
**APPLICATIONS DE L'EFFET
MEISSNER DANS L'AUDIO GRAND
PUBLIC : EXPULSION COMPLÈTE
DU FLUX MAGNÉTIQUE COMME
PARADIGME DE BLINDAGE**

Applications de l'effet Meissner dans l'audio grand public : expulsion complète du flux magnétique comme paradigme de blindage

M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

Résumé

Le blindage électromagnétique conventionnel repose sur l'absorption et la réflexion -- des mécanismes qui atténuent les champs externes mais ne peuvent les éliminer. L'effet Meissner dans les supraconducteurs de Type II fournit un paradigme fondamentalement différent : l'expulsion complète du flux magnétique de l'intérieur du conducteur par la génération de courants d'écrantage de surface. Nous démontrons qu'un chemin de signal audio enfermé dans une gaine supraconductrice ne subit aucun couplage avec les champs électromagnétiques externes de toute fréquence, orientation ou amplitude en dessous du champ critique H_{c2} . Les mesures en présence de sources d'EMI domestiques (routeurs WiFi, transformateurs de puissance, compresseurs de réfrigérateurs) confirment que le chemin du câble supraconducteur est électromagnétiquement invisible -- le champ interne est indiscernable du champ dans l'espace vide. Nous discutons des implications du blindage Meissner pour la conception du système audio supraconducteur complet.

1. INTRODUCTION

Le blindage électromagnétique est une préoccupation de l'industrie des câbles audio depuis les premiers jours de la reproduction haute fidélité. Tresse de cuivre, feuille d'aluminium, feuille de mu-métal, couches de polymère conducteur, enveloppes de fibre de carbone -- le catalogue des matériaux de blindage est vaste et en expansion continue. Chaque matériau offre une combinaison différente de perméabilité magnétique, de conductivité électrique et d'atténuation dépendante de la fréquence, et chacun a été commercialisé comme la solution définitive aux interférences électromagnétiques.

Aucun d'entre eux ne l'est. Tout matériau de blindage conventionnel fonctionne par les deux mêmes mécanismes : l'absorption (conversion de l'énergie électromagnétique en chaleur par courants de Foucault) et la réflexion (redirection de l'énergie électromagnétique loin du conducteur par désadaptation d'impédance). Les deux mécanismes sont intrinsèquement imparfaits. L'absorption dépend de l'épaisseur du matériau et de la fréquence ; les blindages minces fuient aux basses fréquences. La réflexion dépend du contraste d'impédance ; à certains angles et fréquences, les champs pénètrent quoi qu'il en soit.

L'effet Meissner est différent en nature, pas seulement en degré. Lorsqu'un supraconducteur de Type II est refroidi en dessous de sa température critique en présence d'un champ magnétique externe, des courants d'écrantage de surface apparaissent spontanément, générant un champ exactement égal et opposé au champ appliqué. Le champ net à l'intérieur du supraconducteur est nul -- pas faible, pas atténué, nul. Ce n'est pas un paramètre de conception optimisable ; c'est une propriété fondamentale de l'état supraconducteur, aussi intrinsèque que la résistance nulle.

2. VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

Une paire d'interconnexions SC de 1,5 m a été installée dans un salon d'écoute résidentiel standard aux côtés des sources d'EMI suivantes :

Source A : Routeur WiFi 6E (6 GHz, bande passante 160 MHz, puissance d'émission 1 W) à 0,5 m de distance.

Source B : Transformateur toroïdal 500 VA à 0,3 m de distance.

Source C : Moteur de compresseur de réfrigérateur (en fonctionnement) à 1,0 m de distance.

Source D : Amplificateur Classe D (onde carrée 1 kHz, 100 W) à 0,2 m de distance.

Source E : Les quatre sources fonctionnant simultanément.

Le champ magnétique interne au niveau du conducteur du câble a été mesuré par un micro-capteur fluxgate (Bartington Mag690, résolution 0,1 nT) inséré dans le cryostat par un port de mesure dédié.

Pour comparaison, des mesures identiques ont été effectuées sur quatre câbles conventionnels : OFC non blindé, simple tresse de cuivre, double tresse de cuivre + feuille de mu-métal, et l'interconnexion Equatorial Audio Equinox (blindage triple couche).

Résultats (champ magnétique RMS au conducteur, Source E, toutes sources actives simultanément) :

OFC non blindé : 847 nT

Simple tresse de cuivre : 124 nT (atténuation 17 dB)

Double tresse + mu-métal : 8,3 nT (atténuation 40 dB)

Equinox triple couche : 1,7 nT (atténuation 54 dB)

Interconnexion SC (Meissner) : < 0,1 nT (atténuation > 79 dB ; limitée par le plancher de bruit du magnétomètre)

Le champ interne du câble supraconducteur était indiscernable du plancher de bruit du magnétomètre dans toutes les conditions de test, y compris le pire cas de fonctionnement simultané de toutes les sources d'EMI.

3. LE SYSTÈME SUPRACONDUCTEUR COMPLET

Le plein potentiel du blindage Meissner n'est réalisé que lorsque l'ensemble de la chaîne de signal est supraconducteur. Un seul segment de câble conventionnel dans un système par ailleurs supraconducteur crée une « fenêtre magnétique » à travers laquelle les champs externes peuvent se coupler au signal.

Le système de référence Zero Kelvin répond à cela en fournissant des câbles supraconducteurs pour chaque segment de la chaîne de signal : alimentation (câble d'alimentation SC), horloge (câble d'horloge Word Clock SC), numérique (câble numérique SC), analogique (interconnexion SC) et haut-parleur (câble de haut-parleur SC). Le réservoir de distribution à 12 ports assurent que tous les segments de câble sont maintenus à 77 K simultanément.

Lorsque le système complet est opérationnel, le chemin du signal audio de la prise murale au haut-parleur est entièrement enfermé dans un matériau supraconducteur. Chaque segment présente une résistance nulle et une expulsion complète du flux par effet Meissner. Le système atteint ce qu'aucune combinaison de blindage conventionnel ne peut : l'invisibilité électromagnétique.

La différence pratique est plus audible dans des conditions de forte EMI ambiante. Lors d'une démonstration pour un panel de critiques audio (Munich High End 2024), le système de référence Zero Kelvin a été exploité dans une pièce avec une contamination EMI délibérée (plusieurs routeurs WiFi, un réchauffeur à induction de 2 kW et un aspirateur en fonctionnement). Les critiques n'ont pu détecter aucune différence de qualité sonore entre les conditions propres et contaminées. Le système était, électromagnétiquement parlant, inconscient de l'existence de l'interférence.

4. CONCLUSION

L'effet Meissner fournit un blindage électromagnétique qui est fondamentalement complet -- pas atténué, pas dépendant de la fréquence, mais absolu. Les chemins de signal audio enfermés dans un matériau supraconducteur sont immunisés contre les champs électromagnétiques externes à toute fréquence et toute amplitude en dessous du champ critique. Le système de référence Zero Kelvin démontre qu'une chaîne de signal supraconductrice complète est réalisable dans un environnement résidentiel, moyennant une infrastructure cryogénique appropriée. Nous proposons que le blindage Meissner représente la limite physique de la protection électromagnétique pour les chemins de signal audio.

RÉFÉRENCES

- [1] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit," *Naturwissenschaften*, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [2] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, 2nd ed., Dover, 2004.
- [3] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "Theory of superconductivity," *Phys. Rev.*, vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [4] A. A. Abrikosov, "On the magnetic properties of superconductors of the second group," *Sov. Phys. JETP*, vol. 5, pp. 1174-1182, 1957.
- [5] M. Ferro et al., "Interconnexions audio supraconductrices : transmission de signal à résistance nulle via conducteurs YBCO à 77 K," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [6] IEC 61000-4-8:2009, *Compatibilité électromagnétique (CEM) -- Techniques d'essai et de mesure -- Essai d'immunité au champ magnétique à la fréquence du réseau*.