

Bruits et environnement

H. Godfrin



DRTBT 1992 - 19.

États de l'environnement

H. Godin

Détection de rayonnements à très basse température

2ème école d'Automne La Londe Les Maures 92

Bruits et environnement

H. Godfrin, J-L. Bret, Chr. Gianèse

CNRS-CRTBT
BP 166, 38042 Grenoble Cedex 9
Fax 76 87 50 60

Introduction

Vibrations mécaniques

- a) causes
- b) protection contre les vibrations par découplage
- c) construction anti-vibratoire

Interférence électromagnétique

- a) causes
- b) propagation
- c) protection contre les perturbation électromagnétiques
- d) cas des mesures aux basses températures
- e) perturbations électromagnétiques dues aux vibrations

Effets thermiques des perturbations

- a) constantes de temps internes et externes
- b) entrées de chaleur
- c) constantes de temps typiques
- d) résistance de Kapitza
- e) couplage électrons-phonons
- f) couplage spin-réseau

Conclusion

Introduction

Les perturbations provenant de l'environnement (bruits électromagnétiques, vibrations mécaniques, entrées de chaleur) dégradent les performances des détecteurs refroidis ("bruit" et/ou "chauffage") et peuvent, dans des cas extrêmes, rendre leur fonctionnement impossible.

Un minimum de précautions prises lors de la conception de l'appareillage cryogénique peut éviter des modifications coûteuses et peu efficaces; c'est pourquoi il est impératif de connaître l'origine de ces perturbations, les techniques de "filtrage", ainsi que les ordres de grandeur concernant ces "perturbations" et leur effet sur le système refroidi afin d'adapter le "filtrage" aux conditions expérimentales.

Vibrations mécaniques

Certaines expériences à basse température sont très sensibles aux vibrations. Celles-ci perturbent le système de mesure soit par chauffage (conversion directe en chaleur), soit par microphonisme (perturbation des mesures électriques ainsi que, éventuellement, chauffage par les courants de bruit). Il est donc important, en premier lieu, d'étudier l'environnement acoustique avant d'implanter un système de mesure; ensuite, éviter d'introduire des éléments susceptibles d'introduire des vibrations; puis finalement, construire le système en respectant des règles simples qui permettent de limiter la conduction des vibrations jusqu'au système expérimental et d'éviter les résonances du système à des fréquences "dangereuses".

- a) Causes: - vibration des bâtiments (vent, circulation de véhicules, machines)
 - vibration des pompes à vide couplées au système cryogénique.
 - bruit acoustique des pompes, ventilateurs...
 - canalisations d'eau
 - ébullition de l'azote et de l'hélium du cryostat

Le couplage entre les sources de vibration et le système de mesure a lieu, en général, par conduction des ondes acoustiques dans les milieux solides (canalisations de pompage, supports du cryostat...); la propagation par l'air est souvent importante à basses fréquences.

Les fréquences caractéristiques des vibrations mécaniques vont de quelques Hz (vibration des bâtiments) jusqu'à quelques dizaines de KHz. En pratique, les vibrations de haute fréquence sont atténuées plus facilement.

Les vibrations sont souvent amplifiées par des effets de résonance: barres solides, lignes de pompage, enceintes, plaques peuvent avoir des amplitudes d'oscillation importantes à leurs fréquences propres lorsqu'elles sont soumises à un spectre de vibrations.

b) Protection contre les vibrations par découplage:

Les ondes sonores se propageant par l'air n'engendrent des perturbations remarquables que dans certains cas extrêmes (réception résonnante par le système de mesure). Il suffit alors d'interposer entre la source et le système de mesure des écrans formés par des couches successives de plomb et de polystyrène expansé, par exemple, pour obtenir une forte atténuation sonore.

Les vibrations transmises par le sol et les lignes de pompage, par contre, peuvent donner lieu à des puissances de l'ordre de mWatts dissipées dans le système cryogénique par la déformation périodique des matériaux (en général, celle des supports en matière plastique isolant thermiquement les diverses parties du réfrigérateur).

On utilise en général un support anti-vibratoire pour isoler le cryostat des perturbations acoustiques conduites par le sol. Le principe est celui d'une masse importante (en général un bloc en béton de 100 Kg à une tonne) supportée par des ressorts de faible raideur et comportant un mécanisme d'amortissement. Ce système est l'analogue d'un filtre passe-bas; sa fréquence propre f_0 doit être très inférieure à celle des vibrations perturbatrices (autour de la fréquence propre, ce système amplifie l'effet des vibrations!). On utilise souvent des supports commerciaux en caoutchouc (Firestone, Pirelli, Isolair). Leur fréquence propre est en pratique de l'ordre de 1 à 3 Hz. Des valeurs inférieures seraient souhaitables, mais difficiles à obtenir; des systèmes de soufflets métalliques très souples permettent d'atteindre des fréquences de environ 0.1 Hz.

Dans des situations peu critiques, il suffira d'utiliser une masse importante sur un support ne conduisant pas les vibrations (polystyrène expansé, Gripsol, etc...).

Le bloc antivibratoire est d'autant plus efficace que le rapport entre la fréquence perturbatrice et la fréquence propre est élevé: le pourcentage de transmission est donné par la formule $T = 100\% / ((f/f_0)^2 - 1)$. Les vibrations de haute fréquence présentes dans les systèmes cryogéniques isolés ne proviennent donc pas du sol. Elles proviennent en fait des pompes, qui sont de puissants générateurs de vibrations conduites jusqu'au cryostat par les lignes de pompage.

Le découplage entre les pompes et le système expérimental est indispensable. Parfois une méthode simple peut être appliquée: la ligne de pompage est constituée par un soufflet souple bloqué sur une fraction de sa longueur dans un bac lesté et rempli de sable, puis d'un tuyau en caoutchouc à vide jusqu'au cryostat. On atténue ainsi les hautes et les basses fréquences; il convient de couder la ligne pour affecter les vibrations longitudinales et transverses.

Pour des lignes de diamètre important, donc très rigides, on a recours à des systèmes de découplage plus complexes utilisant des soufflets souples et courts, assemblés en forme de T ou de croix.

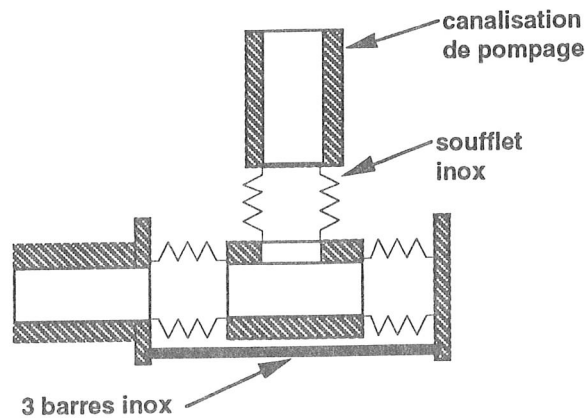


Fig. 1: système de découplage antivibratoire pour les canalisations de pompage;

c) Construction anti-vibratoire

Le problème de découplage des vibrations est en général raisonnablement résolu sur les montages expérimentaux. Par contre, il subsiste souvent de graves problèmes dûs à la conception du cryostat de mesure: celui-ci amplifie les vibrations! Il n'est pas rare de voir des cryostats où des éléments vibrent manifestement; en fait, des vibrations d'amplitude submicronique suffisent parfois pour rendre un système inutilisable. Des règles simples permettent d'éviter les erreurs les plus courantes.

- Ne pas suspendre dans le cryostat des masses importantes à des supports de faible raideur: en particulier, éviter de créer un "pendule" de fréquence comparable à celle du support anti-vibratoire.
- Construire un système très rigide, en particulier ne pas utiliser des éléments de trop faible section pouvant se déformer facilement.
- Adopter une construction "pyramidale": à partir du point de suspension, les éléments seront de plus en plus légers et rigides.
- Attacher, fixer, coller tout élément susceptible de vibrer. En particulier, les lignes coaxiales, fils de mesure et tubes capillaires sont loin d'être inoffensifs, car leur amplitude de vibration peut devenir remarquable.

Ainsi, les éléments les plus sensibles seront protégés par filtrage par les éléments précédents. Parfois on adopte une philosophie de construction opposée (par exemple, on suspend un échantillon par des fils de coton ou de nylon de manière très souple; dans ce cas, les résultats sont imprévisibles, et très dépendants du spectre des vibrations. Ce type de montage a en général pour conséquence un travail de nuit, ou pendant les week-ends, des conditions en général peu recherchées lorsque l'on effectue soi-même les mesures.

L'ébullition de l'azote liquide du cryostat est en général une source de bruit important. Il convient d'utiliser des cryostats superisolés (donc sans azote liquide), en particulier lorsque l'on se sert de détecteurs très sensibles ou si l'on effectue des mesures sous champ magnétique. L'ébullition de l'hélium a des effets de bien moindre importance; les bruits d'ébullition disparaissent lorsque l'hélium est superfluide.

AIRMOUNT VIBRATION ISOLATION

ISOLATION CHART

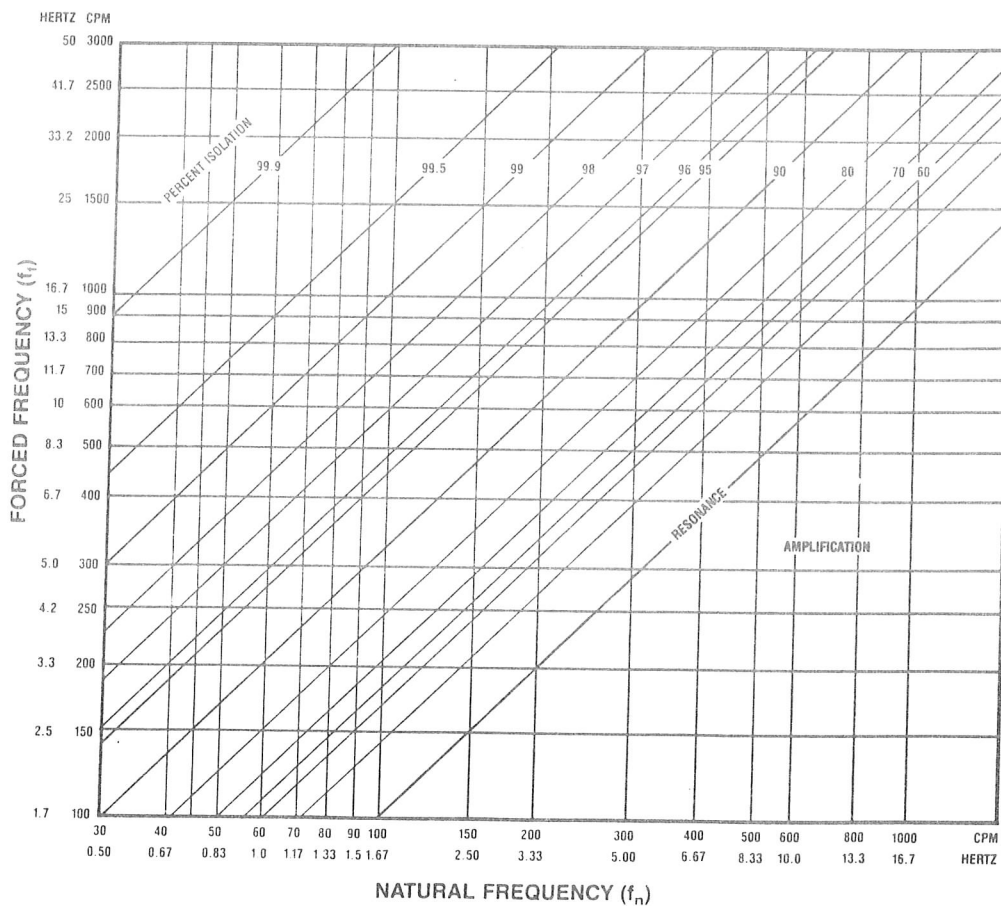


Fig. 2 Isolation antivibratoire par des isolateurs pneumatiques Airmount FIRESTONE.

Interférence électromagnétique

La protection des montages de mesure contre le rayonnement électromagnétique est indispensable à basses températures.

- a) **Causes:**
- émetteurs radio, TV, radar
 - perturbations atmosphériques (foudre)
 - appareillages naturellement bruyants: fours à induction, moteurs, soudure à l'arc...
 - éclairage au néon (en particulier en cas de défauts de démarreur)
 - instrumentation numérique (ordinateurs, voltmètres)
 - instrumentation incorporant des oscillateurs (vidéo, alimentations à découpage)
 - électricité statique, décharges
 - champs magnétiques
 - transitoires sur le réseau (électrovannes, contacteurs)
 - courants circulant dans les blindages (boucles de masse)
 - défauts d'isolation

b) **Propagation:** Les perturbations électromagnétiques couvrent une large plage de fréquences (CC à > 100 GHz). Elles atteignent le montage par deux mécanismes:

1) Conduction par les liaisons électriques de l'instrument de mesure: liaison au réseau d'alimentation, à la terre, à un ordinateur, contact du coffret à des masses métalliques, etc...
En ce qui concerne l'alimentation, les instruments de mesure possèdent presque toujours un transformateur qui assure l'isolement. Cependant, il subsiste une capacité de couplage de 100 à 1000 pF entre les enroulements qui peut transmettre des courants d'autant plus intenses que leur fréquence est élevée.

2) Transmission par rayonnement: Le circuit de mesure peut se comporter comme une antenne et capter un rayonnement perturbateur. Le mode de couplage est souvent très complexe. Cependant, aux basses fréquences (longueur d'onde > dimensions du circuit) l'effet du champ magnétique et du champ électrique peuvent être considérés séparément.

- Couplage par champ magnétique: la composante magnétique ou le champ magnétique alternatif produits par un dispositif quelconque induisent une tension alternative dans les boucles constituées par le circuit de mesure. Une boucle de surface S placée dans un champ H est le siège d'une tension induite

$$V = \mu S(dH/dt)$$

Les transformateurs d'alimentation, les moteurs, les câbles de réseau sont une source importante de champ magnétique perturbateur. Dans une bande de 1 Hz à 20 MHz des tensions de 10 nV à 1 μ V par cm^2 peuvent être générées. Ce mode de transmission affecte plus particulièrement les mesures de très faibles niveaux de tension et les circuits de faible impédance.

- Couplage par champ électrique: la composante électrique ou un champ électrique produits par un dispositif quelconque induisent un courant alternatif dans les conducteurs d'un circuit de mesure. Un conducteur de surface S soumis à un champ électrique E reçoit un courant

$$I = \epsilon S(dE/dt)$$

Ainsi, lorsqu'il existe une différence de potentiel V entre deux conducteurs, la capacité de couplage C laisse circuler un courant

$$I = C(dV/dt)$$

Ce courant, circulant dans un circuit de mesure, donne naissance à une tension perturbatrice d'autant plus élevée que l'impédance du circuit est grande. Ce mode de couplage affecte donc plus particulièrement les circuits de haute impédance et les mesures de faibles courants. Les câbles d'alimentation, les installations d'éclairage, les mauvaises mises à terre constituent les principales sources de champ électrique basse fréquence.

c) Protection contre les perturbations électromagnétiques:

Les méthodes de protection sont bien connues, mais souvent mal employées: blindage, filtrage, découplage, mise à la terre, etc. Elles doivent être choisies en fonction des caractéristiques du circuit à protéger et du spectre électromagnétique de l'environnement.

-En premier lieu, il convient d'estimer le degré de protection nécessaire à la réalisation des mesures. En général, une connaissance empirique est suffisante; dans le cas de circuits très sensibles il faudra analyser les mécanismes de couplage aux perturbations pour optimiser le système.

-Ensuite, éliminer les sources probables de perturbations. Ainsi, lors du choix du lieu d'implantation du système, on évitera la proximité de:

- sources de rayonnements intenses (émetteurs radio ou TV, lignes HT, ordinateurs, ateliers de soudure à l'arc, ateliers de mécanique comportant de grosses machines-outils, etc...)
- sources de champs magnétiques (aimants supraconducteurs, moteurs électriques, fer à béton dans le sol, électrovannes)
- sources de décharges électrostatiques

- Les perturbations peuvent être réduites, mais jamais éliminées. Suivant l'origine des perturbations et le degré d'atténuation souhaité, on peut avoir recours aux solutions suivantes:

Perturbation par conduction:

Les perturbations apportées par le réseau peuvent être atténuées par l'emploi d'un transformateur d'isolement à faible capacité de fuite (de l'ordre du pF). Ces transformateurs comportent deux écrans; le premier, entourant le primaire, doit être relié à la terre du réseau, le deuxième, entourant le secondaire, doit être relié au coffret de l'instrument par le cordon d'alimentation (figure 3).

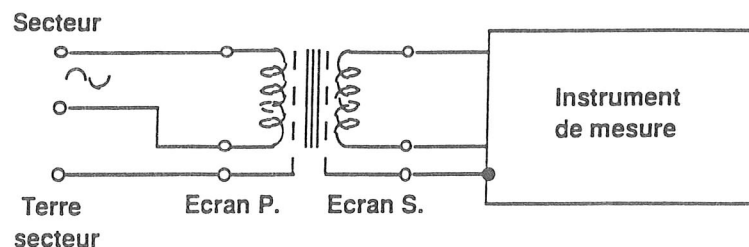


Fig. 3: Transformateur d'isolement.

Un transformateur d'isolement constitue une barrière pour les perturbations basse fréquence, jusqu'à une dizaine de KHz. Au delà, la capacité entre écrans et l'impédance des fils les rendent inefficaces. Le relais peut être repris par des filtres anti-parasites spéciaux pour le secteur. Si la terre du réseau est elle-même source de perturbations, il faut choisir des filtres avec inductance de terre.

Perturbation par rayonnement:

Le rayonnement électromagnétique peut être réduit par une cage de Faraday, dont le blindage métallique réfléchit et absorbe partiellement le rayonnement. L'efficacité est élevée pour des fréquences telles que l'épaisseur des parois est grande par rapport à l'épaisseur de peau e, donnée par

$$e = \sqrt{(2\rho/\omega\mu)}$$

où ρ est la résistivité, μ la perméabilité et ω la pulsation du rayonnement. Pour le cuivre, la conductivité σ=1/ρ= 5.8 10⁷ (Ω.m)⁻¹ à température ambiante, et augmente à basses températures d'un facteur 100, environ, dépendant des impuretés.

FORMULE PRATIQUE: $e = b/\sqrt{F}$ e en mm et F en Hz
e en μm et F en MHz

Métal	b (à 20°C)
Ag	64
Cu	66
Au	79
Al	84.5
Laiton	148

La fraction réfléchie dépend de l'état de surface du blindage, de sa perméabilité et de sa conductivité, de la fréquence, et de l'impédance d'onde de la perturbation électromagnétique. La fraction absorbée dépend de l'épaisseur du blindage, de sa conductivité et de l'épaisseur de peau (pénétration de l'onde).

L'impédance d'onde est le rapport entre l'amplitude de la composante électrique et celle de la composante magnétique de l'onde. A la source, le signal peut avoir une dominante électrique (champ à haute impédance, produit par exemple par une antenne dipolaire) ou bien une dominante magnétique (champ basse impédance, produit par exemple par une boucle de courant). Lors de sa propagation, le champ électromagnétique revient à l'équilibre sur une distance de l'ordre de 10 à 100 longueurs d'onde; l'impédance d'onde est alors de 377 Ohms.

La fraction réfléchie augmente avec la conductivité du blindage et avec l'impédance de l'onde. La dépendance en fréquence est compliquée; en général la réflectivité augmente avec la fréquence pour une onde de basse impédance (magnétique).

La fraction absorbée est élevée pour des matériaux magnétiques. Elle augmente en général avec la fréquence.

En pratique: un blindage en cuivre agit surtout par réflexion; un champ électrique de basse fréquence sera très atténué, mais un champ magnétique de fréquence comparable sera peu affecté. L'épaisseur du blindage a peu d'importance, même si e est grand, et l'on utilise souvent des feuilles de 100 μm d'épaisseur. L'atténuation est sensible au-dessus de 1KHz, et plafonne à environ 100 dB à 10 MHz. Un blindage similaire en feuille d'aluminium n'est efficace qu'à des fréquences beaucoup plus élevées (au dessus de 100 MHz) dans les montages habituels, car les contacts électriques entre feuilles sont surtout capacitifs (couche d'oxyde isolant). L'acier (ferromagnétique) a de bonnes caractéristiques d'absorption, et l'atténuation obtenue à basses

fréquences est proportionnelle à l'épaisseur. Ce matériau permet de couvrir la gamme de 1 KHz à 100 GHz avec une atténuation comprise entre 40 et 120 dB; en particulier, l'atténuation est bien supérieure à basses fréquences pour une onde de basse impédance (mode magnétique).

Bien qu'efficace, la cage de Faraday est peu utilisée. Son coût est élevé et son emploi peu pratique. En outre, il arrive souvent que certains appareils du montage de mesure soient eux-mêmes des sources de perturbation. Il faudrait alors les placer à l'extérieur de la cage, ce qui complique sérieusement son usage. En pratique, le concept de cage de Faraday est utilisé, mais la cage se réduit à une continuité d'écrans et de blindage entourant seulement les circuits sensibles.

L'utilisation d'écrans et des techniques de câblage spécifiques permettent de protéger le système des champs magnétiques.

Pour les perturbations induites par les champs magnétiques basse fréquence il faut réaliser les circuits de manière à ce que la surface de boucle des circuits soit la plus petite possible. Ceci conduit à utiliser des liaisons à structure coaxiale, ou par des fils torsadés. Dans le cas où cette méthode ne peut être appliquée (transformateur, par exemple), il faut utiliser un ou plusieurs écrans en matériaux à forte perméabilité magnétique (co-netic, netic, mu-métal, matériaux magnétiques amorphes) avec un ou plusieurs écrans en cuivre placés en sandwich. Le matériau magnétique doit avoir été soumis à un traitement thermique précis (sauf dans le cas des amorphes) et désaimanté, sous peine de générer des interférences magnétiques lorsqu'il vibre.

c) Cas des mesures aux basses températures

Aux basses températures, une partie des circuits sensibles se trouvent dans le cryostat. Le plus souvent, celui-ci est métallique et peut constituer une portion de la cage de Faraday. Ceci est vrai à condition que certains conducteurs entrant dans le cryostat n'introduisent pas eux-mêmes des perturbations.

Cette cage atténue les champs électriques mais reste transparente aux champs magnétiques de basse fréquence. On peut utiliser des écrans supraconducteurs, qui constituent une arme absolue contre les perturbations E. M., y compris pour les champs magnétiques basse fréquence. Le niobium est un matériau à température critique relativement élevée, et fonctionne bien à 4.2K; par contre, il est difficile d'obtenir des écrans de grand diamètre (prix et difficultés de soudure). Le plomb est plus aisé à mettre en forme, mais on observe des "sauts de flux" pouvant être une source de bruit pour des instruments très sensibles (SQUIDS, par exemple), surtout sous champ magnétique. Les écrans en Pb-Sn ("étain" à souder) sont à proscrire: les sauts de flux sont nombreux, et ce type d'écran peut être un générateur de bruit important.

On peut aussi utiliser des cylindres métalliques de haute conductivité pour atténuer les composantes alternatives d'un champ magnétique très intense (supérieur à quelques Teslas) où les supraconducteurs ne fournissent plus qu'une atténuation très faible.

Pour le raccordement des divers instruments, le concept de cage de Faraday et la pratique des mesures aux B.T. conduisent à l'énoncé de quelques règles à respecter dans la réalisation des liaisons :

- 1) Le cryostat constitue l'unique référence de potentiel pour tous les instruments qui y sont raccordés.
- 2) Les liaisons aux instruments doivent être réalisées au moyen de coaxiaux ou de fils torsadés sous blindage Fig. 1.

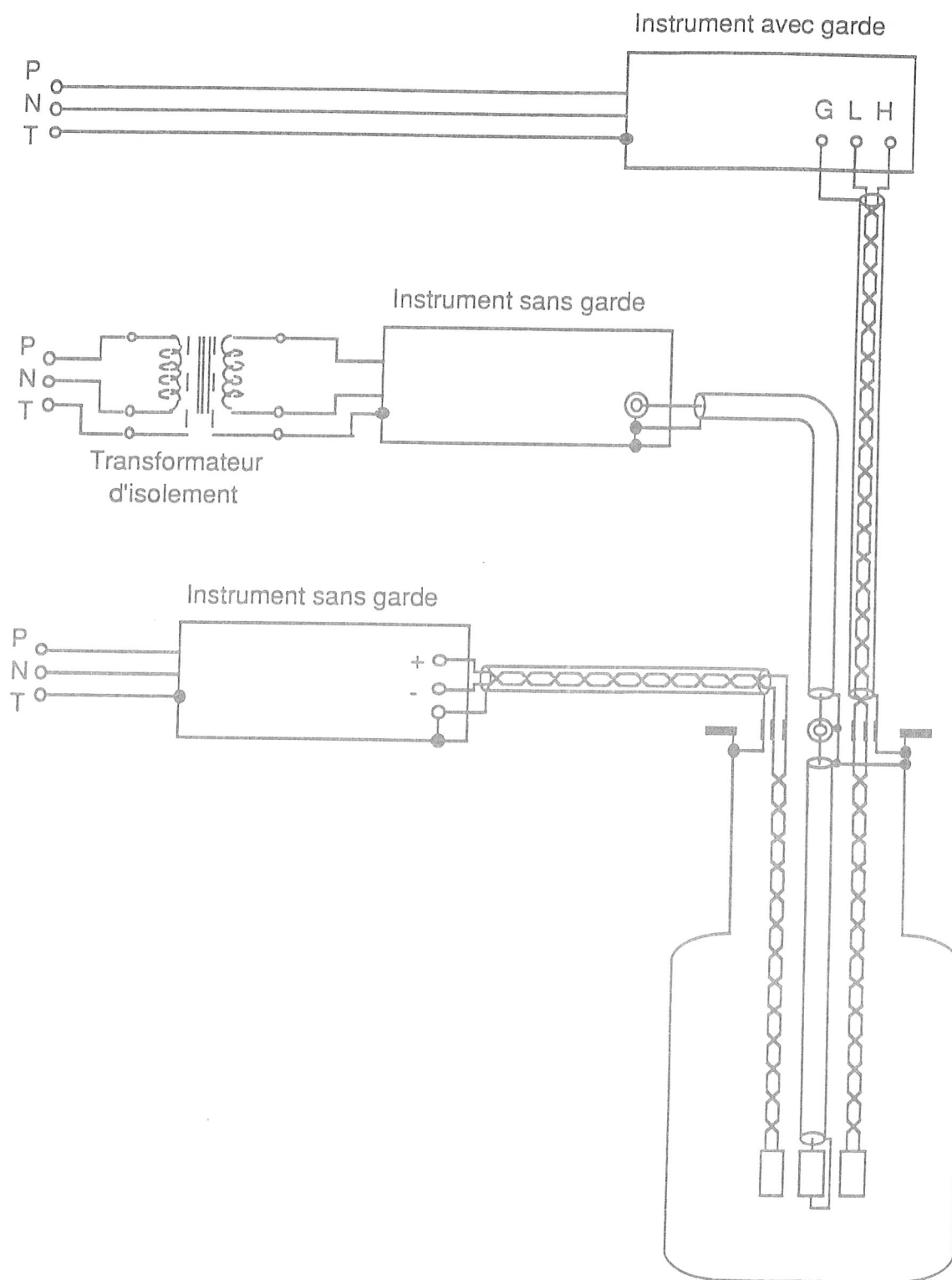


Fig. 4: Exemples de liaisons.

3) Les blindages doivent être reliés au cryostat soit par le boîtier du connecteur soit par l'intermédiaire d'une broche du connecteur reliée elle-même au cryostat par un fil court de bonne section ($0,5 - 1 \text{ mm}^2$).

4) A l'autre extrémité, les blindages des câbles doivent être reliés à la garde des instruments de mesure où, s'ils n'en ont pas, à leur coffret par le boîtier du connecteur.

5) Le cryostat doit être relié à la terre. Le plus souvent, cette liaison se trouve réalisée par les conduites de gaz. Dans le cas contraire, il peut être relié à la terre du réseau par l'intermédiaire de l'un des instruments de mesure et le blindage du câble de liaison.

6) Eviter toute boucle de circuit de masse. En cas d'impossibilité, (double liaison entre deux instruments...) réduire leur surface. Les tensions induites dans les boucles par le champ magnétique font circuler dans les blindages des courants relativement intenses qui, à leur tour, injectent des signaux perturbateurs dans les câbles (voir à la fin de cette section les considérations sur l'impédance de transfert des câbles).

En ce qui concerne les instruments non munis de garde, cette dernière règle conduit d'une part à isoler les coffrets des instruments et d'autre part, pose le problème de liaison à la terre du réseau. En effet, pour des raisons de sécurité, les coffrets doivent y être reliés. Le cryostat étant relié à la terre par les conduites ou un autre instrument, une boucle de terre se trouve ainsi constituée.

A ce problème, la solution la plus simple consisterait à déconnecter le fil de mise à la terre mais cette opération présente des dangers en cas de défaut d'isolement. Elle peut être néanmoins effectuée momentanément pour vérifier que cette boucle apporte effectivement des perturbations. Si tel est le cas, il faut placer un transformateur d'isolement à double écran. Pour des raisons de sécurité, il convient de brancher ce transformateur sur un disjoncteur différentiel sensible.

Pour la réalisation des liaisons entre instrument et cryostat, il est important d'utiliser des câbles dont la tresse de blindage présente un fort taux couverture. Pour cette raison les fils blindés courants sont à éviter. Il est préférable de choisir du câble coaxial ordinaire ou double tresse ou encore traité anti-signal. Pour les câbles multi-conducteurs, employer de préférence ceux comportant une tresse et un ruban métallisé enroulé en hélice (voir à la fin de cette section les considérations sur l'impédance de transfert des câbles).

L'efficacité d'une tresse de blindage est assez limitée vers les fréquences élevées. De ce fait, les perturbations de fréquence supérieure à une dizaine de MHz peuvent pénétrer dans le cryostat et dégager de l'énergie. Pour les arrêter, il faut placer un filtre passe-bas au niveau de l'entrée des fils dans le cryostat. Sa fréquence de coupure doit être inférieure à 1 MHz et la valeur des éléments compatible avec l'impédance des circuits. Un exemple est donné Fig. 5.

Pour que l'efficacité soit bonne aux fréquences élevées, le condensateur doit être du type condensateur de traversée.

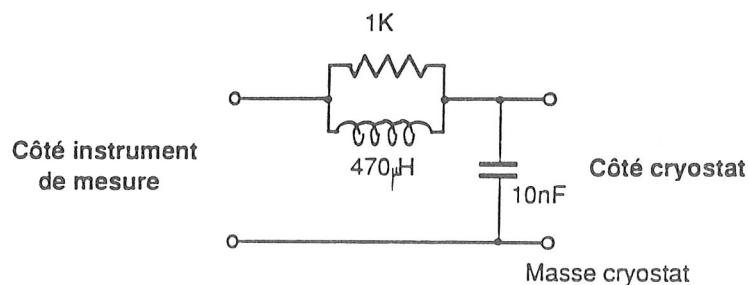


Fig. 5: Filtre passe-bas.

d) Perturbations E.M. dues aux vibrations.

Les vibrations induisent des signaux parasites par suite du microphonisme des circuits. On distingue principalement cinq modes de couplage :

1) Vibration d'un conducteur dans un champ magnétique

Tout conducteur se déplaçant dans un champ magnétique est le siège d'une tension induite. Cet effet, déjà visible dans le champ terrestre, devient très important dans le champ d'un aimant ou d'une bobine.

Ce type de perturbation affecte plus particulièrement les mesures de faibles tensions ou de faibles impédances. Pour les atténuer, il convient d'immobiliser au mieux les conducteurs, de torsader les fils entre eux et, si possible d'atténuer le champ magnétique.

A noter aussi que des vibrations peuvent être créées par les fils eux-mêmes lorsqu'ils sont placés dans un champ et parcourus par un courant alternatif. Cet effet est particulièrement gênant pour les mesures en alternatif, sous champ de faibles résistances (moins de 10Ω) ou d'effet Hall.

2) Vibrations de charges électrostatiques

Les matières isolantes sont susceptibles de porter des charges électrostatiques et d'induire des courants perturbateurs dans les circuits de mesures, lorsqu'il y a mouvement relatif entre ces matières et les conducteurs. Le plus souvent, ce phénomène se rencontre lorsqu'un conducteur est placé dans une gaine isolante. Ce type de perturbations affecte seulement les circuits d'impédance élevée (supérieure à $100 \text{ k}\Omega$) ou les mesures de très faibles courants.

3) Microphonisme des câbles

La déformation des câbles produit des courants perturbateurs dus aux charges électrostatiques engendrées par frottement entre l'isolant et les conducteurs. Comme précédemment, il n'affecte que les circuits d'impédance élevée. Il existe des câbles coaxiaux traités anti- signaux pour lesquels cet effet est très atténué (voir annexe).

4) Microphonisme des transformateurs

Cet effet se rencontre dans les transformateurs d'adaptation d'impédance; il est dû à certaines propriétés du matériau constituant le circuit magnétique. En général, il suffit de veiller à ce que le transformateur ne soit pas soumis à des vibrations trop importantes.

5) Piézoélectricité

Les perturbations générées par cet effet se rencontrent principalement lors de l'utilisation de certains condensateurs céramiques. Elles n'affectent que les circuits de haute impédance et sont rarement d'une amplitude gênante.

Réduction du bruit par transformateur d'adaptation d'impédance à basse température

A basse fréquence, lorsque l'impédance interne de la source de signal est peu élevée le rapport signal sur bruit peut être augmenté par un transformateur [1].

Rapport optimum :

$$N^2 = r \frac{I_b}{E_b}$$

E_b : Courant de bruit de l'amplificateur

I_b : Tension de bruit de l'amplificateur

Lorsque la température de bruit de la source de signal est basse, le facteur de bruit du transformateur est mauvais à cause de son bruit propre, lequel a pour principale origine :

- Tension de bruit Johnson liée à la résistance des enroulements
- Pertes du noyau (courant de Foucault, hystérésis)
- Microphonisme (noyau, enroulements)

Transformateur à base température

Avantages :

- Forte réduction du bruit Johnson des enroulements (négligeable à 4 K) [2]
- Réduction du bruit dû aux pertes du noyau.

Inconvénient :

- Diminution de la perméabilité du noyau (sauf cryoperm [3]) d'où augmentation de la fréquence de coupure basse.

Caractéristiques principales

Essentiellement déterminées par la courbe d'impédance au secondaire, figure 1, la résistance des enroulements et l'inductance de fuite, figure 2.

Le transformateur n'apporte pas de bruit à condition que :

- 1 La tension de bruit Johnson lié à la résistance des enroulements $N^2 r_p + r_s$ soit plus faible que la tension de bruit de l'amplificateur.

- 2 Le courant de bruit Johnson de la résistance R soit plus petit que le courant de bruit de l'amplificateur.
- La condition 1 est presque toujours satisfaite à 4 K, la condition 2 est satisfaite, pour un transformateur à 4 K, si :
- 1 Amplificateur à F.E.T. à T.amb. $R > 5 \text{ M}\Omega$
- 2 Amplificateur à F.E.T. refroidi, $R > 5 \text{ G}\Omega$, ce qui n'est pas réalisable. Dans ce cas, N optimum est calculé en remplaçant le courant de bruit de l'amplificateur par celui généré par R.

Lorsque la température de la source de signal est supérieure à quelques K, son énergie de bruit est supérieure à celle de l'amplificateur. Il suffit alors de prendre

$$N > \frac{E_b}{E_s}$$

où E_s est la tension de bruit de la source de signal, et de réaliser

$$R > \frac{N^2 T_t r}{T_s}$$

où T_t est la température du transformateur et T_s celle de la source.

Si le courant de bruit de R est important, il n'est pas nécessaire de refroidir le F. E. T.

Choix du noyau

Les matériaux magnétique amorphes sont particulièrement intéressants.

- Chute de perméabilité initiale modéré avec l'abaissement de température.
- Pertes plus faibles vers les fréquences élevées (10 KHz).
- Peu sensibles aux contraintes mécaniques.
- Microphonisme faible.

Exemple : Vitrovac 6025 F [3]

Perméabilité initiale à 100 Hz :

- A température ambiante : 114000
- A 77 K : 69000
- A 4 K : 48000

[1] J. O.Lekkala and J. A. V. Malmivuo, Rev. Sci. Inst. 14, 939 (1981).

[2] D. E. Prober, Rev. Sci. Inst. 45, 849 (1974).

[3] Vacuumschmelze (R.F.A.), importateur : P. Balloffet SA,

DEFINITION DU CABLE COAXIAL A BRUIT REDUIT

Lorsqu'un câble est soumis à une déformation, à un choc ou à des vibrations, il y a production de signaux électriques parasites pouvant atteindre une valeur appréciable et perturber ou fausser ainsi les indications que le câble est chargé de transmettre.

Ce phénomène d'émission de "signal" peut être considérablement atténué sur tous les types de coaxiaux en polythène plein (Filothène) ou en polytétrafluoréthylène (PTFE) référencé "Filoflon", grâce à un traitement approprié à la surface du diélectrique.

Il existe plusieurs types de traitement que nous définissons ci-dessous :

1) Traitement L V - Applicable uniquement au Filothène

Il consiste en une lubrification de la surface du diélectrique. Ce traitement n'entraîne aucune modification des caractéristiques électriques et mécaniques du câble ; son efficacité est toutefois limitée.

Ce type de traitement est préconisé lorsque les câbles traités doivent transmettre des courants de fréquence élevée (plusieurs centaines de MHz).

2) Traitement P G - Applicable uniquement au Filothène

Il consiste en l'application d'un vernis semi-conducteur sur le diélectrique. Le vernis ainsi appliqué adhère solidement au diélectrique ce qui permet de conserver au câble des performances constantes. Le traitement est d'une grande efficacité car il permet un rapport de réduction du signal parasite de l'ordre de 34 dB* par rapport à un câble non traité.

Toutefois l'augmentation de l'affaiblissement dans les câbles aux fréquences supérieures à 30 MHz** limite l'emploi de ce traitement au cas de transmission d'impulsions ou de signaux à basse fréquence.

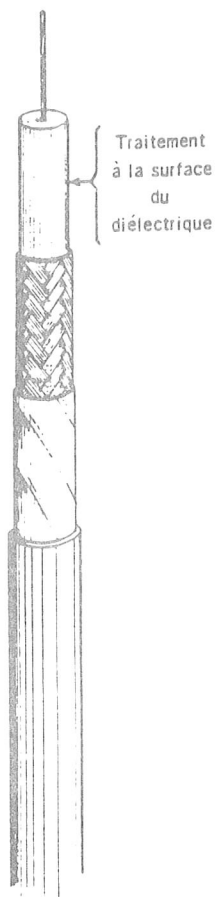
Remarque : Le vernis utilisé se dissout aisément avec les solvants classiques (acétone, éther, acétate de méthyle etc...). Avant le montage des connecteurs, il suffit d'essuyer soigneusement les extrémités du diélectrique avec un coton enduit de solvant jusqu'à disparition de toutes traces noires.

3) Traitement R G - Applicable uniquement au PTFE

Ce traitement consiste à appliquer sur le diélectrique un ruban de PTFE chargé de particules semi-conductrices de très faible épaisseur. C'est donc un traitement très voisin du traitement "PG", mais supportant des températures de 200°C et au-delà.

L'efficacité du traitement RG est comparable à celle du traitement "PG" (rapport de réduction de l'ordre de 34 dB*). Par contre, ce traitement entraîne également un fort accroissement de l'affaiblissement des câbles, qui en limite l'emploi aux fréquences inférieures à 30 MHz.

Remarque : Le ruban PTFE appliqué sur le diélectrique ne fait pas corps avec le diélectrique. Lors du montage des connecteurs, il suffit de le déruber et d'essuyer soigneusement toutes traces de particules noires pouvant se trouver sur le diélectrique.

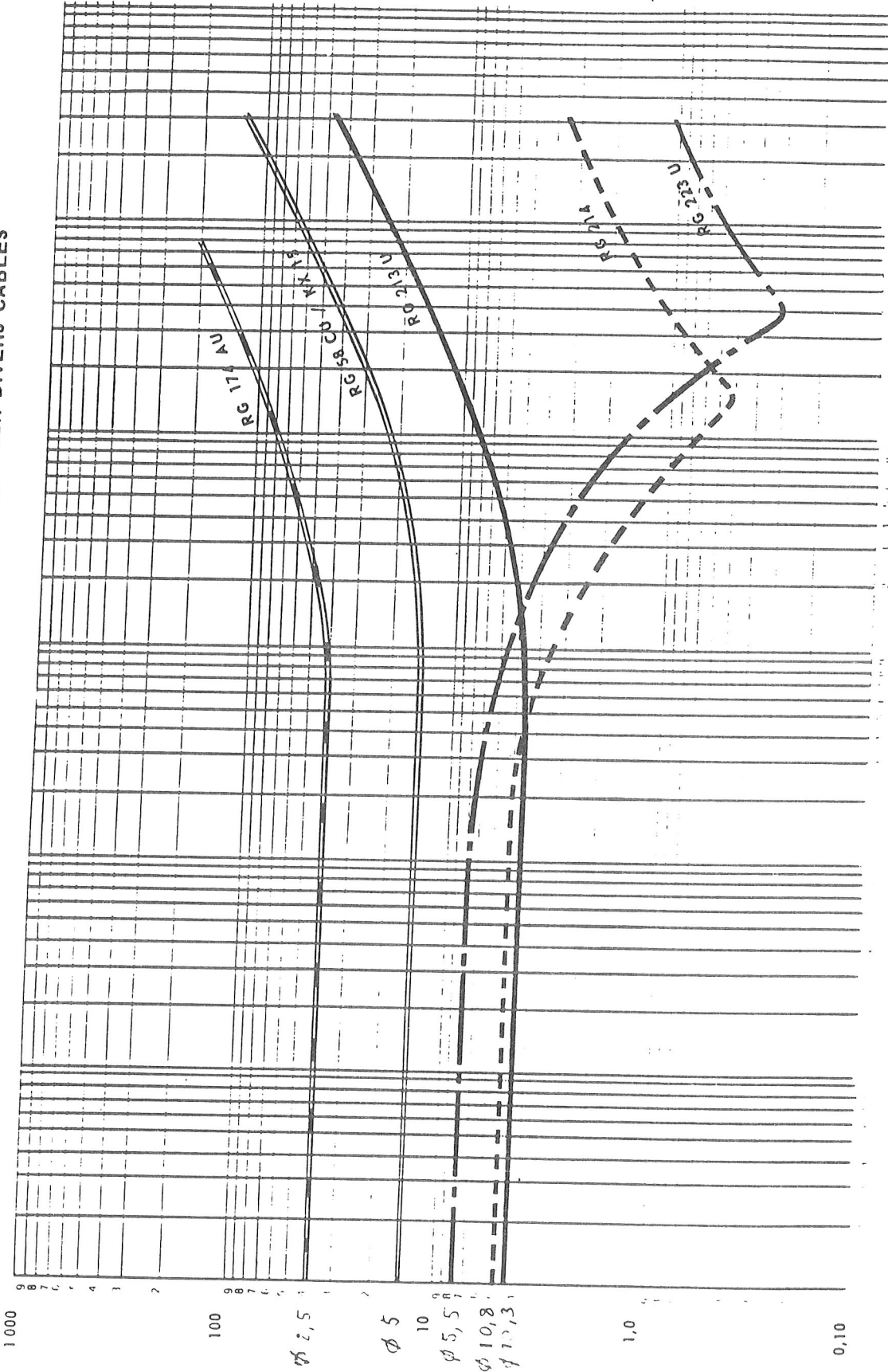


* Ce rapport n'est donné qu'à titre indicatif ; il dépend des types de câbles. Les câbles anti-signaux sont plus précisément définis par le niveau de bruit maximal obtenu dans les conditions de mesures de référence. A la demande nous pouvons garantir un niveau de bruit maximal par un contrôle de fabrication en continu.

** De l'ordre de + 25 % à 200 MHz et 35 % à 400 MHz.

IMPEDANCE DE TRANSFERT DE SURFACE "ZT" SUR DIVERS CABLES

ZT en mΩ / mètres



1000
100
10
1
0,10

0,1 KHz
1 KHz
10 KHz
100 KHz
1 MHz
10 MHz
100 MHz

→ Fréquence Hz

1 tress

2 tress

RG 174 A U

RG 58 C U

RG 213 U

RS 221 A

RG 323 U

φ 2,5

φ 5

10

φ 5,5

φ 10,8

φ 12,3

1,0

0,10

5 Immunité aux parasites - Impédance de transfert Z_T (Ω/m)

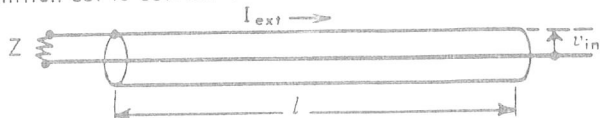
L'étude théorique des problèmes de perturbations électromagnétiques est très complexe et seule une étude expérimentale permet généralement de les résoudre.

Les câbles n'échappent pas à cette règle, mais il est possible de caractériser l'efficacité de leur blindage par une grandeur appelée **impédance de transfert**, exprimée en Ω/m , et qui mesure le couplage entre l'espace intérieur au blindage et l'espace extérieur.

Ses avantages principaux sont :

- d'être une grandeur caractéristique du blindage;
- de permettre de comparer divers câbles.

Le principe de sa définition est le suivant :

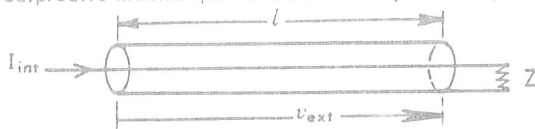


Si un courant parasite uniforme, dû à un champ électromagnétique extérieur, parcourt le blindage d'un câble coaxial, il apparaît à l'extrémité libre une tension parasite entre l'âme et le blindage,

telle que :

$$v_{int} = Z_T \cdot l \cdot I_{ext}$$

Le principe de réciprocité montre que le câble étant parcouru par un courant I_{int}



il apparaît entre les extrémités du blindage une tension parasite

$$v_{ext} = Z_T \cdot l \cdot I_{int}$$

Dans les deux cas : câble parasité ou câble parasitant, le signal parasite induit par le signal perturbateur est proportionnel à Z_T .

L'efficacité du blindage d'un câble est donc d'autant plus grande que son impédance de transfert est plus faible.

Pour les très basses fréquences, Z_T représente la résistance linéique du blindage ; il s'ensuit qu'à construction similaire Z_T sera plus faible sur un gros câble que sur un petit.

Pour les fréquences plus élevées, deux phénomènes modifient Z_T .

- l'effet pelliculaire qui limite la pénétration des courants dans les masses métalliques diminue Z_T puisqu'il affaiblit le couplage entre espaces intérieur et extérieur.
- le couplage selfique dû à la structure en tresse du blindage augmente Z_T .

A la demande, nous pouvons fournir pour nos câbles coaxiaux les courbes $Z_T(f)$ dont quelques unes sont données page suivante.

Le montage utilisé pour les mesures est du type triaxial, conforme à la méthode définie par la Commission Electrotechnique Internationale (Publication CEI 96-1).

Fournisseurs de câbles

(Double blindage, faible conduction thermique)

Câbles à double blindage:

Marque: Acome

Distributeur: CEL

126, rue Mazenod
69421 Lyon Cedex 3
92814 Puteaux Cedex
Tél.: 78 53 94 94

Télécopie: (1) 78 53 50 07

Marque: Belden

Distributeur: Belden Electronics

Tour Anjou
33 Quai de Dion Bouton
92814 Puteaux Cedex
Tél.: (1) 40 81 03 70

Télécopie: (1) 40 81 02 22

Marque: Ralocar-Condelec

Distributeur: Seveko

72-74 Avenue Gambetta
93171 Bagnolet Cedex
Tél.: (1) 48 97 91 92

Distributeurs de marques diverses:

S.E.I.

Local Postal 512
Avenue du Québec
Z.A. du Courtabœuf
91940 Les Ulis
Tél.: (1) 64 46 30 60

Comtec

48, rue d'Estienne d'Orves BP 144
78507 Sartrouville Cedex
Tél.: (1) 39 57 01 12

Télécopie: (1) 39 57 58 50

Coaxial à conduction thermique modérée (T. amb.à 4 K)

Coaxial réf. : 54552-001-3 (Blindage par ruban aluminisé)

Marque : Axon

Route de Châlons B.P. 1

51210 Montmirail

Tél. : 26 81 22 10 Télécopie : 26 81 28 83

Câbles spéciaux pour basses températures

Marque : Lake Shore Cryotronics

Importateur : Cryophysics

9, rue Dallery

F-78350 Jouy en Josas

Tél. : (1) 39 56 00 66 Télécopie : (1) 39 56 42 56

Câbles coaxiaux en acier inoxydable

(Faible conduction thermique)

Marque : Cooner wire company

9186 Independence avenue, Chastsworth,

CA 91311 (818) 882-8311 E. U. A.

Câbles coaxiaux semi-rigides

(Inox, CuBe, Niobium,...)

Marque : Micro- Coax Components

Importateur : Alpen

Z. A. Tremblay-Charles De Gaulle

11, rue Henri Farman

93290 Tremblay-en-France

Tél. : 48 60 76 65 Télécopie : 48 60 39 33

Effets thermiques des perturbations (entrées de chaleur)

Les interférences électromagnétiques et les vibrations mécaniques apportent de l'énergie au système cryogénique. L'effet de chauffage dû à ces perturbations doit être estimé lors de la construction de tout système cryogénique. Pour cela, il suffit de connaître quelques propriétés des matériaux utilisés: chaleur spécifique, conductivité thermique, et résistances thermiques associées aux interfaces. La résistance thermique d'un système soumis à un flux de chaleur est définie par le rapport entre la différence de températures associée et le flux de chaleur. Elle s'exprime en Kelvin/Watt. Pour un barreau de longueur L , section A , conductivité thermique κ , $R = L/(\kappa.A)$. La résistance thermique dépend de la température; on prend une valeur moyenne pour les calculs approchés.

a) Constantes de temps internes et externes.

L'évolution d'un système vers l'équilibre thermique est en général complexe; en première approximation elle est caractérisée par plusieurs constantes de temps. Considérons un échantillon de capacité calorifique C relativement simple (gaz de particules ou d'excitations élémentaires d'un seul type) couplé à une source froide par une résistance thermique R .

La constante de temps interne est de l'ordre de $\tau_{int} = a^2/bD$, où a est une dimension caractéristique, D le coefficient de diffusion de la chaleur ($D \approx \kappa/C$, la chaleur spécifique C étant prise par unité de volume), et b un facteur de l'ordre de quelques unités. Ainsi, dans les échantillons de capacité calorifique élevée (notamment au voisinage de transitions de phase) et à faible conductivité thermique, le temps d'équilibre interne peut être grand par rapport aux temps de mesure souhaitables.

La constante de temps externe est $\tau_{ext} = R.C$. En jouant sur le couplage (R), on peut par exemple fixer le degré d'adiabaticité lors des mesures de capacité calorifique. A très basses températures, par contre, il arrive que le couplage soit très faible, ce qui allonge démesurément le temps de refroidissement.

Les systèmes sont en général plus complexes; par exemple dans un métal les électrons et phonons contribuent aux propriétés thermodynamiques et de transport. On effectue alors une division en plusieurs sous-systèmes dont la constante de temps d'équilibre interne t_i est inférieure à celle correspondant à l'équilibre des sous-systèmes entre eux. Par exemple, dans le Cuivre à des températures de l'ordre du milliKelvin, les spins nucléaires, les électrons et les phonons constituent des sous-systèmes faiblement couplés. Chaque sous-système a une capacité calorifique C_j ; le couplage entre les sous-systèmes est représenté par une résistance thermique R_{jj} . L'ensemble est analogue à un réseau électrique (capacités reliées par des résistances), on déduit aisément ses constantes de temps. Ainsi, dans le cas simple de deux systèmes de capacités calorifiques C_1 et C_2 en contact à travers une résistance thermique R , $\tau = R.C_1.C_2/(C_1+C_2)$.

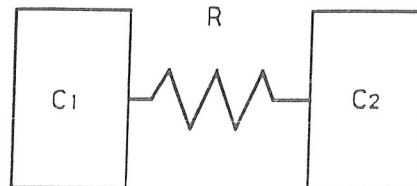


Fig. 7: Constante de temps d'équilibre thermique entre deux systèmes simples.

En pratique, à une température donnée, on pourra regrouper un certain nombre de sous-systèmes en sous-ensembles "bien couplés", et il suffit d'examiner l'équilibre entre un petit nombre (en général deux) de sous-ensembles. Un cas classique est celui de ^3He solide, où l'on distingue des réservoirs thermiques de phonons, lacunes, Zeeman, dipolaire, échange, couplés entre eux différemment en fonction de la température.

Chaque sous-système de l' "échantillon" peut être à une température différente. Le "thermomètre" employé sera également un système complexe. Les couplages entre l'échantillon et le thermomètre mettront en jeu une série de sous-systèmes, rendant la séparation "thermomètre-échantillon" peu évidente a priori. De par ce découplage, certains thermomètres seront sensibles à la température des électrons, ou à celle des phonons, etc...

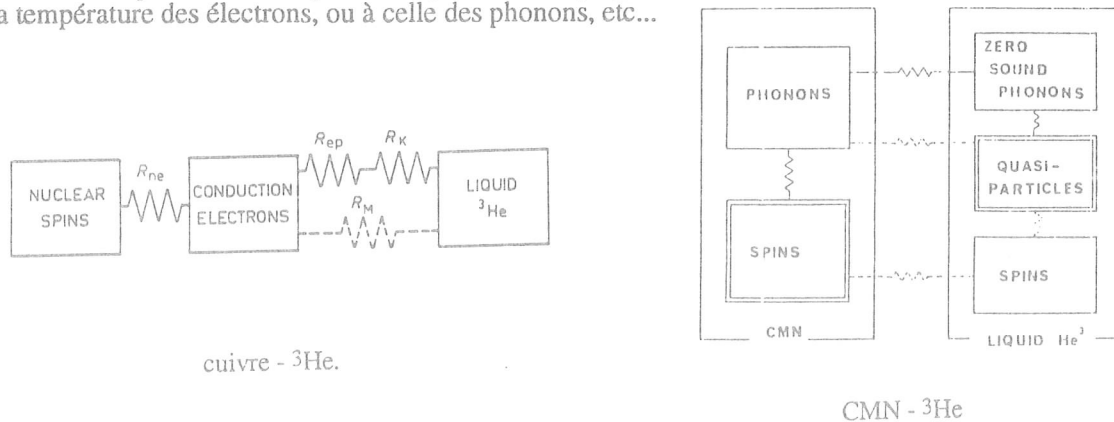


Fig. 8: Equilibre thermique de systèmes complexes: CMN - ^3He et cuivre - ^3He .

b) Entrées de chaleur:

Lorsque la température d'un échantillon (ou de l'un de ses sous-systèmes) diffère de celle de la source froide (réfrigérateur) de manière permanente, c'est-à-dire après un temps très supérieur aux constantes de temps appropriées, il est évident qu'une entrée de chaleur (dQ/dt) est présente. Il en résulte une élévation de température $\Delta T = R \cdot dQ/dt$ sur la résistance thermique empruntée par ce flux de chaleur. Ce découplage peut être souhaité, comme dans le cas des porte-échantillon à température variable, faiblement couplé à un bain à température fixe: ce montage sera rapide, donc aisément réglable, et d'emploi flexible. Ce système sera, par contre, sensible aux perturbations.

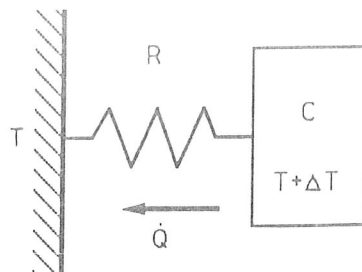


Fig. 9: Découplage thermique d'un échantillon simple par rapport à la source froide sous l'effet d'un apport de chaleur externe dQ/dt .

Les sources des entrées de chaleur sont multiples. La conduction à travers les supports solides est la forme la plus simple, et peut être facilement estimée (voir "conductivité thermique"). La conduction du gaz dans le vide d'isolement peut également être estimée, et constitue rarement un problème dans les systèmes cryogéniques étanches convenablement pompés. De même, le rayonnement à partir des surfaces chaudes est calculable aisément, et d'éventuels problèmes se résolvent à l'aide d'écrans thermiques.

Les vibrations mécaniques produisent des entrées de chaleur importantes lorsque le système contient des parties déformables (par exemple des supports plastiques); il suffit d'une amplitude très faible d'oscillation, amplifiée si le système est proche d'une résonance mécanique, pour générer des entrées de chaleur importantes. A titre d'exemple, plus de 100 μ Watts ont été mesurés sur un échantillon de plomb de 1 Kg supporté par trois tiges de nylon de 5 mm de diamètre et 3 cm de longueur, vissées sur l'échantillon; une légère modification (renforcement de la tige près du pas de vis) a réduit de trois ordres de grandeur ces pertes. Des valeurs "typiques" des entrées de chaleur par vibrations dans des montages cryogéniques vont du nanoWatt au microWatt. Elles sont souvent proportionnelles à la masse, et une valeur de 10 nW/Kg est considérée comme une valeur très raisonnable.

Une masse de cuivre d'une centaine de grammes, refroidie à travers un fil de cuivre d'un millimètre de diamètre et un centimètre de longueur, aura une constante de temps de l'ordre du dixième de seconde. Mais il suffit de 10 nanowatts à 3 mK pour découpler cette masse de 0.3 mK par rapport à la source froide. Ceci est réalisable dans un montage rigide peu sensible aux vibrations.

Dans un montage similaire une masse de cuivre reliée à la source froide par des fils de cuivre (30 fils de diamètre 0.2 mm, 5 cm de longueur), mais suspendue par un ressort en Cuivre-Béryllium (donc susceptible de vibrer) les entrées de chaleur de 700 μ Watts maintiennent l'échantillon à 45 mK, la source froide étant à 25 mK.

Dans le cas où l'échantillon est conducteur, le couplage avec les champs de radio-fréquence des émetteurs radio et télévision peut donner lieu soit à un chauffage de l'échantillon, soit (à très basses températures) à un chauffage des électrons alors que les phonons restent à une température inférieure (découplage électron-phonon). Cet effet est observé lors de mesures de résistance électrique. Par exemple, les résistances de carbone utilisées en thermométrie se "découplent" de la source froide; dans ce cas, suivant la qualité du blindage électromagnétique, les entrées de chaleur varient entre 10^{-9} et 10^{-16} Watts, une valeur typique étant 10^{-12} Watts. Cet échauffement empêche l'utilisation pratique de ces thermomètres en dessous de 30 mK environ (au mieux jusqu'à 5 mK).

Un cas similaire est celui des semi-conducteurs à très basses températures; le faible nombre de porteurs implique une forte dissipation (couplage avec les phonons) par électron. Pour des échantillons de AsGa sous des pertes de 10^{-16} Watts on a mesuré une température des électrons de 100 mK, alors que les phonons de l'échantillon étaient thermalisés à 3 mK. Le couplage électron-phonon est décrit par la suite.

Ces problèmes peuvent être réduits par l'utilisation de cages de Faraday et de filtres radio-fréquence à l'entrée du cryostat décrits précédemment.

IMPORTANT: Deux types de problèmes différents se posent donc à l'expérimentateur:

- 1) $\tau = RC$ (temps de refroidissement)
- 2) $\Delta T = R \cdot dQ/dt$ (entrée de chaleur)

Après avoir identifié la limitation principale, l'expérimentateur optimisera R, C, ou dQ/dt en fonction de son problème.

c) Constantes de temps typiques.

Un échantillon métallique ($C\alpha T$) relié à un bain thermique par un fil métallique ($\kappa\alpha T$, donc $R\alpha l/T$) a une constante de temps τ indépendante de la température, et courte (secondes) ce qui peut être particulièrement agréable expérimentalement. Il en est de même pour un isolant, où C et κ varient en T^3 .

Par contre, un échantillon de CMN collé par un isolant sur la source froide aura une constante de temps variant en T^{-5} , et des difficultés à basses températures ne devraient surprendre personne.

Il n'est pas rare d'observer des constantes de temps de quelques heures, voire quelques jours. Ainsi, la relaxation des protons des plastiques donnera un "entrée de chaleur" pendant plusieurs mois à basses températures!

On utilise souvent des échantillons en poudre afin de réduire le temps de diffusion interne, proportionnel au carré de la taille des grains. Il se pose alors un problème: celui d'obtenir un bon contact thermique entre une poudre et la source froide. On peut dans certains cas placer la poudre en contact avec de l'hélium (^4He au-dessus de 0.5 Kelvin, ^3He au-dessous de cette température, pour des raisons de conduction thermique). Les couches d'hélium adsorbé peuvent être incompatibles avec les mesures (capacité calorifique élevée, par exemple); dans ce cas on mélange la poudre de l'échantillon à une poudre, des fils ou des feuilles de matériau conducteur (or, argent).

d) Résistance de Kapitza

Le transfert de chaleur à travers l'interface entre un solide et un liquide, ou entre deux solides, est caractérisé par une différence de température ΔT proportionnelle au flux de chaleur dQ/dt , et inversement proportionnelle à la surface d'échange thermique A . On définit la résistance thermique de surface, ou "résistance de Kapitza" R_K :

$R_K = \Delta T / (dQ/dt)$, dont les unités sont des K/W . La "résistivité de Kapitza", ou résistance par unité de surface, est $\rho_K = A \cdot \Delta T / (dQ/dt)$, en $K \cdot m^2 / W$. En fait le terme "résistance de Kapitza" correspondait initialement à la résistance thermique très importante observée entre un solide et l'hélium liquide par Kapitza en 1941. On sait maintenant qu'il s'agit d'un phénomène général, lié à la difficulté de transmettre des excitations à travers une interface.

Dans le cas le plus simple, la chaleur est transférée par des phonons. Les densités ρ et les vitesses du son c étant différentes dans les deux milieux, il existe une désadaptation des impédances acoustiques $Z = \rho \cdot c$; il en résulte une réflexion des ondes acoustiques due à l'existence d'un cône critique, ce qui réduit le coefficient de transmission.

Dans un solide typique la densité est de 5 g/cm^3 , et la vitesse du son 5000 m/s . Dans l'hélium $\rho \approx 0.1 \text{ g/cm}^3$, $c \approx 240 \text{ m/s}$. Un rapport d'impédances acoustiques de l'ordre de 1000 implique qu'une très faible proportion des phonons incidents pourra traverser la surface.

La théorie de Khalatnikov permet de calculer R_K dans le cas de la transmission de phonons entre deux milieux séparés par une interface parfaite; en fait, il est rare que l'on observe des valeurs de R_K correspondant à la théorie, sauf pour des échantillons isolants clivés sous hélium à basses températures. De nombreux mécanismes rendent la transmission des phonons meilleure que celle prédite par cette théorie. Sur toutes les surfaces en contact avec de l'hélium liquide il se forme une ou deux couches atomiques d'hélium solide de densité intermédiaire entre les deux milieux, favorisant l'adaptation d'impédances acoustiques. Des excitations de type phonons localisés, dont la relation de dispersion est indépendante du vecteur d'onde, ont été observées dans ces couches par diffusion inélastique de neutrons. Leur existence relaxe les conditions de conservation d'énergie et d'impulsion à l'interface, diminuant ainsi R_K .

Une grande partie de la discontinuité de température ΔT a lieu dans cette couche adsorbée; ainsi, dans des films de quelques couches atomiques on mesure la même R_K que lorsque la surface est en contact avec de l'hélium massif. Mais il existe aussi des effets au voisinage de la surface du

solide (couplage électron phonon à la surface d'un métal, désordre ou oxydation de la surface). Le rôle des électrons à la surface des métaux, ainsi que celui des défauts, contribue à augmenter la transmission de phonons. L'état de la surface est fondamental: on a observé une forte augmentation de R_k après avoir légèrement essuyé un échantillon de cuivre poli.

En général, on peut estimer raisonnablement la résistance thermique de surface à partir de résultats expérimentaux typiques (voir références).

Dans la gamme de températures 10 mK-100 mK, R_k est inférieure à la valeur théorique, mais la loi de variation est bien en T^{-3} , ce qui correspond à un coefficient de transmission indépendant de la température.

Au-dessus de 1K, on observe une forte réduction de R_k ; ceci correspond à la faible longueur d'onde des phonons dominants par rapport à la rugosité de l'interface et à l'existence d'états localisés dans les couches solides adsorbées. A fort flux de chaleur la différence de températures cesse d'être proportionnelle au flux, et la résistance dépend du sens de ce flux. Il se manifeste alors un phénomène de caléfaction (formation de bulles d'hélium gazeux à l'interface).

Au-dessous de 10 mK de nouveaux effets apparaissent; R_k diminue de manière encore mal comprise. Dans certains cas un couplage magnétique a été invoqué. Par ailleurs, de nombreuses expériences dans cette gamme de températures sont effectuées avec des poudres métalliques frittées; en effet, seule l'augmentation de la surface d'échange au niveau de centaines de mètres carrés permet d'échanger quelques nanoWatts à des températures de l'ordre du milliKelvin. Il a été observé que pour des poudres dont les grains ont une taille inférieure à environ 0.1 μm le gain de surface d'échange est dégradé par une plus forte valeur de la résistivité de Kapitza. La longueur d'onde des phonons dominants à ces températures dépasse la taille des grains, le milieu est donc un "milieu moyen" dont les phonons sont fortement modifiés par rapport aux phases massives; d'autre part le couplage électron-phonon, la présence d'impuretés magnétiques, etc ont probablement un rôle important aux plus basses températures, où ces poudres sont essentiellement utilisées pour refroidir de l'hélium trois liquide et des mélanges $^3\text{He}/^4\text{He}$. Dans ce cas, la conductivité du liquide dans les pores de la poudre frittée est également un facteur important, et on limite l'épaisseur des frittés à 2mm.

Au-dessous de 10 mK on observe une variation de r_k a T^{-1} pour les métaux purs en contact avec ^3He pur, et r_k a T^{-2} dans les mélanges. Il faut remarquer que dans ce dernier cas il est bien connu que une à deux couches atomiques au voisinage du solide sont en fait constituées d' ^4He adsorbé préférentiellement à ^3He . D'autre part, les surfaces d'échange ne sont pas connues avec précision dans le cas des poudres: l'estimation fondée sur la mesure de la taille des grains par microscopie électronique fournit des valeurs très supérieures à celles déterminées par la technique des isothermes d'adsorption. En pratique on utilise souvent des poudres de cuivre, et surtout des poudres d'argent frittées. Pour des tailles de grains nominales de 70 nm on mesure des surfaces de l'ordre de $1\text{m}^2/\text{g}$.

Les procédures de fabrication, caractérisation et les valeurs de R_k des poudres d'argent sont décrites en détail par Franco et al. (1984), et celles concernant les poudres de cuivre par Rogacki et al. (1985).

e) Couplage électrons-phonons

Le transfert de chaleur entre les électrons d'un système conducteur et une source froide (support isolant, hélium liquide) isolée électriquement, est limité à basses températures par le mauvais couplage entre les électrons et les phonons plutôt que par la résistance de Kapitza, si l'échantillon est de petite taille. Des mesures effectuées avec des feuilles de cuivre ont permis de déterminer la résistance thermique électrons-phonons aux environs de 100 mK; celle-ci est plus faible et ne suit pas vraiment la valeur théorique $RVT^3 = 8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3\text{K}^4\text{W}^{-1}$ (figure 12). Cette dépendance en V (volume de l'échantillon) indique simplement que chaque électron participe au couplage avec les phonons.

Dans le cas de fils semi-conducteurs en AsGa on a observé une résistance électrons-phonons $RVT^{3.5} = 2.3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3\text{KW}^{-1}$ (T en Kelvin) entre 100 mK et 1K. Dans ce système la

densité d'électrons est faible, et la capacité calorifique des électrons est inférieure à celle des phonons; la constante de temps avec laquelle le gaz d'électrons relaxe vers les phonons est de l'ordre de $8 \cdot 10^{-9} T^{-2.5}$ secondes (T en Kelvin). La réponse du système est donc très rapide, mais la température des électrons sera très sensible aux entrées de chaleur, et surtout au rayonnement électromagnétique.

f) Couplage spin-réseau.

Le refroidissement de nombreux systèmes met en jeu le couplage entre les spins et le "réseau"; c'est le cas, par exemple, des spins électroniques dans le CMN et des spins nucléaires dans le cuivre.

Le cas des spins électroniques est complexe; dans les isolants le couplage dominant concerne les phonons d'énergie voisine de celle des états de spin; des études poussées ont été effectuées dans quelques systèmes, comme le CMN.

Dans le cas simple du cuivre ou du platine, le "réseau" est en fait constitué par les électrons, qui ont une forte capacité calorifique, et sont couplés aux spins nucléaires. La relation de Korringa donne le temps de relaxation spin-réseau: $T_1 T = k$, où k est la constante de Korringa, qui dépend du métal considéré. Pour le cuivre $k = 1.1 \text{ sec.K}$, pour le platine $k = 0.03 \text{ sec.K}$. Les impuretés paramagnétiques peuvent altérer ce comportement; il a été observé dans des poudres de platine des valeurs de $T_1 T$ présentant un minimum dépendant de la fréquence de mesure.

Conclusions

Les perturbations provenant de l'environnement sont toujours présentes, et affectent les mesures si l'on ne prend pas des précautions. Etant donné le grand nombre de paramètres décrivant les perturbations et le système de mesure, et l'impossibilité d'une protection "tous azimuts" (ne serait-ce que par son coût), il convient d'étudier le problème spécifique de chaque installation et de mettre en œuvre les méthodes adaptées à chaque situation.

Références bibliographiques

a) Références générales:

- au-dessous de 1K:

- * "Experimental Principles and Methods below 1K", O.V. Lounasmaa, Academic Press, London 1974. Très technique, le livre indispensable.
- * "Experimental Techniques in Condensed Matter Physics at Low Temperatures", ed. R.C. Richardson and E. Smith, Addison Wesley. Les "recettes" des expérimentateurs. A consulter.
- * "Refrigeration and Thermometry below one Kelvin", D.S. Betts, Sussex University Press, 1976. Livre d'introduction, pédagogique, un peu académique.

- très utiles, mais couvrant le domaine de températures au-dessus de 1K:

- * "Eléments de Cryogénie", R.R. Conte, Masson ed., Paris 1970.
- * "Experimental Techniques in Low Temperature Physics", G.K. White, Oxford Science Publications, 1979 (3d. édition).
- * "The properties of solid and Liquid Helium", J. Wilks, Oxford University Press 1967. Une introduction à l'hélium et aux basses températures bien faite et documentée.

b) Vibrations:

- Voir la documentation des producteurs d'isolateurs pneumatiques:
Firestone: représentant en France: CITEC, BP 19 TORCY, 77201 Marne-la Vallée.
Isolair: représentant en France: CEF, 17 rue Trouillet-Derel, BP39 92603 Asnières.

c) Résistance de Kapitza:

- G. Pollack, Rev. Mod. Phys. 41,48 (1969): résistance de Kapitza entre 0.1 et 10 K; nombreuses références.
- J.P. Harrison, J.Low.Temp. Phys. 37, 467 (1979); résistance de Kapitza au-dessous de 100 mK; nombreuses références.

-Poudres d'argent à très basses températures:

- H. Franco, J. Bossy, H. Godfrin, Cryogenics, p. 477 (1984).
- D.D. Osheroff and R.C. Richardson, Proc. LT17, Elsevier Sci. Pub. (1984), et Phys. Rev. Lett. 54, 1178 (1985).
- P.A. Busch, S.P. Cheston and D.S. Greywall, Cryogenics 24, 445 (1984).
- R.J. Robertson, F. Guillon and J.P. Harrison, Can. J. Phys. 61, 164 (1983).

Poudres de cuivre à très basses températures:

- K. Rogacki, M. Kubota, E.G. Syskakis, R.M. Mueller and F. Pobell, J.Low.Temp. Phys. 59, 397 (1985).
- R.J. Robertson, F. Guillon and J.P. Harrison, Can. J. Phys. 61, 164 (1983).

d) Transport dans les capillaires remplis d'hélium superfluide:

- B. Bertmann et T.A. Kitchens, Cryogenics, Feb. 1968.

e) Couplage électron-phonon à très basses températures:

Cuivre:

- A.C. Anderson et R.E. Peterson, Physics Lett. 38A, 519 (1972).
- R.E. Peterson et A.C. Anderson, Phys. Stat. Sol. (b) 56, 243 (1973)
- J.P. Harrison, J.Low.Temp. Phys. 37, 467 (1979).

AsGa:

- M. Laviron, P. Averbuch, H. Godfrin, R.E. Rapp, J. Phys. (Paris) Lett. 44 (1983) L1021
- H. Godfrin, P. Averbuch, R. Rapp, Topics in Solid State Science, Springer Verlag (1984);
supplément édité par le PTB, Braunschweig, Allemagne.
- A.K.M. Wennberg et al. Phys. Rev. B 34, 4409 (1986)

