

Autres types de bolomètres

A. Benoit



DRTBT 1992 - 08

Autres types de Bolomètres

Plan de l'exposé

A Systèmes utilisable à très basse température

- 1) Chaleur spécifique et type d'excitations
 - a) Les métaux.
 - b) Les systèmes de spins.
 - c) Les liquides.
- 2) Fuite thermique vers la source froide.
- 3) Thermomètres pour la bolométrie.
 - a) Thermomètre à résistance
 - b) Mesure directe de la température électronique.
 - Thermocouples.
 - Effet tunnel.
 - Transition supraconductrice.
 - c) Thermomètre magnétique
 - d) Autres thermomètres à très basse température
- 4) Une application: bolomètre rapide BOLO-BISTRO
 - a) Les spécifications de l'expérience.
 - b) Les difficultés liées à l'utilisation d'un bolomètre semi-conducteur.
 - c) Description du bolomètre métallique à thermo-couple.
 - d) Avantages du système métallique à thermo-couple.

B La résolution limite d'un bolomètre.

- 1) Bolomètre à spin parfait.
- 2) Thermomètre à spin parfait.
- 3) Thermomètre imparfait.
- 4) Thermomètre couplé à une cible.
 - a) Thermomètre dont on mesure toute l'énergie.
 - b) Thermomètre imparfait (mesure d'une partie de l'énergie).
- 5) Conclusion.

A Systèmes utilisable à très basse température

1) Chaleur spécifique et type d'excitations

Dans la plupart des bolomètres, les phonons constituent la majeure partie des excitations à la température d'utilisation. En effet, on recherche en général des systèmes présentant la plus faible chaleur spécifique possible, et tout autre type d'excitations l'augmentera. Ainsi on utilise généralement des isolants (ou des semiconducteur très pur) ne contenant pas d'électrons ou des supraconducteurs dans lesquels les excitations électroniques présentent un gap et ne contribuent plus à la chaleur spécifique. De plus, en abaissant la température d'un système de phonons, la chaleur spécifique décroît comme T^3 , ce qui permet une amélioration très rapide de la sensibilité et de la résolution. Cependant, cette décroissance de la chaleur spécifique correspond en fait à la disparition des excitations thermiques portées par les phonons et conduit à trois inconvénients majeurs:

- Tout autre phénomène présentant des excitations possibles va rapidement dominer la chaleur spécifique du système. Ainsi la présence d'impuretés présentant deux niveaux d'énergie, ou la présence de magnétisme conduit à une limite à la chaleur spécifique lorsque l'on refroidit le système. L'énergie est alors stockée principalement dans ces états d'énergie, les phonons servant au transfert d'énergie entre ces états, généralement localisés.

- Le petit nombre de phonons rend très difficile le transfert d'énergie dans l'échantillon et les constantes de temps d'équilibre thermique peuvent devenir très longues.

- Il n'est généralement pas possible de mesurer directement la température des phonons et la plupart des thermomètres mesurent une température électronique (mesure de résistance électrique). Lorsque la température diminue et que le nombre de phonons diminue, le couplage électron-phonon devient mauvais et le thermomètre sera très mal couplé au système dont on veut connaître la température.

Si l'on accepte des constantes de temps longues (recherche d'évènements rares), il est possible d'utiliser ce type de bolomètre à très basse température en éliminant au maximum toutes les contributions parasites à la chaleur spécifique. Cependant, pour éviter ces problèmes de mauvais couplage par les phonons thermiques, beaucoup d'études portent sur la détection directe des excitations non-thermiques créés par l'absorption d'une particule. On peut ainsi détecter directement les phonons balistiques créés dans un isolant, ou les quasi-particules créées dans un supraconducteur. Ce type de détection semble prometteur mais un tel système n'est plus réellement un bolomètre et la résolution en

énergie risque d'être limitée. En effet, comme pour un détecteur semi-conducteur, l'énergie déposée se partage entre les excitations thermiques et celles que l'on mesure, ce qui conduit, du fait de la statistique de ce partage, à des fluctuations de l'énergie mesurée.

Si l'on veut réellement concevoir un bolomètre à très basse température, il faut choisir un système présentant des excitations bien couplées entre elles à la température de travail, pour pouvoir définir une température (constante de temps raisonnable). Les principaux systèmes étudiés à très basse température et satisfaisant à cette condition peuvent se répartir en trois catégories: les métaux, les systèmes de spins et les liquides.

a) Les métaux.

Dans le cas d'un métal pur ne présentant pas de moment magnétique nucléaire, les phonons sont absents à très basse température et toutes les excitations thermiques sont électroniques. Les électrons étant des fermions, la chaleur spécifique associée décroît beaucoup moins vite que pour les phonons (proportionnelle à la température), de même que la conduction thermique qui est très bonne. La constante de temps d'équilibre thermique d'un tel système est donc une constante, ce qui permet théoriquement d'abaisser la température autant que l'on veut pour améliorer la sensibilité. La table suivante donne les chaleurs spécifiques, constantes de temps et gamme d'énergie typique (pour $dT/T=1\%$) pour un bolomètre en or pur de différentes dimensions.

dimension (mm)	0.002 x 1 x 1	1 x 1 x 1	10 x 10 x 10
constante de temps	0.2 μ s	0.2 μ s	20 μ s
Chaleur spécifique (100mK)	10^{-11} J/K	$5 \cdot 10^{-9}$ J/K	
Chaleur spécifique (1mK)	10^{-13} J/K	$5 \cdot 10^{-11}$ J/K	$5 \cdot 10^{-8}$ J/K
Energie typique (100mK)	60 KeV	1.2 MeV	
Energie typique (1mK)	$\Delta T/T \sim 1\%$ 6 eV	120 eV	120 KeV

On peut remarquer que ce type de système métallique permet d'obtenir de très bonnes sensibilités avec des constantes de temps très rapide à condition de travailler en couche mince ou à très basse température. La difficulté sera de trouver un thermomètre bien couplé.

b) Les système de spins.

A très basse température, les métaux contenant des spins nucléaires ont été beaucoup étudiés. Les spins sont relativement bien couplés entre eux, le couplage dipolaire magnétique conduisant à des temps de relaxation spin-spin τ_2 inférieurs à la milliseconde

(80 μ s pour le cuivre par exemple). Par contre, le couplage avec les excitations électroniques est relativement mauvais, la constante de temps τ_1 étant donnée par la relation de Korringa: $\tau_1 T = k$, avec $k=1.1$ sec K pour le cuivre. Cette constante de temps est suffisamment longue, de l'ordre de $\tau_1=1100$ sec à 1mK pour considérer le système de spin comme isolé avec une température de spin T_s . L'intérêt d'un tel système est qu'il est possible de faire varier l'énergie d'excitation et la chaleur spécifique avec un champ magnétique. Pour des faibles champs magnétiques B, la chaleur spécifique par mole est donnée par :

$$C = \frac{\lambda (B+b)^2}{\mu_0 T^2} \quad \text{avec } b=0.3T \text{ et } \lambda=4 \cdot 10^{-12} \text{ Km}^3/\text{mole.}$$

Pour 1 mm³ de cuivre par exemple, on peut calculer la chaleur spécifique et l'énergie typique pour un échauffement $dT/T=1\%$ en fonction du champ magnétique et de la température:

B / T	1mT / 100 μ K	B=0 / 100 μ K	B=1mT / 1 μ K
Chaleur spécifique	6 10^{-8} J/K	3.5 10^{-10} J/K	6 10^{-4} J/K
Energie typique	600 keV	3.5 keV	60 MeV

On peut observer que la résolution reste faible du fait de la forte chaleur spécifique du système. En particulier, elle augmente lorsque la température diminue, ce qui dégrade les performances. Cependant en travaillant en couche mince ou en utilisant d'autres métaux avec une constante de curie plus faible, il serait possible d'améliorer ces performances. L'intérêt d'un tel système réside dans la possibilité de mesurer la température directement par la mesure de l'aimantation avec un SQUID.

c) Les liquides.

Seul l'hélium est liquide à basse température. Le ⁴He devient superfluide et les excitations disparaissent à basse température (comme dans un métal supraconducteur). Le ³He est un liquide de Fermi ce qui conduit à des propriétés voisines de celles des métaux. cependant, la température de Fermi étant beaucoup plus faible, la chaleur spécifique de ³He est très grande, ce qui en fait un mauvais candidat à la détection bolométrique. Cependant, il devient superfluide vers 2 mK et des expériences semblent montrer la possibilité de mesurer les quasiparticules comme dans les supraconducteurs permettant d'espérer une sensibilité à des énergies très faibles.

2) Fuite thermique vers la source froide.

D'une manière générale, la fuite thermique vers le cryostat doit être plus faible que la conduction interne dans le bolomètre pour permettre une thermalisation du système avant

l'écoulement de l'énergie vers l'extérieur. Pour les bolomètres de type isolant, il est difficile de trouver des matériaux dont la conduction thermique est beaucoup plus faible et il faut jouer sur les dimensions géométriques: suspension avec des fils ou barreaux de faible section et grande longueur. A très basse température et pour les bolomètres dont la conduction thermique interne est grande, le problème est beaucoup plus simple à résoudre car la différence de conduction entre un isolant et un métal peut atteindre 7 ordres de grandeur. L'isolation peut alors se faire simplement en utilisant un matériaux isolant. Le cas le plus défavorable est celui d'une couche mince métallique (épaisseur $2\mu\text{m}$) déposée sur un substrat par l'intermédiaire d'une couche isolante de $1\mu\text{m}$ d'épaisseur. Nous allons voir que même dans ce cas, l'isolation thermique est suffisante.

On peut calculer la chaleur spécifique de la couche métallique, par unité de surface:

$$C = a T \text{ avec } a = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ (J K}^{-2}\text{m}^{-2}\text{)}.$$

La conduction thermique d'un isolant typique est donnée par $K = 3 \cdot 10^{-3} T \text{ (WK}^{-1}\text{m}^{-1}\text{)}$, soit par unité de surface pour une épaisseur de $1\mu\text{m}$:

$$K = b T^2 \text{ avec } b = 3 \cdot 10^3 \text{ (W K}^{-3}\text{m}^{-2}\text{)}.$$

La constante de temps de la couche est alors donnée par $\tau = C/K = 0.5 \cdot 10^{-6} / T$. Cette constante de temps est faible mais il faut tenir compte de la résistance de Kapitza à l'interface métal-isolant. Les valeurs typiques sont données par $R_k = 10^{-3} T^{-3} \text{ (Km}^{-2}\text{W}^{-1}\text{)}$ soit une conduction :

$$K = b T^3 \text{ avec } b = 10^3 \text{ (W K}^{-3}\text{m}^{-2}\text{)}.$$

On obtient maintenant des constantes de temps $\tau = C/K = 1.4 \cdot 10^{-6} T^{-2}$, soit 140 μsec à 100mK et 1.4 sec à 1mK, beaucoup plus longues que les constantes de temps interne de la couche métallique, de l'ordre de la microseconde.

3) Thermomètres pour la bolométrie

Nous allons examiner les différents types de thermomètres utilisés à très basse température pour déterminer leur utilisation possible pour la bolométrie. La première condition est de permettre une mesure relativement rapide. En effet, certains thermomètres nécessitent une acquisition longue (de quelques minute à 1 heure) et de ce fait ne peuvent être utilisés pour la bolométrie (Orientation nucléaire par exemple). Le second paramètre important est le couplage avec le système dont on veut mesurer la température. Ainsi, certains thermomètres ne pourront être couplés que par une conduction de phonons (thermomètres résistifs classiques) tandis que d'autres mesureront directement la température électronique d'un métal (thermocouple, jonction tunnel,...) ou encore la température de spin (magnétométrie, résonnance).

a) Thermomètre à résistance.

A très basse température, on utilise principalement trois types de thermomètres résistifs:

- Les semi-conducteurs dopés (Germanium ou Silicium)
- Les résistances de carbone dont le comportement est proche de celui des systèmes semiconducteurs
- Les systèmes proches de la transition métal-isolant (conduction par hopping).

Ces thermomètres sont très utilisés en basse température du fait de leur sensibilité, rapidité de réponse et simplicité d'utilisation. Cependant, en dessous de 10mK, le couplage thermique devient mauvais car la résistance thermique du thermomètre lui-même augmente. De plus, le contact avec le thermomètre se fait à travers une résistance de surface (Kapitza) qui devient très forte à basse température. C'est pourquoi, ces thermomètres ne sont plus utilisés dans la gamme du milli-Kelvin.

Il faut remarquer que ces thermomètres imposent un chauffage continu par effet joule du au courant de mesure. La sensibilité est directement liée à ce chauffage, ce qui conduit à un compromis pour le point de fonctionnement du bolomètre. Il faut noter que ce n'est pas une propriété générale car il existe d'autres thermomètres ne nécessitant aucun chauffage continu du bolomètre.

b) Mesure directe de la température électronique.

Pour pouvoir utiliser un système métallique comme bolomètre en profitant des faibles constantes de temps d'équilibre thermique, il est indispensable de trouver un thermomètre permettant de mesurer directement la température électronique. Seuls trois techniques semblent adaptées:

- Thermocouple.

La mesure de température par thermocouple est utilisée à très basse température car elle présente certains avantages: une réponse très rapide, une absence de chauffage au repos (pas de courant de polarisation) et une sensibilité ne variant que peu avec la température. Par contre, l'inconvénient principal du dispositif est sa sensibilité relativement faible à basse température. Pour un couple Au-Fe à 100ppm par exemple, le signal est de l'ordre de 1nV/K à 100mK et la mesure doit se faire soit avec un chopper refroidi suivi d'un transformateur de grand rapport, soit à l'aide d'un SQUID. L'exemple du bolomètre BOLOBISTRO montrera l'intérêt d'un tel système pour une application particulière.

- Jonction tunnel.

Généralement les jonctions tunnel ont été utilisées pour mesurer les quasiparticules dans un supraconducteur. L'idée ici serait d'utiliser la jonction tunnel entre un métal

normal et un supraconducteur pour mesurer l'énergie des électrons du métal normal au dessus du niveau de Fermi.

- contact avec un supraconducteur.

La mesure de la température d'un métal devrait pouvoir se faire en mesurant la résistivité ou le magnétisme d'un film mince supraconducteur déposé sur le métal. Il reste à résoudre la question du couplage thermique à l'interface entre les deux métaux.

c) Thermomètres magnétiques.

Les thermomètres magnétiques sont les plus utilisés à très basse température. Généralement, on utilise la résonance magnétique nucléaire mais cette technique présente l'inconvénient de dissiper de l'énergie dans le thermomètre aussi bien en RMN pulsée que en RMN continue. La technique de magnétométrie continue avec un SQUID est beaucoup mieux adaptée à une mesure bolométrique car elle permet une réponse rapide sans chauffer l'échantillon. La sensibilité de ce type de mesure est très bonne et elle présente l'avantage d'être une mesure directe de l'énergie totale du système magnétique. Même en cas de thermalisation incomplète du système de spin, la variation d'aimantation sera directement reliée à l'énergie déposée dans le système de spin. La difficulté provient du mauvais couplage entre les spins nucléaires et les électrons du métal. Néanmoins, si la chaleur spécifique des électrons est négligeable devant celle des spins, on peut espérer que toute l'énergie déposée va se retrouver dans le système de spins.

d) Autres thermomètres à très basse température.

Pour mémoire, voici quelques thermomètres couramment utilisés à très basse température mais très mal adaptés à une mesure bolométrique:

- Orientation nucléaire et effet MosBauer.
- Mesure de la pression osmotique ou de la pression de fusion de ^3He .
- mesure du bruit thermique d'une résistance métallique.
- Mesure de temps de relaxation spin-réseau.

4) Une application: bolometre rapide BOLO-BISTRO.

a) Les spécifications de l'expérience.

Il s'agit de mesurer l'énergie d'ions lourds retrodiffusés par la cible à étudier pour en déterminer les propriétés de surface (retrodiffusion Rutherford). Ces ions ont une énergie de 1 MeV et une résolution de 1 keV (10^{-3}) est demandée avec un taux de comptage pouvant atteindre 1000 coups/sec (voir le cours de A. Broniatovsky).

b) Les difficultés liées à l'utilisation d'un bolomètre semi-conducteur.

Du fait du fort taux de comptage et de la lenteur des thermomètres semi-conducteurs, le bolomètre ne pourra retrouver sa température d'équilibre entre les différents ions incidents et les corrections d'empilement risquent de conduire à une dégradation à la résolution en énergie. En effet, la réponse d'un tel bolomètre n'est pas du tout linéaire et seul un traitement digital complexe réalisé en ligne permet d'espérer une correction suffisante de ces effets.

c) Description du bolomètre métallique à thermo-couple.

Avec une couche mince d'or carré de 1 mm et 2 μm d'épaisseur, en utilisant un thermocouple AuFe implanté, il est possible d'obtenir à 100mK, une impulsion de courant de 1 μA avec une constante de temps thermique du bolomètre de 10 μs . La mesure peut se faire alors soit avec un transformateur pour adapter l'impédance à un amplificateur classique (impédance du thermocouple = 30 $\text{m}\Omega$), soit en utilisant un SQUID D.C. déposé directement à côté du thermocouple.

d) Avantages du système métallique à thermo-couple.

Par rapport à un bolomètre classique le bolomètre à thermocouple présente deux avantages principaux: sa rapidité de réponse et sa linéarité en énergie. En effet, la chaleur spécifique est proportionnelle à la température $C=\gamma T$ ainsi que le pouvoir thermoélectrique $S=\alpha T$. Le passage d'une température T_1 à une température T_2 correspond alors à une énergie déposée :

$$E = \int_{T_1}^{T_2} C \, dT = \frac{\gamma}{2} (T_2^2 - T_1^2).$$

La tension thermoélectrique associée est donnée par

$$V = \int_{T_1}^{T_2} S \, dT = \frac{\alpha}{2} (T_2^2 - T_1^2).$$

On a donc la relation directe $V = \frac{\alpha}{\gamma} E$ qui est au premier ordre indépendante de la température. Ainsi, l'amplitude de l'impulsion associée à une particule ne dépend pas de la température de base du bolomètre, ce qui rend inutile (au premier ordre) les corrections d'empilement et devrait permettre de garder une bonne résolution aux taux de comptage élevés.

B La résolution limite d'un bolomètre.

La question de la résolution limite liée aux propriétés thermodynamiques d'un bolomètre résistif est complexe du fait de la difficulté à tenir compte du mécanisme de mesure de température et de la présence d'une puissance de polarisation. Nous nous proposons ici de considérer des systèmes modèles plus simples pour voir de quelle manière la chaleur spécifique de la cible la méthode utilisée pour mesurer la température peuvent influencer sur la résolution du bolomètre.

1) Bolomètre à spin parfait.

Considérons un système de spin $\frac{1}{2}$ sans interaction placé dans un champ magnétique B . Pour mesurer la température du système, on mesure son aimantation avec une bobine connectée à un SQUID. A l'équilibre thermique, chaque spin a une probabilité $\pm \exp(\mu B / 2KT)$ de se trouver dans un état \downarrow ou \uparrow . On remarque immédiatement que l'aimantation du système est proportionnelle à son énergie interne. Si donc le système est isolé, son énergie interne est constante et la température mesurée ne présentera aucune fluctuation thermodynamique. La différence d'aimantation entre le système avant et après l'absorption d'une particule donnera donc exactement l'énergie de cette particule. Pour un tel bolomètre, la seule limitation à la résolution sera la limite quantique de mesure de l'aimantation, soit une énergie $\Delta E = \hbar \Delta t$ ou Δt est le temps de mesure. Cela conduit à des résolutions de l'ordre de 10^{-8} eV pour des temps de mesure de la microseconde. Atteindre cette limite semble actuellement illusoire mais ce n'est pas complètement utopique. En effet, des expériences de mesure de flux magnétique avec un SQUID D.C. ont permis d'atteindre un bruit en énergie de l'ordre de quelques $\hbar \Delta t$. La remarque importante est que pour ce système, la résolution n'est pas affectée par les fluctuations thermodynamiques liées à la température.

2) Thermomètre à spin parfait.

Prenons maintenant un thermomètre parfait constitué d'un petit système de spin (chaleur spécifique C) couplé à un gros réservoir à la température T . A l'équilibre, la température du thermomètre est par définition égale à celle du réservoir mais son énergie va fluctuer avec une amplitude $\langle (\Delta E)^2 \rangle = k_B C T^2$. Lorsque l'on mesure l'aimantation du système de spin, on ne mesure pas sa température mais son énergie interne, la température apparente mesurée va donc fluctuer comme l'énergie: $\langle (\Delta T)^2 \rangle = k_B T^2 / C$. Il faut remarquer que la fréquence typique de ces fluctuations est donnée par la force du

couplage thermique avec le réservoir, comparée à la chaleur spécifique du thermomètre. Si l'on veut mesurer une température avec précision, il y a donc deux possibilités:

- Utiliser un thermomètre avec une grande chaleur spécifique pour réduire les fluctuations en température.
- Moyenner la mesure pendant un temps grand devant la période typique des fluctuations de température. Cela n'est possible que si le couplage thermique entre le thermomètre et le réservoir est suffisamment bon pour réduire la constante de temps des fluctuations thermiques.

3) Thermomètre imparfait.

Dans la plupart des cas, la mesure du thermomètre ne portera pas sur toute l'énergie du système mais sur une propriété physique particulière. On pourra généralement assimiler cette mesure à la mesure de l'énergie partielle d'un sous système du thermomètre, les fluctuations de la température mesurée étant alors assimilées aux fluctuations d'énergie dans ce sous système. Dans ce cas, même pour un système isolé, la résolution en énergie sera limitée par ces fluctuations. Il est facile de calculer ces fluctuations dans le cas où la chaleur spécifique du sous système mesuré est une fraction α de la chaleur spécifique totale du thermomètre. On obtient:

$$\langle(\Delta E)^2\rangle = k_B C T^2 \alpha(1-\alpha).$$

Les fluctuations de la température apparente sont alors donnée par :

$$\langle(\Delta T)^2\rangle = k_B T^2 / C \frac{(1-\alpha)}{\alpha}$$

4) Thermomètre couplé à une cible.

Nous allons essayer de déterminer quel est le meilleur thermomètre pour mesurer l'énergie déposée dans un cible de chaleur spécifique donnée C_{cible} avec différentes hypothèses sur le thermomètre.

a) Thermomètre dont on mesure toute l'énergie.

Il est clair que l'énergie déposée va se répartir à l'équilibre entre la cible et le thermomètre comme le rapport des chaleurs spécifiques. On remarque immédiatement que si la chaleur spécifique du thermomètre devient très grande devant celle de la cible, toute l'énergie déposée sera transférée dans le thermomètre et les fluctuations seront limitées par la chaleur spécifique de la cible. On obtiendra alors la meilleure résolution qui sera limitée par ces fluctuations:

$$\text{pour } C_{\text{th}} \rightarrow \infty : \langle(\Delta E)^2\rangle = k_B C_{\text{cible}} T^2 .$$

b) Thermomètre imparfait (mesure d'une partie de l'énergie).

Dans ce cas, le calcul général est un peu plus compliqué. Soit x le rapport entre la chaleur spécifique du thermomètre et celle de la cible. La chaleur spécifique de la partie active du thermomètre est donnée par : $C_a = \alpha C_{\text{therm}} = \alpha x C_{\text{cible}}$ tandis que la chaleur spécifique de la partie inactive du système (cible+thermomètre) est donnée par : $C_i = (1+x)(1-\alpha) C_{\text{cible}}$. Les fluctuations d'énergie entre ces deux parties s'écrivent simplement :

$$\langle (\Delta E)^2 \rangle = k_B T^2 \frac{C_a C_i}{C_a + C_i} = k_B C_{\text{cible}} T^2 \frac{\alpha x (1+x)(1-\alpha)}{(1+x)}$$

A partir de ces fluctuations, on peut calculer les fluctuations apparentes de température $\langle (\Delta T)^2 \rangle = \langle (\Delta E)^2 \rangle / C_a^2$ et la résolution en énergie $dE^2 = C_{\text{total}}^2 \langle (\Delta T)^2 \rangle$. Il nous faut donc minimiser la fonction

$$y(x) = \frac{\alpha x (1+x)(1-\alpha)}{(1+x)} \frac{(1+x)^2}{(\alpha x)^2} = \frac{(1+x)(1+x)(1-\alpha)}{\alpha x}$$

Dans le cas où $\alpha=1$, la fonction s'écrit $y(x)=(1+x)/x$ et on retrouve le cas du thermomètre parfait avec un minimum pour $x \rightarrow \infty$

Par contre dans le cas général, cette fonction présente un minimum pour $x = \frac{1}{\sqrt{1-\alpha}}$

Ainsi, lorsque la mesure de température est équivalente à la mesure d'une fraction de l'énergie du thermomètre, la résolution optimale sera obtenue pour une chaleur spécifique du thermomètre du même ordre de grandeur que celle de la cible.

5) Conclusion.

En conclusion, il faut retenir que la limitation thermodynamique à la résolution des bolomètres n'est pas une limite absolue mais dépend fortement de la manière dont est faite la mesure de température. On aura souvent intérêt à utiliser un thermomètre dont la chaleur spécifique est voisine de celle de la cible mais ici encore, ce n'est pas une règle absolue car, si le thermomètre est très bien couplé avec la cible, les fluctuations thermiques ne limitent plus la résolution, leur fréquence devenant très grande devant la fréquence de mesure.

