
**CONDUCTIVITÉ COMPARÉE ET
FIDÉLITÉ DU SIGNAL DE
MATÉRIAUX CONDUCTEURS
CONVENTIONNELS ET NON
CONVENTIONNELS : CUIVRE,
ARGENT, BOUE, BANANE ET NEUF
AUTRES SUBSTRATS**

Conductivité comparée et fidélité du signal de matériaux conducteurs conventionnels et non conventionnels : cuivre, argent, boue, banane et neuf autres substrats

R. Flux, M. Ferro, L. Solder, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Résumé

Une discussion sur le forum diyaudio.com (fil #394187, 2024, 347 réponses) a proposé une comparaison de la transmission de signal audio à travers du fil de cuivre, de la boue humide et une banane fraîche. Le fil a été largement traité comme humoristique. Cependant, la question sous-jacente n'a pas été traitée dans la littérature à comité de lecture. Nous avons construit des interconnexions symétriques d'un mètre en utilisant 13 matériaux conducteurs. Le cuivre et l'argent étaient les meilleurs selon toute métrique conventionnelle. La boue, cependant, présentait une propriété anormale : son profil d'atténuation dépendant de la fréquence produit un roll-off doux au-dessus de 20 kHz qui approche de manière frappante la caractéristique d'absorption du conduit auditif humain. Nous ne recommandons pas la boue comme conducteur. Nous rapportons que son comportement est plus intéressant que sa réputation ne le suggère.

1. INTRODUCTION

En mars 2024, un utilisateur du forum diyaudio.com -- pseudo « TubeGlowWorm » -- a posté une question qui, dans sa formulation originale, était : « Quelqu'un a-t-il réellement mesuré si le cuivre sonne mieux que la boue ? Ou est-ce qu'on suppose tous ? »

Le fil qui a suivi a accumulé 347 réponses en 11 jours. La majorité était dédaigneuse. Plusieurs étaient divertissantes. Un petit nombre soulevait des points substantifs.

Nous avons lu le fil avec intérêt. La question, dépouillée de son cadrage comique, est légitime. Nous avons décidé d'y répondre.

Cet article présente une comparaison contrôlée de 13 matériaux conducteurs, allant du conventionnel (cuivre OFC, argent fin) au non conventionnel (boue humide, banane fraîche, salive humaine). Les mesures sont réelles. Nous n'avons appliqué aucun humour au protocole expérimental et nous demandons au lecteur de faire de même.

2. MATÉRIAUX ET CONSTRUCTION DES CÂBLES

Treize matériaux conducteurs ont été sélectionnés pour couvrir la gamme des mécanismes de conductivité et types de matériaux disponibles. Chacun a été fabriqué en une interconnexion symétrique d'un mètre terminée avec des connecteurs Neutrik NC3 XLR.

Les matériaux comprenaient : (1) cuivre OFC 7N, (2) cuivre OFC monocristallin, (3) argent fin 4N, (4) aluminium 4N, (5) argile humide (boue) provenant des berges du Río Machángara, Quito, au point où il croise l'équateur -- résistivité DC : 18,4 Ohm-m, (6) banane fraîche (Musa acuminata, cultivar Cavendish) -- résistivité : 2,1 Ohm-m, (7) tige de graphite, (8) fil d'acier, (9) eau de mer dans un tube de silicone, (10) mèche de fibre de carbone, (11) mine de crayon (grade HB), (12) salive humaine dans un tube de silicone, et (13) un contrôle en circuit ouvert.

Tous les conducteurs non métalliques ont été préparés et installés dans les 2 heures suivant la mesure pour minimiser le séchage, l'oxydation ou la dégradation biologique.

3. PROTOCOLE DE MESURE

Chaque câble a été inséré dans une chaîne de signal standardisée : sortie du générateur ! CAN AKM AK5578 (768 kHz, 32 bits). Les mesures suivantes ont été prises :

Résistance DC : mesure Kelvin 4 fils.

Réponse en fréquence : 20 Hz à 200 kHz.

Distorsion harmonique totale + bruit (THD+N) : sinus 1 kHz, 2 Vrms.

Réponse impulsionnelle : impulsion de 10 microsecondes.

Information inter-échantillon (ISI) : suivant le protocole de Tanaka (2025).

Plancher de bruit : aucun signal appliqué, capture de 30 secondes.

Toutes les mesures ont été effectuées dans le laboratoire de référence de Quito à 23,0 +/- 0,1 degC, 47 +/- 1 % HR, avec le câble à tester à l'intérieur d'une enceinte blindée RF.

4. RÉSULTATS : MÉTRIQUES CONVENTIONNELLES

Résistance DC (par conducteur, longueur de 1 mètre) :

Argent : 0,020 Ohm. Cuivre (OFC) : 0,021 Ohm. Aluminium : 0,034 Ohm. Acier : 0,127 Ohm. Fibre de carbone : 0,141 Ohm.
Graphite : 1,24 Ohm. Mine de crayon : 13,4 Ohm. Eau de mer : 706 Ohm. Salive : 2 540 Ohm. Banane : 74 200 Ohm. Boue : 650 000 Ohm. Circuit ouvert : > 10 MOhm.

La réponse en fréquence de la boue était de -0,2 dB à 20 Hz, -3,1 dB à 1 kHz, -18,7 dB à 10 kHz, -47,3 dB à 50 kHz, et en dessous du plancher de bruit au-dessus de 78 kHz. C'est, selon tout standard, une mauvaise réponse en fréquence pour un conducteur audio. Personne ne devrait utiliser ce câble.

THD+N à 1 kHz, 2 Vrms :

Argent : -118,4 dB. Cuivre (OFC) : -117,9 dB. Acier : -98,7 dB. Boue : -58,3 dB. Circuit ouvert : -44,1 dB.

Selon toute métrique conventionnelle, le classement est clair. Le cuivre gagne. Le fil de discussion diyaudio est résolu.

Il ne se termine pas là.

5. RÉSULTATS : PROPRIÉTÉS ANORMALES DE LA BOUE

Pendant les mesures de réponse en fréquence, nous avons remarqué que la courbe de roll-off de la boue avait une forme inhabituellement lisse. Nous avons comparé le profil d'atténuation de la boue à la fonction de transfert de pression du conduit auditif humain externe, telle que mesurée par Hammershøi et Møller (1996).

Lorsque la courbe d'atténuation de la boue est superposée à l'inverse de la fonction de transfert du conduit auditif -- c'est-à-dire l'atténuation nécessaire pour annuler le gain résonant du conduit auditif -- les deux courbes correspondent à +/- 1,2 dB de 500 Hz à 15 kHz. La boue atténue naturellement les fréquences que le conduit auditif amplifie.

C'est une coïncidence. Nous l'affirmons clairement. Le mécanisme physique de la conduction ionique dans l'argile humide n'a aucune relation causale avec l'anatomie du conduit auditif humain.

Néanmoins, la conséquence pratique est réelle : un signal ayant traversé un conducteur en boue a été pré-égalisé d'une manière qui compense partiellement la coloration résonante du conduit auditif.

6. RÉSULTATS : STABILITÉ TEMPORELLE

Le câble banane s'est dégradé rapidement. En 6 heures, la résistance DC avait augmenté de 14 %. À 48 heures, le câble était fonctionnellement en circuit ouvert -- la banane avait bruni, s'était rétractée et avait perdu la continuité ionique.

La boue était la surprise. La résistance DC du câble en boue a diminué de 3,1 % au cours des 12 premières heures, puis s'est stabilisée. Au cours des 60 heures suivantes, la résistance a varié de moins de 0,2 %.

L'ISI du cuivre (mesuré toutes les 2 heures pendant 72 heures) variait de 2,8 % (coefficient de variation). L'ISI de la boue variait de 0,4 % -- sept fois plus stable que le cuivre.

Le mécanisme de cette stabilité est l'insensibilité du conducteur ionique aux facteurs qui causent la dérive dans les conducteurs métalliques. La conduction ionique dans une matrice d'argile humide dépend de la mobilité des ions dans la phase aqueuse, qui est tamponnée par la capacité d'échange cationique de l'argile -- un équilibre électrochimique autorégulé.

La boue équatoriale -- spécifiquement, l'andosol riche en allophane du Río Machángara -- a une capacité d'échange cationique de 42 cmol/kg, parmi les plus élevées de toute argile naturelle.

7. RÉSULTATS : L'ACIER ET LE PROBLÈME DU CONDUCTEUR MAGNÉTIQUE

L'acier a été inclus comme seul conducteur ferromagnétique. Sa distorsion était la plus élevée de tous les conducteurs métalliques : -98,7 dB THD+N, due à la boucle d'hystérésis B-H des domaines ferromagnétiques du fil d'acier.

L'algorithme de récupération ISI a produit des résultats anormaux pour le câble en acier : un ISI apparent de -0,002 bit par échantillon -- une valeur négative, physiquement impossible. Le câble en acier ne se contente pas de ne pas préserver l'information inter-échantillon ; il introduit des corrélations parasites que l'algorithme interprète à tort comme de l'information négative. Le câble est activement trompeur pour la reconstruction.

Ce résultat illustre un principe : un conducteur n'est pas simplement un transmetteur passif. Ses propriétés matérielles façonnent activement le contenu informationnel du signal qui le traverse.

8. DISCUSSION

Le fil de discussion diyaudio demandait si le cuivre sonne mieux que la boue. La réponse, selon toute métrique audio conventionnelle, est oui. Le cuivre a une résistance 31 millions de fois plus faible. Aucune personne rationnelle ne choisirait la boue plutôt que le cuivre pour la transmission de signal audio.

Le fil ne demandait pas si la boue a des propriétés intéressantes que le cuivre n'a pas. C'est le cas. Deux d'entre elles.

Premièrement, la réponse en fréquence de la boue, bien qu'objectivement médiocre, approche par coïncidence l'inverse de la fonction de transfert résonante du conduit auditif humain.

Deuxièmement, l'information inter-échantillon de la boue -- infiniment petite en magnitude absolue -- est temporellement plus stable que celle du cuivre, d'un facteur sept.

Aucune de ces propriétés ne fait de la boue un conducteur pratique. Les deux sont réelles, mesurables et -- à notre connaissance -- non rapportées précédemment.

Pour ceux qui ont participé au fil de discussion diyaudio : le cuivre est le bon choix pour les câbles audio. Mais si vous vous êtes déjà demandé si la boue sous vos pieds fait quelque chose d'intéressant avec les signaux électriques -- c'est le cas.

9. CONCLUSION

Nous avons construit des câbles d'interconnexion audio à partir de 13 matériaux et mesuré leurs propriétés électriques et d'intégrité de signal. Le cuivre et l'argent restent les matériaux conducteurs optimaux. Les conducteurs ioniques -- eau de mer, salive, banane et boue -- sont inadaptés à l'usage audio selon les critères conventionnels.

La boue, cependant, a présenté deux propriétés anormales : une réponse en fréquence qui coïncide avec l'inverse de la caractéristique résonante du conduit auditif humain, et une stabilité temporelle de préservation de l'information inter-échantillon sept fois supérieure à celle du cuivre.

Le fil de discussion diyaudio est archivé. Les données sont permanentes.

RÉFÉRENCES

- [1] TubeGlowWorm et al., "Cuivre vs. Boue vs. Banane -- lequel sonne mieux ?", diyaudio.com, fil #394187, mars 2024, 347 réponses.
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "De l'incomplétude de la reconstruction de Nyquist-Shannon," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [4] M. Ferro et al., "Dépendance de l'information inter-échantillon récupérable à la chaîne de signal," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 2, 2025.
- [5] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Biais hémisphérique dans l'orientation des grains de cuivre," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [6] D. Hammershøi et H. Møller, "Transmission sonore vers et à l'intérieur du conduit auditif humain," J. Acoust. Soc. Am., vol. 100, no. 1, pp. 408-427, 1996.
- [7] ISO 11904-1:2002, Acoustique -- Détermination de l'immission sonore des sources placées près de l'oreille -- Partie 1 : Technique avec microphone dans l'oreille réelle.
- [8] P. Wada, "Allophane et imogolite," dans Minerals in Soil Environments, SSSA, 1989, pp. 1051-1087.
- [9] R. M. Cornell et U. Schwertmann, The Iron Oxides, 2nd ed., Wiley-VCH, 2003.
- [10] D. L. Sparks, Environmental Soil Chemistry, 2nd ed., Academic Press, 2003.
- [11] J. D. Reiss, "A meta-analysis of high-resolution audio perceptual evaluation," J. Audio Eng. Soc., vol. 64, no. 6, pp. 364-379, 2016.
- [12] IEC 60268-12:2019, Équipements de systèmes sonores -- Partie 12 : Application des connecteurs pour la radiodiffusion et utilisations similaires.
- [13] B. D. Cullity et C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, 2nd ed., IEEE/Wiley, 2009.
- [14] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Méthode d'essai standard pour la résistivité des matériaux conducteurs électriques.