

# Mesures des pertes dans les supraconducteurs de deuxième espèce en régime alternatif

J. Huret

► **To cite this version:**

J. Huret. Mesures des pertes dans les supraconducteurs de deuxième espèce en régime alternatif. *Revue de Physique Appliquée*, 1967, 2 (2), pp.133-136. <10.1051/rphysap:0196700202013300>. <jpa-00242774>

**HAL Id: jpa-00242774**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00242774>**

Submitted on 1 Jan 1967

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## MESURES DES PERTES DANS LES SUPRACONDUCTEURS DE DEUXIÈME ESPÈCE EN RÉGIME ALTERNATIF

Par J. HURET,  
Ingénieur L.C.I.E. <sup>(1)</sup>.

**Résumé.** — Lorsqu'un fil supraconducteur de deuxième espèce est parcouru par un courant alternatif et plongé dans un champ magnétique alternatif ou continu, il est le siège de pertes thermiques. Nous avons mis au point une méthode électrique de mesure de ces pertes et avons relevé leurs variations en fonction de divers paramètres significatifs afin de tenter de cerner de plus près le modèle représentant le mécanisme physique qui est à l'origine de ces pertes.

**Abstract.** — When an a.c. current passes through a superconducting wire of the second kind placed in an a.c. or d.c. magnetic field, thermal losses appear in the wire. We have set up a method to measure those losses and have noted their variations versus some relevant parameters in order to try and approach the model which represents the physical mechanism which is the source of the losses.

Nous avons étudié le comportement des fils supraconducteurs en régime alternatif. En effet, c'est surtout sous cette forme qu'on trouve actuellement ces matériaux pour des applications techniques. Nous avons donc mis au point un dispositif de mesure des pertes qui apparaissent dans des matériaux sous forme de fils.

Ces pertes, dans le cas des supraconducteurs, sont très petites en valeur absolue. Pour les étudier convenablement, il fallait donc analyser des longueurs de fils relativement grandes. Il était, de plus, utile de travailler sur une géométrie de courants et de champ magnétique produit par ces courants ou imposé de l'extérieur, telle que l'on puisse en avoir une bonne représentation par le calcul, pour qu'il soit ensuite possible de tenter une interprétation des résultats. Cette considération nous a amené à réaliser des bobines cylindriques à enroulement régulier.

On a donc à effectuer des mesures sur une bobine d'inductance propre bien déterminée. La méthode adoptée est la suivante : on fait parcourir cette bobine par un courant alternatif connu. On recueille la tension qui apparaît à ses bornes. Cette tension peut se

décomposer en une composante active qui correspond à des pertes et une composante réactive qui correspond à l'inductance propre de la bobine. On oppose à cette composante réactive une tension de compensation prélevée sur une mutuelle aussi parfaite que possible. Lorsque la différence résultant de cette opposition est minimale, on ne mesure plus que la composante active de la tension aux bornes de l'élément, ce que l'on peut vérifier en comparant la phase de cette différence à celle du courant d'alimentation (*fig. 1*).

Les grandeurs à mesurer, sur le schéma de la figure 1, sont donc :

- le courant  $I$  d'alimentation de la bobine ;
- le courant  $i$  au secondaire de la mutuelle.

La différence de potentiel due à ce courant  $i$  qui circule dans la résistance  $r$ , grande devant toutes les autres résistances du circuit, permet en effet d'atteindre la composante active de la tension aux bornes de la bobine, comme le montrera plus loin l'étude électrique du circuit de mesure.

On a vu qu'il était également intéressant de comparer les phases des courants  $I$  et  $i$  à l'accord du pont. On est donc amené à concevoir un circuit aussi symétrique que possible.

<sup>(1)</sup> J. Huret, actuellement Centre de Recherches de la C.G.E. Marcoussis (Essonne).

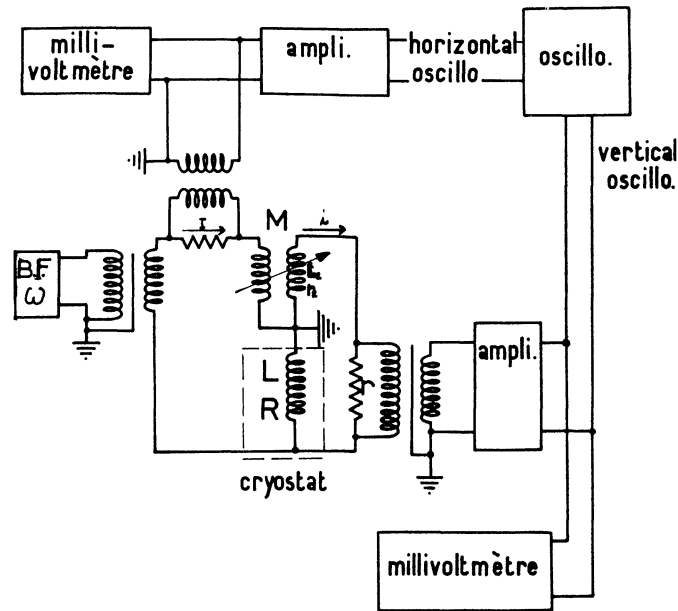


FIG. 1. — Schéma général du dispositif des mesures.

**Étude électrique du circuit de mesure.** — On peut écrire la loi d'Ohm dans le circuit de mesure :

$$(I - i)(R + jL\omega) = -ri + i(r_2 + jL_2\omega) - jM\omega I. \quad (1)$$

Le niveau de bruit de la mesure dépend, entre autres paramètres, de la valeur de la résistance  $r$  qui ne doit donc pas être trop élevée. Elle doit toutefois rester grande devant celles de toutes les autres résistances du circuit pour ne pas affecter la précision des mesures. On a choisi une valeur de compromis  $r = 10 \text{ k}\Omega$  qui paraît concilier ces deux impératifs. Il découle de la formule (1) que :

$$i = I \frac{[R + j(L + M)\omega][R + r + r_2 - j(L + M)\omega]}{(R + r + r_2)^2 + (L + L_2)^2\omega^2}.$$

La compensation de la composante déphasée du courant  $i$  est pratiquement parfaite pour

$$M = -L.$$

Puisque  $i$  est très petit devant  $I$  et que  $r$  est grand devant  $r_2$  et  $j\omega(L_2 + L)$ , il vient finalement

$$ri = R(I - i) - r_2 i - j\omega(L_2 + L) i$$

et l'on peut écrire

$$ri = RI$$

ce qui est vrai dans le domaine de la précision des mesures électriques.

Tous les transformateurs utilisés sont du type à écran, de rapport 1/1. Leur impédance est élevée, à la fréquence de travail, devant la résistance placée à leurs bornes.

Un couplage capacitif parasite de la mutuelle donnait lieu à une tension d'erreur de l'ordre de

grandeur des tensions à mesurer, qui augmentait très rapidement avec la fréquence. On a pu obtenir des résultats satisfaisants en déplaçant l'effet de ce couplage par un positionnement de l'ensemble du montage par rapport à la masse. Ceci explique l'emplacement du point de masse entre la bobine à mesurer et la mutuelle. La tension d'erreur liée à ce couplage se trouvait alors inférieure au niveau de bruit de l'ensemble du système.

**Choix des mesures.** — Divers modèles sont actuellement (1964) proposés pour expliquer les pertes dans les supraconducteurs de deuxième espèce. Ils reposent tous sur l'existence de « filaments de flux » analogues à ceux décrits par A. A. Abrikosov [1].

Ces filaments peuvent se déplacer par un mécanisme du type « Flux-Flow » [2, 3] ou être diffusés par les défauts comme le suggère la théorie du « Flux Creep » [4].

On peut concevoir qu'ils soient à l'origine de pertes par courants de Foucault ou par Hystérésis [5, 6, 7].

L'étude approfondie de ces modèles [8] nous a suggéré l'analyse de la variation de ces pertes en fonction de divers paramètres :

— LA TEMPÉRATURE. — On tente de mettre en relief l'influence d'une « viscosité » liée aux électrons « normaux », c'est-à-dire aux électrons qui ne seraient pas « condensés » dans l'état supraconducteur.

— LA FRÉQUENCE. — Les lois de variation des pertes en fonction de la fréquence sont très dissemblables dans les divers modèles proposés. Une telle étude représente donc un critère sérieux de sélection.

- L'INTENSITÉ DU COURANT ALTERNATIF. — Ce paramètre doit permettre d'analyser l'influence d'un champ magnétique alternatif sur le fil. Chaque fil de la bobine est en effet soumis à un champ magnétique dû à tous les autres fils.
- LE CHAMP MAGNÉTIQUE CONTINU SUPERPOSÉ DANS L'AXE DE LA BOBINE. — L'application de ce champ magnétique permet d'étudier l'influence d'une modification du régime critique par rapport au signal alternatif.

**Résultats des mesures.** — On a étudié ici des échantillons de fils de niobium-zirconium (à 25 % de zirconium) fabriqués par la « Wa Chang Company ».

Le réseau de courbes que l'on peut tracer (fig. 2) subit plusieurs limitations :

- Il est limité en fréquence par la tension disponible à la sortie de notre amplificateur et par les effets de couplage parasite qui croissent rapidement avec la fréquence d'alimentation.
- Il est limité quant à la valeur du champ magnétique continu que l'on peut ajouter dans la direction de l'axe de la bobine. En effet, l'électro-aimant destiné à produire ce champ magnétique est alimenté par une génératrice à courant continu. Celle-ci n'est pas exempte d'ondulations de commutation ou de denture qui induisent dans la bobine supraconductrice des tensions parasites. Conserver celles-ci suffisamment petites pour que la mesure ait un sens, limite le courant à débiter par la génératrice, puisque les ondulations sont proportionnelles à ce courant. On en était partiellement protégé par deux plaques de cuivre massif de 3 mm d'épaisseur, placées devant les pôles de l'électro-aimant et, bien sûr, par l'inductance propre des bobines de l'électro-aimant.

Les pertes sont représentées par la puissance dissipée par unité de longueur de l'échantillon ( $riI/l$ ), en microwatts par centimètre. Le domaine de précision des mesures est indiqué par des flèches sur la figure 2.

On a, de plus, observé une variation pratiquement linéaire des pertes en fonction du champ magnétique continu superposé, lorsque celui-ci varie de 300 à 3 000 œrsteds.

On a tracé sur la figure 3 la variation des pertes, en microwatts par centimètre de longueur, en fonction du courant alternatif  $I$  qui parcourt l'échantillon. La mesure a été faite pour deux valeurs du champ continu superposé.

A la fréquence de 1 kHz, on a trouvé dans les deux cas une loi du type  $W = KI^3$ .

On a enfin étudié la variation des pertes en fonction de la température dans la gamme de 2 °K à 4,2 °K. Mais ces mesures sont rendues difficiles par le temps de mise à l'équilibre thermique, difficilement compatible avec la consommation à 2 °K de notre cryostat en verre, dépourvu de métallisation. L'emploi d'un appareil non métallisé était toutefois indispensable

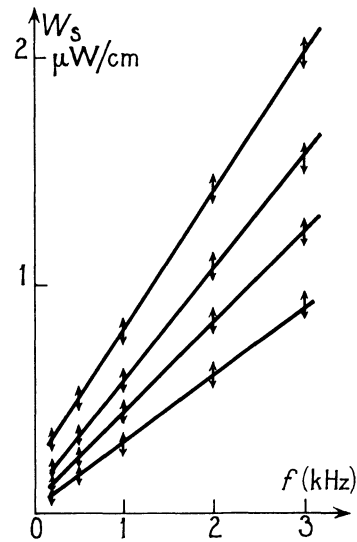


FIG. 2. — Variation des pertes, exprimées en  $\mu\text{W}/\text{cm}$  de longueur, en fonction de la fréquence du courant alternatif, pour divers champs magnétiques continus superposés; courant alternatif  $I = 50 \text{ mA}$ .

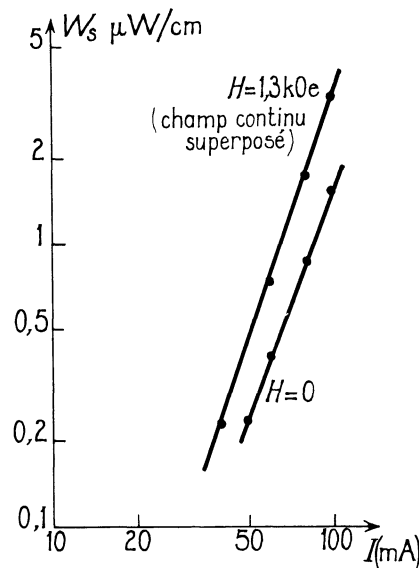


FIG. 3. — Variation des pertes en fonction du courant alternatif, fréquence = 1 kHz. On trouve une loi du type  $KI^3$ .

sous peine de mesurer des pertes parasites dans la dite métallisation.

Cette étude suggère que les pertes sont une fonction croissante de la température du type

$$W = KT^n$$

et l'exposant  $n$  semble être égal ou supérieur à 1.

**Interprétation.** — Les lois de variations relevées semblent indiquer que, pour le corps considéré, et

dans le domaine où les mesures ont été effectuées, les mécanismes physiques prédominants doivent être du type déplacements de filaments avec diffusion sur les défauts. Toutefois, l'ensemble des mesures actuellement disponibles ne permet pas une distinction très sûre, mais indique une voie dans laquelle il faut continuer les investigations.

**Limitations et améliorations de la méthode.** — Les limitations de cette méthode de mesure sont liées aux signaux parasites et aux couplages divers. On peut augmenter considérablement ses possibilités en réalisant un enroulement de très faible inductance propre.

La composante réactive de tension qu'il faut compenser est donc très petite et on peut alors réaliser une mutuelle de très petite valeur, qui supporte des courants alternatifs beaucoup plus importants que ceux qui sont admis dans les mutuelles étalons de mesure existantes.

La répartition complexe des champs magnétiques au voisinage des conducteurs dans un enroulement à inductance propre réduite rend délicate l'interprétation des résultats.

Nous avons, avec J.-P. Duflot, réalisé un tel circuit. Les mesures ont été effectuées jusqu'à 35 A à 50 Hz et quelques relevés ont été faits en fonction de la fréquence.

On a retrouvé une loi de variation des pertes en fonction du cube du courant alternatif :  $W = KI^3$  et une dépendance linéaire en fréquence.

Du fait de la grande différence de répartition des champs magnétiques, entre les deux structures de bobine, il est difficile d'établir une comparaison valable entre les valeurs absolues des pertes relevées dans chacun des cas.

Le niveau maximum de bruit dans les expériences à courant faible peut être évalué à 5  $\mu\text{V}$  pour un courant de 50 mA dans les cas les plus défavorables. Il descend vers 1  $\mu\text{V}$  dans les cas favorables. Cela corres-

pond, sur des échantillons de l'ordre de 30 m, à une résistivité mesurable :

$$\rho = 10^{-11} \Omega \cdot \text{cm.}$$

Ce niveau de bruit décroît considérablement dans le cas des mesures à courants forts. Avec une bobine à inductance propre très réduite, on peut effectuer la mesure sous un courant de 30 A avec un bruit de l'ordre de 10  $\mu\text{V}$ , soit une résistivité mesurable

$$\rho = 2 \times 10^{-14} \Omega \cdot \text{cm.}$$

En conclusion de cette étude concernant les pertes dans les supraconducteurs, on peut remarquer que leur accroissement très rapide avec le champ magnétique alternatif ne permet actuellement d'envisager que des applications dans la gamme des champs magnétiques alternatifs faibles. Il semble toutefois qu'une meilleure connaissance des mécanismes de pertes en alternatif, et en particulier du déplacement des filaments de flux qui paraissent en être responsables, permettrait peut-être la mise au point de matériaux ou de traitements qui rendent ces filaments moins mobiles, ce qui réduirait probablement les pertes.

On peut espérer que de telles études amèneront à la réalisation de matériaux spécifiquement conçus en fonction d'une utilisation en régime variable, les matériaux actuels semblant mieux adaptés aux exploitations en continu.

Qu'il nous soit permis de remercier ici M. le Professeur Aigrain qui nous a donné l'idée de cette étude, M. le Professeur Olmer qui nous a accueilli dans son laboratoire, M. le Professeur Fournet qui nous a prodigué ses conseils et ses encouragements, M. le Professeur Fortini dont le soutien attentif nous a été particulièrement précieux dans nos travaux, M. Elnekavé qui nous a fait bénéficier de sa grande expérience des circuits de mesures.

Ce travail a pu être mené à bien au L.C.I.E. grâce à la D.G.R.S.T. (Convention 64 FR 085).

Manuscrit reçu le 20 octobre 1966.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] ABRIKOSOV (A. A.), *JETP USSR*, 1957, **32**, 1442. Traduction Soviet Physics, **5**, 6, 1174.
- [2] ANDERSON (P. W.) et KIM (Y. B.), *Rev. Mod. Physics*, 1964, **36**, 1 part, 1, 39.
- [3] KIM (Y. B.), HEMPSTEAD (C. F.) et STRNAD (A. R.), *Phys. Rev. Letters*, 1962, **9**, 306 ; *Phys. Rev.*, 1963, **129**, 528.
- [4] ANDERSON (P. W.), *Phys. Rev. Letters*, 1962, **9**, 309.
- [5] BUCHHOLD (T. A.), *Cryogenics*, 1963, **3**, 3, 141.
- [6] LONDON (H.), *Phys. Letters*, 1963, **6**, 2, 162.
- [7] KAMPER (R. A.), *Phys. Letters*, 1962, **2**, 6, 290.
- [8] Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Appliquées J. Juret, 5 décembre 1964, Paris, non publiée.