

---

**INTERCONNEXIONS AUDIO  
SUPRACONDUCTRICES :  
TRANSMISSION DE SIGNAL À  
RÉSISTANCE NULLE VIA  
CONDUCTEURS CÉRAMIQUES  
YBCO À 77 K**

---

# Interconnexions audio supraconductrices : transmission de signal à résistance nulle via conducteurs céramiques YBCO à 77 K

M. Ferro, L. Solder, H. Park, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

## Résumé

Nous rapportons le développement et la caractérisation du premier câble d'interconnexion audio supraconducteur. Le conducteur est un ruban céramique YBCO (oxyde de baryum-cuivre-yttrium,  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ) fonctionnant à 77 K dans un vide rempli d'azote liquide. La résistance en courant continu est nulle -- pas faible, pas négligeable, nulle -- comme confirmé par mesure quatre pointes avec une sensibilité au nanovolt. L'effet Meissner fournit un blindage diamagnétique parfait du chemin de signal, expulsant tout flux magnétique externe. Les signaux audio transmis à travers le conducteur supraconducteur présentent une perte résistive nulle, une contribution de bruit thermique nulle et une immunité magnétique complète. Le câble fonctionne en continu avec un réapprovisionnement passif en LN, d'environ 310 litres par an et par mètre.

## 1. INTRODUCTION

Tout câble audio conventionnel a une résistance. Cette résistance est faible -- typiquement de milliohms à ohms par mètre -- mais elle n'est pas nulle. Les conséquences d'une résistance non nulle sont triples : (1) perte de signal résistive (atténuation), (2) génération de bruit thermique (bruit Johnson-Nyquist, proportionnel à la résistance et à la température), et (3) variation d'impédance dépendante de la fréquence (effet de peau, effet de proximité). Ces effets sont bien caractérisés et, dans les câbles conventionnels, représentent les limites physiques fondamentales de la transmission du signal.

La supraconductivité élimine les trois. Un supraconducteur a exactement zéro de résistance en courant continu en dessous de sa température critique ( $T_c$ ). Zéro résistance signifie zéro atténuation, zéro bruit Johnson-Nyquist et -- dans la bande audio basse fréquence -- zéro variation d'impédance dépendante de la fréquence. Le signal entre à une extrémité du conducteur et sort à l'autre avec une fidélité mathématiquement parfaite.

De plus, l'effet Meissner -- l'expulsion complète du flux magnétique de l'intérieur d'un supraconducteur -- fournit un blindage qu'aucune quantité de mu-métal conventionnel, de tresse de cuivre ou de polymère conducteur ne peut égaler. Un câble supraconducteur n'atténue pas les champs magnétiques externes ; il les exclut de manière absolue.

Le défi d'ingénierie est de maintenir l'état supraconducteur : le YBCO nécessite un refroidissement continu en dessous de 92 K. Nous utilisons l'azote liquide (point d'ébullition 77 K à 1 atm) comme cryogène, circulant dans un cryostat en verre borosilicaté sous vide servant de gaine au câble. Il s'agit, certes, d'une conception de câble peu conventionnelle.

## 2. CONSTRUCTION DU CÂBLE

L'interconnexion SC est constituée des éléments suivants, du centre vers l'extérieur :

Conducteur : Ruban céramique YBCO (SuperPower SCS4050-AP), 4,0 mm de large  $\times$  0,1 mm d'épaisseur, avec un courant critique de 100 A à 77 K et champ propre. Le ruban est enroulé en configuration hélicoïdale sur un support en acier inoxydable pour permettre une flexibilité limitée.

Chemin de signal : Deux rubans YBCO (signal et retour) sont enroulés de manière concentrique avec un espaceur PTFE de 0,5 mm. L'impédance caractéristique est conçue pour être de 75 Ohm aux fréquences audio, conformément à la pratique standard des interconnexions.

Cryostat : Vase Dewar en verre borosilicaté à double paroi, 48 mm de diamètre extérieur, 28 mm de diamètre intérieur. L'espace inter-parois est évacué à  $< 10^{-3}$  Pa. L'ensemble conducteur est immergé dans l'azote liquide. Les orifices de remplissage à chaque extrémité acceptent des tubes d'alimentation LN, standard.

Connecteurs : Connecteurs XLR plaqués rhodium de qualité cryogénique, modifiés avec des traversées sous vide et des ruptures thermiques (espaceurs en fibre de verre G10) pour empêcher la conduction thermique du corps chaud du connecteur vers le conducteur froid.

Le diamètre extérieur total du câble est de 48 mm. Le câble pèse 2,4 kg/m à sec et 3,8 kg/m dans l'azote liquide. Le diamètre minimal est de 300 mm (limité par le cryostat en verre, pas par le conducteur flexible).

### 3. CARACTÉRISATION ÉLECTRIQUE

Résistance DC : Mesurée par technique quatre pointes avec un nanovoltmètre Keithley 2182A et une source de courant 6221. À 77 K (immersion LN<sub>2</sub>), la tension aux bornes d'un conducteur de 1,5 m portant 100 mA DC était de 1 nV. Limite supérieure calculée :  $R < 10 \times 10^{-9} \text{ Ohm}$ . Pour toute application pratique, la résistance est considérée comme nulle.

Impédance AC : À 1 kHz, l'impédance est de 75,0 +/- 0,1 Ohm (purement réactive -- pas de composante résistive). L'impédance est verrouillée en température : parce que le conducteur est maintenu à une température constante, aucune dérive thermique. La stabilité de l'impédance sur une campagne de mesure de 30 jours était de +/- 0,0003 Ohm.

Plancher de bruit : La tension de bruit Johnson-Nyquist d'une résistance est  $V_n = \sqrt{4 \times k_B T R \Delta f}$  (supraconducteur),  $V_n = 0$  quelle que soit la température ou la bande passante. L'interconnexion supraconductrice contribue exactement zéro bruit thermique au chemin du signal.

Blindage magnétique : Une bobine de Helmholtz produisant 1 mT (10 Gauss) à 50 Hz était positionnée à 50 mm du câble. Un magnétomètre fluxgate à l'intérieur du cryostat (adjacent au conducteur) a mesuré < 0,01 nT -- une atténuation supérieure à 160 dB. C'est l'effet Meissner : le supraconducteur exclut activement le champ externe, non par absorption (comme le mu-métal) mais en générant des courants de surface qui s'opposent parfaitement au champ appliqué.

### 4. CONSIDÉRATIONS PRATIQUES

L'interconnexion SC nécessite un approvisionnement continu en LN<sub>2</sub>. Le taux de fuite thermique est de 0,85 litre de LN<sub>2</sub> par jour et par mètre de longueur de câble. Pour une paire d'interconnexions de LN<sub>2</sub>, est d'environ 930 litres -- environ 930 \$ par an au prix commercial actuel du LN<sub>2</sub> (environ 1 \$ par litre).

Le câble doit être installé avec les orifices de remplissage de LN<sub>2</sub>, accessibles pour un réapprovisionnement tous les 5 jours, selon la température ambiante). Une soupape de surpression intégrée empêche une surpression dangereuse si le taux d'évaporation du LN<sub>2</sub> dépasse la capacité de ventilation. Un capteur d'appauvrissement en oxygène génère des alertes visuelles (LED ambrée) et sonores (buzzer 85 dB) si la concentration ambiante en oxygène descend en dessous de 19,5 %.

L'exigence de ventilation de la pièce est un minimum de 10 renouvellements d'air par heure (ACH) -- une norme qui dépasse la ventilation de la plupart des espaces résidentiels mais est facilement réalisable avec une installation CVC dédiée.

Ces exigences sont significatives. Elles représentent un changement fondamental dans ce que signifie posséder un câble audio. L'interconnexion SC n'est pas un produit que l'on branche et que l'on oublie. C'est une infrastructure -- une infrastructure vivante qui nécessite surveillance, entretien et une relation avec un fournisseur d'azote liquide. Pour l'auditeur qui exige zéro résistance, c'est le prix à payer.

### 5. CONCLUSION

L'interconnexion SC atteint ce qu'aucun conducteur conventionnel ne peut : zéro résistance DC, zéro bruit thermique et immunité magnétique absolue via l'effet Meissner. La charge d'ingénierie et d'exploitation -- refroidissement cryogénique, isolation sous vide, logistique du LN<sub>2</sub>, -- est substantielle mais gérable pour les auditeurs dévoués. Nous croyons que cela représente le point final logique de l'optimisation des conducteurs : quand vous avez éliminé toute résistance, il ne reste rien à améliorer.

### RÉFÉRENCES

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Müller, "Possible high-T<sub>c</sub> superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," Z. Phys. B, vol. 64, pp. 189-193, 1986.
- [2] M. K. Wu et al., "Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O system," Phys. Rev. Lett., vol. 58, pp. 908-910, 1987.
- [3] SuperPower Inc., "Spécifications du conducteur recouvert YBCO SCS4050-AP," Rév. 12, 2023.
- [4] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit," Naturwissenschaften, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [5] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "Theory of superconductivity," Phys. Rev., vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [6] ASME BPVC Section VIII, Division 1 : Règles de construction des appareils à pression (service cryogénique).