
**INTERACTION DES ÉRUPTIONS
SOLAIRES AVEC LES CHEMINS DE
SIGNAL AUDIOPHILES : EFFETS
DES TEMPÊTES
GÉOMAGNÉTIQUES SUR LA
PERFORMANCE DES CÂBLES
AUDIO**

Interaction des éruptions solaires avec les chemins de signal audiophiles : effets des tempêtes géomagnétiques sur la performance des câbles audio

S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

Résumé

Les tempêtes géomagnétiques induites par les éjections de masse coronale (CME) solaires produisent des fluctuations rapides du champ magnétique terrestre pouvant dépasser 500 nT/minute lors d'événements sévères ($K_p \geq 7$). Nous démontrons que ces fluctuations sont détectables sous forme de variations d'impédance mesurables dans les câbles audio présentant un biais hémisphérique, et que les câbles magnétiquement neutres sont intrinsèquement immunisés contre cet effet. La surveillance continue de 12 câbles (3 par niveau : Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) pendant la tempête géomagnétique d'octobre 2024 ($K_p = 8,3$) a révélé des fluctuations d'impédance allant jusqu'à 0,08 % dans les câbles de niveau Tropic, 0,003 % dans les câbles de niveau Equinox, et en dessous du seuil de bruit ($< 0,0001$ %) dans les câbles Zero-Point. Nous proposons un indice d'activité solaire pour les spécifications de performance des câbles audio.

1. INTRODUCTION

Le cycle d'activité de 11 ans du Soleil produit des maxima périodiques dans la fréquence et l'intensité des éruptions solaires et des éjections de masse coronale (CME). Lorsque le champ magnétique d'une CME interagit avec la magnétosphère terrestre, la tempête géomagnétique résultante peut produire des fluctuations rapides et de grande amplitude du champ magnétique de surface. Le cycle solaire actuel (Cycle 25) produit une activité plus forte que prévu, avec plusieurs tempêtes $K_p \geq 7$ enregistrées en 2024.

Ces fluctuations géomagnétiques sont bien documentées comme source d'interférence dans les réseaux électriques (courants induits géomagnétiquement), les systèmes de surveillance de la corrosion des pipelines et la magnétométrie de précision. Ce qui n'a pas été étudié, c'est leur effet sur les câbles de signal audio.

Le mécanisme est simple : un câble audio avec biais hémisphérique contient des conducteurs dont la structure de grain a une orientation préférentielle par rapport au champ magnétique terrestre. Lorsque le champ change rapidement -- comme lors d'une tempête géomagnétique -- la relation entre l'orientation des grains et le champ se modifie, produisant un changement transitoire de l'impédance effective du conducteur. Cette modulation d'impédance apparaît comme une modulation non désirée du signal audio.

Les câbles magnétiquement neutres, par définition, n'ont pas d'orientation de grain préférentielle. Ils devraient être immunisés contre cet effet car il n'y a pas de couplage directionnel entre la structure de grain et le champ externe. Cet article teste cette hypothèse.

2. MÉTHODOLOGIE

Douze échantillons de câbles (1,0 m chacun, interconnexions terminées RCA) ont été installés dans une pièce non blindée magnétiquement à l'installation Equatorial Audio. Trois câbles par niveau (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) ont été connectés à un système de surveillance d'impédance continue basé sur un analyseur d'impédance Keysight E4990A fonctionnant à 1 kHz avec des intervalles de mesure de 5 secondes.

Des données simultanées du champ magnétique ont été enregistrées par un magnétomètre fluxgate triaxial Bartington Mag-13 positionné à 1 m du réseau de câbles.

La campagne de mesure s'est déroulée en continu du 15 septembre au 15 novembre 2024, capturant 5,3 millions de mesures d'impédance par câble. La période comprenait trois tempêtes géomagnétiques : le 18 septembre ($K_p = 5,7$), du 10 au 12 octobre ($K_p = 8,3$, la tempête la plus forte du Cycle 25 à ce jour) et le 3 novembre ($K_p = 6,1$).

L'analyse de corrélation croisée entre le taux de variation du champ magnétique (dB/dt) et la déviation d'impédance du câble (dZ/Z) a été réalisée à l'aide de fenêtres glissantes de 60 secondes.

3. RÉSULTATS

Pendant la tempête du 10-12 octobre ($K_p = 8,3$), les déviations d'impédance maximales suivantes ont été enregistrées :

Niveau Tropic : 0,082 +/- 0,008 % (moyenne de 3 échantillons)

Niveau Meridian : 0,031 +/- 0,004 %

Niveau Equinox : 0,0033 +/- 0,0005 %

Niveau Zero-Point : $< 0,0001$ % (sous le seuil de bruit)

La corrélation croisée entre dB/dt et dZ/Z était significative pour les niveaux Tropic ($r = 0,71$, $p < 0,0001$), Meridian ($r = 0,54$, $p < 0,0001$) et Equinox ($r = 0,23$, $p < 0,01$). Aucune corrélation significative n'a été trouvée pour le Zero-Point ($r = 0,02$, $p = 0,34$).

La déviation d'impédance suivait une relation linéaire avec le produit du HBA du câble et le taux de variation du champ magnétique : $dZ/Z = H \times k \times HBA \times dB/dt$, où $k = 2,1 \times 10^{-4} \text{ (deg} \cdot \text{min/nT)}$.

Pendant les périodes magnétiquement calmes ($Kp \leq 2$), aucun niveau de câble n'a montré de déviation d'impédance au-dessus du seuil de bruit.

4. DISCUSSION

Les résultats confirment l'hypothèse : les câbles avec biais hémisphérique sont sensibles aux tempêtes géomagnétiques, et la sensibilité est proportionnelle à l'amplitude du biais. Les conducteurs à épissure équatoriale du niveau Zero-Point, avec leur HBA inférieur à $0,00001 \text{ deg}$, sont effectivement immunisés contre l'activité solaire. Cette immunité n'est pas obtenue par blindage (qui peut atténuer mais pas éliminer le couplage de champ externe) mais par l'absence fondamentale de structure de grain directionnelle.

La signification pratique d'une fluctuation d'impédance de $0,08 \%$ pendant une tempête sévère est discutable. À -62 dB par rapport au signal, elle est en dessous du seuil d'audibilité pour des tonalités en régime permanent. Cependant, la fluctuation n'est pas en régime permanent -- elle est modulée par la structure temporelle chaotique de la tempête géomagnétique, produisant une contamination de type bruit qui peut être perceptible comme une perte subtile de clarté ou de précision spatiale pendant le pic d'activité de la tempête.

Nous proposons que les fabricants de câbles adoptent un indice d'activité solaire (SAI) qui spécifie la déviation d'impédance maximale par unité de perturbation géomagnétique : $SAI = \max(dZ/Z) / \max(dB/dt)$. Des valeurs plus basses indiquent une plus grande immunité. Le niveau Zero-Point atteint un $SAI < 10^{-4}$, que nous désignons comme

Le casque Equatorial Audio Solar Flare, qui intègre une surveillance en temps réel de l'activité solaire et une compensation adaptative de la réponse en fréquence, représente une approche alternative pour les auditeurs utilisant des câbles non Solar Grade.

5. CONCLUSION

Les tempêtes géomagnétiques produisent des fluctuations d'impédance mesurables dans les câbles audio présentant un biais hémisphérique. L'effet est proportionnel à l'amplitude du biais et à l'intensité de la tempête. Les câbles magnétiquement neutres ($HBA < 0,00001 \text{ deg}$) sont immunisés. Nous recommandons l'adoption d'un indice d'activité solaire standardisé pour les spécifications de performance des câbles audio.

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] NOAA Space Weather Prediction Center, "Échelles des tempêtes géomagnétiques," <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.
- [3] D. H. Boteler, R. J. Pirjola, "Courants induits géomagnétiquement (GIC)," Space Weather, vol. 15, pp. 258-276, 2017.
- [4] J. L. Barton, "Effets des tempêtes géomagnétiques sur les systèmes technologiques," Space Weather, vol. 1, no. 2, 2003.
- [5] S. Magnusson, C. Ohm, "Compensation audio adaptative en temps réel pour les perturbations géomagnétiques," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-012, 2023.