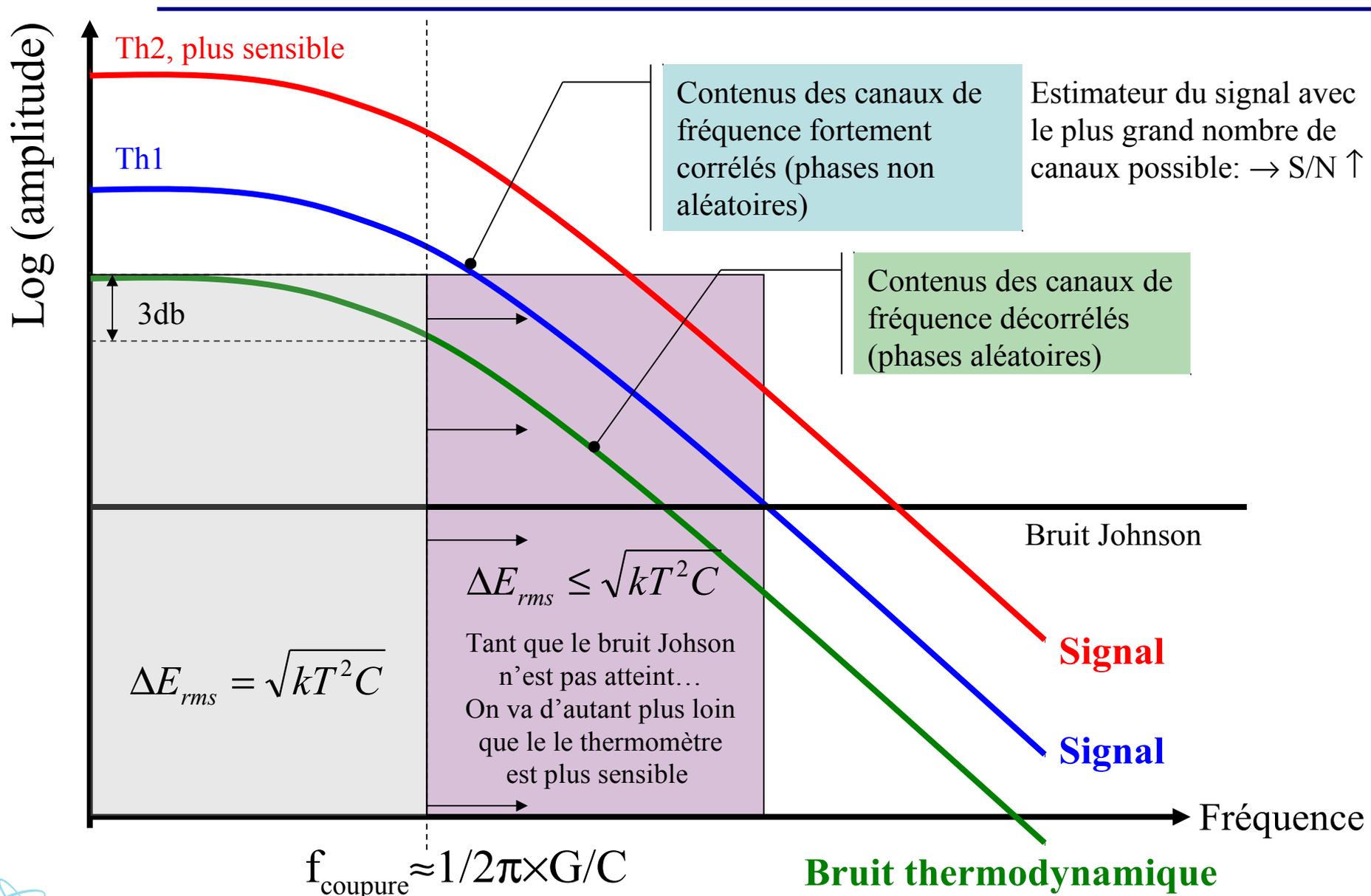
1. La sensibilité  $\alpha$  du thermomètre soit suffisante ( $\geq 20$ )
2. Le bolomètre soit polarisé convenablement
  - en pratique, le minimum est proche de  $t-1=0.1$  à  $0.2$ , quelles que soient les courbes décrivant la composition du bolomètre (i.e. C, G) et la sensibilité du thermomètre.

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

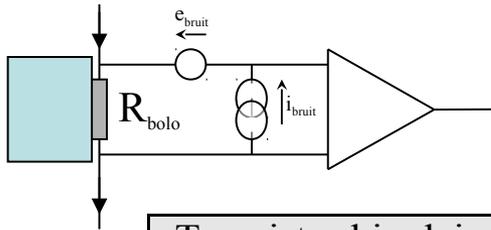
par ex.  $T_{\text{bain}}=20\text{mK} \rightarrow T_{\text{bolo}}=22\text{mK}$  à  $24\text{mK}$

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 !**

# Comment comprendre le « dépassement » thermodynamique ?



# Bruit des amplis: valeurs caractéristiques



	Densités spectrales de bruit		$T_{\text{bruit}}$ K	$R_{\text{bruit}}$ $\Omega$	Remarques
	$e_{\text{bruit}}$ V/ $\sqrt{\text{Hz}}$	$i_{\text{bruit}}$ A/ $\sqrt{\text{Hz}}$			
Transistor bipolaire	0.3 nV	1 pA	2 K	100 $\Omega$	
JFET Silicium à 300K	1 nV	1 fA	20 mK	1 M $\Omega$	Bruit 1/f à $f < 10\text{Hz}$
JFET Silicium à 120K	1 nV	0.1 fA	2 mK	10 M $\Omega$	
MosFET à $T \leq 4.2\text{K}$	1 $\mu\text{V}$	$< 10^{-16}$ A	200 mK	$> 100$ G $\Omega$	$R_{\text{bruit}} \approx \infty$
FET AsGa à $T \leq 4.2\text{K}$	1 nV	1 fA	20 mK	1 M $\Omega$	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

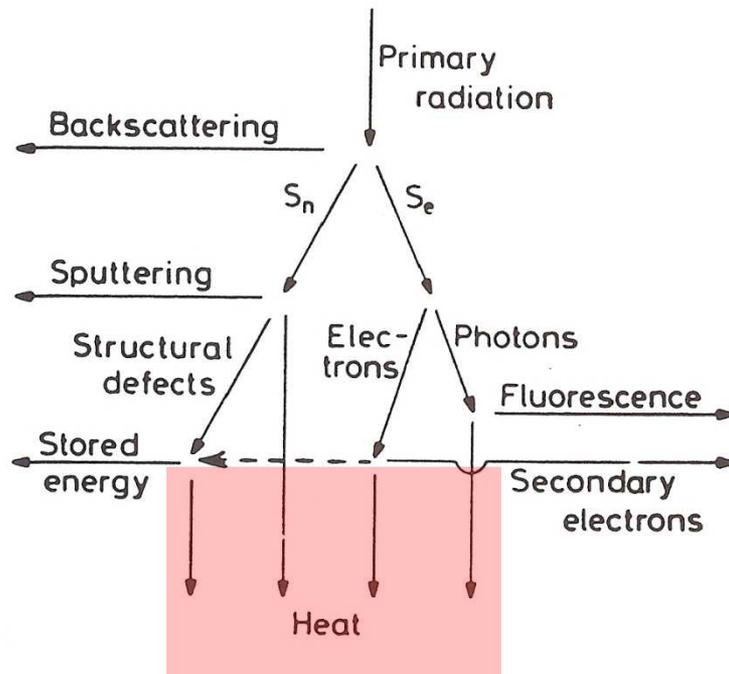
Adaptation d'impédance:

- ✓  $R_{\text{bolo}} = R_{\text{bruit}}$ : 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

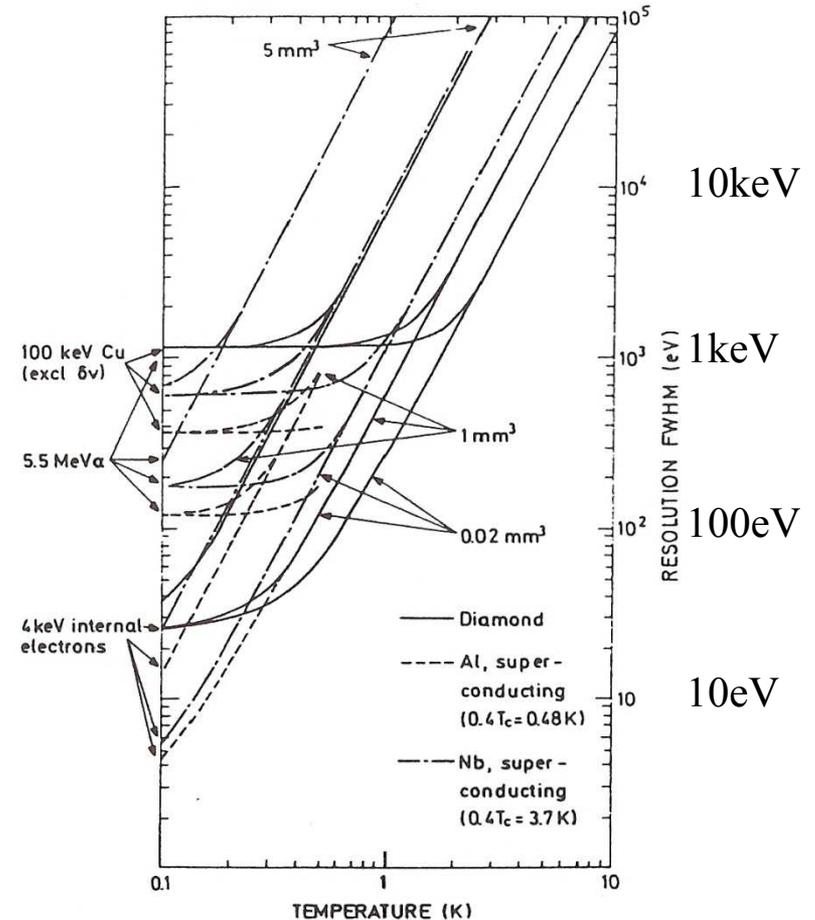
$$R_{\text{bruit}} \times (T_{\text{bruit}} / T_{\text{bolo}}) < R_{\text{bolo}} < R_{\text{bruit}} \times (T_{\text{bolo}} / T_{\text{bruit}})$$

\* SET  $\equiv$  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



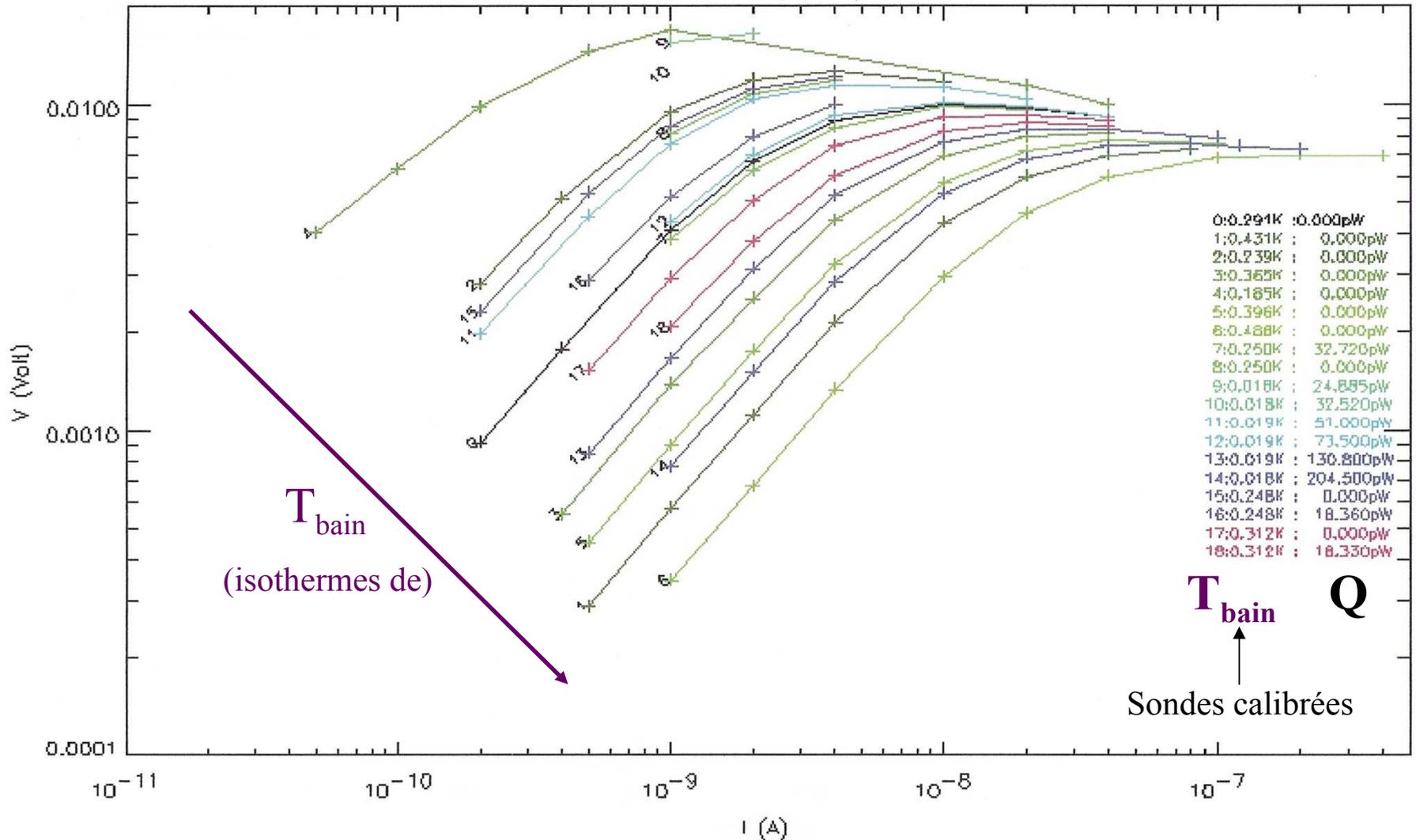
in H.H. Andersen (1986), cité par D. L'Hôte

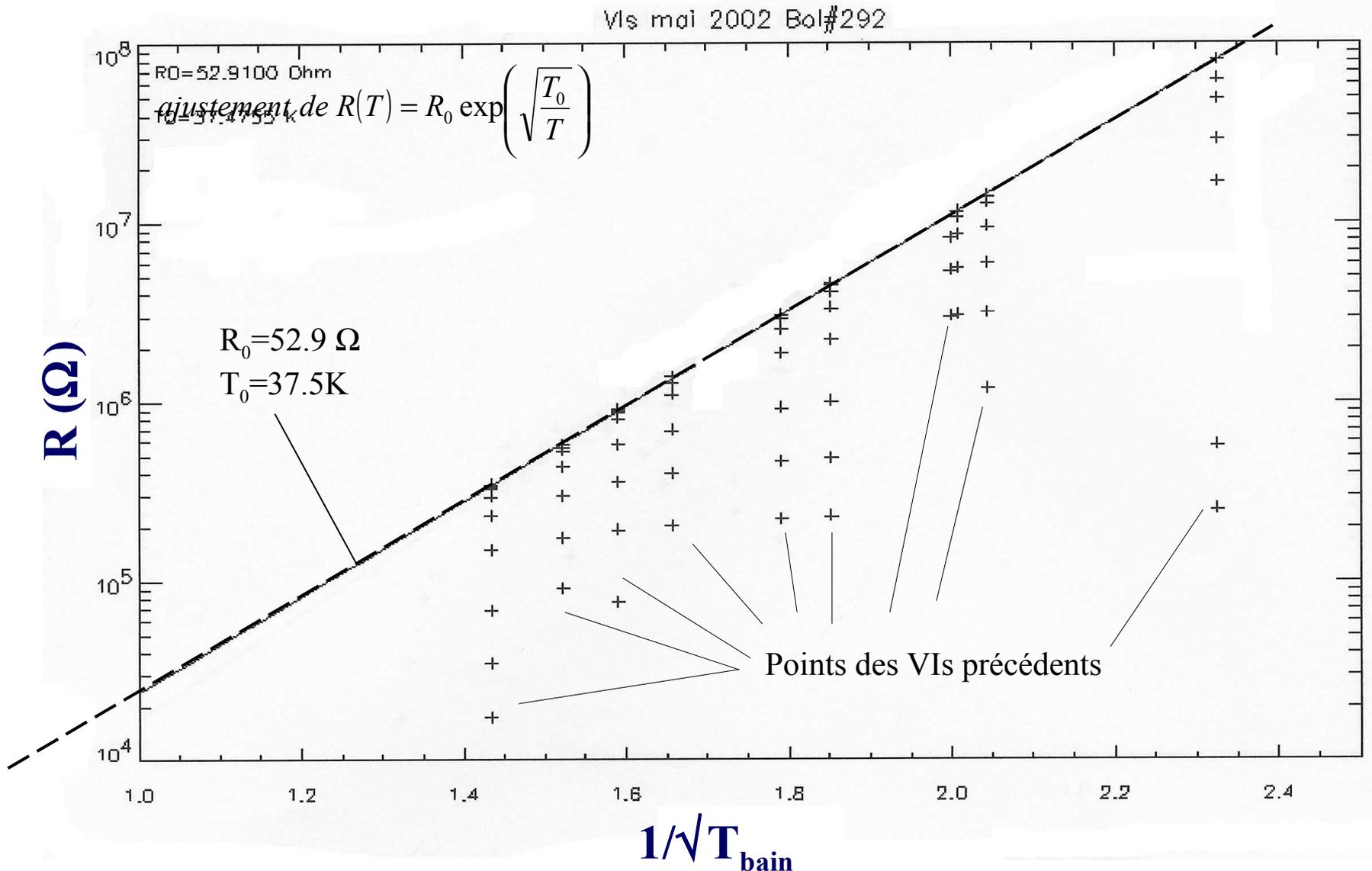
- très peu d'études systématiques à ce jour du partitionnement, ni de mesures fines
  - **les détecteurs sont calibrés avec le type de particules étudiées**  
[ex: l'équipe STAP/IAS a observé une réponse thermique supérieure  $\alpha / \gamma$  dans  $\text{CaWO}_4$  et BGO (de l'ordre de 7%) ]
- même 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 ?)

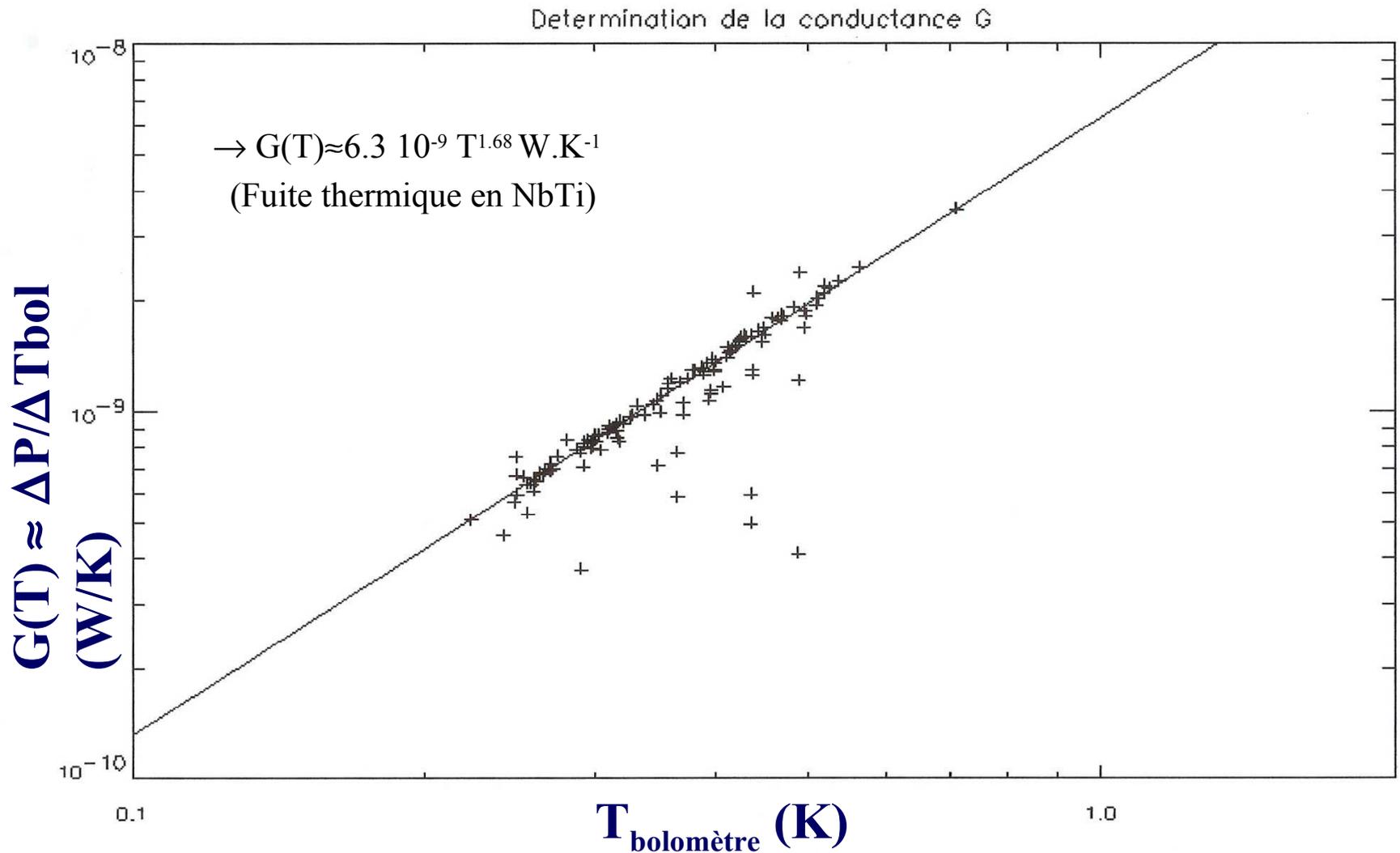
# □ Bolomètre polarisé

## ▪ Caractéristiques

Vls bolomètre 292 mai 2002 (Bolomètre submm IAS)

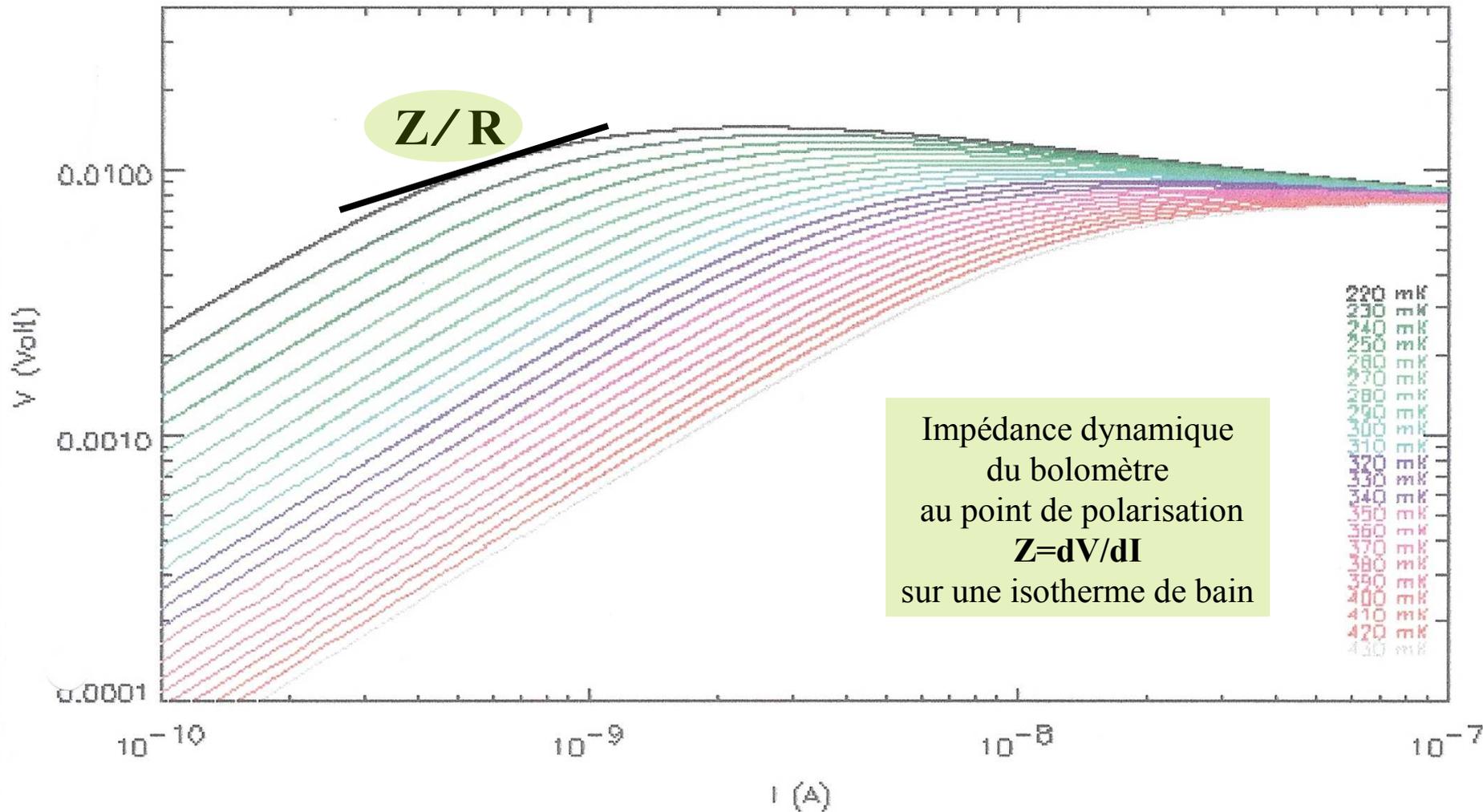


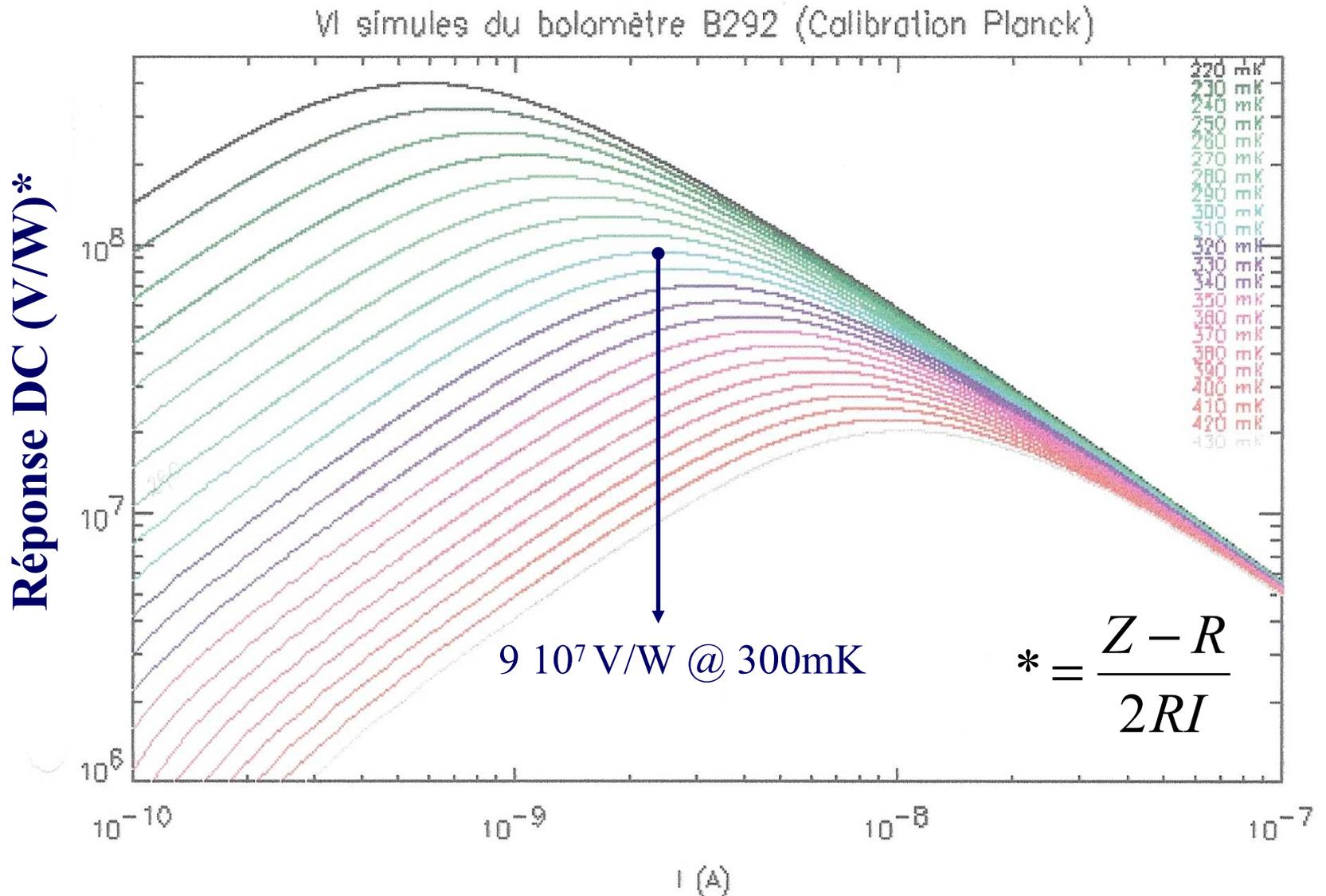




Vis 2002 Calcul d'après données restreintes à  $0.00100000 < dT/T < 0.150000$

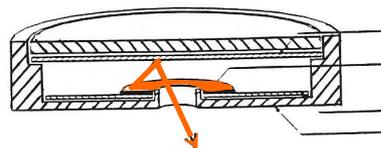
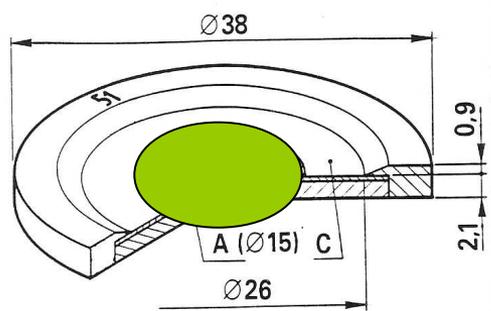
VI simulées du bolomètre B292 (Calibration Planck)





# □ Environnement du bolomètre en laboratoire

Source alpha type (sur inox ou Ag)

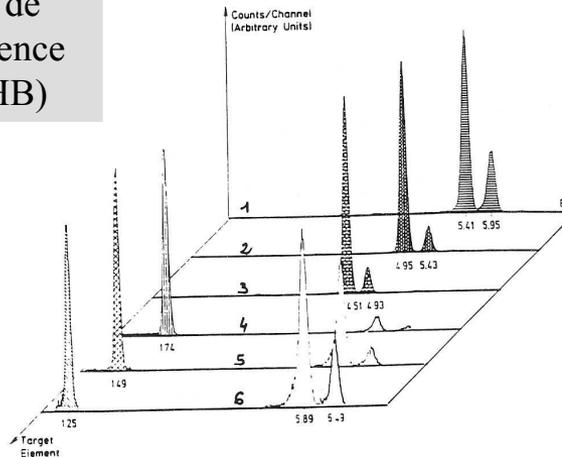


Cible  
Dépôt de  $^{55}\text{Fe}$   
Anneau en inox  
Cage en laiton

Source de  
Fluorescence  
X (LNHB)

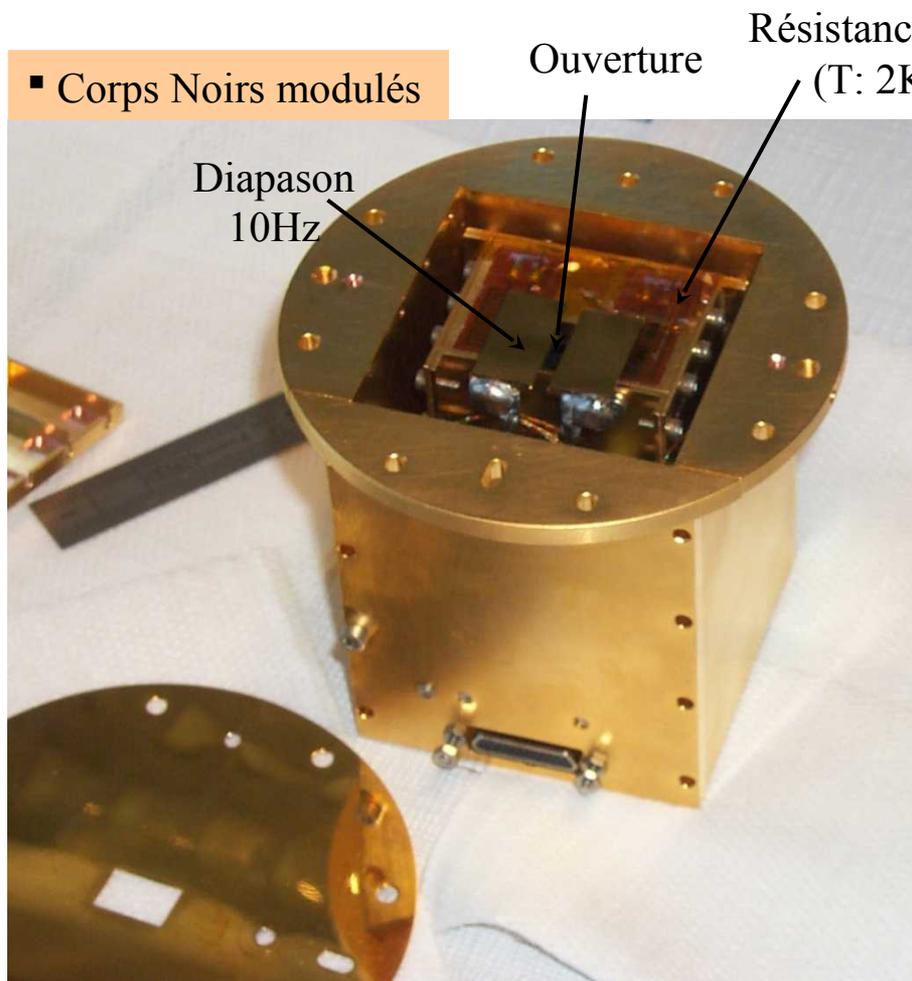
≠Cibles

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



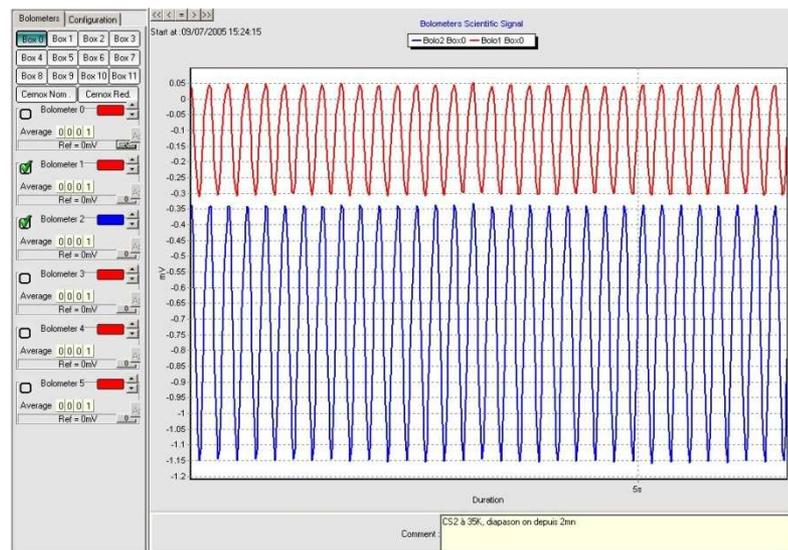
- les sources sont de faible activité (« lenteur » des bolomètres)
- en raison des nombreux écrans cryogéniques et de l'inaccessibilité du détecteur, **les sources alphas, bêta et X (qq.  $\mu\text{Ci}$ ) doivent être refroidies**, tandis que les sources plus pénétrantes (gammas, neutrons) sont externes.
- 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
- fibres C: constantes de temps, diaphonie  
R&D LAL

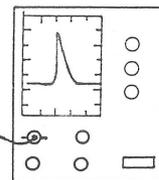
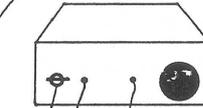
# Environnement du bolomètre (ex. de l'IAS)



Fibres optiques de découplage

Cage de Faraday

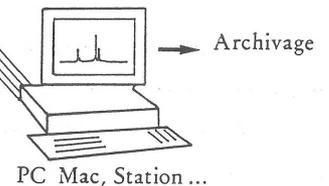
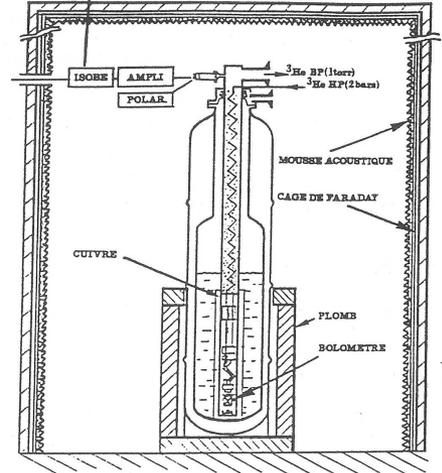
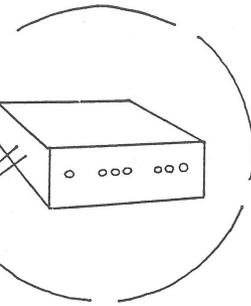
Fibre optique



ADC  
oscillo numérique  
(carte PC, Mac...)

≥12 bits  
100kHz mini

bus IEEE, PC, Mac...



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

# NEP 1. Bruit de photons (bolomètres sub-mm)

- ✓ **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)*

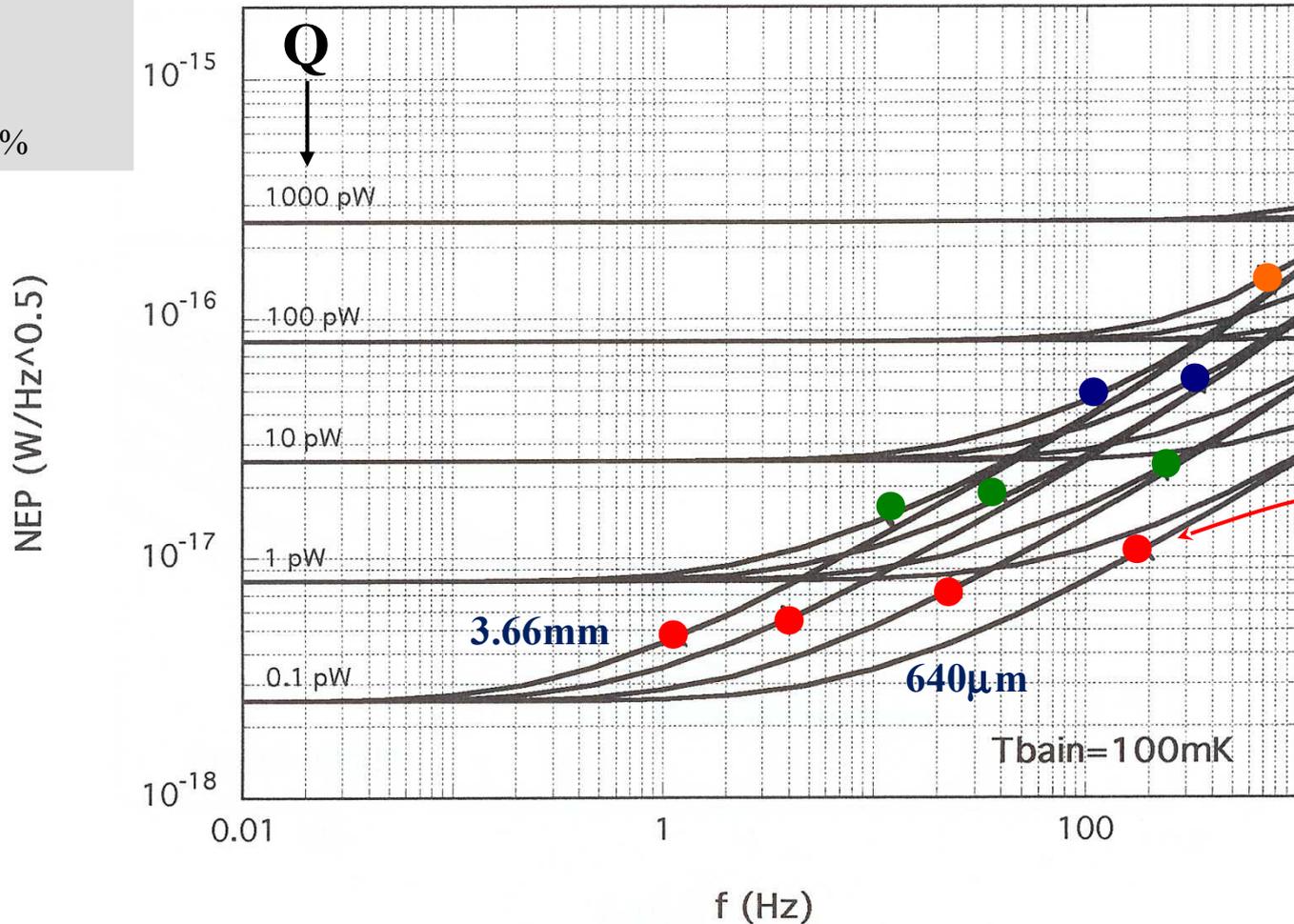
- $Q$ : rayonnement de fond absorbé par le bolomètre
- $\bar{h\nu}$ : énergie moyenne des photons
- $\alpha$ : efficacité d'absorption du détecteur
- $f$ : facteur de transmission optique depuis la source
- $e, T_s$ : émissivité et température de la surface responsable du rayonnement de fond

Paramètres fixés

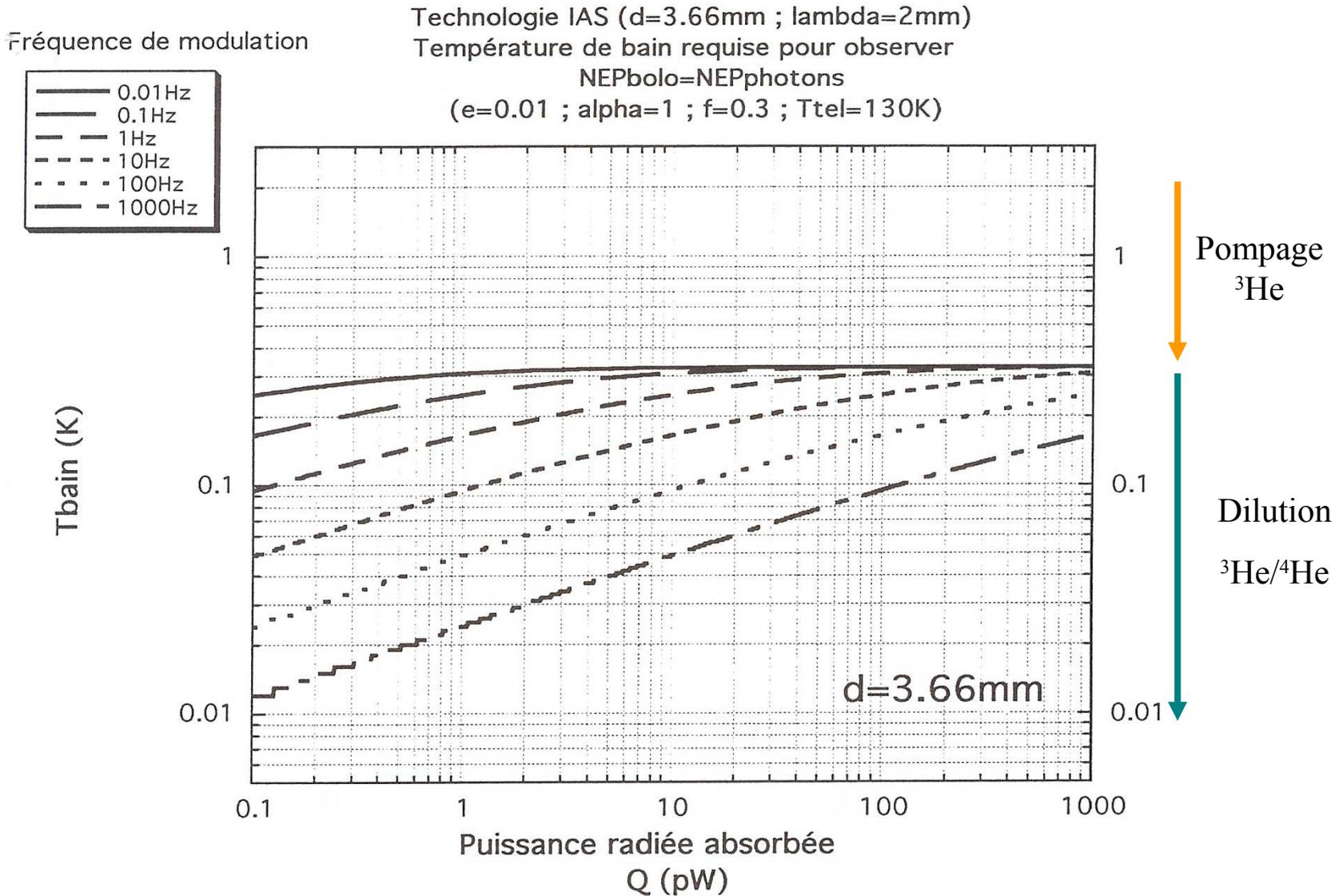
- $T_s=130\text{K}$
- $e=0.01$
- $f=0.3$
- $\alpha=100\%$

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

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



En-deça 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  $\tau_{\text{eff}}$  ...

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

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

« rolloff »

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

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

$\tau_{\text{eff}}$  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)**
- **Emiliano Olivieri (CSNSM)**

**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)