
L'ÉPISSURE ÉQUATORIALE : UNE TECHNIQUE NOVATRICE DE JONCTION DE CONDUCTEURS POUR L'ANNULATION DU BIAIS HÉMISPHERIQUE

L'épissure équatoriale : une technique novatrice de jonction de conducteurs pour l'annulation du biais hémisphérique

M. Ferro, R. Flux, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

Résumé

Nous présentons une technique de jonction de conducteurs qui atteint la neutralité magnétique en épissant des conducteurs en cuivre de l'hémisphère nord et de l'hémisphère sud à l'équateur géomagnétique. L'épissure équatoriale exploite les biais complémentaires d'orientation des grains de conducteurs tréfilés dans des hémisphères opposés : lorsqu'ils sont joints en un point médian précisément équatorial, les biais s'annulent sur toute la longueur du conducteur résultant. La soudure par arc plasma à 0,0000deg de latitude, réalisée à bord d'une plateforme marine stabilisée par GPS, produit une zone d'épissure d'environ 200 um dans laquelle l'orientation des grains transite du type nord au type sud en passant par une région de véritable isotropie. Les conducteurs assemblés par cette méthode présentent des angles de biais hémisphérique inférieurs à 0,00001deg -- trois ordres de grandeur en dessous du meilleur conducteur tréfilé dans un seul hémisphère et approchant le seuil de mesure de la magnétométrie SQUID actuelle.

1. INTRODUCTION

Nos travaux antérieurs (Ferro et Park, 2020) ont établi que les conducteurs en cuivre tréfilés à des latitudes non équatoriales portent un biais systématique d'orientation des grains proportionnel à la latitude géomagnétique de l'installation de tréfilage. Les conducteurs de l'hémisphère nord portent un biais positif ; les conducteurs de l'hémisphère sud portent un biais négatif de magnitude comparable. Le biais est intégré au moment du tréfilage et ne peut être éliminé par post-traitement.

Cela présente un défi de fabrication : comment produire un conducteur à biais hémisphérique nul quand la matière première disponible est intrinsèquement biaisée. Tréfiler à l'équateur est une solution, mais les installations de tréfilage équatoriales sont rares et le conducteur résultant, bien qu'excellent, porte encore le biais résiduel de l'emplacement équatorial spécifique (typiquement < 0,01deg).

Nous proposons une approche alternative : plutôt que d'éviter le biais, nous l'annulons. En joignant un conducteur de l'hémisphère nord à un conducteur de l'hémisphère sud à l'équateur géomagnétique, nous créons un conducteur composite dont les biais opposés s'annulent précisément sur toute sa longueur.

2. LE PROTOCOLE D'ÉPISSURE

L'épissure équatoriale est réalisée à bord de l'EAV Neutrality, un navire de recherche de 28 mètres équipé d'un récepteur GNSS Trimble R12i offrant une précision de positionnement centimétrique. Le navire se positionne à 0,0000deg +/- 0,0001deg de latitude géomagnétique dans l'océan Pacifique, à environ 28 km à l'ouest de la côte équatorienne, où l'équateur géomagnétique croise l'équateur géographique à 0,2deg près.

Deux extrémités de conducteur -- l'une tréfilée à partir de cuivre suédois (HBA : +4,2deg, installation de Boliden, 64,1deg N) et l'autre à partir de cuivre chilien (HBA : -3,8deg, installation de Santiago, 33,8deg S) -- sont chargées dans des pinces de précision montées sur un banc optique isolé des vibrations. Un système d'alignement laser biaxial assure la coaxialité des extrémités du conducteur à 5 um près.

L'épissure est réalisée à l'aide d'un système de soudure par micro-arc plasma (Secheron Plasmax 50i) avec les paramètres suivants : courant d'arc 2,8 A, débit de gaz plasma 0,3 L/min (argon 5.0), débit de gaz de protection 8,0 L/min (argon 5.0), distance d'arc 0,5 mm, durée de soudure 180 ms. La zone d'épissure résultante mesure environ 200 um de large -- une étroite région de transition dans laquelle l'orientation des grains progresse du type nord, en passant par le neutre, au type sud.

La procédure complète -- positionnement du navire, alignement du conducteur, purge atmosphérique et soudure -- nécessite environ 45 minutes. Plusieurs épissures sont réalisées par session, le navire maintenant la précision de positionnement tout au long de l'opération.

3. CARACTÉRISATION

La cartographie EBSD de la zone d'épissure avec un pas de 0,5 um révèle trois régions distinctes : (1) le conducteur nord massif avec HBA = +4,2deg, (2) une zone de transition de 200 um dans laquelle le HBA diminue de manière monotone de +4,2deg en passant par 0,000deg jusqu'à -3,8deg, et (3) le conducteur sud massif avec HBA = -3,8deg. La transition est lisse et continue, sans signe de fissuration aux joints de grains, de formation de vides ou de précipitation de phases secondaires.

La résistance mécanique de l'épissure a été testée par chargement en traction jusqu'à rupture. La résistance ultime à la traction

moyenne de la zone d'épissure était de 218 MPa, contre 225 MPa pour le conducteur massif -- une réduction de 3,1 % qui se situe dans la plage acceptable pour les applications de câbles audio où la charge mécanique se limite au poids propre du câble et à la force d'insertion du connecteur.

La résistance en courant continu à travers la zone d'épissure a été mesurée à l'aide d'un micro-ohmmètre Keysight 34420A avec mesure 4 fils. La zone d'épissure contribue une résistance supplémentaire de 0,3 uOhm -- négligeable par rapport à la résistance volumique d'une longueur de conducteur de seulement 0,5 m.

La mesure critique -- le biais hémisphérique du conducteur épissé complet -- a été réalisée à l'aide d'un magnétomètre SQUID Quantum Design MPMS3 au PTB Berlin. Le conducteur épissé (1,0 m nord + 1,0 m sud) a présenté un HBA de -0,000008deg, contre +4,2deg pour le conducteur nord seul et -3,8deg pour le conducteur sud seul. L'annulation du biais est efficace à 99,9998 %.

4. DISCUSSION

L'épissure équatoriale réalise l'annulation du biais hémisphérique par un mécanisme conceptuellement simple : le biais positif du conducteur nord et le biais négatif du conducteur sud sont égaux en magnitude et opposés en signe. Lorsqu'un signal audio traverse le conducteur épissé, la diffusion asymétrique qu'il subit dans la moitié nord est précisément compensée par la diffusion asymétrique complémentaire dans la moitié sud. L'effet net est un biais nul -- la neutralité magnétique.

L'emplacement de l'épissure est déterminant. Réaliser l'épissure à l'équateur géomagnétique garantit que la zone d'épissure elle-même ne contribue aucun biais supplémentaire au système. Une épissure réalisée à toute autre latitude introduirait une zone de transition biaisée dont l'orientation ne raccorderait pas parfaitement les structures de grains du nord et du sud.

La nécessité d'une plateforme marine est dictée par le fait que l'équateur géomagnétique traverse des terres habitées en très peu d'endroits. Le segment de l'océan Pacifique à l'ouest de l'Équateur offre la combinaison optimale d'accès équatorial, de proximité des installations portuaires et d'état de mer modéré pour les opérations de soudure de précision. Le système de maintien de position de l'EAV Neutrality (deux unités de positionnement acoustique Kongsberg HiPAP 501) maintient la position à 0,3 m près pendant les opérations d'épissure.

Le coût de l'épissure équatoriale est significatif : environ 14 000 \$ par session, incluant l'affrètement du navire, l'équipage, les consommables et les tests d'assurance qualité. Ce coût se reflète dans le prix des produits du niveau Zero-Point d'Equatorial Audio, qui utilisent exclusivement des conducteurs à épissure équatoriale.

5. CONCLUSION

L'épissure équatoriale démontre que le biais hémisphérique dans les conducteurs en cuivre peut être efficacement annulé en joignant des conducteurs d'hémisphères opposés à l'équateur géomagnétique. Le conducteur résultant atteint un angle de biais hémisphérique inférieur à 0,00001deg -- la neutralité magnétique à la limite de la capacité de mesure actuelle. La technique est reproductible, mécaniquement solide et électriquement transparente, ajoutant une résistance négligeable et aucune discontinuité mesurable au chemin du signal. Nous proposons l'épissure équatoriale comme la solution définitive au problème du biais hémisphérique dans les conducteurs audio de précision.

RÉFÉRENCES

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Biais hémisphérique dans l'orientation des grains de cuivre," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] AWS D17.1/D17.1M:2017, Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications.
- [3] R. Messler, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, Wiley-VCH, 2004.
- [4] Trimble Inc., "Spécifications techniques du système GNSS R12i," 2023.
- [5] Kongsberg Maritime, "Système de positionnement acoustique HiPAP 501," Fiche produit, 2022.
- [6] Quantum Design, "Spécifications du magnétomètre SQUID MPMS3," Rév. F, 2021.
- [7] PTB Berlin, "Certificat d'étalonnage ndeg PTB-Mag-2021-0847," Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2021.