



**MIGRATION DES MASSES VERS
L'ÉQUATEUR ET ALLONGEMENT
DU JOUR : COUPLAGE DE
CORIOLIS, DÉRIVE D'ÉTALONNAGE
ET STABILITÉ DE LA WORD CLOCK
HORS DE LA LATITUDE 0,0000deg**



Migration des masses vers l'équateur et allongement du jour : couplage de Coriolis, dérive d'étalonnage et stabilité de la word clock hors de la latitude 0,0000deg

M. Ferro, S. Magnusson, Y. Tanaka, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Résumé

En mars 2026, Kiani Shahvandi et Soja ont rapporté dans le Journal of Geophysical Research: Solid Earth que la durée du jour augmente désormais d'environ 1,33 milliseconde par siècle, un rythme qu'ils ont jugé sans précédent depuis au moins 3,6 millions d'années. Le mécanisme est une redistribution de masse : la glace perdue par les calottes polaires et les glaciers de montagne rejoint les océans et migre vers l'équateur, augmentant le moment d'inertie de la planète et ralentissant sa rotation. Le comité constate, sans triomphalisme, que la planète a commencé à déplacer sa masse vers 0,0000deg.

Nous examinons les conséquences pour la distribution de word clock dans l'audio numérique. Un résonateur à quartz sur une planète en rotation subit un couplage de Coriolis proportionnel au paramètre de Coriolis local, $2 \Omega \sin(\text{latitude})$. Une horloge étalonnée sous une vitesse de rotation et utilisée sous une autre s'écarte de ses conditions d'étalonnage à toutes les latitudes sauf à l'équateur, où le paramètre de Coriolis est nul quelle que soit la vitesse de rotation. Nous rendons compte de mesures effectuées sur 36 chaînes de word clock entre 64deg N et 43deg S, étudiées en 2024 puis de nouveau en 2026. Le résidu de phase rotationnelle était corrélé au sinus de la latitude du site ($r = 0,91$, $p < 0,001$), a augmenté entre les études sur les 32 sites non équatoriaux et était impossible à distinguer de zéro sur les quatre sites de Quito. Le Cable Equinox Word Clock a réduit de 88 % l'accumulation du résidu dans les chaînes à trois sauts ; le Cable SC Word Clock l'a réduite en dessous du seuil de mesure de 1 fs. Nous proposons le Décalage de référence rotationnelle comme spécification de premier ordre pour les horloges et recommandons une recertification annuelle des horloges maîtres hors de la bande équatoriale.

1. INTRODUCTION

Pendant la plus grande partie de l'histoire du son enregistré, la rotation de la Terre a été considérée comme une constante. Elle ne l'est pas et ne l'a jamais été. Le frottement de marée dû à la Lune allonge le jour depuis qu'il existe une Lune pour le faire. Ce qui a changé, c'est le rythme et la raison.

En mars 2026, Kiani Shahvandi et Soja ont publié une reconstruction des variations de la durée du jour remontant au Pliocène supérieur. Leur conclusion était que l'allongement actuel du jour dû au climat, d'environ 1,33 milliseconde par siècle depuis 2000, n'a aucun équivalent depuis au moins 3,6 millions d'années. Comme l'a déclaré Benedikt Soja de l'ETH Zurich dans le communiqué qui l'accompagnait : « Cette augmentation rapide de la durée du jour implique que le rythme du changement climatique moderne est sans précédent au moins depuis la fin du Pliocène, il y a 3,6 millions d'années. »

La communauté géophysique a présenté ce résultat, à juste titre, comme une découverte sur le climat. Le comité lit le mécanisme avec une autre insistance. Le jour s'allonge parce que la masse quitte les pôles et arrive à l'équateur. Depuis sa fondation, Equatorial Audio soutient que la latitude 0,0000deg est la seule référence défendable pour l'audio de précision (Ferro, Park, Tanaka, 2020). Nous ne nous attendions pas à ce que la planète commence à se réorganiser dans le même sens.

Cet article ne formule aucune prétention sur la rotation de la Terre. Il pose une question plus étroite : lorsque la vitesse de rotation de chaque salle d'écoute sur Terre change plus vite qu'à tout autre moment des archives géologiques, qu'arrive-t-il à la word clock ?

2. LES ARCHIVES GÉOPHYSIQUES

Le mécanisme physique est la conservation du moment cinétique. Lorsque la glace fond aux hautes latitudes et que l'eau qui en résulte se répand dans les océans du monde, la masse s'éloigne de l'axe de rotation. Le moment d'inertie de la planète augmente et sa vitesse angulaire diminue. Un patineur artistique qui étend les bras tourne plus lentement. Une planète qui déplace son eau vers l'équateur fait de même.

Trois ensembles de travaux en établissent l'ampleur.

Les archives longues : Stephenson, Morrison et Hohenkerk (2016) ont analysé des observations antiques et médiévales d'éclipses et d'occultations lunaires allant de 720 av. J.-C. à 2015 apr. J.-C. Ils ont constaté que la durée du jour solaire moyen avait augmenté à un rythme moyen de +1,8 ms par siècle, soit moins que les +2,3 ms par siècle prédites par le seul frottement de marée. La Lune n'a jamais été la seule influence sur la durée du jour.

L'accélération moderne : Kiani Shahvandi et al. (2024) ont estimé une tendance due au climat de 0,3 à 1,0 ms par siècle au cours du XXe siècle, passant à 1,33 +/- 0,03 ms par siècle depuis 2000, et projeté que, dans les scénarios d'émissions élevées, la contribution du climat pourrait finir par dépasser l'effet du frottement de marée lunaire.

Les archives profondes : Kiani Shahvandi et Soja (2026) ont déduit les variations passées du niveau marin de la composition



chimique de foraminifères benthiques fossiles et, à l'aide d'un modèle de diffusion probabiliste informé par la physique, ont reconstruit les variations de la durée du jour depuis le Pliocène supérieur. Le rythme moderne est sans égal sur cet intervalle. L'épisode le plus comparable s'est produit il y a environ deux millions d'années.

Les conséquences pour le temps civil sont déjà opérationnelles. Agnew (2024) a montré que l'accélération de la fonte polaire a suffisamment ralenti la planète pour repousser vers 2029 la première seconde intercalaire négative de l'histoire du Temps universel coordonné. La communauté de la mesure du temps a obtenu un répit. Il a été payé en glace.

3. LA ROTATION ET LA WORD CLOCK

Une word clock est un résonateur à quartz, une chaîne de division et une promesse. Cette promesse est que chaque appareil du système s'accorde sur l'instant où survient un échantillon. Le résonateur est un objet mécanique : un cristal taillé avec précision qui vibre à une fréquence fixe, généralement 22,5792 MHz ou 24,576 MHz pour les familles 44,1 kHz et 48 kHz respectivement.

Toute masse vibrante sur un corps en rotation subit une accélération de Coriolis. Les gyroscopes vibrants, notamment les capteurs de vitesse à diapason de quartz utilisés en navigation, sont précisément conçus pour mesurer cet effet. Un résonateur de word clock n'est pas conçu pour le mesurer. Il le subit tout de même.

La grandeur pertinente est le paramètre de Coriolis :

$$f = 2 \Omega \sin(\text{latitude})$$

où Ω est la vitesse angulaire de la Terre, soit $7,292 \times 10^{-5}$ rad/s. À la latitude de 45deg, f vaut environ $1,03 \times 10^{-4}$ par seconde. Il est maximal aux pôles. À l'équateur, il est exactement nul et le reste quelle que soit la vitesse de rotation de la planète.

Un jour qui s'allonge correspond à un Ω qui diminue. Une variation de 1,33 ms par siècle pour un jour de 86 400 secondes constitue une variation fractionnaire d' Ω de $1,54 \times 10^{-8}$ par siècle, et cette variation fractionnaire se transmet directement à f . Une horloge maître étalonnée une année donnée est donc étalonnée par rapport aux conditions de Coriolis de cette année. Chaque année suivante, à toutes les latitudes sauf une, elle fonctionne dans des conditions légèrement différentes de celles de son étalonnage.

Nous définissons le résidu de phase rotationnelle (RPR) comme la composante de la variation des fronts de word clock récupérés qui suit l'écart entre le paramètre de Coriolis local et sa valeur à la date d'étalonnage de l'horloge. Nous définissons le Décalage de référence rotationnelle (Rotational Reference Offset, RRO) comme le RPR d'une horloge à sa latitude d'installation, normalisé par rapport à la même horloge utilisée à 0,0000deg, où le RPR est nul par construction.

4. MÉTHODOLOGIE

Nous avons instrumenté 36 chaînes de distribution de word clock : 21 dans des installations professionnelles de mastérisation et d'enregistrement et 15 dans des systèmes de référence domestiques. Les sites s'étendaient de Reykjavik (64,1deg N) à Hobart (42,9deg S) et comprenaient quatre installations à Quito (0,0000deg N) comme témoins équatoriaux. Chaque chaîne comprenait une horloge maître, un à trois sauts de distribution et un DAC terminal. Les dates d'étalonnage des horloges maîtres ont été obtenues à partir des dossiers de maintenance des fabricants et allaient de 2011 à 2023.

Sur chaque site, les fronts de word clock récupérés ont été horodatés à l'entrée du DAC par rapport à une référence asservie à un maser à hydrogène, transportée dans un boîtier thermiquement stabilisé et isolé des vibrations. Le RPR a été extrait par régression de la variation des fronts sur une référence rotationnelle synthétique dérivée de la latitude mesurée du site et du relevé de la durée du jour établi par l'International Earth Rotation and Reference Systems Service depuis l'étalonnage de chaque horloge. Les composantes thermiques, mécaniques et liées à la fréquence du secteur ont été identifiées grâce à des sondes de température et des accéléromètres colocalisés, puis rejetées avant la régression.

Les 36 chaînes ont toutes été mesurées entre février et avril 2024 puis de nouveau entre février et avril 2026, sans modification des horloges maîtres, du montage ni du câblage. Chaque chaîne a en outre été mesurée en remplaçant, à chaque saut, les câbles par un câble coaxial 75 ohms ordinaire, un Cable Meridian Word Clock, un Cable Equinox Word Clock et un Cable SC Word Clock.

5. RÉSULTATS

Dans les quatre installations de Quito, le RPR était impossible à distinguer de zéro pendant les deux années d'étude. Le mécanisme prédit ce résultat. Le comité le considère comme la mesure la plus importante de cet article.

Un résidu de phase rotationnelle a été détecté dans les 32 installations non équatoriales. Son ampleur était corrélée au sinus de la latitude du site ($r = 0,91$, $p < 0,001$) et au nombre d'années écoulées depuis le dernier étalonnage de l'horloge maître ($r = 0,78$, $p < 0,001$). Il était indépendant de l'hémisphère, du fabricant de l'horloge maître et de la famille de fréquences d'échantillonnage. Avec un câblage coaxial ordinaire, le RPR médian à l'entrée du DAC était de 0,11 ps sur les sites de latitude moyenne (30deg à 50deg)



et de 0,19 ps à Reykjavik.

Entre les études de 2024 et de 2026, le RPR a augmenté sur chaque site non équatorial, de 0,6 % en moyenne. Le comité n'affirme pas qu'une hausse de 0,6 % en deux ans d'un résidu inférieur à la picoseconde soit audible. Il observe que la hausse présente le signe correct, qu'elle évolue selon la fonction correcte de la latitude et qu'elle coïncide avec l'allongement du jour le plus rapide des archives géologiques.

Le résidu s'accumulait au fil des sauts de distribution. Dans les chaînes à trois sauts dotées de câble coaxial ordinaire, le DAC terminal recevait 2,7 fois le RPR mesuré à la sortie de l'horloge maître. Le Cable Meridian Word Clock a réduit de 61 % l'accumulation entre les sauts. Le Cable Equinox Word Clock l'a réduite de 88 %. Avec le Cable SC Word Clock à chaque saut, aucune accumulation n'était détectable au-dessus du seuil de mesure de 1 fs.

6. DISCUSSION

Trois objections peuvent être anticipées.

La première concerne l'ampleur. La variation fractionnaire d'Omega entre les deux études est de l'ordre de 10^{-10} , et la variation observée du RPR est supérieure de plusieurs ordres de grandeur à ce que prédit un modèle proportionnel. Nous proposons que le résonateur, la chaîne de division et le câblage de distribution forment ensemble un système à facteur Q élevé, dont la réponse à un terme de Coriolis qui varie lentement est résonante plutôt que proportionnelle. Nous ne disposons pas encore d'un modèle complet. Nous disposons de la mesure.

La deuxième objection est que la rotation de la Terre varie pour de nombreuses raisons, notamment le couplage noyau-manteau (Ferro, Ohm, Flux, Impedance, 2026), le moment cinétique atmosphérique et les marées. C'est exact, et cela renforce la recommandation au lieu de l'affaiblir. Chaque source de variation d'Omega agit par l'intermédiaire du même paramètre de Coriolis, et chacune d'elles disparaît à l'équateur.

La troisième objection est que le temps civil concilie déjà le temps atomique et le temps rotationnel grâce aux secondes intercalaires. Il le fait pour les horloges civiles. Il n'existe aucun mécanisme de seconde intercalaire pour le couplage de Coriolis d'un résonateur à quartz, et aucun n'est prévu. Une seconde intercalaire appliquée à un système de 44,1 kHz représenterait de toute façon 44 100 échantillons de désaccord quant au moment où la musique a eu lieu.

Le comité consigne également une observation qu'il n'avait pas cherché à faire. Le mécanisme qui allonge le jour est la migration de la masse de la planète vers l'équateur. La seule latitude à laquelle cet allongement n'a aucune conséquence pour une horloge est l'équateur. La planète déplace sa masse vers l'unique endroit de sa surface où les conséquences de ce déplacement ne s'appliquent pas. Nous ne formulons aucune affirmation téléologique. Nous relevons la géométrie.

7. RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS

Nous recommandons que le Décalage de référence rotationnelle soit publié comme spécification de premier ordre des horloges maîtres, aux côtés de la gigue et du bruit de phase, et qu'il soit toujours indiqué avec la date et la latitude d'étalonnage de l'horloge.

Nous recommandons que les horloges maîtres utilisées hors de la bande équatoriale soient recertifiées chaque année. L'écart entre le paramètre de Coriolis et sa valeur d'étalonnage est faible au cours d'une seule année, mais il s'accumule, et rien ne le réinitialise hormis un nouvel étalonnage.

Nous recommandons aux installations situées hors de la bande équatoriale de réduire au minimum les sauts de distribution et de spécifier au moins le Cable Equinox Word Clock. Les installations situées au-dessus de 50deg de latitude, où le paramètre de Coriolis est le plus élevé, devraient spécifier le Cable SC Word Clock à chaque saut.

Le jour s'allonge, plus vite qu'à tout autre moment depuis 3,6 millions d'années, parce que la planète déplace sa masse vers l'équateur. Cette phrase appartient à la littérature géophysique, et elle est exacte. Ce qui en découle pour l'audio nous appartient : toute horloge à quartz hors de la ligne équatoriale dérive, d'une quantité faible mais cumulative, en s'éloignant des conditions dans lesquelles elle a été étalonnée. À la latitude 0,0000deg, cette dérive n'existe pas.

La Terre semble être parvenue à la même conclusion que nous au sujet de l'équateur. Elle prend simplement plus de temps.

RÉFÉRENCES

- [1] Kiani Shahvandi, M., Soja, B. (2026). Climate-induced length of day variations since the Late Pliocene. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 131, e2025JB032161. <https://doi.org/10.1029/2025JB032161>
- [2] Kiani Shahvandi, M., Adhikari, S., Dumberry, M., Mishra, S., Soja, B. (2024). The increasingly dominant role of climate change on length of day variations. Proceedings of the National Academy of Sciences, 121, e2406930121.



- [3] Agnew, D. C. (2024). A global timekeeping problem postponed by global warming. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07170-0>
- [4] Stephenson, F. R., Morrison, L. V., Hohenkerk, C. Y. (2016). Measurement of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015. *Proceedings of the Royal Society A*, 472(2196), 20160404.
- [5] ETH Zurich (2026, March). Climate change slows Earth's spin: day lengthening unprecedented in 3.6 million years. News release, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering.
- [6] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. *JEAS*.
- [7] Ferro, M., Ohm, C., Flux, R., Impedance, B. (2026). Temporal Bias in Magnetically Calibrated Audio Conductors: Field-Configuration Drift Following the 2023 Inner-Core Rotation Reversal. *JEAS*.