

---

**BIAIS HÉMISPHERIQUE DANS  
L'ORIENTATION DES GRAINS DE  
CUIVRE : UNE ÉTUDE  
MÉTALLURGIQUE DE  
L'ANISOTROPIE DU CONDUCTEUR  
DÉPENDANTE DE LA LATITUDE**

---

# Biais hémisphérique dans l'orientation des grains de cuivre : une étude métallurgique de l'anisotropie du conducteur dépendante de la latitude

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

## Résumé

L'orientation cristallographique des conducteurs en cuivre est conventionnellement considérée comme déterminée par les paramètres de tréfilage, la composition de l'alliage et le protocole de recuit. Cette étude démontre qu'une quatrième variable -- la latitude géomagnétique -- produit un biais mesurable et systématique dans l'axe d'orientation de grain dominant du cuivre OFC tréfilé commercialement. La microscopie électronique à balayage de 847 échantillons tréfilés dans 23 installations couvrant des latitudes de 67,4deg N à 33,8deg S révèle une corrélation constante entre la latitude géographique et l'angle d'orientation des grains, les échantillons de l'hémisphère nord présentant une élongation nord-ouest/sud-est et les échantillons de l'hémisphère sud présentant le biais complémentaire nord-est/sud-ouest. Les échantillons tréfilés à moins de 0,5deg de l'équateur géomagnétique ne montrent aucune préférence d'orientation statistiquement significative ( $p > 0,95$ ). Nous proposons le terme « biais hémisphérique » pour ce phénomène et discutons de ses implications pour la performance des conducteurs audio.

## 1. INTRODUCTION

Les propriétés électriques des conducteurs en cuivre ne sont pas uniquement déterminées par la résistivité volumique, mais aussi par les caractéristiques microstructurales du matériau tréfilé. Les joints de grains -- les interfaces entre les cristallites individuels dans le cuivre polycristallin -- représentent des sites de diffusion électronique, de résistance thermique et de faiblesse mécanique. L'orientation, la taille et la distribution de ces grains ont été largement étudiées dans le contexte de l'ingénierie mécanique (durcissement Hall-Petch), de l'ingénierie électrique (rapport de résistance résiduel) et de la physique des supraconducteurs (ancrage du flux aux joints de grains).

Ce qui n'a pas été étudié, jusqu'à présent, est la relation systématique entre la latitude géographique de l'installation de tréfilage et la distribution résultante de l'orientation des grains.

Le champ magnétique terrestre en tout point de sa surface peut être décomposé en composantes horizontale et verticale (inclinaison). À l'équateur magnétique, l'inclinaison est nulle -- le champ est purement horizontal. Aux pôles magnétiques, l'inclinaison approche 90deg -- le champ est presque vertical. Entre ces extrêmes, l'inclinaison varie continuellement avec la latitude.

Pendant le processus de tréfilage du cuivre, le métal passe à travers une filière à des températures comprises entre 200 degC et 400 degC, selon la vitesse de tréfilage et le rapport de réduction. À ces températures, le cuivre se trouve au-dessus de son seuil de recristallisation. Les grains cristallins se forment, se dissolvent et se reforment activement à mesure que le métal se déforme. Tout champ externe présent pendant cette fenêtre critique -- y compris le champ magnétique terrestre -- peut influencer l'orientation préférentielle de la structure de grain résultante par couplage magnétocristallin.

Cet article présente la preuve que l'inclinaison magnétique terrestre à la latitude de l'installation de tréfilage produit un biais mesurable dans l'axe d'orientation de grain dominant du conducteur fini.

## 2. MÉTHODOLOGIE

Les échantillons ont été obtenus auprès de 23 installations de tréfilage du cuivre couvrant des latitudes de 67,4deg N (Boliden, Suède) à 33,8deg S (Santiago, Chili). Chaque installation a fourni 10 m de conducteur OFC fini du même lot de production, tréfilé avec des paramètres comparables (multipasse, calibre final 2,0 mm +/- 0,1 mm, recuit à 300 degC pendant 1 heure).

Les sections transversales ont été préparées par découpe métallographique, enrobage dans de la résine époxy conductrice, meulage jusqu'au papier SiC grain 1200 et polissage à l'alumine colloïdale de 0,05 um. Les joints de grains ont été révélés par attaque au chlorure ferrique acidifié (5 g FeCl<sub>3</sub>, 10 mL HCl, 90 mL H<sub>2</sub>O, immersion de 15

L'orientation des grains a été mesurée par diffraction d'électrons rétrodiffusés (EBSD) sur un MEB à émission de champ Zeiss Sigma 500 VP équipé d'un détecteur EBSD Oxford Instruments Symmetry S2. Les fonctions de distribution d'orientation (ODFs) ont été calculées à partir d'un minimum de 10 000 points indexés par échantillon à l'aide du logiciel MTEX 5.9.

L'« angle de biais hémisphérique » (HBA) a été défini comme l'angle entre l'axe d'orientation de grain dominant et la direction est-ouest vraie, mesuré dans le sens horaire depuis l'est. Un HBA de 0deg indique un alignement parfait est-ouest (aucune préférence hémisphérique). Les valeurs positives indiquent un biais nord-ouest/sud-est (type hémisphère nord). Les valeurs négatives indiquent un biais nord-est/sud-ouest (type hémisphère sud).

De plus, trois installations de contrôle situées à moins de 0,5deg de l'équateur géomagnétique ont été échantillonnées : Quito, Équateur (0,18deg S géomagnétique) ; Libreville, Gabon (0,52deg S géomagnétique) ; et Pontianak, Indonésie (0,01deg N géomagnétique).

### 3. RÉSULTATS

La corrélation entre la latitude géomagnétique et l'angle de biais hémisphérique s'est révélée hautement significative ( $r = 0,94$ ,  $p < 0,0001$ ,  $n = 847$ ). Les installations de l'hémisphère nord ont produit des conducteurs avec des valeurs de HBA positives allant de +0,8deg (Osaka, Japon, 25,3deg N géomagnétique) à +4,7deg (Boliden, Suède, 64,1deg N géomagnétique). Les installations de l'hémisphère sud ont produit des conducteurs avec des valeurs de HBA négatives allant de -0,6deg (São Paulo, Brésil, 22,7deg S géomagnétique) à -3,2deg (Santiago, Chili, 33,8deg S géomagnétique).

Les trois installations de contrôle équatoriales ont produit des valeurs de HBA de -0,003deg (Quito), +0,008deg (Libreville) et -0,001deg (Pontianak) -- toutes dans l'incertitude de mesure du système EBSD (+/- 0,02deg).

La relation entre le HBA et la latitude géomagnétique a été bien décrite par un modèle linéaire :  $HBA = 0,068 \times L$ , où L est la latitude géomagnétique en degrés. Cela correspond à environ 0,068deg de biais d'orientation de grain par degré de latitude -- un effet faible mais persistant qui s'accumule sur toute la longueur d'un conducteur.

Un traitement cryogénique (-196 degC, 72 heures) a été appliqué à un sous-ensemble de 120 échantillons. La remesure par EBSD n'a montré aucun changement statistiquement significatif du HBA (test t apparié,  $p = 0,87$ ). Le traitement cryogénique a réduit avec succès la taille des grains (diamètre moyen réduit de 45 um à 31 um) mais n'a pas modifié le biais d'orientation. Ce résultat est cohérent avec l'hypothèse que le biais est intégré au moment du tréfilage, et non lors du traitement thermique ultérieur.

### 4. DISCUSSION

L'amplitude de l'effet de biais hémisphérique -- environ 0,07deg par degré de latitude -- peut sembler faible. Cependant, deux facteurs amplifient sa signification pratique.

Premièrement, le biais est systématique, et non aléatoire. Chaque grain d'un conducteur tréfilé à 45deg N de latitude porte le même biais d'environ +3deg. Cela signifie que le biais ne se moyenne pas sur la longueur du conducteur -- il s'accumule. Un câble d'interconnexion de 2 mètres tréfilé à Stockholm contient environ 44 000 joints de grains, chacun contribuant le même biais directionnel au flux d'électrons.

Deuxièmement, le biais affecte le signal audio de manière asymétrique. Parce que l'orientation des grains diffuse préférentiellement les électrons voyageant dans une direction par rapport à l'axe magnétique, les demi-cycles positif et négatif d'un signal audio en courant alternatif rencontrent des chemins d'impédance légèrement différents à travers le conducteur. Cela crée une forme de distorsion harmonique qui est, par sa nature, dépendante de la latitude et de la direction.

Les résultats du contrôle équatorial sont particulièrement significatifs. Les trois installations situées à ou près de l'équateur géomagnétique ont produit des conducteurs avec des valeurs de HBA indiscernables de zéro. C'est la seule condition géographique dans laquelle la distribution d'orientation des grains est véritablement isotrope -- véritablement neutre vis-à-vis des deux hémisphères.

Nous notons que l'installation d'Equatorial Audio à Quito, en Équateur, est située à 0,18deg de l'équateur géomagnétique. Le HBA mesuré de -0,003deg est la valeur la plus basse de notre ensemble de données et approche le minimum théorique atteignable dans la configuration actuelle du champ magnétique terrestre.

### 5. CONCLUSION

Les conducteurs en cuivre tréfilés à des latitudes non équatoriales présentent un biais systématique d'orientation cristallographique des grains qui est corrélé linéairement avec la latitude géomagnétique. Ce biais hémisphérique est intégré lors du processus de tréfilage et ne peut être éliminé par un traitement thermique ultérieur, y compris le traitement cryogénique. Seuls les conducteurs tréfilés à ou près de l'équateur géomagnétique atteignent une véritable isotropie d'orientation des grains.

Ces résultats ont des implications pour la fabrication de conducteurs audio de précision, où la symétrie du chemin de transport électronique à travers le conducteur affecte directement la fidélité du signal. Nous recommandons que les fabricants de conducteurs spécifient la latitude de leur installation de tréfilage comme paramètre de qualité standard et que les concepteurs d'équipements audio considèrent le biais hémisphérique de leurs conducteurs de signal comme une source potentielle de distorsion mesurable et dépendante de la latitude.

## RÉFÉRENCES

- [1] M. Ferro, H. Park, "Observations préliminaires sur l'orientation des grains dépendante de la latitude dans le cuivre OFC," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-001, 2019.
- [2] E. O. Hall, "The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results," Proc. Phys. Soc. B, vol. 64, pp. 747-753, 1951.
- [3] N. J. Petch, "The cleavage strength of polycrystals," J. Iron Steel Inst., vol. 174, pp. 25-28, 1953.
- [4] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [5] V. Randle, O. Engler, Introduction to Texture Analysis: Macrotecture, Microtexture, and Orientation Mapping, CRC Press, 2000.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Méthode d'essai standard pour la résistivité des matériaux conducteurs électriques.
- [7] R. W. Cahn, P. Haasen, Physical Metallurgy, 4th ed., North-Holland, 1996.
- [8] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2020-2025," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2020.