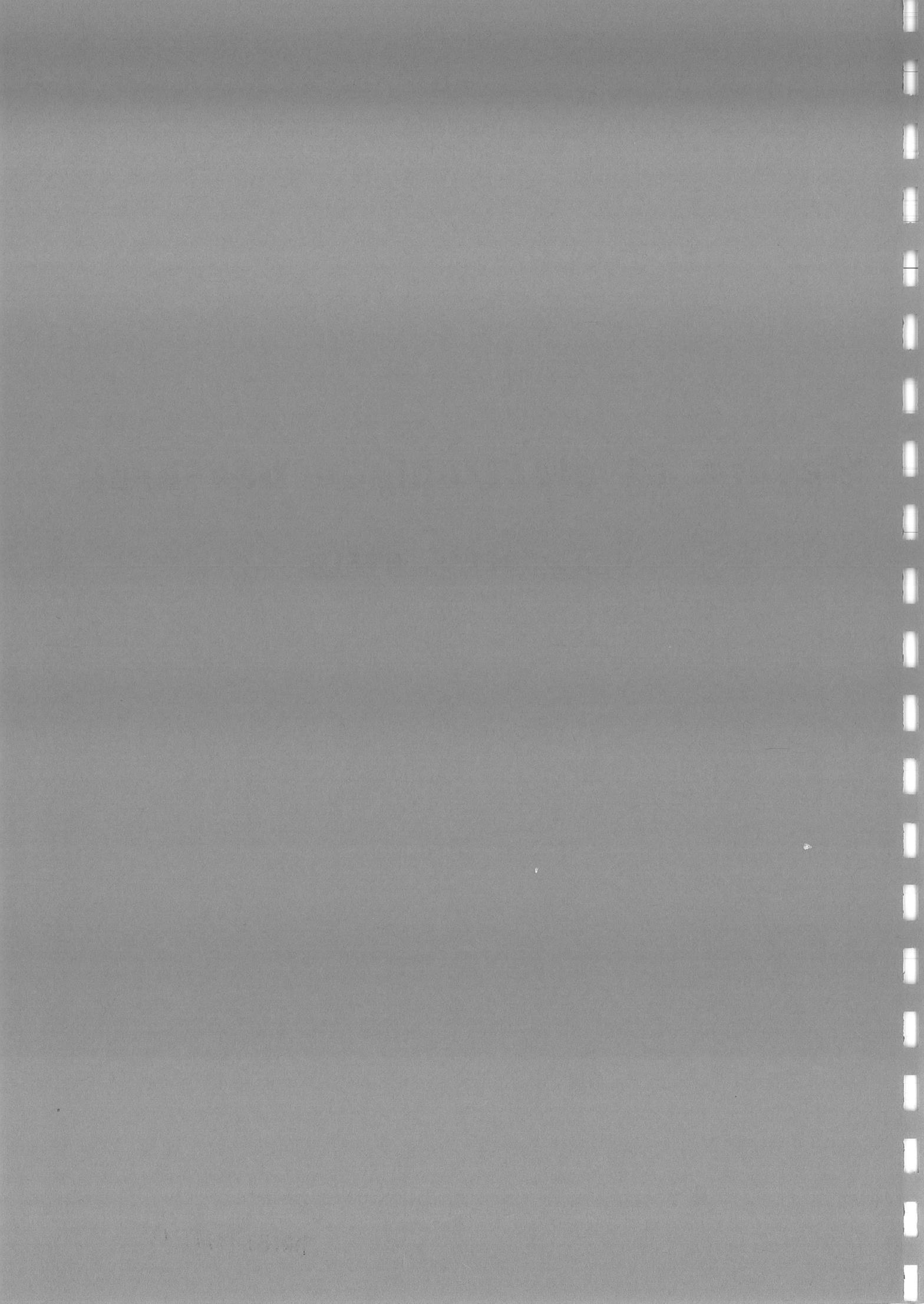


Mesure et électronique bas-bruit

J. L. BRET/F. AYELA



**TECHNIQUES DE PROTECTION D'UN MONTAGE
DE MESURE AUX BASSES TEMPERATURES
CONTRE LES PERTURBATIONS**

C.N.R.S.
**Centre de Recherche sur
les Très Basses Températures**

J. L. Bret

ed. 11.91



1 - Introduction

Les problèmes posés par la perturbation des montages de mesure se rencontrent très souvent et sont assez difficiles à résoudre. Ils apparaissent de plus en plus fréquemment pour deux raisons : D'une part, le niveau des perturbations augmente du fait de l'accroissement des puissances mises en jeu, de l'augmentation du volume de l'appareillage et de l'utilisation plus fréquente de systèmes électroniques émettant des rayonnements parasites tels que : alimentation à découpage, régulateurs à thyristors, ordinateurs, etc. D'autre part, la sensibilité des instruments de mesure est de plus en plus grande. Actuellement des énergies de 10^{-20} à 10^{-30} Joule peuvent être détectées. A de tels niveaux, les vibrations sont elles-mêmes source de perturbations.

En ce qui concerne les mesures aux très basses températures, ces problèmes sont particulièrement fréquents car les signaux sont très souvent faibles. En outre, même si les mesures sont faites en continu ou à basse fréquence, le montage est sensible à un très large spectre de fréquences du simple fait que les perturbations constituent un apport de chaleur et peuvent, par exemple, fausser la mesure de la température. Les montages de mesure doivent donc être extrêmement bien protégés contre les perturbations et les précautions à prendre sont d'autant plus importantes que les températures de travail sont basses. Il convient d'étudier soigneusement le raccordement des instruments, leur mise à la terre, la mise en oeuvre d'écrans, de filtres, etc... .

2 - Perturbations électromagnétiques

2.1 - Modes de transmission

- *Transmission par conduction :*

Les perturbations peuvent tout d'abord être transmises par les diverses liaisons électriques de l'instrument de mesure : liai-

son 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 instrument 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 parasites d'autant plus intenses que leur fréquence est élevée.

- *Transmission par rayonnement :*

Le rayonnement électromagnétique perturbateur peut être capté par le circuit de mesure, lequel se comporte comme une antenne. Le mode de couplage est souvent très complexe. Cependant, aux basses fréquences, c'est-à-dire lorsque la longueur d'onde est beaucoup plus grande que les dimensions du circuit, l'effet du champ magnétique et du champ électrique peuvent être considérés séparément.

a) Couplage par champ magnétique :

La composante magnétique d'une onde électromagnétique ou le champ magnétique alternatif produit par un dispositif quelconque induit une tension alternative dans les boucles constituées par les circuits de mesure.

Une boucle de surface S placée dans un champ H est le siège d'une tension induite Donnée par :

$$V = \mu S \, dH/dt$$

Les transformateurs d'alimentation, les moteurs, les câbles du 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 ou de faibles impédances.

b) Couplage par champ électrique

La composante électrique d'une onde électromagnétique ou un champ électrique produit par un dispositif quelconque induit un courant alternatif dans les conducteurs des circuits de mesure.

Un conducteur de surface S soumis à un champ électrique E reçoit un courant donné par :

$$I = \varepsilon S \, dE/dt$$

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

$$I = C \, dV/dt$$

Ces courants, circulant dans un circuit de mesure, donnent naissance à des tensions perturbatrices d'autant plus élevées que l'impédance du circuit est grande. Ce modèle de couplage affecte donc particulièrement les circuits à haute impédance et les mesures de faibles courants. Les câbles d'alimentation, les installations d'éclairage, les mauvaises mises à la terre constituent les principales sources de champ électrique basse fréquence.

2.2 - Protection contre les perturbations électromagnétiques

- Perturbations 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 de 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 1.

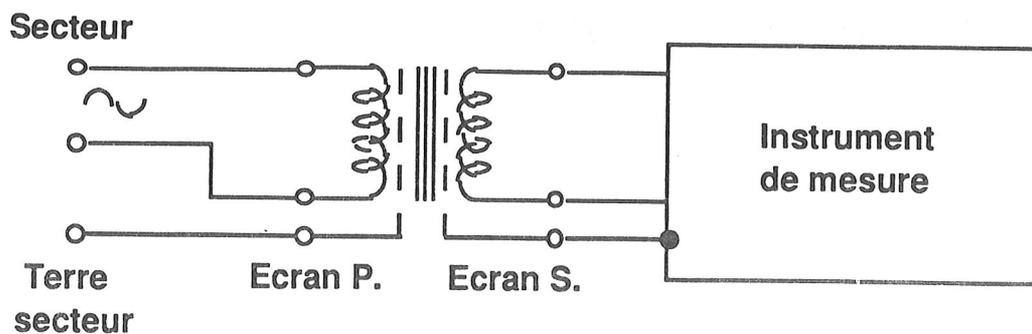


Fig. 1

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 relai peut être repris par des filtres antiparasites spéciaux pour le secteur. Si la terre du réseau est elle-même source de perturbations, il faut choisir des filtres avec inductance de terre.

Pour d'autres liaisons, il faudra réaliser un filtre adapté au circuit, éventuellement utiliser un amplificateur d'isolement. Dans le cas de liaisons numériques, les circuits de communication de données sont, en principe, suffisamment isolés par des photocoupleurs. L'utilisation de fibres optiques constituerait une solution radicale mais elle ne peut guère être envisagée que pour des transmissions sur bus série (type RS 232).

- Perturbation par rayonnement :

Le rayonnement électromagnétique peut être arrêté au moyen d'une cage de Faraday. L'efficacité est élevée pour des fréquences telles que l'épaisseur des parois est grande devant l'épaisseur de peau, laquelle est donnée par :

$$e = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

où ρ est la résistivité

μ est la perméabilité

ω est la pulsation du rayonnement

En pratique, l'atténuation est bonne au-delà d'une dizaine de kHz. Pour des fréquences inférieures, elle demeure excellente pour le champ électrique mais devient faible, voire nulle pour le champ magnétique. Une meilleure atténuation s'obtient par l'emploi de matériau ferromagnétique (mumétal).

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.

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 fils torsadés. Dans le cas où cette méthode ne peut être appliquée (transformateur par exemple), il faut utiliser un ou plusieurs écrans en mumétal avec un ou plusieurs écrans en cuivre placés en sandwich.

2.3- Cas des mesures aux basses températures

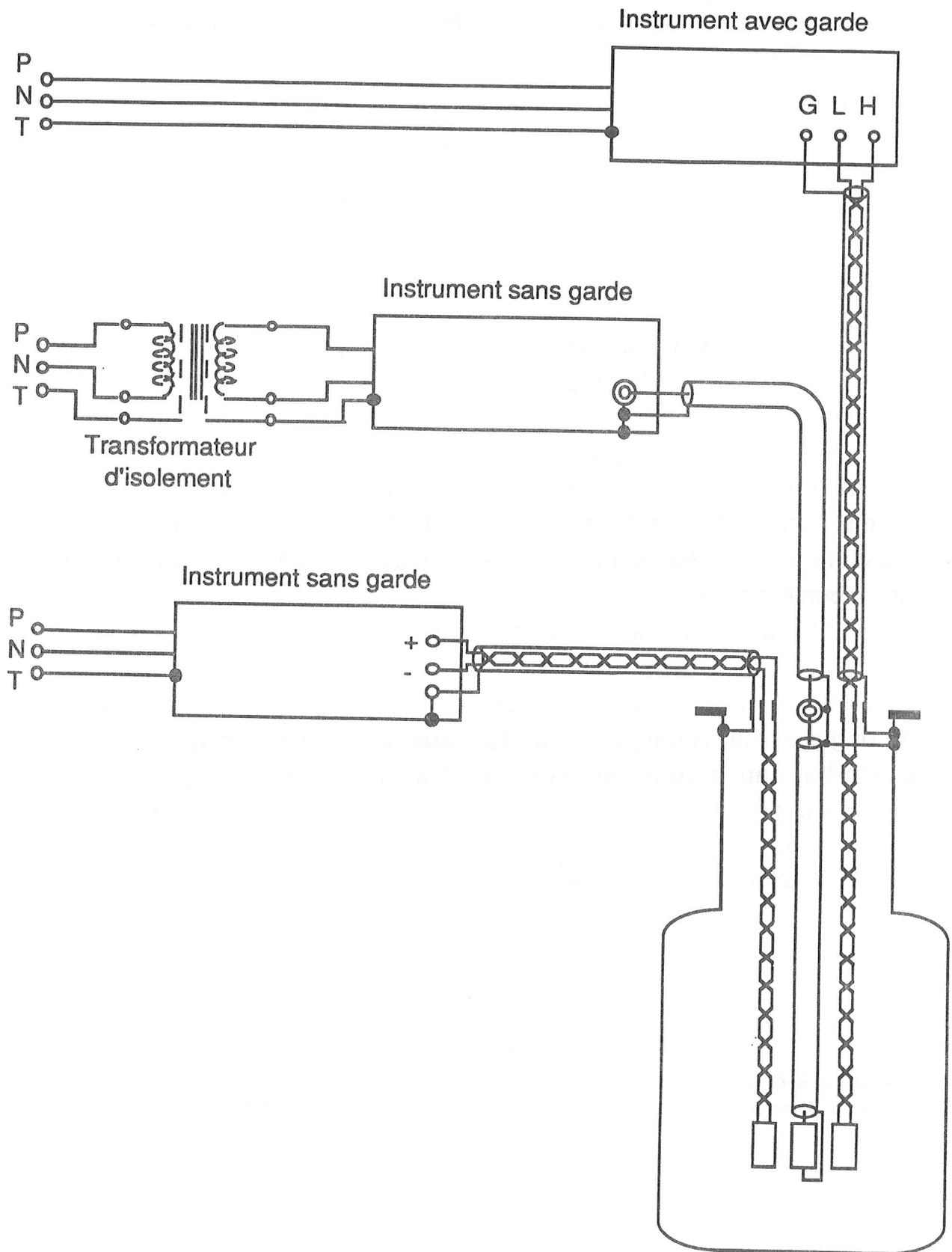
Aux basses températures, une partie des circuits sensibles se trouvent dans le cryostat. Le plus souvent, celui-ci est métallique et constitue une portion de la cage de Faraday mais il faut veiller à ce que certains conducteurs entrant dans le cryostat ne véhiculent pas eux-mêmes des perturbations (Câble de raccordement des bobines supraconductrices par exemple).

Vers la température de l'hélium liquide, un écran supraconducteur peut être mis en oeuvre dans certains cas. Il constitue une barrière absolue contre les perturbations E. M., y compris pour les champs magnétiques basse fréquence.

Pour le raccordement des instruments, le concept de cage de Faraday et la pratique des mesures aux B.T. conduisent à respecter les règles suivantes :

- 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 Figure 2.
- 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 mm²).
- 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.
- 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 ou réduire leur surface. Une tension induite dans cette boucle fait circuler dans les blindages des courants relativement intenses pouvant perturber les mesures.

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.



Exemple de liaisons

Fig. 2

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 si 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 proscrire. Il faut utiliser du câble coaxial ordinaire ou mieux du câble double tresse ou encore traité anti-signal. Pour les câbles multi-conducteurs, choisir du câble comportant une tresse et un ruban métallisé enroulé en hélice ou une double tresse.

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 Figure 3.

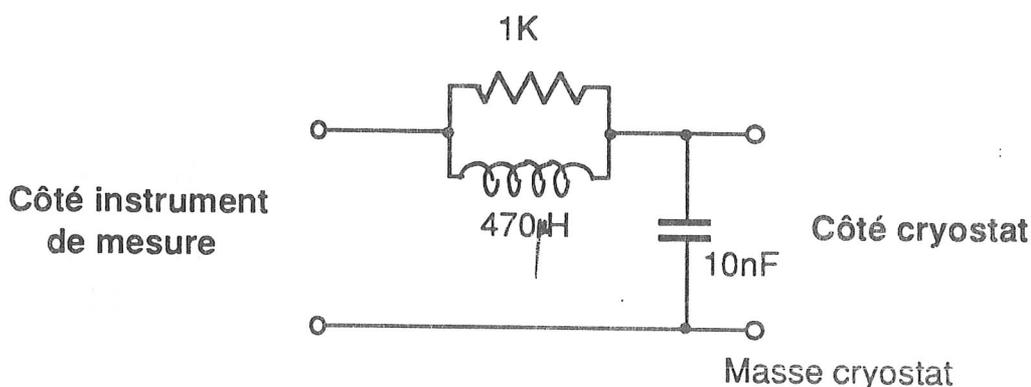


Fig. 3

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

3 - Perturbations dues aux vibrations

Les vibrations sont aussi des sources de perturbations soit parce qu'elles constituent un apport de chaleur, soit parce qu'elles induisent des signaux parasites par suite du microphonisme des circuits. Elles sont généralement transmises par les solides mais peuvent aussi être propagées par l'air bien que les impédances acoustiques des solides et de l'air soient très différentes.

Les vibrations proviennent le plus souvent du sol, des machines tournantes (pompes, ventilateurs) etc... Elle peuvent être atténuées par des systèmes de masse et de ressorts qui constituent l'analogie mécanique de filtres passe-bas. Par exemple, pour isoler un cryostat des vibrations du sol, il faut le monter sur un support comportant une masse rigide et lourde (bloc de béton, caisse de sable...) et reposant sur des pieds élastiques (ressorts, blocs de caoutchouc, vérins pneumatiques...).

En ce qui concerne le 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 (au niveau de l'ordre de 10 nV) 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 10 Ohms) 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 k Ω) 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 (Effet tribo-électrique). Comme précédemment, il n'affecte que les circuits d'impédance élevée (Au dessus de 10 K Ω). Il existe des câbles coaxiaux traités anti-signaux pour lesquels cet effet est très atténué.

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 engendrées par cet effet se rencontrent principalement lors de l'utilisation de certains condensateurs céramiques. Ils génèrent des courant faibles qui n'affectent que les circuits de haute impédance (Au dessus du M Ω).

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

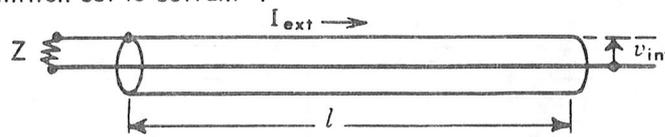
L'étude théorique des problèmes de perturbations électromagnétiques est très complexe et seule une étude expérimentale permet généralement de les résoudre.

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 :

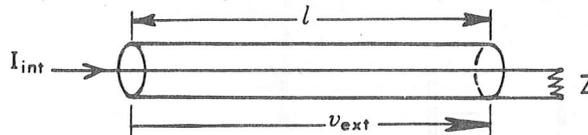


Si un courant parasite uniforme, dû à un champ électromagnétique extérieur, parcourt le blindage d'un câble coaxial, il apparaît à l'extrémité libre une tension parasite entre l'âme et le blindage,

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.

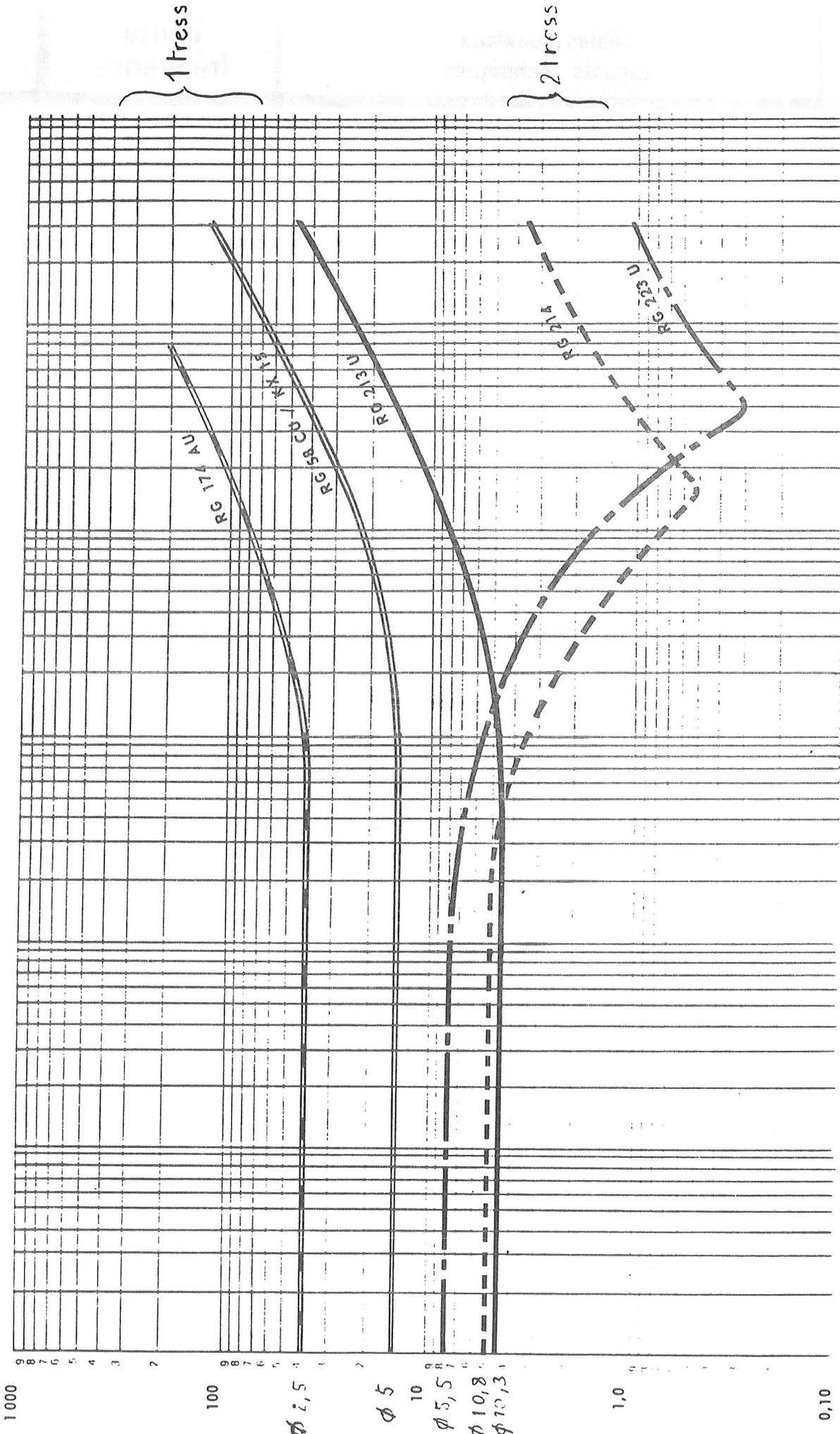
Pour les fréquences plus élevées, deux phénomènes modifient Z_T .

- 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).

IMPEDANCE DE TRANSFERT DE SURFACE "ZT" SUR DIVERS CABLES



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

→ Fréquence Hz

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 LV - 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 PG - 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.

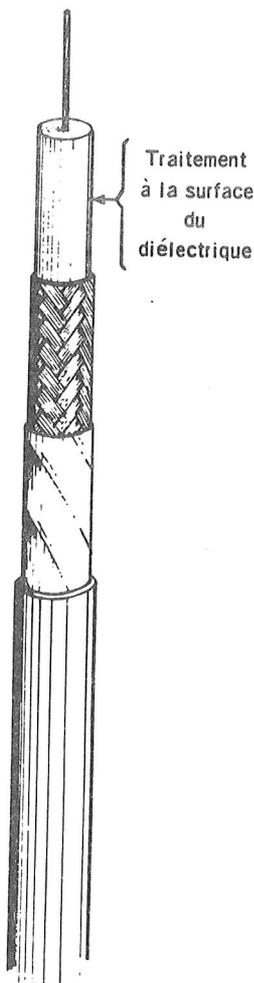
Remarque : Le vernis utilisé se dissout aisément avec les solvants classiques (acétone, éther, acétate de méthyle etc...). Avant le montage des connecteurs, il suffit d'essuyer soigneusement les extrémités du diélectrique avec un coton enduit de solvant jusqu'à disparition de toutes traces noires.

3) Traitement RG - 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 dérubanner 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.

Fournisseurs de câbles

(Double blindage, faible conduction thermique...)

Câbles à double blindage

Marque : Acome

Distributeur : CEL

126, rue Mazenod

69421 Lyon Cédex 3

Tél. : 78 53 94 94 Télécopie : 78 53 50 07

Marque : Belden

Distributeur : Inelco Electronique

114, avenue Louis Roche

92230 Gennevilliers

Tél. : (1) 47 94 76 80 Télécopie (1) 47 92 34 68

Distributeur : Comtec

48, rue d'Estienne d'orves BP 144

78507 Sartrouville Cedex

Tél. : (1) 39 57 01 12 Télécopie (1) 39 57 58 50

Marque : M.O.C.

Distributeur : S.E.I. Local postal 512

Avenue du Québec

Z.A. de Courtaboeuf

91940 Les Ulis

Tél. : (1) 64 46 30 60

Marque : Ralocar-Condelec

Distributeur : Seveko

72-74, avenue Gambetta

93171 Bagnolet Cedex

Tél. : 48 97 91 92

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

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 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

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

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, 4, rue Brunel 75017 Paris Tél. (1) 42 67 69 81

MESURE ET ELECTRONIQUE BAS BRUIT

1) Rappels.

Transistors à effet de champ (FET)
Bruit

2) Sources de bruit d'un FET.

Schéma équivalent
Définitions

3) Mesures expérimentales.

Procédés
Résultats

4) Conclusion.

TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP.

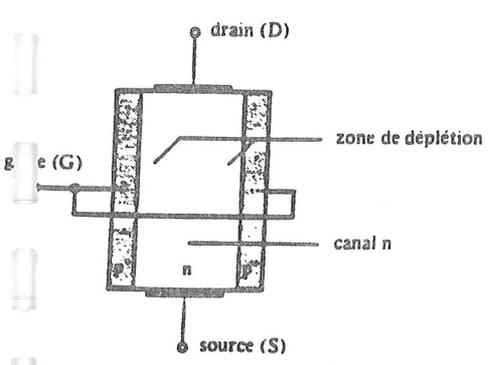


Fig. 1.47

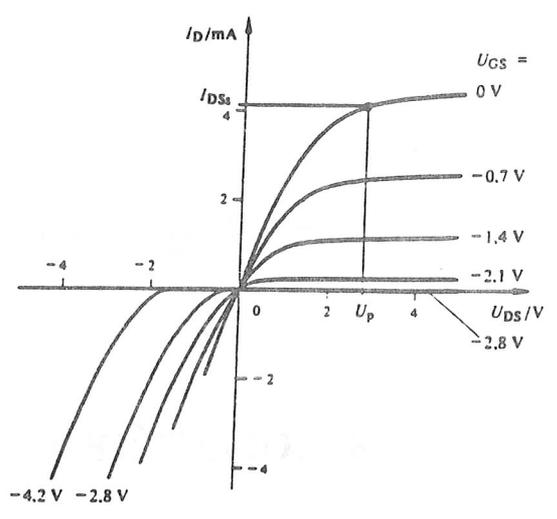
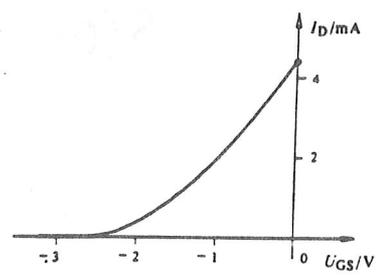
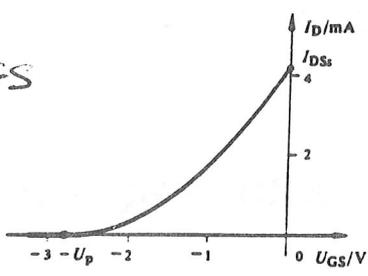


Fig. 1.56

$$\Delta i_{DS} = g_m \delta v_{GS}$$



Utilisation à froid : $\sigma = e \mu n$

$$n \approx e^{-E/kT}$$

E : gap séparant bande conduc.- niv. donneurs

Si : E = 0,05 ev. conduit -> 77K
 GaAs : E = 0,003 ev. conduit -> 4,2K

BRUIT.

1) Généralités.

$$\langle \Delta e(t) \rangle = 0$$

grandeur significative : $\langle \Delta e(t)^2 \rangle$
indép. temps

autocorrélation : $c(\tau) = \langle \Delta e(t) \Delta e(t+\tau) \rangle$

$$S(\omega) = \text{T.F. } c(\tau)$$

$$\int S(\omega) d\omega = c(\tau=0) = \langle (\Delta e)^2 \rangle$$

$$S(\omega) = \frac{d\langle (\Delta e)^2 \rangle}{d\omega} : \text{V}^2/\text{Hz}$$

$$\sqrt{S(\omega)} : \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}} \text{ ou } \text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$$

2) Exemples.

$$\Delta X(t) = \Delta X(0) e^{-t/T}$$

$$c(\tau) = \langle (\Delta X(t))^2 \rangle e^{-\tau/T}$$

$$S(\omega) = \langle (\Delta X)^2 \rangle \frac{T}{1 + \omega^2 T^2}$$

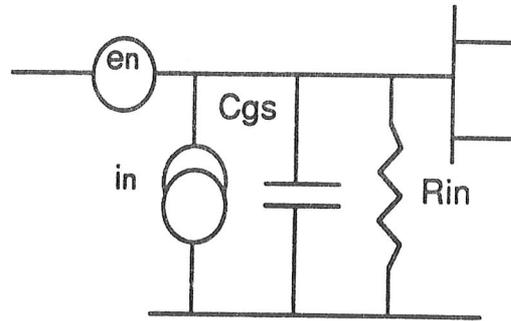
T très court ; bruit blanc

T élevé : lorentzienne

Bruit en 1/f ?

SOURCES DE BRUIT D'UN FET.

Schéma équivalent



$$e_{n1}^2 = \alpha \frac{4kT}{g_m}$$

$$f > f_0$$

$$\alpha \approx 1 \text{ à } 300\text{K}$$

$\alpha \nearrow$ à basse température

$$f_0 \approx 10 \text{ kHz (Si)}$$

$$f_0 \approx 100 \text{ kHz (GaAs)}$$

$$e_{n1} \leq 1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

$$e_{n2}^2 = \frac{A}{f}$$

$A \nearrow$ quand FET refroidi

$$10 < e_{n2}(100\text{Hz}) < 100 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$$

$$i_{n1}^2 = 2eI_G$$

$I_G \searrow \searrow$ avec T
négligeable à 4,2K (AsGa)
 $i_{n1} \leq 1 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ (Si)

$$i_{n2}^2 \approx e_{n1}^2 C_{gs}^2 \omega^2$$

? Température d'un dipôle actif
T boîtier \neq T puce

Si : monté dans ensemble thermalisé

Définitions.

$$\text{Facteur de bruit : } F = \frac{(S_e/N_e)^2}{(S_s/N_s)^2} = \frac{1}{G^2} \left(\frac{N_s}{N_e} \right)^2$$

signal et bruit à l'entrée de la source à température ambiante.

$$\begin{aligned} \text{FET idéal : } N_s &= G N_e \quad \rightarrow F=1 \\ \text{réel : } N_s &> G N_e \quad \rightarrow F > 1 \end{aligned}$$

$$N_s^2 = G^2 (N_e^2 + V^2) \quad \rightarrow F = 1 + \frac{V^2}{N_e^2}$$

impédance de source : R_s

$$F = 1 + \frac{e_n^2 + R_s^2 i_n^2}{4kTR_s}$$

$$F_T - 1 = \frac{300}{T} (F - 1)$$

$$\frac{\partial F}{\partial R_s} = 0 \quad \leftrightarrow \quad \boxed{R_s = \frac{e_n}{i_n}} : R_{opt.}$$

$$\rightarrow F_T = 1 + \frac{e_{ni}^2}{2kT}$$

Température de bruit : $e_{ni}^2 = 2kT_N$

$$F_T = 1 + \frac{T_N}{T}$$

$T_N \ll T$: $F_T \rightarrow 1$: bruit source prépondérant

$T \ll T_N$: bruit ampli. prépondérant

\rightarrow importance de e_n ET i_n

exemples : $T_N \approx 100$ mK

$$0,1 \text{ M}\Omega < R_{opt} < 10 \text{ M}\Omega$$

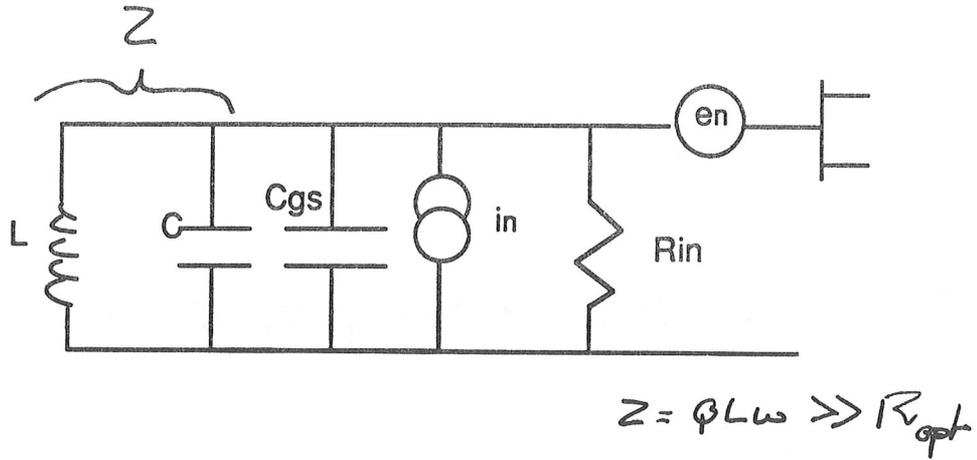
$$\text{Cas Gal : } R_s \gg R_{opt} : F_T = 1 + \frac{1}{2} \frac{R_s}{R_{opt}} \frac{T_N}{T}$$

$$R_s \ll R_{opt} : F_T = 1 + \frac{1}{2} \frac{R_{opt}}{R_s} \frac{T_N}{T}$$

MESURE EXPERIMENTALE.

e_n : relier grille à la masse

i_n :



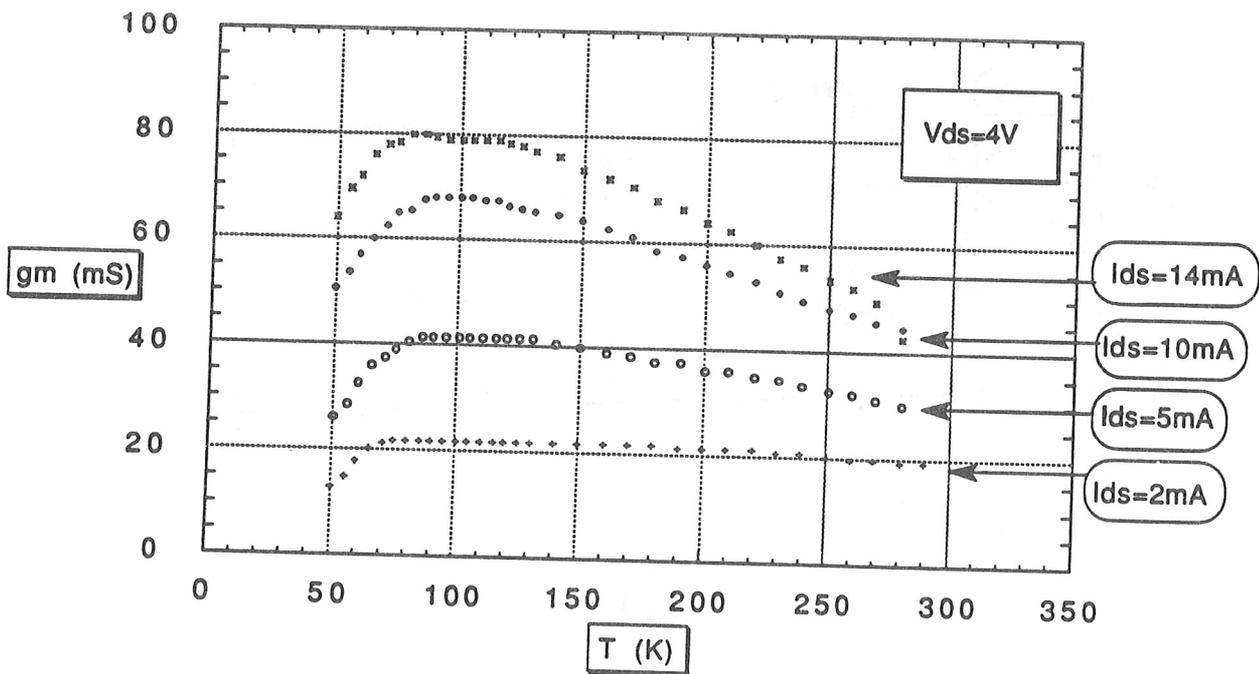
$$L(C + C_{gs})\omega^2 = 1$$

$$Q \approx 10^5$$

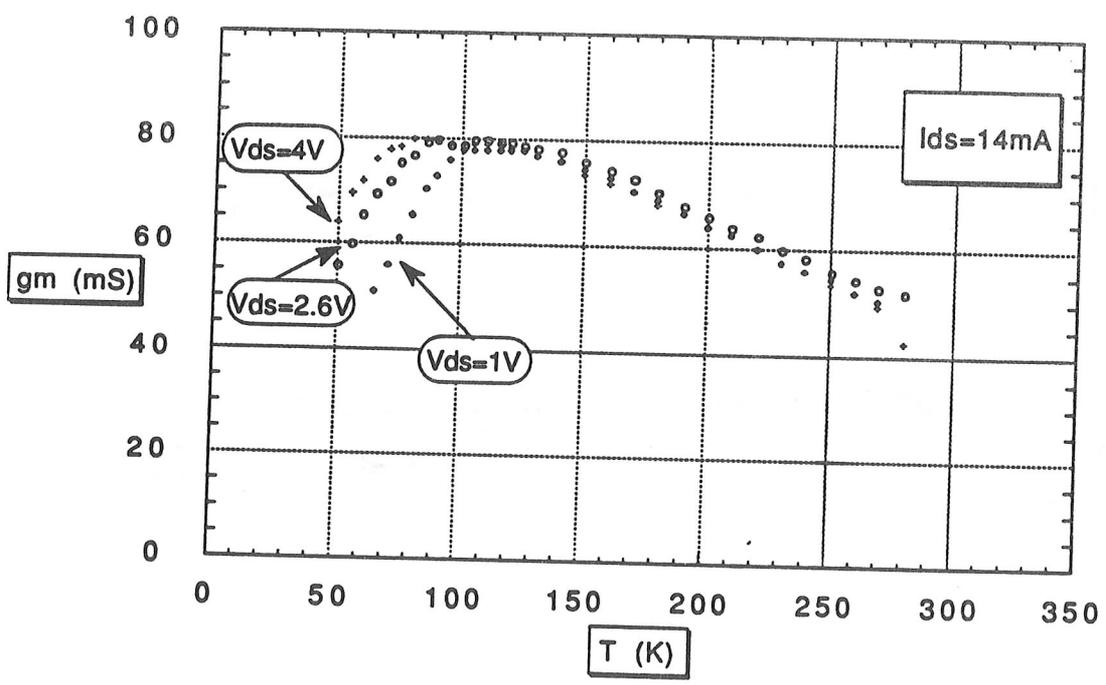
$$V^2 \approx (QL\omega)^2 i_n^2 + 4kTQL\omega$$

inconvenient : mesure ponctuelle
à froid

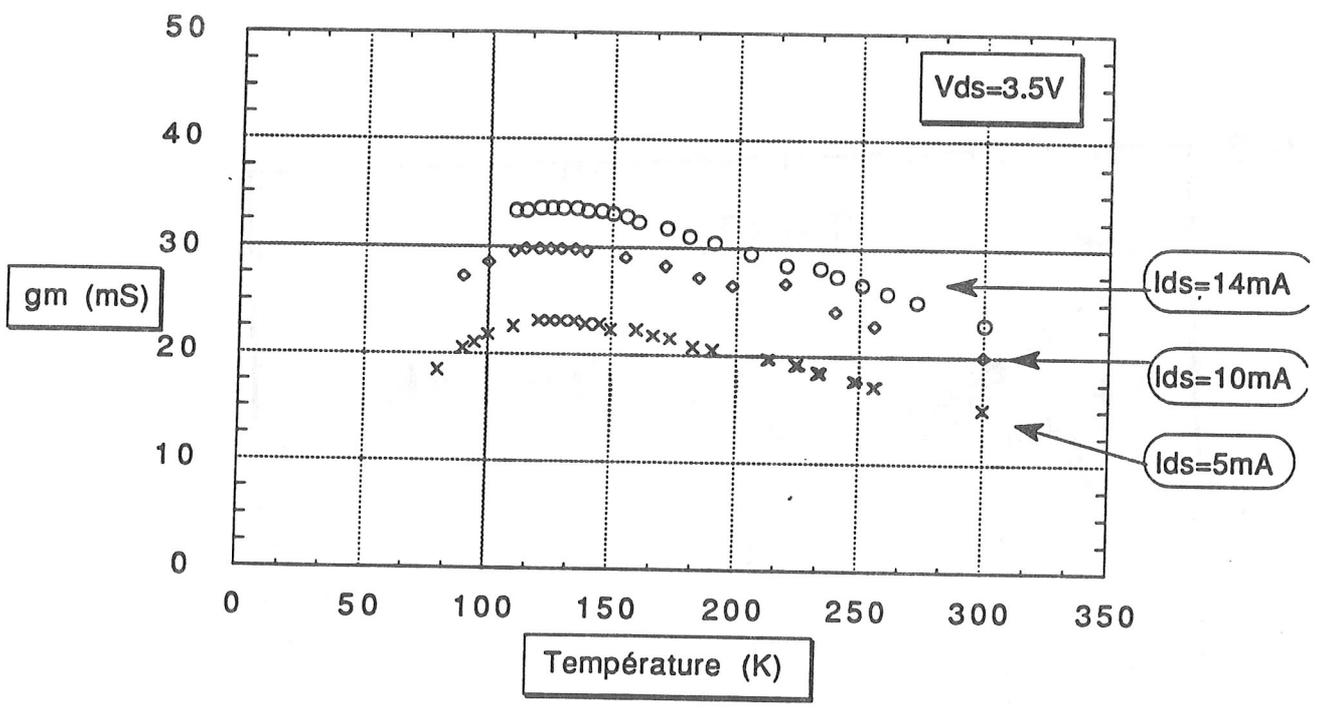
CRISTALONICS
CM860



CRISTALONICS CH 860

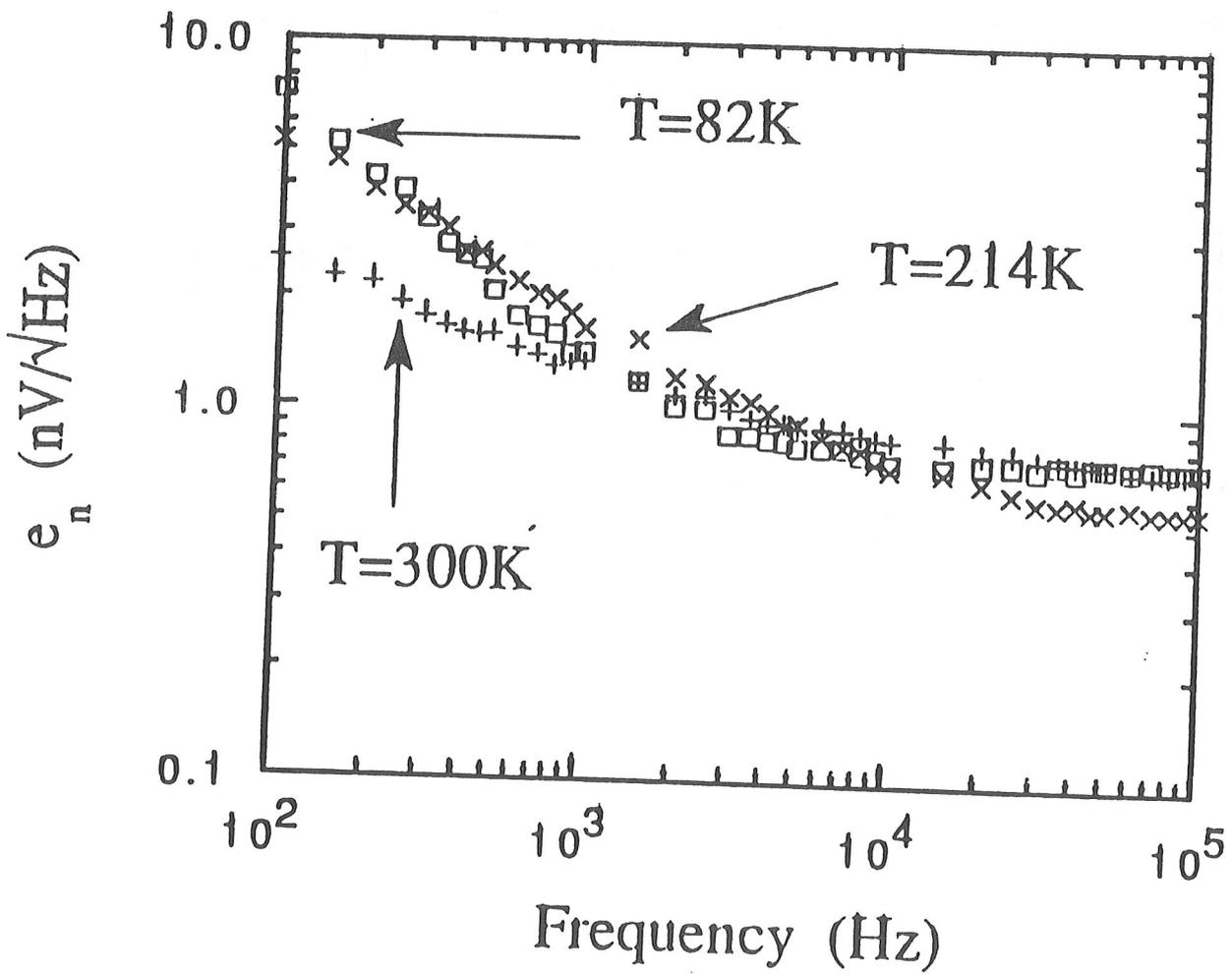


SONY 2SK152

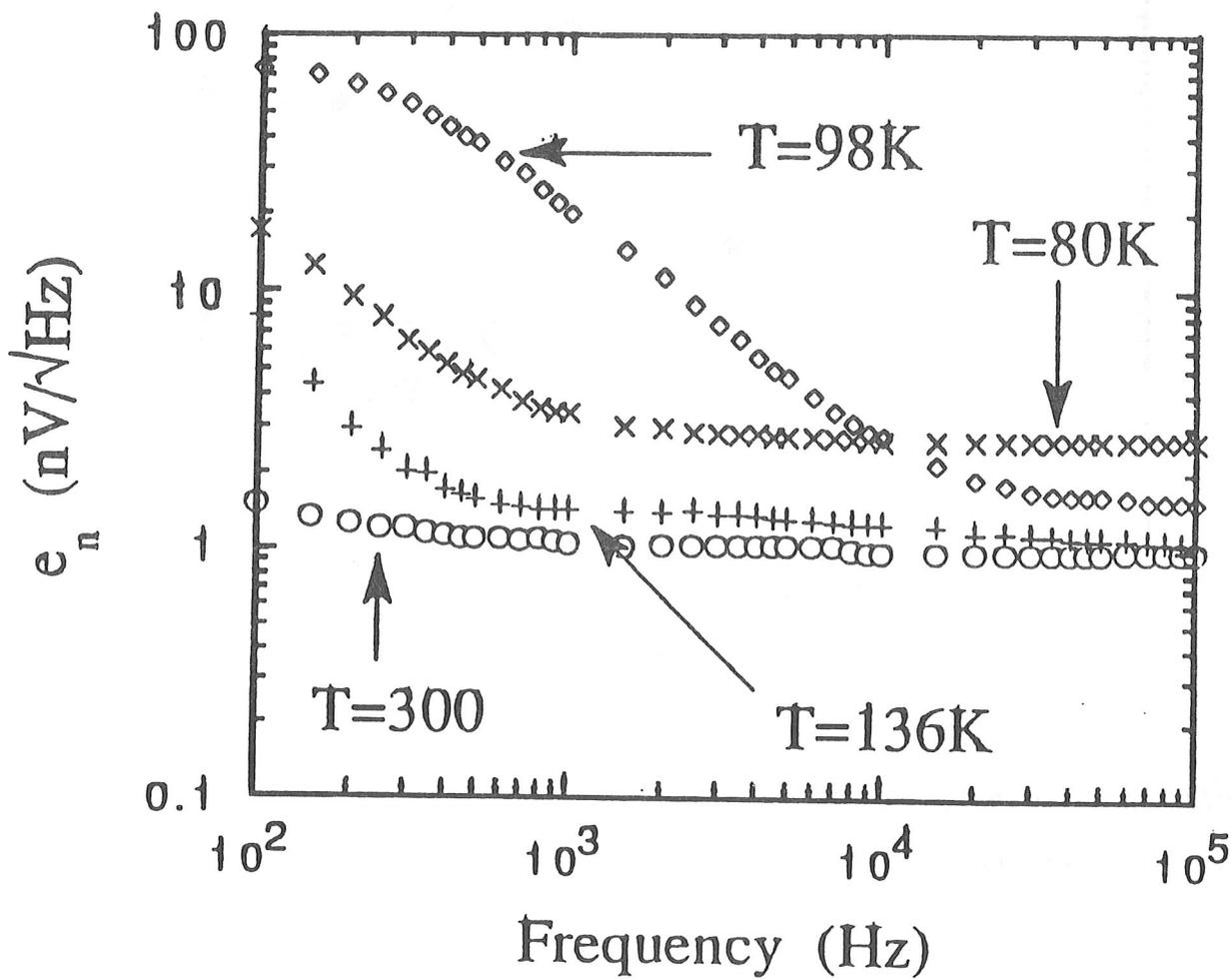


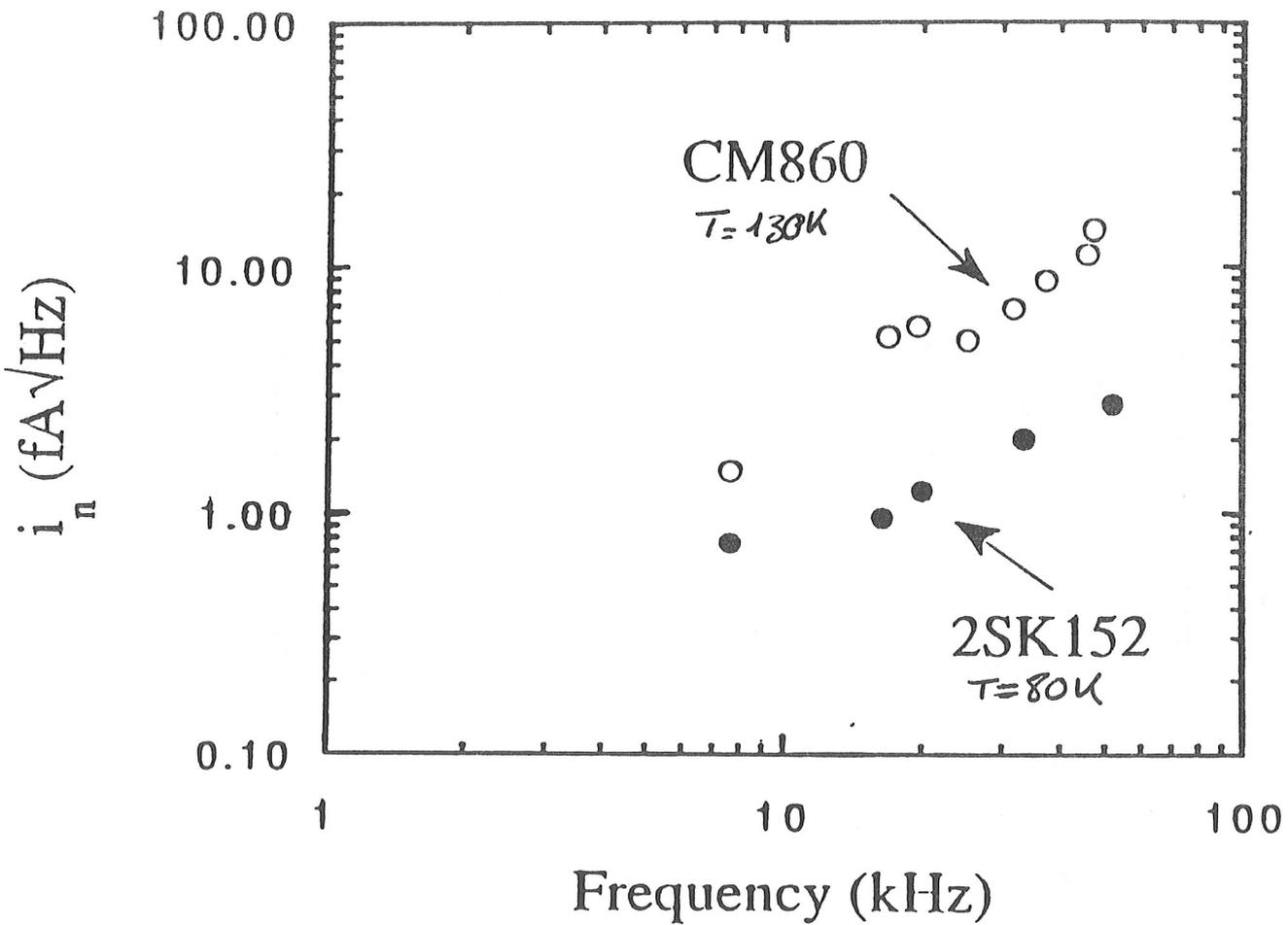
CRISTALONICS

CM 860



SONY 2SK152





CM860 : $T=135 K$
2SK152 : $T=80 K$

CONCLUSION.

Comment choisir, utiliser un FET?

	AsGa	Si
fréq.	>100kHz	<100kHz
C_{gs}	2 - 5 pF	10 - 50 pF
g_m	10 - 20 mS	25 - 70 mS

Avantages refroidissement :

- élimination de i_{n2}
- amplification proche de source signaux
- protection contre courant parasite

